Clarivate™
科睿唯安™

全球工程前沿 2023

中国工程院全球工程前沿项目组　著

中国教育出版传媒集团
高等教育出版社

全球工程前沿
Engineering Fronts

目录

前言 1

第一章 研究方法 2
1 工程研究前沿遴选 3
1.1 论文数据获取与预处理 3
1.2 论文主题挖掘 3
1.3 研究前沿确定与解读 4
2 工程开发前沿遴选 4
2.1 专利数据获取与预处理 4
2.2 专利主题挖掘 5
2.3 开发前沿确定与解读 5
3 发展路线图 5
4 术语解释 5

第二章 领域报告 7
一、机械与运载工程 7
1 工程研究前沿 7
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 7
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 11
2 工程开发前沿 21
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 21
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 26

二、信息与电子工程 35
1 工程研究前沿 35
1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势 35
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 40
2 工程开发前沿 52
2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势 52
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 57

三、化工、冶金与材料工程 67
1 工程研究前沿 67
1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势 67
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 71
2 工程开发前沿 81
2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势 81
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 86

四、能源与矿业工程 94
1 工程研究前沿 94
1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势 94
1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读 99
2 工程开发前沿 111
2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势 111
2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读 117

全球工程前沿
Engineering Fronts

五、土木、水利与建筑工程 128
1 工程研究前沿 128
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 128
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 132
2 工程开发前沿 144
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 144
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 148

六、环境与轻纺工程 156
1 工程研究前沿 156
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 156
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 160
2 工程开发前沿 169
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 169
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 173

七、农业 181
1 工程研究前沿 181
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 181
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 185
2 工程开发前沿 196
2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势 196
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 200

八、医药卫生 209
1 工程研究前沿 209
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 209
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 214
2 工程开发前沿 223
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 223
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 227

九、工程管理 238
1 工程研究前沿 238
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 238
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 242
2 工程开发前沿 253
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 253
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 258

总体组成员 267

前　言

工程科技是改变世界的重要力量，工程前沿代表工程科技未来创新发展的重要方向。当今时代，世界之变、时代之变、历史之变正以前所未有的方式展开，新一轮科技革命和产业变革持续深入演进，人类社会面临前所未有的挑战。前瞻把握世界科技发展动向，准确识变、科学应变、主动求变，已成为各国的共同选择。

为研判工程科技前沿发展趋势，敏锐抓住科技革命新方向，中国工程院作为国家工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构，自 2017 年起开展全球工程前沿研究项目，每年研判并发布全球近百项工程研究前沿和工程开发前沿，以期发挥学术引领作用，积极引导工程科技和产业创新发展。

2023 年度全球工程前沿研究项目依托中国工程院 9 个学部及中国工程院《工程》系列期刊，联合科睿唯安开展研究工作。研究以数据分析为基础，以专家研判为核心，遵从定量分析与定性研究相结合、数据挖掘与专家论证相佐证、工程研究前沿与工程开发前沿并重的原则，凝练获得 93 个工程研究前沿和 94 个工程开发前沿，并重点解读 28 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。

为提高前沿研判的科学性，在前六年实践经验的基础上，2023 年度的研究工作继续在研究最初阶段完善技术体系，明确九大领域的技术边界和结构，梳理各分支技术之间的关联关系；继续在重点前沿解读过程中利用发展路线图工具，研判重点工程前沿未来 5~10 年的发展方向和趋势。

本报告是 2023 年度全球工程前沿项目研究成果，由两部分组成：第一部分为研究概况，主要说明研究采用的数据和研究方法；第二部分为领域报告，包括机械与运载工程，信息与电子工程，化工、冶金与材料工程，能源与矿业工程，土木、水利与建筑工程，环境与轻纺工程，农业，医药卫生和工程管理共 9 个领域分报告，分别描述与分析各领域工程研究前沿和工程开发前沿概况，并对重点前沿进行详细解读。

工程前沿研判是一项复杂且有挑战性的工作。七年来，项目研究聚焦全球工程科技发展的热点和难点，将前沿研究、学术论坛与期刊建设紧密结合，相互促进，逐步探索出一条别具特色的研究路径。工程前沿研究得到了来自我国工程科技界各领域、各机构近千位院士和专家的支持，在此向所有指导工程前沿研究的院士、参与工程前沿研究的专家表示感谢！

第一章　研究方法

工程是人类借助科学技术改造世界的实践活动。工程前沿指具有前瞻性、先导性和探索性，对工程科技未来发展有重大影响和引领作用的关键方向，是培育工程科技创新能力的重要指引。根据前沿所处的创新阶段，工程前沿可分为侧重理论探索的工程研究前沿和侧重实践应用的工程开发前沿。

2023 年度全球工程前沿研究采用专家与数据多轮交互、迭代遴选研判的方法，通过专家研判与数据分析深度融合，在 9 个领域共遴选出 93 个工程研究前沿和 94 个工程开发前沿，并重点解读 28 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。各领域前沿数量分布如表 1.1 所示。

工程前沿研究基本流程包括三步：数据对接、数据分析和专家研判。数据对接，主要是领域专家和图书情报专家依据各领域的技术体系，制定论文和专利数据检索式，明确数据挖掘的范围；数据分析，主要是通过共被引聚类形成文献聚类主题、共词聚类形成专利地图，获得前沿主题；专家研判，主要是通过前沿主题筛选、前沿名称修订、专家研讨等方法逐步筛选确定前沿。同时，为弥补因数据挖掘算法局限性或数据滞后所导致的前沿性不足，鼓励领域专家结合定量分析结果修正、归并、扩充前沿。研究实施流程如图 1.1 所示，

表 1.1　9 个领域前沿数量分布

领域	工程研究前沿 / 个	工程开发前沿 / 个
机械与运载工程	10	10
信息与电子工程	10	10
化工、冶金与材料工程	11	11
能源与矿业工程	12	12
土木、水利与建筑工程	10	10
环境与轻纺工程	10	10
农业	10	11
医药卫生	10	10
工程管理	10	10
合计	93	94

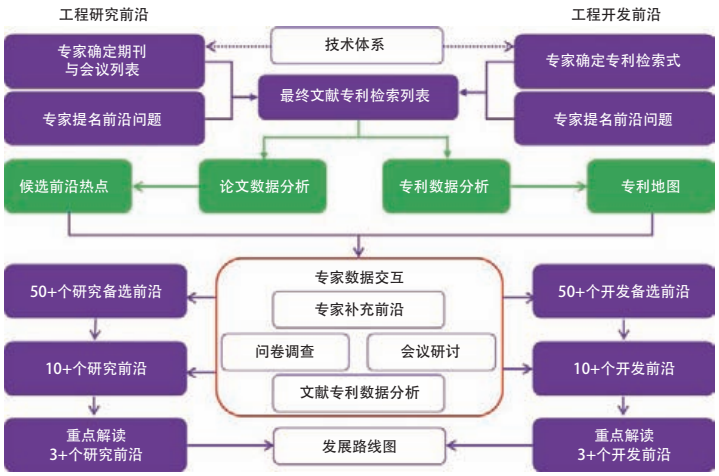

图 1.1　全球工程前沿研究流程

其中绿色部分以数据分析为主，紫色部分以专家研判为主，红色方框为专家与数据多轮深度交互的过程。

1　工程研究前沿遴选

工程研究前沿遴选包括两种途径：一是基于 Web of Science 数据库 SCI 期刊论文和会议论文数据，经数据挖掘聚类形成工程研究前沿主题；二是通过专家提名，提出工程研究前沿问题。以上结果经过专家研判论证、提炼得到备选工程研究前沿，再经过问卷调查和多轮专家研讨，遴选得出 9 个领域 93 个工程研究前沿。

1.1　论文数据获取与预处理

首先构建中国工程院 9 个学部领域技术体系与 Web of Science 学科的映射关系，获得每个领域对应的学术期刊和学术会议列表。经领域专家审核与修订后，确定本年度重点分析的 9 个领域共计 12 696 种学术期刊和 54 389 个学术会议。此外，针对 82 种综合性国际学术期刊，采用单篇文章归类的方法，即根据文章参考文献的主要归属学科来确定相关期刊中单篇文章的研究领域。

针对每个领域的期刊论文和会议论文，参照 Web of Science 高被引论文确定方法，综合考虑期刊论文和会议论文差别、出版年等因素，筛选出 2017—2022 年期间发表的被引频次位于前 10% 的高影响力论文（截至 2023 年 1 月），作为研究前沿分析的基础数据集。各领域数据源概况如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1　各领域数据源概况

序号	领域	期刊 / 种	会议 / 个	高影响力论文 / 篇
1	机械与运载工程	547	3 325	112 450
2	信息与电子工程	1 010	22 572	228 672
3	化工、冶金与材料工程	1 235	4 850	310 860
4	能源与矿业工程	946	2 893	160 920
5	土木、水利与建筑工程	406	1 428	104 330
6	环境与轻纺工程	1 371	1 645	245 146
7	农业	1 463	1 282	190 750
8	医药卫生	4 890	14 887	524 174
9	工程管理	828	1 507	60 673

1.2　论文主题挖掘

基于基础数据集，利用共被引方法对高影响力论文进行聚类分析，获得每个领域的前沿聚类主题，每个聚类主题由一定数量的核心论文组成。其中，2017—2020 年出版的期刊论文和会议论文，按照核心论文的数量、总被引频次、平均出版年、常被引论文占比依次筛选，每个领域获得 35 个不相似的文献聚类主题；2021—2022 年出版的期刊论文和会议论文，按照核心论文的数量、总被引频次、常被引论文占比依次筛选，每个领域获得 25 个不相似的文献聚类主题。以上聚类分析中，如果各领域聚类主题有交叉，则递补不交叉的聚类主题，对于没有聚类主题覆盖的学科，按照关键词进行定制检索和挖掘，最终筛选得到 9 个领域 756 个备选研究热点（包括相似和不相似主题），如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1　各领域文献聚类结果

序号	领域	聚类主题 / 个	核心论文 / 篇	备选研究热点 / 个
1	机械与运载工程	12 404	49 484	98
2	信息与电子工程	23 529	101 924	68
3	化工、冶金与材料工程	30 400	122 129	66
4	能源与矿业工程	17 173	71 528	89
5	土木、水利与建筑工程	11 051	46 128	129
6	环境与轻纺工程	25 575	101 630	89
7	农业	19 645	76 697	76
8	医药卫生	52 636	215 909	66
9	工程管理	6 137	23 325	75

1.3　研究前沿确定与解读

与论文数据处理挖掘同步，领域专家基于专业背景知识，并结合其他综合性科技情报信息，如科技动态、科技政策、新闻报道等进行分析判断，提出工程研究前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据对接阶段，图书情报专家将领域专家提出的研究前沿问题转化为检索式，作为初始数据源的重要组成部分；在数据分析阶段，针对没有文献聚类主题覆盖的学科，领域专家提供关键词、代表性论文或代表性期刊，用于定制检索和挖掘；在专家研判阶段，领域专家对照文献聚类结果进行查漏补缺，对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，图书情报专家提供数据支撑。最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程研究前沿素材进行归并、修订和提炼，而后经过问卷调查和多轮会议研讨，每个领域遴选出 10 余个工程研究前沿。

工程研究前沿确定后，各领域依据发展前景、受关注度选取 3（或 4）个重点研究前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

2　工程开发前沿遴选

工程开发前沿遴选同样包括两种途径：一是基于 Derwent Innovation 专利检索平台，对 9 个领域 53 个学科组中被引频次位于各学科组前 10 000 的高影响力专利家族进行文本聚类，获得 53 张专利地图，领域专家从专利地图中解读出备选工程开发前沿；二是通过专家提名，提出工程开发前沿问题。在这两种途径获得的备选开发前沿基础上，通过多轮专家研讨和问卷调查，最终遴选产生每个领域 10 余个工程开发前沿。

2.1　专利数据获取与预处理

在数据对接阶段，基于 Derwent Innovation 专利数据库，采用德温特世界专利索引（DWPI）手工代码、《国际专利分类表》（IPC 分类）、美国专利局分类体系（UC）等专利分类号和特定的技术关键词，初步构建 9 个领域 53 个学科组的专利数据检索范围及检索策略。领域专家对专利检索式删减、增补和完善，并提名备选前沿主题，图书情报专家将其转化为专利检索式。以上两部分检索式整合后确定 53 个学科组的专利

检索式，在 2017—2022 年“DWPI 和 DPCI（德温特专利引文索引）专利集合”中检索（专利引用时间截至 2023 年 1 月），进而获得相应学科的专利文献。最后对检索得到的百万量级专利文献根据“年均被引频次”和“技术覆盖宽度”指标进行筛选，综合评估得到每个学科前 10 000 个专利家族。

2.2 专利主题挖掘

在前面形成的专利家族数据基础上，针对 9 个领域 53 个学科组被引频次位于前 10 000 的高影响力专利家族，开展专利文本语义相似度分析，基于 DWPI 标题和 DWPI 摘要字段进行主题聚类，获得 53 张能快速直观呈现工程开发技术分布的 ThemeScape 专利地图，以关键词的形式展现所聚集专利的总体技术信息。

领域专家在图书情报专家的辅助下，从专利地图中提炼技术开发前沿、归并相似前沿、确定开发前沿名称，得到每个学科组的备选工程开发前沿。同时，为避免遗漏新兴的或交叉的前沿，领域专家重视专利地图中低频次、关联性较低的离群技术点的研判。

2.3 开发前沿确定与解读

在专利数据处理与挖掘的同时，领域专家基于专业背景知识并结合其他综合情报信息，如产业动态、科技政策、新闻报道等进行分析判断，提出开发前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据对接阶段，图书情报专家将领域专家提出的开发前沿问题转化为专利检索式，作为基础数据集的重要组成部分；在数据分析阶段，领域专家开展第二轮前沿提名，补充数据挖掘中淹没的专利量少、影响力尚未显现的新兴技术点；在专家研判阶段，领域专家研读高影响力专利，图书情报专家辅助领域专家从“高峰”“蓝海”和“孤岛”等多角度解读专利地图。最终，领域专家对专利地图解读结果与专家提名前沿进行归并、修订和提炼，得到备选工程开发前沿，而后通过问卷调查或多轮专题研讨，遴选出每个领域 10 余个工程开发前沿。

工程开发前沿确定后，各领域依据发展前景、受关注度选取 3（或 4）个重点开发前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

3 发展路线图

技术路线图是描绘技术未来发展趋势的重要工具。为强化工程前沿的学术引领作用，在本年度研究中，各领域深入分析重点工程研究前沿和重点工程开发前沿的发展方向、发展重点和发展趋势，以可视化的方式绘制该前沿未来 5~10 年的发展路线图。

4 术语解释

文献（论文）：包括 Web of Science 中经过同行评议的公开发布的研究性期刊论文、综述和会议论文。

高影响力论文：指被引频次在同出版年、同学科论文中排名前 10% 的论文。

文献聚类主题：对高影响力论文进行共被引聚类分析获得的一系列主题和关键词的组合。

核心论文：根据研究前沿的获取方式不同，核心论文有两种含义——如果是来自数据挖掘经专家修正的前沿，核心论文为高影响力论文；如果是来自专家提名的前沿，核心论文为按主题检索被引频次排前10% 的论文。

论文比例：某个国家或机构参与的核心论文数量占全部国家或机构产出核心论文数量的比例。

施引核心论文：指引用核心论文的文献。

被引频次：指某篇论文被 Web of Science 核心合集收录的所有论文引用的次数。

平均出版年：指对文献聚类主题中所有文献的出版年取平均数。

常被引论文：指引文速度排名前 10% 的论文。

引文速度：是一定时间内衡量累计被引频次增长速度的指标。在本研究中，每一篇文献的引文速度是从发表的月份开始，记录每个月的累计被引频次。

高影响力专利：每个学科依据 DPCI 年均被引频次排前 10 000 的 DWPI 专利家族。

核心专利：根据开发前沿的获取方式不同，核心专利有两种含义——如果是来自专利地图的前沿，核心专利指高影响力专利；如果是来自专家提名的前沿，核心专利指按主题检索的全部专利。

专利比例：某个国家（作为专利优先权国家）或机构参与的核心专利数量占全部国家或机构产出核心专利数量的比例。

ThemeScape 专利地图：基于 Derwent Innovation 中的 DWPI 增值专利信息，通过分析专利文献中的语义相似度，将相关技术的专利聚集在一起，并以地图形式可视化展现，是形象反映某一行业或技术领域整体面貌的主题全景图。

技术覆盖宽度：指每个 DWPI 专利家族覆盖的 DWPI 分类的数量。该指标可以体现专利的领域交叉广度。

中国工程院学部专业划分标准体系：按照《中国工程院院士增选学部专业划分标准（试行）》确定，包含机械与运载工程，信息与电子工程，化工、冶金与材料工程，能源与矿业工程，土木、水利与建筑工程，环境与轻纺工程，农业，医药卫生，工程管理，共 9 个学部 53 个专业学科。

第二章　领域报告

一、机械与运载工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

机械与运载工程领域 Top 10 工程研究热点涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 1.1.1）。其中，属于传统研究深化的有：低碳及零碳燃料发动机技术；柔性自供电可穿戴传感器；多材料 4D 打印；血管介入手术机器人系统；基于迁移学习的机械故障诊断；机器人铣削和磨抛。新兴前沿则包括：动态可重构移动微型机器人集群；对抗性环境自动驾驶智能性能测试；水下自主航行器无线充电系统。2017—2022 年，各前沿相关的核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）高超声速飞行器技术

高超声速飞行器是指飞行速度超过 5 倍声速的飞行器。相较于传统的亚声速、声速和超声速飞行器，高超声速飞行器具有飞行速度快、难以拦截、突防成功率高等特点，有着巨大的军事价值和潜在的经济价值。该类飞行器技术研究涉及高超声速空气动力学、计算流体力学、高温气体动力学、化学动力学、导航与控制、电子信息、材料结构、工艺制造等多学科的交叉融合。通过近半个世纪的发展，高超声速飞行器技术在导弹武器方面取得较大成就，但在运载器和可重复使用的飞行器方面技术进展相对不大。相关主要研究包括四个方面：一是宽速度域高升阻比、大装填率构型设计技术研究，主要是突破目前设计理论和技术产生的气动外形的升阻比不高、载荷容积率不大、装填率低的壁障；二是新型动力技术研究，超燃冲压发动机技

表 1.1.1　机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	高超声速飞行器技术	50	4 930	98.60	2018.7
2	低碳及零碳燃料发动机技术	47	4 429	94.23	2018.8
3	动态可重构移动微型机器人集群	11	870	79.09	2019.1
4	柔性自供电可穿戴传感器	30	2 218	73.93	2019.8
5	对抗性环境自动驾驶智能性能测试	11	337	30.64	2019.7
6	多材料 4D 打印	32	736	23.00	2020.4
7	水下自主航行器无线充电系统	13	337	25.92	2020.2
8	血管介入手术机器人系统	18	377	20.94	2020.3
9	基于迁移学习的机械故障诊断	12	328	27.33	2021.0
10	机器人铣削和磨抛	41	1 717	41.88	2019.9

表 1.1.2　机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	高超声速飞行器技术	13	13	9	9	4	2
2	低碳及零碳燃料发动机技术	5	19	7	12	3	1
3	动态可重构移动微型机器人集群	1	2	4	3	1	0
4	柔性自供电可穿戴传感器	2	4	8	4	9	3
5	对抗性环境自动驾驶智能性能测试	1	2	2	1	4	1
6	多材料 4D 打印	4	1	1	4	16	6
7	水下自主航行器无线充电系统	1	3	0	1	5	3
8	血管介入手术机器人系统	0	2	4	3	4	5
9	基于迁移学习的机械故障诊断	0	0	0	2	8	2
10	机器人铣削和磨抛	3	3	9	11	11	4

术虽然取得较大进展，但只能工作在较高速度范围，探索航空类型与冲压类发动机的组合动力技术是目前及未来的研究重点；三是耐高温防热复合材料及冷却技术研究，攻克在长时间服役过程中耐极高温度的新型材料体系及冷却热防护新方法；四是控制和制导系统研究，高超声速飞行器的极端飞行环境与作业状态对控制和导航系统提出了更高的要求。国内外研究分析表明，开展上述方向研究是研制高超声速运载器、重复使用高超声速飞机及天地往返飞行器的关键。

（2）低碳及零碳燃料发动机技术

低碳及零碳燃料发动机技术是指通过采用相对含碳量更低或者不含碳（零碳）的新型燃料部分或全部替代含碳量较高的传统汽油、柴油或其他燃料，进而从源头降低发动机单位功率输出的二氧化碳排放的碳减排技术，涉及动力工程及工程热物理、能源科学与技术、化学与化学工程、交通运输工程、材料科学与工程等多学科的交叉融合。相关研究主要包括不同类别低碳及零碳燃料的合成制备、安全车载储存及供给、新型高效清洁燃烧模式及控制、全生命周期碳排放分析优化等方向。目前获得广泛关注和较为深入研究的发动机低碳及零碳燃料包括天然气，通过生物质制取的甲醇、乙醇、二甲醚和生物柴油，通过可再生电力能源制取的氢气、氨气及电力合成液体燃料等。在技术层面上，发动机低碳及零碳燃料近年研发进展迅速，已有部分企业与研究院所开发包括零碳氢气和氨气发动机在内的工程及原理样机。未来将进一步研究相关燃料在发动机中高热效率、近零污染物排放的先进燃烧技术和尾气后处理新技术，同时随着可再生电力、生物燃料及绿氢绿氨高效低成本制备等相关技术的不断进步，最终实现低碳及零碳燃料发动机的规模化应用。

（3）动态可重构移动微型机器人集群

移动微型机器人集群是指在广域范围、复杂环境、复杂任务场景下，众多分散配置的具有局部感知、决策和行动能力的低成本同构 / 异构自主移动微型机器人个体根据任务目标，通过个体之间信息交互、合作、协调机制而自组织形成的拓扑稳定有序、个体协调协作、行为目标一致、功能相互补充的自主任务执行群体。动态可重构是指移动微型机器人集群可以根据任务目标、能力需求、任务执行状态和态势、环境事件、机器人个体能力的变化及其不确定性，动态地改变集群的个体组成、拓扑结构、协调关系以及个体任务负荷，从而快速响应集群和环境的变化。动态可重构移动微型机器人集群是多智能体系统自组织性、自适应性、智能涌现的生动映照和物理体现，不仅涉及个体智能，还涉及集群层面的群集体系结构、通信网络、

协调机制、信息融合、状态估计、任务分配、路径规划、编队控制、多智能体一致性等多层次、多方面的理论和技术，是多机器人系统协同控制技术发展的高级形式。传统的多机器人协同控制大多采用集中控制 – 全局协作模式，集群规模、协同效能和可扩展性难以提高。而动态可重构移动微型机器人集群无论是在机器人的规模，还是在任务、环境和分工协作的复杂度，以及对任务和环境事件的自适应性和鲁棒性等方面，都与传统的多机器人协同控制技术有着显著的区别，现有技术难以适应集群应用需求扩张的要求。自然界中的群集动物的群集行为为动态可重构移动微型机器人集群的发展提供了启发，探究群集动物的集群协同行为规律和建模方法，揭示其智能涌现的协同控制机理，并将其映射到动态可重构移动微型机器人集群中，构建面向多模态任务的分散自组织动态可重构的集群体系结构和复杂受限通信条件下基于局部信息传播的自组织、自愈合协作机制，攻克广域范围大规模集群分布协同任务动态分配、弱通信条件下大规模多源异构信息融合和分散化态势感知、考虑动力学特性的路径规划与重规划、包含运动不确定信息的编队动态控制、基于事件触发的多机器人一致性跟踪等关键技术，是动态可重构移动微型机器人集群研究的热点和前沿。

（4）柔性自供电可穿戴传感器

柔性自供电可穿戴传感器是指一种可以贴合于人体表面的传感器装置，能够收集和监测身体相关的生理参数或环境信息，并且具备自供电功能，无需外部电源，从而实现佩戴的舒适性和便捷性。该类型传感器通常采用柔性材料制造，如弯曲、拉伸、折叠等，能够适应人体的各种形状和运动。其关键特点是集成了能量收集技术，可以通过身体的运动或其他环境能量来源（如光、温差等）来供电，不需要使用传统的电池或电源。柔性自供电技术可以将人体及周围环境中的微能源转换为电能，为可穿戴传感器人体生理和运动监测等功能提供能量、实现长久续航。柔性自供电可穿戴传感器的能量采集和转换方式主要包括电磁、压电、摩擦电、光伏、热电等，相关研究主要涉及三个方面：一是对能量转换的机理、材料、结构与性能提升的研究，制备人体柔性可贴附能量收集装置，提高能量转化效率；二是复合多种环境能源收集方式，设计和制造柔性复合能源收集系统，优化环境能源的利用效率；三是能量管理和信号处理技术，研制一体化集成的柔性电路，提升电能的利用率及主动式可穿戴传感器的灵敏度和精确度。柔性自供电可穿戴传感器具有环境能量采集、主动式传感、微型化集成等优势，为可穿戴电子设备提供了具有吸引力的发展方向，代表了自供电技术和体域网的发展趋势，在运动传感、健康监测、个性化医疗等领域具有广泛的应用前景。

（5）对抗性环境自动驾驶智能性能测试

对抗性环境自动驾驶智能性能测试是解决车辆、船舶等载运工具智能性能研发、训练、测评、定级、检验的关键技术和研究手段。虚拟仿真、缩比模型、场景试验、实车 / 实船测试是传统自动驾驶测试的基本方法。随着数字孪生技术的发展和传感通信技术的演化，单一测试技术手段已无法满足智能性能测试对环境一致性、有效性、重复性的需求，强调数字空间与物理空间映射、交互、联动、互补的虚实融合测试已成为智能性能测试的研究热点。特别是在智能性能测试过程中，如何体现智能体之间、智能体与人之间的博弈、对抗和协作，在保证测试安全和效率的前提下，构建对抗性的测试环境是十分重要的基础性问题。测试评价理论与方法、行驶性能测试与评价、安全性测试与评价、可靠性测试与评价、综合性能测试、测试工具链设计等问题是当前该领域主要的研究热点。基于模型的系统工程、基于模型的设计、数字孪生、信息物理系统等与自动驾驶智能性能测试的结合也越来越受到关注。

（6）多材料 4D 打印

多材料 4D 打印是利用增材制造工艺成形多种材料得到具有“刺激 – 响应”特性的智能构件的技术。

刺激主要来源于外部能场，如热场、电场、磁场、光场等；响应表现为构件形状、性能或功能随时间发生可控变化。单一材料增材制造获得的性能稳定的构件已难以满足高端制造领域对性能、功能及其变化的需求，因而材料 – 结构 – 功能一体化的多材料 4D 打印已成为目前的热点技术，其将不同的材料分配至适当的位置，通过响应外部刺激而获得既定的形性变化，这种自感知、自驱动的特性使其在航空航天可展开结构、生物支架等关键构件上具有广阔的应用前景。当前该领域主要的研究热点包括智能构件设计及其拓扑优化、4D 打印新工艺研发、成形过程的数值模拟和路径规划、微纳级多材料 4D 打印、超材料打印、智能构件性能及其变化的表征方法、多材料界面性能调控与优化等方面。可在多能场驱动下实现多种响应的智能构件设计与多材料打印，高精度、高效率的多材料 4D 打印也越来越受到关注。

（7）水下自主航行器无线充电系统

续航力和自持力是衡量水下自主航行器性能的重要指标，主要取决于艇载能源系统的储能容量。回收航行器并快速更换模块化能源系统的方法存在成本高、效率低、隐蔽性差等问题。水下无线充电技术通过非接触方式实现能量传输，具有安全性高、环境适应性强等优点，是提升水下自主航行器续航力和自持力的一项标志性关键技术。无线充电技术根据电能传输机理可分为磁场模式、电场模式、微波模式、激光模式和超声波模式等类型。考虑到水下环境的复杂性和传输介质的特殊性，磁场模式因其输电原理和结构的独特优势成为当前水下充电的最优方案之一，在水下自主航行器的无线充电过程中具有显著优势。在水下无线充电系统的原理设计和工程实践中，磁耦合机构设计、海水介质能量传输及涡流损耗特性、双向能量传输电路拓扑及控制策略、水下双向能量和信息同步传输技术是当前水下无线充电技术的研究热点。

（8）血管介入手术机器人系统

心脑血管疾病已成为危害人类健康的第一大杀手。血管介入手术机器人系统能够辅助医生完成血管内的介入操作，提高操作精度，并减少医生受到的辐射伤害，降低其工作强度。然而，现有的血管介入手术机器人系统大多采用主从控制方式，从端器械递送机构的操作完全依赖于主端医生的控制指令，不具备专家级的智能分析、决策与操作能力，无法为医生提供有效的智能辅助，从而限制了其广泛应用。进一步提升血管介入手术机器人的智能化程度，需要重点解决机器人系统的自主影像导航、主动力觉感知、专家技能学习等关键难题，主要涉及手术影像中的血管语义分割、介入器械检测与端点定位、术前 / 术中多模态影像配准、介入器械 – 血管组织交互力建模、触力觉感知与反馈、操作技能建模与学习、人机协同智能操控等前沿热点。此外，面向复杂血管病变诊疗的多器械协同递送机构设计、多器械灵巧操控、器械精准定量递送也越来越受到关注。

（9）基于迁移学习的机械故障诊断

迁移学习是指在某一领域学习到的知识，可以迁移到另一领域进行推广应用。基于迁移学习的故障诊断通常是指在仿真或实验室（即在数字空间或者半物理空间），所验证的诊断方法能够推广到实际运行的设备（即真实物理空间）。迁移学习的实现手段包括基于特征的迁移、基于模型的迁移等，通过增强、微调等技术手段提高源域和目标域样本的一致性，从而减小迁移差异，在变工况、小样本等场景下，提升故障诊断模型的决策精度与场景泛化性能。通常来说，航空发动机、航天发动机、核电装备、空间站运行装备等超大型复杂设备的真实故障难以获取，一旦发生故障，破坏性极强，此类故障诊断应用场景是当前最迫切的需求，期望迁移学习能够发挥更大的效能。迁移学习的理论研究、将迁移学习应用到故障诊断中的方法研究是该领域研究的热点和难点，以期最终实现“他山之石，可以攻玉”、提升重大装备故障诊断的有效性。

（10）机器人铣削和磨抛

机器人铣削和磨抛是一种利用机器人的灵活性和可重构性，实现航空、航天、航海等战略行业重大装备中的大型复杂构件高效、高质量、高稳定性的加工方式。大型复杂构件具有尺寸超大、曲面复杂、形性严苛等特点，其高性能制造是公认的国际难题。传统制造多采用机床和加工中心等装备，行程小、移动性不足，加工大型结构件需要多次分段分片加工，制造效率低；同时磨抛加工大量采用人工操作，加工精度一致性差，且磨抛粉尘损害工人身体健康的问题突出。机器人加工则具有大空间制造灵活、可重构性好、易集成协调等特点，可实现大型复杂构件制造模式变革，已在飞机结构件铣削、大型风电叶片和高铁白车身磨抛等领域显示了巨大的应用潜力。大尺寸构件形位精度保障、机器人铣削与磨抛加工工艺机理、加工机器人系统创新设计、多机器人协同测量 – 建模 – 加工一体化等问题是当前该领域主要的研究热点。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 高超声速飞行器技术

高超声速飞行器技术研究的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代开始研发的高超声速滑翔飞行器。20 世纪 90 年代中后期至今，随着超燃冲压发动机技术的成熟，高超声速飞机成为各国研究的重点方向。有的科技强国已经进行了不同程度的高超声速飞行器试验和飞行测试，并且已经在实践中使用了高超武器装备。

未来下一代飞行器要求实现一小时抵达全球任何一个地方，可快速突防，天地往返重复使用，这也是新一代飞行器的设计目标，而高超声速飞行器正是实现这一目标的有效装备系统。与传统飞行器相比，高超声速飞行器的工作环境极端复杂，以宽速度域、大跨度空域飞行。其历经的流场特性极其复杂，气热产生的温度极高，致使气动构型及结构形态设计比较复杂，要求的动力推进发动机技术难度高，而且推进系统和飞行器结构之间存在强耦合。飞行器模型非线性和不确定性程度比较高，控制精度、末制导难度大。高超声速飞行器已经成为 21 世纪的高科技前沿热点。相关主要研究包括四个方面：一是宽速度域高升阻比、大装填率构型设计技术方面，研究乘波体构型与升力体构型融合原理与设计技术，实现高升阻比，开发基于智能寻优的结构轻量化设计方法，发展高装填率结构布局。二是新型动力技术方面，探索航空类与冲压类发动机的组合动力原理，研究变燃烧室构型技术，开发可调节火焰稳定装置。三是耐高温防热复合材料及冷却技术方面，研究边界层转捩过程中摩擦和空气滞止产生的热防护与热管理新方法，开发可以承受极端环境的先进复合材料体系，构建烧蚀脱落过程所涉及的精准流动模型，以及精确仿真模拟方法和试验验证手段。四是控制和制导系统方面，研究精准动力学控制模型构建方法，发展有效处理强干扰和不确定性因素的鲁棒智能控制策略，开发在高超声速飞行条件下高灵敏度末端导航技术。上述四方面的研究将为创新发展未来新型运载器奠定理论和技术基础，对促进我国迈向航天强国具有重要实际意义。

该前沿中核心论文发表量最靠前的国家是中国，篇均被引频次靠前的国家是美国、加拿大和新加坡（表 1.2.1）。在核心论文的主要产出国家中，中国与英国、加拿大、新加坡这三个国家的合作是最多的（图 1.2.1）。核心论文发文量排在第一位的机构是西北工业大学，篇均被引频次排在前三位的机构是康考迪亚大学、新加坡国立大学与清华大学（表 1.2.2）。在核心论文的主要产出机构中，西北工业大学和清华大学之间合作最多（图 1.2.2）。施引核心论文数排名第一的国家是中国（表 1.2.3），施引核心论文的前三名产出机构是西北工业大学、哈尔滨工业大学与北京航空航天大学（表 1.2.4）。图 1.2.3 为“高超声速飞行器技术”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.1　“高超声速飞行器技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	43	86.00	4 183	97.28	2018.6
2	美国	4	8.00	609	152.25	2018.2
3	英国	4	8.00	384	96.00	2019.2
4	加拿大	3	6.00	439	146.33	2017.7
5	新加坡	3	6.00	436	145.33	2017.3
6	伊朗	3	6.00	217	72.33	2019.3
7	韩国	3	6.00	183	61.00	2020.0
8	阿塞拜疆	2	4.00	159	79.50	2018.5
9	印度	1	2.00	125	125.00	2020.0
10	澳大利亚	1	2.00	63	63.00	2021.0

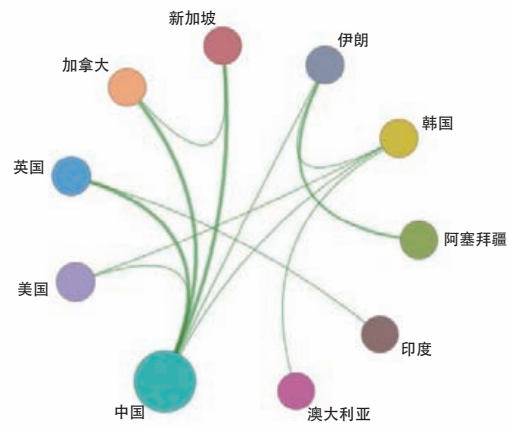

图 1.2.1　“高超声速飞行器技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2　“高超声速飞行器技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	西北工业大学	12	24.00	1 166	97.17	2018.8
2	国防科技大学	7	14.00	761	108.71	2018.7
3	哈尔滨工业大学	6	12.00	601	100.17	2019.0
4	北京航空航天大学	6	12.00	422	70.33	2018.0
5	清华大学	5	10.00	602	120.40	2018.4
6	中国科学院	5	10.00	537	107.40	2020.0
7	空军工程大学	5	10.00	374	74.80	2018.8
8	北京理工大学	3	6.00	192	64.00	2019.7
9	康考迪亚大学	2	4.00	353	176.50	2017.5
10	新加坡国立大学	2	4.00	257	128.50	2017.5

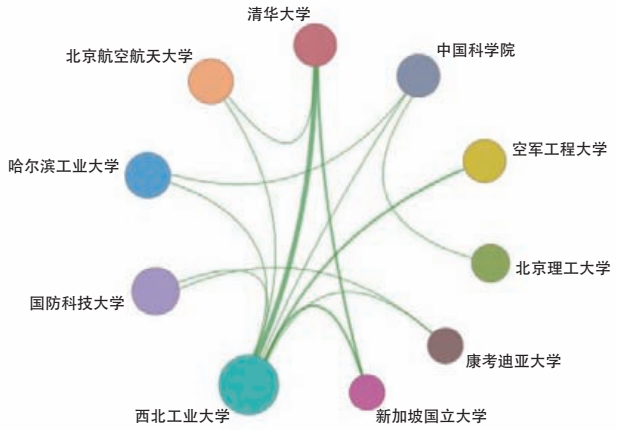

图 1.2.2 “高超声速飞行器技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “高超声速飞行器技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	4 978	70.63	2020.7
2	美国	485	6.88	2020.6
3	印度	311	4.41	2021.0
4	英国	258	3.66	2020.6
5	伊朗	222	3.15	2020.7
6	韩国	192	2.72	2020.9
7	澳大利亚	141	2.00	2020.7
8	加拿大	135	1.92	2020.5
9	俄罗斯	128	1.82	2020.6
10	意大利	106	1.50	2020.9

表 1.2.4 “高超声速飞行器技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	西北工业大学	615	20.56	2020.6
2	哈尔滨工业大学	450	15.05	2020.6
3	北京航空航天大学	356	11.90	2020.8
4	南京航空航天大学	319	10.67	2020.6
5	国防科技大学	308	10.30	2020.7
6	中国科学院	272	9.09	2020.6
7	北京理工大学	186	6.22	2020.9
8	东南大学	132	4.41	2020.3
9	天津大学	126	4.21	2020.1
10	西安交通大学	115	3.84	2021.0

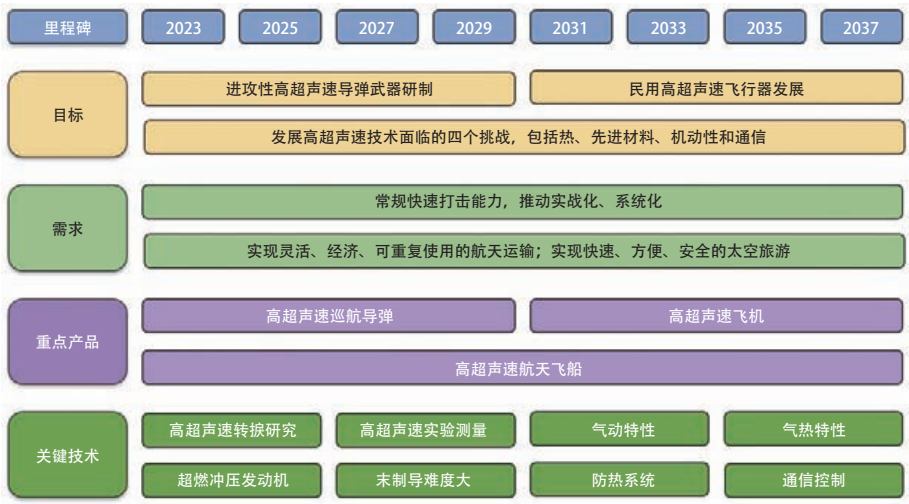

图 1.2.3　“高超声速飞行器技术”工程研究前沿的发展路线

1.2.2　低碳及零碳燃料发动机技术

以燃料燃烧放热为能量来源的发动机是我国道路和航运交通、非道路工程和农用机械及国防装备的主要动力源。目前发动机主要采用汽油、柴油等石化燃料，在提供动力的同时产生二氧化碳排放，统计结果表明我国交通领域所产生的碳排放量占我国总碳排放量的 10%。在“双碳”战略背景下，通过技术创新降低直至实现发动机零碳排放是发动机及相关行业可持续发展的必然选择。发动机低碳化有两大技术方向：一是持续提高传统发动机循环热效率，从而降低其单位功率输出的燃油消耗率；二是采用低含碳量的燃料部分或全部替代传统含碳量较高的汽油 / 柴油燃料，从源头降碳。发动机零碳化则需要通过完全燃烧零碳或全生命周期碳中和的燃料来实现。

传统汽油 / 柴油发动机的热效率的提升既能降低碳排放又可同时提高燃料经济性，是发动机技术研究的长期关注点。柴油机热效率提升技术方向包括提高燃油喷射压力、涡轮及复合增压、余热回收及智能化控制等。汽油机热效率提升主要通过缸内直喷技术、可变压缩比技术、稀薄燃烧技术、汽油压缩燃烧技术、电气化和使用新型热力循环实现。发动机可以使用的零碳燃料主要为氢气和氨气，全生命周期碳中和的燃料主要包括基于生物来源的甲醇、乙醇、二甲醚和生物柴油通过可再生电力能源结合从空气中捕获的 CO_2 制取的电力合成液体燃料等。碳中和燃料分子中虽然含碳，其在发动机的应用也会排放 CO_2，但其在燃料制备过程中消耗 CO_2，在整个生命周期可实现碳中和。未来研究趋势：一是开发高效、低成本的碳中和燃料规模化制备技术；二是利用不同碳中性燃料燃烧特性互补进行燃料调质设计，结合先进发动机燃烧模式和尾气后处理技术，实现发动机零碳和近零污染物排放。

氢气和氨气燃烧不产生任何碳排放，氢气和氨气发动机是近年来零碳燃料发动机技术的研究热点。氢气发动机目前最常用的是火花点火燃烧模式，主要研究方向是防止回火和爆震控制技术、NO_x 排放控制技术和安全高效车载储氢技术。氨气由于反应活性低、燃烧速度慢，很难在发动机全工况范围中实现纯氨燃料的稳定燃烧，目前的技术方案主要通过将氨气与天然气、汽油或柴油进行掺混燃烧，也可将氨气与氢气混合燃烧，且其中氢气可以通过氨气在线裂解制取。氨内燃机的未来研究重点主要聚焦于氨气高效清洁燃烧组织、高效车载选择性催化还原（selective catalytic reduction，SCR）装置、高效车载氨裂解技术等。

低碳及零碳燃料发动机技术涉及动力工程及工程热物理、能源科学与技术、化学与化学工程、交通运输工程、材料科学与工程等众多学科方向，是保障我国交通行业“双碳”达标，及在“双碳”战略背景下促进发动机及相关产业可持续发展的关键核心技术，具有重要技术研究价值和社会意义。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数排名前三的国家是中国、英国与印度，篇均被引频次排名前三的国家是沙特阿拉伯、英国与加拿大（表 1.2.5）。其中，中国与英国和爱尔兰的合作最多（图 1.2.4）。核心论文的主要产出机构中，篇均被引频次排名前三的机构为牛津大学、清华大学与印度国立技术研究所（表 1.2.6）。大连海事大学与都柏林圣三一大学、西安交通大学与北京理工大学、清华大学与牛津大学之间存在合作（图 1.2.5）。施引核心论文数排名第一的国家是中国（表 1.2.7）。施引核心论文的主要产出机构中，论文数排名前三的是西安交通大学、中国科学院与北京理工大学（表 1.2.8）。图 1.2.6 为“低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.5 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	16	34.04	1 755	109.69	2019.2
2	英国	10	21.28	1 294	129.40	2019.1
3	印度	6	12.77	565	94.17	2019.2
4	美国	5	10.64	505	101.00	2019.8
5	土耳其	5	10.64	471	94.20	2019.0
6	加拿大	4	8.51	462	115.50	2018.2
7	挪威	3	6.38	248	82.67	2020.0
8	马来西亚	3	6.38	215	71.67	2018.0
9	爱尔兰	3	6.38	184	61.33	2019.7
10	沙特阿拉伯	2	4.26	326	163.00	2018.0

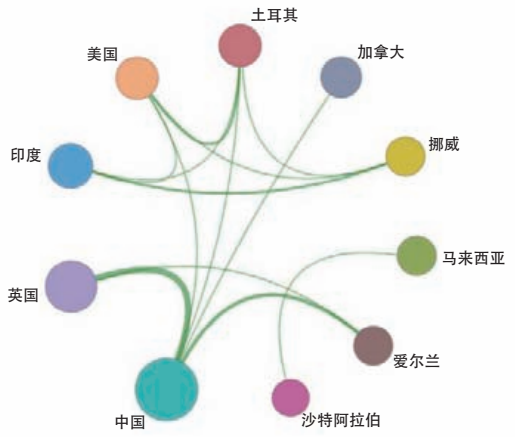

图 1.2.4 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	牛津大学	2	4.26	741	370.50	2018.5
2	清华大学	2	4.26	722	361.00	2018.0
3	印度国立技术研究所	2	4.26	229	114.50	2018.5
4	萨提亚巴马科学技术研究所	2	4.26	178	89.00	2019.5
5	西安交通大学	2	4.26	155	77.50	2021.0
6	大连海事大学	2	4.26	139	69.50	2020.5
7	都柏林圣三一大学	2	4.26	139	69.50	2020.5
8	北京理工大学	2	4.26	111	55.50	2020.0
9	伦敦布鲁内尔大学	2	4.26	110	55.00	2017.5
10	马来亚大学	2	4.26	91	45.50	2018.0

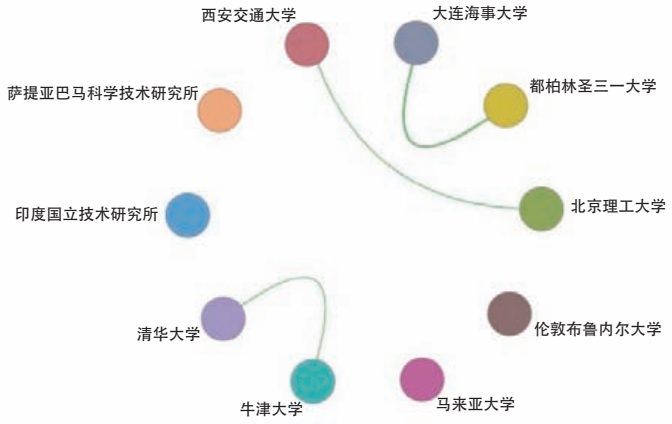

图 1.2.5　“低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 357	36.82	2021.2
2	印度	545	14.79	2021.1
3	美国	356	9.66	2021.1
4	英国	304	8.25	2021.2
5	意大利	200	5.43	2021.0
6	土耳其	174	4.72	2021.1
7	德国	171	4.64	2021.3
8	韩国	150	4.07	2021.5
9	马来西亚	146	3.96	2021.1
10	沙特阿拉伯	142	3.85	2021.4

表 1.2.8 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	西安交通大学	102	12.59	2021.4
2	中国科学院	96	11.85	2021.2
3	北京理工大学	91	11.23	2021.1
4	天津大学	89	10.99	2021.2
5	清华大学	88	10.86	2021.1
6	上海交通大学	78	9.63	2021.3
7	北京工业大学	69	8.52	2021.1
8	江苏大学	68	8.40	2020.8
9	浙江大学	46	5.68	2021.1
10	萨提亚巴马科学技术研究所	42	5.19	2021.0

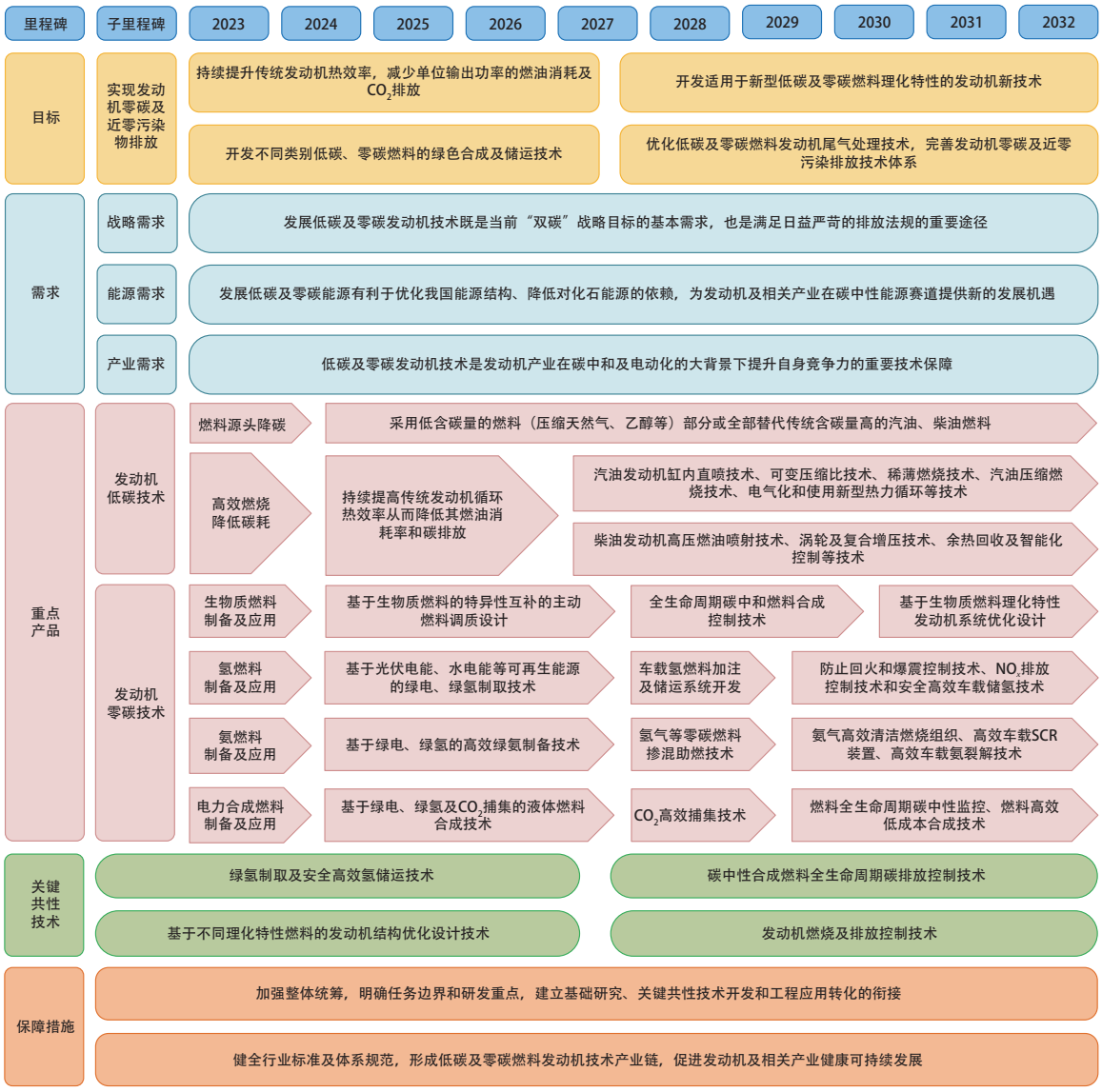

图 1.2.6 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿的发展路线

1.2.3　动态可重构移动微型机器人集群

随着智能移动机器人应用需求不断向作业任务复杂多模态、作业范围立体广域、作业环境复杂多变甚至存在干扰和对抗的方向拓展，复杂、昂贵的单台机器人已难以满足功能和性能要求，采用数量众多的、可动态重构的、成本相对低廉的同构 / 异构自主移动微型机器人组成任务执行集群，充分发挥群体分工协作的优势，不仅可以提高在复杂环境下完成复杂任务的效率、鲁棒性，而且免去了开发专用复杂系统设备的成本，获得显著的经济效益。动态可重构的移动微型机器人集群已成为移动机器人领域的重要发展方向，在智能制造工厂、区域覆盖探查、广域目标搜索乃至遂行军事作战等领域具有广阔的应用前景，成为智能移动机器人领域发展的重要方向。

动态可重构的移动微型机器人集群包括空中智能无人机集群、地面移动机器人集群、水面和水下无人航行器等多种形态，也包括这些形态个体的混合集群。集群中的个体可以是同构的，也可以是异构的。动态可重构移动微型机器人集群的整体行为来源于具有自主能力的个体根据任务目标而进行的相互协调和协作，是多智能体系统自组织性、自适应性、智能涌现的生动映照和物理体现，是多机器人系统协同控制技术发展的高级形式。

动态可重构移动微型机器人集群技术不仅涉及个体智能（自主控制、自主感知、自主规划与自主决策），还涉及集群层面的群集体系结构、通信网络、协调机制、信息融合、状态估计、任务分配、路径规划、编队控制、多智能体一致性等多层次、多方面的理论和技术。传统的多机器人协同控制大多采用分层递阶式控制体系架构、强连通通信网络、基于全局信息的协作协调、集中式任务分配和调度、领航 / 跟随式编队控制来实现，集群规模、协同效能和可扩展性都难以提高，集群规模往往限于数十个个体量级。而动态可重构移动微型机器人集群期望集群个体数量达到数百、数千甚至更多，而且对于任务、环境和分工协作的复杂度，以及对任务和环境事件的自适应性和鲁棒性等方面的要求都与传统的多机器人协同控制技术有着显著的区别，现有协同技术难以适应其发展的要求，亟待集群理论和技术的突破。

现代生物学研究表明，自然界中典型群集动物，如鸟群、鱼群、蚁群、狼群等，仅依靠对集群局部信息的获取和与邻近若干个体的信息交互，即可感知集群的态势和变化，做出与集群行为目标一致的决策，从而涌现出集群整体的行为。这些群集行为为动态可重构移动微型机器人集群的发展提供了启发。探究群集动物的群集智能涌现机理，并将其映射到动态可重构移动微型机器人集群控制领域，构建面向任务基于自组织的动态可重构的体系结构和复杂受限通信条件下基于局部信息传播的自组织协作机制，攻克广域范围大规模集群分布协同任务动态分配、弱通信条件下大规模多源异构信息融合和分散化态势感知、考虑动力学特性的路径规划与重规划、包含运动不确定信息的编队动态控制、基于事件触发的多机器人一致性跟踪等关键技术，是动态可重构移动微型机器人集群的研究热点。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数排名第一的是中国，篇均被引频次排名第一的是美国（表 1.2.9），中国与美国和瑞士存在合作，德国与土耳其存在合作（图 1.2.7）。核心论文的主要产出机构中，核心论文数排名第一的是香港中文大学，篇均被引频次排在前三位的是北京理工大学、密歇根州立大学和哈尔滨工业大学（表 1.2.10）。其中，哈尔滨工业大学、北京理工大学、密歇根州立大学这三个机构之间存在合作。科奇大学与马克斯普朗克智能系统研究所之间存在合作。香港中文大学则与中国科学院、密苏里大学、香港理工大学、深圳市人工智能与机器人研究院这四所机构都存在合作（其中，中国科学院与密苏里大学之间也存在合作）（图 1.2.8）。施引核心论文的主要产出国家中，发文量排在第一位的是中

国（表 1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构中，排名前三的是香港中文大学、中国科学院和哈尔滨工业大学（表 1.2.12）。图 1.2.9 为“动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	10	90.91	803	80.30	2019.1
2	美国	2	18.18	330	165.00	2018.0
3	德国	1	9.09	67	67.00	2019.0
4	土耳其	1	9.09	67	67.00	2019.0
5	瑞士	1	9.09	10	10.00	2021.0

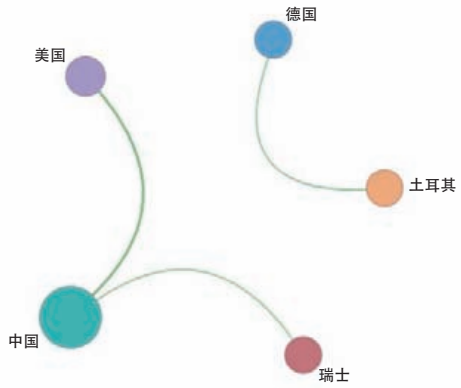

图 1.2.7 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	香港中文大学	8	72.73	516	64.50	2019.1
2	哈尔滨工业大学	2	18.18	287	143.50	2019.0
3	北京理工大学	1	9.09	262	262.00	2019.0
4	密歇根州立大学	1	9.09	262	262.00	2019.0
5	中国科学院	1	9.09	68	68.00	2017.0
6	密苏里大学	1	9.09	68	68.00	2017.0
7	科奇大学	1	9.09	67	67.00	2019.0
8	马克斯·普朗克智能系统研究所	1	9.09	67	67.00	2019.0
9	香港理工大学	1	9.09	40	40.00	2020.0
10	深圳市人工智能与机器人研究院	1	9.09	10	10.00	2021.0

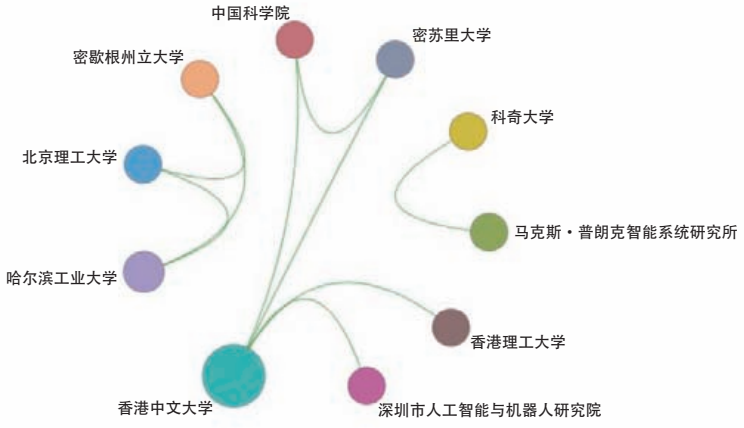

图 1.2.8　“动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	323	51.52	2020.8
2	美国	90	14.35	2020.8
3	德国	42	6.70	2020.5
4	韩国	41	6.54	2020.8
5	瑞士	24	3.83	2021.0
6	日本	20	3.19	2021.0
7	加拿大	19	3.03	2020.9
8	意大利	19	3.03	2020.7
9	英国	19	3.03	2020.7
10	荷兰	15	2.39	2020.9

表 1.2.12　“动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	香港中文大学	102	32.28	2020.5
2	中国科学院	47	14.87	2020.8
3	哈尔滨工业大学	40	12.66	2021.0
4	苏黎世联邦理工学院	21	6.65	2021.1
5	马克斯·普朗克智能系统研究所	20	6.33	2020.4
6	清华大学	17	5.38	2020.9
7	深圳人工智能与机器人学会研究所	15	4.75	2021.1
8	香港城市大学	14	4.43	2021.1
9	北京航空航天大学	14	4.43	2021.1
10	北京理工大学	13	4.11	2020.9

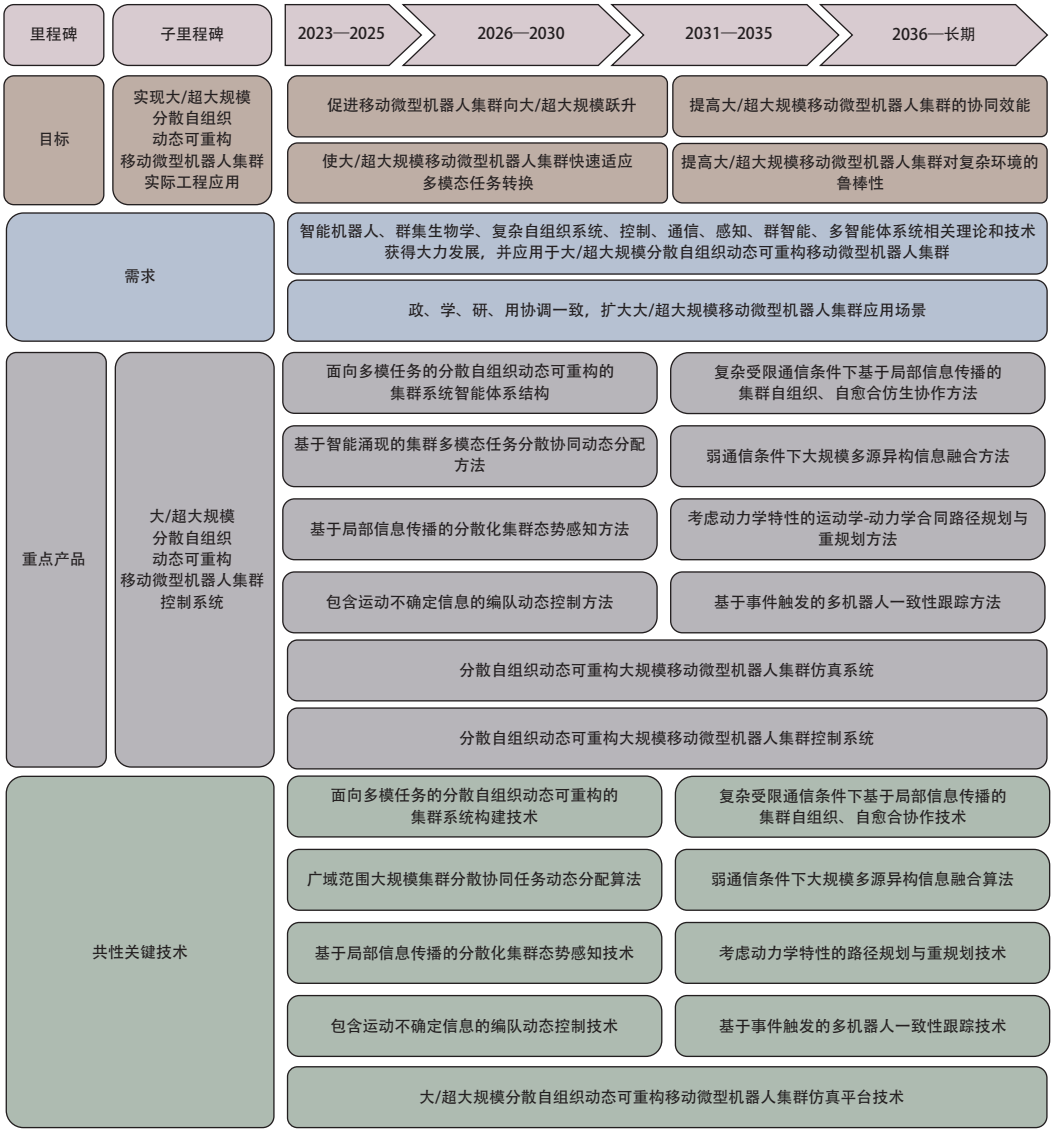

图 1.2.9　“动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿的发展路线

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

机械与运载工程领域的 Top 10 工程开发前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 2.1.1）。其中，属于传统研究的深入的有：多机器人协同作业优化技术；无人驾驶飞行器路径规划技术；微小型无人机精确制导技术；基于人工智能的精准目标识别技术；多功能高性能航空复合材料技术；微型高性能复合传感技术；智能移动机器人控制与感知系统。新兴前沿则包括：低成本可回收复用航天器；水下无人救援机器人；空天往返运输系统能源一体化与推进剂管理技术。2017—2022 年各开发前沿涉及的核心专利公开情况见表 2.1.2，

表 2.1.1　机械与运载工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	多机器人协同作业优化技术	465	1 943	4.18	2020.4
2	低成本可回收复用航天器	142	612	4.31	2019.9
3	水下无人救援机器人	185	512	2.77	2020.0
4	无人驾驶飞行器路径规划技术	911	6 525	7.16	2020.5
5	微小型无人机精确制导技术	483	1 932	4.00	2019.8
6	基于人工智能的精准目标识别技术	615	1 340	2.18	2021.1
7	多功能高性能航空复合材料技术	1 102	5 777	5.24	2019.8
8	空天往返运输系统能源一体化与推进剂管理技术	363	2 135	5.88	2019.8
9	微型高性能复合传感技术	205	245	1.20	2019.6
10	智能移动机器人控制与感知系统	569	6 729	11.83	2019.8

表 2.1.2　机械与运载工程领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	多机器人协同作业优化技术	32	35	52	78	126	142
2	低成本可回收复用航天器	18	18	21	24	30	31
3	水下无人救援机器人	11	25	39	34	32	44
4	无人驾驶飞行器路径规划技术	52	75	108	157	203	316
5	微小型无人机精确制导技术	46	73	79	89	93	103
6	基于人工智能的精准目标识别技术	4	14	39	112	168	278
7	多功能高性能航空复合材料技术	177	148	147	163	211	256
8	空天往返运输系统能源一体化与推进剂管理技术	39	65	44	64	87	64
9	微型高性能复合传感技术	35	32	31	28	38	41
10	智能移动机器人控制与感知系统	58	93	82	119	108	109

多机器人协同作业优化技术、无人驾驶飞行器路径规划技术、基于人工智能的精准目标识别技术是近年来专利公开量增速最显著的方向。

（1）多机器人协同作业优化技术

多机器人协同作业优化技术是指在一个作业任务或场景中，通过对多个机器人的协同行动与决策进行优化，以提高整体作业效率和性能的技术。主要应用于制造业、仓储物流、监测侦查、环境探测、应急搜

救等领域，涉及多机器人之间的通信、合作、规划和决策等多项技术。相关研究主要集中在三个方面：一是协同传输计算，提升多机器人共享和传输计算资源以增强整体计算能力；二是分布式感知，多个机器人在工作场景中同时进行数据采集和测量，以获取对环境或任务状态的准确信息；三是协同控制，多个机器人之间相互合作、协同工作以实现共同目标的控制策略和方法。未来多机器人协同作业优化技术将趋向智能化、跨领域应用、多模态传感、人机协同和学习等方面的发展，推动多机器人系统在各领域的广泛应用，实现更高效、更安全、更智能的协同作业。

（2）低成本可回收复用航天器

随着人类太空探索与开发活动的日益频繁，目前一次使用的航天器由于成本高、准备周期长，已很难满足需求。因此，能更加便捷与廉价地探索、开发和利用太空资源的可回收复用航天器越来越受到重视。可回收复用航天器是一种能够有效延长航天器寿命、提升航天器可靠性和使用便捷性、降低航天器成本的先进航天器应用模式，各航天大国均将其作为未来航天技术可持续发展的重点突破方向之一。可复用载人飞船和货运飞船、航天飞机、重复使用可机动轨道飞行器等均属于典型的可回收复用航天器。可回收复用航天器并不是新概念，但其与传统一次使用航天器的设计理念和方法存在巨大差异，导致其研制难度很大，对人类的科技发展水平提出了严峻的挑战。目前可回收复用航天器的重点研究方向主要包括：可重复使用设计理论与方法、可回收复用航天器总体设计、可靠精确返回着陆技术、长时在轨精确轨 / 姿 / 热控与维护技术、高可靠可复用耐高温抗烧蚀热防护技术、结构寿命评估与健康管理技术等。

（3）水下无人救援机器人

水下无人救援机器人主要是指搭载水下搜索设备和特定作业装备执行水域应急救援任务的一类水下机器人，其主要工作任务包括水下搜索和水下救援两大方面。目前典型的水下无人救援机器人主要是在有缆式遥控水下机器人（remotely operated vehicle，ROV）的基础上发展而来的。与传统的水下机器人相比，水下无人救援机器人的工作环境复杂多变，且对于任务执行的时效性要求较高。为了应对多样性的救援任务，传统 ROV 的构型、操纵模式以及作业手臂控制策略等需要进行优化升级。

目前该领域的主要技术方向包括水下无人救援机器人功能结构优化、基于声光电传感器的多源数据融合处理、组合式高精度导航定位技术、基于模型预测的非线性位姿控制技术等。结合 ROV 在局部区域的遥控精细作业优势和自主水下航行器（autonomous underwater vehicle, AUV）在较大范围海域的自主航行优势发展起来的多模式自主缆控水下无人救援机器人技术是该领域未来的发展方向。具体的技术发展趋势包括基于仿生结构的可变构型功能结构优化设计、基于多源传感器数据的水下救援目标自主检测和识别技术、基于深度学习的目标救援自主决策技术等。

（4）无人驾驶飞行器路径规划技术

无人驾驶飞行器路径规划技术旨在综合考虑任务、环境、动力学等约束，自主规划出一条从起始点到目标点的安全、光滑轨迹。传统的路径规划算法主要基于采样、数值优化、启发式搜索等技术，如 A* 算法、快速扩展随机树算法、人工势场算法、动态规划算法、贝塞尔曲线算法、遗传算法、粒子群优化算法等。然而，由于无人机的机动性能不断提升，作业环境日益严峻复杂，传统的规划算法难以兼顾实时性、平滑性和安全性的需求，并且很可能陷入局部最优点，导致优化路径的目标不可抵达。随着以深度强化学习为代表的新一代人工智能技术的发展，采用深度 Q 网络、深度确定性策略梯度等进行路

径规划成为研究热点。这类算法不需要先验知识，可以直接进行迭代训练，根据环境反馈信息优化决策，通用性和可迁移性强，但是奖励设计、参数调节及收敛性保障难度较大。因此，组合不同算法优势的融合路径规划算法是该领域研究的必然趋势，利用传统启发搜索等算法实时规划最优路径，同时结合深度强化学习算法实现复杂环境下的自主避碰，能够有效突破二者的技术瓶颈。此外，通过无人机参数空间降维、可行域高质量建模等方式进行轻量级路径规划也受到了广泛关注。近年来，随着大模型的迅猛发展，Transformer 架构因其独有的自注意力机制，已经被用于自动驾驶的环境感知和分割、目标检测、跟踪和定位、路径规划和决策，在未来有望成为无人驾驶飞行器路径规划应用的新范式。

（5）微小型无人机精确制导技术

微小型无人机通常被认为是特征尺寸在几厘米到几十厘米、最大起飞质量在几克到十几千克的无人飞行器，具有体积小、质量轻、机动性强等特点。微小型无人机精确制导技术是以无人机为平台应用载体，利用目标反射、散射、辐射特性发现识别与跟踪目标，利用惯性技术、信息支援保障等方式获取无人机自身的导航信息，控制和导引制导武器准确命中目标的技术。在有地形限制的复杂环境下，精确制导技术可有效提高微小型无人机的导引精度，降低误伤风险，提高战斗效果，对于反恐行动和军事打击具有重要意义。目前，微小型无人机精确制导技术的主要研究方向为精确探测技术、信息支援综合利用技术、高精度导引控制技术等。有人 / 无人协同作战呈现的新模式对微小型无人机精确制导技术提出了制空对抗高隐身化、集群对抗高密度化、攻防对抗高智能化等若干要求，未来发展趋势和研究方向包括但不限于：一是复合制导技术研究，主要用于提高微小型无人机精确制导打击精度；二是智能识别及集群算法的研究，用于提高智能作战场景下协同作战能力；三是微型结构与新型材料研究，用于提升微小型无人机突防隐身能力。

（6）基于人工智能的精准目标识别技术

基于人工智能的精准目标识别技术是指借助人工智能中的机器学习、模式识别等强大的学习和拟合能力，实现场景语义信息的精准分析，包括环境感知、目标提取、分类及跟踪。常以摄像头、红外、激光雷达、导航雷达、毫米波雷达等传感器信息或其融合信息作为来源。当前，目标识别任务场景日益复杂，场景信息繁杂，目标重叠多，姿势形态各异，同时伴随着严重的遮挡、视角畸变、粼光、雨雾、抖动等环境限制条件，桎梏着自动识别系统获取“全面”和“清晰”目标的能力。以无人艇为例，其场景具有突发性，如何迅速且精准地捕捉追踪突现的、快速的目标也是亟待突破的难点。传统的识别算法已难以满足需求，研究者开始借助以深度学习为代表的深度特征提取及空间映射能力，设计更精巧的卷积核和网络结构，来防止遮挡、水雾、反光、抖动等导致的识别性能下降。近年来，Transformer 结构被革命性地引入目标识别领域。其独有的自注意力机制，使其能自适应地对信息进行多层次、跨空间、跨时间的关联，极大地提升了识别的精度，逐渐取代卷积成为新一代目标识别系统的主流框架。最近，大模型的诞生更是带来了新的启发，研究者们开始开发目标识别领域的专用大模型，不再拘泥于某一特定的任务或场景。人工智能是实现精准目标识别的必要驱动力，基于 Transformer 的实例精准分割、目标识别场景的通用大模型开发、复杂环境下的全景语义识别、多源异构信息时空配准与融合等是当前的研究热点。Transformer 甚至已经成为自动驾驶环境感知的新范式，深刻地改变着人类生活。未来随着应用场景的日趋复杂，亟待用更先进的人工智能方法将环境感知升级为态势认知。

（7）多功能高性能航空复合材料技术

多功能复合材料为航空飞行器提供优异力学性能的同时，也赋予其吸波、透波、隔热、导电、电磁屏蔽、减振吸能等功能特性。基于该类材料设计和制造的新一代航空装备，可快速适应温度、湿度、盐度等剧烈变化的空 – 天 – 地 – 海一体化复杂飞行环境，已成为世界各主要航空强国重点发展的颠覆性技术。目前，多功能高性能航空复合材料技术的主要研究方向包括：多尺度、多物理场分析理论与建模方法；雷达 / 红外多频谱隐身复合材料的吸波机理；功能 – 材料 – 结构一体化设计与增材制造；自诊断 / 自修复复合材料的修复机理与制造方法；多功能复合材料结构高性能装配技术等。未来的发展趋势和研究方向包括：结合机器学习方法，开发多功能复合材料的性能预测模型与设计方法；基于环境敏感材料，发展集传感、控制、驱动等功能于一体的智能复合材料系统；采用高性能、低成本天然材料，发展轻质高强、环境友好的绿色多功能复合材料。

（8）空天往返运输系统能源一体化与推进剂管理技术

空天往返运输系统能源一体化与推进剂管理技术是针对往返于地球表面与轨道的航天运输工具中多种能源系统进行整合与优化，并对推进剂进行安全高效管理的一类技术的总称。能源一体化是指综合考虑能源的供给、传输与存储、终端消耗和回收四个环节，在各环节采用互相关联的技术和管理措施，使得整个能源系统从整体上达到系统最优化。利用地外的水冰资源等的原位能源技术和设备、空间氢能源动力一体化技术，空天往返过程能源消耗的精确匹配、调节和高效利用技术，能源储存、分配、生产的动态组织和准确预示技术是系统能源一体化的主要研究方向。低温推进剂长期在轨的位置管理与热量管理技术、低温推进剂空间在轨交叉传输技术、集成流体管理（integrated vehicle fluids，IVF）系统建模仿真技术是推进剂管理技术的主要研究方向。随着天地往返运输要求的不断增加，依托大推力发动机、大直径结构技术打造的重型运载火箭，采用新型动力、高精度返回控制等技术发展的重复使用运载器，能源一体化与低温推进剂长期在轨管理等技术研究越来越受到关注。

（9）微型高性能复合传感技术

传感技术作为信息获取和数据采集的唯一功能器件，是数字经济时代下最核心技术之一，也是先进制造、信息技术领域的基石之一。当前，机器人、智能制造、智能交通、智慧城市以及可穿戴技术正在迅速发展，要求传感技术向着微型化、高性能、低功耗、智能化、集成化和低成本的方向发展。微型高性能复合传感技术是将多种微型高性能传感功能进行有机集成，从而在一个小芯片上实现对多种类、多维度物理量精准复合测量的高新技术。复合传感技术可以通过微加工技术将不同功能的传感元件集成为多功能的微型传感芯片，其特点是集成度高、体积小，不同传感功能间可实现相互补偿和校正，从而使得数据的获取具有更高的精度和完整性。随着微纳制造技术、多功能复合技术、精密封装技术、数字补偿技术的快速发展，新原理、新材料、新工艺不断涌现，开发具有新原理、新效应的敏感元件和传感元件，并以此不断推进更多传感单元功能的复合集成，是当前微型高性能复合传感技术的主要研究热点与发展方向。

（10）智能移动机器人控制与感知系统

控制与感知系统是智能移动机器人实现环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行功能的关键系统，主要由传感模块、计算与决策模块组成。为了在未知或动态环境中成功导航，机器人需要对其环境有准确的感知，这些感知信息进一步被用于机器人的决策制定和行动执行。随着移动机器人应

用场景不断丰富，移动机器人的智能化水平要求也日益提升。深度学习与感知、即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping，SLAM)、强化学习与控制、多模态感知与传感器融合、人 – 机交互与合作、机器人群协同、边缘计算与感知、生物启发方法等问题是当前该领域主要的研究热点。考虑到真实环境的不确定性和动态性，如何使机器人在复杂、变化的环境中保持稳定和有效的操作是一个重要的研究方向。随着机器人在公共空间和家庭中的应用越来越普遍，其操作的安全性和伦理问题也越来越受到关注。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　多机器人协同作业优化技术

多机器人协同作业优化技术是指在多个机器人共同参与的作业任务或场景中，通过有效的作业任务规划、资源分配、协同决策和协调控制等手段，提高多机器人系统整体工作效率和性能的技术。它旨在通过合理的算法和策略，使得多个机器人能够更好地协同工作，共同完成复杂任务。该技术涉及多机器人之间的通信、规划、决策与控制等多个研究方向，在机器人化的加工制造、仓储物流、监测侦查、环境探测、应急搜救等领域中有广泛应用。

多机器人协同作业是面向科学前沿的多学科交叉技术，跨学科前沿技术结合紧密，涵盖了人工智能中的博弈论和运筹学等范畴，又与复杂系统和信息理论、控制理论等学科密切相关，因而也成为公认的国际性难题。多机器人协同作业的优化亟待解决三个科学技术挑战。一是多机器人高效传输 – 计算一体化协同机制：面向复杂作业任务中多机器人协同作业需求，研究多机器人低延迟、高可靠通信组网理论，异构数据跨层级高效互通共享方法，建立面向多机器人协同作业的传输 – 计算一体化通信网络，为高实时、高可靠信息传输与计算提供保障。二是大范围精密感知与分布式特征识别机制：挖掘多机器人时空感知误差定量描述与耦合传递机理，阐明多源异构传感器的大范围自主协同测量和信息融合机制，建立作业任务驱动的多尺度多目标识别通用模型和持续的认知学习架构，形成面向复杂作业任务的多机器人具身感知与具身智能。三是感知 – 认知 – 决策 – 控制协同机制：构建融合作业任务数据与机理知识的多机器人系统模型，建立安全高效、强鲁棒、易扩展的任务调度和动态规划体系，保障大规模复杂作业任务的井然有序运行。建立多机器人自主决策机制，以适应多机器人与复杂环境产生强时变动态交互需求。构建多工序全链路协同作业模型，探索多机器人协同作业系统参数自优化机制，提升多机器人系统作业的精度、稳定性和安全性。多机器人协同作业优化技术可提高生产效率和产品质量，降低作业成本并减少人员风险，因而在工业生产、农业、物流、医疗等领域有广泛应用前景，是智能制造和智慧社会的重要支撑技术之一。

目前，该前沿核心专利产出数量最多的国家是中国，核心专利平均被引数最高的国家是韩国（表 2.2.1）。核心专利的主要产出国家中，印度、马来西亚、秘鲁这三个国家之间存在合作，另外印度和瑞典之间也存在合作（图 2.2.1）。核心专利产出数量较多的机构是北京理工大学、广州中国科学院先进技术研究所、韩国 3MTOP 有限公司（表 2.2.2）。核心专利的主要产出机构之间没有合作。图 2.2.2 为“多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.1 “多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	416	89.46	1 518	78.13	3.65
2	美国	26	5.59	207	10.65	7.96
3	韩国	14	3.01	197	10.14	14.07
4	印度	6	1.29	9	0.46	1.50
5	哥伦比亚	2	0.43	12	0.62	6.00
6	瑞士	1	0.22	0	0.00	0.00
7	马来西亚	1	0.22	0	0.00	0.00
8	秘鲁	1	0.22	0	0.00	0.00
9	瑞典	1	0.22	0	0.00	0.00

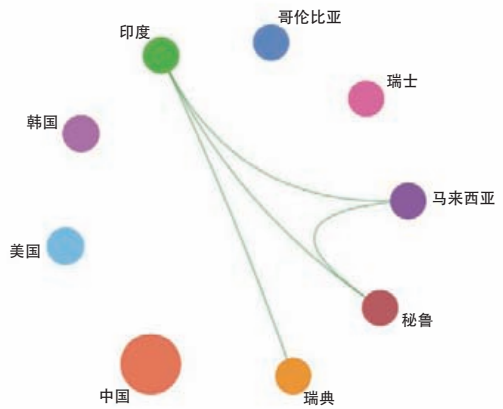

图 2.2.1 “多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.2 “多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京理工大学	19	4.09	46	2.37	2.42
2	广州中国科学院先进技术研究所	12	2.58	44	2.26	3.67
3	韩国 3MTOP 有限公司	12	2.58	3	0.15	0.25
4	美国波音公司	11	2.37	66	3.40	6.00
5	湖南大学	10	2.15	21	1.08	2.10
6	南京航空航天大学	10	2.15	7	0.36	0.70
7	东南大学	9	1.94	107	5.51	11.89
8	哈尔滨工业大学	8	1.72	91	4.68	11.38
9	西安电子科技大学	8	1.72	42	2.16	5.25
10	哈尔滨工程大学	8	1.72	34	1.75	4.25

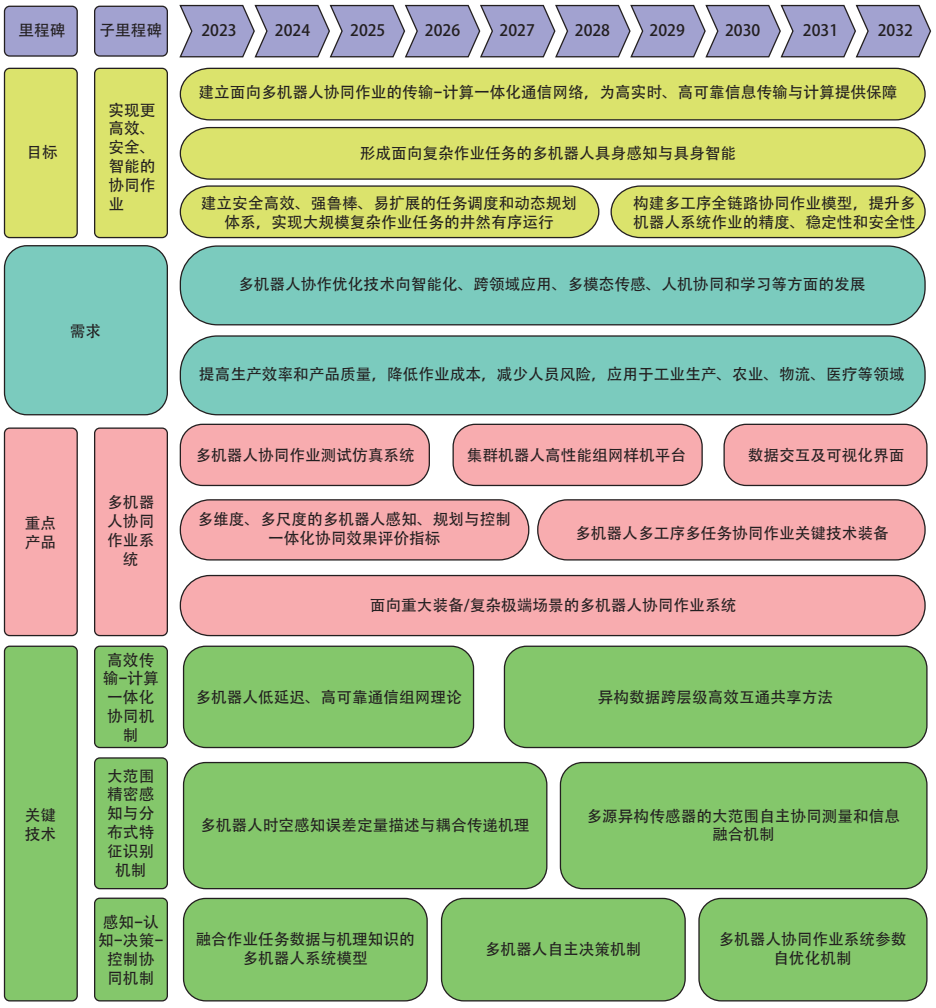

图 2.2.2　“多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2　低成本可回收复用航天器

随着航天活动的不断扩大和发射频率的持续上升，传统一次性航天器的高昂成本日益成为制约航天发展的关键因素，可回收复用技术被认为是降低运营成本、提高航天技术可持续性的主要途径之一。近年来，世界各航天强国都积极探索可回收复用航天器的发展，提出了相应的发展路线并取得了显著成果，如美国 SpaceX 的龙飞船和波音的 CST-100 飞船、我国的神舟飞船、俄罗斯的 Soyuz MS 飞船，以及 Blue Origin 的 New Shepard 亚轨道航天器等。这些航天器在设计理念和方法上注重可重复性，通过精简结构、自主控制、垂直着陆、优化材料等方面的突破，在执行任务之后成功进行了回收与重复使用。

未来，可回收复用航天器将主要应用于近地轨道任务和行星际机动运载任务。与传统的一次性使用航天器相比，这种航天器的设计理念和方法面临着重大的改革。目前的回收复用技术仍以部件级复用为主，个别功能单元在任务完成后经过复用性评估，直接或简易修复后在新的航天器上继续承担原有功能。而实现航天器系统级回收复用仍然面临困难。因此，纵观世界各国的研发历程，发展不同任务级别的可回收复用航天器需要集中突破一批共性关键技术。

首要攻关的关键技术是总体设计技术，建立可回收复用航天器的技术理论体系，并从技术风险、可靠

性、安全性、经济效益等方面对总体方案进行优化和论证，具体涉及任务规划、总体布局、健康管理、系统和分系统可靠性建模与评估、试验验证等方面的研究。其次，动力系统、抗冲击结构、轻质烧蚀材料以及精准无损着陆回收技术是实现航天器可回收复用的硬件保障。动力系统的研发涉及减损延寿、燃烧室热防护以及动力调节技术。结构和材料的发展方向聚焦于高效承载、整体性、密封性结构以及轻质烧蚀材料。精准无损着陆技术则需要解决多台发动机协调反推减速、矢量控制、无损检测以及可复用缓冲器的抗疲劳及耐久性设计等问题。此外，智能测量与自动化决策控制技术在任务执行过程中同样至关重要，决定了轨道机动控制及再入制导的精确性，确保其满足全寿命周期内的环境适应性要求。

目前，该前沿核心专利产出数量排名前三的国家是中国、美国和俄罗斯，核心专利平均被引数排名第一的国家是法国（表 2.2.3）。核心专利的主要产出国家之间没有合作。核心专利产出数量较多的机构是航天特种材料及工艺技术研究所与波音公司（表 2.2.4）。核心专利的主要产出机构中，Johann Haltermann 有限责任公司与休斯敦 Monument Chemical 有限责任公司之间存在合作（图 2.2.3）。图 2.2.4 为“低成本可回收复用航天器”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3 “低成本可回收复用航天器”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	72	50.70	327	53.43	4.54
2	美国	30	21.13	81	13.24	2.70
3	俄罗斯	14	9.86	7	1.14	0.50
4	法国	12	8.45	170	27.78	14.17
5	西班牙	6	4.23	23	3.76	3.83
6	德国	4	2.82	0	0.00	0.00
7	哥伦比亚	2	1.41	0	0.00	0.00
8	印度	1	0.70	0	0.00	0.00

表 2.2.4 “低成本可回收复用航天器”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	航天特种材料及工艺技术研究所	24	16.90	170	27.78	7.08
2	波音公司	11	7.75	4	0.65	0.36
3	欧洲航空防御和航天公司	8	5.63	160	26.14	20.00
4	Johann Haltermann 有限责任公司	8	5.63	0	0.00	0.00
5	休斯敦 Monument Chemical 有限责任公司	8	5.63	0	0.00	0.00
6	Pangea Aerospace 公司	7	4.93	27	4.41	3.86
7	北京星际荣耀空间科技有限公司	5	3.52	35	5.72	7.00
8	北京空间飞行器总体设计部	5	3.52	4	0.65	0.80
9	南京航空航天大学	4	2.82	26	4.25	6.50
10	Ariane 航天公司	4	2.82	10	1.63	2.50

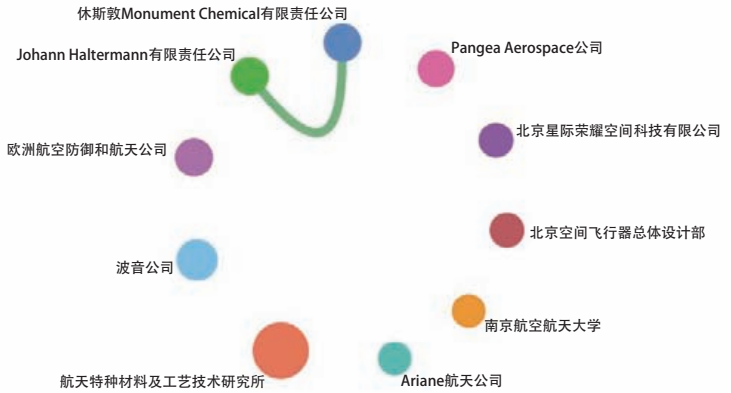

图 2.2.3　“低成本可回收复用航天器”工程开发前沿主要机构间的合作网络

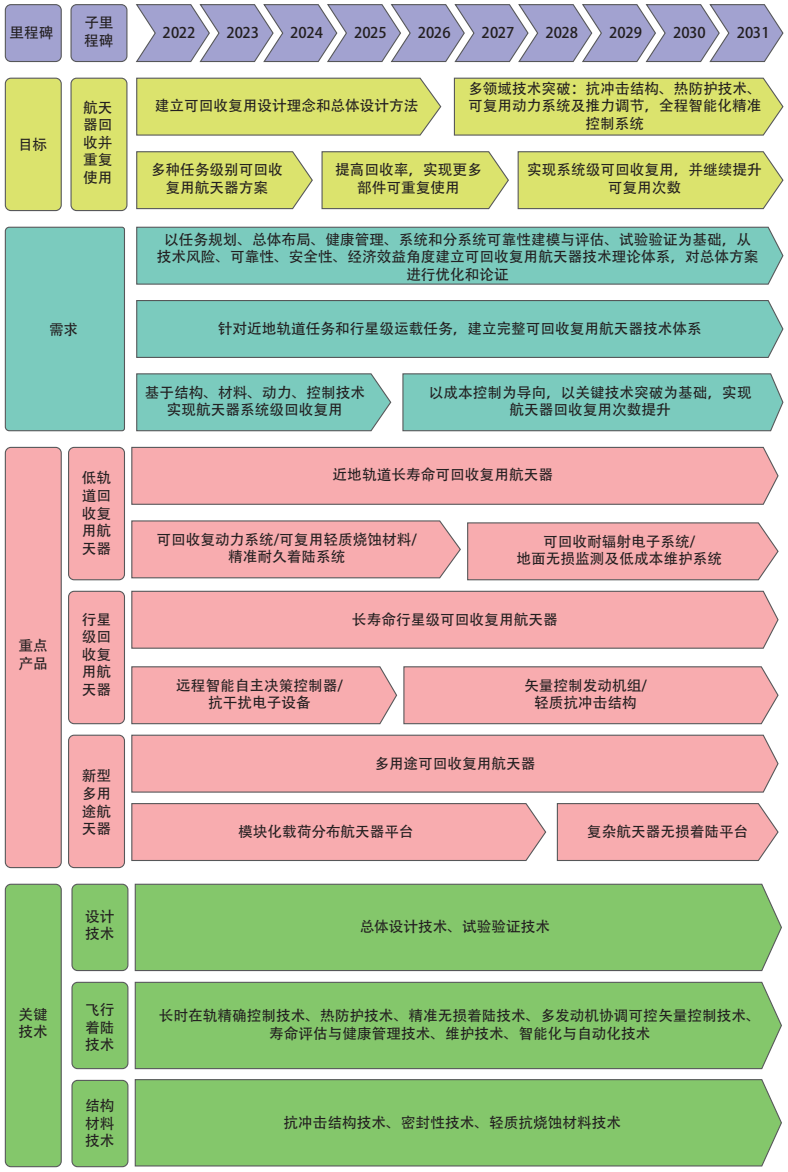

图 2.2.4　“低成本可回收复用航天器”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 水下无人救援机器人

随着海上贸易、海洋调查和海洋资源开发等人类活动的日益增多，海上发生事故的频次也逐渐增加，这些事故对国家的经济发展造成了巨大的损失。利用先进的应急救援装备开展救援活动对提高救援行动的成功率、降低事故损失和挽救人员伤亡等方面具有重要意义。由于水下作业环境的复杂性和多变性，水下应急救援任务的执行效率和实际效果等往往不尽如人意。水下无人救援机器人凭借作业能力强、自主性高等优势逐渐成为水下应急救援装备体系中的主力。自 20 世纪 70 年代出现第一台水下救援机器人至今，随着传感器和智能控制技术的发展，水下无人救援机器人的自主性和作业能力得到了较大的提高，在水下应急救援任务中的角色逐渐从辅助角色成为救援主体。

为了适应多样化的救援需求和更为严苛的救援环境，水下无人救援机器人的智能化控制策略、环境感知及突发情况下的自学习与自适应等能力已成为当前水下机器人学科领域的研究热点。我国关于水下无人救援机器人的研究起步较晚，但近年发展迅速。相关研究主要分为三个方面：一是结构方面，将新型机构、新材料、新驱动等应用于水下无人救援机器人的机构设计中，基于仿生结构的可变构型功能结构优化设计、多模式功能融合和可重构模块化设计等为该方面的发展趋势；二是环境适应性方面，通过多传感器融合技术、高效信息提取与处理技术、多任务并行及动态分析等技术，实现复杂海洋环境下精确的环境感知，基于声光电传感器的多源数据融合处理技术、基于多源传感器数据的目标检测和识别技术等为该方面的发展趋势；三是智能化发展方面，通过动态概率网络决策方法和强化学习方法等相关技术，实现复杂任务下的高效自主决策控制，基于模型预测的非线性位姿控制技术、基于深度学习的任务自主决策技术等为该方面的发展趋势。总之，水下无人救援机器人技术在控制工程、传感器技术、人工智能等多学科领域具有重要研究价值，对保障我国海上活动安全、提高我国水下应急救援水平等具有重要实际意义。

目前，该前沿核心专利产出数量最多的国家是中国，核心专利平均被引数排名第一的国家是美国（表 2.2.5）。核心专利的主要产出国家之间没有合作。核心专利产出数量最多的机构是鬲虹（南京）科技有限公司。专利主要产出机构中，北部湾大学、广州市顺海造船有限公司、华南理工大学之间存在合作（图 2.2.5）。图 2.2.6 为“水下无人救援机器人”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.5 “水下无人救援机器人”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	178	96.22	454	88.67	2.55
2	美国	2	1.08	58	11.33	29.00
3	韩国	2	1.08	0	0.00	0.00
4	波兰	1	0.54	0	0.00	0.00
5	俄罗斯	1	0.54	0	0.00	0.00
6	土耳其	1	0.54	0	0.00	0.00

表 2.2.6　“水下无人救援机器人”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	翀虹 (南京) 科技有限公司	5	2.70	0	0.00	0.00
2	温州伊诺韦特科技有限公司	4	2.16	16	3.12	4.00
3	江苏科技大学	4	2.16	15	2.93	3.75
4	深圳高度创新技术有限公司	4	2.16	12	2.34	3.00
5	浙江创智果企业管理咨询有限公司	4	2.16	8	1.56	2.00
6	天海融合防务装备技术股份有限公司	3	1.62	25	4.88	8.33
7	桂林电子科技大学	3	1.62	17	3.32	5.67
8	北部湾大学	3	1.62	13	2.54	4.33
9	广州市顺海造船有限公司	3	1.62	13	2.54	4.33
10	华南理工大学	3	1.62	13	2.54	4.33

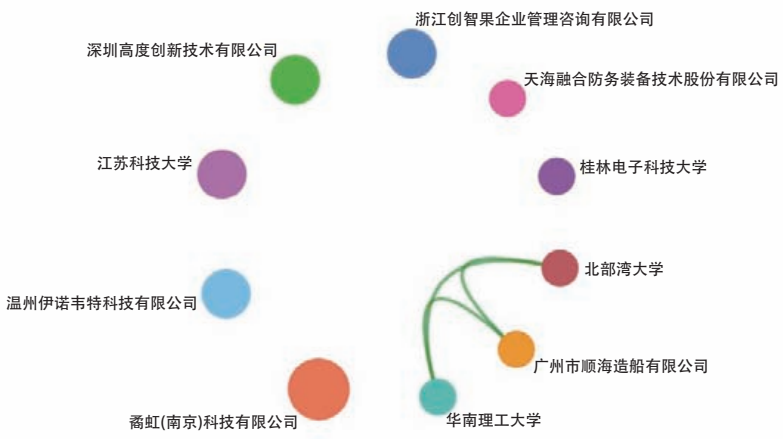

图 2.2.5　“水下无人救援机器人”工程开发前沿主要机构间的合作网络

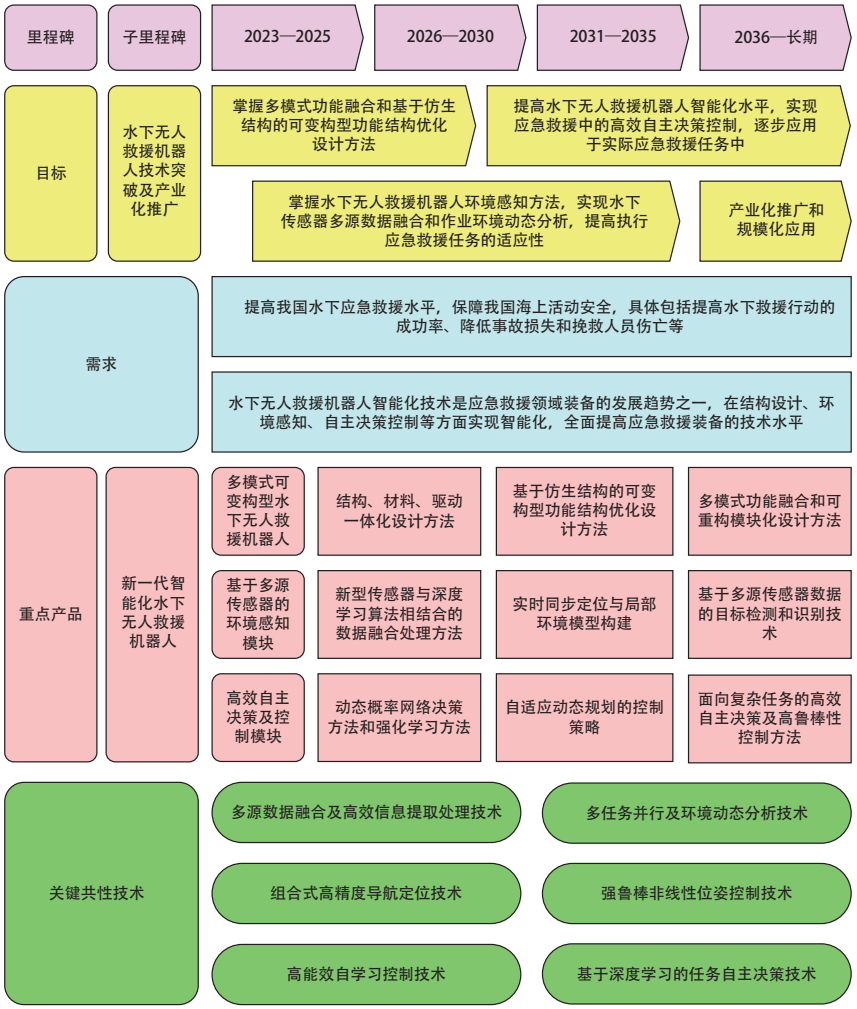

图 2.2.6　“水下无人救援机器人”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：李培根　郭东明

院士专家组：

尤　政　丁　汉　严新平　王树新　陈学东[1]　金东寒　朱　坤　王国庆　肖龙旭　葛世荣　陈学东[2]　单忠德

工作组：

史铁林　夏　奇　龙　胡　刘智勇　李仁府　华　林　王　宇　罗　欣　孙　博　黄永安　厉　侃

1　合肥通用机械研究院。
2　华中科技大学。

张　弛　梁健强　张　晖　闫春泽　向先波　李进华　陈雪峰　张小明　陶　波　刘晓伟　李宝仁
张建星　苑伟政　张海涛　黄志辉　丁佳宁　夏　凉　侯玉亮　李锡文　王学林　熊蔡华　陈文斌

执笔组成员：

李仁府　王　宇　罗　欣　黄永安　厉　侃　张　弛　张　晖　刘佳仑　闫春泽　向先波　侯增广
陈雪峰　张小明　陶　波　刘晓伟　李宝仁　张建星　苑伟政　张海涛　黄志辉　丁佳宁　侯玉亮
王学林　陈文斌　史铁林　陈惜曦

二、信息与电子工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“光电融合感存算器件与集成”为数据挖掘前沿；“卫星互联网组网理论与关键技术”“超大规模硅基量子芯片”“人工智能辅助软件自动开发”“多智能体系统体系化博弈与智能控制”“工业控制系统信息物理安全”“芯片化卫星激光通信终端”为专家提名前沿；其余为数据挖掘 & 专家提名前沿。各前沿涉及的核心论文 2017—2022 年发表情况见表 1.1.2。

（1）大模型及其计算系统理论与技术

大模型及其计算系统理论与技术是指大规模预训练模型的半监督 / 无监督基础学习理论和参数微调、强化学习等机制组成的高效计算技术，以及在此基础上的模型并行计算与分布式系统及其优化策略和部署方案。大模型是基于自监督等学习机制在大规模数据上进行预训练，具备强大的表示与泛化能力的模型，通常具有较大参数量。大模型摆脱了对大量标注数据的依赖，可通过在特定任务上模型微调、指令微调和上下文学习等方式服务于下游应用，并对多个不同应用场景下的任务具备通用的智能能力。大模型及其计算系统理论与技术的研究目前保持高速迭代，并快速渗透到自然语言、智慧医疗、多模态生成、自动驾驶等应用领域。大模型计算系统理论与技术为提升大模型性能、效率与泛化能力提供了动力与理论基础，主要研究方向包括大模型理论框架、大模型结构与训练机制，以及分布式训练与部署策略。大模型理论框架基于信息论和过参数化理论，研究涌现、同质化等新特性的解释理论，同时建模大模型的计算复杂性。结

表 1.1.1　信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	大模型及其计算系统理论与技术	34	2 231	65.62	2020.2
2	卫星互联网组网理论与关键技术	31	1 354	43.68	2020.5
3	超大规模硅基量子芯片	56	6 779	121.05	2019.7
4	光子集成的量子光源器件	63	4 188	66.48	2019.5
5	超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术	19	1 417	74.58	2019.7
6	光电融合感存算器件与集成	56	5 417	96.73	2020.8
7	人工智能辅助软件自动开发	37	586	15.84	2019.8
8	多智能体系统体系化博弈与智能控制	39	1 636	41.95	2019.8
9	工业控制系统信息物理安全	118	5 816	49.29	2019.9
10	芯片化卫星激光通信终端	111	3 047	27.45	2019.6

表 1.1.2　信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	大模型及其计算系统理论与技术	4	3	3	6	8	10
2	卫星互联网组网理论与关键技术	1	2	4	6	9	9
3	超大规模硅基量子芯片	10	6	8	11	11	10
4	光子集成的量子光源器件	10	11	11	11	9	11
5	超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术	2	3	4	3	3	4
6	光电融合感存算器件与集成	2	4	6	6	13	25
7	人工智能辅助软件自动开发	5	5	6	6	7	8
8	多智能体系统体系化博弈与智能控制	5	5	5	8	9	7
9	工业控制系统信息物理安全	10	17	22	22	22	25
10	芯片化卫星激光通信终端	9	25	22	18	14	23

构与训练机制方面的研究对大模型“预训练 + 泛化”的统一框架的计算系统进行优化，设计更高效的自监督机制，平衡模型拟合能力与复杂性。分布式训练与部署策略研究大模型的可扩展性提升方案，利用无服务器计算等方法将训练任务分布在云端多个计算节点，通过并行训练策略突破存储和计算资源的限制。大模型及其计算系统理论与技术未来发展仍需解决隐私安全、评测方法和部署效率三方面问题。首先，大模型的训练与部署需要更高效的加密与安全通信技术，并构建安全可信的计算方案。其次，需要自动化且通用的评估框架对大模型的能力边界、鲁棒性、纠偏能力进行基准测试。最后，大模型的实时性与训练能耗亟须进一步优化。

（2）卫星互联网组网理论与关键技术

卫星互联网是继固定通信网和移动通信网之后的第三次互联网革命。具体而言，卫星互联网是以卫星网络作为接入网的无线网络。一方面，卫星互联网突破了地面互联网的覆盖范围，实现了全球无缝覆盖。陆地面积只占全球面积的 29%，即使是在陆地上，地面互联网也只覆盖了部分城市和乡村地区，广大的海洋、沙漠、森林和山地等偏远地区并没有有效的无线覆盖。然而，在这些地区建设新的地面网络建设成本极高、维护难度极大，亟须以卫星网络作为接入网的卫星互联网。随着卫星制造、发射和通信成本的下降，利用卫星网络实现全球覆盖成为可能，这为建设卫星物联网创造了条件。另外，卫星互联网突破了原有的以人联为中心的网络形态，实现了真正的万物互联。近年来，随着经济社会的发展，海量无线设备需要接入无线网络。卫星互联网具有接入容量大、抗毁能力强和天气影响小的优点，为全球范围的物物互联创造了条件。

根据卫星轨道高度的不同，卫星网络通常分为低轨、中轨和高轨三类。低轨卫星网络轨道低，具有较低的传输时延和损耗，通常作为卫星互联网的接入网。例如，美国 SpaceX 公司的星链（Starlink）互联网采用 500 千米左右的轨道高度。但是，低轨卫星移动速度快，一颗卫星的可视时间很小。为了实现全球的无缝覆盖，需要部署大量的低轨卫星进行组网，即低轨卫星星座。近年来，学术界和工业界在卫星互联网的组网理论和关键技术方面开展了大量的工作，取得了重要的突破，主要包括星间通信技术、卫星网络协议、弹性路由协议和移动性管理等。特别是手机直连卫星通信技术的引入，进一步改进了卫星互联网的组网方式，显著增强了卫星互联网的功能。首先，卫星互联网摆脱了对地面设备的依赖，极大地增强了移动

性，真正实现了全球范围的移动接入。其次，现有手机也可以直接接入卫星互联网，实现了向下兼容。最后，卫星互联网与地面网络的协同，达到了天地一体的目标。

（3）超大规模硅基量子芯片

量子计算机有望超越经典计算机为人类带来更高的算力，而负责计算和信息处理的量子芯片是其中的核心。量子芯片将量子线路紧密集成到基底上，是发展量子技术的关键组件。与经典芯片中的二进制不同，量子芯片利用量子特性极大地增加了计算的并行性和处理复杂问题的能力。超大规模量子芯片指的是可以容纳数百万个量子比特的芯片，它们是实现通用容错量子计算机的必要条件。考虑到经典计算芯片目前已可容纳数十亿个晶体管，同时集成电路产业拥有成熟的制造技术和基础设施，基于互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺实现的超大规模硅基量子芯片具有天然的扩展性优势，逐渐成为国际量子计算领域的研究热点。

目前，硅基量子芯片的发展涵盖多种路线。其中之一是将量子信息编码至栅控硅基量子点内的电子（空穴）自旋或嵌入硅的磷核自旋上。目前已实现保真度远高于纠错阈值的单量子比特门和双量子比特门，并且成功构建了含有 6 个量子比特的量子处理器。未来硅基自旋量子比特的发展将着重解决长程耦合和高保真度均一性的问题。此外，借助硅基光子集成工艺也可以实现光量子计算和量子通信。目前已在高维度量子纠缠态、量子密钥分发和隐形传态等领域取得显著突破。未来硅光量子技术的发展需要将量子光源、量子态操控器件和单光子探测器等紧凑地集成至单一芯片中，并降低器件损耗。这些进展为在硅基材料上实现量子计算和通信铺平了道路，未来硅基量子芯片将会持续向着大规模、应用化方向发展。

（4）光子集成的量子光源器件

光子集成的量子光源器件是指基于平面波导光子集成技术实现的用于量子光学探测、传感、测量、通信等功能的光学器件。近年来在量子光学领域中，利用激光与原子相互作用原理实现新方法和新技术的研究越来越受到重视，特别是将 509 nm、633 nm、780 nm、795 nm、852 nm、976 nm、1 064 nm、1 083 nm、1 310 nm、1 550 nm 等波长激光器应用于光学原子钟、里德堡探测、量子磁探仪、量子陀螺仪、量子通信等已经成为主流。传统用来产生以上波长激光的量子光源器件，以气体、固体激光器或光纤激光器为主，其体积庞大、操作复杂、能耗比低、可靠性不足，难以应对当前空天地海通信、传感、探测等复杂多样应用环境的要求。半导体激光器因其体积小、效率高等特点，非常适合空天地海应用环境，并且具有可直接光电转换、与半导体工艺兼容等优势，能够实现光子集成的量子光源器件。

但是，半导体激光器因谐振腔规模和波导尺寸方面的限制，其光谱噪声高、光束质量差，难以满足量子光学对激光光谱纯度、波长准确度和频率稳定度的要求，因此需要借助外部的光学选频芯片，并通过适当的光学反馈方式，实现对内部激光谐振腔模式的诱导，从而达到激光线宽压窄、噪声抑制和光谱纯化的目的。对于从可见光延伸到近红外的多谱段量子光源，不仅需要解决不同材料体系半导体激光器外延生长、光栅制备、波导刻蚀、腔面镀膜等问题，还需要解决外部光学选频芯片的结构设计与光学反馈的模式损耗控制等问题。

除此之外，为保证波长准确度和频率稳定度，需要针对不同材料体系，为半导体激光器设计专门的电流 / 温度驱动控制电路。在量子光学中激光频率标准源是最常用的光源器件，为了达到更高的频率稳定性，通常需要利用高精度的驱动控制电路以及原子气室，构建半导体激光器的反馈稳频系统，从而将后者的输出频率锁定到原子或分子跃迁的能级上。但是用于提供跃迁原子的气室体积较大，并且与半导体工艺不兼容，如何实现集成化的半导体激光器的反馈稳频系统，是未来相关领域必须解决的关键难题。

（5）超大规模超宽带天线阵列通信理论与技术

超大规模超宽带天线阵列技术是指同时利用超宽带技术及超大规模天线阵列，从扩大带宽、增加天线数两方面出发，实现提高信道容量、进而提升信息传输速率目标的技术。厘米波、毫米波及太赫兹频段可提供数百兆赫兹甚至吉赫兹量级的超大带宽，并且由于相应频段内载波波长短，天线尺寸小，因此支持数量级式提升基站天线数，形成超大规模阵列。超大规模与超宽带技术相辅相成，是满足 6G 信息传输速率需求的有效手段。

频谱是移动通信系统的重要资源之一，随着通信技术的发展，通信系统频段逐步升高、带宽逐渐增大。5G 毫米波频段的研究已形成较为成熟的通信系统模型及传输方案；6G 早期研究重点关注 100 GHz 以上的太赫兹频段，以提供超大带宽，因其具有高路径损耗、信道空间非平稳等特性，多数研究致力于降低太赫兹信道建模的复杂性并提高准确性。然而，随着频率的增加，路径损耗加剧，覆盖性能受限。2022 年，3GPP RAN 第 96 次会议正式将 6 425~7 125 MHz 频段定义为 U6G 授权频谱，并决议通过针对全 6 GHz 频谱（5 925~7 125 MHz）的 Release 18 立项工作。2023 年，中国工业和信息化部发布了新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》，将 U6G 频段应用于 IMT（含 5G/6G）系统。该频段路径损耗相对较小，电磁波绕射、穿透能力强，具有良好的无线覆盖性能。由于 U6G 受关注时长有限，截至目前，学术界和工业界对其的研究均较为匮乏，其信道模型暂不明确，为当前阶段关注重点。

不同频段下，超大规模天线阵列系统的信道特性尚未被完全挖掘，所以信道测量及建模是超大规模目前主要的研究方向之一。超大规模信道已被证实具有空间非平稳特性，具体表现在用户所发射的无线信号在到达超大规模天线阵列时形成球面波前，同时信道能量只集中于维度大幅降低的部分子阵列。多数研究基于这一特性进行信道估计、预编码技术、收发信机等传输设计。此外，由于天线数量庞大，超大规模天线阵列系统的射频、功耗和复杂度不容忽视，未来研究需致力于探索低成本系统架构和低复杂度传输方案。

（6）光电融合感存算器件与集成

光电融合感存算器件与集成是指将传感、存储、计算功能融合到光电协同作用器件中，并进一步规模化集成。光电融合感存算系统旨在打破传统冯·诺依曼存储、计算分离的计算架构所造成的速度和功耗限制，并融合光电传感功能，有助于发展更加智能化、高能效的计算系统。三位合一的光电融合感存算器件作为新兴的智能器件，能够模拟人类视网膜和大脑的工作方式，通过引入光电材料，利用光子调控载流子、离子的输运特性，使得器件在电导率、光响应率参量方面具有高度的可调特性。通过整合光学感知、信息存储和逻辑计算等功能，可以极大地提升图像数据处理速度和能效。

传统机器视觉系统由于数据在传感、内存和处理单元之间的反复搬运，导致高能耗和高延迟，难以满足海量视觉信息实时处理的需求。光电融合感存算技术在云计算、人工智能（AI）、物联网背景下迎来了巨大的发展机遇，在无人驾驶、可穿戴、智能家居等方面具有丰富广泛的应用场景，可实现更高效的机器视觉和类脑计算。

虽然光电融合感存算技术应用前景广阔，但在性能、精准、高效等方面仍存在众多挑战，例如：开发新型功能复合材料实现宽光谱响应，构筑高量子效率的感存算器件；探索晶圆级加工工艺，实现器件的高密度集成；构建智能光电融合感存算系统，完成高阶的信息任务。

（7）人工智能辅助软件自动开发

人工智能辅助软件自动开发是指利用人工智能技术来辅助、加速和优化软件开发过程。其核心目标是

通过智能化手段，减少开发人员工作负担，提高软件开发效率和质量。近年来，其主要研究方向包括：① 自动化需求分析，通过机器学习和自然语言处理技术，将用户提供的自然语言需求自动转换为机器可直接理解 / 分析的需求模型，并对其进行自动分析，这可以帮助开发人员更准确地理解和捕捉用户需求，并减少需求理解上的误差；② 自动化设计和编码，利用机器学习和自然语言处理技术，自动生成设计或代码片段、函数甚至整个模块，这有助于减少手工设计或编码工作量，加速开发过程；③ 自动化测试，利用人工智能技术自动生成测试用例，提高软件测试的覆盖率和缺陷检测能力，从而提升软件质量；④ 自动化集成和部署，可以将开发人员手动编写的代码和自动生成的代码自动集成到一起，并将其自动部署到生产环境中，提高软件交付效率和稳定性；⑤ 智能推荐系统，根据开发人员的开发历史数据和项目需求，推荐适合当前开发上下文的代码、工具和技术等，提高开发人员的开发效率。

从大方向上看，有以下几方面发展趋势。一是编码智能化。代码生成将变得更加智能化和符合开发人员意图，减少后续调整和修改。也可以根据不同项目的特点和需求，自动选择最合适的开发策略和工具，提供更加灵活和高效的智能化开发服务。二是运维自适应。能够根据用户反馈和运维数据变化，不断优化和改进软件运行过程，提升运行质量。三是开发协同化。通过自然语言处理和智能对话技术，与更多开发人员、测试人员和领域专家实时交互和沟通，促进跨领域合作，提供更加友好和高效的开发体验，创造更加全面和优化的解决方案。四是伦理和安全问题隐蔽化。随着开发自动化程度提高，开发人员需要更多关注随之而来的偏隐蔽的伦理问题和安全问题，确保自动生成的代码和决策是可靠、安全的。

（8）多智能体系统体系化博弈与智能控制

多智能体系统体系化博弈与智能控制是指智能体之间通过博弈过程和交互策略，结合智能控制方法，调整智能体的行为和优化系统参数，使系统达成个体利益的平衡和群体利益的最大化。其面临着系统结构复杂、博弈环境不确定、决策信息不完整、结果不可解释等挑战。对此，当前研究热点聚焦于：① 多智能体组织化体系化博弈理论模型，运用并结合多种人工智能学习算法，探索多智能体系统的博弈演化规律；② 多层次、多尺度、多模式、非线性、不确定时变动态系统的建模，实现多智能体分析、模拟、预测、优化和控制；③ 多智能体自主导航与集群协同，应对不确定环境、不完备决策信息、受限制通信情况下多智能体自主化、智能化、规模化难题；④ 多智能体系统中的决策过程，包括合作协商、资源分配、任务分工等，实现智能体之间的有效协作与决策；⑤ 多智能体算法模型的鲁棒性分析框架，降低协同决策算法复杂度，解决数据驱动方法与实际场景存在的模型偏差。

从大方向上看，以下几方面有待进一步探索：① 提高多智能体系统的可解释性和可控性，使系统的行为和决策更易理解与调节，增加系统的可靠性和安全性；② 博弈论、多智能体学习与控制论的进一步深度融合，深化博弈论和智能控制方法，提升系统的整体性能和智能程度；③ 博弈、学习与控制的交叉研究在一些新兴领域（如智能交通、物流管理）的应用。

（9）工业控制系统信息物理安全

工业控制系统（简称工控系统）是由多种自动化采集、监测、控制组件组成的用于工业基础设施自动化运行和监管的系统。工控系统主要分为数据采集与监控系统、分布式控制系统以及可编程控制器。目前，工控系统已成为工业生产、智能电网、智慧交通等国家关键基础设施的神经中枢与运行中心。由于工控系统的重要性与开放互联性，其已成为恶意威胁的首要目标之一。随着攻击者漏洞发现能力与攻击技术的不断提升，工控系统信息物理安全问题日益严峻，其主要指攻击者利用工控系统信息物理融合特性，进而在

信息域与物理域实施协同攻击所带来的“所见非所得，所得非所行”安全困境。例如，攻击者能够通过渗透隔离、入侵检测等信息安全手段，突破冗余容错、安全连锁等物理安全防护机制，贯穿系统监测层、控制层与执行层，对工控系统实施精准打击。这种信息物理融合的安全威胁不仅具备“穿透”信息安全防护手段的可能，还能够利用工控系统的业务特性有针对性地设计具有强协作性和高隐蔽性的恶意数据篡改与欺骗机制。这对工控系统的安全防护提出了巨大的挑战。

目前，工控系统信息物理安全相关研究主要集中在以下三大方面：① 攻击者能力建模 / 系统脆弱性分析，站在攻击者角度针对工控系统的架构、协议、控制等设计攻击策略，以构建攻击者模型，实现对工控系统的脆弱性分析；② 攻击检测，通过被动收集系统动态运行数据或主动添加动态认证信息，构建系统正常运行特征模态用以检测恶意攻击行为；③ 攻击防御，包括识别恶意攻击节点、移动目标防御、弹性安全控制等防御策略。未来，将进一步面向工控系统大规模、多层级、强耦合等特性开展脆弱性分析与安全防护研究，以实现工控系统的防护升级。

（10）芯片化卫星激光通信终端

卫星激光通信具备大带宽、高速率、发射能量集中、抗干扰抗截获能力强等优势，是当前世界各国争相攻克的空间网络技术制高点。芯片化卫星激光通信终端是通过光电集成技术实现卫星激光通信功能的微型设备，它将光电通信器件、电子控制单元等功能全部或部分集成到芯片中，具备体积小、质量轻、功耗低、传输效率高的特点，能够满足高速通信、数据传输、卫星组网等多样化的通信需求。近年来，其主要研究方向包括：① 异质异构光电子集成技术，优化绝缘体上硅（SOI）、硅基薄膜铌酸锂（LNOI）、氮化硅（Si_3N_4）、磷化铟（InP）等材料体系上的集成芯片设计和制造工艺，提高芯片性能；② 高速激光通信技术，解决激光通信的调制、解调、编解码、信号处理等关键问题，以提高通信速率和传输距离；③ 激光终端可靠性优化技术，改进信号抗干扰能力、温度和辐照等环境适应能力，提高稳定性和寿命。未来，芯片化卫星激光通信终端将进一步集成化，实现更高的传输速率、更远的通信距离、更高的可靠性、更小、更轻、更低功耗，并面向多功能和网络化通信，实现兼容性和互操作性的提升，推动芯片化卫星激光通信终端在导航、中继通信、地球观测、深空探测、低轨互联网星座等多个领域的广泛应用。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　大模型及其计算系统理论与技术

大模型及其计算系统通过在大规模无标注数据中学习数据的特征表示，对包含较大参数量的模型进行预训练，具有通用能力强、适用场景广、对标注数据依赖小等优点。然而，由于目前大模型可解释能力差，高度依赖训练数据，训练与部署成本高，大模型及其计算系统理论与技术亟须在理论框架、结构设计、训练与部署策略三方面突破。

首先，在大模型理论框架方面，主要有两大趋势。一是在大模型研究中融合信息论与过参数化理论，探索 GPT 等大模型表达能力的理论极限。二是将图论相关概念引入大模型训练过程的理论分析，如使用超图解释和提升大模型无监督箱式预训练过程的稳定性。该方向的主要研究机构包括哈佛大学、清华大学、浙江大学、海康威视数字技术股份有限公司、华沙大学等。

其次，在大模型结构设计方面，一个重要的发展方向是将大模型结构与迁移学习策略绑定，解决未经

过滤的数据导致的大模型退化和偏见现象，从而提升大模型预测能力的可靠性，另一个发展方向是在模型设计中引入“提示编程（prompt programming）”概念，降低大模型在底层和中层特征的过拟合，通过精心设计的提示（prompt）引导模型更好地理解和执行特定任务。该方向的主要研究机构包括 Facebook 人工智能研究院、首尔大学、高雄科技大学等。

最后，在大模型训练与部署策略方面，利用 McDRAM 等新型硬件提升大模型推理的实时性、降低部署过程的能耗，是实现在边缘设备上部署大模型的潜在技术。同时，利用近似计算（approximate computing）技术加速大模型推理过程，或设计针对大模型的定制化二值化策略和量化方法，在未来可能有效提升大模型推理速度并节省计算资源。该方向的主要研究机构包括不来梅大学、新加坡国立大学、华为技术有限公司（以下简称华为）、悉尼大学等。

“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 1.2.1。美国核心论文数排名第一，约占总论文数的三分之一。中国仅次于美国，但论文平均出版年较晚，处于快速追赶状态。中国的合作对象主要是美国和澳大利亚（图 1.2.1）。排名前十的核心论文产出机构（表 1.2.2）中，有 4 家机构来自中国，其余分布在美国、澳大利亚、新加坡等国家。在机构合作（图 1.2.2）方面，中国的三家机构与悉尼大学合作较为密切，同时中国的三家机构相互合作较为密切。施引核心论文（表 1.2.3）方面，中国排名第一（占比为 44.56%），第二名是美国，其余国家占比均低于 10%；排名前十的施引核心论文产出机构（表 1.2.4）中，除排名第七的哈佛大学外，其余都来自中国，体现了中国科研机构对大模型及其计算系统理论与技术的高度关注。

在过去 5 年中，大模型及其计算系统理论与技术取得了诸多研究成果。然而，从整个领域的发展进程看，其应用与研究仍处于起步阶段，仍存在众多亟待解决的关键瓶颈问题。如图 1.2.3 所示，未来 5~10 年的重点发展方向包括如下几个方面。

第一，模型压缩与分布式训练。当前，以 ChatGPT 为代表的大模型包含了百亿以上的参数，它们在计算资源和存储方面需求巨大，未来发展方向包括更高效的模型压缩和加速技术，以减少模型的参数规模和计算成本，提高其在笔记本式计算机、手机等边缘设备上的部署效率，实现多种计算场景中的实时推断和

表 1.2.1　“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	11	32.35	1 664	151.27	2019.0
2	中国	9	26.47	419	46.56	2021.0
3	澳大利亚	3	8.82	410	136.67	2019.3
4	德国	3	8.82	129	43.00	2019.3
5	英国	3	8.82	14	4.67	2022.0
6	波兰	2	5.88	63	31.50	2021.0
7	新加坡	2	5.88	14	7.00	2020.0
8	印度	2	5.88	11	5.50	2020.5
9	沙特阿拉伯	1	2.94	51	51.00	2019.0
10	韩国	1	2.94	18	18.00	2020.0

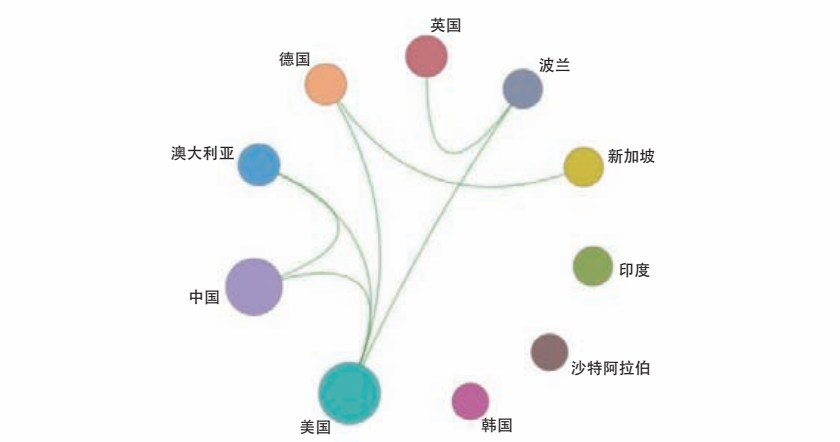

图 1.2.1　“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2　“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	Facebook 人工智能研究院	2	5.88	1 320	660.00	2019.0
2	悉尼大学	2	5.88	396	198.00	2019.0
3	哈佛大学	2	5.88	118	59.00	2019.0
4	华沙大学	2	5.88	63	31.50	2021.0
5	浙江大学	2	5.88	18	9.00	2021.5
6	新加坡国立大学	2	5.88	14	7.00	2020.0
7	华为技术有限公司	1	2.94	346	346.00	2021.0
8	北京大学	1	2.94	346	346.00	2021.0
9	鹏城实验室	1	2.94	346	346.00	2021.0
10	柏林洪堡大学	1	2.94	113	113.00	2017.0

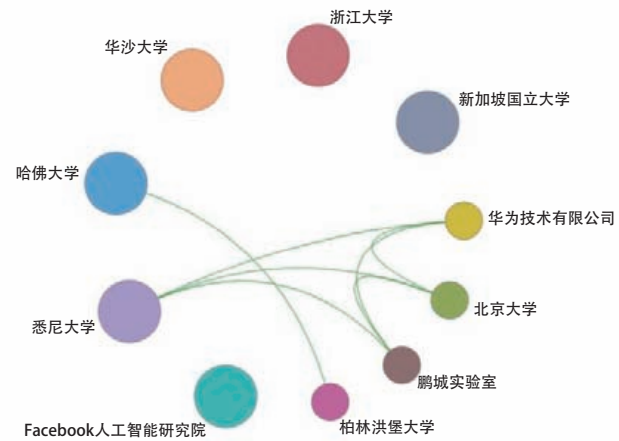

图 1.2.2　“大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 089	44.56	2021.4
2	美国	557	22.79	2021.0
3	韩国	142	5.81	2021.3
4	英国	125	5.11	2021.2
5	德国	106	4.34	2021.1
6	加拿大	86	3.52	2020.9
7	澳大利亚	83	3.40	2021.3
8	印度	79	3.23	2021.6
9	日本	76	3.11	2021.1
10	法国	55	2.25	2021.0

表 1.2.4 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	103	22.01	2021.3
2	清华大学	54	11.54	2021.3
3	北京大学	43	9.19	2021.3
4	上海交通大学	42	8.97	2021.3
5	浙江大学	37	7.91	2021.3
6	香港中文大学	34	7.26	2020.5
7	哈佛大学	34	7.26	2020.3
8	电子科技大学	33	7.05	2021.2
9	武汉大学	33	7.05	2021.6
10	哈尔滨工业大学	28	5.98	2021.7

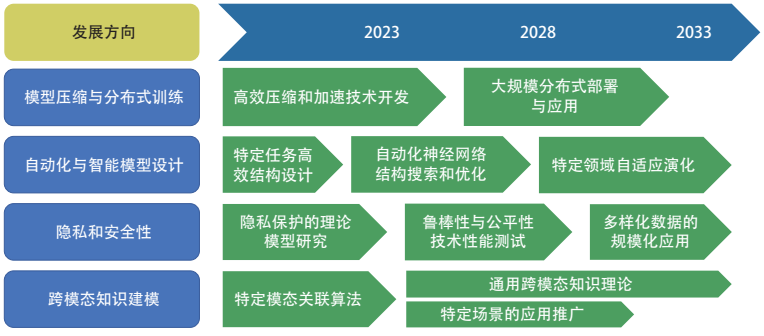

图 1.2.3 “大模型及其计算系统理论与技术”工程研究前沿的发展路线

决策。另外，随着模型规模的不断增大，大模型的分布式训练和协同学习将变得更加重要，新的分布式训练策略和技术将有助于加快模型训练速度，同时保持模型性能。

第二，自动化和更智能的模型设计。目前，谷歌、微软等大型企业均依靠其强大的计算资源设计了T5、Kosmos 等多人—多出大模型结构。然而，利用强化学习、进化算法等方法同样可以自动设计出适用于特定任务的高效模型结构，因此自动化的神经架构搜索和模型优化技术未来在大模型领域将得到更大的发展。除了 OpenAI 的 ChatGPT、微软的 MASS、华为的盘古、百度的文心一言、智源的悟道等通用领域的预训练模型，未来必然要求更多针对医疗、金融等特定领域的预训练模型。

第三，隐私和安全性。随着 ChatGPT 在线对话、Dell-E 图文生成等大模型应用不断增多，大模型的隐私性问题也逐渐引起更多关注。未来研究方向包括如何在保护用户数据隐私的同时保持模型的高性能。安全性方面，针对大模型的鲁棒性和公平性问题也将成为研究重点，包括如何让模型在多样化的数据上表现良好，并且避免对不同群体产生偏见。

第四，跨模态知识的建模与推理。尽管现有技术已经实现图像、文字、音频等多模态数据之间的相互关联与生成，但面对蛋白质结构、实时自动驾驶、多方博弈等更复杂和更抽象的推理场景时，白玉兰科学大模型、盘古大模型、Uni-RNA、MathGPT、MathPrompter 等现有技术仍只能依据大量训练数据中的归纳关联进行解答。为使大模型更贴近人类智能，未来的研究重点包括：① 对跨模态大模型的知识进行量化建模与表达；② 探索大模型的推理决策与知识表征的关系；③ 探索大模型多模态知识的可推理性与可解释性。

1.2.2　卫星互联网组网理论与关键技术

卫星互联网是互联网领域一场新的变革，具有“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信”的特点，为实现全球万物互联的愿景提供了强大支撑，因而受到各国的重视。20 世纪 90 年代，美国摩托罗拉公司就建立了铱星系统，其由 66 颗低轨卫星构成，具有星间链路和星上处理能力。与此同时，美国劳拉公司和高通公司建设了全球星系统，其包含 48 颗低轨卫星，每颗卫星采用透明转发。由于商业上的原因，这两个卫星互联网系统都经历了破产重组。在一段时间的低谷后，最近几年卫星互联网进入第二次热潮，并且规模更加庞大。2017 年，英国一网公司提出 OneWeb 计划，规划发射 1 980 颗卫星，形成覆盖全球的低轨星座。美国 SpaceX 公司更是计划发射 4.2 万颗低轨卫星构成星链（Starlink），支持全球范围内的高速移动通信。近年来，中国也在抓紧开展卫星互联网的建设。例如，中国航天科技集团设计的“鸿雁星座”由 324 颗卫星组成，而中国航天科工集团的“虹云星座”包含 156 颗卫星。

虽然卫星互联网经历了快速发展，但在网络架构、路由协议、星间通信、移动性管理等方面还存在诸多挑战性问题，有待取得新的突破。

1）在网络架构方面，目前存在两种主流网络架构。一种是国际移动通信标准化组织 3GPP 主导的非地面网络（non-terrestrial network, NTN）。这一网络架构与地面蜂窝网络相互兼容，是整个 6G 网络的重要组成部分，并且可以实现与现有地面网络的相互兼容，具有开放性。另一种是由 SpaceX 公司专为“星链”设计的网络架构，这一网络架构具有封闭性。该方向的主要研究机构包括哈尔滨工业大学、中国科学院、早稻田大学、华为等。

2）在路由协议方面，由于卫星网络的高度动态性，卫星位置处于不断变化中，地面网络的路由协议不再适用，因而需要设计新的弹性路由协议。其基本思想是利用星座运动的规律性，将真实卫星节点与虚

拟节点映射，当卫星移动或地面终端进行切换时，虚拟节点之间的路由表在物理节点之间交换，从而完成路由信息交换。该方向的主要研究机构包括萨里大学、SpaceX 公司、北京邮电大学、西安电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学等。

3）在星间通信方面，主要存在两个发展趋势。一是星间微波通信，目前已得到较多应用，技术成熟度高。但是，微波通信具有频段容量有限、难以满足高速通信要求、同频干扰严重等问题。二是星间激光通信，这是新一代卫星互联网普遍采用的星间通信方式。相比于微波通信，激光通信具有带宽大、通信载荷小、抗干扰、保密性强等优点。该方向的主要研究机构包括萨里大学、SpaceX 公司、中国科学院、北京邮电大学、电子科技大学和浙江大学。

4）在移动性管理方面，一是采用集中式移动性管理，即使用本地代理对终端进行管理，终端每次发起位置更新时都要向本地代理传输消息；二是采用分布式移动性管理，其将全球分为多个区，每个区由覆盖该位置区的卫星群来构成虚拟网关，终端向位置区所在网关进行注册，从而可以满足大规模卫星网络的移动性管理。该方向的主要研究机构包括鹏城实验室、东南大学、卢森堡大学、华为和中兴公司。

该前沿核心论文的主要产出国家见表 1.2.5。中国优势明显，核心论文数排名第一，占比超过 67%，并且与日本、英国、沙特阿拉伯、韩国、加拿大、澳大利亚和挪威都有合作（图 1.2.4）。排名前十的核心论文产出机构（表 1.2.6）中，中国科学院和哈尔滨工业大学并列第一；有 7 家机构来自中国，其余分布在沙特阿拉伯、日本和卢森堡。在机构合作（图 1.2.5）方面，阿卜杜勒阿齐兹国王大学、早稻田大学和西安邮电大学有密切合作。施引核心论文（表 1.2.7）方面，中国仍然排名第一，占比超过 50%，其余国家占比均低于 10%；排名前十的施引核心论文产出机构（表 1.2.8）中，除排名第六的早稻田大学外，其余都来自中国，体现了中国在该方向强劲的研究实力。

目前，卫星互联网已受到各主要国家的高度重视，正以前所未有的速度发展。图 1.2.6 为该前沿的发展路线。以下继续围绕网络架构、路由协议、星间通信和移动性管理 4 个方面概述其发展方向。在网络架构方面，NTN 网络架构目前正处于商讨和标准制定阶段，预计将于 2027 年全面制定并实现商用。在路由协议方面，目前采用的固定路由协议存在固有缺陷，严重制约了网络规模和性能，而弹性网络协议正在逐

表 1.2.5　“卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	21	67.74	1 097	52.24	2020.4
2	日本	4	12.90	350	87.50	2020.8
3	英国	4	12.90	139	34.75	2021.5
4	沙特阿拉伯	3	9.68	141	47.00	2021.3
5	意大利	3	9.68	119	39.67	2020.7
6	韩国	3	9.68	57	19.00	2021.0
7	加拿大	3	9.68	16	5.33	2022.0
8	澳大利亚	2	6.45	72	36.00	2020.5
9	卢森堡	2	6.45	49	24.50	2020.0
10	挪威	1	3.23	89	89.00	2020.0

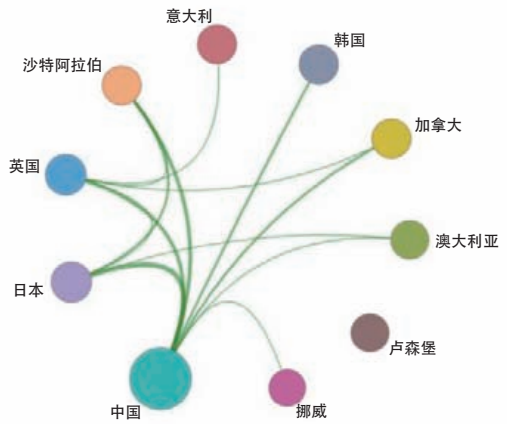

图 1.2.4　“卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	3	9.68	154	51.33	2019.0
2	哈尔滨工业大学	3	9.68	91	30.33	2020.3
3	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
4	早稻田大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
5	西安邮电大学	2	6.45	137	68.50	2021.0
6	北京理工大学	2	6.45	102	51.00	2021.0
7	鹏城实验室	2	6.45	87	43.50	2019.5
8	西安电子科技大学	2	6.45	71	35.50	2020.5
9	北京邮电大学	2	6.45	63	31.50	2021.0
10	卢森堡大学	2	6.45	49	24.50	2020.0

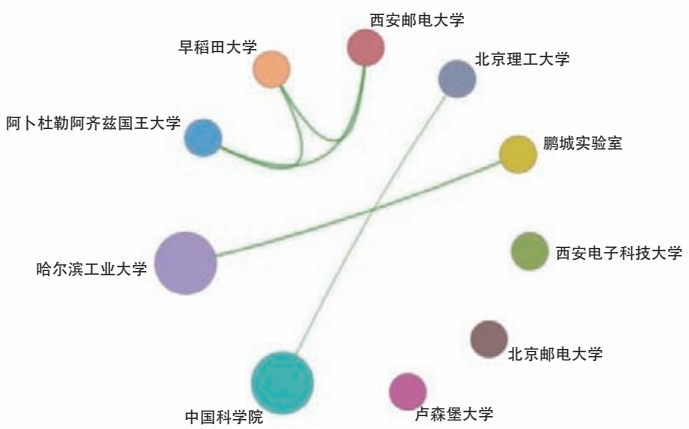

图 1.2.5　“卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	667	51.91	2021.3
2	加拿大	100	7.78	2021.5
3	美国	87	6.77	2021.3
4	英国	77	5.99	2021.3
5	日本	67	5.21	2021.5
6	印度	64	4.98	2021.6
7	韩国	53	4.12	2021.7
8	沙特阿拉伯	48	3.74	2021.6
9	澳大利亚	48	3.74	2021.4
10	意大利	41	3.19	2021.0

表 1.2.8 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	哈尔滨工业大学	70	16.09	2021.2
2	北京邮电大学	63	14.48	2021.0
3	西安电子科技大学	44	10.11	2021.5
4	鹏城实验室	39	8.97	2021.4
5	中国科学院	37	8.51	2021.2
6	早稻田大学	34	7.82	2021.6
7	东南大学	32	7.36	2021.2
8	北京理工大学	30	6.90	2021.6
9	中国人民解放军国防科技大学	30	6.90	2021.1
10	电子科技大学	29	6.67	2021.4

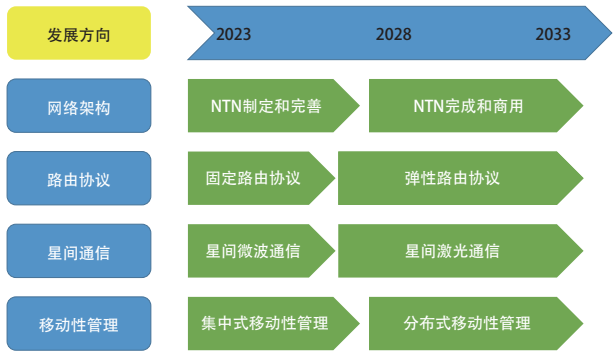

图 1.2.6 “卫星互联网组网理论与关键技术”工程研究前沿的发展路线

步完善中，预计在 2026 年左右成熟。在星间通信方面，现在使用的微波通信存在速率低和干扰强的问题，正在逐步被星间激光通信代替，预计在 2026 年左右完成替代。在移动性管理方面，集中式管理存在信令开销大和传输时延高的问题，因而正在向分布式管理过渡。卫星互联网的发展趋势：一是从以通信为主向通信、导航和遥感一体化发展，实现多功能卫星互联网的功能；二是从地面设备辅助接入向手机直连卫星通信发展，实现随遇接入的目标；三是从卫星互联网向卫星物联网发展，实现万物互联的愿景。卫星互联网目前已在应急通信、偏远地区通信和物流通信等场景得到应用，随着卫星互联网的快速发展，未来将在经济、社会、军事等领域得到广泛应用。

1.2.3　超大规模硅基量子芯片

量子芯片是利用量子力学原理设计和制造的芯片，可用于量子计算和量子通信。与经典芯片采用二进制比特不同，量子芯片利用量子比特作为其基本信息单元。量子比特可以同时处于 0 和 1 的叠加态，通过纠缠在多个量子比特之间共享信息。这使得量子芯片在某些特定问题上具有潜在的巨大优势，能够以更快的速度解决一些经典计算机难以处理的问题，如大数分解、量子模拟和优化问题等。由于量子比特的脆弱性，容易受到周围不可控的环境影响而被破坏，因此制造和操作量子芯片是一项极具挑战的任务。一台通用量子计算机往往需要数百万个量子比特来进行量子纠错，以实现所需的量子优势。然而，单就量子比特数目而言，目前采用的多种物理实现路线，如超导电路、金刚石氮空位色心、俘获离子等技术，仍无法满足需求。因此，制造超大规模量子芯片成为实现通用量子计算机的关键挑战。鉴于传统半导体工业已经成功制造出容纳数十亿个晶体管的芯片，将硅微电子技术与量子技术融合有望在现有的半导体制造基础上构建起量子计算平台。硅基量子芯片与传统半导体工艺的兼容性使其在生产成本、规模化制造以及集成度等方面天然具备优势。这令大规模硅基量子芯片逐渐成为量子计算领域的研究热点，为实现量子计算机的可行性和可扩展性提供了一条前景广阔的道路。

目前，硅基量子芯片呈现出多条发展路线。一条路线是将量子信息编码至栅控硅基量子点内的电子（空穴）自旋，或嵌入硅中的掺杂磷核自旋上。在 1998 年，理论物理学家预测了硅纳米结构中自旋可以承载量子信息，标志着一场实验研究竞赛的开始。通过对单个电子自旋的操控和测量，可以实现单量子比特的操作。而利用两个自旋之间的交换相互作用，可以实现双量子比特门操作。最初的实验采用Ⅲ – Ⅴ族半导体，但不可避免的超精细相互作用阻碍了其进一步发展。2013 年，几个课题组同时报道了硅基自旋量子比特的突破。这是因为硅可以通过同位素提纯来抑制超精细相互作用，从而显著提高保真度。目前已经实现保真度远高于纠错阈值的单量子比特门和双量子比特门。同时由于硅基量子点和掺杂原子的纳米级物理尺寸，以及与现代集成电路技术兼容，可以在合理的芯片尺寸内扩展为大规模量子比特阵列。目前已经实现包含 6 个量子比特的量子处理器，并且展示了一维和二维构型的更大量子点平台。

另一条路线是利用硅基光子集成工艺来实现光子间的量子纠缠和量子态的操控，进而实现量子计算和量子通信。较长的退相干时间、多自由度、无需真空和低温等优势使得光量子技术脱颖而出。相比于体积庞大、不稳定、可扩展性差的传统光学仪器，利用 CMOS 微纳制造技术制备的硅基光量子芯片具有高集成度、高稳定性、强可控性、易扩展性等优点。目前已经实现单个芯片上数百个光学元件的集成，同时有望单片集成各种核心光量子功能器件，包括量子光源、量子操控光路、单光子探测器等。近年来，硅基光量子芯片在玻色采样、多光子高维度量子纠缠态、量子密钥分发和隐形传态等领域取得显著突破。

近年来，超大规模硅基量子芯片领域取得众多核心研究成果。其核心论文的主要产出国家和主要产出机构情况见表 1.2.9 和表 1.2.10。美国、英国和荷兰在核心论文数方面位居前三名。主要产出机构包括代尔夫特科技大学、布里斯托大学、北京大学等。另外，许多核心论文是由不同国家的不同研究机构合作完成的，其中主要产出国家及主要产出机构间的合作网络分别见图 1.2.7 和图 1.2.8。表 1.2.11 和表 1.2.12 分别列出该领域施引核心论文的主要产出国家和主要产出机构。中国科学院和中国科学技术大学位居前两位，体现了中国对该方向较高的关注度。

从整个领域的发展进程来看，超大规模硅基量子芯片仍处于起步阶段，存在众多亟待解决的关键性问题。如图 1.2.9 所示，超大规模硅基量子芯片领域未来将着重围绕以下几个关键方向发展。

表 1.2.9　“超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	24	42.86	3 059	127.46	2019.7
2	英国	15	26.79	2 436	162.40	2018.7
3	荷兰	13	23.21	2 135	164.23	2019.5
4	澳大利亚	12	21.43	1 441	120.08	2019.7
5	中国	11	19.64	1 603	145.73	2019.5
6	日本	11	19.64	1 075	97.73	2020.1
7	德国	9	16.07	1 621	180.11	2019.8
8	丹麦	6	10.71	748	124.67	2020.3
9	韩国	4	7.14	542	135.50	2019.5
10	瑞士	4	7.14	226	56.50	2021.2

表 1.2.10　“超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	代尔夫特科技大学	11	19.64	1 940	176.36	2019.5
2	布里斯托大学	9	16.07	1 319	146.56	2018.6
3	北京大学	6	10.71	753	125.50	2020.2
4	丹麦科技大学	6	10.71	748	124.67	2020.3
5	荷兰国家应用科学研究院	6	10.71	577	96.17	2020.0
6	荷兰 QuTech 量子计算实验室	5	8.93	493	98.60	2019.8
7	新南威尔士大学	5	8.93	492	98.40	2019.6
8	斯图加特大学	4	7.14	902	225.50	2020.0
9	赫瑞 – 瓦特大学	4	7.14	741	185.25	2019.0
10	电子科技大学	4	7.14	693	173.25	2018.5

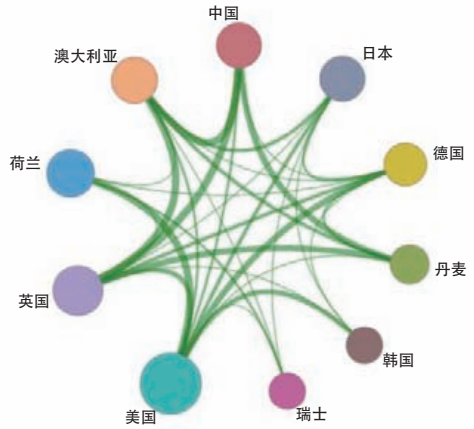

图 1.2.7　“超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿主要国家间的合作网络

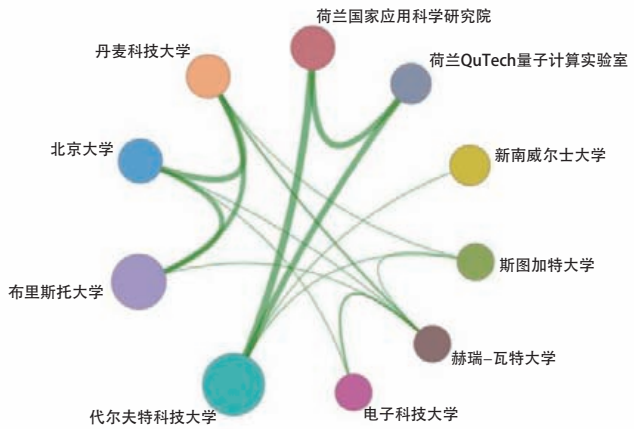

图 1.2.8　“超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	美国	1 281	23.69	2020.6
2	中国	1 157	21.40	2020.8
3	德国	558	10.32	2020.7
4	英国	461	8.53	2020.4
5	澳大利亚	412	7.62	2020.4
6	日本	325	6.01	2020.6
7	加拿大	302	5.59	2020.4
8	法国	273	5.05	2020.5
9	意大利	232	4.29	2020.6
10	荷兰	207	3.83	2020.5

表 1.2.12 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	225	16.78	2020.6
2	中国科学技术大学	213	15.88	2020.7
3	代尔夫特科技大学	145	10.81	2020.4
4	新南威尔士大学	112	8.35	2020.5
5	麻省理工学院	111	8.28	2020.6
6	哈佛大学	103	7.68	2020.2
7	悉尼科技大学	93	6.94	2020.6
8	格勒诺布尔 – 阿尔卑斯大学	89	6.64	2020.8
9	布里斯托大学	85	6.34	2019.9
10	马里兰大学	84	6.26	2020.4

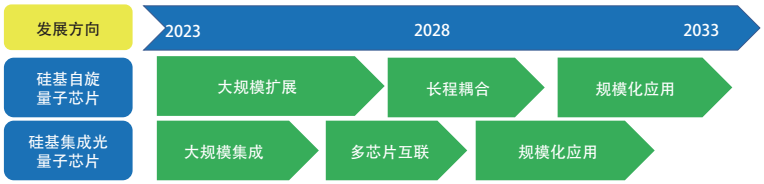

图 1.2.9 “超大规模硅基量子芯片”工程研究前沿的发展路线

（1）硅基自旋量子芯片

1）大规模阵列。自旋量子芯片的实用化需要将每个量子比特的初始化、操控、读取等模块的保真度同时提升到足够高的水平。利用 CMOS 工艺大规模制造高保真度的量子比特是一个具有挑战性的任务，因为自旋量子比特的性质，如谷劈裂、自旋轨道耦合以及量子点间的隧穿耦合等，对原子级的缺陷非常敏感，因此材料的生长质量至关重要。同时，快速检测以及自动化调控每个量子比特的参数也是必要的。

2）长程耦合。目前硅基自旋量子比特大多是采用近邻耦合，这就需要量子点或者掺杂磷原子之间的间距很近，制约了密集阵列时的布线。发展长程耦合方法允许量子比特分隔更大的距离。目前实验上已经尝试多种方法，如浮栅、微波腔、超导谐振器、电子穿梭等。

（2）硅基集成光量子芯片

1）大规模集成。在单一芯片上集成量子光源、量子态操控光路和单光子探测等功能，并保证各项关键指标同时满足，仍需要克服许多技术难题。降低芯片中光子与周围介质相互作用造成的损耗也是关键。另外，为实现实用化应用，还需要不断提高光量子芯片能够制备的多光子高维纠缠态的复杂度，以实现足够大的态空间。

2）多芯片互联。随着量子比特数量的增加，在单一芯片上集成更多光学元件变得愈加困难。未来可能会发挥光通信的优势来实现多芯片间的互联，从而采用分布式量子计算来构建大规模量子处理器。但目前硅基集成光量子芯片间的高性能互联仍是技术难题，需要发展超低损耗的互联技术，以提高芯片间量子态传输的保真度。

超大规模硅基量子芯片具有巨大的潜在应用价值。硅基自旋量子芯片和硅基集成光量子芯片都有望成为未来量子技术的关键组成部分，对解决复杂问题和提升信息安全产生深远影响。未来，硅基量子芯片将凭借着与传统 CMOS 工艺的兼容性不断向着更大规模和广泛应用的方向迈进。

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“光控相控阵天线技术”“基于脑机接口的无人系统控制技术”“基于人工智能的故障诊断和检测技术”为数据挖掘前沿；其余为专家提名前沿。各开发前沿涉及的核心专利 2017—2022 年公开情况见表 2.1.2。

表 2.1.1　信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	光控相控阵天线技术	260	1 063	4.09	2020.0
2	基于脑机接口的无人系统控制技术	464	1 344	2.90	2019.8
3	面向多样性计算的算力网络构建技术	638	3 034	4.76	2019.9
4	柔性智能触觉传感器	616	5 105	8.29	2019.1
5	高速空间光通信技术	1 018	2 061	2.02	2020.1
6	太赫兹固态相控阵芯片	887	2 022	2.28	2019.9
7	基于人工智能的故障诊断和检测技术	991	5 736	5.79	2020.9
8	大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片	232	366	1.58	2020.1
9	基于光场技术的裸眼 3D 技术	668	3 379	5.06	2019.0
10	增强现实空间操作系统	420	1 949	4.64	2019.9

表 2.1.2　信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	光控相控阵天线技术	25	37	46	42	39	71
2	基于脑机接口的无人系统控制技术	58	78	73	67	88	100
3	面向多样性计算的算力网络构建技术	77	77	109	125	101	149
4	柔性智能触觉传感器	127	136	96	107	82	68
5	高速空间光通信技术	115	138	127	128	214	296
6	太赫兹固态相控阵芯片	94	112	162	133	176	210
7	基于人工智能的故障诊断和检测技术	18	38	99	151	293	392
8	大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片	26	27	21	43	46	69
9	基于光场技术的裸眼 3D 技术	168	154	106	89	75	76
10	增强现实空间操作系统	47	61	72	63	79	98

（1）光控相控阵天线技术

光控相控阵天线主要由收发机、导波结构、天线阵列、光敏机制和光控系统五部分组成，通过光照的强度、波长、相位、指向、延时等参数对光敏材料电磁特性在时、空、频、谱域调制，控制天线单元辐射场的幅度、相位和极化，以实现对天线阵列辐射特性的精密调控，在军民无线通信、遥感遥测、定位感知、勘探测量等领域具有重要意义。根据辐射频率，其关键技术包括：① 用于空间光空间光通信、感知、探测的光学相控阵天线技术；② 用于微波通信、感知、探测等的光控微波相控阵天线技术。前者主要向低功耗、高集成度、宽视场、多波束、高时空精度扫描等方向发展。后者以微波光子相控阵技术和光调微波相控阵技术为代表，向低成本、低功耗、宽带宽扫描角和高效率发展。

技术原理区分上，微波光子相控阵技术利用光载微波时延以实现微波信号的宽带同相低损耗传输，技术难点在于实现高集成度光电转换、高精度时延光波导、可扩展微波光子传输系统和小型化高功率可调激光源等。光调微波相控阵技术利用光致微波幅相调谐，以突破传统电调天线阵由于复杂天馈网络和精密半导体制程要求所导致的增益、频率、阵列规模和极化自由度等方面的限制，技术难点在于实现高速高频光控微波开关、高精度光调微波移相、高对比度光敏材料等。光学相控阵为实现广角域、高速率、高分辨力的多束激光扫描，当前研究热点主要聚焦于光束成型网络中光延时和光调制器件的研制，以充分利用热光调制、机械光调制、电光调制、液晶光调制和相变 – 光调制等技术原理，实现反射式、折射式和全息式光束偏转与赋形。

（2）基于脑机接口的无人系统控制技术

基于脑机接口的无人系统控制技术结合神经生物学、信息学、人工智能、无人系统等领域相关技术，通过采集和分析大脑活动产生的生理信号，解码人脑意图，并将其转化为控制指令，再通过编码，实现人脑与无人系统之间的交互与控制。在此技术中，用户无须通过传统的人机交互方式，而是利用脑电等生理信号直接控制无人系统。

主要技术方向包括：① 脑信号的采集和传输，采用不同类型的生物传感器（如脑电图仪、眼动仪等）捕捉人脑生理信息，将其放大并转换为数字信号；② 脑信号的处理和解码，主要通过信号处理方法，处理复杂、高维的大脑活动数据，包括降噪、特征提取等，以识别脑信号中的特征模式，解码人脑意图；③ 无人系统指令生成和控制，将识别到的人脑意图特征模式，通过编码技术，转换为对应的控制指令，用于对无人系统（如无人机、无人车、机器人、外骨骼等）的控制。此外，还需要保证人机交互方式的舒适便捷性、稳定性和实时性。

传统的无人系统基于人工智能技术，对小概率突发异常状态应对不足。为此，将脑机接口引入无人系统，利用脑 – 机智能融合，充分发挥人脑和计算机两者不同智能的优势，是提升无人系统智能性的新途径，预期在航空、航天、航海、无人驾驶、交通安全、助老助残、医疗辅助、救援救灾、工业控制、教育娱乐等领域都有广泛的应用前景。

（3）面向多样性计算的算力网络构建技术

算力网络是将跨中心算力通过网络连接的技术理念，依托高速、移动、安全、泛在的网络连接，整合网、云、数、智、安、边、端、链等多层次算力资源，提供数据感知、传输、存储、运算等一体化的新型基础服务，由中国率先提出。其目标是整合多层次算力资源，构建以算力和网络为核心的新型基础设施体系。面向多样性计算的算力网络构建技术是指利用高性能计算与云计算、高性能网络、分布式存储等技术手段，有效整合和调度异构计算资源，为用户提供灵活、高效、可扩展的计算、存储、网络、应用和数据服务。

该技术旨在满足不同应用场景对计算资源多样性和动态性的需求，以支持人工智能、大数据分析、虚拟现实等领域的复杂计算任务。

主要技术方向包括：异构资源集成与协同、算力资源及服务封装、智能任务调度、动态计量计费等。异构资源集成与协同是通过统一的接口和协议，将异构计算资源及网络资源连接在一起，形成统一计算资源池，提供给用户灵活、可扩展的计算环境。算力资源及服务封装将底层云平台资源进行统一描述、封装及调用。智能任务调度根据任务的特性和硬件平台的特点，设计合理的调度算法和负载均衡策略，自动选择最优的执行环境和资源配置。动态计量计费对跨管理域组合集群的资源使用情况实现准确计量并提供规范化的计费方式。

随着人工智能的发展，算力网络构建技术将更加智能化，根据任务类型、资源特性、用户需求等因素自动选择最优的计算资源组合和分配策略。未来发展将注重数据隐私保护、网络安全防护和容错机制设计，确保计算资源网络的稳定运行和用户数据的安全性。随着 5G 技术的普及和边缘计算的发展，面向多样性计算的算力网络将与 5G 网络和边缘设备实现更紧密的融合，利用其计算能力和低延迟特性为用户提供更快速、实时响应的计算服务。

（4）柔性智能触觉传感器

触觉传感器作为机器人重要的关键支撑技术之一，是连接外部环境与机器人本体的桥梁，旨在模仿人类皮肤的触觉感知能力，实现机器人对外部环境物理信息的灵敏、精确感知。柔性智能触觉传感器结合柔性电子技术和智能感知算法，具备测量适应性和接触信息智能化，能够覆盖复杂机器人体表和物体表面，适于机器人在非结构环境下开展智能交互及操作任务。

目前，其主要技术方向包括：① 柔性材料及其制造技术；② 感知机制与算法；③ 触觉传感仿真；④ 多模态感知集成及操作应用。

首先需要利用具有良好的电学和力学特性的新型柔性聚合物、纳米材料和生物材料，实现柔性触觉传感器的基底材料、感知层材料、电极材料的制造，从而增强传感器的柔弹性、耐用性和适应性。同时，开发通用性的智能感知方法，使传感器实现对接触力、形状、温度、位置等多模态参数灵敏且精准的感知。为应对触觉传感器获得大规模数据成本高昂的特点，开发高质量的触觉传感仿真平台及相应的迁移算法尤为重要。目前具有代表性的视触觉传感器仿真器 Tacchi，能提供丰富的接触信息，提高触觉学习效率。进一步结合多种柔性触觉传感机制与神经网络大模型方法，实现传感器的多模态感知融合，从而更全面、深入地理解环境，提供更加完整、多样、精准的触觉感知反馈，并应用于复杂操作任务，完成从触觉感知到操作的仿生过程。

（5）高速空间光通信技术

高速空间光通信技术是指利用激光束作为载波在自由空间进行高速信息传输的通信技术，相对于传统微波方式，具备速率高（可达 100 Gb/s 以上）、抗电磁干扰性强、无频谱限制等优点，同时终端体积小、质量轻、功耗低、易部署。基于上述特点，高速空间光通信技术在探火探月、对地观测、导航侦察、低轨移动通信、紧急救援等军事和民用领域具有重大战略需求与应用价值。然而，由于空间激光传输距离长，光束易发散，且对地接收易受大气吸收折射以及背景光干扰、云层颗粒散射等方面因素影响，空间光通信技术在高功率光源及高谱效调制、高灵敏度抗干扰光信号接收、精密可靠高增益收发天线设计、快速精确捕获跟踪和瞄准技术、高动态高鲁棒光组网技术等方面仍面临诸多挑战，实现高速、稳定可靠、低成本的空间光信息网络是空间激光通信研究的核心目标。近年来，随着全球空间信息网络的规模化部署以及在大

功率半导体激光器、高精度光滤波器件、高灵敏度光学探测器以及快速、精密的光、机、电综合技术方面进行的不懈探索，部分国家已初步具备实现 100 Gb/s 空间激光通信的能力，目前空间激光通信技术逐渐从点对点模式向中继转发和构建高速、智能、一体的激光网络方向发展。

（6）太赫兹固态相控阵芯片

太赫兹固态相控阵芯片通过将收发、开关和幅相控制等器件进行高度集成，在太赫兹通信、感知、雷达、成像系统中对波束指向进行精确调控、对目标进行快速跟踪和探测，在有效提高系统装备智能化、灵活性和作战效能的同时，显著减少装备体积和开发列装成本。太赫兹波是频率在 100 GHz~10 THz 之间的电磁波，其电磁频谱介于微波频段与红外光谱之间，处于传统电子学和光子学研究频段间隙的特殊位置，具有通信传输容量大、分辨率高、穿透性好、光谱特性优异等突出特点。无线应用的普及和频谱资源的枯竭，驱动固态电路向太赫兹方向发展，但由于在太赫兹频段传播损耗大、器件功率受限等原因，需要采用相控阵体制提供天线增益并进行波束动态跟踪，因此，基于先进化合物和硅基集成电路工艺的太赫兹固态相控阵芯片技术，是太赫兹技术的核心发展路线和必然发展方向，在新一代无线通信系统和高精度太赫兹雷达系统中成为研究重点。

近年来，由于化合物和硅基集成电路工艺的不断进步，其截止工作频率和器件性能快速提升，尤其是在摩尔定律的推动下，硅基太赫兹集成电路技术得到突飞猛进的发展。太赫兹固态相控阵技术使太赫兹系统的性能和可靠性全面提升，在显著提高系统集成度、降低系统物理尺寸的同时，极大地降低了系统的成本及应用技术要求。太赫兹固态相控芯片技术成为电子信息领域的重要战略方向，2021 年，美国国防部先进计划研究局（DARPA）推出“G 波段阵列电子学”（ELGAR）项目；中国也在该领域进行了相应的布局，未来将向更高频率、更高集成度、更高性能等方向发展。

（7）基于人工智能的故障诊断和检测技术

基于人工智能的故障诊断和检测是利用机器学习模型（如深度神经网络）对数据进行处理，实现对测试对象的故障检测、诊断和预测。近年来，基于人工智能的故障诊断和检测研究受到广泛关注。主要研究方向包括：① 强泛化智能故障诊断和检测，如复杂环境下模型的自适应性、不同场景下模型的可迁移性；② 可解释智能故障诊断和检测，如构建可解释的网络模型、分析可视化特征所蕴含的语义信息；③ 弱数据质量下智能故障诊断和检测，如探索生成模型进行数据补齐、基于元学习的诊断与检测算法；④ 基于信息融合的智能故障诊断和检测，如数据级、特征级以及决策级的信息融合；⑤ 轻量化的智能故障诊断和检测，如深度网络的轻量化压缩、边缘端与移动端智能模型。

尽管基于人工智能的故障诊断与检测方法层出不穷，但几大瓶颈问题仍少有涉及，包括：① 数据依赖性大且缺乏数据挖掘过程中的机理解析；② 模型泛化的边界条件与影响因素研究欠缺；③ 可解释性缺乏机理研究及定量标准；④ 人工智能模型步入风险敏感场景时的可信性难以保证。围绕上述问题，加快推动智能故障诊断与检测技术在技术创新、工程实践、可信安全等方面的发展，是未来发展基于人工智能故障诊断与检测技术的重要方向。

（8）大尺寸半导体碳化硅材料与功率芯片

大尺寸半导体碳化硅（SiC）材料主要指直径为 6 英寸[1] 甚至更大的碳化硅单晶衬底。利用它们，可以

1　1 英寸＝ 2.54 厘米。

获得高质量的外延薄膜，进而制造高性能的功率芯片。在“双碳”目标的牵引下，半导体碳化硅材料与芯片的大规模化应用正在到来。作为一种四族化合物半导体材料，碳化硅具有禁带宽度大、热导率高、击穿场强高、电子饱和漂移速率高、化学稳定性和热稳定性好等优异特性。作为新兴的功率半导体材料，由于碳化硅所制备的功率器件与硅功率器件相比具有更高的工作温度、更高的击穿电压、更快的开关速度、更低的导通电阻和更好的耐用性，其有望在电力电子领域——特别是新能源相关的电力电子领域——得到规模化应用。

大尺寸半导体碳化硅材料的主要技术创新方向是提高碳化硅单晶的尺寸和厚度，降低碳化硅单晶的缺陷密度，以期获得更低成本和更高质量的碳化硅衬底。碳化硅单晶尺寸在不断增加，使主流碳化硅衬底尺寸发展到目前的 6 英寸。全球科研机构和公司正在竞相发展 8 英寸碳化硅单晶及衬底技术，积极推进其产业化。碳化硅单晶目前厚度普遍在 10~30 mm，发展到硅单晶的米级还有很长的路要走。碳化硅单晶的体缺陷如微管已经基本消除，但是其他缺陷如线缺陷位错还较多，一般在 $10^3/cm^2$ 量级，有待进一步降低。

碳化硅的功率二极管技术已经比较成熟，但是其功率金属 – 氧化物 – 半导体场效应晶体管（MOSFET）的性能有待大幅提升。首先，MOSFET 注入区的离子激活率亟待提高，这与器件制备过程中离子注入及后续高温退火密切相关。其次，如何优化热氧化及后续退火工艺的关键技术参数，以降低界面缺陷和氧化层缺陷密度，是提升 MOSFET 沟道电子迁移率和栅氧可靠性需要考虑的重要问题。最后，MOSFET 的可靠性必须得到显著改善，这涉及栅氧及后退火改善技术、短路鲁棒性改善技术、抗浪涌和抗雪崩技术、辐照加固技术等。

（9）基于光场技术的裸眼 3D 技术

基于光场技术的裸眼 3D 技术是指一种通过光线追踪来构造 3D 物体的技术，通过复现包括全光方程中发光位置、观察位置方向的两个发光角度、光的波长 λ 以及观察时间 t 等要素信息，使用户通过双眼直接看到“真实世界里的三维物体”。与传统裸眼 3D 显示技术相比，光场显示在双目视差的基础上增加位移视差，从而拥有超高信息密度和空间带积宽，为用户带来视网膜级的视觉体验。

光场概念于 1936 年被提出，具体可分为光场采集（成像）和光场显示两大部分。光场采集包括相机阵列、微透镜阵列、小孔成像；光场显示包括 Magic Leap 的扫描型、多投影型，斯坦福大学的多层屏技术，理光的多焦面以及集成成像等技术实现类型。其中，扫描型采用高速投影机和旋转定向散射屏产生水平多视点，但其设备和场地要求严格。多投影型采用投影阵列和旋转 / 定向散射屏产生水平多视点，但其设备体积以及成本受限。多层屏技术采用多层液晶屏幕和指向性背光源或普通背光源，算法实现连续景深，目前技术瓶颈集中于算法的研究。多焦面液晶屏幕或者微显示搭配变焦透镜，算法实现连续景深，该领域重点聚焦不同算法的配合研究。集成成像采用 Panel 搭配透镜阵列实现连续景深，利用光场相机得到视频源，再利用阵列透镜复现。

利用光场显示技术在空间中重新构建出三维物体的光场分布，将可实现与自然世界无限接近的立体显示效果。因此，基于光场显示的裸眼 3D 技术将成为未来重要的信息交互模式。受益于半导体显示技术的不断突破与发展，超高分辨率的显示面板为光场裸眼 3D 显示技术提供了更多可能。结合眼球追踪、动作捕捉等实现瞳孔级密集视点下的智能化交互。

显示技术的升级引领将推动包括显示芯片、高分辨率面板材料、3D 内容源等全产业链的技术升级，并赋能上下游生态联动发展。在可预见的未来，随着产业链逐步完善，基于光场技术的裸眼 3D 显示将在医

疗影像、检测、微创手术等方面实现产业化应用突破，此外，在电子工业设计自动化、在线教育模式的创新，商业展览展示、文化、娱乐等领域也将形成全方位赋能。

（10）增强现实空间操作系统

增强现实空间操作系统是针对扩展现实（XR）设备设计的支持虚实结合、实时交互、逼真呈现的 3D 操作系统。其主要目标是通过空间感知技术，在现实世界的基础上融合虚拟空间，并通过眼动、手势等识别算法支持 3D 多模态用户交互，构建支持自然交互的空间应用体系，进而实现沉浸式虚实融合空间的多通道自然交互操作。不同于传统个人电脑和手机端操作系统，增强现实空间操作系统强调用户在三维空间中的沉浸体验，让用户能够在真实物理世界中增加虚拟对象，从而实现更丰富的虚实混合呈现与交互。相较于屏幕界面，空间操作系统能够以更自然、直观的方式进行操作和交互，是构建元宇宙应用生态的基础。

主要研究方向包括：① 空间应用体系，在系统级高性能 3D 渲染引擎的支持下，面向增强现实空间的交互特性，构建和管理在 XR 设备上运行的空间应用，定义新的 3D 应用体系，研究如何最有效地在空间中设计、渲染、使用 3D 应用；② 空间交互体系，采用以人为中心的设计理念，研究如何基于多种识别算法的多模态交互，实现自然、直观和高效的用户交互新模式；③ 空间感知融合，研究高效的空间定位追踪、环境理解等算法，让 XR 设备能更好地感知其所在的环境，实现虚拟内容与物理空间的无缝融合。

未来，增强现实空间操作系统有望以全新的空间应用体系颠覆传统的操作系统模式，通过眼动和手势等新型交互方式，提供更为真实、自然的人机界面和空间理解、感知能力以及更强的交互应用，实现混合增强智能信息的高效获取和处理，获得超越现实空间的感受和体验。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 光控相控阵天线技术

相控阵技术自 1899 年被提出，已广泛应用于无线通信、遥感遥测、定位感知、勘探测量、安防检测、医疗器械、医学影像等领域，是推动人类科技进步、促进社会生产力发展的军民两用关键共性基础技术。21 世纪以来，随着 5G/6G 移动通信、物联网和人工智能的发展而爆发的大数据，对低成本高速信息传输和相控阵技术提出新的要求。“光互联”作为逐渐代替“电互联”的新载体，用于高速信息的高速传输。随着光调制器、光开关、光波导等器件的发展，“光控”和“光互联”的概念也在微波相控阵技术中得到应用，典型技术代表是微波光子相控阵技术和光调微波相控阵技术。

微波光子相控阵技术聚焦光载微波时延技术，通过光载微波时延实现微波信号的宽带低损耗传输和相移，在极大降低传统电控移相器导致的发热和馈电网络损耗的同时，展宽扫描角度与带宽，并提高系统抗辐照性能。主要发展趋势是提升微波光子芯片集成度，提升光延时精度、范围、连续性，提高光电、电光转换效率，降低微波光子链路损耗，实现大带宽、大延时、大动态范围的波束扫描技术。中国的代表性研究机构包括浙江大学、电子科技大学、清华大学、中国电子科技集团公司等。国外代表性研究机构包括渥太华大学、伦敦大学学院（UCL）、美国海军实验室、弗吉尼亚大学、加利福尼亚大学、大阪大学等。

光调微波相控阵技术聚焦光致微波调谐技术，通过光敏器件实现光控微波天线口面或馈网的幅相调谐，降低传统电调机制导致的馈网损耗以及对精密半导体制程的要求，逐步实现微波相控阵天线在最大增益、天线效率、最高工作频率、可扩展规模、极化自由度等多方面的突破。代表性研究机构包括澳大利亚国立

大学、美国海军实验室、上海科技大学、东南大学、西安电子科技大学、南京航空航天大学等。具体来说，在光调连续微波相位方面，澳大利亚国立大学在 2012 年提出利用光电二极管控制变容二极管实现超材料反射系数调控；东南大学在 2020 年提出利用光电池为电压源控制变容二极管，在 7 GHz 实现反射单元的连续相位调控；西安电子科技大学在 2022 年提出利用光敏电阻分压控制反偏变容二极管，在 6.35 GHz 实现反射单元的连续相位调控。值得一提的是，在光调离散微波相位方面，美国海军实验室在 2020 年提出利用砷化镓光敏电容薄膜控制反射阵天线单元二进制移相；上海科技大学在 2022 年提出利用光敏电阻分流控制开关二极管切换微波反射阵单元负载，首次在超过 10 GHz 频率上实现并验证激光调控的 1 024 单元的单极化光控微波相控阵，实现 ±60° 无栅瓣大范围扫描，代表了光控微波相控阵天线技术的最新发展。

“光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家和机构分别见表 2.2.1 和表 2.2.2。亚洲地区（中国、日本、韩国和印度）在专利公开总量上优势明显。其中，中国在专利公开量上超过其他 9 个国家专利公开数量总和的两倍，但在平均被引数上仅排名第五。美国在专利公开量和平均被引数上均排名第二，综合展现出较高的专利质量和技术价值。英国和加拿大两国虽然平均被引数较高，但专利公开量总量较低。从以上数据来看，该项技术呈现出中、美两国为主导，日、韩两国迎头追赶的趋势。专利产出机构上，以浙江大学、中国电子科技集团和航天恒星科技有限公司为代表的中国企事业机构在数量上优势明显，但在产业化落地方面较美国 Analog 光电有限责任公司有较大差距。专利的主要产出机构也体现了该技术在航空航天等国家重要战略领域的重大需求。光控相控阵技术应用场景的特殊性从某种意义上可能也导致国家与机构间合作较少，由图 2.2.1 可知，只有中国和加拿大在国家层面上有一些交流合作，而各机构之间无交流合作。

光控相控阵技术在取得较大进展的同时也面临诸多问题。在未来 5~10 年，光控微波相控阵天线技术面临频段稀疏化、高频高效化、宽带智能化、低成本集成化以及平面轻小型化的挑战。“光控相控阵天线技术”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.2 所示。

微波光子相控阵天线的主要发展趋势包括：① 降低波束赋形光网络的尺寸和功耗；② 提高光时延调控精度；③ 提升波束扫描的空间连续性、空间范围和时空分辨率；④ 降低系统扩展级联的变频损耗；⑤ 实现低激光载波功率下的高链路增益和高信噪比。研究方向包括：① 降低集成器件尺寸和功耗；② 探索光电转换新机理和新方法；③ 提高光延时器件精度和连续性；④ 降低光子微波链路复杂度、成本和损耗。

光调微波相控阵天线在近两年萌芽，在原理发现和技术开发方面还有较多原始创新工作有待开展，主要发展趋势包括：① 提升光控微波开关速率与工作频率；② 探索光致微波调谐新机理和新方法；③ 提高光控微波移相调幅精度与连续性；④ 提高光敏材料和光敏器件调控对比度；⑤ 在通信、感知、存储、计算、防护等多个层面上探索不同载荷、载体、电磁环境和应用场景中可获得的变革型系统性能突破。

光学相控阵天线技术在朝着低功耗、低损耗、高效率、高集成和宽扫描方向发展时，当前的研究热点主要聚焦于光束成型网络中光延时和光调制器件的研制，包括：① 热 – 光调制技术，基于热光效应改变光波导材料折射率，实现折射式光束偏转扫描；② 机械 – 光调制技术，通过微纳机械旋转的微镜反射实现反射式光束偏转扫描；③ 电 – 光调制技术，基于材料的电光效应改变光波导材料（如铌酸锂等）的折射率，实现折射式光束偏转扫描；④ 液晶 – 光调制技术，通过电压控制液晶取向和折射率，实现折射式光束偏转扫描；⑤ 相变 – 光调制技术，通过温度控制相变材料（如硫族化合物相变材料）的晶态和非晶态转换，改变相变材料的折射率，实现折射式光束偏转。具体技术方向包括：① 激光器——小型化、低成本、高功率、

表 2.2.1 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	184	70.77	529	49.76	2.88
2	美国	43	16.54	426	40.08	9.91
3	韩国	13	5.00	57	5.36	4.38
4	日本	10	3.85	3	0.28	0.30
5	俄罗斯	4	1.54	3	0.28	0.75
6	英国	2	0.77	42	3.95	21.00
7	加拿大	1	0.38	8	0.75	8.00
8	德国	1	0.38	0	0.00	0.00
9	以色列	1	0.38	0	0.00	0.00
10	印度	1	0.38	0	0.00	0.00

表 2.2.2 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	浙江大学	12	4.62	55	5.17	4.58
2	中国电子科技集团	12	4.62	22	2.07	1.83
3	Analog 光电有限责任公司	9	3.46	129	12.14	14.33
4	航天恒星科技有限公司	9	3.46	26	2.45	2.89
5	韩国科学技术院	6	2.31	29	2.73	4.83
6	吉林大学	6	2.31	14	1.32	2.33
7	长春理工大学	5	1.92	39	3.67	7.80
8	清华大学	5	1.92	34	3.20	6.80
9	中国人民解放军国防科技大学	5	1.92	5	0.47	1.00
10	Quanergy 系统公司	4	1.54	33	3.10	8.25

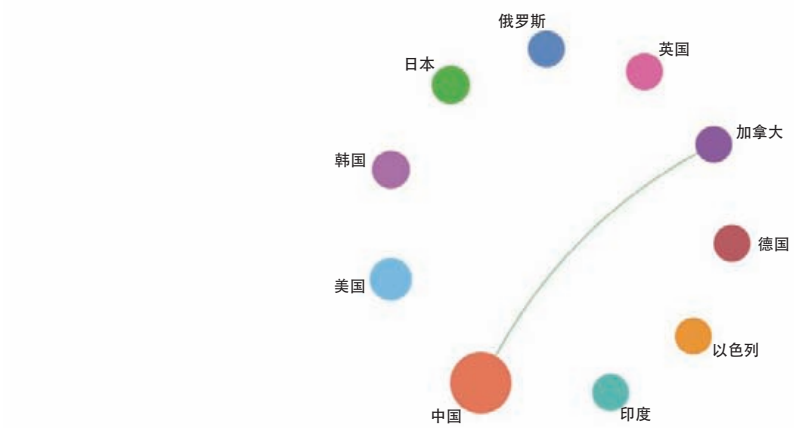

图 2.2.1 “光控相控阵天线技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

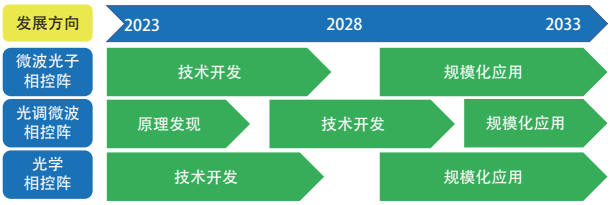

图 2.2.2　“光控相控阵天线技术”工程开发前沿的发展路线

高速率、温度稳定性高、可片上集成的波长可调激光器；② 分光器——易加工、一致性高、低损耗的新型层叠透镜式分光移相器；③ 光相位调制器——易控制、易扩展、易制备、高稳定、高功率、高可靠、高隔离、低串扰、低延迟、低色散、低损耗、低噪声、低成本的液晶光调制器、硅基热光调制器、色散光纤调制器、超材料光调制器；④ 光天线阵列——扫描范围大、调制效率高、集成度高、时空分辨率高、辐射效率高的阵列架构。

总体而言，光控相控阵的典型技术特点是低成本、高性能、制程占优、生存能力强和想象空间大。未来，光控相控阵有望在无线微波回传、蜂窝无线通信、星地毫米波通信、空间光通信、自动驾驶雷达、雷达探测与制导、生物医疗、空天地一体化智能网络等多个场景中获得广泛应用。典型地，对于低轨道星联网，光控相控阵的低成本、高性能、大带宽、抗辐照等优势有助于超大规模卫星相控阵的快速部署，有望在 5 年内得到规模化部署与应用。同时，光控相控阵可作为新型智能反射表面，在改造空天地一体化电波传播环境信道和构建智能可调电磁环境辅助的 6G 无线通信与智能网络中发挥重要作用。

2.2.2　基于脑机接口的无人系统控制技术

近年来，人工智能技术的进步推动了无人系统技术朝着智能化的方向迅猛发展，但在面对无人系统可能遭遇的各种突发、异常状况时，基于人工智能的无人系统的表现不尽如人意。将“脑”和“机”的智能相融合，充分发挥两种不同智能的优势，是进一步实现无人系统智能化的重要方向。脑机接口技术的发展使得这种“脑”和“机”的智能融合成为可能。

脑机接口的概念最早于 1970 年由 Jacques Vidal 提出，主要指在人机交互中使用大脑信号来控制计算机或者外部设备。在之后很长一段时间里，受限于软、硬件条件的制约，对大脑意图解码的准确率和可靠性都相对较低，并不能满足无人系统的控制需求。随着近年来脑机接口技术的飞跃式发展，不仅在识别大脑的主动意图上实现较高准确性，同时也能够实现对特定大脑状态的被动监测，于是研究者们开始将脑机接口与无人系统技术相结合。通过特定的实验范式如事件相关电位、稳态视觉诱发电位或运动想象等，通过脑机接口技术较准确地提取受试者的主观意图，实现对无人系统的过程控制。但受限于脑机接口较低的信息传输速率，这种过程控制方式效率很低。为此，研发人员将脑机接口的识别结果转变为预先定义好的特定指令，无人系统基于指令独立自主进行特定的系列动作，实现无人系统多任务的脑机协同控制，这种改进极大地提升了对无人系统的控制效率，但脑与机仍然是两个独立的智能控制系统，并未构成脑机统一的决策与控制系统。近期，研究人员发现在无人系统的目标识别、路径规划等任务中，将脑和机通过决策层或特征层的融合，可以实现更优的任务表现，这使得基于脑机接口的无人系统技术由单向的控制转变为脑机双向的交互和融合。未来，脑机接口技术不仅仅为无人系统提供命令或指令，更可深度融合于目标识别、

路径规划、任务管理等无人系统的日常任务中，从而实现真正的人机融合与智能增强。

“基于脑机接口的无人系统技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家分布情况见表 2.2.3。中国的优势明显，专利公开量和被引数均排名第一，专利公开量约为第二名美国的 15 倍，但平均被引数低于美国。中国的国际合作对象主要是德国，而美国的国际合作对象主要是印度，其余国家独立研发（图 2.2.3）。排名前十的专利主要产出机构（表 2.2.4）中，北京理工大学、中国人民解放军军事科学院军事医学研究院等产出的专利最多，但与其余 8 家机构差距较小。平均被引数方面，东南大学最高，其后为上海大学、天津大学和北京理工大学，三者数据相近。另外，前十机构均来自中国，体现了中国对该方向较高的关注度和较强的研发能力。

“基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.4 所示。未来，得益于脑机接口技术的发展，便携化、高信噪比和高通量的脑电信号采集设备将使得对脑功能的解码更为准确，功能近红外光谱、眼动信息等多模态生理信号有望集成化并实现同步采集，互补的多模态信息也将进一步增强脑机接口的可靠性。在此基础上，在基于脑机接口的无人系统中，其脑机控制方式将由低自由度的离散控制方式向高自由度的连续控制方式发展。在这一阶段，无人系统的智能化程度将由脑机的简单结合向脑机融合的混合智能方向发展，其特点是脑与机将在决策层深度融合，从而扩展无人系统对未知、突发状态的应对能力。随着脑机接口和人工智能技术的进一步发展与融合，其脑机控制方式将发展为任务层级的控制，此时无人系统自身将更智能化，脑将负责更高级别的认知决策任务。在这一阶段，“脑”与“机”将在信息层进行深度融合，双向的信息感知与决策融合将最终形成一体化的智能体，其特点在于“脑”与“机”将产生协同效应而能够共同解决问题，扩展认知能力，最终使得无人系统更好地处理复杂问题、完成高难度的任务。从系统实用化的角度分析，目前基于脑机接口的无人系统技术已初步完成原理验证并进入到产品研发阶段，后续有望在 10 年内实现从原理样机到小规模应用、进一步到多领域推广应用的阶段。脑机融合是基于脑机接口的无人系统发展的必然趋势，“脑”“机”双智能的结合可以带来许多创新和应用，有望在交通安全、航空航天航海、助老助残、医疗辅助、救援救灾、工业控制等领域产生更多积极影响。

表 2.2.3 “基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	370	79.74	1 047	77.90	2.83
2	美国	25	5.39	129	9.60	5.16
3	韩国	20	4.31	64	4.76	3.20
4	印度	19	4.09	12	0.89	0.63
5	日本	11	2.37	24	1.79	2.18
6	德国	5	1.08	10	0.74	2.00
7	法国	4	0.86	23	1.71	5.75
8	巴巴多斯	2	0.43	27	2.01	13.5
9	俄罗斯	2	0.43	4	0.30	2.00
10	巴西	2	0.43	0	0.00	0.00

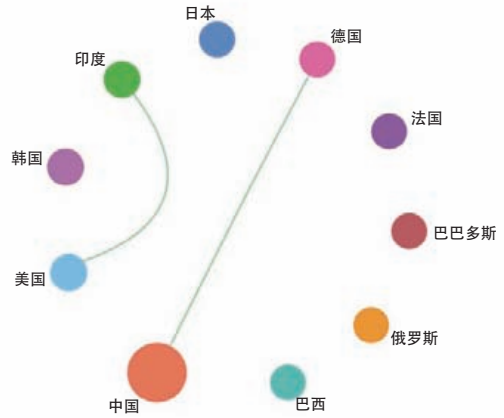

图 2.2.3　“基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4　“基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京理工大学	8	1.72	51	3.79	6.38
2	中国人民解放军军事科学院军事医学研究院	8	1.72	25	1.86	3.12
3	天津大学	7	1.51	45	3.35	6.43
4	西北工业大学	7	1.51	19	1.41	2.71
5	上海大学	6	1.29	39	2.90	6.50
6	北京航空航天大学	6	1.29	30	2.23	5.00
7	西安交通大学	6	1.29	27	2.01	4.50
8	东南大学	5	1.08	38	2.83	7.60
9	浙江大学	5	1.08	20	1.49	4.00
10	北京邮电大学	5	1.08	9	0.67	1.80

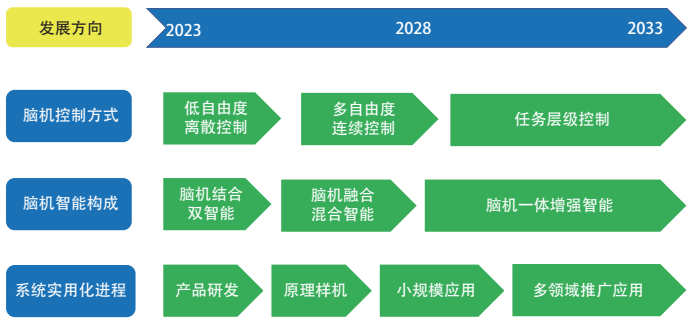

图 2.2.4　“基于脑机接口的无人系统控制技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 面向多样性计算的算力网络构建技术

随着大数据和人工智能技术的快速发展，各行业对计算能力和存储能力的需求也越来越大。面向多样性计算的算力网络构建技术的主要目标是构建一个能够满足异构计算需求的算力网络，以提高计算效率、降低能耗，解决传统计算模型在处理大规模数据以及复杂任务时遇到的算力不足和资源不够等问题。而面向多样性计算的算力网络构建技术通过联合各种计算资源，形成一个强大的算力网络，能够更好地满足不同应用场景下的计算需求，实现高效的数据计算和处理。

面向多样性计算的算力网络构建技术因其能够通过将计算资源进行整合和优化，实现高效的计算能力，具有广阔的应用前景。世界各国政府正针对计算中心与数据中心的资源共享开展系列重要计划，并取得一些突破性进展。美国政府推出高性能计算和数据资源共享联邦计划 XSEDE，旨在通过网络连接多个高性能计算中心，为研究人员和工程师提供广泛的计算和数据资源。欧洲联盟推动了欧洲超级计算机计划（EuroHPC），旨在建立欧洲范围内的超算网络，通过超级计算机联盟 PRACE，给欧洲研究机构和工业界提供高性能计算资源。以谷歌、微软、亚马逊为首的科技巨头也分别推出各自的分布式云服务或分布式计算引擎，以实现大规模资源的跨地域共享和调度。在研究领域，美国劳伦斯伯克利国家实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室等针对大规模科学数据共享、应用统一运行时框架进行了探索和试验。

中国该领域相关研究主要由科研机构、高校和电信运营商开展。在东数西算和超算互联网建设背景下，中国科学院计算机网络中心牵头建设国家高性能计算环境，有效整合高性能计算资源，提供具有统一访问入口的高性能计算服务。以国家超级计算济南中心和鹏城实验室分别牵头建设的山东省一体化算力网络和中国智算网络等为代表的新兴算力共享平台也在高速发展，有效推动各省市区的算力、数据、软件等资源的互联与协同。

全球多个国家、地区在开展该领域的研究。如表 2.2.5 和表 2.2.6 所示，美国是该领域专利产出最多的国家，占比高达 74.45%，这表明美国在面向多样性计算的算力网络构建技术方面处于世界领先地位，代表机构有 EMC IP 控股公司、国际商业机器公司（IBM）等。中国是第二大专利产出国，占比为 17.71%。

面向多样性计算的算力网络构建技术通常需要多个机构和企业之间的紧密合作，才能实现数据共享、技术协同和资源优化。目前全球范围内各个机构和企业之间的合作还很少，目前仅有美国和印度间展开了合作（图 2.2.5），机构之间的合作网络尚未形成。因此亟须形成国家和机构之间的合作网络，通过共同开展科研合作、技术交流和项目合作，来推动该技术的发展和应用。

如图 2.2.6 所示，面向多样性计算的算力网络构建技术在未来 5~10 年有以下几个重点发展方向。

1）算力网络架构优化：在 Y.2501 算力网络框架的基础上，进行算力网络架构设计和拓扑结构优化。通过建立更加灵活、高效的基础底层通信网络结构，实现更好的计算资源调度和管理，以提高计算能力和性能。

2）异构资源融合：不同类型的计算资源如中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）、现场可编程门阵列（FPGA）等在算力网络中的融合会继续深入发展。随着计算资源的进一步创新和性能提升，算力网络将更好地利用这些异构资源，提供更高效的计算能力。例如，出现更强大和高效的加速器、新型服务器架构和处理器设计，进一步推动算力网络的发展。

3）跨域资源管理与任务协同：跨域资源管理与任务协同的目标是实现计算资源的高效利用和任务执行的高性能。通过跨域资源管理与任务协同，算力网络可以充分利用来自不同领域的计算资源，提高资源

表 2.2.5　“面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	475	74.45	2 476	81.61	5.21
2	中国	113	17.71	328	10.81	2.90
3	德国	9	1.41	11	0.36	1.22
4	加拿大	7	1.10	24	0.79	3.43
5	俄罗斯	7	1.10	22	0.73	3.14
6	英国	7	1.10	8	0.26	1.14
7	印度	5	0.78	5	0.16	1.00
8	荷兰	4	0.63	0	0.00	0.00
9	日本	2	0.31	4	0.13	2.00
10	爱尔兰	1	0.16	147	4.85	147.00

表 2.2.6　“面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	EMC IP 控股公司	67	10.50	168	5.54	2.51
2	国际商业机器公司（IBM）	43	6.74	208	6.86	4.84
3	美国银行有限公司	41	6.43	142	4.68	3.46
4	Nuance 通信有限公司	25	3.92	110	3.63	4.40
5	ReliaQuest 控股有限责任公司	18	2.82	26	0.86	1.44
6	微软知识产权许可有限责任公司	15	2.35	49	1.62	3.27
7	Gamalon 有限公司	11	1.72	49	1.62	4.45
8	英特尔公司	10	1.57	12	0.40	1.20
9	北京邮电大学	9	1.41	53	1.75	5.89
10	山东浪潮科学研究院有限公司	9	1.41	1	0.03	0.11

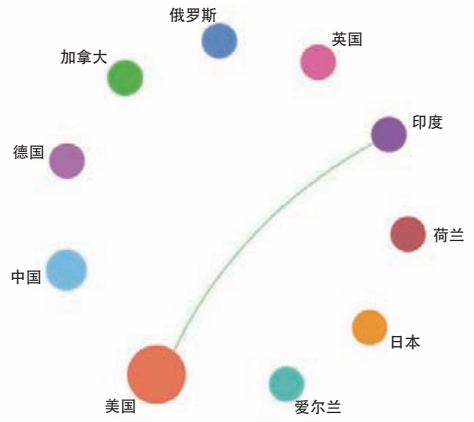

图 2.2.5　“面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

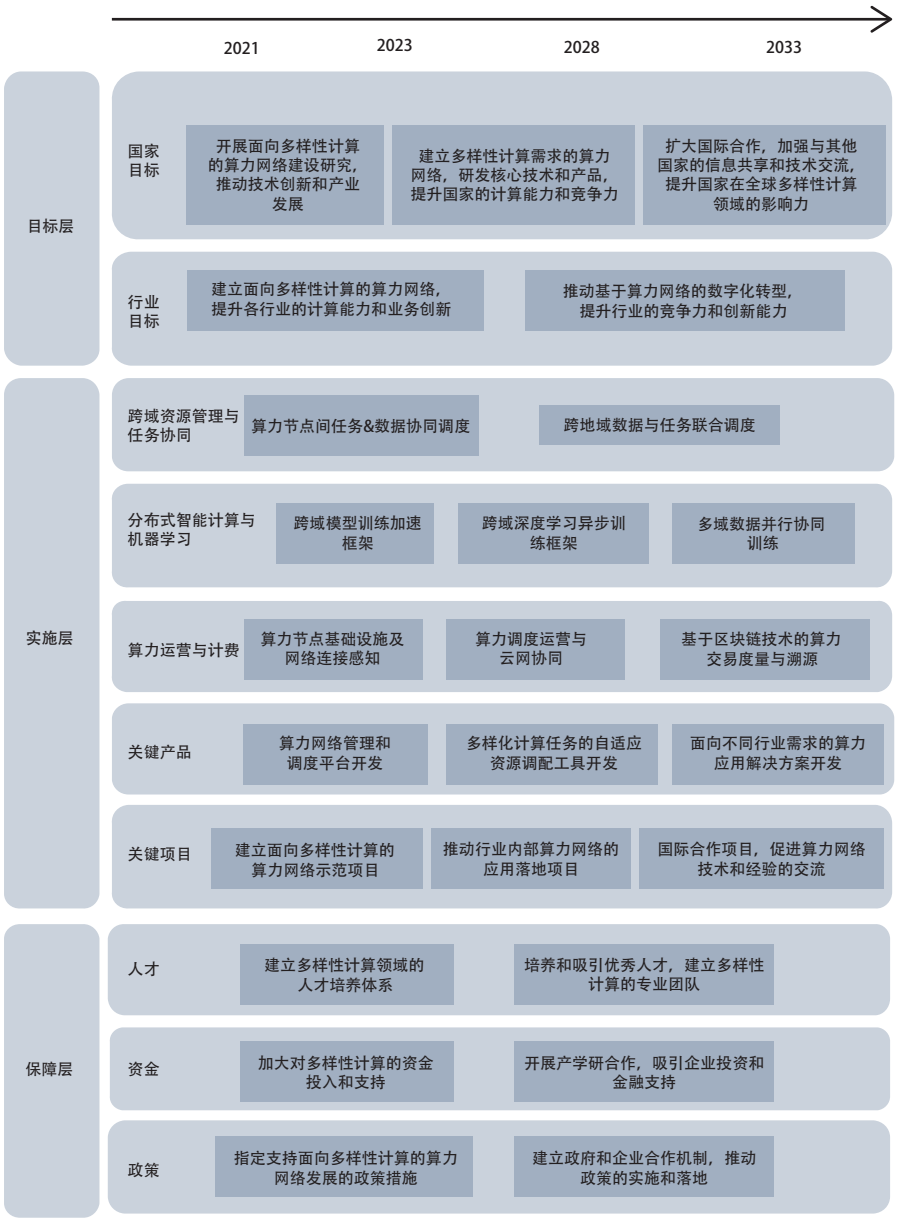

图 2.2.6　“面向多样性计算的算力网络构建技术”工程开发前沿的发展路线

利用率和性能，同时协同多个任务的执行，实现更高效的计算和数据处理。这对于促进多样性计算的发展和应用具有重要意义。

4）算力运营与交易：算力交易是实现算力网络体系中市场自发调节、协调各服务主体收益的重要手段，须通过对算力资源的使用情况与负载指标进行多维度、多粒度的信息采集，建立资源使用时空模型，实现合理计费。

5）AI 与算力网络的融合：AI 技术的迅速发展将与算力网络相互融合，为计算任务提供更强大的智能和学习能力。算力网络将通过与深度学习、机器学习、自然语言处理等 AI 算法和技术的集成，实现智能的资源管理和自动化决策，以提供更智能化和自适应的计算能力。

6）安全性与隐私保护技术的加强：随着大规模数据的使用和计算资源的分布，保护数据安全和隐私将成为算力网络发展的重要关注点。未来的算力网络将加强安全性技术，如数据加密、访问控制和身份验证等，以确保计算任务和数据的安全性和对隐私的保护。

在未来的发展趋势中，面向多样性计算的算力网络构建技术将逐渐成为各个领域数据处理和分析的核心技术，将广泛应用于云计算、大数据分析、人工智能、物联网等领域，并推动这些领域的发展和创新。此外，该技术还有很大的发展潜力，可以为公共安全、智慧城市、医疗健康、工业制造等领域提供更高效、智能的解决方案。

领域课题组成员

审核专家组：

组长：潘云鹤　费爱国

成员（按姓名拼音排序）：

第一组：刘泽金　罗先刚　吕跃广　谭久彬　张广军

第二组：丁文华　段宝岩　何　友　吴伟仁　余少华

第三组：柴天佑　陈　杰　樊邦奎　费爱国　廖湘科　卢锡城　潘云鹤　赵沁平

学科召集人（按姓名拼音排序）：

陈文华　程　鹏　李东升　刘　东　刘建国　刘　伟　陆振刚　皮孝东　辛　斌　杨　易　张建华

图情专家：

文献：李　红　赵惠芳　熊进苏　王凯飞　陈振英

专利：杨未强　梁江海　刘书雷　霍凝坤　吴　集　刘　燚　杨子宁

执笔组（按姓名拼音排序）：

研究前沿：陈晓明　方崇荣　高　飞　韩亚洪　韩　瑜　何建平　金　石　李　戈　刘建国　骆军委　吴　飞　谢　涛　于海洋　张　颖　周　晔　邹灿文

开发前沿：陈文华　方　斌　高　阳　郝爱民　黄善国　林丰涵　林　京　刘　莎　骆　欢　皮孝东　唐　卓　谢松云

工作组：

联络指导：高　祥　张　佳　张纯洁　邓晃煌

项目秘书：翟自洋　谌群芳　杨未强　胡晓女

项目助理：韩雨珊

三、化工、冶金与材料工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 11 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 11 工程研究前沿的核心论文情况见表 1.1.1 和表 1.1.2。其中，“低碳节能冶金反应器设计与流程优化”“用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究”“超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制”是专家推荐的前沿；其他前沿则是基于数据由专家研判而来。电催化、单原子催化和本征安全电池相关主题，一如既往，仍然是科研人员热衷的方向，篇均被引频次超过 200.00（表 1.1.1）。从核心论文逐年发表数量来看，所有入选的前沿均呈下降趋势（表 1.1.2）。

（1）可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料

可再生能源驱动生物固碳是利用光能、电能等可再生能源替代化学能作为生物固碳途径的能量和还原力来源，用于生产生物基化学品、清洁燃料以及生物绿色材料的过程，可以进一步发挥生物固碳的优势。现阶段的相关研究多着眼于光 / 电驱动的体外多酶固碳和光 / 电驱动的全细胞固碳，主要集中于：① 生物固碳新途径的开发；② 新型生物相容性光 / 电催化材料的制备；③ 生物催化模块与光 / 电催化模块的耦合适配工程。可再生能源驱动生物固碳具有原料绿色化、过程绿色化和产品绿色化的特征，然而该技术的总体能量效率不高，面向工业化应用时仍存在一些技术瓶颈。未来，应着重于以下几个方向：① 开发原位表征新技术，阐明生物催化剂与人工催化剂的能量交流机制，加深对二者耦合过程的认知；② 开发高效率、高适应性的优质生物催化剂，实现核心酶和核心菌种的技术自主化，提高产品的产量；③ 针对原料供给、

表 1.1.1　化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料	92	13 644	148.30	2018.9
2	冶金流场混沌非线性强化技术研究	120	9 337	77.81	2018.9
3	面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系	107	25 965	242.66	2018.8
4	反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征	76	9 481	124.75	2018.7
5	低碳节能冶金反应器设计与流程优化	82	3 788	46.20	2018.5
6	极端低温环境用特种合金的理性设计与制备	148	13 642	92.18	2018.7
7	用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究	109	14 356	131.71	2018.4
8	高强高韧低密度钢研究	59	3 246	55.02	2018.4
9	超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制	61	13 127	215.20	2019.0
10	面向离子分离的选择性限域传质膜	81	9 394	115.98	2019.0
11	本征安全电池体系实现可再生能源存储	131	31 898	243.50	2018.6

表 1.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料	16	21	26	17	12	0
2	冶金流场混沌非线性强化技术研究	26	25	30	21	15	3
3	面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系	20	26	29	22	8	2
4	反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征	20	18	17	12	6	3
5	低碳节能冶金反应器设计与流程优化	23	28	13	9	7	2
6	极端低温环境用特种合金的理性设计与制备	43	25	37	23	16	4
7	用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究	37	21	28	16	7	0
8	高强高韧低密度钢研究	23	10	13	6	7	0
9	超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制	8	13	17	14	9	0
10	面向离子分离的选择性限域传质膜	10	20	22	22	6	1
11	本征安全电池体系实现可再生能源存储	33	32	30	28	8	0

过程强化到产品分离工程，开发工业化高端反应器和分离介质，建立成熟的装备与技术体系。

（2）冶金流场混沌非线性强化技术研究

冶金过程中流动 – 传递 – 反应蕴含着复杂的非线性动力学机制和多尺度时空特征，这些特征对冶金反应器的设计、优化和运行提出了严峻挑战。冶金流场混沌非线性强化技术结合了流体力学、混沌理论和非线性科学的知识，旨在揭示冶金反应器中流动 – 传递 – 反应耦合与放大规律，阐明流体混沌特性、介稳流场结构失稳与化学混沌强化的内在联系。该技术的研究主要通过构建混沌流与温度场 – 流场均匀性关联模型，精准描述混沌流与温度场 – 流场均匀性之间的关系；基于混沌混合特性与场均匀性的耦合机理，以及流场多尺度结构的形成、输运和转化过程，通过调控气泡群的混沌行为，实现对热质传递效率的提升。这一技术为冶金炉窑中复杂多相流型的拓扑耦合提供了新的调控思路，可高效解决冶金炉窑强化过程流场 – 温度场难以协同以及气泡群搅动热质传递的强化效果无法精确描述的难题。未来，该理论有待在极端及超常规冶金、装备大型化、智慧冶金等方面进一步发展。

（3）面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系

在整个能源和环境体系中，二氧化碳（CO_2）绿色高效转化与利用是实现低碳能源高效转化的核心。其中，碳捕集、利用与封存（carbon capture, utilization and storage, CCUS）技术已逐步成为目前应对气候变化，实现“碳达峰、碳中和”目标（简称“双碳”目标）的关键技术。目前，太阳能、风能等可再生能源提供的绿电驱动 CO_2 催化转化，不仅可以解决 CO_2 过度排放的问题，还可以实现间歇性电能直接转化为化学能，对实现碳平衡和优化能耗结构具有重要意义，受到广泛关注。CO_2 电催化转化的研究主要集中在以下几个方面：① 利用原位光谱技术监测 CO_2 还原反应（CO_2 reduction reaction，CO_2RR) 中的关键中间产物，同时结合理论计算构建 CO_2 催化转化过程中的反应网络；② 设计开发高性能电催化剂，调控优化催化剂结构，研究催化剂结构与 CO_2RR 性能之间的构效关系；③ 合理设计优化电极结构以及调节整个电解反应器来控制反应体系的运行，利用其模块化特点实现调控优化，使得各指标达到工业化应用要求。CO_2RR的进一步发展需要提高电催化剂的长期连续运行稳定性，并扩大 CO_2 电解槽的规模，此外，还需要确定其实际应用

的目标、产品的经济性和市场供需。最终的产品分离和过剩的 CO_2 原料气体与电解液的回收成本也需要进一步设计管理。

（4）反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征

催化剂结构以及表界面特性是催化研究的基本问题，直接关联催化剂性能，也为理论模拟和预测提供结构模型的直接依据。催化活性位点及其与周边环境 (配位、外场) 在化学反应中的时空动态演变规律是理解和设计原子精准新型催化剂的关键。而厘清这些规律的前提是对于物质表界面结构与化学在超高时空分辨率下的表征，尤其是在模拟反应条件下的原位表征。目前，对于反应条件下异相催化剂的分子 / 原子尺度原位表征技术包含原位电子 / 扫描探针显微技术、空间分辨的振动（红外 / 拉曼）原位光谱技术以及基于 X 射线的光电子能谱 / 吸收光谱等原位技术。其研究的主要内容包括：① 通过观测催化剂原子结构在活化以及反应过程中的动态变化，揭示与反应关联的结构活性位点，指导催化剂的精准设计与制备；② 在分子尺度揭示催化剂表界面反应物吸附和解离规律，确定中间产物物种与时空分布规律，厘清反应转化路径；③ 将多种原位技术联用并利用精准设计的模型催化剂进行性能关联，厘清关键化学反应过程中结构与化学活性位点。

（5）低碳节能冶金反应器设计与流程优化

超大型 / 特种冶炼装备，在尺寸放大、结构调整、工艺优配等过程中，常常因缺少理论依据导致设备放大失真、工况多变条件下运行失稳、理论模型与实际装备的放大失配等问题，从而造成冶金反应器及冶炼流程能耗高。其运行过程涉及复杂的精矿 – 熔体 – 富氧射流等多相，电 – 磁 – 流 – 热 – 颗粒 – 组分等多场，微观反应 – 介观运动 – 宏观操作多尺度体系间的协同耦合，亟需低碳冶炼装备尺寸放大设计 / 工艺精细优化的动力学试验与模拟仿真方法。未来的相关研究方向包括：① 研究冷态模拟多相体系流场定量可视化表征新方法，针对基于相似性理论建立的大型装备冷态试验模型，采用流场特征高速动态记录、流场示踪粒子图像测速（particle image velocimetry，PIV）等可视化分析技术，结合图像解析处理、混合时间测定、混沌数学分析等定量测量技术，实现非线性流场混合程度的定量表征；② 研究气 – 液 – 固多相体系中电 – 磁 – 流 – 热 – 颗粒 – 组分多场耦合机制，包括实际冶金反应器内的各种传递过程和冶金化学反应规律，模拟和解析单一及多个关联反应器的协同耦合规律，从而实现优化完善既有流程，并开发新的低碳节能冶金工艺流程和反应器。

（6）极端低温环境用特种合金的理性设计与制备

清洁能源、航空航天等装备的创新与发展是世界各国争相抢占的制高点。这些装备中的关键部件常面临极端低温服役环境，如磁约束核聚变堆的超导线圈（约 4 K）、航天液氧液氢发动机（约 20 K）、高雷诺数风洞（约 77 K）等，这对所涉及的特种合金的服役性能提出了异常严格的要求。目前，国内外极端低温环境用特种合金存在包括绝对性能不足、组织和性能调控机制不明、制备工艺不成熟等多个问题，在很大程度上限制了人类飞行器制造技术水平和清洁能源开发利用能力的提升。因此，极端低温环境用特种合金的理性设计与制备中的各个阶段尚有很多科学问题待深化研究，主要集中于以下几个方面：① 极端低温服役过程中相结构稳定性的精准调控，主要包括特种合金在极端低温服役条件下奥氏体层错能等的影响机制，获得有效调控相稳定性的手段，并阐明其对于不同低温服役性能的作用规律，进而指导合金成分设计与制备加工过程；② 极端低温特种合金冶炼 – 锻造 / 轧制 – 热处理 – 焊接一体化过程中的多相组织演变及强韧化机理，包括极端低温特种合金全流程制备条件下的正 / 逆相变原理、元素配分机制、析出过程调控

机理，以及低温形变机制，最终建立典型工艺过程、多相组织构成与力学性能之间的构效关系；③ 针对复杂低温环境，需研究强腐蚀、宽温域、交变载荷等多场耦合服役条件下的损伤失效模式与机理，主要包括多重力学物理性能在低温下的相互匹配机理，明晰热力疲劳、磨损、腐蚀等耦合作用下的低温损伤失效模式机理，建立合金服役性能与失效模式机理之间的构效关系，并反馈指导特种合金设计与制备工艺优化。

（7）用于高效电化学储能的集成式一体化电极研究

锂离子电池占据了电化学储能领域的绝大部分市场份额，但能量密度及功率密度亟须提高，以满足日益增长的社会发展需求。开发兼具高比能、高功率、高稳定、长寿命、高安全和低成本的新一代锂电池的关键不仅在于对电极材料电化学储能机制有清晰认知，还需在电芯组分以及电极整体结构层面进行系统设计。因此，具有多种组成与结构优势的集成式一体化电极的设计研制在近些年获得了广泛关注。这种新型电极不仅具有优异的离子－电子混合传导性，并可免除黏结剂等非活性组分的使用，适宜的孔隙结构还可以使其在充放电过程中保持高结构稳定性。目前，该方向的研究主要集中于以下几个方面：① 先进的电极结构设计；② 简单的电极合成策略；③ 集流体的设计、选择及与活性物质的复合；④ 活性物质面载量及体积密度的提升；⑤ 电极整体导电性的提升；⑥ 正、负电极的匹配即全电池的构筑；⑦ 柔性电极、厚电极等的开发；⑧ 电极的工作机制即电化学反应机制的揭示等。实现具有高活性物质载量的集成式一体化电极结构设计及其简单、高效制备是该领域研究亟须解决的技术瓶颈。

（8）高强高韧低密度钢研究

低密度钢，又称轻质合金钢，是通过向钢中添加 Al、Mn、C 等轻质元素从而使合金密度降低的一种轻量化材料。研究表明，每加入 1% 的 Al，可使钢的密度降低 1.3%。低密度钢在车辆、船舶、航空航天及军事领域的轻量化与安全服役等方面有着广泛的应用前景。21 世纪初，德国马克斯·普朗克科学促进学会研究指出，Fe–Mn–A1–C 体系高强高韧低密度钢具有优异的减重潜力，带动了汽车用高强高韧低密度钢的研究热潮。2015 年，韩国浦项公司对轧制低密度钢进行了工业化试制；2022 年，中国兴澄特种钢铁有限公司也开展了高强高韧低密度钢板的工业化试制；此外，日本 JFE 公司、制铁公司，德国蒂森克虏伯公司，中国宝武钢铁集团有限公司、鞍山钢铁集团有限公司等企业也开展了低密度钢的研究和试制工作。但是由于制造成本、表面质量、应用技术等方面的原因，制约了高强高韧低密度钢的进一步开发和应用。目前，国内外对高强高韧低密度钢的研究以 Fe–Mn–Al–C 体系低密度钢为主，主要研究方向包括单一铁素体钢、铁素体基双相钢、奥氏体基双相钢和奥氏体钢四大类，在 Fe–Mn–Al–C 体系低密度钢的成分设计、组织调控、服役性能等方面仍然存在很多科学问题有待深入研究。

（9）超分散单原子合金催化材料的高效制备及催化机制

单原子合金催化剂属于单原子催化剂的子类，是将一种活性金属（常为贵金属）以单原子形式高度分散于第二金属中（常为非贵金属）制备得到的，此类催化剂具有极高的贵金属原子利用效率、高反应活性和选择性等独特优势，近年来备受关注。从 2012 年 Sykes 等提出了单原子合金 [Pd_1/Cu(111)] 这一概念开始，各国研究者探索了多种单原子合金催化剂制备方法，并将其逐步应用于燃料电池、电解水、选择性加氢以及 CO 氧化等催化反应中。目前，关于单原子合金催化剂的研究主要聚焦在三个方面：① 探索简单有效、可控调节活性位和周围原子之间相互作用且能实现原子对高配对比例的方法；② 结合原位精细结构表征分析方法和理论计算方法在原子水平上明确单原子合金结构与催化性能之间的构效关系及催化机理，为单原子合金催化剂的理性设计提供理论依据；③ 开发出贵金属载量可调的单原子合金催化剂宏量制备方法，搭

建其进行工业应用的关键桥梁。超分散单原子合金催化剂以其低贵金属载量、高催化活性、选择性和稳定性，将为工业催化的发展提供重要引擎。

（10）面向离子分离的选择性限域传质膜

离子选择性分离是膜分离技术的重要应用领域，其在盐湖提锂、盐水精制、高盐废水资源化和液流电池等领域均有一定程度的应用。传统聚合物膜材料性能受到“博弈效应”的制约，通量和选择性无法同时提升。限域传质膜因在亚纳米尺度上构建的人工通道具有独特的质量传输特性，在这一方向上有着可观的前景。目前，对于选择性离子限域传质膜的研究主要有两个方向：一是分离机理的基础性探究，尝试从通道几何结构及界面物理化学特性等方面探究微观尺度下传质动力学与选择性的影响因素，以助推膜的设计；二是从膜材料入手，通过设计诸如共价有机框架（COF）、金属有机框架（MOF）等具有不同尺寸、官能团、界面电荷的材料来实现高速传质。未来，将实现限域通道中的原位可视化表征，建立理想传质模型与实际分离膜性能间的有效连接，通过制造具有更高传质速率和选择性的限域传质膜，完成从实验室规格到规模化生产的过渡，实现产业化发展。

（11）本征安全电池体系实现可再生能源存储

规模化储能电站对电池安全性要求严苛。本征安全电池是一种具有内在安全机制的电池技术，在电池内部结构和材料上实现安全性能的提升，能够有效预防和控制热失控、爆炸和漏液等危险情况。当前，本征安全电池研究领域正在不断进行技术创新和突破。研究者致力于开发新型材料、优化电池结构设计，以提高电池的本征安全性能和电化学性能。例如，设计添加阻燃剂以有效抑制电解质的燃烧，开发本征阻燃型聚合物电解质以提升固态电池安全性，抑制锂枝晶以提升锂金属负极安全性。本征安全电池的研究方向主要包括以下方面：一是提高电化学稳定性，防止在充放电过程中发生副反应、电解液分解或电极材料不稳定等问题；二是提高电池在高温环境的热安全性，包括开发不可燃（或阻燃）电池材料、升级电池热管理系统，防止过热引发电池失控、燃烧或爆炸等安全问题；三是提高电池的机械稳定性，抵抗外部冲击及电池内部应力，避免电池破裂或内部短路等安全隐患；四是采用固态电解质、水系电解液等替代传统的有机电解液，以提高电池的安全性和稳定性，并解决有机电解液存在的燃烧、泄漏等问题。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料

如今，世界各国相继颁布了针对绿色生物制造的国家发展战略。中国的《“十四五”生物经济发展规划》中指出，要推动能源产业与重要工业产品制造与生物技术深度融合，向绿色低碳、无毒低毒、可持续发展模式转型。美国公布的《美国生物技术和生物制造的明确目标》中计划在未来 9 年内通过生物转化实现千兆吨级的 CO_2 固定，每吨的成本将低于 100 美元。利用可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成生物基化学品、生物能源及材料能实现全流程低碳化，是未来生物制造的发展重点，将颠覆原有的产业格局，降低人类对化石能源的依赖，带动未来经济绿色发展。在“双碳”目标下，自 2020 年提出“第三代生物炼制”以来，以光 / 电催化耦合生物催化为代表的研究快速发展，多样的途径和机制得到了开发。生物催化剂既能直接利用光 / 电催化材料提供的电子实现固碳，也能利用甲酸、乙酸、甲醇等 CO_2 还原的初级产品进行发酵。另外，得益于合成生物学与酶技术的进步，可再生能源驱动生物固碳的产物谱系越来越丰富，包括

L– 乳酸、二羟基丙酮、乙醇酸等原料化学品和聚乳酸（PLA）、聚羟基脂肪酸酯（PHA）等生物基可降解塑料在内的一系列产品，能够以 CO_2 为唯一碳源被生产出来。然而，与传统化工固碳产业相比，可再生能源驱动生物固碳仍存在一定的效率瓶颈，主要解决办法包括：① 挖掘和改造高活性的酶和菌种，理性设计更加高效的固碳生物途径；② 提高可再生能源的利用率，开发生物亲和、低毒性的光 / 电催化材料；③ 优化光 / 电催化模块与生物催化模块的热力学和动力学适配，或将采用分离解耦策略，保证各模块的最佳效率。

近年来，“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和机构分别见表 1.2.1 与表 1.2.2。其中，41.3% 的核心论文来源于中国（主要产出机构为中国科学院和天津大学），其次分别是美国、印度、韩国和德国，占比均在 10% 以上。图 1.2.1 和图 1.2.2 分别显示了主要国家和机构间的合作网络，全球科学家在该领域建立了广泛的合作，中国与美国合作最多。由表 1.2.3 和表 1.2.4 可以看出，施引核心论文的主要产出国家中，中国占比高达 52.02%；施引核心论文的

表 1.2.1　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	38	41.30	5 087	133.87	2019.0
2	美国	24	26.09	3 911	162.96	2018.7
3	印度	16	17.39	2 676	167.25	2019.3
4	韩国	10	10.87	1 708	170.80	2018.4
5	德国	10	10.87	1 114	111.40	2019.2
6	澳大利亚	9	9.78	1 480	164.44	2019.0
7	英国	8	8.70	922	115.25	2019.0
8	沙特阿拉伯	5	5.43	871	174.20	2019.0
9	以色列	4	4.35	635	158.75	2019.0
10	加拿大	4	4.35	538	134.50	2018.0

表 1.2.2　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	苏里尼大学	5	5.43	707	141.40	2020.0
2	中国科学院	5	5.43	536	107.20	2019.4
3	哈佛大学	4	4.35	780	195.00	2018.5
4	加利福尼亚大学伯克利分校	4	4.35	635	158.75	2019.0
5	剑桥大学	4	4.35	520	130.00	2018.8
6	劳伦斯伯克利国家实验室	3	3.26	538	179.33	2018.7
7	韩国科学技术院	3	3.26	459	153.00	2018.0
8	建国大学	3	3.26	361	120.33	2018.3
9	天津大学	3	3.26	360	120.00	2018.7
10	弗吉尼亚理工学院	3	3.26	290	96.67	2019.0

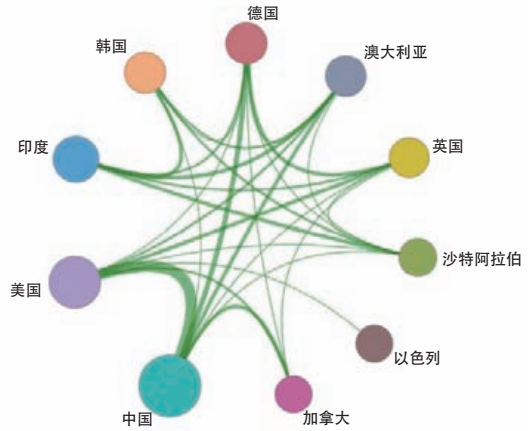

图 1.2.1　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

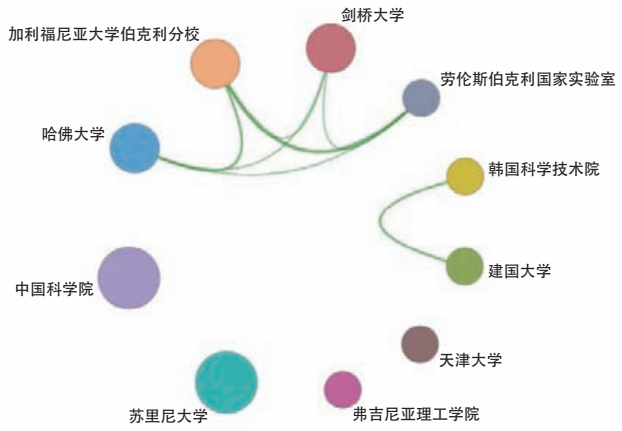

图 1.2.2　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	6 308	52.02	2021.0
2	美国	1 196	9.86	2020.7
3	印度	1 130	9.32	2021.1
4	韩国	695	5.73	2020.8
5	澳大利亚	481	3.97	2020.8
6	德国	476	3.93	2020.8
7	沙特阿拉伯	423	3.49	2021.1
8	英国	408	3.36	2020.9
9	伊朗	355	2.93	2020.8
10	西班牙	333	2.75	2020.8

主要产出机构中，除阿卜杜勒阿齐兹国王大学外，其他均为中国高校或研究所，包括中国科学院、江苏大学、清华大学等。

图 1.2.3 为“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿的发展路线。可再生能源驱动生物固碳的研究在近年来得到了迅猛发展。将转化可再生能源的人工器件与生物催化剂相耦合的关键问题在于耦合机制，在未来的研究中，首先应着重发展相应的表征技术，揭示人工器件与生物组分之间的物质和能量交流机制，并以此不断推动人工 – 生物高效互作新体系、新模型的开发。其次，生物催化剂是该过程的研究核心，工业酶和工业菌种的发掘与改良进程决定了可再生能源驱动生物固碳的产业化进程，需要借助学科交叉工具，将大数据和人工智能（AI）等计算机技术和前沿物理、化学技术应用

表 1.2.4　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	793	33.47	2021.0
2	江苏大学	202	8.53	2020.9
3	清华大学	193	8.15	2021.1
4	中国科技大学	185	7.81	2021.3
5	天津大学	178	7.51	2021.0
6	郑州大学	174	7.34	2021.2
7	湖南大学	157	6.63	2021.0
8	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	132	5.57	2021.0
9	福州大学	121	5.11	2020.8
10	哈尔滨工业大学	120	5.07	2021.1

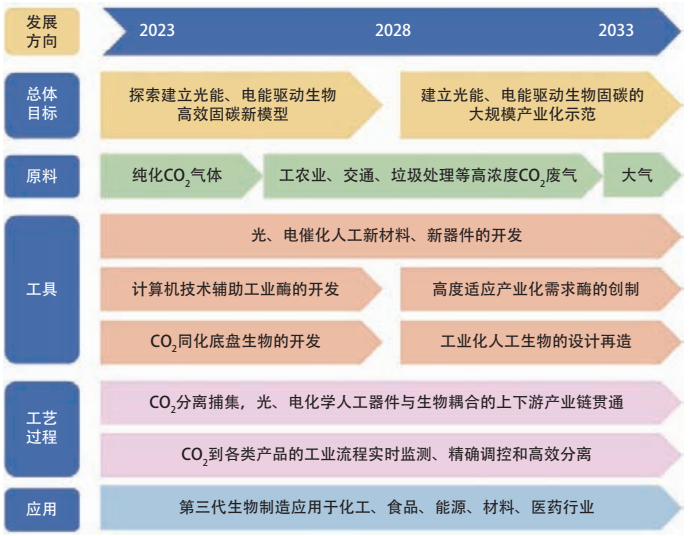

图 1.2.3　“可再生能源驱动生物催化转化二氧化碳合成化学品、能源及材料”工程研究前沿的发展路线

于工业酶、工业菌种的筛选、改造与创制，在未来几年内实现核心酶和核心菌种的技术自主化。最后，研究适用于可再生能源驱动生物固碳的高端工业反应器，实现从 CO_2 到各类燃料和化学品的实时监测、精确调控和高效分离，以适应不同的生产需求，打造有针对性的高效生产路线。

1.2.2 冶金流场混沌非线性强化技术研究

冶金反应器作为冶金工业领域的反应载体，在工业流程中发挥着十分关键的作用。冶金反应器是一个复杂多相混合反应体系，涉及气、固、液相的流动、混合、反应、传热和传质，是微观反应和宏观过程的统一体，其冶金流场作为能量和质量传递的载体，对三场协同及系统性能具有决定性作用。长期以来，对冶金反应系统的测量及数据采集技术的长足进步和在特定条件下对冶金流场的操作解析，有助于深化对其复杂化学反应过程的认识，但对其设计、优化和运行仍主要依赖于经验数据。冶金流场混沌非线性强化技术是近年来冶金科学和工程领域的前沿研究方向。该技术结合了流体力学、混沌理论和非线性科学的知识，旨在优化冶金过程中的流场行为，从而提高生产效率。

冶金多相流动为典型的远离平衡态的非线性过程，蕴含着诸多复杂的非线性动力学机制，呈现出时空跨尺度关联耦合的特征，导致冶金反应体系的混合传递与化学反应过程缺乏协同性，给有效调控强化和工程放大带来了挑战。该领域的核心研究方向是，冶金反应器多相体系中连续相和分散相拓扑结构时空演化的协同性、混沌流混合特性与多物理场的协同作用及其与传递性能的相关性。冶金流场混沌非线性强化的研究路径如下：首先，通过混沌理论对冶金过程中的多相非线性系统进行描述，采用混沌强化实现相间物质和能量的快速传输，以加快化学反向速率；进而实现流场、温度场、组分场的多物理场协同耦合，有效进行流场分布调控；接下来，通过强化流动 – 传递 – 反应的“协同性”和“均匀性”，实现高效均匀混合和强化热质传递，为冶金过程的强化和反应器的优化设计提供理论基础。

近年来，“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.5 和表 1.2.6。主要产出国家中，中国位居第一，伊朗次之。主要产出机构中，伊斯兰阿扎德大学位居第一，中国的西安交通大学、上海交通大学、中国科学院三所机构上榜。主要国家及机构间的合作网络分别见图 1.2.4 与图 1.2.5。中国在该领域合作网络中处于核心地位，与多个国家形成合作关系，特别是与巴基斯坦的合作关系尤为突出。巴基斯坦在网络中也是一个重要的节点，与除英国和新加坡之外的所有国家都有合作。机构间的合作在亚洲内部紧密联系，其中伊斯兰阿扎德大学在该领域合作网络中处于核心地位，与多所机构有着合作关系。由表 1.2.7 可知，中国是施引核心论文数最多的国家，施引数为 2 490 篇，占比为 26.51%。中国的核心论文数和施引核心论文数均排名第一，说明中国学者在该领域的研究处于领先地位，对该前沿的动态保持密切的关注和跟踪。

冶金流场混沌非线性强化技术利用混沌非线性理论，研究冶金过程多相流体混合机制，解析流场多尺度结构的形成、输运和转化。到目前为止，受限于实验测量技术和多尺度模拟方法的发展，有关混沌流在极端及超常规冶金、装备大型化方面的研究还有限；同时，该研究方向涉及冶金、流体和物理等多个学科的交叉领域。如图 1.2.6 所示，未来的研究方向包括：① 极端及超常规冶金反应流场的混沌流强化，突破电场 – 磁场 – 热应力场条件下极端超常规冶金过程混沌流强化，打破学科间壁垒，强化非线性混沌理论的系统性和普适性；② 超大型冶炼装备混沌流放大机制及准则，突破冶金流场混沌流型放大机制及准则，解决超大型冶炼装备放大过程理论缺乏导致的放大失真、运行失稳、工艺失配等问题；③ 基于机器学习

表 1.2.5　“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	40	33.33	3 192	79.80	2019.0
2	伊朗	26	21.67	2 411	92.73	2018.5
3	美国	20	16.67	1 632	81.60	2018.4
4	印度	20	16.67	1 529	76.45	2019.8
5	巴基斯坦	16	13.33	992	62.00	2019.9
6	沙特阿拉伯	13	10.83	1 099	84.54	2019.6
7	英国	8	6.67	872	109.00	2019.2
8	越南	8	6.67	540	67.50	2019.9
9	新加坡	7	5.83	454	64.86	2018.7
10	阿拉伯联合酋长国	6	5.00	393	65.50	2019.3

表 1.2.6　“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	伊斯兰阿扎德大学	10	8.33	893	89.30	2018.8
2	西安交通大学	8	6.67	499	62.38	2018.5
3	孙德胜大学	7	5.83	491	70.14	2019.7
4	南洋理工大学	6	5.00	410	68.33	2019.0
5	上海交通大学	4	3.33	453	113.25	2019.8
6	中国科学院	4	3.33	433	108.25	2017.8
7	法赫德国王石油与矿业大学	4	3.33	410	102.50	2020.2
8	伊朗科学技术大学	4	3.33	309	77.25	2019.0
9	印度理工学院	4	3.33	284	71.00	2019.0
10	伊斯兰堡通信卫星大学	4	3.33	229	57.25	2020.2

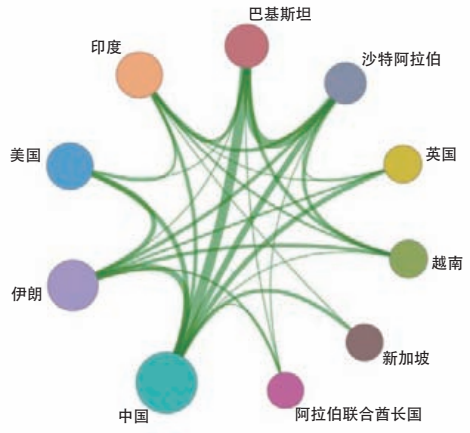

图 1.2.4　“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

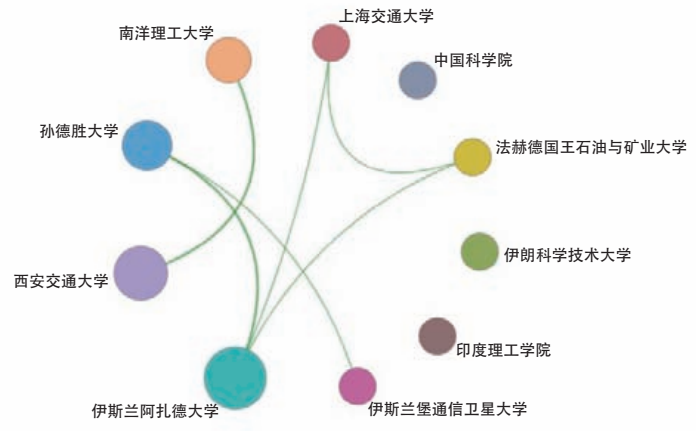

图 1.2.5 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 490	26.51	2021.0
2	沙特阿拉伯	1 327	14.13	2021.3
3	巴基斯坦	1 157	12.32	2021.1
4	印度	1 050	11.18	2021.2
5	伊朗	1 003	10.68	2020.5
6	美国	560	5.96	2020.8
7	埃及	458	4.88	2021.5
8	英国	366	3.90	2021.1
9	越南	351	3.74	2020.2
10	马来西亚	315	3.35	2021.0

表 1.2.8 “冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	哈立德国王大学	360	14.84	2021.5
2	伊斯兰阿扎德大学	306	12.61	2020.5
3	阿卜杜勒阿齐兹国王大学	301	12.41	2021.2
4	孙德胜大学	279	11.50	2020.0
5	萨塔姆·本·阿卜杜勒阿齐兹王子大学	230	9.48	2021.6
6	西安交通大学	195	8.04	2020.9
7	中国医药大学	191	7.87	2021.5
8	伊斯兰堡通信卫星大学	169	6.97	2021.4
9	巴博勒理工大学	159	6.55	2019.4
10	维新大学	129	5.32	2020.5

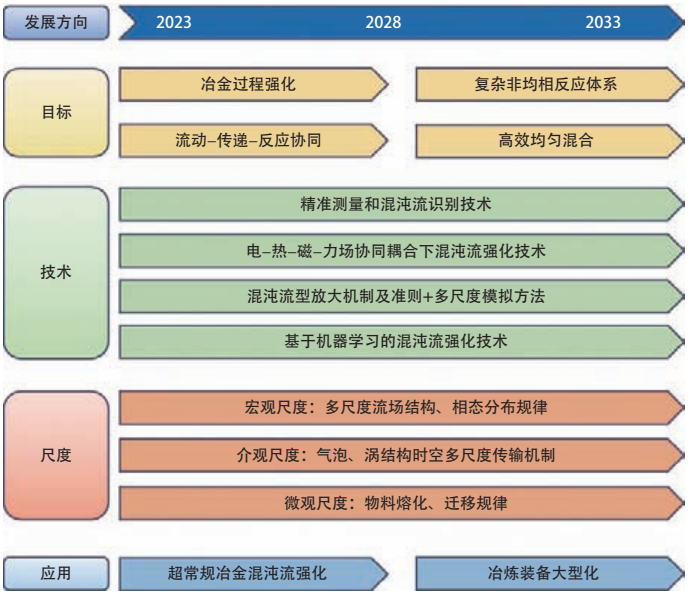

图 1.2.6　“冶金流场混沌非线性强化技术研究”工程研究前沿的发展路线

的冶金流场混沌非线性强化技术，构建基于机器学习的冶金流场非线性强化模型，突破冶金过程多因素复杂耦合机制，加强冶金系统智能化的软、硬件建设。

1.2.3　面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系

利用可再生能源驱动电还原 CO_2 生成高附加值化学品为解决能源危机和环境问题提供了一种有效的方法。近年来，用于二氧化碳还原的电催化剂材料的研发在选择性、效率和反应速率方面取得了极大进展，并朝着实际应用的方向发展。CO_2 可通过电还原制备各种化工产品，如甲酸、合成气、醇类和烯烃等，这些产品的生产规模较大，因此转向可再生能源驱动生产可以极大地减少 CO_2 的排放。

由于 CO_2 具有极高的热力学稳定性，导致其很难被活化。此外，通过 C–C 偶联生成高附加值 C_{2+} 产品也存在难度。近几十年来，CO_2RR 领域的研究在高活性或高选择性电催化剂的设计及 CO_2RR 机理方面取得了重大进展。目前的研究主要集中在以下几个方面：① 合理设计、可控制备高效电催化剂，通过晶面、形貌、表面电子结构调控等措施，提高其上的 CO_2RR 活性、选择性和稳定性；② 利用各种原位表征手段，如原位红外光谱、原位拉曼光谱、原位电镜等技术，对 CO_2RR 过程中的反应中间体和催化剂表面结构演变进行监测，从而揭示其上催化剂表面和电子结构对催化反应的调控作用及动力学机制；③ 合理设计电极结构，通过疏水性材料（如聚四氟乙烯等）改性，提高电极表面的疏水性能，从而避免长期运行过程中的液泛问题，使得电极稳定性得到提高。优化调节电解反应器的结构，增强反应传质和提高能量效率。

近年来，“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家及机构分别见表 1.2.9 和表 1.2.10。主要产出国家中，中国位居第一，核心论文 71 篇，占比达 66.36%，远高于美国、澳大利亚、加拿大等国家。主要产出机构中，中国科学院位居第一，中国科技大学和斯坦福大学次之。主要国家及机构间的合作情况分别见图 1.2.7 和图 1.2.8。中国与美国的合作较多，中国与澳大利亚、加拿大和新加坡也有密切合作。由表 1.2.11 可知，施引核心论文数排名前三的国家是中国、

美国和澳大利亚，其中，中国施引核心论文占比达 57.95%，说明我国学者对该前沿的研究动态保持密切的关注。施引核心论文的主要产出机构多为中国机构，包括中国科学院、中国科技大学、天津大学等（表 1.2.12）。

在温和条件下通过电催化将 CO_2 活化转化，进而合成社会经济发展所需化学品，这是发展绿色低碳能源技术的重要途径。CO_2 电催化转化是一个复杂的多尺度过程，涉及 CO_2 分子吸附与转化、纳米尺度催化剂、微米尺度膜电极以及宏观尺度电解槽。目前的研究主要集中在寻找和改进高性能电催化剂，未来还需要结合各类原位表征手段在以下几个方面展开研究：电极形态演变、反应工艺条件优化、电极 / 电解质界面演变、传质运输优化、催化剂稳定性提高以及电解质 / 溶剂效应的影响等。此外，对于未来电催化还原 CO_2 技术的工业化应用，还需要考虑以下几点：确定实际应用目标、评估化学产品经济性和市场供需、扩大 CO_2 电解槽规模、提高电催化剂的长期连续运行稳定性、核算产品分离及原料回收的成本。图 1.2.9 为“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	71	66.36	17 849	251.39	2019.0
2	美国	31	28.97	8 069	260.29	2018.8
3	澳大利亚	12	11.21	2 946	245.50	2018.9
4	加拿大	11	10.28	4 406	400.55	2019.1
5	韩国	9	8.41	1 429	158.78	2018.8
6	新加坡	7	6.54	2 569	367.00	2018.9
7	瑞士	4	3.74	764	191.00	2018.5
8	德国	4	3.74	686	171.50	2018.8
9	法国	4	3.74	681	170.25	2019.2
10	丹麦	3	2.80	749	249.67	2018.3

表 1.2.10 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	25	23.36	6 474	258.96	2019.1
2	中国科技大学	9	8.41	2 517	279.67	2019.4
3	斯坦福大学	7	6.54	1 813	259.00	2019.3
4	天津理工大学	6	5.61	1 616	269.33	2018.7
5	北京化工大学	6	5.61	1 260	210.00	2019.0
6	南洋理工大学	5	4.67	1 846	369.20	2019.0
7	SLAC 国家加速器实验室	5	4.67	1 032	206.40	2019.4
8	多伦多大学	4	3.74	2 155	538.75	2020.0
9	天津大学	4	3.74	2 082	520.50	2018.0
10	耶鲁大学	4	3.74	1 860	465.00	2017.5

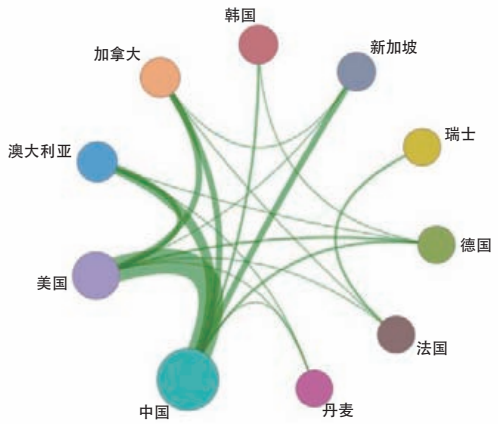

图 1.2.7　“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿主要国家间的合作网络

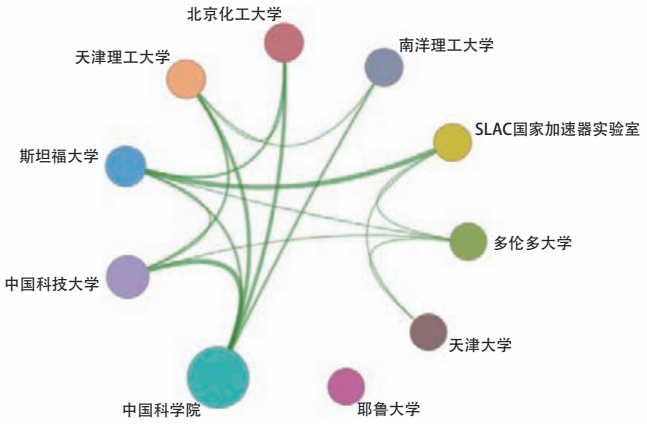

图 1.2.8　“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	8 508	57.95	2021.0
2	美国	1 928	13.13	2020.6
3	澳大利亚	746	5.08	2020.8
4	韩国	612	4.17	2020.9
5	德国	524	3.57	2020.8
6	加拿大	521	3.55	2020.7
7	印度	424	2.89	2021.1
8	英国	407	2.77	2020.8
9	新加坡	405	2.76	2020.8
10	日本	386	2.63	2020.8

表 1.2.12 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	1 705	36.28	2020.9
2	中国科技大学	525	11.17	2021.0
3	天津大学	405	8.62	2021.0
4	清华大学	374	7.96	2021.0
5	北京化工大学	303	6.45	2020.8
6	郑州大学	300	6.38	2021.2
7	苏州大学	260	5.53	2020.9
8	南洋理工大学	230	4.89	2020.7
9	浙江大学	209	4.45	2021.0
10	深圳大学	196	4.17	2021.1

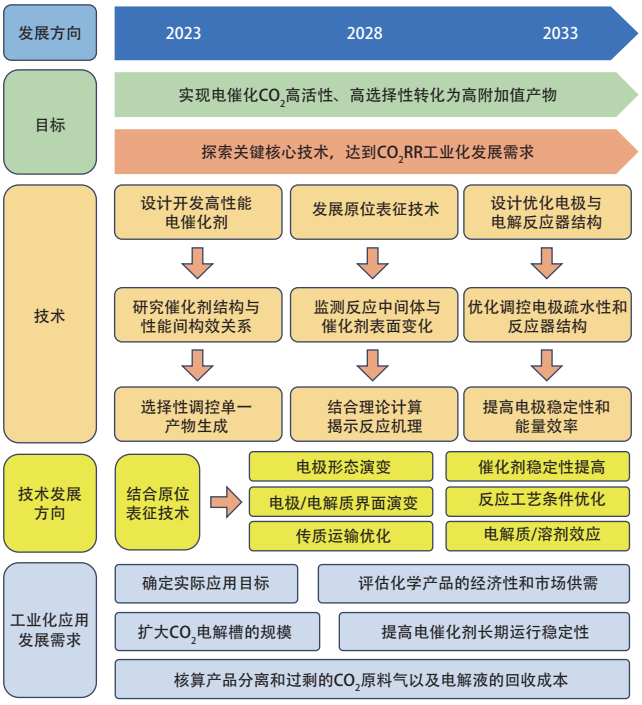

图 1.2.9 “面向二氧化碳转化利用的高效电催化剂与反应体系”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 11 工程开发前沿见表 2.1.1。其中，“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”“高效光伏器件的构建与规模化制造技术”“低温低压条件下绿氨宽负荷制

备技术”“富氢碳循环高炉炼铁技术”是专家推荐的前沿；其他前沿则是基于数据由专家研判而来。2023年入选的开发前沿，专利逐年公开量整体呈现出增长的趋势，尤其是“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”“面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发”“富氢碳循环高炉炼铁技术”的增长速度较快（表 2.1.2）。

（1）基于可再生能源的冶金低碳化利用

复杂金属物料的冶炼过程需要大量的电力消耗，并依赖化石燃料的还原特性及燃烧供热，这是制约冶金工业低碳可持续发展的关键。可再生能源可以提供清洁电能、生物质能和绿氢，同时具备了还原性和燃烧供热属性，其在冶金领域的高效应用，有望实现冶金工业绿色低碳转型。中国已经研发出了比较完整的

表 2.1.1　化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	基于可再生能源的冶金低碳化利用	520	223	0.43	2020.4
2	基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备	482	1 354	2.81	2020.9
3	面向高温环境的金属基复合材料设计与制备	596	1 033	1.73	2019.7
4	面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发	697	774	1.11	2020.0
5	冶金炉窑混沌强化供热技术	775	501	0.65	2019.8
6	高效光伏器件的构建与规模化制造技术	705	1 066	1.51	2019.4
7	低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术	540	890	1.65	2019.5
8	富氢碳循环高炉炼铁技术	353	582	1.65	2020.2
9	超高能量密度铝 – 空气电池的研发及应用	400	656	1.64	2019.7
10	高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用	358	335	0.94	2019.8
11	新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备	208	464	2.23	2019.6

表 2.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	基于可再生能源的冶金低碳化利用	40	48	48	90	140	154
2	基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备	12	22	46	66	123	213
3	面向高温环境的金属基复合材料设计与制备	84	101	87	93	106	125
4	面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发	83	90	92	105	131	196
5	冶金炉窑混沌强化供热技术	97	113	109	132	157	167
6	高效光伏器件的构建与规模化制造技术	126	142	108	95	100	134
7	低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术	101	76	93	81	86	103
8	富氢碳循环高炉炼铁技术	32	48	39	55	59	120
9	超高能量密度铝 – 空气电池的研发及应用	52	53	77	77	68	73
10	高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用	46	50	55	53	72	82
11	新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备	32	37	32	28	36	43

钢铁氢冶金系统，并实现了百万吨以上规模氢冶金示范工程，水电硅、水电铝也在云南实现了产值超千亿元。但在有色金属火法冶炼产业的可再生能源燃烧与还原技术领域，尚有很多问题亟待深化研究。未来技术发展方向包括：① 构建多能互补与储能系统相结合的冶金用能体系，形成风 – 光 – 水 – 氢与冶金余热余能的互补清洁供能系统；② 开发生物质燃油旋流喷吹深度还原冶金熔渣新技术，以可再生能源替代化石能源还原剂；③ 开发生物质燃油旋流雾化强化燃烧技术，提高大分子、低热值的生物质燃油的燃烧供热效率，以可再生能源替代化石燃料，从而实现冶金用能结构清洁低碳化，从全生命周期和源头减碳角度提高冶炼用能水平、降低碳排强度。

（2）基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备

化工新材料的开发周期长达 15~25 年，投入巨大，高度依赖专家经验。随着领域日益成熟，领域内数据呈现出总量海量但细分体系内稀疏的特点，依靠专家经验总结新材料规律愈发困难，亟需一场研究范式的变革。2023 年初，ChatGPT 横空出世，LIaMA、Claude、文心一言和悟道等紧随其后，拉开了大语言模型（以下简称大模型）的时代。大模型规模大，具有涌现性和通用性，有望应用于化工领域，以加速新材料的设计与制备。大模型能在文献信息提取、材料结构生成、材料性质预测、合成条件优化和智能化表征等环节全面加速新材料的开发。① 文献信息提取是整合化工材料数据的主要手段，大模型能够基于传统模型的结果进行精修，输出结构化的信息，从而提升数据质量。② 材料结构生成是逆向设计新材料的关键技术，大模型的涌现性有望突破人类的思维定式。③ 材料性质预测是高通量筛选的前提，大模型能整合领域内的各类小型模型，实现对各类材料性质的精准预测。④ 合成条件优化与智能化表征是摸索材料制备工艺的核心步骤，大模型挖掘规律的能力更强，能更快找到最优点。

（3）面向高温环境的金属基复合材料设计与制备

金属基复合材料 (metal matrix composite，MMC) 是以金属或合金作为基体，与一种或多种增强相结合而成的多相材料。MMC 兼具金属或合金基体和增强相的特性，具有高比强度、高比模量、低密度和良好的导电性及导热性等优异性能，在航空航天、汽车、电子信息、国防工业等领域得到了广泛应用。近年来，对于 MMC 的研究大多集中于改善材料的室温力学性能（尤其是强韧性），对于高温性能的研究相对较少。在高温和应力耦合的工况下，溶质原子具有相对更快的扩散速率，且更容易受到服役环境引起的氧化和腐蚀等不利影响，长期服役后往往以热疲劳或蠕变损伤的形式失效。与室温工况下服役的材料相比，高温工况下服役的材料往往具有相对更短的服役寿命，亟须对其组织结构进行设计以满足高温服役要求。目前，国内外的材料开发主要集中在以下方面：① 基于材料基因工程的复合材料高通量制备与表征技术；② 材料成型过程中构型与界面的精细化控制技术；③ 耐热铝基复合材料大尺寸构件短流程制造技术；④ 高温服役环境下复合材料演变规律、性能退化机理和控制技术。

（4）面向能量密集型化工过程的高效节能分离新技术开发

化学工业能源消耗和碳排放量大，居工业领域前列，其中化工分离过程能耗约占化工产品加工总能耗的 70%。目前，尽管部分行业的技术和装备有所提高，但整体技术水平仍然较低，我国全行业达到国际先进水平的技术装备占比较低，能源利用率比发达国家低 15% 左右，一些化工产品的单位能耗比发达国家高 20% 以上。开发和推广化工分离过程节能新工艺、新技术和新装备，降低化石能源消耗，提高能量利用效率，充分利用高新技术提升改造传统化学工业，才能提高生产效率，推进节能减排，促进产业升级。未来，面向能量密集型化工过程的分离技术发展将主要聚焦于以下两个方面：① 开发可替代的高效分离新方法，

如分子识别分离技术、分离过程耦合与强化技术等，针对不同待分离体系的特点选择合适的分离方法，进而提升分离过程能量利用效率；② 开发可再生的输入能源新形式（如太阳能、生物质能、绿氢、绿电等），降低分离过程中化石能源的使用比例，通过开发使用可再生能源的新型分离技术，向电气化方向发展，推进化工产业向绿色、可持续、高效化升级。

（5）冶金炉窑混沌强化供热技术

冶金炉窑节能增效的主要手段是对其供热过程进行强化。传统强化供热主要依靠增大供热量，导致冶金工业能耗和碳排放高、设备寿命短、产品质量不能满足高端使用等问题。冶金炉窑混沌强化供热技术引入混沌数学理论，通过创建混沌流强化系列数学模型，开辟调控混沌流流型来强化热质传递的新途径。目前，该技术已经在熔池熔炼炉和热处理用加热炉上实现了工业化应用，但炉窑热质传递强化机制和多场协同强化机理两大关键科学问题尚未解决，数学模型与实际应用的吻合度不够。该技术的发展方向主要集中于以下三方面：① 继续深入研究炉窑热过程非线性混沌强化基础理论及技术，进一步完善最低燃耗强化供热法则及模型，解决供热不精准的问题；② 针对熔池熔炼炉喷溅严重、设备寿命短的问题，开发富氧旋流混沌搅拌供热技术，解决富氧利用不充分、自热不足能耗高的难题；③ 针对加热炉供热不精准、燃料燃烧不完全的问题，开发加热炉旋流混沌燃烧及强化供热制度调控技术，解决金属工件加热均匀性难以精准化的难题，保证加热质量、降低能耗，实现均匀精准加热。

（6）高效光伏器件的构建与规模化制造技术

发展光伏技术是可再生能源利用的重要举措。随着“双碳”目标的推进，分布式光伏扮演着越来越重要的角色。为了弥补传统硅晶电池的不足，一些新兴的薄膜光伏技术如碲化镉、铜铟镓硒、钙钛矿、聚合物太阳电池等应运而生。最近，这些光伏技术在能量转换效率和大规模制造技术方面都取得了长足的研究进展，这也是新兴光伏技术提升竞争力、走向商业化的关键。这些光伏技术的独特优势极大地拓展了光伏技术的应用领域，使其能够融入城市基础设施、消费电子等领域，如光伏建筑一体化、便携式可穿戴设备。未来，光伏技术发展需要关注以下四个方面：① 更好地融入新型能源电力系统，支撑智慧城市建设；② 与储能技术相结合，实现绿色能源的稳定供应和高效利用；③ 光伏组件的回收利用，推动行业绿色可持续发展；④ 对于新型光伏技术，降低成本、提高寿命、突破量产将是技术突破的关键。

（7）低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术

氨在现代农业与工业中起着重要作用，年产量为 1.8 亿吨。因其具有易液化、高能量密度和零碳排放的特点，氨被称为“氢 2.0”，有望成为下一代清洁能源载体。工业上，N_2 与 H_2 反应合成 NH_3 是一个放热、体积变小的过程，低温、高压有利于反应的进行。然而，由于 N_2 分子具有较高的键能和较弱的配位能力，使得 N_2 在低温下难以活化。目前，合成氨工业是在高温、高压条件下窄负荷连续进行，不仅高能耗、高碳排放，而且与光伏、风电等清洁能源的波动性特点不匹配，难以进行绿色升级。未来，低温低压条件下绿氨宽负荷制备技术的发展主要聚焦于以下几个方面：① 开发具有高本征活性的催化剂，降低 N_2 在催化剂表面的吸附能垒，提升低温下 N_2 的活化能力；② 在传统的热催化反应器中引入变频的电、磁等外场，利用外场变化调节催化剂活性中心电子结构，打破吸脱附限制；③ 研制快速响应装置与系统，拓宽低温、低压条件下合成氨的负荷区间。

（8）富氢碳循环高炉炼铁技术

高炉炼铁是目前炼铁生产的主要方法，2022 年全球高炉生铁产量超过 13 亿吨，在未来相当长的一段

时间，高炉 – 转炉流程工艺仍将是钢铁生产的重要方式。钢铁制造过程中，约 2/3 的碳排放来自高炉炼铁过程，降低高炉炼铁过程中的碳排放是全球钢铁企业研发的热点。富氢碳循环高炉炼铁技术通过向高炉中喷吹富氢气源（如焦炉煤气），用含氢还原气替代传统高炉中焦炭和煤的作用，同时辅以炉顶煤气循环（top gas recycling，TGR）技术和 CCUS 技术，将高炉煤气中的 CO、H_2 循环再利用，将 CO_2 脱除后再利用，从而最大程度减少高炉炼铁过程中的碳排放。富氢碳循环高炉炼铁技术不改变现有高炉工艺流程结构或炉料结构，是当前传统高炉炼铁碳减排的首选技术。目前，日本制铁公司、德国蒂森克虏伯公司、中国宝武钢铁集团有限公司等企业都在积极开展富氢碳循环高炉炼铁技术开发和工业试验，并取得了阶段性的减碳成效。未来，富氢碳循环高炉炼铁技术开发的重点包括全氧炼铁、炉顶煤气 CO_2 脱除后加热循环利用、富氢复合喷吹、富氢碳循环高炉全氧冶炼工况下的煤气自循环工艺等。

（9）超高能量密度铝 – 空气电池的研发及应用

随着全球经济发展，世界各国对能源的需求急剧增加，能源问题已引起全人类的高度关注。目前常见的传统能源有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池等，其在能量密度、安全性及生产成本等方面存在局限性，而铝 – 空气电池凭借高电压（理论值 2.7 V）、高比容量（2 980 mAh/g）、高比能量（8 100 Wh/kg）、高安全性、材料来源广泛、无污染等优点，已成为最具潜力的电化学储能体系之一。针对铝负极表面析氢副反应抑制的研究从 20 世纪末就已经开始，国内外研究人员在电池负极材料合金化、电解液添加剂改性以及有机电解质等关键技术领域均已取得长足的进步。但目前国际社会对能源需求和技术指标提出了新的目标，在进一步明晰电池反应机制的基础上，设计及开发适合大批量生产的超高能量密度、高安全性、高功率的铝 – 空气电池变得尤为重要。具体来看，未来铝 – 空气电池基础研究及工业应用方面需实现三大关键技术突破：① 电池改性技术手段（含负极合金化冶炼、电解液添加剂改性等）及相应表 / 界面反应机制机理；② 金属燃料电池各组件耦合模型及后续优化技术手段，简化电池结构，便于规模化应用；③ 持续开发铝 – 空气电池全流程低碳、安全、低成本的关键技术，并有效开发利用电池副产物，提升铝 – 空气电池应用带来的经济效益。

（10）高纯金属、合金及其材料关键制备技术及应用

高纯金属、合金及其材料主要应用于半导体、无线电子、航空航天、军工等尖端科技领域。其制备方法包括化学提纯和物理提纯。化学提纯主要依托于化学反应过程的“反应性 – 选择性”原理，综合反应体系构建、反应条件控制、反应环境优化等手段，将材料中的杂质元素通过选择性化学反应除去；物理提纯主要利用不同元素的“相似性 – 差异性”物理特性，通过真空蒸馏、区域熔炼、电迁移等手段实现除杂的目的。欲获得高度纯化的材料，通常将化学提纯和物理提纯方法结合并合理运用。高纯金属、合金及其材料提纯制备需解决的核心问题主要包括：① 材料中杂质元素的稀散赋存与分布机制；② 元素相似性及其选择性分离动力学，需计算基体与杂质之间的相互作用力、吸脱附热以及动力学平衡参数等；③ 材料纯化过程杂质物相形态转变规律、迁移行为以及提纯过程参数调控。

（11）新型生物航空燃料的分子设计与规模化制备

新型生物航空燃料分子是由生物质原料经化学键精准断链再定向合成的具有精确结构及特殊性能的燃料分子，在航空领域具有重要的发展潜力。目前关于新型生物航空燃料的研究主要聚焦于：① 生物燃料分子设计，深入研究燃料分子结构与理化性质之间的构效关系，建立大通量燃料分子理性设计及筛选方法，结合生物质原料分子结构特征快速获得目标分子结构库；② 高效合成方法，创建原子利用率高、温和高

效的合成路径，实现生物质原料到航空燃料的全流程高收率转化；③ 高活性低成本催化剂，深入解析催化反应机制，明确催化剂结构与生物质催化转化性能的构型关系，开发具有高活性和选择性的贵金属低载量超分散催化剂或非贵金属催化剂；④ 燃料规模化制备，在现有基础上持续改进催化剂和工艺，开发集成工艺，优化反应器结构，提高反应效率、降低能耗。面向航空领域碳减排的急迫需求，需要加快生物航空燃料的精细设计、高效合成及工程化放大研发步伐，突破可全组分替代石油基航煤的新型生物航空燃料制备技术。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　基于可再生能源的冶金低碳化利用

钢铁及有色冶金工业的采选、冶炼、热处理等全流程工艺过程都要直接消耗大量化石燃料，实施清洁能源替代成为解决碳排放问题的有效措施。实现绿色冶金产业发展思路，首先就要依托优势资源和清洁能源聚集地，重构冶金产业布局，鼓励冶金产能向风能、太阳能、水电等可再生能源富集区或金属资源 / 再生资源富集区转移。例如，结合产业链基地建设，可在核电企业附近布局铝电解等用电冶金产业。另外，制造工艺成熟但应用规模始终受限的生物质能作为唯一含碳的可再生能源，也是冶金燃料及还原剂的最佳绿色低碳替代。在此基础之上，探索可再生能源在冶金领域的高效应用是实现冶金工业绿色低碳转型的新路径。

从钢铁冶金领域来看，可再生能源利用近年来发展迅速，已经引入了氢能、太阳能、风能、水电、煤转气等清洁能源，突破了多能协同互补技术，提高了冶金行业清洁能源使用比例；发展了余热利用等能源回收新方法，通过优化关键工艺和装备改进，促进了跨工序、跨行业的能源回收利用。但可再生能源存在间断不稳定的问题，较难实现连续稳定供能的要求。目前，中国已经研发出了比较完整的钢铁氢冶金系统。以河北钢铁集团的 120 万吨规模氢冶金示范工程为例，该项目是全球首次使用焦炉煤气“自重整”方式制氢，用获得的氢气直接还原含铁原料，生产出高品质的直接还原铁。同时，有色冶金工业的绿色电力替代发展也非常迅速，如可再生能源丰富的云南省在引进硅项目的同时，还在加速吸引电解铝企业，其绿色铝、硅建成产能规模居全国前列，产值超千亿元。将高耗电的硅铝产业与清洁能源结合，可实现水电硅、水电铝材产业一体化绿色发展。但生物质能在冶金行业的燃烧和还原替代技术的研发与应用还在起步阶段，未来的减排潜力巨大。

由表 2.2.1 和表 2.2.2 可以看出，相关专利基本全部出自中国，符合世界第一冶金大国的产业发展需求。

表 2.2.1　“基于可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	513	98.65	218	97.76	0.42
2	印度	2	0.38	0	0.00	0.00
3	韩国	2	0.38	0	0.00	0.00
4	荷兰	1	0.19	5	2.24	5.00
5	俄罗斯	1	0.19	0	0.00	0.00

而昆明理工大学拥有地区新能源资源和冶金科技研发能力的双重优势，在钢铁、有色冶金两个领域的专利数量和被引数均为第一。

未来 20 年，“可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.1 所示：技术前沿主要集中于构建多能互补与储能系统相结合的冶金用能体系，形成风 – 光 – 水 – 氢与冶金余热余能的互补清洁供能系统；开发生物质燃油旋流喷吹深度还原冶金熔渣新技术，以可再生能源替代化石能源还原剂；开发生物质燃油旋流雾化强化燃烧技术，以可再生能源替代化石燃料，从而实现冶金用能结构清洁低碳化。总体目标：在未来 10 年实现从传统的“碳冶金”向颠覆性绿色低碳冶金的转变，在下一个 10 年实现从全生命周期和源头减碳角度提高冶炼用能水平、降低碳排强度，实现全冶金过程零排放。

表 2.2.2 “基于可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	昆明理工大学	14	2.69	16	7.17	1.14
2	中冶赛迪工程技术股份有限公司	13	2.50	4	1.79	0.31
3	江苏省镔鑫钢铁集团有限公司	7	1.35	1	0.45	0.14
4	宝山钢铁股份有限公司	6	1.15	2	0.90	0.33
5	沧州中铁装备制造材料有限公司	5	0.96	2	0.90	0.40
6	云南德胜钢铁有限公司	4	0.77	1	0.45	0.25
7	乌海德晟煤焦化有限公司	4	0.77	0	0.00	0.00
8	青岛理工大学	3	0.58	6	2.69	2.00
9	新化县群华陶瓷科技有限公司	3	0.58	4	1.79	1.33
10	鞍钢股份有限公司	3	0.58	3	1.35	1.00

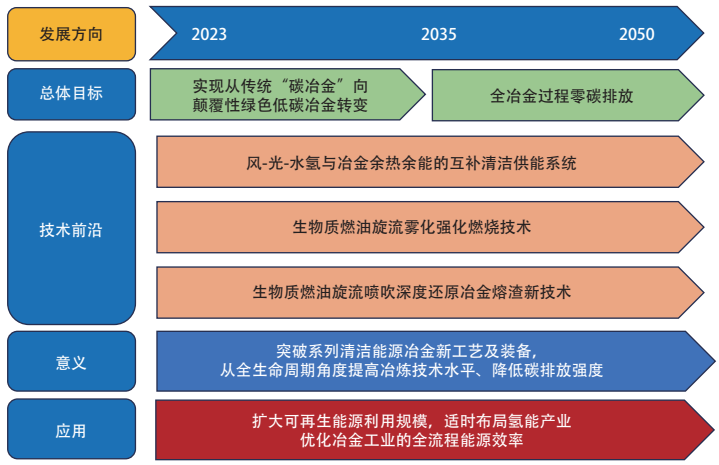

图 2.2.1 “基于可再生能源的冶金低碳化利用”工程开发前沿的发展路线

2.2.2　基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备

化工与材料行业是工业社会的支柱产业，是人类开发和改造物质世界的基石。每一种新材料的发现和量产，都是一次飞跃。然而依靠实验试错和人力总结规律的传统研发范式已经面临瓶颈，化工新材料的设计与制备速度趋缓，研究范式需要革新。在化工新材料领域，数据特点是总量大且分布稀疏，依靠人力或者传统模型无法有效地挖掘隐藏在海量数据背后的深层次规律，而大模型有望整合领域知识并结合具体材料体系微调，实现先“通”再“专”的技术路径，触类旁通，帮助科学家突破思维定式，加速材料开发。

早在 2011 年，美国就率先发起了“材料基因组”计划；我国也紧跟前沿，创办了独立自主的材料基因工程关键技术与支撑平台重点专项。随着 AI 的不断发展，面向化工新材料开发的专利数量逐年递增，呈现出一超一强、多头紧随的格局。由表 2.2.3 可以看出，中美两国在该领域的专利数量超过全球专利总数的七成，其余专利来源主要是发达国家。虽然中美专利数量接近，但被引用数差距较大，说明美国在该领域依然保有领先地位。表 2.2.4 说明，美国的主要产出机构既有高校又有企业，而我国的主要产出机构仅有高校，说明在产学研一体化上我们仍需追赶。此外，在该领域相关的国际合作与交流上，我国的开放程度不够，如图 2.2.2 所示，还需要进一步扩大相关领域的国际影响力。目前，这一领域已经成为国际热点，

表 2.2.3　“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	180	37.34	877	64.77	4.87
2	中国	177	36.72	337	24.89	1.90
3	印度	33	6.85	0	0.00	0.00
4	韩国	24	4.98	33	2.44	1.38
5	日本	21	4.36	24	1.77	1.14
6	英国	11	2.28	28	2.07	2.55
7	德国	10	2.07	8	0.59	0.80
8	加拿大	8	1.66	13	0.96	1.62
9	澳大利亚	5	1.04	3	0.22	0.60
10	瑞士	3	0.62	13	0.96	4.33

表 2.2.4　“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	国际商业机器公司（IBM）	14	2.90	34	2.51	2.43
2	英特尔公司	8	1.66	35	2.58	4.38
3	广州大学	8	1.66	2	0.15	0.25
4	美光科技公司	7	1.45	0	0.00	0.00
5	Peptilogics 公司	6	1.24	14	1.03	2.33
6	Freenome 公司	6	1.24	13	0.96	2.17
7	加利福尼亚大学	6	1.24	7	0.52	1.17
8	浙江大学	5	1.04	10	0.74	2.00
9	Ro5 公司	5	1.04	6	0.44	1.20
10	斯坦福大学	4	0.83	26	1.92	6.50

相关专利公开量逐年加速上升，平均被引数位居 Top 11 工程开发前沿之首（表 2.1.1 和表 2.1.2），但直接应用大模型进行材料开发的专利还是一片空白，领域仍处于起步阶段，发展空间广阔。

在未来 5 ~ 10 年（图 2.2.3），大模型将助力化工新材料行业的多个环节，从文献信息提取、材料结构生成、材料性质预测、合成条件优化、智能化表征等方面加速化工新材料的设计与制备。第一，文献信息提取是化工材料数据平台采集数据的主要途径。大模型能够精修传统模型的提取结果，输出高度结构化的信息，从而构建高质量的领域数据库。建立高质量的领域语料数据集，并借助领域知识进行微调，是实现大模型助力文献提取的关键步骤。第二，材料结构生成是逆向设计新材料的关键技术。大模型的涌现性有望突破人类的思维定式，挖掘数据背后的联系，提出合理的猜想。生成模型是 AI 领域内的难题，攻克这一问题是实现 AI 提出科学猜想的必经之路。第三，材料性质预测是高通量筛选的前提。大模型能整合领域内的各类小型模型，从而实现对各类材料性质的精准预测。大模型在集成小模型的基础上，可以学习小模型的参数，从模型中发现规律。第四，合成条件优化与智能化表征是摸索材料制备工艺的核心步骤。大模型挖掘规律的能力更强，能充分考虑各类影响因素，实现快速寻优。探索多层次主动学习并总结其在化工材料领域的通用框架具有重要意义。以聚烯烃催化剂为例，若按照目前的传统方法进行开发，单个配

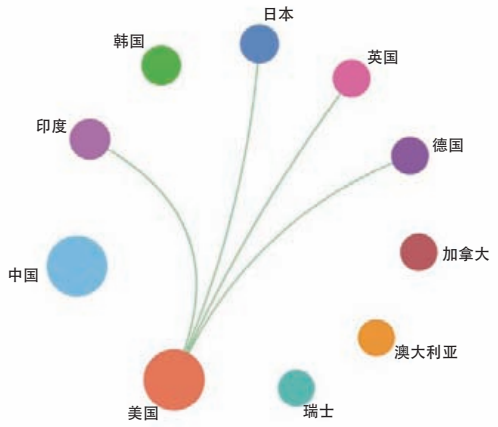

图 2.2.2　“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

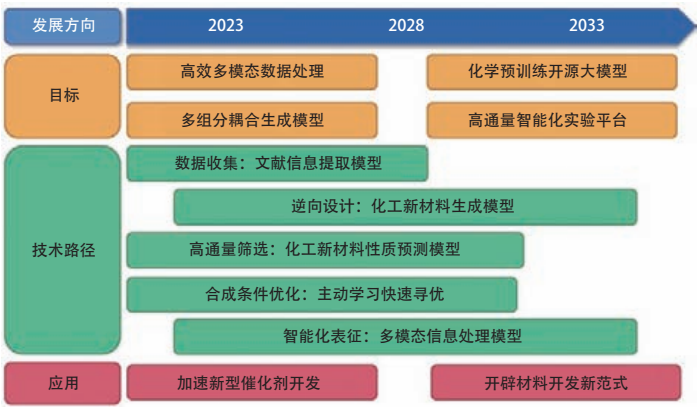

图 2.2.3　“基于人工智能大规模语言模型的化工新材料设计与制备”工程开发前沿的发展路线

方从设计、合成、表征到最后的聚合评价，往往需要数月时间，且这一过程中得到的催化剂大多无法满足最终需求。借助大模型学习预测能力，有望加速聚烯烃催化剂的开发速度，开发高效高端聚烯烃催化剂，可以进一步降低光伏行业封装胶膜关键材料 POE 的生产成本，加速国产 POE 材料工业化生产的进程。

2.2.3　面向高温环境的金属基复合材料设计与制备

金属基复合材料（MMC）是指采用人工方法，将不同尺寸、不同形态（包括颗粒、纤维、晶须、纳米片等）的无机非金属（或金属）增强体添加到金属基体（铝、钛、镁、铜等）中制成的新型材料。相较于传统的均质金属，MMC 具有较高的强度、耐蚀、导电、导热等优秀的综合性能，在航空航天、国防军工、轨道交通、电子信息等领域有着广阔的应用前景。早在 20 世纪 80 年代，美国最早采用搅拌铸造法制备颗粒增强 MMC。我国也在 1981 年启动了 MMC 研究，并在多个重大工程的关键部件上得到了重要应用，该领域目前处于普及与快速发展阶段。以铝基体为例，对于需要在 300~400 ℃区间服役的构件，铝合金的室温高强度优势荡然无存。其主要原因在于，传统高强铝合金赖以强化的析出相在 200 ℃以上便将发生快速失稳粗化，导致材料丧失强化效果并快速软化失效。以航空航天广泛使用的 7075 铝合金为例，其在 200 ℃和 300 ℃的抗拉强度分别仅为室温下的约 30% 及 10%，使其无法有效推广到耐热结构部件的设计使用中。因此，对于当前航空航天领域最为关心的 300~400 ℃温度区间，铝合金服役时出现的力学性能急剧衰退成为大动力 / 大功率的服役条件下制约结构设计、影响服役安全的关键短板。

当前将金属与高性能的增强相复合制备 MMC 已经成为提高金属基材料热稳定性最具前景和可行性的策略之一。其热稳定强化原理主要是：利用高热稳定性的第二相颗粒钉扎晶界，有效阻碍晶界滑移，抑制晶界的移动，提高基体晶粒的稳定性，并且在高温下载荷通过界面传递到增强颗粒，硬度较高的增强颗粒能够承担更大的载荷，从而提高材料的热稳定性。例如，美国 Enrique J. Lavernia 等制备的 35%（体积分数）TiC 纳米颗粒增强铝基复材 300 ℃高温拉伸强度可达 220 MPa，断裂延伸率为 10%，但是随着增强相含量的进一步提高，其断裂延伸率也显著下降。澳大利亚吴鑫华团队开发了代号为 Al250C 的高强 3D 打印铝合金，其 300 ℃高温抗拉强度达 250 MPa，断裂延伸率为 9.5%，目前该合金成分、制粉和打印工艺处于严格保密状态。综上可知，相比于合金体系在高温下弥散析出相快速失稳粗化造成力学性能退化的设计局限，MMC 有望通过调控增强相颗粒的种类、尺寸、体积分数、增强相与基体的界面等途径，优化提升复合材料的热稳定性。然而，目前铝基复合材料 300 ℃高温拉伸强度普遍在 250 MPa 以下，材料塑韧性较纯铝基体显著降低。应用方面，在高温下，高强度 / 质量比的新材料的使用可以大大减少航天舱、重要构件和热保护系统的质量，如航空发动机中的活塞材料、叶片材料、耐热材料等。轻质高强多功能金属复合材料作为一种性能优异的候选材料，在许多领域都具有性能与技术上的优势，因此着力面向高温环境的 MMC 的设计与制备技术对于实现科技强国的战略目标具有重要意义。

表 2.2.5 列出了“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。可以看出，主要产出国家以亚洲国家居多，其中中国的专利公开量和被引数比例远超其他国家。各主要产出国家间，中国和美国存在一定的国际合作（图 2.2.4），其余国家之间尚未开展广泛合作。国际相关技术实施封锁，例如美国该领域的研究报道主要集中于国家实验室，核心技术尚未公开。从表 2.2.6 来看，中国主要的金属材料研究机构，如北京科技大学、哈尔滨工业大学、中国科学院金属研究所等均高度重视面向高温环境的 MMC 研发。企业方面，无锡市恒特力金属制品有限公司和安徽尼古拉电子科技有限公司

表 2.2.5 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	529	88.76	892	86.35	1.69
2	日本	24	4.03	23	2.23	0.96
3	韩国	23	3.86	53	5.13	2.30
4	美国	9	1.51	56	5.42	6.22
5	印度	4	0.67	1	0.10	0.25
6	俄罗斯	2	0.34	2	0.19	1.00
7	德国	2	0.34	0	0.00	0.00
8	新加坡	1	0.17	5	0.48	5.00
9	英国	1	0.17	4	0.39	4.00
10	奥地利	1	0.17	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京科技大学	7	1.17	39	3.78	5.57
2	哈尔滨工业大学	7	1.17	16	1.55	2.29
3	中国科学院金属研究所	6	1.01	23	2.23	3.83
4	无锡市恒特力金属制品有限公司	6	1.01	5	0.48	0.83
5	吉林大学	5	0.84	35	3.39	7.00
6	太原理工大学	5	0.84	11	1.06	2.20
7	安徽尼古拉电子科技有限公司	5	0.84	0	0.00	0.00
8	中国航空制造技术研究院	4	0.67	46	4.45	11.50
9	西安理工大学	4	0.67	23	2.23	5.75
10	浙江大学	4	0.67	19	1.84	4.75

等均位于前列，各主要机构间尚无合作。研究机构的分布广泛性也说明了耐热 MMC 具有重要的研究地位和价值。

面向高温环境的 MMC 产业面临着重要战略机遇期，未来 5~10 年有望拓展并广泛应用于民生领域装备。对于耐热 MMC 设计及其制备技术已有较多的研究基础和积累，但仍然有很多尚未解决的技术与科学问题。在装备换代和技术升级的大背景下，耐热 MMC 的研发产业链面临新的挑战和需求，如何进一步提升材料的耐热极限温度、提高材料制备的稳定性并降低成本、开发适用于耐热 MMC 的精密加工设备和评价体系等仍亟待突破。建议从如下方面进一步推进设计理论和技术完善与应用（图 2.2.5）。① 从微观结构与形态层面上进行仿生设计。从自然界中极端环境下生存的植物、动物的结构分析中获得灵感，进行从微观、介观到宏观的多尺度材料设计，并借助计算模拟开发相应的多尺度计算平台，进一步优化结构特征。② 转型材料基因工程的全新研究范式。挖掘金属的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、纳米碳材料等增强体的物理性能和化学性能，建立多维数据库，并结合基体成分、界面结构、增强相分布构型等的仿真计算，精细设计和优化工艺制备出耐热 MMC。③ 开发特殊近净成形制备与加工技术。针对 MMC 加工难的技术瓶颈，开发新工艺，进一步提高材料的利用率和成型精度；针对金属基复材界面和增强相构型的特点对技术原型进行进一步设计改进，开发形状复杂的 MMC 构件高效成型技术、缺陷检测技术和服役评价技术。④ 研究

和建立国家标准与行业标准体系。构建面向高温环境应用的 MMC 各类细分材料的高温性能评价方法、鉴定与验收标准等。

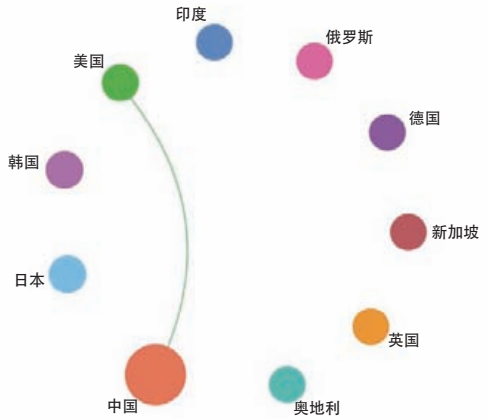

图 2.2.4　“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

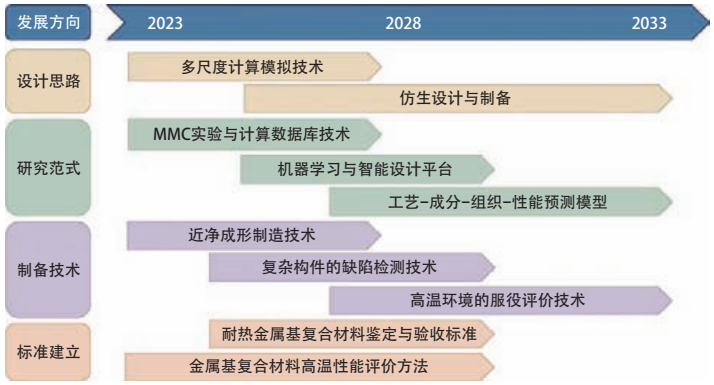

图 2.2.5　“面向高温环境的金属基复合材料设计与制备”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：谭天伟　元英进

工作组成员：

联络指导：马新宾　何朝辉　涂　璇

项目秘书：程路丽　黄耀东　李艳妮　李　莎　朱晓文

执笔成员：

高　鑫　何春年　胡文彬　吉科猛　刘永长　罗浪里　吕永琴　潘　伦　王仕博　王笑楠　魏永刚

吴　忠　徐浩元　杨春鹏　杨世亮　姚昌国　于一夫　张　生　张　翔　张志国　周凯歌

数据分析成员：

北京航空航天大学

邓　元　祝　薇　郭思铭　韩广宇　胡少雄　张青青　周　杰

北京化工大学

吕永琴　张志国　郭禹曼

电子科技大学

闫裔超

广西大学

聂双喜

哈尔滨工业大学

柯　华　李达鑫

华东理工大学

卢静宜　王义明

昆明理工大学

胡　途　祁先进　田国才　王　华　王仕博　王　勋　魏永刚　徐浩元　徐建新　许　磊　杨世亮
姚钦文　郑永兴　曾晓苑

清华大学

王笑楠　尹浩宇

四川大学

朱铧丞

天津大学

陈　星　崔春燕　丁　然　杜希文　费竹平　高　鑫　韩　优　何春年　何光伟　胡文彬　吉科猛
刘家臣　刘文广　刘永长　罗浪里　罗诗妮　潘　伦　裴春雷　任相魁　孙　哲　王　灿　王　颖
徐连勇　杨春鹏　杨永安　杨振文　于　涛　于一夫　张　宝　张　雷　张　鹏　张　生　张　翔
张育淼　赵　雷　赵振宇　周凯歌　朱国瑞　陈　缘　种博洋　丁秋燕　况思宇　陆　淇

浙江大学

杨皓程

中国宝武中央研究院

辜海芳　王　媛　姚昌国

中国科学院文献情报中心

翁彦琴　杨绮文

中南大学

李　扬

四、能源与矿业工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 12 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域组研判的 Top 12 工程研究前沿见表 1.1.1，涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中，“海水直接制氢技术研究”“基于可再生能源的电力多元转换技术”“高比能锂金属电池”属于能源和电气科学技术与工程领域；“紧凑型聚变堆高温超导磁体”“核能制氢工艺路线及关键材料性能研究”“高放废物深地质处置核心技术”属于核科学技术与工程领域；“能源资源遥感成像变化检测方法”“基于人工智能的钻井速率预测模型”“水力压裂的储层改造特征和效果”属于地质资源科学技术与工程领域；“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”“海洋深水复杂地层油气开发提质增效理论”“安全高效深地采矿岩石力学建模”属于矿业科学技术与工程领域。

2017—2022 年各研究前沿相关的核心论文逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）海水直接制氢技术研究

海水直接制氢技术是指不经过淡化等预处理过程而直接将海水分解为氢气和氧气的技术。但由于海水成分极其复杂（含高达 92 种化学元素），面临着析氯副反应、膜堵塞、腐蚀性等诸多难题与挑战。自 1975 年 Williams 首先提出海水直接制氢技术构想的半个世纪以来，国际上仍以海水直接电解制氢的四大路

表 1.1.1　能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	海水直接制氢技术研究	455	13 177	28.96	2020.8
2	紧凑型聚变堆高温超导磁体	468	4 595	9.82	2019.9
3	能源资源遥感成像变化检测方法	36	2 342	65.06	2020.3
4	地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究	11	379	34.45	2021.5
5	基于可再生能源的电力多元转换技术	212	5 174	24.41	2020.4
6	高比能锂金属电池	282	75 243	266.82	2018.6
7	核能制氢工艺路线及关键材料性能研究	174	15 263	87.72	2018.4
8	高放废物深地质处置核心技术	387	3 058	7.90	2020.0
9	基于人工智能的钻井速率预测模型	42	686	16.33	2019.4
10	水力压裂的储层改造特征和效果	162	2 474	15.27	2019.9
11	海洋深水复杂地层油气开发提质增效理论	114	783	6.87	2019.7
12	安全高效深地采矿岩石力学建模	30	1 309	43.63	2020.0

注：前沿来源包括三类，即数据挖掘、专家提名、数据挖掘 & 专家提名，序号 3、4、12 为数据挖掘前沿，其余为专家提名前沿。

表 1.1.2　能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	海水直接制氢技术研究	19	31	32	55	108	210
2	紧凑型聚变堆高温超导磁体	56	68	66	74	97	107
3	能源资源遥感成像变化检测方法	1	0	7	11	14	3
4	地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究	0	0	0	0	6	5
5	基于可再生能源的电力多元转换技术	13	16	23	48	44	68
6	高比能锂金属电池	55	92	60	57	17	1
7	核能制氢工艺路线及关键材料性能研究	52	46	44	21	7	4
8	高放废物深地质处置核心技术	55	42	51	58	71	110
9	基于人工智能的钻井速率预测模型	1	5	8	4	9	10
10	水力压裂的储层改造特征和效果	12	28	29	32	24	37
11	海洋深水复杂地层油气开发提质增效理论	16	20	11	25	21	21
12	安全高效深地采矿岩石力学建模	1	3	6	7	10	3

径为主。一是基于催化剂工程的海水直接制氢，主要通过提高电化学活性、引入选择性位点、构造保护涂层等方法，来避免析氯副反应与析氧反应的竞争。二是基于非对称电解质的海水直接电解制氢，通过在阳极侧添加单一、纯净的电解质，在阴极侧添加海水来达到直接制氢的目的。三是基于膜材料隔离的海水直接电解制氢，通过亲水反渗透膜原位筛分来排除海水中的杂质离子。四是基于物理力学的相变迁移海水直接制氢，通过在海水与电解液间构建气 – 液相界面，并利用两者的饱和蒸气压差作为传质驱动力，诱导海水中的水以气态形式跨膜迁移至电解质，彻底隔绝海水离子的同时实现了无淡化过程、无副反应、无额外能耗的海水直接制氢。海水直接制氢技术的发展，将助力推动“海上风电等可再生能源利用 – 海水氢能生产”的全球新兴战略产业。

（2）紧凑型聚变堆高温超导磁体

可控核聚变能源是未来理想的清洁能源，目前最有可能实现的可控热核聚变方法是磁约束聚变。托卡马克装置被认为是实现可控核聚变最有前景的磁约束装置，超导磁体是托卡马克装置的关键部件之一。传统托卡马克装置采用的是低温超导磁体，为了获得高聚变能量增益和聚变功率密度，装置往往建造得很大，增加了装置的造价。随着超导材料技术的发展，第二代高温超导材料相较于低温超导材料有着更高的温度裕度、电流密度和临界磁场。这些特性促进了更加紧凑、更强磁场的高温超导磁体的诞生。高温超导磁体技术的突破形成了新的紧凑型聚变堆技术路线，不仅成本大大降低，更使研发周期大幅缩短。MIT Technology Review 将紧凑型聚变堆评为 2022 年度十大突破性技术之一。国际上具有代表性的装置有美国麻省理工学院（MIT）的 SPARC 装置和英国卡拉姆聚变能源中心的 STEP 装置，目前均处于概念设计阶段。

（3）能源资源遥感成像变化检测方法

遥感成像变化检测是利用不同时期覆盖同一地表区域的多源遥感影像和相关地理空间数据，结合相应地物特性和遥感成像机理，采用图像、图形处理理论及数理模型方法，确定和分析该地域地物的变化，包括地物位置、范围的变化和地物性质、状态的变化。

变化检测初期采用中低分辨率遥感影像，随着遥感影像空间分辨率的提升，相同地物的空间纹理表现

形式差异变大，地物特征更加复杂多样，传统的变化检测方法已很难满足需求，高光谱影像变化检测和高分辨率影像变化检测成为变化检测的重要领域。遥感大数据、互联网、人工智能（AI）、云计算等现代信息技术正在蓬勃发展，驱动遥感监测技术模式快速转型升级。统筹利用现有数据与计算资源，开展地表常态化、智能化监测，及时、高效地获取地物变化信息，已成为当前遥感领域的研究热点之一。未来研究趋势包括应用场景变化检测、大规模变化检测专用样本集的构建与应用、多源数据的信息挖掘等。

（4）地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究

地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究是指通过结合多个空间和时间尺度，探究地热系统中岩石的热、水、力相互作用及其耦合机制的研究，旨在揭示地热能开发和地下水流对地质断裂带和岩石性质的影响机制，提高地热资源的开发效率和环境管理水平。

主要研究方向包括：① 岩石孔隙结构、矿物组成、热传导等微观特性，以及岩石与流体的相互作用的微尺度研究；② 中尺度层面，模拟分析小尺度岩石的热 – 水 – 力行为，揭示地热系统中流体渗流、热传输和力学响应之间的关系；③ 在宏观尺度上，研究探索整个地热系统中岩石的热 – 水 – 力耦合作用下岩石断裂行为，考虑地质构造和地下水流对地热资源的影响。通过跨尺度模拟研究将这些不同尺度的信息整合起来，为地热能源开发提供更全面的指导。

随着计算能力的提升和多学科交叉的深入，地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程的多尺度断裂模拟方法和技术将进一步发展。体现在：① 基于数值新算法、人工智能新技术，多尺度模拟方法将更加精细和高效，模拟结果更准确；② 通过实际监测数据来优化数值模型，利用数据驱动的模拟方法提高预测精度，同时，研究过程更加注重耦合效应，考虑温度、压力、流体运移等因素之间的相互影响；③ 跨学科知识交叉融合将得到进一步加强，地质学、水文学、地球物理学等领域的专业知识将融合到模拟研究中。

（5）基于可再生能源的电力多元转换技术

电力多元转化技术（Power-to-X）是利用可再生能源（太阳能、风能、水力等）产生的绿电制备绿氢、绿色甲醇、绿氨及其他产品的过程。这一新兴技术可实现间歇性可再生能源到可储存化学能的转变，有助于大规模可再生电力的消纳，并将可再生能源链接至工业、交通、能源动力等部门，为全球经济脱碳和提供非化石能源产品提供合适的解决方案。

电解水制氢是当前 Power-to-X 技术的重点领域。此外，绿氢耦合 CO_2 和 N_2 转化可以提供丰富的产品。可再生电力驱动 $H_2O/CO_2/N_2$ 直接制备绿色甲醇、绿氨等产品是 Power-to-X 研究领域的热点。其中，H_2O/CO_2 共电解制合成气，串联分布式微型费托装置具有生产碳中性燃料和化学品的广阔前景。生物质及其平台化合物是一类地球丰富的可再生资源，相比于 CO_2 和 N_2，其具有丰富的 C—O—H 分子架构、更活泼的反应基团和更灵活的分子裁剪性，是适合于可再生电力加工的重要对象，而且生物质基产品与经济系统具有出色的兼容性。因此，Power-to-X 技术耦合生物质转化在碳中和经济领域具有巨大的潜力。

打破 Power-to-X 转换技术“材料 – 电极 – 电解槽 – 系统”全链条的关键科学技术瓶颈，提高 Power-to-X 过程的能量转化效率以及产品的经济价值，优化 Power-to-X 技术与工业、交通与能源动力等部门的连接方式是当前这一领域的核心。

（6）高比能锂金属电池

作为二次电池负极金属锂的理论比容量高达 3 860 mAh/g，同时它具有最负的电化学电位，是高能二次电池负极材料的终极选择。在 20 世纪 70 年代曾有人尝试将金属锂作为二次电池负极，但发现在充电（即

锂电沉积）时会产生锂枝晶，可刺破隔膜造成内短路，进而引起热失控和燃烧爆炸。另外，锂枝晶还容易断裂导致粉末化，导致化学活性和安全风险提高。这些致命缺陷阻断了金属锂二次电池的商业化，研究更多瞄准了锂离子可插入的母体材料，最终石墨基负极锂离子电池于 1991 年问世。近十年来，随着电动车和储能技术等的快速发展，对电池能量密度提出了更高的要求，金属锂二次电池重新进入人们的视野，大量研究瞄准能量密度超过 400 Wh/kg 的锂硫电池等新体系，但负极枝晶生长和低循环效率两大问题仍需要加以解决。优化集流体构造、修饰电极表面或采用金属锂复合材料都能有效抑制锂枝晶生长。另外，锂负极的性能也与所用电解质休戚相关。通过电解液组分调制可以改善固体电解质界面相的性质，抑制锂枝晶并提高库仑效率；尤其是使用有机 – 无机复合或无机固体电解质有望从根本上解决金属锂负极的存在问题。随着新材料的不断涌现、电池结构和充电机制的优化，高能金属锂二次电池最终有望得到实际应用。

（7）核能制氢工艺路线及关键材料性能研究

氢作为一种二次能源，是一种能量载体或能流，核能与氢能的结合将使能源生产和利用的全过程基本实现洁净化。利用核电为电解水制氢提供电力是核能制氢的一种方式。目前，电解水制氢的主要问题是能耗高、效率低。如果在用电低谷时进行核电电解水制氢，则可合理利用电网资源，降低制氢成本；对于反应堆中核裂变过程所产生的高温直接用于热化学制氢已进行了广泛研究。与电解水制氢相比，热化学制氢的效率更高，成本更低。

热化学制氢基于热化学循环，使水在 800~1 000 ℃下进行催化热分解，制取氢和氧，目前共研究出了 100 多种热化学循环流程。该方法的关键之一是需提供低成本的高温热源。以反应堆中核裂变所产生的高温作为热化学循环制氢的热源是近年来国际核工程界的一个活跃的研究课题，有可能成为今后核能应用的新领域。热化学过程制氢有生物质热化学制氢、热化学碘硫循环制氢、高温固体氧化物电解制氢、甲烷（高温）重整制氢等多种方式，其中，热化学碘硫循环制氢被认为是较有前景的方式。热化学制氢对反应堆的要求方面，首先要求反应堆须提供 750~1 000 ℃的高温，其次必须防止核系统与制氢系统在热交换过程中的交叉污染。国际上第四代核能系统（Gen Ⅳ）路线图充分考虑了核能制氢问题，在推荐的 6 种核能体系中，除超高温气冷堆（VHGR）以产氢为主外，气冷快堆（GFR）、铅冷快堆（LFR）和熔盐堆（MSR）均兼顾发电和制氢。

（8）高放废物深地质处置核心技术

高放废物是指核反应堆乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体。根据中国标准《放射性废物的分类》，高放废物分为高放废液和高放固体废物两类。由于高放废物是一种放射性强、毒性大、含有半衰期长的核素并且发热的特殊废物，对其进行安全处置难度极大，面临一系列科学、技术、工程、人文和社会学的挑战。国际上普遍采用的可行方案是深地质处置，即把高放废物埋在距离地表深 500~1 000 m 的地质体中，使其永久与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程即称为“高放废物处置库”。建设高放废物处置地下实验室，以地下实验室为平台，多国已确定处置场址，研发了完备的处置理论和技术体系，进入处置库建设 / 筹备阶段。例如，芬兰在 2015 年 11 月获得处置库建造许可，2016 年开建；瑞典和法国获得处置库建造许可；美国在 2017 年拨款重启尤卡山项目。2019 年 5 月 6 日，经国务院同意，国家国防科技工业局正式批准地下实验室建设工程立项，这是中国高放废物地质处置的里程碑式标志。

高放废物安全处置须解决的重大科学问题包括：处置库场址地质演化的精确预测，深部地质环境特征，多场耦合条件（中 – 高温、地应力、水力作用、化学作用和辐射作用）下深部岩体、地下水和工程材料的行为，低浓度超铀放射性核素的地球化学行为与随地下水迁移行为以及超长时间尺度下处置系统的安全评价等。

（9）基于人工智能的钻井速率预测模型

基于人工智能的钻井速率预测模型是利用机器学习和数据分析技术，针对油气钻井作业中的钻井速率进行预测的方法。该模型通过分析历史钻井作业数据、地质信息、钻井参数等多种因素，并应用神经网络、决策树、支持向量机等人工智能算法，构建预测模型，为钻井作业的规划和优化提供决策依据。其研究方向主要包括数据采集、特征工程、算法建模和模型优化等。需要收集大量历史钻井数据，提取与钻井速率相关的特征，选择适当算法构建预测模型，并通过迭代优化提高精度和稳定性。随着数据技术和人工智能的发展，数据多样性和实时性的不断提升，其他领域信息的逐步融入，自动化技术等的应用，模型将变得更加精准和可靠，提供实时全面准确的钻井速率预测结果。

（10）水力压裂的储层改造特征和效果

水力压裂技术是利用储层的天然或诱导裂缝系统，使用含有各种添加剂的压裂液在高压下注入地层，使储层裂缝网络扩大，并依靠沙粒或陶瓷粒等支撑剂使裂缝在压裂液返回以后不会封闭，从而改善储层的裂缝网络系统，使赋存其中的页岩气持续不断地释放并输送到地表。中国于 20 世纪 50 年代开始研究水力压裂技术。通过探索和借鉴，直至 2009—2011 年首次实施第一口页岩气井压裂现场试验，拉开了中国页岩气压裂理论研究和现场应用的序幕。2012 年，涪陵页岩气田焦页 1 HF 井压裂获得高产，标志着中国压裂技术实现了国产化。此后随着压裂技术的稳步发展，截至 2020 年，中国页岩气压裂井总数达到 1 092 口，页岩气产量逐年攀升，2020 年全国页岩气产量达 200.4×10^8 m^3。

从实现储层改造的充分程度来看，中国早期实施的压裂工艺主要包括常规分段多簇压裂技术、同步压裂技术、拉链式压裂技术、重复压裂技术等，其中分段多簇压裂技术是页岩气压裂的主体技术。随着页岩气开发的深入，2018 年以后，为了提升改造效果，特别是深层页岩气的改造体积和缝网复杂度，发展了“密簇”强加砂压裂技术。在该工艺技术的实施过程中，为了调控裂缝的均衡程度，发展了缝内、缝口暂堵压裂技术和非均匀射孔压裂技术等，实现了对裂缝延伸均匀性的有效调控。

（11）海洋深水复杂地层油气开发提质增效理论

一般将水深超过 300 m 海域的油气资源定义为深水油气，深水油气资源丰富、潜力大，勘探开发和增储上产前景广阔，已成为油气储量和产量的主要接替区。受平台使用寿命限制，深水油气开发必须在有限时间内实现稳产高产，亟须实现油气开发的提质与增效。全球超过 70% 的油气资源蕴藏在海洋中，40% 来自深水。近十年新发现的 101 个大型油气田中，深水油气田数量占比为 67%、储量占比为 68%。中国目前深水油气产量已达上千万吨，获得阶段性进展。然而，中国深水油气勘探开发仍处于初期阶段，储层成因复杂，勘探、表征、建井和开采难度大，配套材料和装备对外依赖性强，限制了其进一步发展，亟须研究适合我国海洋深水复杂地层的油气开发提质增效理论。主要研究方向有：深水油气地质勘探方法、深水油气精细表征技术、深水油气安全钻完井技术、深水油气开发配套材料和装备研发、深水油气高效开采方法等。积极研究新方法，研发新技术、新材料和新装备，形成海洋深水复杂地层油气开发提质增效理论体系，制定科学合理的开发模式，有望为保障国家能源安全贡献重要力量。

（12）安全高效深地采矿岩石力学建模

安全高效深地采矿岩石力学建模是指在深部地下采矿过程中，通过应用先进的力学模型和数值模拟技术，研究岩石的变形、破裂、应力分布等力学行为，以预测和评估采矿过程中可能出现的岩体失稳、坍塌等地质灾害风险，从而为安全高效的矿山开采提供科学指导。

该领域的主要研究方向包括：① 岩石的本构模型研究，探索不同类型岩石在高压、高温等极端条件下的变形特性，为采矿过程中岩石变形行为提供准确的数值描述；② 孔隙岩体的力学行为研究，考虑地下水流对岩体力学性能的影响，以及孔隙介质中岩石－水耦合作用对开采的响应；③ 多尺度建模方法研究，构建跨尺度模拟方法揭示从微观到宏观尺度的岩石力学响应。

随着计算机技术的飞速发展，安全高效深地采矿岩石力学建模将呈现更为精细和准确的发展趋势，体现在：① 模型将更加细致地考虑岩石的非线性、各向异性、损伤等特性，提高模拟的准确性；② 耦合效应的研究将更加深入，将地下水流、温度、应力等多种因素纳入模型，更全面地预测岩石力学响应；③ 人工智能和机器学习技术的应用将增强，用于优化模型参数、加速模拟过程，提高模拟效率。随着深部矿山的开采深度不断增加，岩石力学建模也将关注更深部地下的力学行为研究。

1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

1.2.1 海水直接制氢技术研究

电解水制氢高度依赖淡水资源，而淡水资源的短缺严重制约了电解水制氢的发展。海洋是地球上最大的氢矿，向大海要水来制取“绿氢”是未来科技与产业发展的重要战略方向。海水成分极其复杂，涉及 92 种化学元素和大量微生物、固体杂质等，且其电导率低、成分波动大，易导致电解过程发生副反应竞争、催化剂失活、膜堵塞等问题，给电解系统的高性能、稳定性、高效率和兼容性带来了巨大的挑战。

先淡化后制氢是当前最成熟的海水制氢技术路径，目前已在国内外开展规模化示范工程项目。但该类技术严重依赖大规模淡化设备，工艺流程复杂且占用大量土地资源，进一步推高了制氢成本与工程建设难度。海水直接制氢由美国科学家 Williams 于 20 世纪 70 年代提出，目前国际上以海水直接电解制氢的四大路径为主。其中，催化剂工程是目前解决海水制氢挑战最传统和常规的方式，主要通过提高电化学活性、引入选择性位点、构造保护涂层的方法，来避免析氯副反应与析氧反应的竞争。第二类是基于非对称电解质的海水直接电解制氢进一步避免了阳极的竞争反应，主要通过在阳极侧添加单一、纯净的电解质，在阴极侧添加海水来达到直接制氢的目的。第三类是基于膜材料科学的海水直接电解制氢，主要通过亲水性反渗透膜原位筛分来排除海水中的杂质离子。这三类路径仍停留在实验室阶段。第四类是近年兴起的基于物理力学的相变迁移海水直接制氢，通过在海水与电解液间构建气－液相界面，并利用两者的饱和蒸气压差作为传质驱动力，诱导海水中的水以气态形式跨膜迁移至电解质，彻底隔绝海水离子的同时实现了无淡化过程、无副反应、无额外能耗的海水直接制氢。该路径已在 2023 年 5 月 27 日在福建省兴化湾完成的全球首个海上风电海水直接电解制氢海试中得到验证。

“海水直接制氢技术研究”工程研究前沿中核心论文发表量与篇均被引频次排在前列的国家是中国和美国（表 1.2.1），中国、美国、澳大利亚三国合作较多（图 1.2.1）。在核心论文的主要产出机构中，发文量排在前列的是中国科学院与青岛科技大学，篇均被引频次排在前列的是休斯顿大学和天津大学（表 1.2.2）。其中，中国石油大学（华东）与青岛科技大学、深圳大学与郑州大学合作较多（图 1.2.2）。施引核心论文的主要产出国家和机构分别见表 1.2.3 和表 1.2.4。

目前相变迁移的海水直接电解制氢技术路线已初现优势（图 1.2.3），预计到 2025 年实现 100 Nm^3/h H_2 海水制氢系统量产，2028 年前实现 1 000~3 000 Nm^3/h H_2 海水制氢系统量产，2033 年前实现应用场景拓宽到污水、废水等非纯水资源的大规模直接制氢。

表 1.2.1　“海水直接制氢技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	249	54.73	7 803	31.34	2021.3
2	美国	79	17.36	3 432	43.44	2020.5
3	韩国	31	6.81	584	18.84	2021.0
4	澳大利亚	25	5.49	1 162	46.48	2020.7
5	日本	23	5.05	280	12.17	2020.2
6	英国	19	4.18	223	11.74	2020.7
7	德国	15	3.30	939	62.60	2019.7
8	加拿大	15	3.30	566	37.73	2020.5
9	印度	15	3.30	262	17.47	2021.1
10	荷兰	12	2.64	516	43.00	2020.3

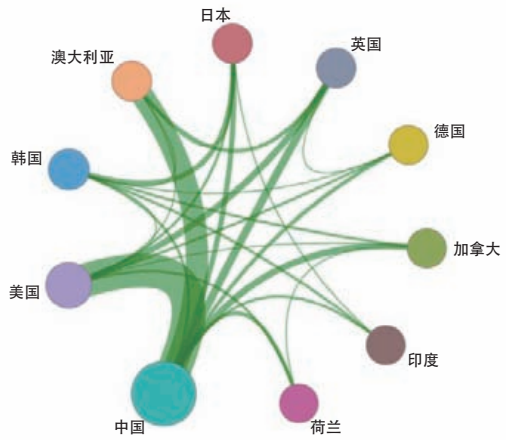

图 1.2.1　“海水直接制氢技术研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2　“海水直接制氢技术研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	28	6.15	632	22.57	2021.0
2	青岛科技大学	27	5.93	318	11.78	2021.8
3	武汉理工大学	17	3.74	435	25.59	2021.5
4	休斯顿大学	12	2.64	1 703	141.92	2021.0
5	中国石油大学（华东）	11	2.42	244	22.18	2021.5
6	南开大学	11	2.42	213	19.36	2021.5
7	天津大学	10	2.20	467	46.70	2020.9
8	深圳大学	10	2.20	198	19.80	2021.4
9	郑州大学	9	1.98	155	17.22	2021.8
10	上海理工大学	9	1.98	60	6.67	2021.7

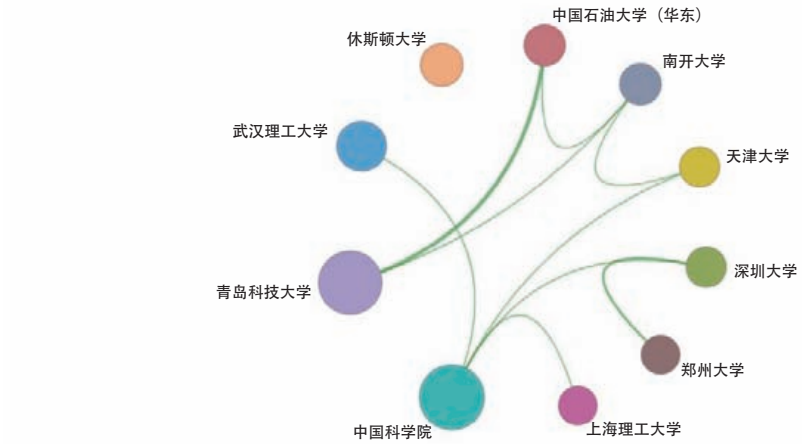

图 1.2.2 “海水直接制氢技术研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “海水直接制氢技术研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	561	57.54	2020.4
2	美国	119	12.21	2020.0
3	澳大利亚	56	5.74	2020.3
4	韩国	54	5.54	2020.3
5	德国	35	3.59	2020.3
6	英国	33	3.38	2020.4
7	新加坡	28	2.87	2020.2
8	日本	25	2.56	2020.3
9	伊朗	23	2.36	2019.8
10	加拿大	22	2.26	2020.4

表 1.2.4 “海水直接制氢技术研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	77	26.55	2020.1
2	苏州大学	27	9.31	2020.0
3	清华大学	24	8.28	2020.5
4	湖南大学	24	8.28	2020.4
5	郑州大学	23	7.93	2020.6
6	天津大学	21	7.24	2020.3
7	武汉理工大学	21	7.24	2020.4
8	北京化工大学	19	6.55	2020.3
9	中国科学技术大学	18	6.21	2020.4
10	青岛科技大学	18	6.21	2020.4

图 1.2.3　“海水直接制氢技术研究”工程研究前沿的发展路线

1.2.2　紧凑型聚变堆高温超导磁体

聚变能源清洁、安全且资源比较丰富，是最可能从根本上解决未来能源危机的理想能源。托卡马克装置被认为是实现可控核聚变最有前景的磁约束装置。超导磁体是托卡马克装置的关键部件之一，提供产生、约束等离子体的极向和环向磁场以实现聚变。在托卡马克装置中，聚变能量增益和聚变功率密度与环向磁场存在标度率关系，采用传统低温超导材料的磁体中心环向磁场仅能达到 7 T 左右，如中国的 EAST、日本的 JT-60SA、英国的 JET 以及国际合作的 ITER。随着超导材料技术的发展，第二代高温超导材料相较于低温超导材料有着更高的温度裕度、电流密度和临界磁场。这些特性促进了更加紧凑、更强磁场的高温超导磁体的诞生。由于托卡马克装置的造价近似与装置大半径的立方成正比关系，高温超导磁体技术可以有效地降低聚变装置的整体造价，对未来进一步推广聚变能的应用有着重要的作用。目前，英国托卡马克能源公司已经完成了 ST25-HTS 装置的制备，证实了托卡马克装置与高温超导材料结合的可行性。未来 5 年，美国麻省理工学院计划采用高温超导材料完成中心环向磁场大于 12 T、功率增益系数 Q 大于 2、聚变能量大于 50 MW 的 SPARC 示范装置。使用高温超导磁体的紧凑型高温超导托卡马克装置已经成为未来可控核聚变技术一个重要研究方向。

“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿中核心论文数最多的国家是中国、美国和日本，篇均被引频次靠前的国家是美国、韩国、瑞士和俄罗斯（表 1.2.5）。其中，中国与美国合作较多，德国与瑞士合作较多（图 1.2.4）。核心论文的主要产出机构方面，中国科学院、中国科学技术大学和麻省理工学院具有

表 1.2.5　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	130	27.78	959	7.38	2020.0
2	美国	116	24.79	2 238	19.29	2019.9
3	日本	72	15.38	994	13.81	2019.6
4	德国	44	9.40	565	12.84	2019.7
5	意大利	41	8.76	379	9.24	2020.0
6	瑞士	40	8.55	677	16.93	2020.0
7	英国	30	6.41	350	11.67	2020.2
8	韩国	25	5.34	456	18.24	2019.5
9	法国	22	4.70	271	12.32	2019.5
10	俄罗斯	18	3.85	301	16.72	2019.8

优势，篇均被引频次排在前列的是麻省理工学院、科罗拉多大学和普林斯顿等离子体物理实验室（表 1.2.6）。其中，中国科学院与中国科学技术大学合作较多，日本国家聚变科学研究所和日本东北大学合作较多（图 1.2.5）。施引核心论文数排名靠前的国家是中国和美国（表 1.2.7），施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、中国科学技术大学和麻省理工学院（表 1.2.8）。

目前国际范围内利用高温超导磁体建设的紧凑型聚变堆有 MIT 的 SPARC 装置，这是计划建造的核聚变电站的小规模版本。SPARC 的成功运行，将证明一个全面的商业运行的核聚变发电厂是可行的，为快速设计和建造商用可控核聚变发电站扫清道路，让核聚变发电成为未来清洁能源的核心，改变未来世界能源格局。未来 5 年内首先完成高温超导聚变堆应用可行性研究，之后在 2033 年前后，进行高温超导聚变电站的建设，最终实现聚变发电（图 1.2.6）。

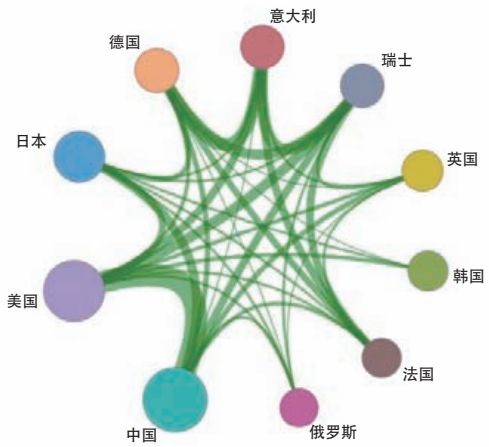

图 1.2.4　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	87	18.59	517	5.94	2020.0
2	中国科学技术大学	42	8.97	234	5.57	2020.2
3	麻省理工学院	29	6.20	1 003	34.59	2019.6
4	日本国家聚变科学研究所	27	5.77	173	6.41	2019.9
5	日本东北大学	22	4.70	204	9.27	2019.3
6	都灵理工大学	20	4.27	195	9.75	2020.1
7	卡尔斯鲁厄理工学院	20	4.27	178	8.90	2019.7
8	普林斯顿等离子体物理实验室	19	4.06	249	13.11	2020.0
9	劳伦斯伯克利国家实验室	17	3.63	75	4.41	2020.8
10	科罗拉多大学	15	3.21	265	17.67	2020.9

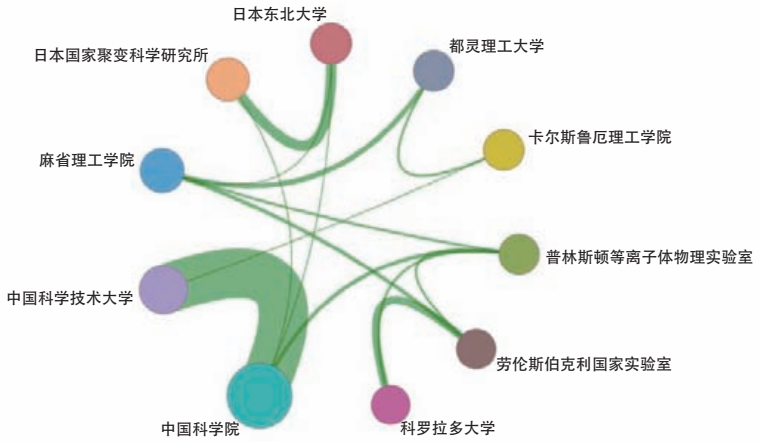

图 1.2.5　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 120	29.11	2021.0
2	美国	828	21.52	2020.8
3	日本	372	9.67	2020.7
4	德国	332	8.63	2020.7
5	英国	246	6.39	2021.0
6	意大利	224	5.82	2020.9
7	韩国	166	4.32	2021.0
8	法国	161	4.19	2020.8
9	瑞士	150	3.90	2020.9
10	俄罗斯	145	3.77	2021.1

表 1.2.8　“紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	385	32.06	2021.1
2	中国科学技术大学	153	12.74	2021.0
3	麻省理工学院	129	10.74	2020.6
4	上海交通大学	86	7.16	2021.0
5	橡树岭国家实验室	82	6.83	2020.8
6	日本国家聚变科学研究所	68	5.66	2020.4
7	兰州大学	64	5.33	2021.3
8	卡尔斯鲁厄理工学院	61	5.08	2020.4
9	清华大学	61	5.08	2020.6
10	首尔大学	57	4.75	2021.0

图 1.2.6 “紧凑型聚变堆高温超导磁体”工程研究前沿的发展路线

1.2.3 能源资源遥感成像变化检测方法

遥感影像变化检测是遥感图像处理分析方法研究的重要方向，核心是利用不同时期、相同地域的遥感影像，分析与确定地物的变化状况及其特征相关性，对遥感光谱信息的利用经历了从黑白全色影像到多光谱、高光谱再到时间序列的发展历程，变化检测方法也由基于像素的代数计算向机器学习算法及多方法联合算法等演变，如较为传统的方法是采用遥感时间序列变化检测，包括分类法、阈值法、图像变换法、模型法等。近年来，随着搭载高空间分辨率光学相机的遥感卫星陆续升空、机动灵活的无人机遥感的广泛应用，遥感影像的数量、检测精度、信息完整性不断提升，针对同一区域获取数据的频次也逐渐提高，这为遥感影像变化检测提供了重要基础。在此背景下，“人工智能 + 遥感大数据”模式成为近年来行业应用系统建设的普遍共识，主要研究方向包括多时相高光谱影像“时－空－谱”联合特征的有效提取、基于深度学习的高精度变化检测算法等，高精度、自动化的遥感成像变化检测方法对于矿产资源勘探、国家生态环境保护、海洋环境监测等具有重要的现实意义与战略意义。

国际摄影测量与遥感学会多年来一直为遥感影像变化检测研究设置单独的工作组，以致力于推动利用遥感技术手段进行多领域变化检测发展。美国国家地理空间情报局亦将遥感影像变化检测与分析纳入战略规划。中国也高度重视遥感影像变化检测技术在地理国情检测中的应用，从 2010 年开始国土资源部每年都会开展全国遥感检测工作，利用多时相遥感影像变化检测技术持续更新全国土地调查成果。

“能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿中核心论文数排名第一的国家是中国（35 篇），论文占比达 97.22%，其他国家占比均低于 10.00%；核心论文数排名第二的是意大利（3 篇），论文占比为 8.33%（表 1.2.9）。在核心论文的主要产出机构（表 1.2.10）方面，排名前十的机构中，中国占 8 个，其中武汉大学（13 篇）、中国科学院（6 篇）和北京航空航天大学（4 篇）位列前三。中国（777 篇）也是该工程研究前沿中施引核心论文产出最多的国家，论文占比为 67.80%，第二名是美国（82 篇），仅占 7.16%（表 1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构中，前三名为武汉大学（125 篇）、中国科学院（116 篇）和西安电子科技大学（39 篇）（表 1.2.12）。该领域合作以中国为主，意大利、美国和荷兰等国围绕中国开展合作（图 1.2.7），机构之间的合作研究集中在武汉大学、中国科学院、南京信息工程大学和中南大学之间（图 1.2.8）。

未来 5~10 年内，能源资源遥感成像变化检测方法将迎来一系列重要发展趋势（图 1.2.9）。高分辨率和多频谱数据的融合将提供更精确的资源变化检测能力，包括多源数据融合和超光谱技术的应用。机器学习和深度学习技术的普及将自动化进行遥感数据的分析，降低人工干预程度。此外，时序数据分析将有助于更好地理解资源变化趋势和周期性，提高变化检测的准确性。云计算和分布式计算资源的使用也将提高数据处理和分析的效率。这些方法不仅将在环境监测、资源管理和气候变化研究中发挥关键作用，还将应用于智能城市规划、可持续发展、精准农业和森林资源管理等领域。随着这些发展趋势的不断推动，能源资源遥感成像变化检测方法的应用前景将更加广泛，为决策支持和资源管理提供更多有力工具。

表 1.2.9　“能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	35	97.22	2 330	66.57	2020.3
2	意大利	3	8.33	193	64.33	2020.7
3	荷兰	2	5.56	398	199.00	2019.5
4	德国	2	5.56	54	27.00	2020.0
5	澳大利亚	2	5.56	47	23.50	2020.5
6	美国	1	2.78	20	20.00	2020.0
7	英国	1	2.78	15	15.00	2021.0

表 1.2.10　“能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	武汉大学	13	36.11	1 153	88.69	2020.1
2	中国科学院	6	16.67	432	72.00	2019.2
3	北京航空航天大学	4	11.11	312	78.00	2020.8
4	南京信息工程大学	3	8.33	256	85.33	2020.3
5	中南大学	3	8.33	179	59.67	2021.0
6	乌得勒支大学	2	5.56	398	199.00	2019.5
7	中国矿业大学	2	5.56	138	69.00	2020.0
8	西南交通大学	2	5.56	75	37.50	2021.0
9	特伦托大学	2	5.56	63	31.50	2021.0
10	北京师范大学	2	5.56	28	14.00	2021.0

表 1.2.11　“能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	777	67.80	2021.3
2	美国	82	7.16	2021.1
3	意大利	42	3.66	2021.3
4	德国	41	3.58	2021.1
5	韩国	38	3.32	2021.0
6	加拿大	35	3.05	2021.3
7	英国	34	2.97	2021.3
8	荷兰	27	2.36	2020.7
9	印度	26	2.27	2021.5
10	法国	25	2.18	2020.7

表 1.2.12 “能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	武汉大学	125	26.54	2021.1
2	中国科学院	116	24.63	2021.2
3	西安电子科技大学	39	8.28	2021.1
4	中国地质大学	31	6.58	2021.4
5	南京信息工程大学	30	6.37	2021.1
6	中山大学	27	5.73	2021.2
7	西北工业大学	23	4.88	2021.1
8	特伦托大学	23	4.88	2021.1
9	北京航空航天大学	20	4.25	2021.2
10	德国航空太空中心	19	4.03	2021.2

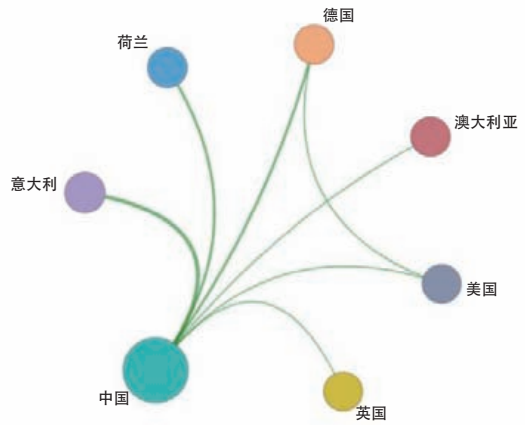

图 1.2.7 “能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

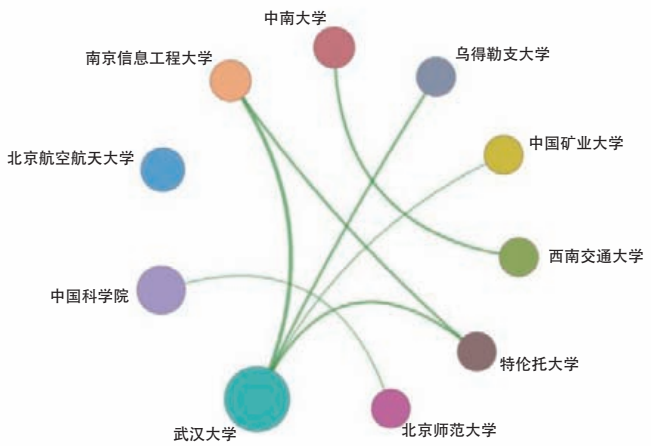

图 1.2.8 “能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

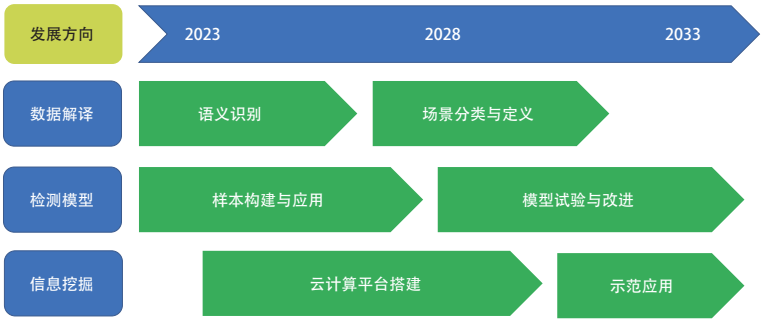

图 1.2.9　“能源资源遥感成像变化检测方法”工程研究前沿的发展路线

1.2.4　地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究

地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究是地热能利用与地质环境相互作用的重要前沿领域。这一领域的研究旨在深入理解地热系统中岩石的热 – 水 – 力耦合行为，从而为地热资源开发和管理提供科学依据。在过去几十年中，随着数值模拟、计算能力和数据监测技术的进步，这一领域取得了显著的发展。

地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程的断裂研究历史可以追溯到 20 世纪 80 年代。最初，研究主要集中在单一尺度的实验和理论模型上，探讨地热系统中温度、压力、水流等要素之间的关系。随着实验设备、计算机技术的发展，多尺度实验、模拟方法逐渐得到应用，使得研究者能够更全面地揭示地热系统岩石断裂的复杂耦合行为。近年来，随着深部地热资源的关注度上升，多尺度断裂模拟研究更加受到重视，以提升预测和解决地热能开发中遇到的问题。

地热系统的热 – 水 – 力耦合行为影响着地热能开发的效率和可持续性。掌握岩石的物理和化学响应，有助于优化地热能的开发过程，减少资源浪费。另外，地热系统中的岩石断裂行为与地下水流和地质灾害密切相关，其相关研究对于地下水资源管理和地质灾害预防具有重要意义。

多尺度断裂模拟研究包括以下几个方面：① 从微观尺度到宏观尺度的跨尺度模拟，深入理解地热系统内部岩石的热、水、力相互作用机制；② 耦合实验研究和数值模拟，验证多因素影响下模拟结果的准确性；③ 开发高效算法和模拟工具，提升多尺度模拟的计算效率；④ 实时监测和数据采集技术的应用，改进模拟模型的精度。

“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家是中国、美国和澳大利亚（表 1.2.13、图 1.2.10）；核心论文数排名靠前的机构为西安理工大学、中国矿业大学、成都理工大学和普渡大学（表 1.2.14），这四所机构间有较多合作（图 1.2.11）。施引核心论文数排在前三位的国家是中国、美国和澳大利亚（表 1.2.15）。施引核心论文数排名靠前的机构是中国矿业大学、西安理工大学、河南理工大学、安徽理工大学和普渡大学（表 1.2.16）。

“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿的发展路线如图 1.2.12 所示。主要的发展方向包括：① 高精度模型构建，未来的研究将注重更精细的模型构建，包括更准确的岩石物理参数、孔隙结构和地质断裂特征的输入，这将有助于更真实地模拟地热系统中的复杂热 – 水 – 力耦合行为；② 耦合效应研究，将更加注重不同尺度和不同物理过程之间的耦合效应，探究岩石的热、水、力相互作用

对地热系统岩石断裂行为的影响；③ 数据驱动模拟，随着监测技术的发展，未来的模拟研究将更多地融合实际监测数据，用于验证模型准确性和优化参数，提高模拟结果的可靠性。

未来 5~10 年的发展趋势主要包括以下两方面：一是多物理场耦合，不仅关注热 – 水 – 力耦合，还会考虑化学场、流场等多个物理场的相互作用，实现更全面的地热系统岩石断裂模拟；二是高性能计算应用，随着计算能力的提升，未来的模拟研究将更加依赖高性能计算，使模拟更精细、更复杂，以更准确地预测

表 1.2.13 “地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	11	100.00	379	34.45	2021.5
2	美国	4	36.36	118	29.50	2021.2
3	澳大利亚	1	9.09	65	65.00	2022.0

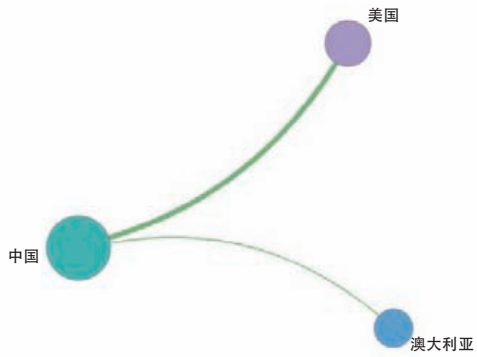

图 1.2.10 “地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.14 “地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	西安理工大学	8	72.73	348	43.50	2021.4
2	中国矿业大学	5	45.45	221	44.20	2021.4
3	成都理工大学	4	36.36	156	39.00	2021.2
4	普渡大学	4	36.36	118	29.50	2021.2
5	河南理工大学	4	36.36	42	10.50	2021.5
6	莫纳什大学	1	9.09	65	65.00	2022.0
7	核工业北京地质研究院	1	9.09	49	49.00	2021.0
8	河海大学	1	9.09	49	49.00	2021.0
9	西安科技大学	1	9.09	43	43.00	2021.0
10	徐州工程学院	1	9.09	23	23.00	2021.0

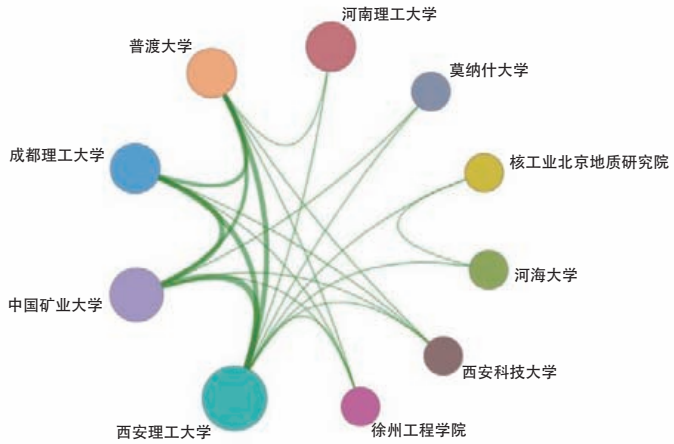

图 1.2.11　“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.15　“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	190	84.07	2021.9
2	美国	16	7.08	2021.8
3	澳大利亚	8	3.54	2021.8
4	波兰	3	1.33	2022.0
5	英国	2	0.88	2022.0
6	日本	2	0.88	2022.0
7	伊朗	1	0.44	2021.0
8	俄罗斯	1	0.44	2021.0
9	印度	1	0.44	2021.0
10	葡萄牙	1	0.44	2022.0

表 1.2.16　“地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国矿业大学	55	28.21	2021.8
2	西安理工大学	30	15.38	2021.8
3	河南理工大学	22	11.28	2021.7
4	安徽理工大学	15	7.69	2021.9
5	普渡大学	14	7.18	2021.7
6	西安科技大学	12	6.15	2021.9
7	重庆大学	11	5.64	2021.9
8	徐州工程学院	11	5.64	2021.6
9	山东科技大学	11	5.64	2021.9
10	贵州大学	8	4.10	2022.0

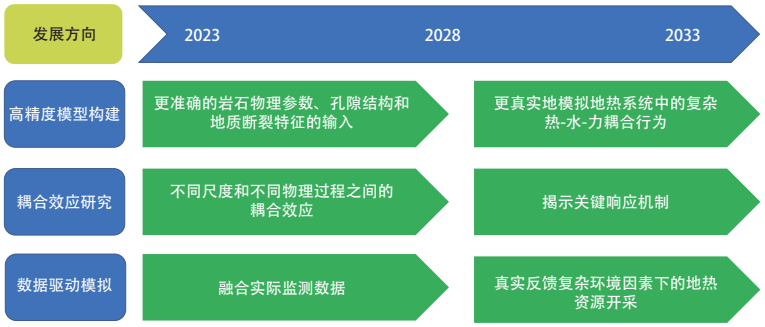

图 1.2.12 “地热系统岩石热 – 水 – 力耦合过程下多尺度断裂模拟研究”工程研究前沿的发展路线

地热系统的岩石断裂行为。

地热能作为一种可持续的清洁能源形式，具有巨大的应用潜力。多尺度模拟研究有助于更好地理解地热资源的分布、变化以及可持续利用的方式，这对于提高地热能开发效率、降低环境破坏风险具有重要意义。

另外，多尺度模拟研究在地热资源勘探、开发和管理方面具有广泛的应用。在地热能开采过程中，它可以帮助预测地热系统的岩石断裂行为，优化生产方案，降低生产风险。此外，它还可以应用于地热能与地下水、地质环境的相互影响研究，以及地热能与其他能源形式的综合利用方案设计。

2 工程开发前沿

2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域组研判的 Top 12 工程开发前沿见表 2.1.1，涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中，“动力电池快速充电及管理技术”“长时大规模储热及热机械储能技术”“数据驱动的智能配电网的安全运行与监控技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”“聚变装置托卡马克氘氚运行实验”“核能制氢 – 工业应用耦合技术”属于核科学技术与工程领域；“地面高精度重力测量找矿技术”“基于深度学习的地震数据解译及应用技术”“便携式地质勘探及取样装置研发”属于地质资源科学技术与工程领域；“油气勘探开发智能化协同平台”“页岩储层大平台长水平井优快钻井技术”“复杂条件下煤矿智能感知随钻探测装备”属于矿业科学技术与工程领域。

各开发前沿涉及的核心专利在 2017—2022 年的公开情况见表 2.1.2。

（1）动力电池快速充电及管理技术

动力电池（锂 / 钠离子电池）决定了电动交通运输工具的性能和市场竞争力。以电动车为例，现有动力电池的充满电时间约为 60 分钟，是燃油车加油耗时的 20 倍。实现“加油式”快速充电，能够拓展电动车的应用场景，提高电动车的市场渗透率。美国先进电池联盟对动力电池充电提出了具体指标，要求在 15 分钟内充满电池总电量的 80%。然而，由于离子传输阻力带来的动力学极化，快充会导致动力电池负极侧析锂（钠），进而加速性能衰减并引发安全隐患。通过管理技术或本征材料改性可降低快充过程

表 2.1.1　能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	动力电池快速充电及管理技术	464	15 925	34.32	2018.5
2	快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用	312	507	1.62	2019.9
3	地面高精度重力测量找矿技术	342	5 472	16.00	2018.5
4	油气勘探开发智能化协同平台	275	618	2.25	2020.4
5	长时大规模储热及热机械储能技术	1 616	2 558	1.58	2020.1
6	数据驱动的智能配电网的安全运行与监控技术	109	3 137	28.78	2019.0
7	聚变装置托卡马克氘氚运行实验	143	216	1.51	2020.0
8	核能制氢－工业应用耦合技术	142	181	1.27	2019.8
9	基于深度学习的地震数据解译及应用技术	336	4 714	14.03	2019.1
10	便携式地质勘探及取样装置研发	872	497	0.57	2020.3
11	页岩储层大平台长水平井优快钻井技术	392	8 076	20.60	2018.6
12	复杂条件下煤矿智能感知随钻探测装备	178	1 930	10.84	2019.8

注：序号 1、3、6、9~12 为数据挖掘前沿，序号 2、5、7~8 为专家提名前沿，序号 4 为数据挖掘 & 专家提名前沿。

表 2.1.2　能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	动力电池快速充电及管理技术	136	119	96	73	39	1
2	快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用	43	32	54	49	65	69
3	地面高精度重力测量找矿技术	92	94	70	56	26	4
4	油气勘探开发智能化协同平台	9	31	40	36	71	88
5	长时大规模储热及热机械储能技术	178	210	219	225	319	465
6	数据驱动的智能配电网的安全运行与监控技术	22	21	24	21	18	3
7	聚变装置托卡马克氘氚运行实验	14	18	25	21	27	38
8	核能制氢－工业应用耦合技术	24	21	17	15	26	39
9	基于深度学习的地震数据解译及应用技术	51	68	86	70	56	5
10	便携式地质勘探及取样装置研发	51	101	82	176	237	225
11	页岩储层大平台长水平井优快钻井技术	104	84	103	52	47	2
12	复杂条件下煤矿智能感知随钻探测装备	18	15	22	58	64	1

限速步骤的反应能垒，提高快充能力。管理技术的主要方向是电池智能温控系统和算法优化充电协议。本征材料改性则围绕电极构造、负极材料、黏结剂、电解质、固态电解质薄膜（SEI）。然而，快充限速步骤难以被准确识别且会随循环条件的变化发生动态迁移，从而导致针对某一步骤的动力学优化策略效果大打折扣。在此种情况下，将“抑制析锂（钠）”转变为“调控析锂（钠）”，通过以构建功能化 SEI 为代表的一系列调控策略使析锂（钠）分布均匀、形貌规则、高度可逆，不仅能本征解决金属枝晶析出

引发的安全问题，减少快充对电池寿命的损耗，而且可以提高快充下的荷电状态，是未来快充技术发展的重要趋势。

（2）快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用

国际上已经使用的快堆燃料形式有陶瓷燃料和金属燃料两大类。国际上正在研发快堆金属燃料、氮化物和碳化物燃料，这类燃料比氧化物燃料有更高的增殖比。

金属燃料具有热导率高、燃料温度低、安全裕度高的特点。通过材料技术改进可以抑制辐照肿胀。快堆金属燃料是公认的未来主要快堆燃料种类之一。金属燃料的制造工艺更加简化，金属燃料与干法后处理（分离出的金属为 U 和 Pu）能够更好地直接配合生产新燃料，构成一体化燃料循环系统。金属燃料研发主要集中在 U–Zr 合金和 U–Pu–Zr 合金。金属燃料通常由 U–10Zr 的二元合金或 U–Pu–10Zr 的三元合金组成。在氧化物燃料及金属燃料中加入次锕系核素（MA）成为嬗变燃料。

混合的钚铀氮化物燃料和碳化物燃料是正在开发的新型燃料形式。UPuN 和 UPuC 的钚铀密度比氧化物燃料高，能获得较高的增殖比、较短的增殖时间、较好的热导性能，并且与钠冷却剂和不锈钢包壳均具有优良的相容性。

国际上已有多个国家开展了氮化物、碳化物燃料的研发和应用。美国、法国、俄罗斯、印度等国都曾开展过多种碳化物和氮化物燃料的研发。俄罗斯快堆（除 MOX 以外）燃料选择混合氮化物燃料（MNUP）作为未来的快堆燃料选项之一。印度的试验快堆 FBTR 采用碳化物（Pu，U）C 燃料。

（3）地面高精度重力测量找矿技术

地面重力测量是指采用地面重力仪测定某一点的重力值，利用测得的地下重力（密度）差值进行找矿的方法。通过对相对重力和绝对重力测得的重力值进行分析，开展区域地质研究、矿产勘查和能源调查等，是地球物理找矿的重要方法之一。

国内外地面重力测量技术已获得巨大发展，基于零长弹簧思想，美国和加拿大设计生产出弹簧型地面重力仪，测量精度优于 5 μGal[1]，中国设备精度达到 30 μGal，在找矿方面发挥了重大作用，而今仍然是世界各国的主力技术装备。但传统的弹簧型地面重力仪已经发展到极限水平，测量精度提高余度很小。目前，国内外基于原子干涉原理，开发了一批地面绝对重力仪和重力梯度仪，绝对重力仪测量灵敏度达到 4.2~44.0 μGal/$Hz^{1/2}$，重力梯度仪可观测到 170 E 的重力梯度信号，且探头体积明显减小。原子重力仪作为新一代的量子重力传感器，其测量灵敏度有望达到 10^{-4} μGal，但面对原子重力仪小型化和测量精度提升等关键难题，原子重力梯度仪还面临着标度因子不足、相位提取效率偏低等问题，其实用化面临着巨大的挑战。

主要研究方向包括小型化高精度原子绝对重力仪 / 重力梯度仪研制、数据精细处理与解释等。提供精度更高、技术更有优势的找矿技术，对筑牢我国矿产资源安全防线具有重要的现实意义与战略意义。

（4）油气勘探开发智能化协同平台

油气勘探开发智能化协同平台是指通过提供信息共享、技术创新、生产经营一体化、智能化协同平台或环境，实现多学科交互融合和勘探开发一体化。当前新一轮油气科技革命和数字革命中，大数据、人工智能等新技术与油气工业的跨界融合成为创新的重要途径。国外油气勘探开发智能化协同平台建设已初见成效，壳牌、斯伦贝谢、哈里伯顿、BP、雪佛龙、埃尼等企业相继开展智能化平台研究。然而，

1　1μGal=10^{-8} m/s^2。

油气行业全球信息化程度仍相对较低，远低于产业平均值。目前，我国仍处于数字化向智能化过渡阶段，中国石油天然气集团有限公司建设“勘探开发梦想云”平台，中国石油化工股份有限公司建设“石化智云”平台，中国海洋石油集团有限公司构建勘探开发协同工作环境和海陆协同工作体系，皆取得阶段性进展，但总体发展仍落后于国外。主要研究方向包括：人工智能技术、智慧油气勘探研究、地质工程一体化构建、智能化装备研发、云计算平台建设、数据共享等。其发展趋势是将硬件设施、软件开发、数字化技术和油气专业知识有机结合，构建勘探开发全过程数字化、自动化、智能化专业应用环境，实现油气勘探开发多领域协作。未来有望从根本上改变勘探开发工作模式，提高工作效率，实现综合效益最大化，推动油气行业数字化转型和智能化发展，保障国家能源安全。

（5）长时大规模储热及热机械储能技术

储热及热机械储能技术是一种基于热质传递输运和热功可逆转化的能量存储技术，可从技术和经济的角度实现能量的长时跨季节规模化存储，具有能量密度高、利用方式灵活、综合效率高、成本可控等优点，是推动碳中和目标下能源绿色转型、构建以新能源为主体的零碳电力系统的关键技术。储热技术包括显热储热、相变储热和热化学储热，热机械储能技术涵盖压缩空气 / 二氧化碳储能、液化空气 / 二氧化碳储能和卡诺电池（也称热泵储电）。

主要技术方向包括：储热与传热传质多尺度耦合机制的构建方法；储热材料物理化学性质的主动调控策略；安全高效封装与隔热材料的开发与制备；基于拓扑优化理论和 AI 算法的储热装置结构优化技术；极端温度、压力条件下的高等熵效率压缩与膨胀技术；储热及热机械储能系统的热力学与经济性分析；储热及热机械储能系统的多场景智慧运行调控技术。

发展趋势包括：① 材料层面，在综合考虑储热材料热物性、腐蚀性和稳定性的基础上开展新型复合储热材料的主动设计与制备；② 装备层面，与 3D 打印等增材制造技术相结合，研发明确目标下具备相应高自由度结构的储热与动力装备；③ 系统层面，将储热及热机械储能系统同零碳电力系统、零碳燃料系统相融合，拓展为可提供灵活能源方案的智慧能源系统。

（6）数据驱动的智能配电网的安全运行与监控技术

随着智能配电网信息化与自动化水平的不断提高，配电网运行量测数据激增；同时，智能配电网与物联网的深度融合也促进了电力企业内外部数据交互，逐渐形成了面向智能配电网安全运行与监控的大数据环境。然而，所获取的配电网数据信息类型多样、数据粒度精细化程度高、在线与离线数据关联性复杂，现有基于模型的配电网分析计算与优化控制方法无法适用，亟须探索数据驱动的智能配电网分析决策、运行优化、监测控制技术，实现大数据赋能的配电系统监测、调度、保护、控制等全方面智能化提升。数据驱动的智能配电网安全运行与监控技术的主要研究方向包括：智能配电网多参量传感器与边缘计算装置研发；配电网数据通信网络安全与隐私保护机制；智能配电网运行态势感知与数字孪生 AI 建模技术；多尺度、精细化的智能配电网数据挖掘与数据融合技术；数据驱动下配电系统海量需求侧资源的聚合调控与互动支撑技术；数据驱动的智能配电网源网荷储优化调度方法；基于故障数据挖掘的智能配电网保护与控制技术。

（7）聚变装置托卡马克氘氚运行实验

基于托卡马克装置的磁约束氘氚聚变是迄今为止最有望实现受控核聚变能开发的途径。在“碳中和”以及国家长远发展对能源需求日益增长的背景下，开发聚变能是解决能源问题的终极途径。氚（T）是

一种稀有的放射性氢同位素，当它与同位素氘发生聚变反应时，相比单独氘（D）粒子之间的反应将会产生更多的中子和能量输出。氘氚聚变反应实现的条件相对容易，但由于氚的半衰期短，制备困难，其价格极其昂贵。目前，大部分托卡马克装置都仅仅使用氘进行等离子体实验。因此，为了验证氘氚聚变反应涉及的相关物理和工程技术挑战，国际热核聚变实验堆（ITER）预计从 2035 年开始进行氘氚等离子体实验。通过开展氘氚聚变实验可以直接验证聚变性能，分析托卡马克中氚的相关行为，研究氘氚等离子体行为、阿尔法粒子行为及其对等离子体的影响等。聚变装置托卡马克氘氚运行实验的关键研究和发展方向包括以下几个方面：阿尔法粒子加热相关物理学、氘氚等离子体能量约束、同位素效应、粒子输运研究、磁流体稳定性、聚变功率产出、氚处理安全性验证、氚增殖、聚变堆维护相关遥操作技术等。

（8）核能制氢 – 工业应用耦合技术

与传统制氢技术相比，核能制氢具有清洁、高效、经济等优势，核能制氢的科学研究与产业化应用逐渐成为热点。电解水制氢——氢直接应用或发电的储能形式有望成为继抽水蓄能以外的另一种商业化应用的大容量长时储能技术，同时核能制氢在工业领域的应用包括核能向石化园区供应水热电氢多元化产品，在燃料合成和冶金等领域应用。

在氢和合成燃料生产方面，加拿大利用重水堆 ACR–700，通过 Cu–Cl 热化学混合循环制氢；德国利用原型反应堆生产工艺热，通过煤炭气化生产混合气体；日本提出了利用 GTHTR300C 制氢的概念；南非提出了可以进行蒸气改进和具有热化学硫混合循环的 PBMR 概念；美国提出了利用 H2–MHR，通过高温蒸气电解方法制氢的方案。此外，还有氢基绿色燃料合成技术、氢冶金技术、燃煤掺氨混燃技术、掺氢 / 燃氢轮机技术等。氢能工业应用耦合技术主要包括工艺模拟与优化、高效能反应堆、工程材料的耐腐蚀试验、测量和控制技术。

（9）基于深度学习的地震数据解译及应用技术

地球科学和能源领域正借助深度学习迎来前所未有的变革。基于深度学习的地震解释技术通过模拟人脑神经结构实现地震数据的自动学习与分析，为地质勘探、储层预测和油气开发等领域带来了巨大潜力。国外公司如斯伦贝谢、CGG、Halliburton 等在基于深度学习的地震解释技术方面均取得了显著进展，先后推出了智能化断层识别、层位拾取、地震相分析等产品，实现了高效、准确的构造解释和储层分析功能，为能源勘探开发提供了重要的技术支持。当前，我国面临深层超深层勘探、非常规非均质储层、工程甜点预测、老油气田提高采收率等挑战，对高精度的地震解释技术提出了新的更高要求，基于深度学习的地震数据解释技术有望成为提高石油勘探和油气开发效率的关键。我国目前已取得阶段性进展，尽管个别技术已位居国际前列，但整体水平仍需提升。基于深度学习的地震解释技术的研究方向包括智能化测井分析技术、智能化构造解释、储层预测与油藏开发等。未来的发展趋势将涵盖多物理场数据融合、自动化解释平台构建、储层智能描述、实时地震监测等。融合地震数据与其他地质、地球物理数据将进一步提升解释的准确性和可靠性。同时，建立智能化的解释平台，实现从数据预处理到结果可视化的一体化流程。此外，深度学习技术将与地质模拟相结合，实现储层性质的智能描述，从而辅助油气储层评价和优化。这些技术必将为地球科学和能源领域带来新的突破。

（10）便携式地质勘探及取样装置研发

便携式地质勘探及取样装置由便携式钻机、取样工具及冲洗液循环系统等器具组成，基于轻量化、模块化设计，易于拆装搬运，适用于交通不便、施工场地受限等地区的地质勘查取样。国外已形成较为完善

的技术与装备体系，国内设备在钻进能力方面与国外相近，但在取样技术体系建设、设备自动化水平等方面仍有差距。目前，我国开展新一轮找矿突破战略行动的重点调查区已转向覆盖区、中高山、深切割等区域，便携式地质勘探及取样装置是统筹矿产勘查开发和生态保护、践行绿色勘查的关键技术装备。便携式地质勘探及取样装置研发的主要技术方向包括钻机轻量化、高效钻进工艺、电动化与自动化升级、绿色勘查综合技术集成等。便携式地质勘查及取样装置的发展趋势：一是结构、材料优化及钻进过程的自动化升级，提高钻机便携性，降低人员劳动强度；二是通过清洁能源驱动、环保冲洗液、泥浆不落地等技术的研发与应用实现绿色勘查；三是取样技术体系研究，满足不同地质条件、地质需求的高效原位无污染取样；四是钻机多工艺、多载体集成，实现一机多能，提高解决问题的能力；五是研发配套的参数监测系统，结合人工智能技术，实现工况诊断、岩性识别等。

（11）页岩储层大平台长水平井优快钻井技术

页岩储层具有“低孔低渗”的特征，其生产依赖于水平钻井和水力压裂技术。大平台长水平井优快钻井技术是指在同一平台同时布置多口长水平井，以减少井场占地面积，增加地下油气藏控制体积，实现页岩储层优质快速钻井，缩短钻井周期，降低作业成本。美国和加拿大率先成为页岩油气商业化生产国，中国正加快迈入产业化商业化生产阶段。西南油气田钻成中国第一口页岩气水平井和第一口具有商业价值的页岩气井，长庆油田建成亚洲陆上最大页岩油长水平井平台——华 H100 平台。H90–3 井水平段长度达 5 060 m，为亚洲陆上水平井最长水平段长度。然而，与北美海相为主的页岩储层条件相比，中国以陆相为主的页岩储层埋藏深，地形复杂，地层连续性差且分割强烈，技术要求和开发成本高，钻采难度大。主要研究方向包括：工厂化作业技术、水平井轨迹优化技术、水平井提速配套技术、井身结构优化、钻井参数强化、钻井液体系优化、提速设备研发、高效导向钻井模式和综合降阻滑动导向技术研究等。开展以长水平井为基础的大平台作业，研发高效钻完井技术，有望助推我国页岩油气的高效开发。

（12）复杂条件下煤矿智能感知随钻探测装备

煤矿智能感知随钻探测装备是针对煤矿深部开采环境中的复杂条件和高风险而设计的先进技术装备。其核心概念在于结合人工智能、传感器技术、数据分析等领域，使得钻探过程更加智能化、自动化，并能够实时感知煤、岩层变化情况，确保矿工的安全，提高采矿效率。

在主要技术方向方面，煤矿智能感知随钻探测装备的开发涵盖了多个关键领域：① 高精度传感器技术，包括地质勘探传感器、温湿度传感器、气体检测传感器等，这些传感器能够实时监测地下煤、岩层的物理参数和环境情况；② 数据采集和处理技术，利用大数据分析和机器学习算法，将传感器采集到的数据转化为可利用的信息，预测潜在风险并做出相应决策；③ 自动化控制技术，通过自动化设备控制钻探过程，降低人工干预，减少事故风险。

随着技术的不断发展，煤矿智能感知随钻探测装备的发展日趋成熟。一方面，装备将越来越注重多模态数据融合，通过融合不同类型的传感器数据，实现更全面的地下信息获取。另一方面，装备将更加注重智能化决策支持，借助先进的算法和模型，实现自动化的风险预测和应急响应。此外，装备还有望在通信技术领域有所突破，实现地下环境与地面指挥中心的实时数据传输，从而提升整体应急处置效率。

2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

2.2.1 动力电池快速充电及管理技术

实现动力电池“加油式”快速充电是进一步拓展电动车应用场景和提高市场渗透率的必要途径。动力电池充电时，锂（钠）从正极脱出，经电解液传输至负极并嵌入。该过程限速步骤的认知存在争议，但普遍认为离子的脱溶剂化、界面层传输、负极体相扩散是可能的限速步骤。限速步骤缓慢的动力学行为导致电池内阻在高倍率充电时迅速升高，从而驱动负极表面的枝晶状锂（钠）析出，导致电池容量衰减与安全问题。

充电管理技术和本征材料改性可改善动力电池的安全快充性能。充电管理技术的主要发展方向是电池智能温控系统和算法优化充电协议。电池智能温控系统可智能预热电芯以加速离子输运，达到降低限速步骤反应阻力的目的。但能够精准调控单体电芯温度的温控系统技术仍待突破。算法优化充电协议可实现电池内任意多物理信号的优化与平衡。然而，由于存在目标函数的局部最优解、收敛速度慢、求解困难等问题，该策略还需大量实验数据给予支持。

本征材料改性包括电极构造、负极材料、黏结剂、电解质、固态电解质薄膜（SEI）五个方向。具有三维、梯度等特征构造的电极可提高活性反应界面，加速离子界面与体相扩散，但受成本、工艺、能量密度的限制，该方案目前难以普及。硅、红磷、黑磷等理想的快充型负极材料目前处于研发阶段，重点攻关其电导率与体积变化问题。开发具备功能化的混合离子 – 电子导电黏结剂也是提升快充性能的方案之一，但其工艺制备还需进一步研发。快充电解质以弱溶剂化结构为方向，目前难点是如何提升自由溶剂的氧化稳定性，进而拓宽电压窗口。通过设计富氟化锂、氮化锂的 SEI，可降低电池内阻，提高快充性能。此外，功能化 SEI 也可以调控快充下负极的析锂（钠）形貌，实现均匀、安全、可逆的析出行为，不仅解决了枝晶引发的问题，而且可实现快充 100% 的荷电状态，让负极析锂（钠）不再成为阻碍动力电池快充的因素，是快充技术的发展趋势。

“动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿中，中国以 217 件核心专利公开量居世界第一，占比为 46.77%，其次为美国、日本和韩国（表 2.2.1）。其中，美国与韩国的合作最多，中国主要与美国和加拿大建立了合作（图 2.2.1）。核心专利产出较多的机构有纳诺达克有限公司、三星电子公司、清华大学和宁德时代新能源科技股份有限公司等（表 2.2.2）。其中，美国的纳诺达克有限公司与环球石墨烯集团的本土合作最为密切，其次是美国的联合技术公司与雷神公司、中国的清华大学与宁德时代新能源科技股份有限公司（图 2.2.2）。

实现动力电池的安全快充离不开电池管理技术与本征材料改性的协同发展和调和融汇。在电池管理技术方面，需重点发展电池智能温控系统和算法优化充电协议，实现对单一电芯温度的灵活调控，并降低系统成本与体积。完善算法网络，实现对电池状态的实时反馈、对负极析锂（钠）行为的准确监控、输出高效的大功率充电协议。在本征材料改性方面，应进一步设计三维电极结构、功能化黏结剂与弱溶剂化电解液，并构建无机组分为主的 SEI，大幅度降低电池内阻，抑制析锂（钠）行为。此外，负极材料由碳基到硅基直至磷基逐步递进。在原有基础上，通过电解液与界面工程改进 SEI，实现对析锂（钠）形貌的正向调控，直至充分利用快充条件下的析锂（钠）容量。最终，该集合多元技术的动力电池有望实现电动车的 3 分钟“加油式”快充电 – 充满电性能。“动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.3 所示。

表 2.2.1　“动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	217	46.77	5 840	36.67	26.91
2	美国	144	31.03	6 002	37.69	41.68
3	日本	37	7.97	1 481	9.30	40.03
4	韩国	34	7.33	1 448	9.09	42.59
5	加拿大	9	1.94	329	2.07	36.56
6	德国	9	1.94	321	2.02	35.67
7	英国	6	1.29	194	1.22	32.33
8	以色列	5	1.08	270	1.70	54.00
9	丹麦	4	0.86	118	0.74	29.50
10	法国	2	0.43	61	0.38	30.50

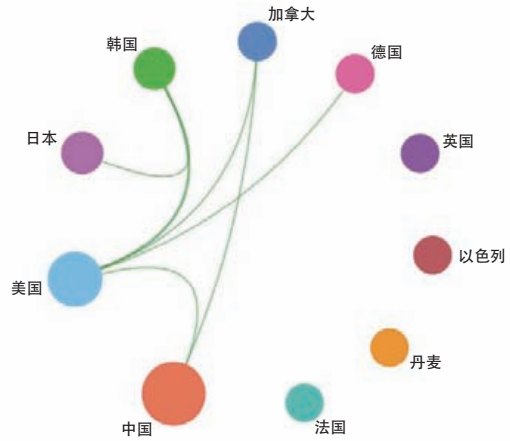

图 2.2.1　“动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.2　“动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	纳诺达克有限公司	37	7.97	1 738	10.91	46.97
2	三星电子公司	21	4.53	912	5.73	43.43
3	环球石墨烯集团	19	4.09	850	5.34	44.74
4	联合技术公司	19	4.09	658	4.13	34.63
5	通用电气公司	18	3.88	693	4.35	38.50
6	LG 化学公司	10	2.16	425	2.67	42.50
7	清华大学	10	2.16	356	2.24	35.60
8	东芝股份有限公司	8	1.72	361	2.27	45.12
9	宁德时代新能源科技股份有限公司	8	1.72	235	1.48	29.38
10	雷神公司	8	1.72	227	1.43	28.38

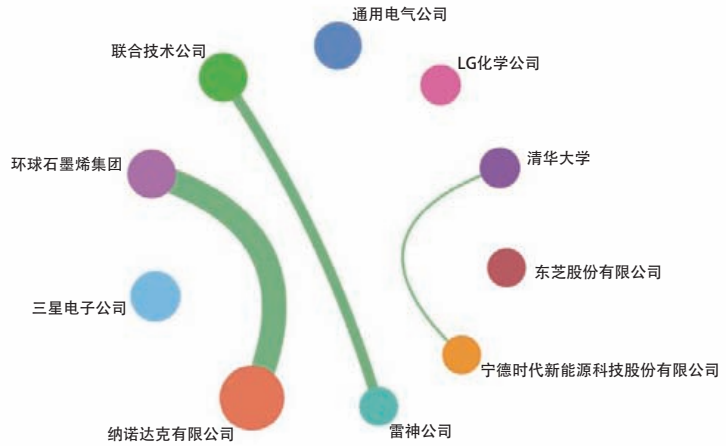

图 2.2.2 “动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

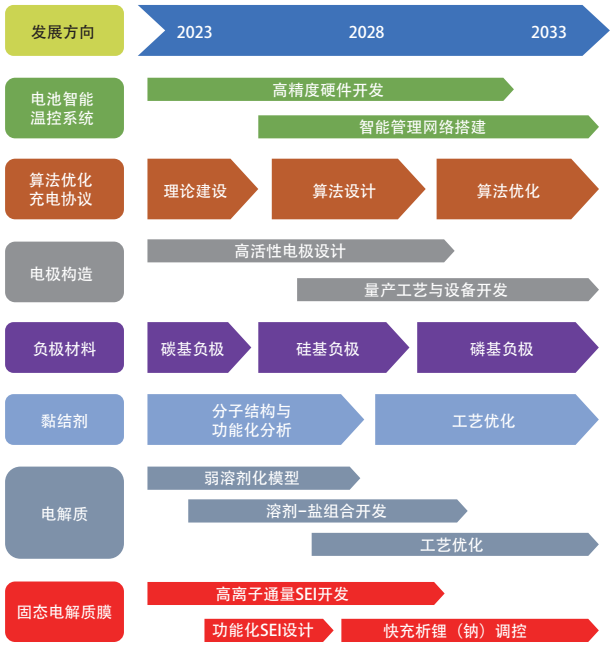

图 2.2.3 “动力电池快速充电及管理技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用

快堆核能系统通过核燃料后处理可以实现核燃料闭式循环，确保核能的可持续发展。采用快堆技术可以有效利用铀 –238（占天然铀的 99.3%），可立足国内铀资源满足核能发展需求；可以有效焚烧长寿命放射性废物，解决环境友好问题。耐高温与耐辐照能力是快堆燃料最重要的特性，这意味着反应堆寿期加长降低了对燃料循环堆外部分的要求。在产生高功率的同时保持相对较低的燃料温度也是其重要的特征。快堆实现燃料增殖和次锕系核素（MA）嬗变，并通过简化高效的干法后处理，将包括铀、钚和 MA 在内的全部元素进行循环利用。

适用于快堆的核燃料，应该具有长的堆内停留时间，能够承受反复的功率瞬变，能够提供高的功率密度，具有较大应对超功率的裕量、良好的应对包壳失效的能力、制造简单、后处理工艺简单经济等特性。金属燃料优点是核特性好，能谱硬，增殖性能接近理论上限；氮化物和碳化物核燃料，仍然属于陶瓷燃料，与氧化物燃料相比，其优势是具有更好的增殖能力和更短的快堆倍增时间。金属燃料在钠冷快堆中具有另一个优点，即在包壳发生破损以及燃料裸露的情况下，反应堆可以继续运行而不污染冷却剂。并且金属燃料极大地降低了堆外燃料循环的要求；制造简单、容易、价格低廉，后处理工艺步骤少，循环设施紧凑经济。深燃耗使得裂变物料流很小，因此金属燃料为更经济的燃料循环奠定了基础。美国阿贡国家实验室在 1984—1994 年间开发了基于金属燃料的一体化快堆；美国泰拉能源公司在 2006 年左右提出了行波堆概念，行波堆具有深燃耗特点，可以使铀 –238 在堆内实现原位增殖和焚烧；2012 年，俄罗斯和平利用核能方面的国家级战略规划“突破”计划正式启动，计划建设包含快堆、闭式燃料循环技术、后处理、先进核燃料和新型结构材料等多个领域的工程并进行相关科学研究，实现同厂址闭式核燃料循环。在快堆技术上，中国已建成 65 MWt 的中国实验快堆（CEFR），正在建设 600 MWe 的示范快堆。正在开展一体化快堆系统研究，由反应堆及配套的燃料再生设施组成，反应堆采用金属燃料快堆，同时实现发电、增殖和嬗变三个功能；燃料再生设施集干法后处理和燃料制造工艺于一体；反应堆和燃料再生设施同址设计，实现闭式燃料循环工艺流程一体化。

表 2.2.3 列出了“快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。可以看出，排名前三的国家是中国、日本和美国，其中中国的公开量和被引数比例远高于其他国家。各主要产出国家间尚无合作。从表 2.2.4 来看，中国核动力研究设计院公开了大量的专利。从主要产出机构间的合作来看，泰拉能源有限责任公司与通用电气公司、中国核动力研究设计院与中广核研究院有限公司之间有合作（图 2.2.4）。

“快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.5 所示。金属燃料的发展目标是掌握 U–Zr 合金的制造技术和工艺，预计 2030 年前完成 U–Zr 合金金属燃料组件的辐照考验，燃耗达到 150 GWd/tHM。对于快堆及其他先进堆燃料的发展路线是开展氮化物、碳化物、U–Pu–Zr、U–Pu–Am–Zr 合金等先进燃料的研发，在 2033 年前突破制造工艺及关键技术，为先进堆提供更高性能的燃料组件结构材料。

表 2.2.3　“快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	162	51.92	237	46.75	1.46
2	日本	47	15.06	28	5.52	0.60
3	美国	39	12.50	196	38.66	5.03
4	韩国	26	8.33	10	1.97	0.38
5	俄罗斯	23	7.37	9	1.78	0.39
6	瑞典	4	1.28	16	3.16	4.00
7	法国	3	0.96	4	0.79	1.33
8	加拿大	1	0.32	3	0.59	3.00
9	意大利	1	0.32	2	0.39	2.00
10	德国	1	0.32	1	0.20	1.00

表 2.2.4 “快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国核动力研究设计院	68	21.79	36	7.10	0.53
2	中广核研究院有限公司	19	6.09	30	5.92	1.58
3	通用电气公司	18	5.77	13	2.56	0.72
4	韩国原子能研究院	18	5.77	7	1.38	0.39
5	三菱重工株式会社	18	5.77	6	1.18	0.33
6	西安交通大学	17	5.45	49	9.66	2.88
7	泰拉能源有限责任公司	16	5.13	119	23.47	7.44
8	西屋电气公司	14	4.49	42	8.28	3.00
9	中国科学院上海应用物理研究所	8	2.56	16	3.16	2.00
10	东芝股份有限公司	8	2.56	5	0.99	0.62

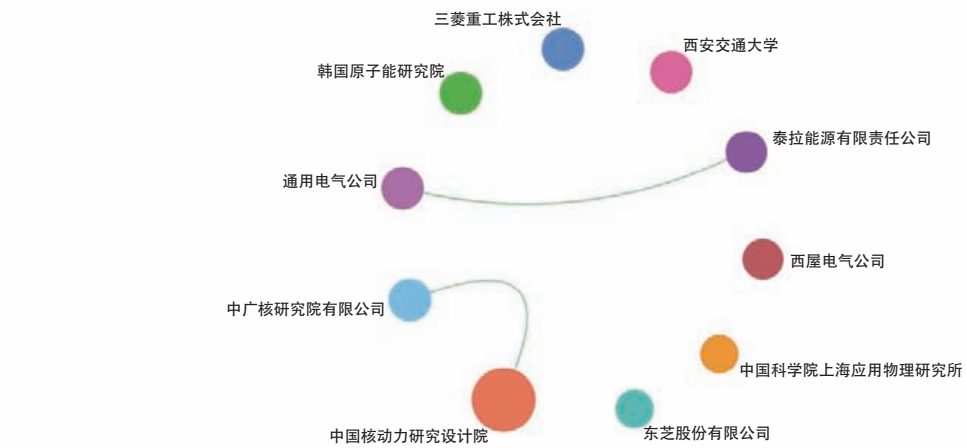

图 2.2.4 “快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿主要机构间的合作网络

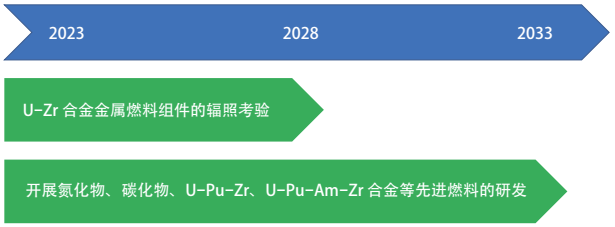

图 2.2.5 “快堆金属燃料和氮化物、碳化物核燃料及循环应用”工程开发前沿的发展路线

2.2.3　地面高精度重力测量找矿技术

国外地面重力测量技术已获得巨大发展，基于零长弹簧思想，美国 LaCoste Romberg 公司和加拿大 Scientrex 公司设计生产出弹簧型地面重力仪。Scientrex 公司的地面重力仪已经发展到第 6 代——CG-6，其测量精度优于 5 μGal，在找矿方面发挥了重大作用，而今仍然是世界各国的主力技术装备。斯坦福大学于 20 世纪 90 年代最早提出冷原子干涉重力仪，该原理的重力仪近期测量灵敏度达到 8 μGal/$Hz^{1/2}$。伯明翰大学设计实现了一台高可靠性的原子重力梯度仪，观测到 170 E 的重力梯度信号。法国 iXblue 公司研制出了国际上首台亚 E 水平的可移动原子重力梯度仪，测量分辨率达到 0.15 E 水平。

中国地面重力测量技术也得到了快速发展，并在地质找矿中发挥了重要作用，但实际工作中使用的重力仪基本上依赖进口，在技术装备的研制方面仍落后于国外。20 世纪 90 年代以来，北京地质仪器厂生产出了 ZSM 石英弹簧重力仪，测量精度达到 30 μGal，并已形成产品。浙江工业大学、华中科技大学等 8 家单位开展了地面原子绝对重力仪研究，测量灵敏度达到 4.2~44.0 μGal/$Hz^{1/2}$。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院报道了一台高集成度亚 E 水平原子绝对重力梯度仪，探头体积小至 92 L，但都处于样机研制阶段，尚未实用化。

“地面高精度重力测量找矿技术”工程开发前沿中核心专利的公开量排名前两位的国家是美国和中国，公开量分别为 120 件和 87 件，占比分别为 35.09% 和 25.44%，其他国家的专利占比均低于 12.00%；其中，美国的专利被引数最高（2 419），被引数比例达 44.21%，中国和德国的被引数比例分别为 17.40% 和 11.90%，其他国家相关技术的专利被引数比例均小于 10.00%；英国的平均被引数最高（20.25）（表 2.2.5）。在核心专利主要产出机构（表 2.2.6）方面，英飞凌科技公司（12）、TDK 株式会社和罗伯特·博世制造解决方案有限公司（各 9）产出较多；Hyperfine Research 公司被引数比例最高（5.39%）、平均被引数最高（73.75）（表 2.2.6）。注重领域合作的国家有德国、美国、法国和瑞士（图 2.2.6），各主要产出机构之间尚无合作。

表 2.2.5　“地面高精度重力测量找矿技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	120	35.09	2 419	44.21	20.16
2	中国	87	25.44	952	17.40	10.94
3	德国	40	11.70	651	11.90	16.27
4	日本	32	9.36	520	9.50	16.25
5	韩国	12	3.51	156	2.85	13.00
6	加拿大	11	3.22	212	3.87	19.27
7	瑞士	9	2.63	142	2.60	15.78
8	法国	8	2.34	126	2.30	15.75
9	荷兰	6	1.75	69	1.26	11.50
10	英国	4	1.17	81	1.48	20.25

传统的弹簧型地面重力仪已经发展到极限水平，测量精度提高余度很小。原子重力仪作为新一代的量子重力传感器，其测量灵敏度有望达到 10^{-4} μGal，但原子重力仪小型化和精度提升是当前急需解决的关键难题，原子重力梯度仪还面临着标度因子不足、相位提取效率偏低等问题，面临着巨大的挑战。

主要研究方向是小型化高精度原子绝对重力仪 / 重力梯度仪研制、数据精细处理与解释方法研究与软件开发等，提供精度更高、技术更有优势的找矿技术，对筑牢中国矿产资源安全具有重要的现实与战略意义。

高精度地面重力测量找矿技术在矿产资源勘查、基础地质研究等领域具有广阔的发展前景（图 2.2.7），未来 5~10 年，该领域的重点发展方向是实用化的地面高精度原子绝对重力仪 / 重力梯度仪研制、精确的重力数据地形改正、面向直接找矿的 3D 正反演和地质建模技术，形成快速、精细测量的地面重力探测方法与找矿技术体系，实现地面重力仪自主化、小型化和实用化，以及地面重力与多类型多源数据融合、井 – 地多参数联合约束反演、三维成像等重力处理解释，满足深部矿产资源勘查的需要，同时，更好地服务于地震防灾、国防建设等领域，有望大幅提高找矿成功率和增储量，提升社会经济效益。

表 2.2.6　“地面高精度重力测量找矿技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	英飞凌科技公司	12	3.51	245	4.48	20.42
2	TDK 株式会社	9	2.63	152	2.78	16.89
3	罗伯特·博世制造解决方案有限公司	9	2.63	132	2.41	14.67
4	迈来芯有限公司	8	2.34	94	1.72	11.75
5	朗格微系统有限公司	7	2.05	138	2.52	19.71
6	哈里伯顿能源服务公司	5	1.46	59	1.08	11.80
7	凯斯纽荷兰工业集团	5	1.46	44	0.80	8.80
8	Hyperfine Research 公司	4	1.17	295	5.39	73.75
9	Facebook 科技公司	4	1.17	91	1.66	22.75
10	联合技术公司	4	1.17	45	0.82	11.25

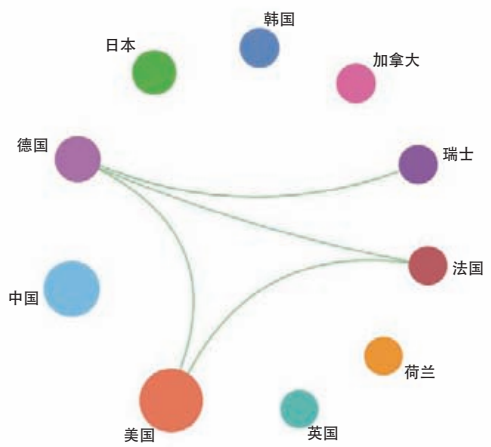

图 2.2.6　“地面高精度重力测量找矿技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

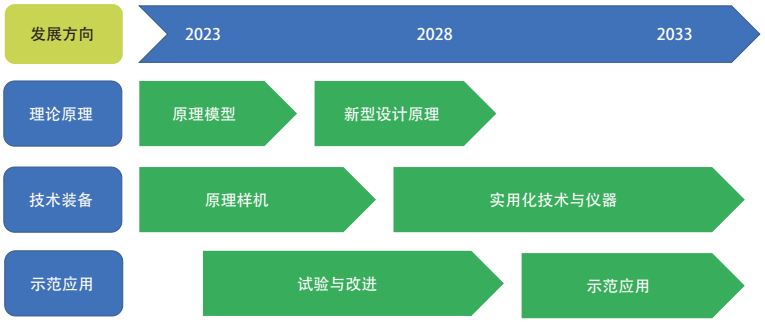

图 2.2.7　“地面高精度重力测量找矿技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.4　油气勘探开发智能化协同平台

油气勘探开发智能化协同平台是指通过提供信息共享、技术创新、生产经营一体化、智能化协同平台或环境，实现多学科交互融合和勘探开发一体化。当前新一轮油气科技革命和数字革命中，大数据、人工智能等新技术与油气工业的跨界融合成为创新的重要途径。

国外油气勘探开发智能化协同平台建设已初见成效，Akselos 为壳牌 Bonga FPSO 部署数字孪生，斯伦贝谢与谷歌合作推出 DELFI 云平台，道达尔公司搭建油气生产一体化协同研究平台，哈里伯顿与埃森哲、微软签订战略协议，BP 与微软达成战略合作，雪佛龙、埃尼、阿布扎比国家石油公司等企业也相继开展智能化平台研究。中国的智能化协同平台建设起步较晚，仍处于数字化向智能化过渡阶段。中国石油天然气集团有限公司建成主营业务智能共享平台——“勘探开发梦想云”平台，中国石油化工股份有限公司建设服务于能源化工行业的“石化智云”平台，中国海洋石油集团有限公司致力于构建勘探开发协同工作环境和海陆协同工作体系。国内智能化协同平台建设已取得了阶段性进展，但总体技术仍落后于国外。目前，油气行业全球信息化程度仍相对较低，远低于产业平均值。未来的主要研究方向包括人工智能技术、智慧油气勘探研究、地质工程一体化构建、智能化装备研发、云计算平台建设、数据共享等。

“油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿中核心专利的公开量排名前两位的国家是中国和美国，分别为 240 件和 21 件，占比分别为 87.27% 和 7.64%，其他国家相关技术的专利公开量占比均低于 2.00%；其中，中国的专利被引数最高（441），被引数比例达 71.36%，美国的被引数比例为 26.54%，其他国家相关技术的专利被引数比例均小于 5.00%；美国的平均被引数最高（7.81）（表 2.2.7）。在专利产出机构（表 2.2.8）方面，中国石油化工股份有限公司（12）、西南石油大学（9）、中国石油大学（北京）（8）、中国石油天然气集团有限公司（8）、中国中铁股份有限公司（7）和中南大学（7）产出较多；其中，被引数比例超过 5.00% 的机构有中国石油化工股份有限公司（5.50%）和中国中铁股份有限公司（5.83%）（表 2.2.8）。注重领域合作的国家有美国、荷兰、加拿大和法国（图 2.2.8），机构之间的合作研究集中在中国石油天然气集团有限公司和西南石油大学（图 2.2.9）。

油气勘探开发智能化协同平台在实现数据互联、技术互通、研究协同等方面具有广阔的发展前景，适用于油气勘探、钻完井、开采等油气上游业务领域（图 2.2.10）。未来 5~10 年，其重点发展方向是开展多学科融合，增强数据共享，开展顶层设计，完善技术架构。将硬件设施、软件开发、数字化技术和油气专业知识有机结合，构建勘探开发全过程数字化、自动化、智能化专业应用环境，实现油气勘探开发多领域

协作。改变勘探开发工作模式，提高工作效率，实现综合效益最大化，推动油气行业数字化转型和智能化发展。

表 2.2.7 “油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	240	87.27	441	71.36	1.84
2	美国	21	7.64	164	26.54	7.81
3	加拿大	5	1.82	27	4.37	5.40
4	法国	5	1.82	27	4.37	5.40
5	荷兰	5	1.82	27	4.37	5.40
6	沙特阿拉伯	5	1.82	5	0.81	1.00
7	印度	5	1.82	0	0.00	0.00
8	俄罗斯	2	0.73	4	0.65	2.00
9	挪威	2	0.73	3	0.49	1.50
10	韩国	1	0.36	6	0.97	6.00

表 2.2.8 “油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国石油化工股份有限公司	12	4.36	34	5.50	2.83
2	西南石油大学	9	3.27	12	1.94	1.33
3	中国石油大学（北京）	8	2.91	16	2.59	2.00
4	中国石油天然气集团有限公司	8	2.91	8	1.29	1.00
5	中国中铁股份有限公司	7	2.55	36	5.83	5.14
6	中南大学	7	2.55	20	3.24	2.86
7	斯伦贝谢科技公司	6	2.18	27	4.37	4.50
8	中国海洋石油集团有限公司	5	1.82	4	0.65	0.80
9	大连理工大学	4	1.45	9	1.46	2.25
10	山东科技大学	4	1.45	5	0.81	1.25

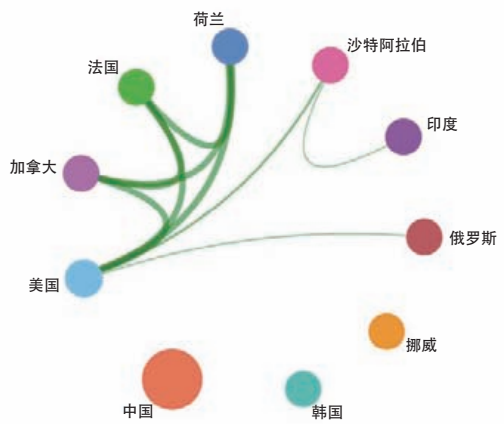

图 2.2.8 “油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿主要国家间的合作网络

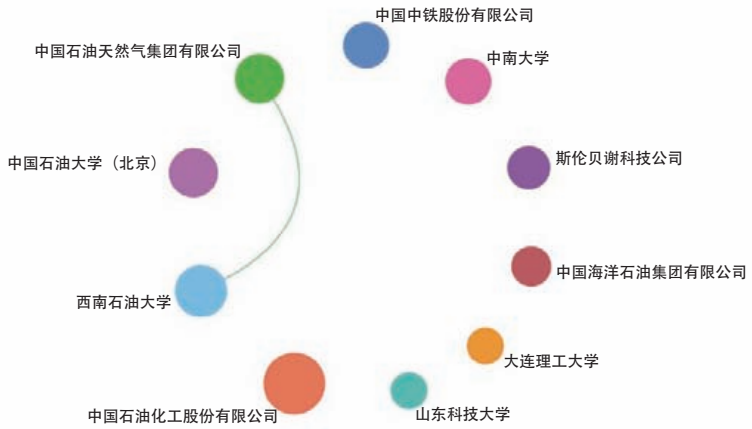

图 2.2.9　“油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿主要机构间的合作网络

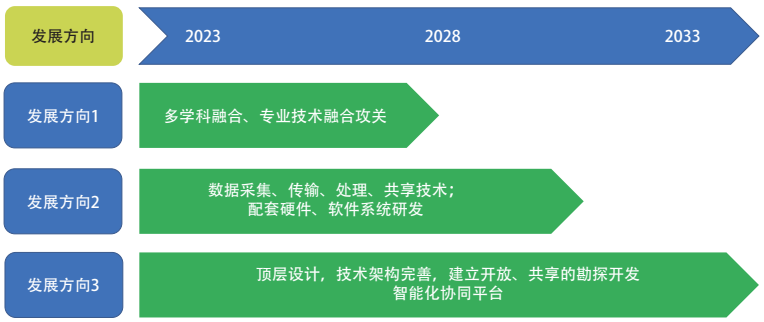

图 2.2.10　“油气勘探开发智能化协同平台”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：翁史烈　倪维斗　周守为　彭苏萍　黄　震

中国工程院二局能源与矿业工程学部办公室：宗玉生　解光辉

***Frontiers in Energy* 编辑部：**刘瑞芹　殷　靓　付凌霄

图书情报人员：陈天天　陈　梦

能源和电气科学技术与工程学科组：

组　长：翁史烈　岳光溪

秘书长：巨永林　周　托

参加人：谢和平　刘　涛　杨　军　周宝文　梁　正　严　正　赵　耀　杨　立　邰能灵　徐潇源　周　托　巨永林

执笔人：刘　涛　杨　军　周宝文　梁　正　严　正　赵　耀

核科学技术与工程学科组：

组　长：叶奇蓁　李建刚

秘书长：苏　罡　高　翔

参加人：高　翔　郭英华　苏　罡　周红波

执笔人：李恭顺　郭　晴　杨　勇　苏　罡　周红波　孙晓龙

地质资源科学技术与工程学科组：

组　长：赵文智　毛景文

秘书长：刘　敏　王　坤

参加人：熊盛青　简　伟　刘　敏　王　坤　刘协鲁　朱　磊　李永新

执笔人：王　坤　熊盛青　周锡华　钱荣毅　高秀鹤　李永新　董　劲　关　铭　刘　敏　谭春亮　岳永东　李志欣

矿业科学技术与工程学科组：

组　长：袁　亮　李根生

秘书长：周福宝　吴爱祥　张　农　宋先知

参加人：江丙友　时国庆　梁东旭　黄中伟　阮竹恩　王海柱　许富强　荣浩宇

执笔人：江丙友　宋先知　梁东旭　许富强　时国庆　王高升　李　爽

五、土木、水利与建筑工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及结构工程、建筑学、地质工程、交通工程、市政工程、水利工程、城乡规划与风景园林、测绘工程等学科方向。其中，“在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建”“安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化”“城市水系统病原微生物风险识别与阻控”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿。各前沿所涉及的核心论文自 2017 年至 2022 年的发表情况见表 1.1.2。

（1）基于人工智能的结构损伤识别及性能预测

基于人工智能的结构损伤识别及性能预测旨在综合运用物联网、大数据、机器学习等前沿信息技术、方法和装备，融合结构静 / 动力响应及雷、视、声等传感器感知信息，建立可根据实时数据进行学习与强化的智能模型，实现在不同荷载和环境条件下的结构损伤与性能变化精准判别。开展基于人工智能的结构损伤识别及性能预测研究，实现对潜在损伤的及早发现并进行准确的性能预测，对工程结构全寿命周期的功能性、经济性、可靠性、安全性提升具有重要意义。主要研究方向包括：① 结构损伤检 / 监测的新传感装备研究；② 结构健康检 / 监测数据标准化与融合；③ 基于机器学习算法的结构损伤检测和定位；④ 数据驱动的结构性能预测方法；⑤ 物理信息融合的结构性能预测模型。未来主要发展趋势在于构建结构状态全息感知和智能诊断系统，提升结构损伤识别和性能预测模型在可解释性、泛化性、准确性等方面的能力，建立融合物理信息及知识驱动的学习模型，实现复杂场景下的结构损伤识别及性能预测模型的工程应用。

表 1.1.1　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	基于人工智能的结构损伤识别及性能预测	54	3 616	66.96	2020.6
2	城市更新中的减碳方法与技术	45	2 229	49.53	2020.0
3	巨型地质灾害链时空分布与智能化评估	109	6 081	55.79	2019.6
4	在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建	25	852	34.08	2019.9
5	结构与工程系统全寿命抗灾韧性	37	1 456	39.35	2020.8
6	城市污泥与垃圾共发酵高效资源化	73	3 012	41.26	2020.0
7	地下水资源量 – 水质 – 生态协同演变及可持续利用	72	5 307	73.71	2020.1
8	安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化	16	681	42.56	2020.3
9	城市水系统病原微生物风险识别与阻控	17	816	48.00	2019.4
10	高分辨率遥感目标智能检测	151	14 846	98.32	2020.2

表 1.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	基于人工智能的结构损伤识别及性能预测	1	3	8	9	19	14
2	城市更新中的减碳方法与技术	5	5	8	6	11	10
3	巨型地质灾害链时空分布与智能化评估	17	18	14	21	22	17
4	在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建	3	3	6	2	4	7
5	结构与工程系统全寿命抗灾韧性	1	2	5	6	4	19
6	城市污泥与垃圾共发酵高效资源化	1	1	2	1	6	2
7	地下水资源量 – 水质 – 生态协同演变及可持续利用	11	5	9	10	14	23
8	安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化	1	0	3	4	5	3
9	城市水系统病原微生物风险识别与阻控	5	4	6	5	1	4
10	高分辨率遥感目标智能检测	11	15	18	38	29	40

从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 54，被引频次为 3 616，篇均被引频次为 66.96。

（2）城市更新中的减碳方法与技术

城市更新中的减碳方法与技术主要是指将降低碳排放的策略与城市更新设计相结合，将碳减排的方法和技术引入针对不同城市要素的更新过程，从而显著促进城市的低碳发展和可持续性建设。主要研究方向包括：① 既有城区的能耗及微气候环境模拟；② 减碳目标下的城市更新设计方案优化和决策工具；③ 城市更新中减碳技术与建筑材料一体化及其建造技术创新；④ 统筹不同类型、不同规模的城市更新要素的碳减排技术集成设计。未来的发展趋势是融合建筑节能技术、新能源技术、地理信息科学、计算机与人工智能技术等多学科知识，促进城市更新要素与减碳技术的融合，开发数字平台进行多情境模拟、应用和监测反馈，有力支撑城市可持续有机更新。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 45，被引频次为 2 229，篇均被引频次为 49.53。

（3）巨型地质灾害链时空分布与智能化评估

巨型地质灾害链是指某一地质灾害事件直接或间接诱发一种或多种次生灾害所形成的地质灾害系列。相较于单一地质灾害，巨型地质灾害链呈现出显著的不确定性、多种灾害相互依赖的复杂成灾机制，以及链式累积放大的巨灾效应。近年来，以中国川藏铁路为代表的高海拔寒区工程建设面临着巨型地质灾害链威胁，致灾规模高达数亿立方米，带来严重的人员伤亡和经济损失。准确预测巨型地质灾害链的时空分布并智能评估其灾害风险，是保障工程安全性、经济性和可持续性建设的关键。主要研究方向包括：① 复杂孕灾环境下地质灾害链时空发育分布特征与智能识别；② 地质灾害链成因机理与链生演化机制的动力学模型；③ 地质灾害链的韧性风险评估与防控结构优化方法；④ 超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警、智能化评估与防控决策响应。未来主要发展趋势在于巨型地质灾害链时空分布模式判别和灾变机理明晰，并在此基础上融合多源数据和智能算法预测地质灾害链的发展趋势、评估潜在的风险与影响，同时开发基于智能技术的地质灾害链实时监测与早期预警系统，构建超大尺度巨型地质灾害链智能化风险评估和防控决策体系。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 109，被引频次为 6 081，篇均被引频次为 55.79。

（4）在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建

在役道路、轨道和机场工程性能感知、评价以及改扩建，是指对现有交通基础设施（如道路、铁路轨道和机场等），采用智能感知技术和综合评估方法，对其性能状况进行实时监测、评估和预测，以便根据不断增长的乘客和货物运输需求进行必要的改进与扩展，从而提高交通基础设施的安全性、可靠性和可持续性，以适应不断变化的交通环境和用户需求。与新建设施相比，在役道路、轨道与机场工程改扩建面临更加复杂的时间、空间和生态约束。主要研究方向包括：① 结构健康检 / 监测与评估，运用传感器技术、无损检测等手段进行实时监测和综合检测，捕捉潜在的结构病害，结合高效精准的评估技术预防事故的发生，提升结构与功能耐久性；② 交通荷载感知与优化，利用智能交通系统、大数据分析等手段，实时感知交通流量，提供精准的交通管理和调度，提高交通基础设施利用率；③ 运行环境评估与改进，对气候、地质等因素进行监测和分析，研究交通荷载与环境变化对结构的影响，优化交通基础设施的设计和维护策略，提高耐久性和适应性；④ 改扩建规划与设计，结合结构服役状态演变规律分析和性能感知评价结果，制定合理的设施改建和扩建计划，适应未来交通发展需求。未来的发展趋势将集中在以下方面：高精度智能化感知与评价；可持续性与环保低碳设计；综合性能优化算法与决策模型；数字化建设与工程管理。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 25，被引频次为 852，篇均被引频次为 34.08。

（5）结构与工程系统全寿命抗灾韧性

结构与工程系统全寿命抗灾韧性是指结构与工程系统在设计、建造、维护和拆除全寿命周期内面对自然灾害、人为灾害等的抗灾韧性的评估及提升。传统结构与工程系统的抗灾韧性研究主要考虑设计和建造阶段，对维护和拆除等阶段的关注较少。随着世界各国大量结构与工程系统进入存量发展阶段，既有结构与工程系统的抗灾韧性研究对于韧性城市建设具有重大社会意义和战略价值。主要研究方向包括：① 结构单体全寿命抗灾韧性评估及提升；② 建筑工程系统全寿命抗灾韧性评估及提升；③ 水、电、燃气、通信管网等生命线系统的抗灾韧性评估及提升；④ 考虑工程多系统全寿命抗灾韧性的韧性城市建设。未来主要发展趋势在于复杂巨系统下的全寿命灾变机理和韧性评估及提升，并在此基础上结合健康监测大数据和人工智能算法实现城市工程系统全寿命抗灾韧性的准确评估与大幅提升，同时加快城市工程系统韧性防灾的全寿命化和智慧化，提升城市工程系统抗灾安全，构建城市工程系统全寿命韧性防灾管控体系。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 37，被引频次为 1 456，篇均被引频次为 39.35。

（6）城市污泥与垃圾共发酵高效资源化

城市污泥是城镇污水处理的必然产物，具有“污染”和“资源”的双重属性，污泥无害化处理和资源化利用是推动水污染防治领域减污降碳协同增效的关键举措。城市污泥与垃圾等有机废弃物的协同厌氧发酵处理可产生显著的经济效益和环境效益，有利于提高有机物降解效率和发酵系统稳定，大幅提升高值产品产量，是实现城市污泥无害化处理和高效资源利用的重要途径。主要研究方向包括：① 不同条件下城市污泥与垃圾共发酵机制与资源化效率；② 城市污泥与垃圾共发酵优化调控技术；③ 城市污泥与垃圾共发酵高值定向转化机制；④ 城市污泥与垃圾共发酵装备研发。未来主要发展趋势在于城市污泥与垃圾共发酵效率及能耗的影响因素逐步明晰，并在此基础上优化共发酵过程的资源化路径，强化共发酵过程新型清洁型生物燃料产量，进一步降低共发酵成本，构建城市污泥与垃圾共发酵高效资源化技术与装备体系。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 73，被引频次为 3 012，篇均被引频次为 41.26。

（7）地下水资源量 – 水质 – 生态协同演变及可持续利用

地下水在保障城乡生活生产供水、支持经济社会发展和维系良好生态环境中发挥着不可替代的作用。地下水资源量 – 水质 – 生态协同演变是指地下水资源量、水质与生态地质环境效应之间的相互作用及变化，而地下水可持续利用旨在保证地下水资源能够满足人类社会及生态环境系统的长期稳定发展，避免出现过度开发所导致的生态地质环境问题与灾害。主要研究方向包括：① 地下水循环分布与污染物迁移转化理论研究；② 地下水监测 – 模拟 – 评价方法研究；③ 地下水超采防治与地下水污染修复技术研究；④ 地下水可持续开发利用及管控。未来主要发展趋势在于解决变化环境下地下水循环演化和物质能量迁移转化理论的难题，创建空 – 天 – 地一体化地下水监测 - 解译新技术，建立多尺度多过程地下水模拟预测与地下水资源量 – 水质 – 生态评价技术体系，研发地下水超采及次生灾害预警防控与治理保护关键技术，完成地下水污染溯源与生态修复关键技术攻坚，创新陆海多源地下水增储与可持续开发利用技术，提出不同场景下多目标优化管理技术体系与地下水资源调控战略策略。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 72，被引频次为 5 307，篇均被引频次为 73.71。

（8）安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化

安全韧性导向的高密度城市人居环境是指在城乡规划和设计中，在高人口密度条件下创造既能安全防灾又能可持续发展的人居环境。不同于一般城市，高密度城市存在建成环境应灾风险高、安全隐患大、城市防灾应急系统设施脆弱、缺乏统筹、抗灾建筑性能弱、避难建筑标准低、建筑运维机制不健全等问题。近年来频繁发生极端气候事件，使高密度城市防灾体系面临严峻考验，因此关注高风险建筑、抗灾建筑和避灾建筑的典型灾害场景，增强城市韧性以便应对气候变化的巨大冲击，研究安全韧性导向的高密度城市人居环境多尺度空间优化具有重大意义。主要研究方向包括：① 高密度城市建筑规范的废改立；② 高密度城市建筑的动态监测与评估；③ 高密度城市建筑的韧性与可持续性优化设计；④ 高密度城市建筑存量更新与改造；⑤ 陆海统筹地区高密度城乡建成环境适灾优化。未来主要发展趋势将聚焦于高密度特大城市人居建成环境存量安全隐患和品质问题。通过对安全隐患与韧性应对能力进行研判，结合多尺度分析及预测特大城市建成环境的多元风险，借助深度学习、数据挖掘、数字孪生等方法，从安全韧性与可持续发展的角度优化高密度城市人居环境。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 16，被引频次为 681，篇均被引频次为 42.56。

（9）城市水系统病原微生物风险识别与阻控

城市水环境与自然循环、人类生产活动密切相关，城市水系统中存在细菌、病毒等病原微生物的暴发传播风险，主要源自人畜粪便、垃圾、生活污水和医院污水等。病原微生物在城市水系统中的迁移与传播会导致流行性疾病的暴发，严重威胁着环境安全和公共健康。有效识别、阻控和深度削减城市水系统中的病原微生物、保障用水安全性是迫切需要解决的问题。主要研究方向包括：① 城市河 / 湖病原微生物具体种类、分布、传播规律、去除途径等基础数据的建库；② 水质监测与评价体系中病原微生物的快速识别、表征与风险评估；③ 常规消毒技术（氯系消毒剂、臭氧和紫外等）与联合消毒剂对病原微生物的灭活；④ 基于物理分离及吸附原理的新型膜分离技术和吸附剂研发；⑤ 微生物代谢技术，如活性污泥工艺、膜生物反应器（MBR）工艺等；⑥ 包括水源管控、水厂去除和管网保障的病原微生物风险综合管控技术体系。面向城市水系统生态安全，未来研究重点和挑战主要包括构建典型水系统抗性组 / 病原菌 / 致病病毒数据库、制定流域优控介水病原微生物清单、确立用于健康风险评估

的指示性病原微生物、研发典型介水病原微生物的高通量检测方法和配套设备、建立病原微生物综合管控控制技术体系等。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 17，被引频次为 816，篇均被引频次为 48.00。

（10）高分辨率遥感目标智能检测

高分辨率遥感目标智能检测是借助知识工程、深度学习、逻辑推理、群体智能等人工智能新技术从高分辨率遥感图像中获取特定目标的类别和位置信息，在侦查、监视、预警、搜救等军民领域有广泛应用。当前的主要研究方向包括：① 通用目标智能检测方法，针对遥感图像目标检测中面临的类不平衡、背景复杂度高、目标多尺度变化、成像视角特殊、小 / 微目标检测等难题，研究通用的智能检测方法；② 特定目标智能检测方法，针对机场、建筑、飞机、舰船、车辆、云、海冰等具有重要价值的目标，发展专用的遥感图像目标智能检测方法。未来主要发展趋势将聚焦于小目标检测和多模态目标检测难题，不断优化目标智能检测模型，构建以知识为引导、算法为基础的智能化高分遥感目标检测方法体系，进而推动遥感场景智能理解，为构建遥感影像智能解译系统提供支持。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 151，被引频次为 14 846，篇均被引频次为 98.32。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　基于人工智能的结构损伤识别及性能预测

土木工程结构的损伤危及其健康，并直接影响其安全性能及使用性能。传统的结构损伤识别及性能预测方法通常依赖于物理传感器和数学模型，而利用人工智能方法，可从大量多源多模态数据中提取复杂的损伤特征模式，析出结构性能表征的关键参数，并基于实时数据的自我学习和强化机制，实现对结构损伤的准确识别及性能预测。开展基于人工智能的结构损伤识别及性能预测研究，为结构健康监测、维护补强及性能提升提供科学依据，在降低基础设施运维成本、改进管理养护策略、辅助结构全寿命设计优化等方面均具有重要意义。

主要研究方向包括：

1) 结构损伤检 / 监测的新传感装备研究。基于视觉、声学、微波雷达、分布式光栅光纤、纳米材料传感等多种传感技术，实现各种场景不同尺度下的结构损伤定性感知和定量判定；集成研发面向结构损伤检 / 监测场景的新装备，结合分布式智能技术，建立并完善结构损伤检 / 监测技术体系，实现少人、自主、全量、高效的工程结构损伤识别。

2) 结构健康检 / 监测数据标准化与融合。结合人工智能算法设计与模型优化需要，建立结构检 / 监测数据“采、传、存、用”标准，运用知识图谱、贝叶斯网络、概率图模型等技术，实现多源数据跨尺度聚合，为结构损伤识别与性能预测提供高可用数据。

3) 基于机器学习算法的结构损伤检测和定位。利用深度学习、支持向量机、聚类算法等机器学习模型，通过对比学习、监督学习等方式，挖掘结构致损机理，构建具有结构特性表达能力的数字代理模型，结合环境输入和结构响应，实现结构损伤状态判定与定位。同时，考虑环境特征和结构特性，根据实时数据对模型进行强化学习与自主迭代，不断提升损伤识别准确性和可靠性。

4) 数据驱动的结构性能预测方法。针对工程结构性能的影响因素复杂且数据样本匮乏问题，建立有效

的特征提取和特征分析的前处理方法，压缩数据维度，并结合主动学习，强化学习及迁移学习等技术，设计数据驱动模型，提炼影响结构力学性能、防灾减灾韧性及全寿命周期性能的关键特性参数，构建针对不同性能表征的数据驱动预测方法。

5) 物理信息融合的结构性能预测模型。借助数据－知识－模型－智能算法的多元技术融合发展，将力学理论模型、专家领域先验知识与智能算法的优势充分结合，探索物理约束的机器学习新算法及模型，从而突破人工智能模型对数据样本的依赖性以及模型“黑箱”所致的可解释性差、工程泛化能力弱等瓶颈，提高模型对工程结构性能预测的准确性和实用性。

“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”的核心论文有 54 篇（表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 66.96。核心论文产出排名前五的国家为越南、比利时、中国、韩国和美国（表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 25.93%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为美国、阿尔及利亚、比利时、越南和日本，其中中国的篇均被引频次为 66.36，略低于平均水平。由图 1.2.1 可知，各主要产出国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为比利时的根特大学、越南的孙德胜大学、越南的胡志明市开放大学、中国的东南大学和越南的交通与通信大学（表 1.2.2）。发文量排在前三的机构合作较为频繁，研究方向主要聚焦在结构损伤识别的人工智能模型，基于多种算法解决结构健康监测中的反问题，即由结构刚度、频率、应变能等响应来识别结构损伤等方面，主要应用于层压复合材料结构，在实际桥梁工程结构中也有应用。由图 1.2.2 可知，各主要产出机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、越南、韩国和伊朗（表 1.2.3），施引核心论文产出排名前五的机构为中国的同济大学和东南大学、比利时的根特大学、越南的胡志明市开放大学和中国的哈尔滨工业大学（表 1.2.4）。根据论文的施引情况来看，排名前五的核心论文产出国家与排名前五的施引核心论文产出国家有所不同，说明该前沿受到了不同国家学者的普遍关注。

表 1.2.1 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	越南	22	40.74	1 607	73.05	2020.2
2	比利时	20	37.04	1 585	79.25	2020.0
3	中国	14	25.93	929	66.36	2020.9
4	韩国	14	25.93	913	65.21	2020.9
5	美国	10	18.52	1 041	104.10	2020.2
6	阿尔及利亚	10	18.52	900	90.00	2020.2
7	日本	6	11.11	430	71.67	2020.0
8	意大利	6	11.11	266	44.33	2020.2
9	加拿大	5	9.26	289	57.80	2021.2
10	印度	4	7.41	279	69.75	2021.2

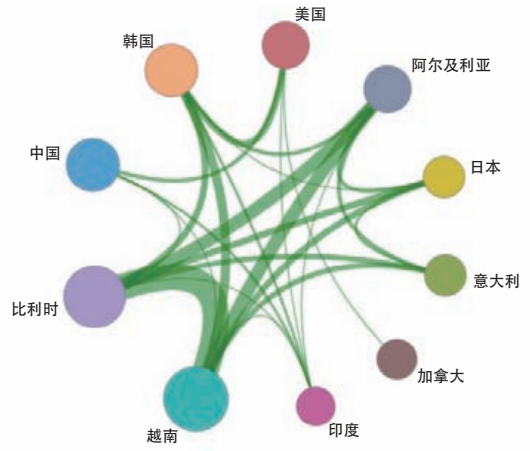

图 1.2.1　“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2　“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	根特大学	20	37.04	1 585	79.25	2020.0
2	孙德胜大学	13	24.07	1 192	91.69	2019.5
3	胡志明市开放大学	8	14.81	500	62.50	2021.2
4	东南大学	8	14.81	380	47.50	2021.2
5	交通与通信大学	7	12.96	499	71.29	2020.0
6	长安大学	6	11.11	256	42.67	2021.3
7	加利福尼亚大学洛杉矶分校	4	7.41	393	98.25	2019.8
8	汉阳大学	4	7.41	351	87.75	2020.2
9	穆卢德马梅里大学	4	7.41	319	79.75	2020.5
10	同济大学	4	7.41	315	78.75	2020.5

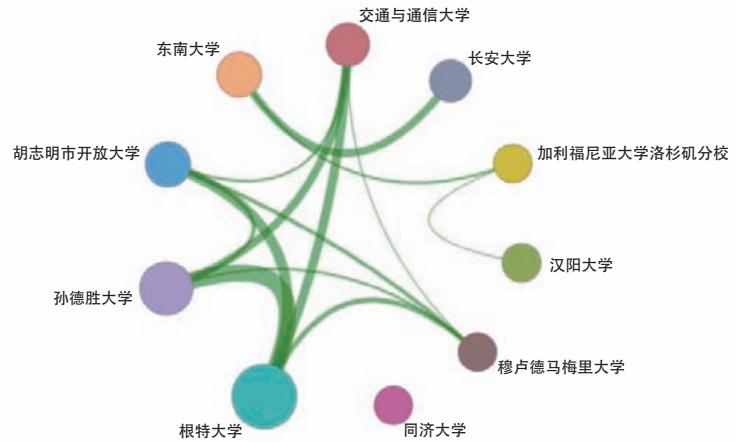

图 1.2.2　“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	868	40.07	2021.7
2	美国	235	10.85	2021.5
3	越南	169	7.80	2021.4
4	韩国	144	6.65	2021.6
5	伊朗	142	6.56	2021.6
6	印度	138	6.37	2021.7
7	意大利	105	4.85	2021.7
8	澳大利亚	102	4.71	2021.7
9	加拿大	99	4.57	2021.7
10	沙特阿拉伯	87	4.02	2021.6

表 1.2.4 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	同济大学	95	17.66	2021.7
2	东南大学	87	16.17	2021.7
3	根特大学	74	13.75	2021.0
4	胡志明市开放大学	43	7.99	2021.7
5	哈尔滨工业大学	41	7.62	2021.8
6	香港理工大学	40	7.43	2021.9
7	孙德胜大学	36	6.69	2020.5
8	大连理工大学	33	6.13	2021.7
9	延世大学	31	5.76	2021.7
10	交通与通信大学	30	5.58	2020.8

综合以上统计数据，中国的施引核心论文占比远超核心论文占比，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

未来 10 年，该前沿重点发展方向在于结构损伤状态全息感知体系构建、多模态大模型驱动的结构智能诊断系统建立，以及结构损伤识别及性能预测模型性能提升。一方面，依赖高集成度的一体化智能感知技术，结合多源多模态数据融合模型，显著提高损伤识别及性能预测可用数据容量与质量；另一方面，考虑结构多因素、多目标条件下的致损机理及性能演化过程，探索融合物理信息的知识驱动“学习”新范式，从而实现结构损伤识别及性能预测模型在可解释性、泛化性、准确性等多方面的提升。该前沿研究成果可应用于既有结构的运营维护及新结构的设计建设中，具有巨大发展潜力及广泛的应用场景（图 1.2.3）。

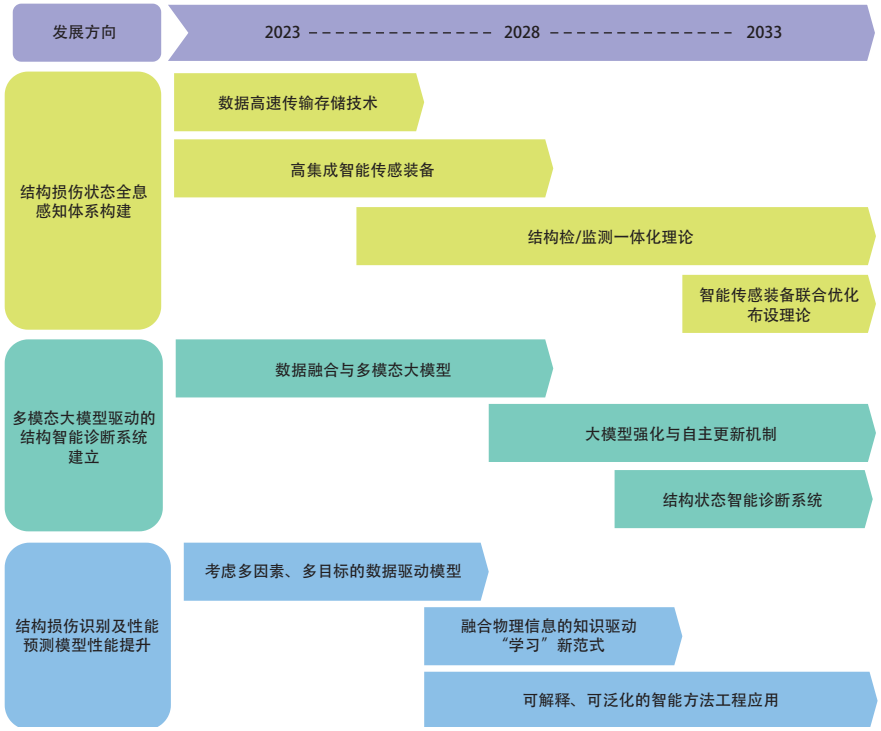

图 1.2.3　“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿的发展路线

1.2.2　城市更新中的减碳方法与技术

城市更新作为优化整个城市系统物理条件、空间形态和功能的工具，对于改善高能耗、高碳排放的城市构成要素将发挥重要作用，为城市发展中的二氧化碳减排提供了关键的干预点。当前城市更新主要应用传统模式，城市更新对象与减碳技术的结合难度大、结合角度单一，数字化精度低，缺乏应用实例。因此，如何建立城市更新与多种碳减排技术的系统集成和协同机制，探索应用机器学习、遗传算法等技术优化设计和决策的方法，高性能建筑材料与减排技术一体化及其建造技术的创新等是这一研究前沿的关注点。

主要研究方向包括：

1) 既有城区的能耗及微气候环境模拟。基于提取的建筑大数据信息和相关标准规范，结合地理信息系统（GIS）和建筑能耗模拟工具，自动生成区域建筑能耗与碳排放模型，实现区域尺度的快速建模，并根据实测数据进行模型自动校准。

2) 减碳目标下的城市更新设计方案优化和决策工具。运用机器学习、大数据分析、遗传算法等先进技术和方法，构建用于情景模拟和低碳评估的系统与平台，识别不同城市更新措施的二氧化碳排放现状和减排潜力，通过多目标优化生成最适宜的城市更新方案。

3) 城市更新中减碳技术与建筑材料一体化及其建造技术创新。建筑业被认为是原材料和能源的主要消费者。在维护和翻新既有建筑与基础设施的过程中，实现高性能的建筑材料与减碳技术一体化及其建造技术创新，有利于解决建筑业面临的低能效和高碳排放的挑战。

4) 统筹不同类型、不同规模城市更新要素的碳减排技术集成设计。城市更新是一个全面而复杂的系统工程，除了对单个城市更新要素应用减排技术的深入研究外，还需要建立各个城市要素所利用的减排技术的耦合，包括能源、建筑、交通、废弃物处理、碳汇技术等方面。

“城市更新中的减碳方法与技术”的核心论文有 45 篇（表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 49.53。核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、英国、意大利和澳大利亚（表 1.2.5），其中中国的核心论文占比为 55.56%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引数排名前五的国家为中国、澳大利亚、美国、新加坡和以色列，其中中国的篇均被引频次为 62.40，高于平均水平。由图 1.2.4 可知，核心论文数排名前十的国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为中国的中国矿业大学、华东师范大学、武汉大学、上海交通大学和上海理工大学（表 1.2.6）。中国矿业大学的前沿方向主要包括：研究可再生能源发展、智慧城市政策、产业融合等领域对提升能源效率，减少碳排放、空气污染等的影响机制，并提供实证证据和政策见解。华东师范大学的前沿方向主要包括：研究多尺度视角下的 CO_2 时空变化，以及政府政策对生态效率的影响，为可行的 CO_2 减排政策提供科学依据。武汉大学的前沿方向主要包括：研究不同可再生能源的分布特征和部署潜力及其发电效率的影响机制，同时关注 PM2.5、CO_2 的时空分布特征及影响因素。由图 1.2.5 可知，各主要产出机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、英国、澳大利亚和意大利（表 1.2.7），施引核心论文产出排名前五的机构为中国的中国科学院、中国矿业大学、重庆大学、武汉大学和清华大学（表 1.2.8）。从施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家其施引核心论文数也比较多，其中中国的核心论文数和施引论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计数据，在该前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，并逐步发展到领先地位。

表 1.2.5 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	25	55.56	1 560	62.40	2020.3
2	美国	5	11.11	258	51.60	2021.2
3	英国	4	8.89	157	39.25	2021.0
4	意大利	4	8.89	65	16.25	2019.2
5	澳大利亚	3	6.67	171	57.00	2018.0
6	新加坡	3	6.67	130	43.33	2017.7
7	德国	3	6.67	122	40.67	2019.3
8	孟加拉国	3	6.67	98	32.67	2022.0
9	马来西亚	3	6.67	98	32.67	2022.0
10	以色列	2	4.44	84	42.00	2019.0

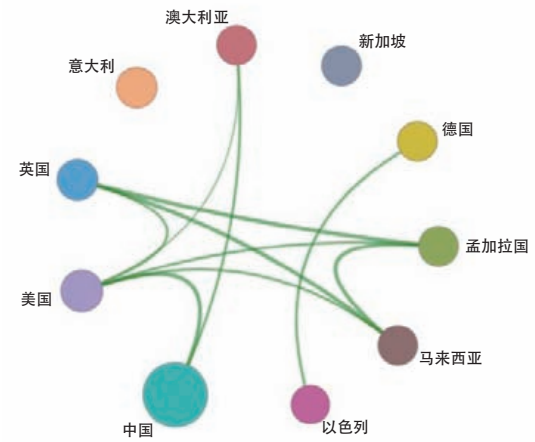

图 1.2.4　“城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国矿业大学	6	13.33	327	54.50	2021.7
2	华东师范大学	4	8.89	311	77.75	2018.2
3	武汉大学	4	8.89	244	61.00	2019.5
4	上海交通大学	4	8.89	212	53.00	2020.0
5	上海理工大学	4	8.89	212	53.00	2020.0
6	重庆大学	3	6.67	202	67.33	2021.3
7	河北工业大学	3	6.67	202	67.33	2021.3
8	慕尼黑工业大学	3	6.67	122	40.67	2019.3
9	库尔纳工程技术大学	3	6.67	98	32.67	2022.0
10	拉杰沙希工程科技大学	3	6.67	98	32.67	2022.0

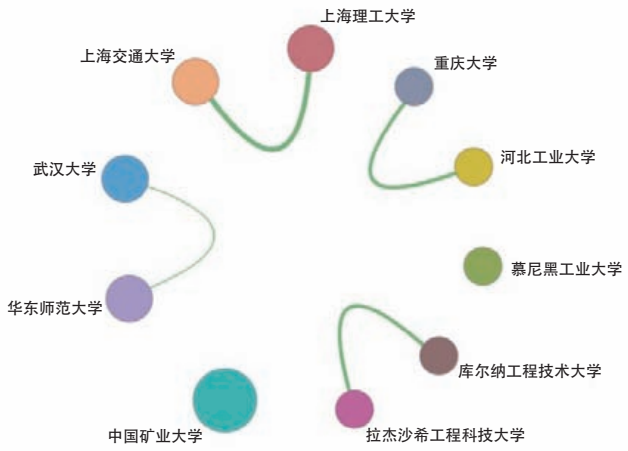

图 1.2.5　“城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 194	66.70	2021.5
2	美国	149	8.32	2021.3
3	英国	100	5.59	2021.5
4	澳大利亚	75	4.19	2021.3
5	意大利	59	3.30	2021.1
6	西班牙	43	2.40	2021.3
7	新加坡	37	2.07	2021.2
8	德国	36	2.01	2021.2
9	日本	33	1.84	2021.3
10	马来西亚	32	1.79	2021.6

表 1.2.8 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	126	23.25	2021.0
2	中国矿业大学	62	11.44	2021.8
3	重庆大学	60	11.07	2021.5
4	武汉大学	54	9.96	2021.1
5	清华大学	41	7.56	2021.2
6	中国地质大学	37	6.83	2021.2
7	天津大学	35	6.46	2021.5
8	北京师范大学	33	6.09	2020.8
9	山东大学	33	6.09	2021.2
10	上海交通大学	32	5.90	2020.9

“城市更新中的减碳方法与技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为：城市更新中减碳新材料的开发和应用、新能源与建筑一体化技术、城市更新中低碳设计优化、碳减排技术集成、数字技术应用、碳减排效果验证等工作。具体而言，在能耗和碳排放模拟的构建与计算中，提高城市尺度建筑群碳排放精准核算和动态预测的准确性，并面向不同尺度的城市更新设计；在技术集成应用方面，促进城区和街区更新建设中单项碳减排工程技术更新迭代的同时，建立多系统耦合的城市更新碳减排技术集成；在开发低碳城市更新决策支持工具方面，建立综合多种减排技术的方案优化平台，并明确不同地区、不同发展阶段的城市“低碳”目标、指标和技术路线（图 1.2.6）。

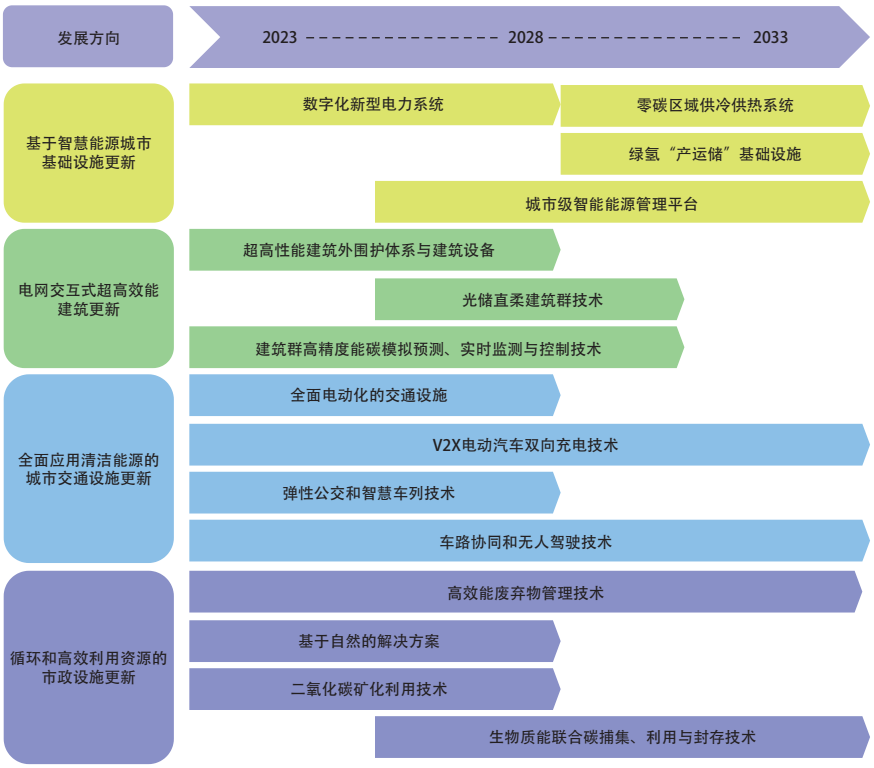

图 1.2.6　“城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿的发展路线

1.2.3　巨型地质灾害链时空分布与智能化评估

全球巨型地质灾害链往往发生在高寒山区。随着建设规模的增加，世界范围内的重大工程建设逐渐向地质条件恶劣的高寒山区扩展，而复杂的地形地貌条件、密集的区域断裂带、频繁的强震活动等孕灾环境给工程建设与后期安全运营构成重大灾害风险。此外，高寒山区被视为全球气候变暖的“放大器”，近年来全球极端气候事件频发加速了巨型地质灾害链的发生，给重大工程建设、运营和管理带来了巨大挑战。研究巨型地质灾害链时空分布与智能化评估对确保安全生产、加快基础设施建设意义重大。

主要研究方向包括：

1) 复杂孕灾环境下地质灾害链时空发育分布特征与智能识别。地质灾害链往往发生于人迹罕至的高海拔山区，灾害隐蔽性强，基础数据缺乏且存在异质性。基于空、天、地、内多源综合遥感技术，结合多源异质数据解译算法，建立山区地质灾害链数据库，揭示地质灾害形成与复杂孕灾要素之间的关系，探明主要致灾因素，总结地质灾害链时空发育分布规律和灾害发育特征，结合机器学习图像识别技术建立不同类型地质灾害链早期识别标志，实现对地质灾害链潜在相互转化关键区段的智能识别。

2) 地质灾害链成因机理与链生演化机制研究的动力学模型构建。研究地震动、降雨、气温等复杂孕灾环境对不同类型灾害体内部孔隙水压、应力、强度以及力学性能的作用，从宏观的地质动力过程和微观的颗粒力学特征角度进行耦合研究，揭示地质灾害链在形成过程中的多相态（固态－液态）、多过程（流－堵－溃）灾变转化的临界力学条件，建立考虑滑坡运动演化过程中的宏观－细观－微观互联效应的多尺度耦合动力学模型。

3) 地质灾害链的韧性风险评估与防控结构优化方法建立。针对巨型地质灾害链的突发性、不确定性和

复杂属性，构建地质灾害链致灾范围的随机评估方法，结合人工智能算法开展大尺度时空的地质灾害链危险性预测和风险分区评价，采用帕累托改进实现高风险区段线路局部优化调整，进一步建立针对不同类型防护结构抗冲击性能评估的随机动力学方程，获取工程结构性能指标的随机动力响应规律，从概率密度函数层次精确表征工程结构的破坏概率和易损性，同时开展基于可恢复性思想的结构设计，从鲁棒性和可恢复性角度提出灾害韧性防控设计方案。

4) 超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警、智能化评估与防控决策响应。地质灾害链发生后往往会造成跨行政区域(国界、省界、县界)的超大尺度成灾，存在灾害评估滞后与风险管控难以智能化协同的问题。基于多源监测数据和动力学数值模拟结果更新智能算法的风险评价参数，建设多类型灾害过程融合的系列地质灾害链的智能化动态评估系统，形成规范，包括地质灾害链早期识别、调查评价、监测预警及风险区划等全过程的预警标准体系，并针对不同预警等级建立韧性风险防控措施。

“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”的核心论文有 109 篇（表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 55.79。核心论文产出排名前五的国家为中国、澳大利亚、美国、意大利和英国（表 1.2.9），其中中国发表论文占比为 77.06%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引数排名前五的国家为挪威、印度、越南、伊朗和澳大利亚，其中中国作者所发表的论文篇均被引数为 56.32，高于平均水平。由图 1.2.7 可知，核心论文数排名前十的国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为中国地质大学、成都理工大学、南昌大学、中国科学院和纽卡斯尔大学（表 1.2.10）。中国地质大学的研究方向聚焦在采用多源数据及人工智能方法等对滑坡位移预测进行研究，成都理工大学和南昌大学重点关注采用机器学习等方法对滑坡易发性进行预测。由图 1.2.8 可知，各机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出前五的国家为中国、美国、意大利、伊朗和印度（表 1.2.11），施引核心论文产出前五的机构为中国地质大学、中国科学院、成都理工大学、长安大学和维新大学（表 1.2.12）。从施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家其施引核心论文数也比较多，其中中国的核心论文数和施引论文数

表 1.2.9 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	84	77.06	4 731	56.32	2019.7
2	澳大利亚	14	12.84	1 124	80.29	2019.2
3	美国	14	12.84	984	70.29	2019.6
4	意大利	13	11.93	913	70.23	2019.5
5	英国	6	5.50	273	45.50	2018.2
6	挪威	4	3.67	631	157.75	2018.2
7	伊朗	4	3.67	489	122.25	2020.2
8	印度	3	2.75	465	155.00	2019.7
9	越南	3	2.75	458	152.67	2020.0
10	法国	3	2.75	135	45.00	2019.7

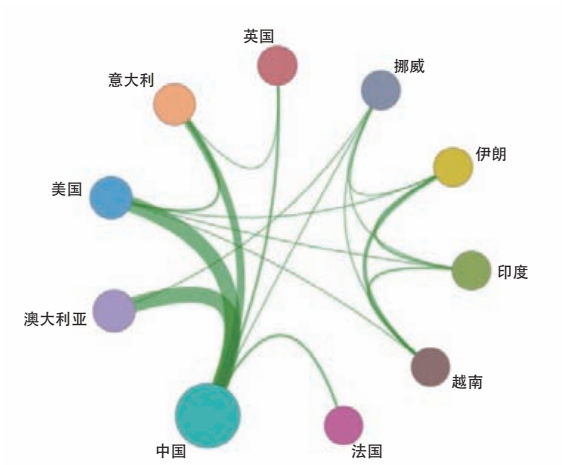

图 1.2.7　“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10　“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国地质大学	23	21.10	1901	82.65	2019.3
2	成都理工大学	15	13.76	819	54.60	2020.0
3	南昌大学	12	11.01	941	78.42	2019.7
4	中国科学院	12	11.01	548	45.67	2019.9
5	纽卡斯尔大学	11	10.09	996	90.55	2019.4
6	清华大学	9	8.26	295	32.78	2020.7
7	四川大学	5	4.59	293	58.60	2020.0
8	同济大学	5	4.59	201	40.20	2020.8
9	长安大学	5	4.59	92	18.40	2021.2
10	香港科技大学	4	3.67	155	38.75	2020.5

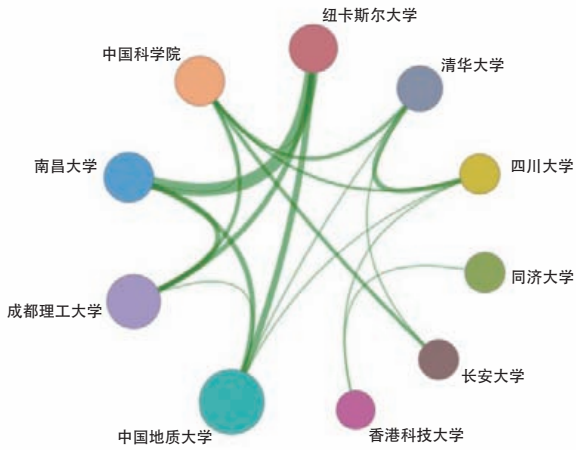

图 1.2.8　“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 588	54.11	2021.2
2	美国	358	7.48	2020.8
3	意大利	306	6.40	2020.9
4	伊朗	284	5.94	2020.7
5	印度	276	5.77	2021.3
6	英国	232	4.85	2020.9
7	越南	198	4.14	2020.5
8	澳大利亚	175	3.66	2020.8
9	德国	135	2.82	2020.8
10	加拿大	117	2.45	2020.8

表 1.2.12 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国地质大学	369	20.79	2020.9
2	中国科学院	350	19.72	2021.1
3	成都理工大学	253	14.25	2021.2
4	长安大学	129	7.27	2021.2
5	维新大学	108	6.08	2020.1
6	同济大学	104	5.86	2021.2
7	西南交通大学	103	5.80	2021.4
8	四川大学	94	5.30	2021.3
9	重庆大学	94	5.30	2021.3
10	武汉大学	89	5.01	2021.1

均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计数据，在该前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，并逐步发展到领先地位。

未来 10 年，该前沿重点发展方向在于基于多源异构数据分析的地质灾害链时空发育特征和早期识别，多致灾因素下地质灾害链成因机理和链生演化机制分析，极端气候变化下地质灾害链的韧性风险评估与防控优化方法建立，以及推进超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警与智能化防灾决策系统开发。同时，在发展趋势上，该前沿将逐渐向定量化、智能化、系统化发展。随着工程建设过程中面临的愈加恶劣的地质环境和运营过程中面临的愈加频繁的极端气候，该前沿研究成果将具有巨大发展潜力（图 1.2.9）。

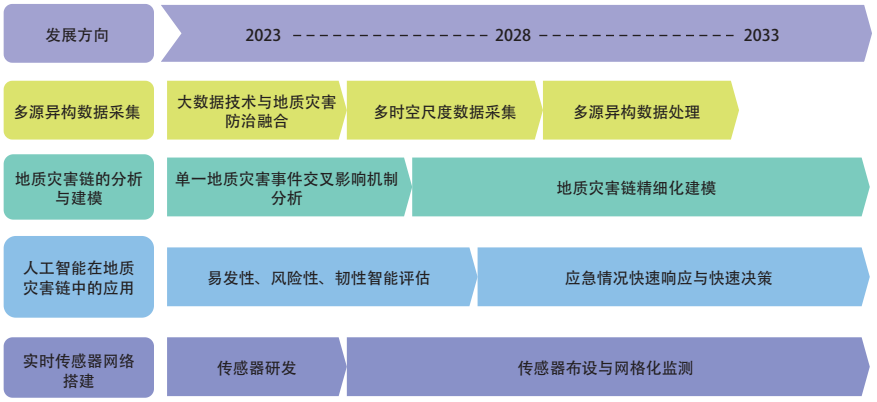

图 1.2.9　“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿的发展路线

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，涉及市政工程、测绘工程、建筑学、城乡规划与风景园林、交通工程、水利工程、土木建筑材料、岩土及地下工程、结构工程等学科方向。其中，“排水管道漏损智能探测与修复技术”“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”“极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿。各前沿所涉及的专利自 2017 年至 2022 年的核心专利公开量见表 2.1.2。

（1）排水管道漏损智能探测与修复技术

排水管道漏损已经成为制约雨水安全排放、污水全收集全处理的瓶颈之一。漏损智能探测与修复是指探测诊断评估管道结构性缺陷水平，开展低扰动、高质量和预防性修复，使管道安全高效运行。随着物联

表 2.1.1　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	排水管道漏损智能探测与修复技术	22	43	1.95	2020.8
2	毫米级全球和区域坐标框架建立技术	55	95	1.73	2020.3
3	城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系	19	122	6.42	2020.0
4	人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术	21	27	1.29	2021.1
5	极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术	19	42	2.21	2020.4
6	复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备	47	234	4.98	2019.8
7	多源固废制备负碳建筑材料技术	106	985	9.29	2019.5
8	复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术	258	1 257	4.87	2019.3
9	装配式构件与模块化结构	286	1 694	5.92	2019.3
10	高标准农田智能灌排技术与装备	185	1 679	9.08	2019.4

表 2.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	排水管道漏损智能探测与修复技术	1	0	1	6	7	7
2	毫米级全球和区域坐标框架建立技术	6	2	6	16	8	17
3	城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系	3	1	3	4	2	6
4	人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术	1	0	4	0	3	13
5	极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术	3	1	1	3	3	8
6	复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备	7	8	3	8	10	11
7	多源固废制备负碳建筑材料技术	15	19	23	16	17	16
8	复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术	47	42	53	51	42	23
9	装配式构件与模块化结构	37	57	52	72	65	3
10	高标准农田智能灌排技术与装备	35	28	33	36	27	26

网、大数据、云计算等技术发展，漏损探测将由周期性被动检测向常态化主动监测转变，为排水管道预防性修复提供支撑。主要技术方向包括：① 数字底座技术，即融合地理信息系统国产化和复杂介质条件下的精准测量技术；② 智能探测技术，即融合电磁和声波检测的隐患识别和结构健康监测技术；③ 智慧评估技术，即基于数据驱动与模型驱动的健康预测和自适应建模技术；④ 高效修复技术，即适应长距离输送、腐蚀环境和力学条件多变的修复材料，以及适用于大型、特大型管道的修复技术。未来发展趋势主要聚焦在精准量化探测技术、高强度高适应修复技术，以及基于移动互联网技术的探测和修复质量过程控制技术。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 22，被引频次为 43，平均被引频次为 1.95。

（2）毫米级全球和区域坐标框架建立技术

坐标框架是描述地球形状及变化、表达地球空间信息的基础，也是拓展人类活动、促进社会发展的关键地球空间信息基础设施。目前，最新的国际地球参考框架难以满足大范围或全球尺度毫米级地球系统动态变化监测的需求，研究建立毫米级坐标框架已成为该领域的开发前沿。当前发展的主要方向包括：① 精密空间大地测量数据处理技术，通过精细化数学模型确定最优的甚长基线干涉测量（VLBI）/ 卫星激光测距（SLR）/ 全球卫星导航系统（GNSS）/ 星基多普勒轨道和无线电定位组合系统（DORIS）数据处理策略，对全球基准站数据进行整网一致性重处理以消除或减弱技术类系统误差的影响，为毫米级坐标框架的建立提供更准确的输入数据；② 基准站非线性运动建模，针对地球物理效应造成的基准站非线性位移，融合环境负载、热膨胀及其他模型建立毫米级基准站地球物理运动模型，为实现毫米级坐标框架建立提供支持；③ 空间大地测量技术组合，综合利用 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 等空间大地测量技术建立全球坐标框架；④ 地心运动建模，联合多种空间大地测量技术及地球物理模型反演地心运动，解决坐标框架原点定义与实现间的不一致问题，为地球动力学研究提供更高精度的地心参考框架。未来的发展趋势主要聚焦在精密空间大地测量数据处理技术、基准站非线性运动建模、空间大地测量技术组合、地心运动建模。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 55，被引频次为 95，平均被引频次为 1.73。

（3）城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系

如何保护和利用城市历史文化资源是全球关注的重要议题，涉及城市文化遗产、自然遗产和文化遗产的混合体以及文化景观等诸多工程开发领域。中国城市历史文化资源异常丰富，但在资源保护和利用领域仍存在着理论研究滞后、基础数据的系统性和完整性不足、新技术方法应用范围有限等问题。伴随着新一轮数字化技术的发展，全球范围内正将最新的智能化数字技术导入传统的历史文化资源保护与利用领域，提高资源保护工作的体系化、拓展历史文化资源利用的广度和深度。主要研发方向包括：① 城市历史文化资源的数据库构建技术；② 城市历史文化资源的智能化保护技术；③ 数字赋能的城市历史文化资源利用技术；④ 城市历史文化资源保护与利用的技术集成。未来重点发展方向为多源数据融合、风险监测感知、评估推演预警、空间规划响应、价值传播利用和规划技术集成。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 19，被引频次为 122，平均被引频次为 6.42。

（4）人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术

建筑空间策划生成技术面向大型复杂建筑工程加强全过程管控的迫切需求，利用人工智能前沿技术，整合建筑设计多专业、全流程数据，支持建筑空间策划的复杂决策，实现精准诊断－智能策划－整合设计闭环数据贯通，从而提升建筑设计决策科学性。该技术将有助于解决针对复杂建筑策划的智能化决策工具、空间绩效与人体感知数据的获取与关联、全寿期设计数据转换与衔接机制、前策划与后评估的内在映射机制等问题。主要技术方向包括：① 基于图拓扑的不确定、模糊复杂决策技术；② 空间环境客观评价与多维泛在人体感知信息耦合技术；③ 建筑全寿期智慧化整合设计技术；④ 贯穿前策划－后评估的智慧管控与全寿期前馈推演技术。未来重点发展方向：一是从建筑向城市全尺度空间扩展，从空间构图形式转向场所、空间网络，强调系统内部要素关联；二是从数据导向到数据驱动的演进，强化数据的动态性、联系性，为实现智能化建筑空间策划提供有力的数据支撑；三是从助力低维决策向破解高维复杂难题，以智能化为主要路径，进行大型建筑工程的前策划－后评估智能技术集成示范应用。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 21，被引频次为 27，平均被引频次为 1.29。

（5）极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术

极端环境下的道路、轨道与机场工程建养技术的目标是应对极端气候、地质条件和自然灾害等极端环境挑战，采用先进的维护和养护技术，以确保道路、轨道和机场等基础设施在极端条件下拥有卓越的建设质量、高效的运营性能以及持久的使用寿命。该领域关注交通运输系统在高温多雨、严寒冻融、氯盐侵蚀等恶劣环境条件下的可靠性和稳定性，同时也注重交通运输系统在应对自然灾害如台风、地震、暴雨等情况的安全性。主要技术方向包括：① 极端环境适应性材料与结构设计，即研发新型材料和结构，以确保道路、轨道和机场设施在极端气候和地质条件下的稳定性与耐久性；② 智能化监测与维护，即利用传感器、监控系统等技术，实时监测施工阶段与运营阶段工程设施的状态，及早发现异常，确保工程高质量建造与安全稳定运行；③ 抗灾风险评估与预警，即运用数据分析和模拟技术，对极端环境中的自然灾害风险进行评估和预测，为防范应对提供科学依据；④ 紧急响应与恢复，即制定应急响应计划，建立快速恢复机制，确保在灾害发生后能够及时进行修复和恢复工作。未来发展方向包括：① 绿色可持续发展；② 数字化与智能化应用；③ 新材料与新工艺应用；④ 工程结构韧性提升。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 19，被引频次为 42，平均被引频次为 2.21。

（6）复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备

海底原位观测主要是对海底沉积物、地质环境、海底界面层等动态变化资料数据进行采集、分析及表达，可广泛应用于海洋灾害预警、海洋资源开发利用，以及海洋生态环境保护、治理和修复等。海底地质条件、海底水流、风暴潮和地震海啸等复杂极端海洋环境，除了造成海底沉积物、地质环境、海底界面层等发生剧烈变化外，还影响海底原位观测系统的安全性、观测数据的精确性和信息传输的稳定性。主要技术方向包括：① 研发适应复杂极端海底环境、用于各种观测目的的高精度、高稳定性、长寿命的自主观测仪器；② 研发适应复杂极端海底环境的安全可靠的自主移动观测平台，扩展观测的空间尺度；③ 研发广域实时信息传输与精确时间同步的信息传输系统，建设大时空尺度智能控制海底原位观测网；④ 研发高能量密度、长寿命、高安全储能系统，为体系化、协同化、智能化海底原位观测提供可靠能源动力支撑。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 47，被引频次为 234，平均被引频次为 4.98。

（7）多源固废制备负碳建筑材料技术

多源固废制备负碳建筑材料技术是指借助不同固废材料中钙、镁等碱土金属物相的碳化反应，制备具有负碳特征的建筑材料的技术。通过多源固废之间的理化协同，可实现材料的性能与制备工艺、能耗的优化。这一技术有助于建筑行业的碳减排与工业固废的资源化利用。该领域的主要技术方向包括：① 固废材料碳化反应活性的基本理论及提升方法；② 碳化反应过程、碳化产物晶型及微结构调控；③ 二氧化碳传输与固定效率的强化提升；④ 产品制备工艺与配套装备等。多源固废制备负碳建筑材料技术研发与应用的关键是如何平衡材料的性能与环境效能，未来发展方向包括：① 高性能多源固废体系的设计；② 碳化、水化等多反应机理的协同；③ 反应—传输过程的三维动态表征；④ 材料制备与工业流程的耦合；⑤ 产品性能与碳排放评价标准等。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 106，被引频次为 985，平均被引频次为 9.29。

（8）复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术

快准钻探与感知技术是指应对在深部地下探测与工程建设中所面临的极端复杂地质条件，利用先进的钻探技术装备实现快速获取地下实物资料、探明地层情况的技术，通过传动、控制、传感器信息感知和数据融合处理等技术，感知设备状态、地层环境，精准判定各项参数，可靠执行指令动作，实现探测装备智能化、钻探过程规范化、钻孔质量可控化、事故提前预判化、工艺参数控制智能化和地层参数自评化，提升钻探工程获取地下实物资料与地层信息的效率。大深度复杂地质环境面临井下温度高、地层压力大、实施周期长、规程参数大等问题，导致钻探工程实施过程中存在钻探设备动力不足、井下机具服役寿命降低、钻孔轨迹控制困难、测井仪器高温易失效等问题。复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术的主要技术方向包括：① 大深度智能化自动化钻井系统与钻具研发；② 多工艺高效高速钻进技术；③ 大深度复杂地层高效取芯技术；④ 水平定向钻探与孔内综合测试技术；⑤ 基于先进传感器的井内数据测传与智能钻进控制技术；⑥ 高温硬岩地层机具与仪器可靠性提升技术；⑦ 井下地层环境、钻探设备状态超前感知技术。未来的发展趋势是轻量化、全流程、自动化钻探技术装备升级，以及构建基于人工智能技术的井下外部环境多信息融合的超前智能感知测、传、控、钻井下闭环钻进技术。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 258，被引频次为 1 257，平均被引频次为 4.87。

（9）装配式构件与模块化结构

建筑工业化是传统建筑产业适应现代工业化生产方式的必然选择，目的是提升建造效率、节能降耗、实现建筑业高质量发展，主要特征为标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修和信息化管理等。装配式建筑是实现建筑工业化的有效途径之一，其核心是以工厂化生产的标准化预制构件为主，通过现场装配方式设计建造。因此，发展各类高效装配式建筑结构体系、装配式构件和相应建造技术对实现建筑工业化具有重要意义。主要技术方向包括：① 装配式建筑结构体系及其设计方法；② 不同集成度且适应工业化建造的装配式构件（含连接件）及其设计方法；③ 装配式构件工厂化预制技术及建筑体系装配技术；④ 装配式建筑一体化建造技术；⑤ 数字化智能建造技术。未来发展趋势上，体系开发将从传统钢混、钢、木结构建筑的高效拆分向基于高效部品的合理组合，即正向设计方向发展，同时装配式建造逻辑为建筑智能防灾、结构韧性提升等研究提供新空间；构件从传统一维构件向高集成度的二维、三维模块化单元发展，并通过标准化、系列化以适应建筑多样性要求；一体化建造将从单一建筑部品的结构－装饰、结构－功能、建筑－设备一体化等向建造全过程、全专业、全产业的深度一体化发展；同时，建筑产品思维与数字孪生技术将为建造工业化、智能化提供更为广阔的技术支撑和研究空间。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 286，被引频次为 1 694，平均被引频次为 5.92。

（10）高标准农田智能灌排技术与装备

高标准农田智能灌排技术与装备是指在现代农业生产中，综合运用物联网、传感器、遥感、边缘计算、云计算、人工智能等技术对作物生长状况、农田水分状况、灌排渠系（管道）状态及环境因素进行多源多维感知与智能分析决策，并通过智能化装备对灌排过程进行精量控制与过程跟踪，以协调农田水分状况、提升水旱灾害应对能力，满足作物生长的同时降低人力成本、提高管理效率，实现高产高效。主要技术方向包括：①农田作物的水与营养状态定量诊断与控污减排灌排决策支持技术；② 轻量化灌排系统多层级高性能测控终端装备研发；③ 具有自主学习能力与强时效性的农田灌排数字孪生系统；④ 基于高标准农田地力提升的灌排全局时空智能优化技术与协同调控模式。该前沿的发展趋势包括：① 突破传感器技术的局限，引入多样化感知手段，实现多源多模态数据的融合分析，为高标准农田系统提供更精确、全面的信息支持；② 通过数据－模型－知识的融合与交互增强提升农田决策科学性与可操作性；③ 加强灌排装备和系统的自主决策能力，增加设备的云边端计算能力和协同互联能力，通过数据共享和协作，提升整体精准度和效率；④ 自主创新高标准农田灌排过程中新方法、新技术、新装备和新模式，实现在高标准农田中灌排无人化、智能化、轻量化和全链条化。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 185，被引频次为 1 679，平均被引频次为 9.08。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　排水管道漏损智能探测与修复技术

排水管道中雨水管道的渗漏，影响排水功能，污水管道的漏损，造成污水处理效率低下。排水管道漏损已经成为制约雨水实现安全排放、污水实现全收集全处理的主要瓶颈之一，引发土壤－地下水污染、污水冒溢等环境问题和道路塌陷等安全隐患。排水管道漏损智能探测与修复主要是指探测诊断评估雨水管渠、污水管道的结构性缺陷水平，针对性开展低扰动、高质量和预防性修复，使排水管道安全、

有效运行。由于排水管道隐蔽性强、分布面广、数量庞大、流态多变且内部环境恶劣，传统漏损探测技术存在适用条件窄、数据不系统、预判不及时等问题；而管道修复技术则面临降水修复难、开挖条件受限、标准化水平低等问题。随着物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的发展，排水管道漏损探测将由周期性被动检测向常态化主动监测转变，提高探测的覆盖面和有效性，为排水管道预防性修复提供支撑。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”的主要研发方向包括：

1）数字底座技术。包括排水管道地理信息系统国产化技术、复杂介质条件下的流量和水质精准测量技术。

2）智能探测技术。包括融合地质雷达、混凝土厚度检测、钢筋分布检测等方式的管道外部检测技术、融合电磁和声波检测的管道隐患识别技术、大口径长距离管道结构健康监测技术。

3）智慧评估技术。包括基于数据驱动和模型驱动协同的管网服役演化分析算法、多元驱动和服役状态多源数据影响下排水管道失效预测技术、基于关键节点在线监测数据的城市排水管网系统快速自适应建模。

4）高效修复技术。一是适应长距离输送、腐蚀环境和力学条件多变的修复材料，如以高强度快干注浆材料为核心的模铸管道修复技术；二是适用于大型和特大型管道的修复技术，如通过模块法内衬来提升结构性强度的修复技术等。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿的核心专利有 22 件，平均被引频次为 1.95（表 2.1.1）。核心专利产出国家为中国（表 2.2.1），中国机构或个人所申请的专利占比达到了 100%，是该工程开发前沿的重点研究国家，平均被引频次为 1.95。

核心专利产出排名前五的机构为郑州大学、郑州安源工程技术有限公司、河海大学、南京水动力信息科技有限公司和广州市运通水务有限公司（表 2.2.2）。从排名前十的核心专利产出机构合作网络（图 2.2.1）来看，机构间的合作较为稀疏。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向主要聚焦在精准量化探测技术、高强度高适应修复技术以及基于移动互联网技术的检测和修复质量过程控制技术。精准量化探测技术主要包括全景 / 激光量化探测技术，基于温度和压力的光纤渗漏探测技术，基于机械弹性波的管道剩余强度探测技术，基于超声波测厚法、红外摄像检测法、漏磁法、瞬态电磁法等的管道剩余壁厚探测技术，以及基于测径器法、激光仪法、多传感器探测法等的管道变形探测技术。高强度高适应修复技术主要聚焦新材料、新技术、新工艺和新设备的突破，拓宽修复的适用场景和修复质量，满足对排水管道腐蚀环境、狭长空间带水条件等情况的修复需求。基于移动互联网技术的检测和修复质量过程控制技术将以移动互联网技术应用为核心，提高检测和修复施工管理的效率，保障施工过程的质量以及数据的真实性（图 2.2.2）。

表 2.2.1 “排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	22	100.00	43	100.00	1.95

表 2.2.2　“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	郑州大学	3	13.64	8	18.60	2.67
2	郑州安源工程技术有限公司	2	9.09	8	18.60	4.00
3	河海大学	1	4.55	9	20.93	9.00
4	南京水动力信息科技有限公司	1	4.55	9	20.93	9.00
5	广州市运通水务有限公司	1	4.55	5	11.63	5.00
6	深圳前海运通水务有限公司	1	4.55	5	11.63	5.00
7	河南爱比特科技有限公司	1	4.55	4	9.30	4.00
8	广州立信电子科技有限公司	1	4.55	3	6.98	3.00
9	华中科技大学	1	4.55	1	2.33	1.00
10	清远市清源施工安全检测有限公司	1	4.55	1	2.33	1.00

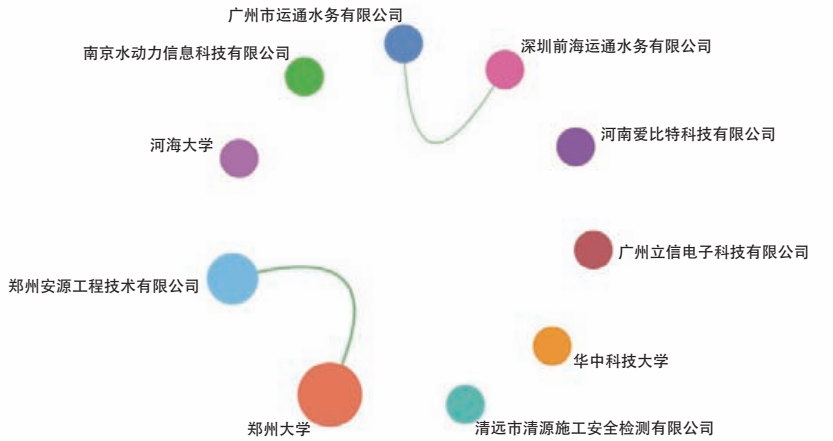

图 2.2.1　“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

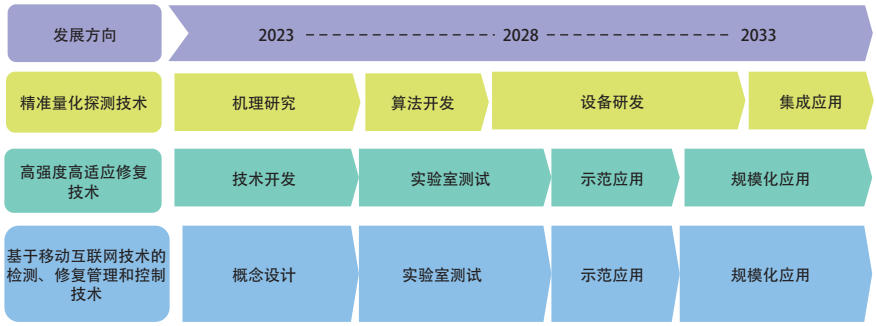

图 2.2.2　“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 毫米级全球和区域坐标框架建立技术

坐标框架是描述地球形状及变化、表达地球空间信息的基础。它不仅能够为深空探测、城市建设、救灾减灾等提供基础数据，而且可以为开展全球变化探测与科学研究，如地球动力学反演，地震、气候及水文监测等，提供统一的高精度空间基准，是拓展人类活动、促进社会发展的关键地球空间信息基础设施。

现有国际地球参考框架难以满足大范围或全球尺度毫米级地球系统动态变化监测的需求，研究建立毫米级坐标框架已成为 21 世纪国际大地测量学界的学科目标和重要挑战。当前发展的主要方向包括：

1）精密空间大地测量数据处理技术，通过精细化数学模型确定最优的甚长基线干涉测量（VLBI）/ 卫星激光测距（SLR）/ 全球卫星导航系统（GNSS）/ 星基多普勒轨道和无线电定位组合系统（DORIS）数据处理策略，对全球基准站数据进行整网一致性重处理以消除或减弱技术类系统误差的影响，为毫米级坐标框架的建立提供更准确的输入数据。

2）基准站非线性运动建模，针对地球物理效应造成的基准站非线性位移，融合环境负载、热膨胀及其他模型建立毫米级基准站地球物理运动模型，为实现毫米级坐标框架建立提供支持。

3）空间大地测量技术组合，综合利用 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 等空间大地测量技术建立全球坐标框架。

4）地心运动建模，联合多种空间大地测量技术及地球物理模型反演地心运动，解决坐标框架原点定义与实现间的不一致问题，为地球动力学研究提供更高精度的地心参考框架。

在该领域研究较为深入的机构有武汉大学、中国测绘科学研究院和中国科学院测量与地球物理研究所等。

“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿的核心专利有 55 件，平均被引频次为 1.73（表 2.1.1）。核心专利公开量排名前三的国家为中国、俄罗斯和韩国（表 2.2.3），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 83.64%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 1.85。

核心专利公开量排名前五的机构为西安应用光学研究所、中国人民解放军某部队、西北工业大学、千寻位置网络有限公司和中国电子科技集团公司（表 2.2.4）。

“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为精密空间大地测量数据处理技术、基准站非线性运动建模、空间大地测量技术组合和地心运动建模（图 2.2.3）。

表 2.2.3 “毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	46	83.64	85	89.47	1.85
2	俄罗斯	6	10.91	4	4.21	0.67
3	韩国	1	1.82	4	4.21	4.00
4	法国	1	1.82	2	2.11	2.00
5	波兰	1	1.82	0	0.00	0.00

表 2.2.4　“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	西安应用光学研究所	4	7.27	16	16.84	4.00
2	中国人民解放军某部队	3	5.45	1	1.05	0.33
3	西北工业大学	2	3.64	6	6.32	3.00
4	千寻位置网络有限公司	2	3.64	5	5.26	2.50
5	中国电子科技集团公司	2	3.64	4	4.21	2.00
6	北京环境特性研究所	2	3.64	0	0.00	0.00
7	国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心	1	1.82	12	12.63	12.00
8	武汉大学	1	1.82	5	5.26	5.00
9	北京航空航天大学	1	1.82	4	4.21	4.00
10	中国科学院电子学研究所	1	1.82	4	4.21	4.00

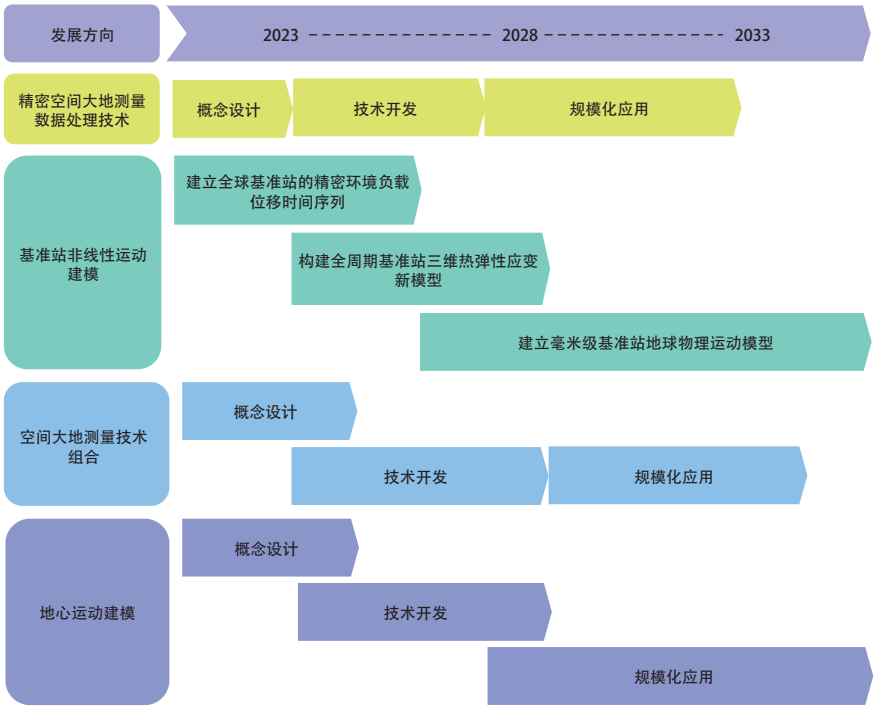

图 2.2.3　“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.3　城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系

城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系的核心在于通过数字技术赋能，实现保护与利用的协调统一，将静态被动的保护方式转变为动态积极的保护方式，充分发挥出历史文化资源对城市空间和社会

发展的重要价值。主要研发方向包括：

1）城市历史文化资源的数据库构建技术。创建历史文化资源的数字化档案是实现整体性资源保护的基础性工作。既可为文化遗产的修复和保护提供支持，也是遗产价值传播利用的载体和统筹协调多种资源管理的需要。然而，历史文化资源类型多样，既有物质性遗产，也有非物质性遗产，前者还包括可移动文物、不可移动文物和历史名城等，并在空间尺度上存在明显差异。城市历史文化资源的多源异构数据融合和多尺度数据贯通等技术研发十分关键。

2）城市历史文化资源的智能化保护技术。城市历史文化资源安全受自然风险（气候变化、自然灾害等）和人类活动（资源利用、开发建设等）的双重影响，数字技术为构建针对各类风险的“感知监测－动态评估－风险预警－措施响应”联动式、伴随式、智能化的主动保护机制提供了技术可行性。

3）数字赋能的城市历史文化资源利用技术。城市历史文化资源的数字化不仅是为了保存各类资源的历史信息，同时也是资源利用和价值传播的重要手段。欧洲多国已开展数字博物馆建设，通过虚拟现实等技术开发加强互动体验，针对智能手机等终端进行应用开发，并将城市历史文化资源嫁接到电子游戏等新兴数字产业。

4）城市历史文化资源保护与利用的技术集成：通过一体化技术集成，打通“数据库构建－风险评估响应－资源利用与价值传播”三大环节，实现数字技术赋能下的保护与利用相互促进。此外，城市历史文化资源保护与利用不应当是独立的技术体系，需要整合纳入国土空间资源保护与利用的技术体系，加强与其他城市资源管理的横向协调，以及国土空间各空间层级的纵向贯通，最终实现国土空间全域全要素全周期的统筹。

“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿的核心专利有 19 件，平均被引频次为 6.42（表 2.1.1）。核心专利的主要产出国家为中国、罗马尼亚和韩国（表 2.2.5），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 78.95%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 7.60。

核心专利产出排名前五的机构为中南大学、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国地质大学（武汉）、鼎宸建设管理有限公司和韩国科学技术院（表 2.2.6）。

“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为多源数据融合、风险监测感知、评估推演预警、空间规划响应、价值传播利用和规划技术集成（图 2.2.4）。

表 2.2.5　“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	15	78.95	114	93.44	7.60
2	罗马尼亚	3	15.79	0	0.00	0.00
3	韩国	1	5.26	8	6.56	8.00

表 2.2.6　“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中南大学	1	5.26	40	32.79	40.00
2	中国科学院遥感与数字地球研究所	1	5.26	35	28.69	35.00
3	中国地质大学（武汉）	1	5.26	11	9.02	11.00
4	鼎宸建设管理有限公司	1	5.26	11	9.02	11.00
5	韩国科学技术院	1	5.26	8	6.56	8.00
6	成都理工大学	1	5.26	6	4.92	6.00
7	中国科学院城市环境研究所	1	5.26	4	3.28	4.00
8	沈阳工业大学	1	5.26	3	2.46	3.00
9	苏州规划设计研究院股份有限公司	1	5.26	2	1.64	2.00
10	西安中科西光航天科技有限公司	1	5.26	2	1.64	2.00

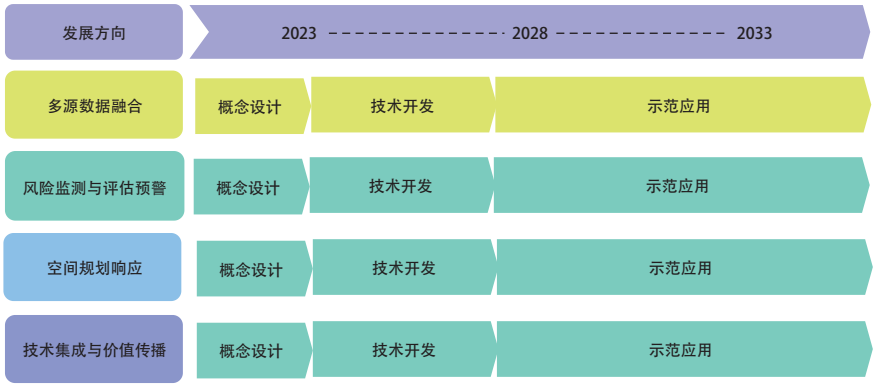

图 2.2.4　“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：崔俊芝　聂建国　朱合华　顾祥林

专家组：

院士：

崔俊芝　欧进萍　王　浩　杨永斌　张建云　刘加平[1]　缪昌文　李建成　杜彦良　郭仁忠　胡春宏
钮新强　彭永臻　郑健龙　王复明　孔宪京　陈湘生　张建民　吴志强　岳清瑞　李华军　吕西林
陈　军　马　军　冯夏庭　朱合华　杜修力　王明洋　刘加平[2]　郝　洪　邢　锋　童小华

1　西安建筑科技大学。
2　东南大学。

专家：

蔡春声　蔡　奕　蔡永立　陈　峻　陈　鹏　陈　庆　陈求稳　陈　欣　陈永贵　成玉宁　樊健生
范凌云　范　悦　冯殿垒　高　博　高　军　高　亮　葛耀君　顾冲时　郭劲松　郭容寰　韩　杰
贺鹏飞　贺瑞敏　黄介生　黄廷林　黄　勇　贾良玖　姜　超　蒋金洋　蒋正武　金君良　冷　红
李　晨　李向锋　李益农　李　早　李峥嵘　李　质　林波荣　凌建明　刘　超　刘翠善　刘　芳
刘合林　刘　京　刘仁义　刘曙光　刘彦伶　鲁安东　钮心毅　彭晋卿　任伟新　邵益生　时蓓玲
史才军　石铁矛　舒章康　苏　平　孙　剑　孙立军　孙　智　谈广鸣　谭刚毅　田　波　田　莉
汪　芳　汪　涵　汪洁琼　汪双杰　王爱杰　王本劲　王国庆　王　晖　王建华　王　兰　王　伟
王亚宜　王元战　王志伟　吴永发　伍法权　夏圣骥　肖飞鹏　谢　辉　徐　斌　徐　峰　徐俊增
严金秀　严　宇　杨　斌　杨大文　杨俊宴　杨　柳　杨仲轩　姚俊兰　姚仰平　叶　蔚　叶　宇
余钟波　禹海涛　袁　烽　袁艳平　岳中琦　曾　鹏　张　辰　张　锋　张云升　赵渺希　甄　峰
郑百林　郑　刚　郑　曦　周　翔　周正正　庄晓莹　卓　健

执笔组：

马　军　庄惟敏　童小华　陈　鹏　陈　欣　程光华　崔冬瑾　范　悦　丰成友　高　亮　黄　雨
贾良玖　李　晨　李元齐　刘　超　刘　芳　刘合林　刘彦伶　鲁春辉　倪化勇　潘　玥　屈　张
宋殿兰　苏晶文　孙澄宇　汪　涵　王本劲　王达磊　汪发武　王　睿　王　信　王元战　吴继修
吴金生　伍　江　肖飞鹏　肖　扬　徐俊增　姚俊兰　曾　鹏　张　辰　张　庆　赵云妹　郑　方
卓　健

六、环境与轻纺工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）组所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。其中，“非二氧化碳温室气体减排与资源化”“饮用水水源微污染防治与安全利用技术”“精准营养与健康工程”为专家推荐前沿，其他均为数据挖掘前沿。各前沿 2017—2022 年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）土壤中新污染物的环境风险

新污染物是指具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征的有毒、有害化学物质，对生态环境和人体健康存在较大风险，但尚未纳入环境管理，或现有管理措施不足。目前，国内外广泛关注的新污染物主要包括国际公约管控的持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素、微塑料等。

土壤中新污染物的来源广泛、种类众多，且土壤基质复杂，因此，研究开发高灵敏度、多靶标的高通量筛查技术，并尽快建立标准方法，对于快速、高效测定新污染物，保证研究结果的准确性，完成环境风险评估具有重要意义。

许多研究都是评估单个新污染物，而没有考虑到联合或协同效应的可能性。然而，多种污染物在土壤中总是共存的，并且影响污染物混合物毒性的因素很多，这使得混合污染物的风险评估成为一项复杂的任务。因此，混合物毒理学在未来的研究中应该得到更多的关注。此外，土壤中的微塑料还会对其他新污染物的吸附、降解和迁移行为产生影响，该方向也是近年来的研究热点。

表 1.1.1　环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	土壤中新污染物的环境风险	86	4 632	53.86	2021.1
2	非二氧化碳温室气体减排与资源化	255	4 976	19.51	2020.3
3	饮用水水源微污染防治与安全利用技术	85	10 560	124.24	2018.6
4	水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究	33	1 502	45.52	2019.9
5	基于神经网络的集合预报方法	50	5 016	100.32	2020.4
6	城市化对小时极端降水的影响研究	47	743	15.81	2020.4
7	全球海 – 气二氧化碳通量估算及其调控机制研究	48	2 293	47.77	2018.3
8	精准营养与健康工程	246	25 780	104.80	2018.7
9	低碳环保型生物质纺织材料研发	101	7 362	72.89	2019.2
10	大宗生物质全组分利用研究	50	697	13.94	2021.4

表 1.1.2　环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	土壤中新污染物的环境风险	0	1	1	11	51	22
2	非二氧化碳温室气体减排与资源化	23	24	23	51	54	80
3	饮用水水源微污染防治与安全利用技术	22	18	24	14	5	1
4	水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究	1	8	3	8	7	6
5	基于神经网络的集合预报方法	0	0	0	32	14	4
6	城市化对小时极端降水的影响研究	3	3	4	15	8	14
7	全球海 – 气二氧化碳通量估算及其调控机制研究	19	9	11	6	3	0
8	精准营养与健康工程	57	56	62	46	21	4
9	低碳环保型生物质纺织材料研发	13	21	21	27	15	4
10	大宗生物质全组分利用研究	0	0	0	8	14	28

（2）非二氧化碳温室气体减排与资源化

温室气体是指大气中能吸收地面反射的长波辐射并重新发射辐射，从而导致地球表面温度升高的气体，主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、一氧化氮、二氧化硫、一氧化碳、氟利昂、氢氟氯碳化物等。温室气体减排与资源化主要指采取措施减少温室气体排放，并将废弃物或副产品转化为可再利用的资源，在减少环境污染的同时进一步降低资源消耗。目前，温室气体再利用方案多集中在二氧化碳方面，如利用捕集二氧化碳来驱油、合成燃料生产等。

非二氧化碳温室气体在大气中的浓度虽远低于二氧化碳，但其全球增温潜能值（global warming potential, GWP）却远高于二氧化碳。目前已在非二氧化碳温室气体资源化利用方面进行了一些探索：甲烷可在捕集后转化为合成气，用于生产合成燃料和化学品，如合成天然气、合成油、合成塑料等，将废气转化为更高附加值的产品；通过吸收、吸附、催化还原等方式从工业过程或废水处理中捕集氧化亚氮，并催化转化为硝酸盐，用作农业肥料或用于生产苯乙烯等；通过催化全氟碳化物产生分解产物——氟化氢，用作化工基础产品等。非二氧化碳温室气体的减排与资源化利用对推动减污降碳、大气复合污染治理具有重要意义，也是未来环境科学与工程研究的前沿热点之一。

（3）饮用水水源微污染防治与安全利用技术

以微量有机污染物为主要特征的饮用水水源微污染是全球普遍关注的环境问题。近年来，新污染物概念的提出和新污染物治理行动对水源微污染防治提出了更高的要求，亟须发展饮用水水源微污染防治与安全利用技术。按处理技术类型划分，该研究前沿主要包括：① 面向有机微污染物处理的高级氧化技术，如臭氧氧化、类芬顿氧化、电催化氧化等；② 面向微污染水源水处理的膜技术，如反渗透、正渗透、纳滤等；③ 面向微污染物的吸附材料研究，主要集中在活性炭等碳基材料的研究；④ 微污染水源的生化处理技术，如曝气生物滤池等。在众多微污染物中，全氟和多氟烷基物质、药品和个人护理品、消毒副产物、藻毒素的治理技术引起了更多的关注。鉴于微污染水源中目标污染物的浓度通常远低于共存基质，未来应进一步探索和开发针对目标微污染物的选择性高级氧化技术。该研究前沿目前主要集中在微污染物治理技术，而饮用水水源水质风险控制的相关研究仍较少，因此，基于水质风险防控的安全利用技术是该前沿未来的重要发展方向。

（4）水产养殖温室气体产排机理与减污降碳途径研究

我国海洋渔业经济增长稳定，海洋渔业碳排放量不断增加。要将低碳绿色发展理念融入海洋渔业发展

的全过程，就必须了解海洋渔业碳排放的现状和发展趋势。

近年的前沿研究采用系统动力学方法、解耦指数模型等方法，建立了海洋渔业碳排放动态模型，研究了我国海洋捕捞渔业碳排放与经济产出的关系、碳排放的关键影响因素。

研究发现，经济的快速发展对海洋渔业碳排放的增加有显著影响，渔业碳排放量和碳汇均呈增加趋势，净碳排放量呈下降趋势；不同省份碳排放量、碳汇和净碳排放量存在差异，而能源和产业结构的调整有助于控制海洋渔业的碳排放。近年来，沿海地区的脱钩状态均有所改善，研究建议加大碳税政策的实施力度，建立农户补偿机制，推动碳排放交易和国际蓝碳交易。

（5）基于神经网络的集合预报方法

随着科学技术的不断发展，气象预报技术也在不断地提高和完善。自 20 世纪 90 年代以来，作为减小预报不确定性、提高预报技巧的重要手段，集合预报已经成为国际上数值天气预报与数值气候预测的主流方法。集合预报的核心运行逻辑是，通过一定的数学方法，获得在一定初值误差范围内具有某种概率密度函数分布特征的数值预报初值集合，然后用数值模式对每个初值进行积分，从而得到一组预报结果的集合，再由这一组预报集合估计未来天气状态的概率密度分布信息，如集合平均、概率、离散度、极端值等。近年来，人工智能在气象领域的应用越来越受关注，而神经网络属于人工智能重要的一支。神经网络的主要特点是可以将输入的数据通过任意程度的非线性映射到输出数据，其具有很强的学习能力和拟合高度非线性函数的能力。通过逐层的特征变换，将样本在原空间的特征表示变换到一个新的特征空间，从而提升分类或预测的准确性。因而，基于神经网络的集合预报方法能够充分发挥各种数值预报模式的优点，在气象业务工作中具有很好的推广应用前景。

（6）城市化对小时极端降水的影响研究

极端降水的发生往往容易引发积水、洪涝等现象，甚至造成山体滑坡、泥石流等地质灾害，威胁人民生命、财产安全。与长持续时间的极端降水不同，小时极端降水能在短时间内产生大量的降水，对人民生活和经济建设产生更具威胁性的影响。随着全球城市化的发展，极端降水变化与城市化的关系研究受到越来越多的关注。在城市地区，影响小时尺度极端降水变化的因子非常复杂，各因子之间甚至有相互抵消的作用。城市热岛效应、气溶胶排放、城市下垫面摩擦作用以及建筑物的阻挡作用等都会影响降水在城市所在当地原本的分布形态，并且与对温度的影响不同，其影响的大值中心可能并不集中在城市中心，而是根据不同的地理特征和气象环流背景而变。因而，进一步加深小时极端降水与城市化的关系研究，有利于更好的城市工程设计和基础设施规划。另外，由于形成小时极端降水的对流系统具有空间尺度小、发展迅速、预报难度大的特点，深入理解并正确预报这类系统不仅是提升精细化气象服务水平的关键，还有助于提升气象防灾减灾能力。

（7）全球海 – 气二氧化碳通量估算及其调控机制研究

海洋是地球系统中最大的碳库，通过吸收和释放二氧化碳来调节大气中的碳含量。海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，在全球气候变暖的背景下，准确估算海 – 气二氧化碳通量是全球碳循环研究的重要内容，也是全球定量评估海洋碳收支及其源汇格局时空变化的重要环节，进一步厘清其调控机制对了解、预测和评估全球碳循环、气候变化及海洋生态系统的健康状况具有重要意义，也为保护海洋和应对气候变化提供科学依据。

目前，研究海 – 气二氧化碳通量的手段包括：在海洋中设置浮标，测量海水中的二氧化碳浓度；利用

卫星遥感技术监测海洋表面的二氧化碳分压、估算海－气二氧化碳通量；通过海洋科考船和潜水器进行现场采样与观测；采用放射性同位素示踪法进行实验室研究等。然而，因目前数据较少、时空分布极不均匀，通量估算的不确定性较大。未来需进一步开展长期、连续、广覆盖度的二氧化碳浓度监测研究，加强开发更准确的海－气二氧化碳通量估算手段，深入探究调控海－气二氧化碳通量的因素，最终实现全球海－气二氧化碳通量的精准评估及其调控机制的全面探析，这对未来预测海洋吸收人类排放二氧化碳的能力具有重要的现实意义。

（8）精准营养与健康工程

将基础营养科学日益增长的发现转化为有意义的与临床相关的饮食建议，是当今营养与健康研究面临的主要挑战之一。最新的标准化饮食分析结果表明，即便食用同样的食品，不同人的反应依然存在巨大差异。这表明，开展营养干预时需要考虑包括饮食习惯、食物行为、体力活动 / 锻炼等方面的因素。精准营养旨在通过遗传学、表观遗传组、微生物组、代谢物组、环境暴露组等多组学手段明确个体的代谢异质性因素，基于分子生物学、分子营养学等手段开展营养代谢相关的生物标志物筛查、疾病与健康的生理生化进程研究，明确不同健康问题的精准靶点、不同人群的精准需求等，将人们分成不同的群体，利用这种分层更好地估计不同群体的饮食需求，从而实现更好的饮食建议和干预，达到逆转慢性疾病与维持健康稳态的目标。

（9）低碳环保型生物质纺织材料研发

生物质材料是源自植物、动物、微生物等生命体的有机高分子物质，其组成主要包括碳、氢、氧三种元素。这类材料在未经过修饰的情况下容易被自然界中的微生物分解为水、二氧化碳及其他小分子产物，从而再次进入自然界的循环。这种特性使得生物质材料具备显著的可再生和可生物降解优势。常见的生物质材料有木质素及其衍生物、改性淀粉、甲壳素及其衍生物、茶皂素核脂肽类物质等，其在纺织浆料、印染助剂、纺织品功能整理、纺织印染废水处理等领域具有广阔的应用前景。

随着消费需求的不断增长，纺织材料尤其是智能型纺织产品的实用性正日益受到重视。传统纺织材料在生产过程中消耗了大量的自然资源，造成过量的碳排放。鉴于化学纤维、羊毛等传统纺织原材料日益短缺，生物质材料因其丰富的原材料、较低的成本，以及良好的物化稳定性、机械性能和环境友好性而备受关注。开发低碳环保型生物质纺织材料是解决纺织行业资源不足、实现持续发展的重要手段，因此这类材料的研究意义重大。

生物质材料来源广泛、结构复杂，这在一定程度上阻碍了生物质材料的开发应用。如何用更为低碳、环保的方法高效提纯，如何通过化学或物理的改性使其更符合人们的需求，如何开发其在纺织领域更广泛的用途，均是当下研究的热点。

（10）大宗生物质全组分利用研究

工业生产的整个生命周期通常都伴随着碳排放问题，其中钢铁、水泥及石油基高分子材料等工业原料的大量生产和使用在碳排放总量中占有相当比例。因此，工业原料替代成为资源碳中和领域的关键技术。根据国际能源机构（IEA）的定义，生物质是指利用光合作用固碳形成的各种有机体，是典型的可再生碳中性资源。因此，将生物质作为重碳工业原料的全部或部分替代物，对实现碳中和目标具有重要的战略意义。生物质组分较为复杂，各组分的物理结构和化学性质差异较大，因此传统的生物质利用技术策略通常需要将生物质的各组分分离，再进行分级分质利用。然而，生物质各组分的高效分离较为困难，分离过程中需要严苛的实验条件并消耗大量化学品，这会进一步导致碳排放问题的产生。此外，分离后无法利用的生物

质原料组分也会造成资源浪费和环境污染问题。因此，在工业生产中实现大宗生物质全组分的高效利用有望进一步解决碳排放问题。未来，需重点研究开发对各类大宗生物质具有普适性的预处理技术和加工成型技术，在满足实际生产使用需求的同时，实现资源碳中和目标。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　土壤中新污染物的环境风险

新污染物是在生产、生活等人类活动中产生的有毒、有害化学物质，主要包括内分泌干扰物（ED）、药品与个人护理用品（PPCP）、全氟化合物（PFC）、溴代阻燃剂（BRP）、饮用水消毒副产物、纳米材料、微塑料等。新污染物具有持久、危害大、分布广等特性。其在土壤中的浓度一般较低，但对生态系统的危害和对人体健康的影响较大。

土壤是陆地生态系统中新污染物的巨大的“汇”，例如每年释放到土壤中的微塑料比释放到海洋中的微塑料多 4~23 倍，仅在欧洲和北美微塑料每年就在土壤中积累 7×10^5 t，远远超过全球海洋中微塑料的总量（9.3×10^4~2.3×10^5 t）。进入土壤后，一部分新污染物留在土壤中或在植物和土壤动物中积累，另一部分则通过水平、垂直迁移进入地表水和地下水，最终可能暴露到人类。因此，土壤又是生态系统中新污染物的“源”。

新污染物通过改变土壤理化性质、降低土壤肥力、干扰土壤微生物群落的功能和结构多样性等方式影响土壤养分的循环。此外，新污染物对土壤动物、植物和微生物的某些毒性影响（例如导致氧化应激、DNA 损伤、代谢功能降低等问题）将通过食物链进一步威胁人类生命和健康。研究报告称，微塑料进入人体后会导致氧化应激和炎症反应，以及它们在人体内的持续存在可能导致慢性炎症并增加肿瘤发生的风险。

微塑料和抗生素是土壤新污染物环境风险的研究热点，新污染物进入土壤后的动态与归趋和土壤环境中新污染物的生物有效性是目前关注的主要问题。

由表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文主要产出国家为中国、伊朗、土耳其、秘鲁、印度等。其中：中国的核心论文数居于首位，占比为 33.72%；伊朗次之，占比为 27.91%。两国的核心论文数总和占比接近全球论文数的 60%。由表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构是湖南大学、古昌理工大学、阿卡德尼兹大学、圣伊格纳西奥洛约拉大学、湖南中医药大学、希拉兹医科大学和布什尔医科大学。这些机构的核心论文数均超过了 8 篇。

由图 1.2.1 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有中国、伊朗、土耳其、印度、马来西亚、美国和埃及。中国的核心论文数最多，主要是与伊朗和土耳其进行合作发表。由图 1.2.2 可知，古昌理工大学、阿卡德尼兹大学、希拉兹医药大学、电子科技大学、安卡拉大学等机构有合作关系。

在表 1.2.3 中：施引核心论文产出最多的国家是中国，占比高达 39.39%；印度次之，占比为 11.31%；伊朗位列第三，占比为 10.78%。在表 1.2.4 中，施引核心论文产出最多的机构是中国科学院，占比为 18.20%，古昌理工大学的施引核心论文比例也达到了 14.82%。

通过以上数据分析结果可知，中国在土壤中新污染物的环境风险方面的核心论文产出及施引数量均处于世界前列，我国研究机构的施引核心论文数量相对较多。图 1.2.3 为“土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.1 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	29	33.72	2 276	78.48	2020.8
2	伊朗	24	27.91	1 192	49.67	2021.5
3	土耳其	17	19.77	994	58.47	2021.5
4	秘鲁	13	15.12	376	28.92	2021.5
5	印度	12	13.95	436	36.33	2021.3
6	马来西亚	11	12.79	603	54.82	2020.8
7	美国	8	9.30	446	55.75	2020.9
8	埃及	8	9.30	327	40.88	2021.0
9	德国	8	9.30	211	26.38	2021.2
10	沙特阿拉伯	7	8.14	136	19.43	2021.4

表 1.2.2 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	湖南大学	15	17.44	923	61.53	2020.7
2	古昌理工大学	12	13.95	906	75.50	2021.7
3	阿卡德尼兹大学	10	11.63	870	87.00	2021.5
4	圣伊格纳西奥洛约拉大学	9	10.47	311	34.56	2021.3
5	湖南中医药大学	8	9.30	503	62.88	2020.6
6	希拉兹医科大学	8	9.30	479	59.88	2021.5
7	布什尔医科大学	8	9.30	205	25.62	2021.2
8	电子科技大学	7	8.14	746	106.57	2021.7
9	马来西亚理工大学	7	8.14	317	45.29	2020.9
10	安卡拉大学	7	8.14	230	32.86	2021.3

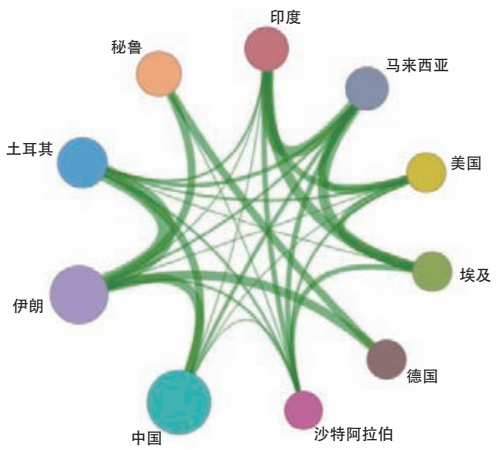

图 1.2.1 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿主要国家间的合作网络

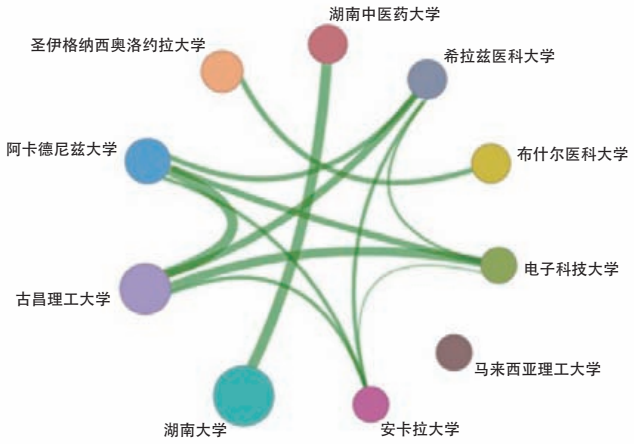

图 1.2.2　“土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 125	39.39	2021.6
2	印度	323	11.31	2021.7
3	伊朗	308	10.78	2021.8
4	美国	226	7.91	2021.5
5	韩国	169	5.92	2021.7
6	土耳其	142	4.97	2021.8
7	沙特阿拉伯	135	4.73	2021.6
8	加拿大	116	4.06	2021.5
9	英国	110	3.85	2021.4
10	马来西亚	103	3.61	2021.5

表 1.2.4　“土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	97	18.20	2021.5
2	古昌理工大学	79	14.82	2021.9
3	湖南大学	51	9.57	2021.2
4	伊斯兰阿扎德大学	50	9.38	2021.8
5	沙特国王大学	50	9.38	2021.8
6	约翰内斯堡大学	41	7.69	2021.8
7	电子科技大学	40	7.50	2021.7
8	大不里士大学	36	6.75	2021.9
9	深圳大学	31	5.82	2020.7
10	阿卡德尼兹大学	30	5.63	2021.8

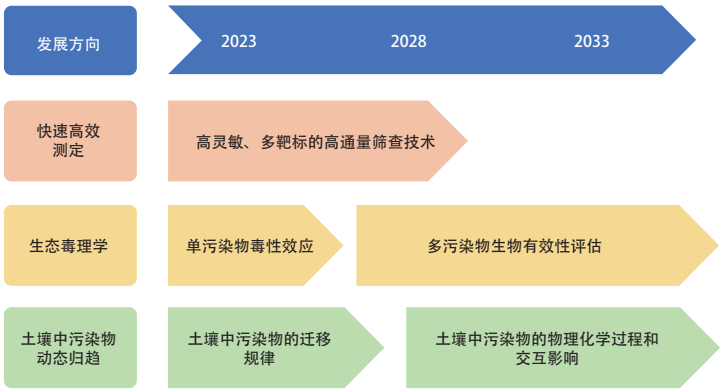

图 1.2.3 “土壤中新污染物的环境风险”工程研究前沿的发展路线

1.2.2 基于神经网络的集合预报方法

集合预报是减小预报不确定性、提高预报技巧的重要手段。自 20 世纪 90 年代以来，集合预报已经成为国际上数值天气预报与数值气候预测的主流方法。集合预报的概念是对某一特定目标产生一组预报结果，其核心在于不改变现有预报模式，借由多个彼此差异不大的初始集合进行重复的预报，以增加预测结果的可靠度，其最终目的是定量预测未来时刻变量状态的概率分布。神经网络具有较强的非线性问题处理能力，其主要是利用大数据来学习特征，能够刻画数据丰富的内在信息。但目前基于神经网络的集合预报方法往往针对某一特定的气象数据进行预测，具有局限性，无法利用多种类天气数据之间的相关性进行预测，预测效率较低。

表 1.2.5 为“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家。可以发现，无论是核心论文数还是被引频次，中国均排名第一，其他国家与中国有不小的差距，说明中国在这方面具有较强的研究优势。美国在核心论文数上排名第二，伊朗排名第三。从篇均被引频次来看，中国的排名靠后，澳大利亚核心论文数虽然较少，但是篇均被引频次排名第一，这也从侧面说明发表同行公认的高水平核心论文的重要性。由图 1.2.4 可知，中国与美国合作较为密切，但与其他国家的合作还有待加强。表 1.2.6 为该前沿中核心论文的主要产出机构。核心论文数排名第一的机构在越南，为维新大学。由图 1.2.5 可知，各国国内的部分机构间有合作关系，但这十个机构之间的合作较少。

在施引核心论文的国家排名中，中国排名第一，美国排名第二，印度排名第三（表 1.2.7）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第一，其次是华北电力大学和华中科技大学（表 1.2.8）。由此可以看出，中国在“基于神经网络的集合预报方法”方面具有一定的领先优势，中国科学院在该领域的研究机构中也处于领先地位，应继续保持该前沿的相关研究状态，同时加强与其他国家的合作。

图 1.2.6 为“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿的发展路线。可以看出，该研究前沿未来 5~10 年的重点发展阶段有两个：第一个阶段目标是在获取足够多的训练数据的基础上，针对不同气象数据设定不同的模型参数，并进行多轮迭代以获得更好的预测精度；第二个阶段目标是将神经网络方法应用于集合预报研究，以取得更可靠的结果。

表 1.2.5　“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	22	44.00	1 978	89.91	2020.5
2	美国	9	18.00	756	84.00	2020.4
3	伊朗	7	14.00	758	108.29	2020.3
4	意大利	5	10.00	610	122.00	2020.4
5	印度	5	10.00	557	111.40	2020.8
6	英国	5	10.00	444	88.80	2020.6
7	越南	4	8.00	512	128.00	2020.8
8	澳大利亚	3	6.00	516	172.00	2020.3
9	法国	3	6.00	436	145.33	2020.7
10	德国	3	6.00	239	79.67	2021.0

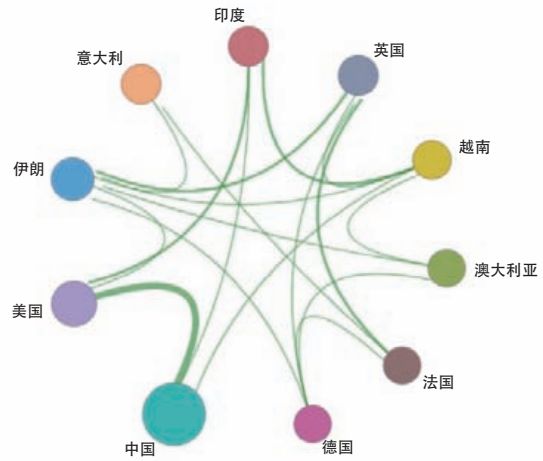

图 1.2.4　“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	维新大学	3	6.00	412	137.33	2020.3
2	孙德胜大学	2	4.00	323	161.50	2020.5
3	华中科技大学	2	4.00	288	144.00	2020.0
4	伊朗高等技术研究生院	2	4.00	228	114.00	2020.0
5	西安交通大学	2	4.00	206	103.00	2021.0
6	华北电力大学	2	4.00	156	78.00	2020.0
7	北京大学	2	4.00	153	76.50	2020.5
8	电子科技大学	2	4.00	137	68.50	2020.5
9	清华大学	2	4.00	132	66.00	2020.0
10	国际商业农业与技术大学	1	2.00	328	328.00	2020.0

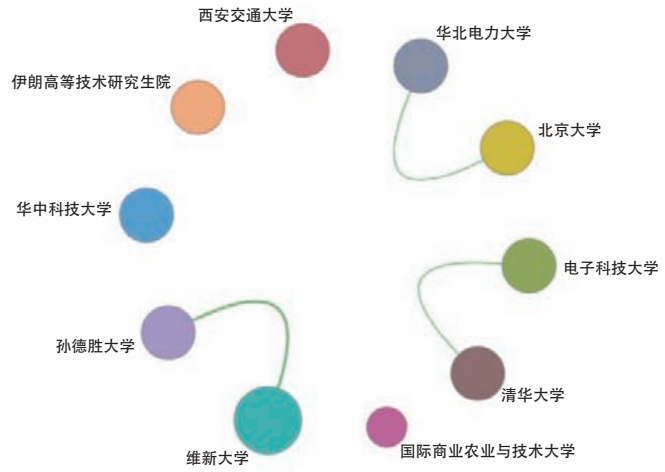

图 1.2.5 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	6 972	47.92	2021.0
2	美国	1 636	11.24	2020.9
3	印度	1 094	7.52	2021.3
4	伊朗	937	6.44	2020.9
5	英国	735	5.05	2020.9
6	澳大利亚	634	4.36	2020.9
7	韩国	632	4.34	2021.1
8	沙特阿拉伯	554	3.81	2021.4
9	加拿大	520	3.57	2021.0
10	西班牙	433	2.98	2020.8

表 1.2.8 “基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	404	17.71	2021.1
2	华北电力大学	331	14.51	2020.5
3	华中科技大学	206	9.03	2020.5
4	清华大学	202	8.86	2021.0
5	武汉大学	188	8.24	2021.1
6	河海大学	176	7.72	2021.1
7	天津大学	161	7.06	2020.8
8	维新大学	161	7.06	2020.3
9	伊斯兰阿扎德大学	152	6.66	2020.9
10	中南大学	151	6.62	2021.2

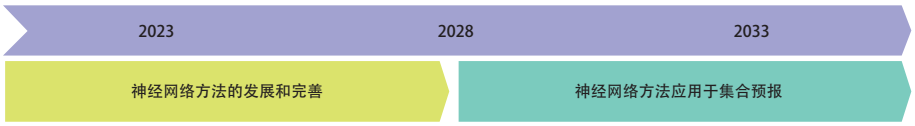

图 1.2.6　“基于神经网络的集合预报方法”工程研究前沿的发展路线

1.2.3　精准营养与健康工程

将基础营养科学日益增长的发现转化为有意义的与临床相关的饮食建议，是当今营养与健康研究面临的主要挑战之一。最新的标准化饮食分析结果表明，即便食用同样的食品，不同人的反应依然存在巨大差异。这表明，开展营养干预时需要考虑包括饮食习惯、食物行为、体力活动 / 锻炼等方面的因素。

因此，综合营养基因组学、代谢组学和微生物区系图谱等深层表型，饮食前后的血液指标（血氧、血压、血糖等水平）、粪便菌群区系、饮食行为规律等生理表型以及个人活动 / 锻炼等生活因素，借助大数据分析与机器学习的优势，通过回归、分类、推荐和聚类等计算方式，探寻不同营养因子摄入、不同代谢特征、不同个体环境之间的交互效应，形成以可穿戴设备为生活方式切入的精准营养干预手段，是精准营养智能化实施、塑造营养生活范式的前沿路径。例如，针对肥胖表型的最新研究表明，肥胖表型受到遗传变异、微生物代谢产物和表观遗传因素的调控，其中包括 FTO、MC4R、PPAR、apoA 和 fads 基因的变异，CpG 岛区的 DNA 甲基化，以及特定的微核糖核酸（miRNA）和微生物物种，如 Firmicut、Bacteriodes、Clostridies 等。同时，微生物代谢物、叶酸、B– 维生素和短链脂肪酸与 miRNA 相互作用，也会影响肥胖表型。这表明营养代谢失衡是多维度的生物学因素的综合表型。因此，融合基因组学、蛋白组学、代谢组学、微生物学等技术手段，发掘营养失衡相关疾病的深层分子指征与生物标志，并从多组学角度建立人群代谢指征异常的预测性分析与分群依据，指导精准营养对慢性病、代谢病的预防性干预，至关重要，这也是精准营养临床发展的必然方向。

精确营养旨在通过遗传学、表观遗传学、微生物组、代谢物组、环境暴露组等多组学手段明确个体的代谢异质性因素，基于分子生物学、分子营养学等手段开展营养代谢相关的生物标志物筛查、疾病与健康的生理生化进程研究，明确不同健康问题的精准靶点、不同人群的精准需求等，将人们分成不同的群体，利用这种分层更好地估计不同群体的饮食需求，从而实现更好的饮食建议和干预，达到逆转慢性疾病与维持健康稳态的目标。

“精准营养与健康工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 1.2.9。其中，中国以核心论文比例 11.79%、被引频次 2 556 排名第六，与其他国家相比还有一定的差距，说明中国在这方面的研究优势还需加强。从篇均被引频次来看，加拿大核心论文数虽然较少，但是篇均被引频次排名第一，这也从侧面说明发表同行公认的高水平核心论文的重要性。该前沿中核心论文的主要产出机构见表 1.2.10。排名前十的机构中没有来自中国的科研机构。哈佛大学以 25 篇核心论文位居第一。由图 1.2.7 可知，较为注重该研究领域国家间合作的有美国、英国、德国和新西兰。由图 1.2.8 可知，哈佛大学和布里格姆妇女医院之间的合作较多。如表 1.2.11 所示，施引核心论文产出最多的国家是美国，占比高达 23.61%；中国次之，占比为 20.54%。如表 1.2.12 所示，施引核心论文产出最多的机构是哈佛大学，占比为 21.39%；其次是中国科学院，其占比达到了 14.09%。

通过以上数据分析结果可知，中国在该前沿中施引核心论文产出方面处于世界前列，仅次于美国；但在核心论文产出方面与美国等国家还有较大差距。图 1.2.9 为“精准营养与健康工程”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “精准营养与健康工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	97	39.43	10 192	105.07	2018.7
2	意大利	42	17.07	6 707	159.69	2018.9
3	英国	40	16.26	5 676	141.90	2018.5
4	西班牙	34	13.82	3 559	104.68	2018.6
5	德国	29	11.79	5 245	180.86	2018.7
6	中国	29	11.79	2 556	88.14	2018.5
7	新西兰	26	10.57	4 290	165.00	2018.6
8	法国	23	9.35	4 097	178.13	2018.7
9	加拿大	22	8.94	4 120	187.27	2018.3
10	澳大利亚	20	8.13	3 301	165.05	2018.2

表 1.2.10 “精准营养与健康工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	哈佛大学	25	10.16	3 841	153.64	2018.8
2	塔夫茨大学	11	4.47	1 235	112.27	2018.8
3	纳瓦拉大学	10	4.07	1 436	143.60	2018.0
4	布里格姆妇女医院	10	4.07	1 091	109.10	2019.4
5	卡洛斯三世健康研究所	9	3.66	821	91.22	2018.1
6	纽卡斯尔大学	9	3.66	732	81.33	2017.4
7	牛津大学	8	3.25	1 414	176.75	2019.5
8	哥本哈根大学	8	3.25	487	60.88	2018.1
9	米兰大学	7	2.85	1 807	258.14	2019.0
10	马斯特里赫特大学	7	2.85	569	81.29	2017.4

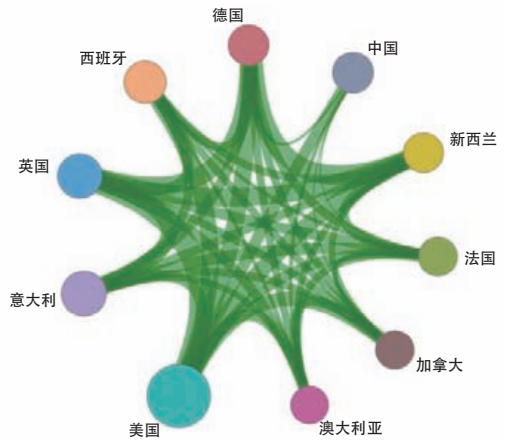

图 1.2.7 “精准营养与健康工程”工程研究前沿主要国家间的合作网络

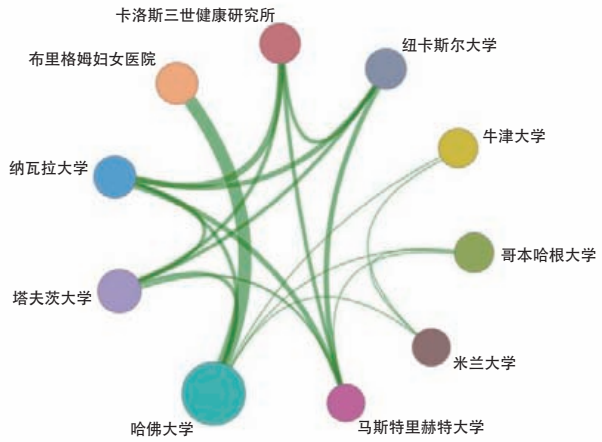

图 1.2.8　“精准营养与健康工程”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“精准营养与健康工程”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	美国	5 160	23.61	2020.9
2	中国	4 489	20.54	2021.2
3	意大利	2 209	10.11	2020.9
4	英国	1 900	8.69	2020.8
5	西班牙	1 716	7.85	2020.9
6	德国	1 484	6.79	2020.9
7	澳大利亚	1 228	5.62	2020.8
8	加拿大	1 034	4.73	2020.9
9	法国	905	4.14	2020.9
10	新西兰	898	4.11	2020.8

表 1.2.12　“精准营养与健康工程”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	哈佛大学	615	21.39	2020.9
2	中国科学院	405	14.09	2021.2
3	米兰大学	279	9.70	2021.0
4	昆士兰大学	216	7.51	2020.6
5	圣保罗大学	211	7.34	2020.8
6	哥本哈根大学	209	7.27	2020.7
7	浙江大学	201	6.99	2021.3
8	多伦多大学	187	6.50	2021.0
9	那不勒斯第二大学	187	6.50	2020.8
10	卡洛斯三世健康研究所	184	6.40	2020.6

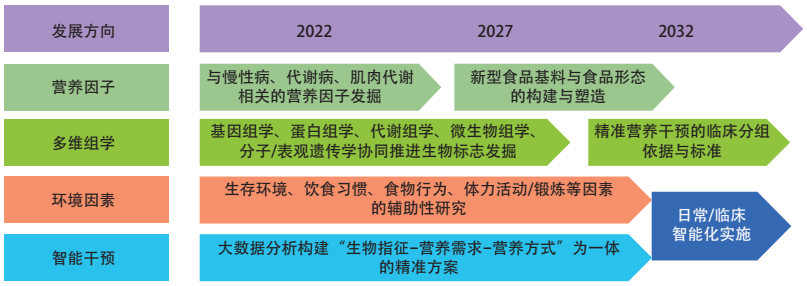

图 1.2.9 “精准营养与健康工程”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

环境与轻纺工程领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1，涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿 2017—2022 年核心专利公开量情况见表 2.1.2。

（1）低碳源污水脱氮工艺

氮污染是一个典型的全球性环境问题，长期威胁着人类健康和水生态安全。随着污水排放标准的不断严格，对污水中氮元素的排放要求不断提高。传统基于异养反硝化的硝酸盐去除工艺中，微生物利用碳源作为电子供体，将硝酸盐转化为无害的氮气。在此过程中，脱氮性能强烈依赖于水中有机碳源浓度。然而，当前城市污水厂普遍存在碳源不足的情况，对总氮去除造成不利影响，导致出水无法稳定达标。因此，低碳源污水脱氮新工艺成为研究热点。

近年来，随着对生物脱氮机理认识的不断加深，开发出硫自养反硝化、短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等新型脱氮工艺，以缩短脱氮路径为核心，达到深度脱氮目的，同时降低碳源需求及运行成本。虽然相应工艺已在全球数百座污水厂得到中试验证，但目前对于脱氮新工艺的研究仍处于起步阶段，其在工程上的实际应用还需进一步开发和探索。工艺关键影响因素及未来研究方向包括：① 相比于常规异养反硝化细菌，自养细菌生长缓慢，导致启动时间长，新型生物脱氮应重点关注菌种的生物学及生理学特征，加强对菌种驯化、培育、保存的研究探索；② 亚硝酸盐的累积是实现低碳源脱氮的关键因素，因此优化设计 pH 值、溶解氧、进水方式等参数，扩大短程硝化反应优势，是工艺改进的重点方向。

（2）河湖富营养化生态治理技术与装备

河湖富营养化是指水体中氮、磷等营养盐含量过多而引起的水质污染现象。其实质是河湖水体中营养盐的迁移转化、输入输出、归趋行为的平衡态被破坏，导致河湖水生态系统中群落组成失常、物种分布失衡、营养结构失稳，阻碍了系统中物质与能量的流动，使整个水生态系统趋于崩溃。河湖水体中氮、磷等营养物质来源较为复杂，既有内源又有外源，既有点源又有非点源，这给河湖富营养化的治理造成了巨大困难。不论营养物质来源于何处，水体富营养化的形成是受多种因素影响的，其中既有自然因素的作用，也有人为因素的作用。有效地控制外源污染是治理河湖富营养化的基础，进而通过调控水生生态系统结构，构建

表 2.1.1 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	低碳源污水脱氮工艺	941	2 933	3.12	2020.0
2	河湖富营养化生态治理技术与装备	463	802	1.73	2019.7
3	新老污染物跨介质协同防控技术	1 000	4 957	4.96	2019.7
4	化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术	942	2 947	3.13	2020.3
5	海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术	431	1 393	3.23	2019.7
6	对流分辨尺度区域地球系统模式的研发	9	7	0.78	2020.9
7	深远海大型养殖平台构建技术	72	108	1.50	2020.5
8	纤维素基抗菌纺织材料	1 000	3 941	3.94	2020.8
9	食品功能组分的生物强化	829	971	1.17	2020.6
10	木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术	68	1 817	26.72	2019.0

表 2.1.2　环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	低碳源污水脱氮工艺	96	116	151	164	175	239
2	河湖富营养化生态治理技术与装备	64	83	75	67	76	98
3	新老污染物跨介质协同防控技术	136	147	165	157	197	198
4	化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术	86	119	112	115	171	339
5	海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术	55	66	63	81	92	74
6	对流分辨尺度区域地球系统模式的研发	0	1	0	2	2	4
7	深远海大型养殖平台构建技术	3	7	4	17	22	19
8	纤维素基抗菌纺织材料	52	64	60	71	394	359
9	食品功能组分的生物强化	59	76	87	83	154	370
10	木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术	16	16	15	6	6	9

完整的生态系统营养级，恢复自然、健康和稳定的水生生态系统功能，增强对外界干扰的抵抗力，使水生生态系统处于良性循环和可持续循环。因此，生态治理技术，即通过内部调控尤其是提高水体自身的生物净化作用，是解决河湖富营养化的重要研究方向。

（3）新老污染物跨介质协同防控技术

工业、农业与都市区多污染复合叠加效应突出，大气、土壤、地表水、地下水等多介质污染相互转化传输态势显著，进一步改善生态环境质量已经不能仅通过单一介质、单一要素的污染控制。水污染控制、大气污染控制和土壤污染控制的学科分化，导致边界固化，往往是“头痛医头、脚痛医脚”，致使污染物并非从环境中去除，而是在气、液、固介质中相互传递，增加了环境质量改善的难度。跨介质污染由于缺少统一的联合治污机制，治污脱节现象比较严重。基于跨介质传输机制和过程研究的成果，利用数值模拟等方法，建立新老污染物跨介质传输模型，模拟新老污染物在大气、土壤、地表水、地下水等介质中的迁

移过程，研究固 – 水 – 气 – 土污染物跨介质调控与治理机理，构建新老污染物跨介质协同治理技术体系，建立高效、经济、安全的污染多介质组合技术优化协同整治机制，突破新老污染物跨介质协同监控技术体系，监测新老污染物在不同介质中的分布和变化，评估防控效果和环境风险，为实现新老污染物跨介质协同防控提供理论与科技支撑。

（4）化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术

中国现有工业园区 22 000 多家，其中化学工业园区 600 多家，省级以上化工园区 200 余家，包含石油化工、精细化工、农药化工等。当前，部分化工园区场地土壤与地下水污染严重，呈现多污染源叠加、多代污染累积、多介质复合污染等特点，潜在风险管控难、突发性场地土壤污染事件时有发生。此外，化工行业总能耗、碳排放量分别占全国的 12%、13%，污碳高度同源，源汇机制复杂，严重影响周边环境。因此，亟须开发化工园区场地土壤减污降碳协同治理技术，对在产化工园区实施减污降碳、污染预防，实现边生产、边管控、边修复；对退役化工园区实施精准识别、污染溯源，实现风险管控、绿色修复、安全利用。目前已有技术仅针对单一的减污、降碳途径，缺乏整体系统的源头管控 – 过程控制 – 末端治理 – 安全利用一体化方案。因此，需建立以物质流和能量流为基础的化工园区精细化智慧管理平台，开发以多介质过程为核心的化工园区土壤与地下水污染协同处置技术及装备，协同物理化学与生物修复技术治理化工园区土壤污染，进行化工园区场地分区、分类、分级管理与修复，构建污染溯源、修复治理和绿色发展的信息管理系统，进而创建化工园区减污降碳协同治理新模式。

（5）海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术

海洋水体三维数据的获取是地球系统多圈层耦合和海洋科学研究中亟须解决的基础性重大需求。现有的海洋遥感技术总体上是二维平面遥感，与海洋业务及科学应用所需的水体剖面结构或物质、能量的迁徙与时空分布三维探测需求存在巨大的差距。激光雷达通过向海水发射激光和测量时间分辨率回波信号的光谱、波形、强度、频移等特性，获得海洋上层水体生物光学参数的剖面信息，是实现从海表面遥感向水体剖面结构遥感的必要途径，是卫星海洋遥感的重要发展方向，是当今海洋光学和水色遥感领域的国际前沿。

星载海洋剖面探测技术至今尚未突破，只能依赖昂贵而稀疏的现场观测手段，严重制约了卫星海洋遥感观测范围和精度。亟须发展星载激光海洋高精度剖面探测技术，实现全球上层海洋剖面关键参数的大范围遥感探测，实现海洋遥感从二维向三维的跨越。目前主要的研究方向与发展趋势包括：一是发展海洋剖面蓝绿多波长、高光谱分辨率、单光子等新体制激光探测技术；二是研发复杂海洋环境和遥感器耦合的激光雷达三维辐射传输模拟仿真技术；三是发展高精度的激光雷达海洋光学和生物参数剖面反演、主被动融合及真实性检验技术；四是开展海洋激光在前沿科学、生态环境、碳循环领域的应用技术，形成工程化和规模化应用。

（6）对流分辨尺度区域地球系统模式的研发

区域地球系统模式和对流分辨尺度模拟是区域气候模式两个重要的发展方向。区域地球系统模式是在区域气候模式的基础之上，进一步考虑气候系统中的碳、氮循环等生物地球化学循环过程，其核心依然是大气 – 海洋 – 陆面 – 海冰多圈层耦合的物理气候系统。对流分辨率模式（≤ 4 km 模式）不再需要对深对流过程进行参数化，能够提供更真实的地形、地表覆盖和显式描述对流过程，从而产生更可靠的、基于过程的中小尺度气候，因此被认为是减小模式模拟不确定性和误差的重要途径。随着近年来对于精细化区域气候信息的广泛需求以及高性能计算资源的快速发展，研发对流分辨尺度区域地球系统模式来准确描述和

预测气候变化与人类活动对陆面物理、生物、地球化学过程的影响，提高对各圈层之间复杂相互作用的认识，可为天气 / 气候预报预测、应对气候变化及防灾减灾等提供有力的科学支撑。

（7）深远海大型养殖平台构建技术

深远海大型养殖平台是以海洋工程装备、工业化养殖、海洋生物资源开发与加工应用技术为基础，集海上规模化养殖、名优苗种规模化繁育、渔获物扒载与物资补给、水产品分类贮藏等于一体的大型渔业生产综合平台。平台的研发、应用与推广对于带动中国海上养殖业由近海走向深远海，打造“蓝色粮仓”，助力海洋强国建设具有重要的战略意义。

近年来，中国深远海大型养殖平台构建技术朝着信息化、智能化与集成化的方向不断创新发展。目前主要的研究方向包括：专业化深海大型养殖网箱设施研发，养殖平台海上稳定性及水动力控制技术研究，自动精准投喂、水质监测、赤潮防护等智能化装备与系统开发，深远海大型养殖平台自动化控制技术研究等。未来，需继续推动深远海养殖平台“养 – 捕 – 加”全流程装备设施研发应用；深化深远海水文规律及水体养殖环境营造等关键理论与技术研究；构建深远海大型养殖平台协同控制与大数据管理系统；建立深远海大型养殖平台的多能源形式供给与能源保障管理系统；构建养殖平台全过程工业化管控体系和陆海联动的运营管理模式等。

（8）纤维素基抗菌纺织材料

在后疫情时代，人们的个人防护意识日益增强。科研工作者们广泛关注如何有效抑制有害细菌的生长并将其彻底消灭。纺织品作为主要的人体防护材料，其疏松多孔的结构和较大的比表面积使其极易吸附人体新陈代谢过程中分泌的油脂和汗液，为微生物的附着、滋生和繁殖提供了温床。有害病菌在纺织品表面大量繁殖，不仅会产生臭味，还会通过间接方式在某些公共场合传播疾病，给人类的健康带来安全隐患。因此，开发功能性纺织品，尤其是低碳环保型抗菌纺织材料，已成为当务之急。

纤维素基材料是指以纤维素为主要原料，经过一定的化学或生物等处理后制备成的具有多种特性的功能材料。纤维素基材料具有生态环保、可降解、可再生等优点。常见的纤维素基抗菌材料有竹纤维、壳聚糖纤维、麻纤维、木棉纤维等。其在纺织领域中具有广泛的应用前景，如制作医疗用品（手术衣、医用敷料等）、家居用品（毛巾、床上用品等）等。在人们环保意识日益增强的当下，纤维素基抗菌纺织材料也成了众多品牌和企业的首选材料。随着技术的不断发展，纤维素基抗菌纺织材料的性能也将进一步得到提升和完善，其在纺织领域中的应用前景也将更加广阔。

（9）食品功能组分的生物强化

近年来，营养与健康问题日益凸显，不良饮食以及营养失衡带来的健康风险已位于全球疾病风险因素之首，严重影响人类生命健康，制约社会与经济的有序发展。利用生物强化技术提高食品中重要功能组分的含量，是减少和预防在发展中国家普遍存在的营养不良与微量营养素缺乏问题的重要途径。通过育种技术提高现有农作物中能为人体吸收利用的微量营养素含量是生物强化的重要手段。富集如铁、锌和维生素 A 等微量营养素的水稻、小麦、玉米和甘薯等主要农作物大部分已经培育成功，将进入从农田到餐桌的阶段，极大地改善贫困人口营养缺乏状况。此外，硒是人体必需的微量元素，而中国有 29% 的地区属于严重缺硒地区。富硒农作物的生物强化一方面依赖于以现代分子生物技术为基础的遗传与基因工程技术，更为有效的途径则是通过以土壤施硒肥和叶面施硒为主的农艺管理技术，进而提高农产品附加值，促进富硒产业的高质量发展。相对于农作物生物强化，食品生物强化则能在短期内解决微量营养素缺乏问题，而且可以精

准作用于营养缺乏人群。例如 DHA、EPA 等不饱和脂肪酸对于胎儿大脑发育十分重要，而人体自身合成十分有限。将藻类或岩藻黄素等作为饲料添加剂，经口摄入进而提高反刍动物乳汁中 DHA 的含量及乳制品的营养价值。系统梳理“食品功能组分的生物强化”领域的发明专利将有利于评价这一产业技术发展程度，并指明该领域未来的发展方向，为实施精准营养策略、促进国民健康提供现实参考。

（10）木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术

乳酸是具有生物相容性的有机羧酸，在医药、食品、化妆品等领域具有广泛的应用。乳酸的生产方法主要包括化学合成和生物合成两类。生物合成法因其环境友好、生产成本低等优势正逐步取代传统的化学合成法。然而，生物合成法通常采用木薯淀粉和其他粮食作物发酵生产得到乳酸，这引起社会对粮食和燃油问题的争议。因此，大宗乳酸化学品仍面临供不应求的问题。木质纤维素作为第二代生物质底物，是非食用性的可再生资源。因此，若将木质纤维素作为原料用于乳酸的生物合成，可有效解决上述问题。然而，木质纤维素的结构及组分较为复杂，在乳酸生产过程中大多通过批次发酵的方式进行，这存在发酵时间长、产率低、易产生杂质等缺点。细胞工厂技术可通过对复杂生命体的工程化重构，采用生物合成路径来生产目标产物。因此，从工业应用和经济性两方面考虑，细胞工厂技术是实现木质纤维素可持续生产乳酸大宗化学品的有效途径。未来，仍需进一步研发木质纤维素可持续生产乳酸的细胞工厂技术所配套的原料预处理、生物脱毒工艺，并进一步提升生物合成阶段的生产效率，以实现乳酸生产的全过程连续化。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 低碳源污水脱氮工艺

面对世界活性氮产生量逐年递增的现状，建设“低氮社会”成为控制环境污染、维护生态系统健康的必然举措。不断提高污水氮排放标准，是全球水处理行业的永恒主题。然而，当前城市污水厂普遍存在碳源不足的情况，传统污水脱氮工艺很难达到预期处理效果。在全球迈向“双碳”目标的大背景下，开发低碳源污水脱氮新工艺，是实现绿色水处理过程的重要途径。

面向低碳源污水脱氮需求，研究人员开发出硫自养反硝化、短程硝化反硝化、同步硝化反硝化以及厌氧氨氧化等新型脱氮工艺。各工艺特点如下：① 硫自养反硝化工艺采用硫等无机物作为电子供体，由于无须投加有机碳源，且可与现有工艺流程实现较好的匹配，已在部分污水厂中得到应用；② 短程硝化反硝化工艺则把硝化过程控制在亚硝酸盐阶段，能够减少对碳源的需求，降低反应过程的能量消耗，缩小反应器的占地面积，降低处理成本；③ 同步硝化反硝化工艺是在溶解氧浓度较低的条件下，同时实现硝化与反硝化过程，具有缩短反应时间、减小反应器体积、减少有机碳源消耗等优点；④ 厌氧氨氧化工艺是在厌氧或缺氧条件下，以氨为电子供体对亚硝酸盐进行还原，在无碳源情况下生成氮气，具有较高的经济性与技术可行性。

通过将多种工艺进行组合，可在最大程度上优化低碳源条件下的脱氮效果。例如，通过将短程硝化与厌氧氨氧化相结合，理论上可实现无碳源条件下污水脱氮。该工艺已被广泛应用于碳源不足的高浓度氨氮废水，如垃圾渗滤液、印染废水、污泥厌氧消化上清液等。然而，将短程硝化 – 厌氧氨氧化工艺应用于市政主流污水中仍面临较大挑战，尚无稳定的长期实际应用案例。

从国际范围来看，“低碳源污水脱氮工艺”核心专利的主要产出国家（表 2.2.1）中，中国在核心专利

公开量上排名第一，占比为 98.51%，与其他国家相比，在数量上有绝对优势。法国、美国等国家的专利公开量小于中国，但平均被引数超过中国。这表明，中国在低碳源污水脱氮工艺方面的研究和创新数量不断上升，但影响力仍需提高，研究的开创性有待提高。在该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构（表 2.2.2）方面，前十名的机构全部来自中国。其中，北京工业大学的核心专利公开量为 92 件，排在第一位，平均被引数为 6.37，处于较高水平。除高校与科研院所外，中国石油化工股份有限公司、北控水务（中国）投资有限公司等商业公司也贡献了一定量的核心专利产出，但影响力仍需进一步提升。各主要产出国家和机构间均不存在合作关系。今后，在该前沿领域，应逐步破除“唯数量论”，增加科研产出影响力的相关评估，以激励科研机构注重研究的质量与影响力，促进大学、科研机构与企业之间的产学研结合，促进学科领域的长足发展。

展望污水脱氮工艺的未来发展趋势，应立足于污水自养生物脱氮基础原理与技术研发，探索厌氧氨氧化与其他脱氮工艺的耦合，同时应加强新型曝气系统及智能精确控制技术研发，开展解决低温和低氨氮条件下短程硝化与厌氧氨氧化难以有效控制的难题，减少过程中温室气体的排放，进一步实现城市污水总氮的高效去除（图 2.2.1）。

表 2.2.1　“低碳源污水脱氮工艺”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	927	98.51	2 543	86.70	2.74
2	法国	4	0.43	226	7.71	56.50
3	韩国	4	0.43	8	0.27	2.00
4	美国	2	0.21	102	3.48	51.00
5	奥地利	2	0.21	0	0.00	0.00
6	日本	1	0.11	32	1.09	32.00
7	荷兰	1	0.11	22	0.75	22.00

表 2.2.2　“低碳源污水脱氮工艺”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京工业大学	92	9.78	586	19.98	6.37
2	哈尔滨工业大学	15	1.59	47	1.60	3.13
3	中国石油化工股份有限公司	15	1.59	15	0.51	1.00
4	同济大学	14	1.49	42	1.43	3.00
5	北控水务（中国）投资有限公司	13	1.38	54	1.84	4.15
6	安徽建筑大学	13	1.38	33	1.13	2.54
7	河海大学	12	1.28	18	0.61	1.50
8	中国科学院水生生物研究所	11	1.17	75	2.56	6.82
9	重庆大学	11	1.17	8	0.27	0.73
10	南京大学	10	1.06	96	3.27	9.60

图 2.2.1 “低碳源污水脱氮工艺”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术

海洋水体剖面激光探测技术是由激光器向海水发射一束或多束激光，由探测系统接收海洋水体目标受到激光激发后发射出来的回波信号，再通过计算机系统采集和分析信号数据，获取海洋上层水体生物光学剖面的新兴技术，是当前唯一具备获取分层海洋生地化剖面信息能力的遥感技术手段。现有的海洋遥感技术总体上是二维平面遥感，与海洋业务及科学应用所需的水体剖面结构探测需求存在巨大的差距，海洋激光雷达可将现有海洋遥感的探测能力从二维推进到三维，其应用范围涉及生物光学、生态、海洋动力、目标探测等，在海洋观测中具有巨大的潜力。海洋激光遥感是海洋遥感的新一代“探针”，为国家空间安全、资源开发、“双碳”战略提供新的立体观测手段，是当今海洋遥感领域的国际前沿，是三维海洋立体监测体系的重要一环，开展海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术研究具有迫切的国家需求和重要的科学意义。

近年来，国内外主要针对海洋生地化剖面探测需求，发展海水中物质荧光与剖面参数的相关系统与技术，且多以船载为主，在机载乃至星载大范围三维探测上仍在进行原理及机制研究，处于关键技术攻关阶段。在探测原理方面，多以米散射或荧光探测为主，具备更高探测精度的高光谱分辨率激光雷达研究较少。在反演算法和应用方面，对于激光雷达多次散射和主被动光学闭合等难题的研究较少，科学应用尚属起步阶段。星载海洋剖面探测技术至今尚未突破，国际上至今还没有专门的海洋剖面探测激光雷达卫星。

主要的研究方向与发展趋势包括：① 发展海洋剖面蓝绿多波长、高光谱分辨率、单光子等新体制激光雷达系统，突破海水高光谱分辨率探测、窄线宽高功率蓝光光源、瞬时大动态范围高灵敏度探测等关键技术；② 研发复杂海洋环境和遥感器耦合的多模态新型激光雷达三维辐射传输模拟仿真技术，形成行业认可的、普遍可用的商业化激光雷达多次散射仿真软件工具；③ 发展高精度的激光雷达海洋光学和生物参数剖面反演、主被动融合及真实性检验技术，突破多次散射修正、主被动光学参数闭合、主被动空间融合和光谱融合等关键难题；④ 开展海洋激光在前沿科学、生态环境、碳循环领域的应用技术，促进我国海洋剖面探测激光雷达卫星从科学试验走向业务化的进程。

在该工程开发前沿核心论文的主要产出国家（表 2.2.3）中，中国的专利公开量位于第一位，被引数位于第二位；美国的专利公开量位于第二位，被引数位于第一位；中国和美国的专利公开总量占比约为 67.52%。由图 2.2.2 可知，除美国与德国之间存在合作外，其他国家间缺少合作。在主要产出机构（表 2.2.4）方面，专利公开量排名前十的机构主要聚集在中国（5 个）和美国（3 个）。各主要产出机构间缺少合作。总之，虽然中国和美国在该领域均处于优势地位，但国家间的合作仍较为缺乏。中国需加强与其他国家的合作，提升该领域研究在国际上的影响力与话语权。图 2.2.3 为“海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3　“海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	193	44.78	364	26.13	1.89
2	美国	98	22.74	454	32.59	4.63
3	日本	44	10.21	63	4.52	1.43
4	德国	38	8.82	86	6.17	2.26
5	韩国	12	2.78	11	0.79	0.92
6	俄罗斯	6	1.39	1	0.07	0.17
7	加拿大	5	1.16	24	1.72	4.80
8	印度	4	0.93	4	0.29	1.00
9	意大利	4	0.93	4	0.29	1.00
10	瑞士	4	0.93	2	0.14	0.50

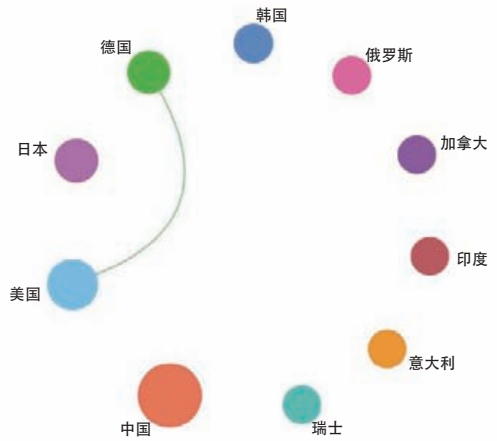

图 2.2.2　“海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4　“海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	日本天田株式会社	12	2.78	24	1.72	2.00
2	吉林大学	11	2.55	34	2.44	3.09
3	罗切斯特大学	6	1.39	44	3.16	7.33
4	北京工业大学	6	1.39	18	1.29	3.00
5	北京理工大学	6	1.39	14	1.01	2.33
6	戴姆勒股份公司	6	1.39	11	0.79	1.83
7	西安交通大学	5	1.16	10	0.72	2.00
8	复旦大学	4	0.93	18	1.29	4.50
9	IPG 光电公司	4	0.93	17	1.22	4.25
10	加利福尼亚大学	4	0.93	12	0.86	3.00

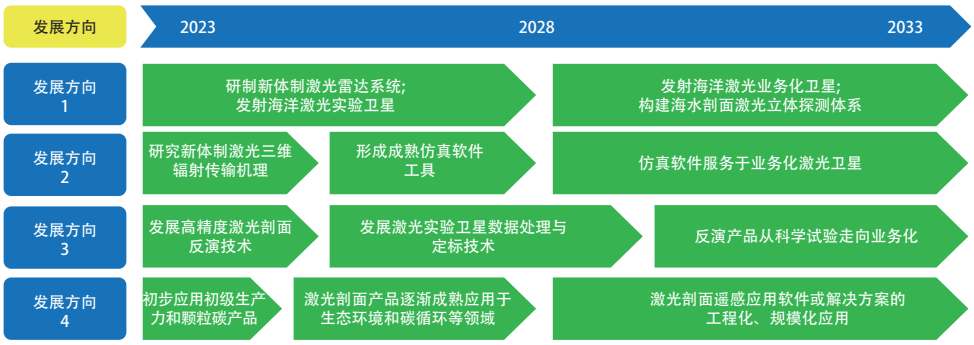

图 2.2.3 “海洋上层水体生物光学剖面激光探测技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 纤维素基抗菌纺织材料

随着人们生活水平的提高和卫生健康意识的增强，消费者更加重视生命安全和健康。抗菌纺织材料具有抗菌、防霉功效，能够避免材料被细菌或微生物沾污而发生纤维损伤，还能有效阻止疾病传播。因此开发抗菌功能材料，制造抗菌功能产品和研究高性能杀菌、杀病毒医卫防护材料，尤其是环保、可再生的纤维素基抗菌纺织材料尤为重要。而这需要通过创新开发来实现。近年来，中国在纤维素基抗菌纺织材料上的研发投入在全世界名列前茅，纤维素基抗菌纺织材料研究技术不断创新。

如表 2.2.5 所示，近年来的核心专利产出方面，中国的专利公开量高达 722 件，占比为 72.20%；其次为美国和德国，公开量分别为 69 件和 44 件；中国纤维素基抗菌纺织材料技术专利总量远高于美国、德国、日本等发达国家。但中国的平均被引数仅为 1.39，远低于美国、德国、日本等发达国家，说明中国纤维素基抗菌纺织材料技术原创仍较少，创新不足，影响力不够。在核心专利的主要产出机构（表 2.2.6）方面，排名第一的机构为中国的江南大学，但是其专利的被引数和平均被引数都较低。图 2.2.4 和图 2.2.5 分别给出了该开发前沿各主要产出国家和机构间的合作网络。可以看出，各机构间的研发合作关系很弱，只有北卡罗来纳大学教堂山分校与恩特格利昂公司之间存在合作关系，并且产业化程度较低，针对纤维素基抗菌纺织材料技术产 – 学 – 研合作仍有很大提升空间。中国应进一步加强与其他国家、机构间的交流合作，进一步提升在这一领域的创新能力，在技术开发方面也应破除“唯数量论”，增加科研产出影响力的相关评估，以激励科研机构注重研究的质量与影响力，促进大学机构与企业之间的产 – 学 – 研结合，促进学科领域的长足发展。

近年来，微生物污染和多种细菌性疾病的出现给人类健康与安全造成了较大影响，促使人们健康意识不断提高，且对抗菌材料有了更高的要求。纤维素主要是由葡萄糖通过 β –(1,4)– 糖苷键连接而成的高分子化合物，是自然界中最丰富的天然生物可降解材料和可再生能源。其具有比表面积大、吸水性好、化学性质稳定、可降解和生物相容性优异等特点。开发抗菌性能优异的纤维素材料成为当下研究的热点。

目前，纤维素基抗菌材料由基体纤维素或纤维素衍生物和抗菌剂两部分组成。基体纤维素有植物纤维素基体、细菌纤维素基体和海鞘纤维素基体三种。抗菌剂包括无机抗菌剂、有机合成类抗菌剂和天然抗菌剂三种。纤维素基抗菌材料的制备方法主要有：① 将天然抗菌纤维素纤维直接制备成抗菌纺织品，

表 2.2.5　“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	722	72.20	1 002	25.43	1.39
2	美国	69	6.90	1 917	48.64	27.78
3	德国	44	4.40	177	4.49	4.02
4	日本	26	2.60	58	1.47	2.23
5	韩国	22	2.20	2	0.05	0.09
6	以色列	20	2.00	131	3.32	6.55
7	瑞典	11	1.10	109	2.77	9.91
8	加拿大	11	1.10	71	1.80	6.45
9	奥地利	10	1.00	35	0.89	3.50
10	印度	10	1.00	1	0.03	0.10

表 2.2.6　“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	江南大学	20	2.00	25	0.63	1.25
2	Argaman 科技有限公司	17	1.70	152	3.86	8.94
3	恩特格利昂公司	13	1.30	1 160	29.43	89.23
4	北卡罗来纳大学教堂山分校	13	1.30	1 160	29.43	89.23
5	罗莱生活科技股份有限公司	11	1.10	20	0.51	1.82
6	有机点击股份公司	10	1.00	105	2.66	10.50
7	兰精股份公司	10	1.00	35	0.89	3.50
8	青岛尼希米生物科技有限公司	10	1.00	11	0.28	1.10
9	巴斯夫股份公司	9	0.90	146	3.70	16.22
10	日本制纸株式会社	9	0.90	17	0.43	1.89

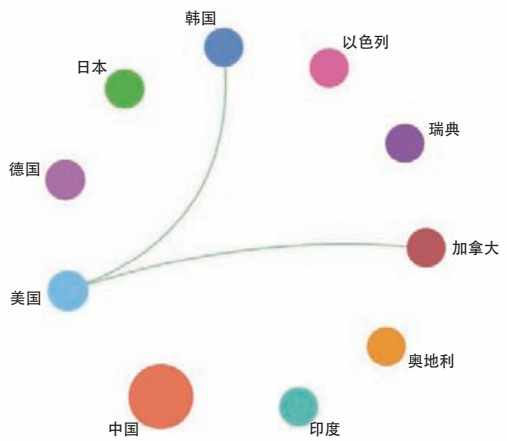

图 2.2.4　“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿主要国家间的合作网络

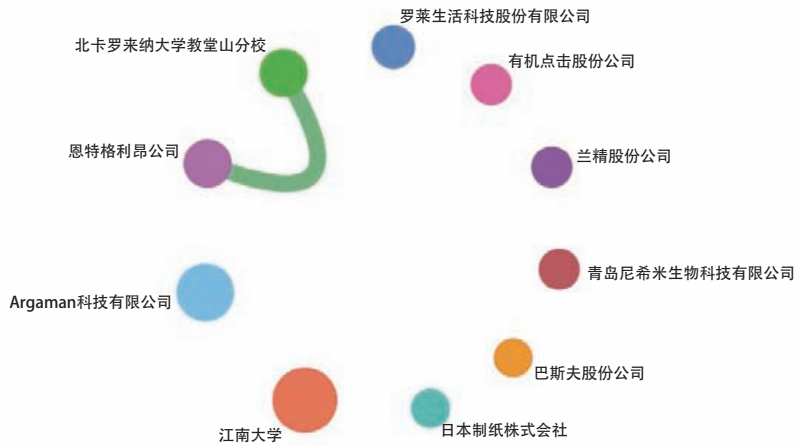

图 2.2.5 “纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿主要机构间的合作网络

这种方法抗菌持久性一般；② 将抗菌剂经纺丝法制备成抗菌纤维，再将其加工成产品，其中采用共混方式制备抗菌纤维对抗菌剂的选择有一定的局限性，需要采用热稳定性好、与高分子树脂有良好相容性的抗菌剂；复合纺丝法比共混纺丝法所用的抗菌剂的量更少，结合所制备纤维的特殊结构，产品的耐水洗性更好，但其制造工艺更复杂，生产成本也相对更高；③ 用抗菌剂对基体纤维素进行后整理得到抗菌材料，该方法是目前市场上制备抗菌纺织品的主流方法，有浸渍法、表面涂层法、树脂整理法、表面接枝改性法和微胶囊法等多种制备方法，这些方法加工简单，抗菌效果较好。

纤维素基抗菌材料的主要研究方向包括：① 纤维素纤维的改性，通过改变纤维素纤维的表面结构、极性、疏水性等性质，提高其抗菌性能；② 抗菌剂的合成与添加，合成新型抗菌剂，或将现有抗菌剂加入纤维素纤维中，实现抗菌功能；③ 纤维素纤维与其他材料的复合，将纤维素纤维与其他具有抗菌功能的材料复合，制备出具有更好抗菌性能的复合材料；④ 纤维素基抗菌纺织品的加工与生产，研究纤维素基抗菌纺织品的生产工艺和技术，提高生产效率和产品质量。

纤维素基抗菌材料发展趋势包括：① 高性能化，研发具有更高抗菌性能的纤维素基抗菌纺织材料，提高产品的市场竞争力；② 多元化，开发多种不同类型、不同功能的纤维素基抗菌纺织材料，满足不同领域的需求；③ 环保化，采用环保、可持续的原料和生产工艺，制备具有环保性质的纤维素基抗菌纺织材料；④ 个性化，根据市场需求，开发具有个性化、时尚化的纤维素基抗菌纺织材料，提高产品的附加值。

未来 5~10 年，“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿的发展路线如图 2.2.6 所示：纤维素基抗菌纺织材料的发展成熟度逐步由实验室阶段、工程化阶段转向产业化发展阶段。随着人们对健康和生活质量的追求不断提高，纤维素基抗菌纺织品的市场需求将会不断增长。未来，纤维素基抗菌纺织品的发展将更加注重环保、健康、功能性、智能化等方面。同时，随着新技术的不断应用和发展，纤维素基抗菌纺织品的性能和附加值也将不断提高。预计未来纤维素基抗菌纺织品将在更多领域得到应用和发展。

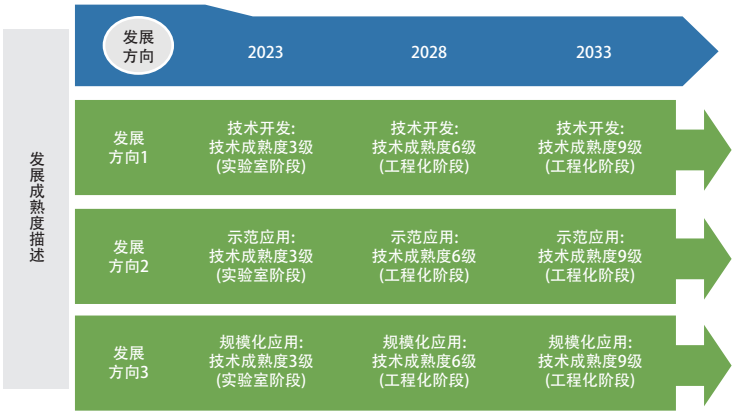

图 2.2.6　“纤维素基抗菌纺织材料”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：郝吉明　曲久辉

专家组：

贺克斌　魏复盛　张全兴　杨志峰　张远航　吴丰昌　朱利中　潘德炉　丁一汇　徐祥德　侯保荣
张　偲　蒋兴伟　任发政　庞国芳　孙晋良　俞建勇　陈克复　石　碧　瞿金平　岳国君　陈　坚

工作组：

黄　霞　鲁　玺　胡承志　李　彦　许人骥　陈宝梁　潘丙才　席北斗　徐　影　宋亚芳　白　雁
马秀敏　李　洁　郭慧媛　刘元法　刘东红　范　蓓　覃小红　黄　鑫

办公室：

王小文　朱建军　张向谊　张　姣　郑　竞　高　岳

执笔组：

黄　霞　鲁　玺　胡承志　李　彦　潘丙才　单　超　席北斗　白军红　陆克定　姜永海　贾永锋
尚长健　古振澳　盛雅琪　谢　淏　陈国柱　于建钊　郑　菲　许人骥　徐　影　石　英　王知泓
白　雁　李　洁　马秀敏　吕丽娜　陈　鹏　马　峥　郭慧媛　方　冰　覃小红　张弘楠　黄　鑫
肖涵中　梁　杰

七、农业

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

农业领域 Top 10 工程研究前沿主要包括：① 农作物育种相关生物学机制和机理的研究，如“作物泛基因组”“动物多组学功能基因挖掘”；② 提升动植物产品品质、产量及绿色生产的相关研究，如“作物产量 – 品质 – 效率协同提升机理与途径”“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”“农作物病虫害智能识别机制和实时监测技术”“基于深度学习的林木病虫害诊断”“秸秆改性及快速腐解技术”；③ 动物医学与营养依然是畜牧方面的研究前沿，如“重要动物病原调控宿主炎症应答机制”“畜禽肠道健康与高效生长的无抗营养调控技术”。农业领域工程研究前沿的核心论文数区间为 18~67 篇，平均为 47 篇，与往年相近；篇均被引频次区间为 28.94~225.40，平均约为 84.54；核心论文出版年度以 2018 年和 2019 年为主，其中“农作物病虫害智能识别机制和实时监测技术”“秸秆改性及快速腐解技术”“畜禽肠道健康与高效生长的无抗营养调控技术”“多农机智能协同作业技术”“基于深度学习的林木病虫害诊断”的核心论文平均出版年以 2019 年为主，较其他入选前沿更贴近当前（表 1.1.1 和表 1.1.2）。

（1）作物泛基因组

泛基因组是一个物种中全部脱氧核糖核酸（DNA）序列的集合。近年来，泛基因组研究是作物基因组领域的重要研究方向之一，对于揭示作物的遗传多样性、解析演化驯化历史及促进功能基因发掘具有重要意义。目前，已完成玉米、水稻、小麦等主粮作物的多个高质量参考基因组的组装。相比于单个参考基因组，不同材料或品系的基因组序列可以更加全面和准确地反映该物种的遗传多样性，特别是包含串联重复、存

表 1.1.1 农业领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	作物泛基因组	50	11 270	225.40	2017.7
2	作物产量 – 品质 – 效率协同提升机理与途径	43	3 684	85.67	2018.5
3	园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络	58	3 321	57.26	2018.6
4	农作物病虫害智能识别机制和实时监测技术	42	4 876	116.10	2019.2
5	秸秆改性及快速腐解技术	67	1 939	28.94	2019.8
6	重要动物病原调控宿主炎症应答机制	54	2 603	48.20	2018.3
7	畜禽肠道健康与高效生长的无抗营养调控技术	35	2 313	66.09	2019.1
8	动物多组学功能基因挖掘	50	2 645	52.90	2018.2
9	多农机智能协同作业技术	40	3 615	90.38	2019.2
10	基于深度学习的林木病虫害诊断	18	1 340	74.44	2019.3

表 1.1.2　农业领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	作物泛基因组	4	7	9	9	3	0
2	作物产量 – 品质 – 效率协同提升机理与途径	9	16	8	6	4	0
3	园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络	15	13	15	12	2	1
4	农作物病虫害智能识别机制和实时监测技术	7	6	10	11	7	1
5	秸秆改性及快速腐解技术	11	7	13	5	14	17
6	重要动物病原调控宿主炎症应答机制	16	18	11	5	3	1
7	畜禽肠道健康与高效生长的无抗营养调控技术	0	12	11	10	1	1
8	动物多组学功能基因挖掘	15	18	9	7	0	1
9	多农机智能协同作业技术	6	9	5	13	7	0
10	基于深度学习的林木病虫害诊断	3	3	3	5	3	1

在缺失变异、染色体易位等在内的复杂基因组结构变异。在种属水平构建的泛基因组可为探究作物的起源和演化、解析驯化和去驯化过程、揭示功能基因的演变规律提供线索。此外，丰富的基因组信息的整合可用于鉴定作物物种的核心基因和泛基因集合，支撑作物优异基因资源的发掘和利用。近年来，高质量的无缝基因组和端到端的完整基因组组装的陆续完成，也为构建作物的泛基因组提供了强有力的参考。基于泛基因组的研究方法和解析策略也在不断完善，如基于泛基因组学的比对方法、基因家族功能注释、图形化泛基因组构建方法等。未来，通过与人工智能（AI）、机器学习等新兴技术结合，并融合丰富的表型数据，作物泛基因组研究有望为作物优异基因精准发掘和分子设计育种提供全面的基因组坐标系统，在作物基础研究和育种应用中发挥更加重要的作用。

（2）作物产量 – 品质 – 效率协同提升机理与途径

作物产量 – 品质 – 效率协同提升，是指在系统揭示丰产优质高效协同形成规律及机理的同时，通过因地筛选适种良种与适期播栽，充分利用当地温光资源，优化养分管理与灌溉，达到高效利用肥水资源，从而实现农作物产量、品质和效率的协同提升。当前，我国水稻、小麦、玉米等主要作物单产已达较高水平。但随着我国经济社会的高速发展，人民生活质量的不断提高，现代农业高质量发展对作物生产提出了新的要求，迫切需要在主攻单产提高的同时有效提升品质和资源利用效率。因此，作物产量 – 品质 – 效率协同提升的机理解析与途径探索至关重要。其核心科学问题主要包括：① 作物生长发育与产量 – 品质 – 效率形成、作物 – 环境 – 栽培措施的互作对产量 – 品质 – 效率的综合影响以及作物产量 – 品质 – 效率协同提升的机理；② 作物产量 – 品质 – 效率协同提升品种的评价指标体系和综合筛选方法；③ 作物产量 – 品质 – 效率协同提升的调控途径与广适性栽培关键技术。以上相关理论与技术的突破将为我国作物丰产优质高效协同生产提供核心理论支撑和现代作物生产工程技术方案。

（3）园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络

随着园艺产业快速发展和园艺产品总产量迅猛提高，产品品质性状变化、健康成分含量及园艺产品质量安全问题受到了密切关注。园艺产品品质包括外观品质、营养品质和风味品质等，主要有产品器官大小、形状、整齐度、色泽、耐贮运性、各种营养物质（糖、酸、淀粉、维生素、矿质营养、类黄酮等）含量、

各种风味物质（氨基酸、芳香类物质等）含量和口感（软硬度、口内风味感觉等）等，品质性状复杂。近年来，我国在园艺作物果形、色泽、营养品质、风味和苦味物质形成与调控机理方面已开展了一些研究，特别是运用基因组、转录组和代谢组等手段，通过园艺产品品质相关物质代谢基因及其调控基因的挖掘与分析，明确了少数代谢物质的关键控制基因，对重要农艺性状分子机制和调控网络的了解也越来越多，但多数决定园艺产品品质的代谢物质还不清晰，其分子机制和代谢调控机理的研究更少。因此未来应该在现有基础上，从转运蛋白、转录调控因子、表观修饰因子以及非编码核糖核酸（RNA）等方面，开展不同层级的基因表达级联调控机制及其调控网络、植物激素信号转导与品质形成的交互调控以及品质代谢与环境的耦合调控机制等研究，探明园艺产品品质形成的调控网络和信号传导机制，为园艺产业提质增效提供科学依据。

（4）农作物病虫害智能识别机制和实时监测技术

在作物病虫害综合防治体系中，防治决策是核心，预测是决策的前提和基础，而监测是预测和决策必不可缺的依据，及时、快速、准确的监测技术在植物病虫害防治中十分重要。近些年，随着遥感、雷达、图像技术、定量分子检测技术、传感器技术、物联网技术、大数据分析、人工智能等高新技术的集成和发展，作物病虫害智能识别、实时监测和预警技术方面取得了比较明显的进步，大幅度提高了病虫害监测的时效性和准确度。作物病虫害智能识别技术主要由病虫害捕捉和诱集设备、探测或高清拍摄设备、实时传输平台、远程监控平台、智能识别与计数模型或算法、计算机或手机的网络客户端等模块组成，实现了病虫害监测由传统人工调查转变为病虫害信息实时采集、传输、识别、分析和预警等一体化的远程自动实时监控、识别与诊断。虽然目前多数病虫害识别和监测模型的准确性或适用范围不可避免地存在一定局限性，但随着人工智能、深度学习等技术的进一步发展，传统方法和新兴技术集成融合的作物病虫害智能识别和监测技术，将成为未来病虫害监测预警的主要发展方向。

（5）秸秆改性及快速腐解技术

秸秆还田对稳定维持耕地地力、提高养分利用率、减缓土壤酸化等具有重要作用，但由于秸秆碳氮比高，纤维素、木质素等成分结构复杂，直接还田腐解慢，易造成下茬作物缺氮与生长不良、病虫害加重等问题，异位腐解至少需 2 个月。因此，如何促进还田秸秆快速腐解是当前农业亟待解决的问题之一。秸秆腐解转换为有机质受本身性质、土壤理化性质与微生物综合影响。秸秆改性是指外源添加氮肥、纳米材料、化学改性剂、酶制剂、微生物菌剂等，通过调控秸秆腐解过程中的物理、化学或生物过程提高秸秆的腐解效率与产物功效。随着微生物学、有机物质表征等技术的快速发展，基于高效促腐菌剂筛选、秸秆改性等技术，提高秸秆原位与异位腐解速度，提升有机降解产物的性能及养分保蓄能力，构建不同气候环境下秸秆快速腐解的区域精准技术，对实现农业可持续发展、低碳农业发展和加快农业循环经济具有重要意义。

（6）重要动物病原调控宿主炎症应答机制

作为畜禽养殖和动物源食品消费大国，重大动物疫病以及人兽共患病的防治对于我国畜牧业的健康发展以及公共卫生安全至关重要。动物病原入侵机体能够诱导宿主的免疫应答，其对宿主炎症应答的调控与疾病的发生发展密切相关。炎症反应是宿主对于刺激的一种自我防御机制，在病原清除、增强机体抗病能力及阻止病原扩散等方面发挥着重要作用。具体来讲，病原入侵机体后，被宿主模式识别受体识别，起始一系列细胞内的信号转导，招募大量趋化因子、细胞因子以及活化的免疫细胞聚集到感染部位以清除病原，

造成局部的炎症反应。炎症反应由促炎性细胞因子介导，一些重要病原能够通过诱导促炎性细胞因子的大量释放而造成“细胞因子风暴”，导致组织强烈的局部炎症，辅助病原增殖；同时，病原也可通过激活炎性小体造成巨噬细胞裂解，完成病原的逃逸和扩散；此外，病原可通过调控宿主细胞内的多种信号通路，抑制促炎性细胞因子的表达和释放，从而免于被机体清除，建立持续感染。揭示病原对宿主炎症应答的调控机制，对于了解病原的致病机理，寻找感染性疾病的新治疗方案至关重要，相关研究成果也将为疫苗研发与疫病防控提供重要指导和理论依据。

（7）畜禽肠道健康与高效生长的无抗营养调控技术

抗生素滥用导致的细菌耐药性、生态环境污染以及食品安全等问题，已严重影响我国畜牧业健康发展。2020 年，我国颁布“禁抗令”，饲料中全面禁止添加促生长类抗生素，由此给畜禽肠道健康与生长发育等方面带来巨大挑战。基于此，开发和应用绿色、安全的无抗营养调控技术，维持畜禽肠道健康、促进其生长发育，是我国畜牧业高效可持续发展的必然趋势。无抗营养调控技术是以饲料“营养结构”平衡为核心，整合集成营养素对动物免疫、肠道健康和致病因子的综合营养调控，实现在无抗条件下促进动物肠道发育，提高机体的抗病能力，确保动物健康和高效生产。无抗营养技术体系关键在于饲料营养结构的平衡与优化、饲料加工调制与精准饲喂，从营养源选择、配方设计与优化、添加剂组合筛选、饲料加工调制、饲喂方式和粪菌移植等方面调控肠道微生态平衡，促进畜禽肠道健康与高效生长。进一步加强无抗营养基础理论研究，推广应用无抗营养调控技术体系，是当前研究的难点与热点，相关研究成果必将为无抗条件下的畜禽肠道健康与高效生长提供理论指导和技术支撑。

（8）动物多组学功能基因挖掘

动物多组学功能基因挖掘是指通过综合分析多种遗传组学、转录组学、蛋白质组学等数据，应用相关生物信息学方法，鉴定和研究动物基因组中具有重要功能与生物学意义的基因。动物多组学功能基因挖掘通常包括以下步骤：① 数据收集；② 数据预处理；③ 生物信息学分析（应用生物信息学工具和算法对预处理后的数据进行分析，包括基因组装、基因定位、基因功能注释、转录本组装、表达量分析、蛋白质鉴定和定量等）；④ 功能基因挖掘（结合分析结果和已有的生物学知识，鉴定具有重要功能和生物学意义的基因，可能涉及富集分析、差异表达分析、蛋白质互作网络分析等）；⑤ 功能注释和解释；⑥ 生物学验证（通过实验验证或进一步的功能研究，确认功能基因在生物学过程中的重要作用）。该技术旨在解析优异动物种质中产肉量和品质、产奶量和乳品质、产绒毛量和品质、产蛋量，以及生长、发育、繁殖、抗病、抗热应激、耐低氧等重要性状形成的分子遗传基础，从而为基因组精准设计育种理论与技术创新提供依据，将极大地提高农业动物高产、优质、抗病、抗逆等优良性状的选择与创制的准确性，加速优良品种的定向培育进程。

（9）多农机智能协同作业技术

据联合国预测，到 2050 年，全球人口将达到 97 亿，届时对粮食的需求量将比现在增加 70%。而劳动力短缺已成为农业生产的现实问题，亟须深入推进农业现代化和产业升级。无人化智能农机可以通过自动化技术进行操作，减少对人工劳动力的依赖，实现高效率的农业作业，提高生产效率。但随着农业现代化的推进，农田规模不断扩大，单台农机的智能化和无人化将难以满足规模化高效生产需求，如何实现多台农机智能协同作业是研究热点，包括农机之间的实时数据传输和信息交互的通信与网络技术，实时获取农田环境信息和作物生长状态的感知与识别技术，多台农机的自主规划和协同控制技术，多台农机之间的任

务协调和作业调度技术，单台农机和多台农机协同作业的安全与保障技术（包括行驶安全、数据安全、系统可靠性和故障诊断等）等。相关关键核心技术的突破将实现农业生产任务分工和协作，提高作业效率，支撑智慧农业应用发展。

（10）基于深度学习的林木病虫害诊断

基于深度学习的林木病虫害诊断是一种运用深度学习技术来辨识和监测森林中病虫害威胁的创新方法。深度学习作为一类机器学习方法，其核心是构建和训练多层次的神经网络，以从大量数据中自动学习特征和模式。基于深度学习的方法能够精确地识别病虫害，并通过数据耦合分析其发生规律，相较于传统的病虫害辨识方法，其具有减少专业人员重复性工作、节省人力、时效性强、高效和准确等诸多优势。目前基于深度学习的林木病虫害诊断研究涉及林木病虫害图像识别、通过对灯诱或信息素引诱害虫的监测和识别实现害虫计数和种群动态监测、借助卫星高分影像和无人机影像（可见光、多光谱和高光谱数据）监测森林病虫害的变化和预测病虫害发生趋势等。随着人工智能技术的发展，构建林木病虫害大模型，深入研究数据融合和多模态信息，探索模型设计、压缩和自动化架构搜索，提高模型的高效性与通用性，保护数据隐私和安全，促进跨地区（机构）合作，以及在区域病虫害监测网络基础上开展病虫害预测预报，对适应当前环境变化、病虫害入侵大趋势下的林业可持续发展具有重要意义。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络

随着园艺产业的快速发展和园艺产品总产量的迅猛提高，产品品质性状变化、健康成分含量及园艺产品质量安全问题受到了密切关注。园艺产品品质包括外观品质、营养品质和风味品质等，主要有产品器官大小、形状、整齐度、色泽、耐贮运性、各种营养物质（糖、酸、淀粉、维生素、矿质营养、类黄酮等）含量、各种风味物质（氨基酸、芳香类物质等）含量和口感（软硬度、口内风味感觉等）等，品质性状复杂。近年来，我国在园艺作物果形、色泽、营养品质、风味和苦味物质形成与调控机理方面已开展了一些研究，特别是运用基因组、转录组和代谢组等手段，通过园艺产品品质相关物质代谢基因及其调控基因的挖掘与分析，明确了少数代谢物质的关键控制基因，对重要农艺性状分子机制和调控网络的了解也越来越多，但多数决定园艺产品品质的代谢物质还不清晰，其分子机制和代谢调控机理的研究更少。

随着测序技术的快速发展，成本也迅速降低，许多园艺植物已完成了基因组测序，或是更新为更优质的基因组。我国科学家在此领域做出了杰出的贡献。据不完全统计，有 50 余种园艺作物的基因组测序工作已经完成，为通过分子设计方法培育优异作物新品种奠定了基础。

目前已经定位到 60 余个控制糖分的数量位点，另外，蔗糖转运器、淀粉合成酶和液泡加工酶等间接作用于糖代谢的蛋白作用也陆续被解析。叶志彪团队通过代谢组的全基因组关联分析（mGWAS）定位到了编码铝激活苹果酸转运蛋白（ALMT9）、调控番茄苹果酸积累的主效位点 TFM6（tomato fruit malate 6），明确了 WRKY42 通过结合 ALMT9 启动子上 W-box 来负调控 ALMT9 表达，进而抑制番茄果实中苹果酸的积累。已报道在番茄中有 237 个位点与抗坏血酸代谢途径的酶促反应相关，抗坏血酸代谢途径相关基因及其对应酶的代谢网络已初步建立。许多参与类胡萝卜素生物合成途径的基因已被分离

与克隆，并进行了功能验证。一些次生代谢物，如类黄酮、生物碱、苯丙烷类以及芳香类物质，也是园艺作物营养和风味品质形成的重要组分，在该领域，中国农业科学院和美国佛罗里达大学合作，确定了33 种影响消费者喜好的主要风味物质，挖掘了 49 个调控风味物质积累的关键位点，揭示了番茄风味的物质基础和遗传改良路径，为培育美味番茄提供了切实可行的育种方案。

由于品质性状的复杂性，目前对性状形成的遗传学基础与调控网络的研究仍处于起步阶段，未来研究的重点包括：应用分子生物手段，建立与优化园艺作物遗传转化体系，挖掘与作物品质相关的关键基因，阐明基因对品质的调控作用，建立更加精细的分子调控网络，明确重要的节点调控基因；打破与品质连锁的不利基因的影响，实现园艺作物品质与逆境抗性等其他优良特性的共同提升，培育优质园艺作物品种；探讨环境与栽培技术对品质的调控机制，建立优质园艺作物设施栽培关键技术。

“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是中国（占 63.79%）、美国（占 27.59%）和意大利（占 12.07%）（表 1.2.1）。该前沿核心论文的篇均被引频次分布在 46.25~93.67，其中以色列和美国的篇均被引频次均超过了 70.00。核心论文的主要产出机构（表 1.2.2）方面，中国科学院、安徽农业大学、中国农业科学院的核心论文数及被引频次较高。由图 1.2.1 可知，国家间的研究合作较为普遍，其中中国与美国的合作相对更紧密。由图 1.2.2 可知，中国科学院与其他机构的合作较多。施引核心论文数排名前两位的国家是中国和美国，中国占比为 49.05%，美国占比为 14.35%（表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构（表 1.2.4）方面，中国科学院、中国农业科学院和南京农业大学的施引核心论文数排在前三位。图 1.2.3 为“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.1　“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	37	63.79	2 288	61.84	2018.7
2	美国	16	27.59	1 178	73.62	2019.1
3	意大利	7	12.07	423	60.43	2017.7
4	英国	7	12.07	367	52.43	2019.1
5	以色列	6	10.34	562	93.67	2018.2
6	西班牙	6	10.34	281	46.83	2018.5
7	法国	6	10.34	279	46.50	2018.5
8	荷兰	5	8.62	261	52.20	2019.2
9	澳大利亚	4	6.90	185	46.25	2018.0
10	德国	3	5.17	160	53.33	2018.7

表 1.2.2 “园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	6	10.34	384	64.00	2019.7
2	安徽农业大学	6	10.34	302	50.33	2018.7
3	中国农业科学院	5	8.62	280	56.00	2020.0
4	华中农业大学	4	6.90	342	85.50	2017.5
5	浙江大学	4	6.90	329	82.25	2018.8
6	加利福尼亚大学戴维斯分校	4	6.90	251	62.75	2019.2
7	艾德蒙机械基金会研究与创新中心	4	6.90	218	54.50	2017.8
8	华南农业大学	4	6.90	190	47.50	2018.8
9	康奈尔大学	3	5.17	387	129.00	2018.3
10	美国农业部农业研究服务局	3	5.17	266	88.67	2019.3

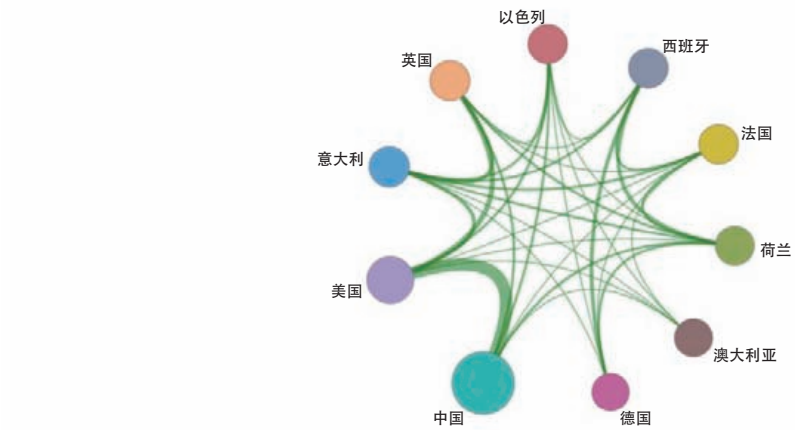

图 1.2.1 “园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿主要国家间的合作网络

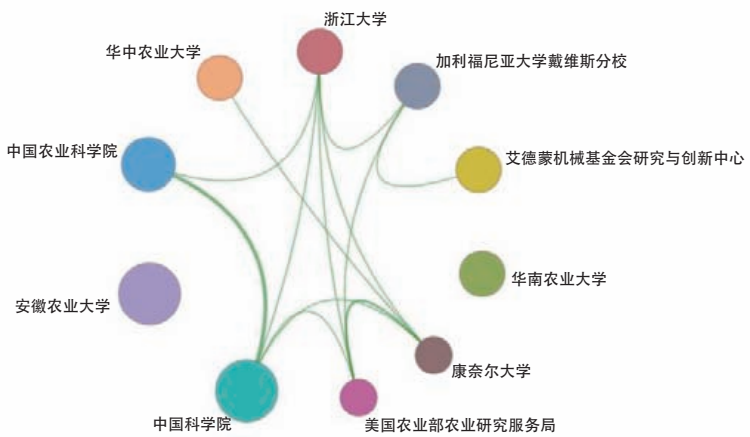

图 1.2.2 “园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 623	49.05	2021.1
2	美国	475	14.35	2020.8
3	意大利	216	6.53	2020.7
4	西班牙	174	5.26	2020.8
5	德国	161	4.87	2020.9
6	印度	155	4.68	2021.2
7	法国	154	4.65	2020.5
8	英国	110	3.32	2021.0
9	澳大利亚	84	2.54	2020.5
10	日本	79	2.39	2020.8

表 1.2.4　“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	150	15.59	2021.1
2	中国农业科学院	141	14.66	2021.1
3	南京农业大学	100	10.40	2021.0
4	华南农业大学	92	9.56	2021.0
5	华中农业大学	90	9.36	2020.9
6	浙江大学	73	7.59	2021.1
7	福建农林科技大学	70	7.28	2021.1
8	安徽农业大学	70	7.28	2020.8
9	美国农业部农业研究服务局	62	6.44	2020.8
10	山东农业大学	57	5.93	2021.2

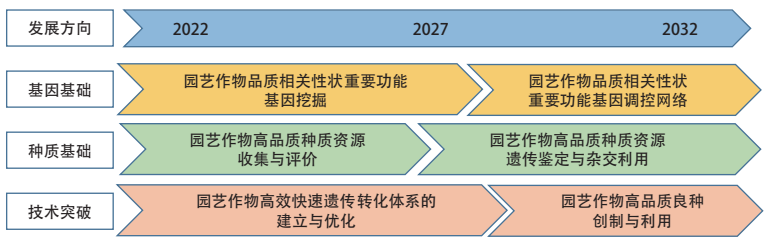

图 1.2.3　“园艺作物品质性状形成的遗传学基础与调控网络”工程研究前沿的发展路线

1.2.2 动物多组学功能基因挖掘

畜禽业健康发展是保障我国粮食和畜产品安全的战略需要，而种业位于养殖产业链条的上游，未来对畜牧业发展的贡献度将进一步提升。畜禽重要经济性状形成的分子机制极为复杂，而目前功能基因组图谱注释不完善、优异性状关键基因及调控机制不明确，严重制约了种质资源高效利用、遗传改良与重大畜禽新品种创制进程。

随着现代生物技术的不断发展，畜禽育种工作者从早期只能宏观上利用性状的遗传力来描述性状的遗传规律，到利用分子标记解析影响数量性状的相关调控区域，再到现在可以直接解析 DNA 序列变异与复杂性状的关系。这些重要性状的已知致因突变可以直接应用于育种实践，为培育优良品种奠定了坚实的基础。动物多组学功能基因挖掘正是畜禽重要性状分子遗传基础解析、基因组序列以及功能基因组研究中的关键，也是培育优良动物新品种的重要前提，是长期以来国内外动物遗传育种研究领域的焦点。

自 2009 年至今，基于全基因组单核苷酸多态性（SNP）芯片的全基因组选择技术迅速发展，并在欧美发达国家的奶牛、肉牛、猪、肉鸡育种中得到广泛应用。2014 年，澳大利亚科学家牵头启动国际千牛基因组计划。2015 年，欧盟和美国成立“国际动物基因组功能注释项目”，以达到预测畜禽种质资源重要性状的目的。我国科学家则先后主导或参与了鸡、鸭、猪、鹅、牦牛、羊等不同畜禽的基因组项目，联合不同国家先后启动了万种鸟类基因组计划、宏基因组计划等科学计划，为阐明重要经济性状遗传机理奠定了基础。此外，国内外研究者鉴定了一批与生长、肉质、繁殖、产奶等重要经济性状相关的差异表达基因、差异表达蛋白、差异甲基化基因等，并对它们之间的调控关系进行了探究，在猪胴体性状、奶牛乳成分合成和乳房炎抗性、绒山羊毛囊发育等分子机制等方面都有重要发现；获得了奶牛、猪、肉牛、鸡、肉鸭等全基因组拷贝数变异图谱，发现了多个与产奶性状、体尺性状、胴体性状、免疫性状、肉质性状等相关的重要候选基因。国内外动物基因组功能注释项目（如 FAANG、FarmGTEx 等）的启动，引领了组学时代下农业动物表型性状的分子调控机制解析，同时随着动物多组学功能基因挖掘应用基础研究的不断深入，农业动物育种也正在加速从传统的常规育种逐渐转变为多组学智能设计育种。

动物多组学功能基因挖掘技术主要包括：在动物泛基因组、基因组、表观组、时空转录组、蛋白质组、代谢组、表型组等多组学的大数据联合分析基础上，综合运用遗传学、基因组学、生物信息学、分子生物学、生物化学、细胞生物学、动物育种学等方法，揭示动物全景多维组学特征，筛选动物高产、优质、抗逆、抗病等性状相关的数量性状基因座（QTL）定位和分子标记，挖掘关键遗传变异、功能基因、调控序列和调控网络，揭示基因、表型与环境的互作规律，为动物育种提供分子遗传选择标记和操纵目标。该领域技术旨在解析优异动物种质中产肉量和品质、产奶量和乳品质、产绒毛量和品质、产蛋量，以及生长、发育、繁殖、抗病、抗热应激、耐低氧等重要性状形成的分子遗传基础，从而为基因组精准设计育种理论与技术创新提供依据，以极大地提高农业动物高产、优质、抗病、抗逆等优良性状的选择与创制的准确性，加速优良品种的定向培育进程。

“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是美国（占 38.00%）、中国（占 38.00%）和英国（占 10.00%）（表 1.2.5）。该前沿核心论文的篇均被引频次分布在 45.00~82.00，其中英国、澳大利亚和荷兰的篇均被引频次均超过了 65.00。在主要产出机构方面，加利福尼亚大学戴维斯分校、图卢兹大学和西北农林科技大学产出的核心论文及被引频次较多（表 1.2.6）。由图 1.2.4 可知，国家间的研究合作较为普遍，其中英国、美国和中国的合作相对更紧密。由图 1.2.5 可知，各机构间存在一定的合作关系。施引核心论文数排名前两位的国家是中国和美国，中国占比为 30.38%，美国占比为 24.14%，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（表 1.2.7）。施引核心论文的主要产出机构（表 1.2.8）方面，中

表 1.2.5　“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	19	38.00	1 153	60.68	2018.6
2	中国	19	38.00	924	48.63	2018.4
3	英国	5	10.00	348	69.60	2018.6
4	法国	5	10.00	287	57.40	2018.0
5	德国	5	10.00	225	45.00	2018.4
6	澳大利亚	4	8.00	288	72.00	2018.5
7	加拿大	4	8.00	235	58.75	2017.8
8	丹麦	3	6.00	168	56.00	2018.0
9	西班牙	3	6.00	167	55.67	2018.0
10	荷兰	2	4.00	164	82.00	2018.5

表 1.2.6　“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	加利福尼亚大学戴维斯分校	4	8.00	270	67.50	2018.5
2	图卢兹大学	4	8.00	252	63.00	2018.2
3	西北农林科技大学	4	8.00	190	47.50	2018.0
4	昆士兰大学	3	6.00	232	77.33	2018.3
5	爱丁堡大学	3	6.00	224	74.67	2018.7
6	爱荷华州立大学	3	6.00	205	68.33	2020.0
7	美国农业部农业研究服务局	3	6.00	190	63.33	2019.0
8	奥胡斯大学	3	6.00	168	56.00	2018.0
9	法国国家农业科学研究院	3	6.00	163	54.33	2017.7
10	中国农业大学	3	6.00	159	53.00	2019.3

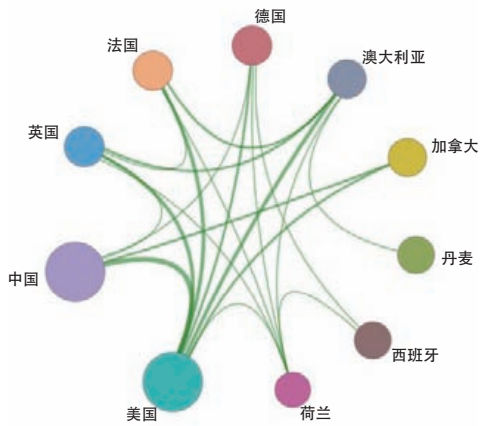

图 1.2.4　“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿主要国家间的合作网络

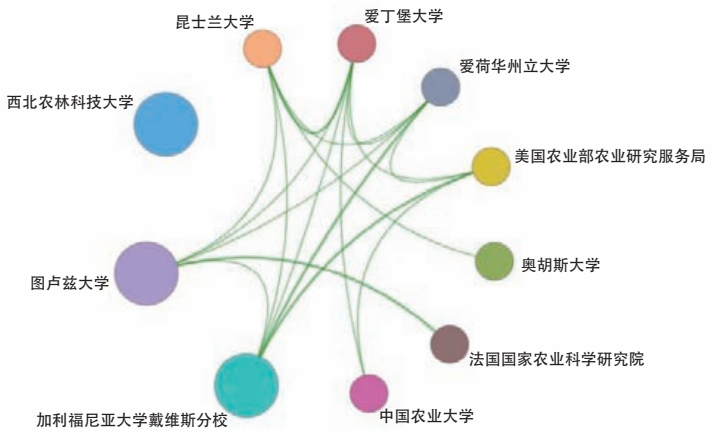

图 1.2.5 “动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	979	30.38	2021.0
2	美国	778	24.14	2020.5
3	英国	247	7.66	2020.5
4	德国	235	7.29	2020.3
5	法国	177	5.49	2020.5
6	澳大利亚	172	5.34	2020.6
7	加拿大	145	4.50	2020.5
8	印度	144	4.47	2020.9
9	意大利	127	3.94	2020.4
10	西班牙	123	3.82	2020.5

表 1.2.8 “动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	104	14.05	2021.1
2	中国农业科学院	102	13.78	2020.9
3	中国农业大学	86	11.62	2020.7
4	爱丁堡大学	81	10.95	2020.7
5	美国农业部农业研究服务局	75	10.14	2020.7
6	西北农林科技大学	59	7.97	2020.7
7	华中农业大学	56	7.57	2021.1
8	昆士兰大学	52	7.03	2020.4
9	四川农业大学	47	6.35	2020.7
10	加利福尼亚大学戴维斯分校	40	5.41	2020.5

国科学院、中国农业科学院和中国农业大学排在前列，其中中国科学院的施引论文数排在首位。

值得注意的是，动物复杂经济性状是由大量遗传元件参与，通过复杂的发育调控网络展示出来，并不断受到自然或人工选择作用而逐渐形成的。单一基因对性状的贡献有限且在不同环境条件下效应区别较大，不同性状间耦合和拮抗的调控网络及其内在核心调控单元还未完全解析，由于遗传连锁而形成的一因多效和多因一效现象，成为动物多组学功能基因挖掘的关键瓶颈，同时也限制了动物分子设计育种，尤其是多性状协同改良的遗传进展。因此，未来研究应从丰富多组学数据来源和拓宽多组学联合分析深度两个方面入手。① 传统的功能基因组学针对单一性状的静态遗传关联研究（SNP、GWAS），或者针对发育过程中单一基因或信号通路的功能研究，很难准确绘制基因型到表型的系统演化框架。针对不同的经济性状形成的独特多因子调控模型，充分利用三维基因组（Hi-C）、蛋白质互作组、多时空表观组（ATAC-Seq、ChIP-seq）、单细胞测序、空间转录组测序、基因编辑技术、GWAS 算法优化等新兴整合分析技术，解析不同座位等位基因间组合与相互作用对复杂性状表型形成的调控网络，挖掘可用于育种实践的关键功能元件。② 农业动物重要性状分子遗传基础研究需要大规模试验群体及数据的支撑，以及对于关键表型的持续、系统和深入的监测与研究，因此多组学智能设计育种的广泛研究必然意味着动物的多组学信息呈超指数型增长。如何解读海量异质性的多组学数据，整合来自不同研究的多组学信息，以解析遗传变异与重要经济性状间的关系，面临着极大的挑战。通过可参考的动物复杂性状多组学数据库与动态整合分析方法来攻克单一组学止步于标记和表型间的“相关”分析，突破难以揭示“因果”的瓶颈，从整合和系统生物学角度解析动物复杂性状的成因。图 1.2.6 为“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿的发展路线。

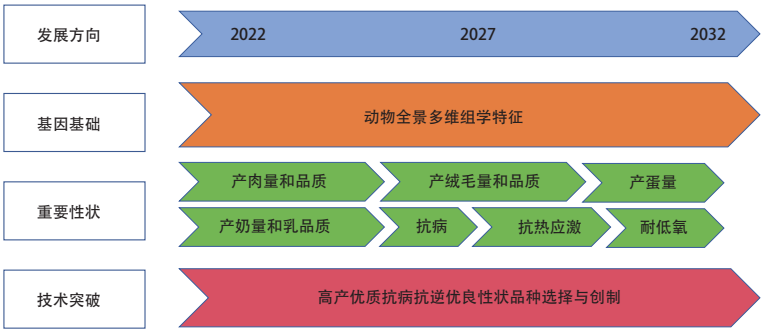

图 1.2.6　“动物多组学功能基因挖掘”工程研究前沿的发展路线

1.2.3　基于深度学习的林木病虫害诊断

林木是自然界中最复杂的非刚性有机生命体，在生态系统中扮演着生态位形成、能量流动和物质循环的重要角色。此外，森林作为固碳的重要场所，是陆地生态系统中最大的有机碳库之一。联合国粮食及农业组织发布的报告显示，2020 年，全球树林面积为 40.45 亿公顷[1]，占地球陆地面积的 31%。结合第九次全国森林资源连续清查结果、中国森林资源核算结果和《中国林业统计年鉴》相关统计结果，测算平均每亩森林的效益显示，中国平均每亩森林年涵养水源量为 192.34 吨、年吸收大气污染物量为 12.1 千克、年释氧量为 315 千克。2022 年，中国主要林业有害生物危害林地面积为 1.78 亿亩[2]，松材线虫病危害 2 200 万亩，病死松树数量达 1 000 万株，白蛾等其他检疫性有害生物危害 2 800 万亩。因此，林木病虫害诊断

1　1 公顷＝ 10 000 平方米。
2　1 亩≈ 666.67 平方米。

研究对于维护森林生态系统健康、提高林业产值以及保护生物多样性具有重要意义。

传统的林木病虫害辨识方法依赖于人工方法和传统图像处理技术，往往受限于人工判断和有限的特征提取能力，在准确性和效率方面存在限制；另外，技术人员缺口大，导致防控工作滞后，造成巨大的经济损失或超量用药，影响生态安全和生物多样性。基于深度学习的方法，通过构建深层神经网络，从大规模的图像和数据中自动学习复杂的特征与模式，实现更精确、快速的病虫害诊断。目前，基于深度学习的林木病虫害诊断技术涉及使模型更好地适应不同病虫害诊断的多任务学习、减少数据需求和训练时间的迁移学习、确定病虫害位置的目标检测算法、清晰界定受感染区域与健康区域的语义分割等算法。基于深度学习的林木病虫害诊断技术研究趋向于模型的高效性与通用性、实时监测与反馈、自动化与智能化、数据融合和多模态信息、AI 大模型等。

基于深度学习的林木病虫害诊断主要集中于林木病虫害图像识别、监测灯诱或信息素引诱害虫进行害虫计数以实现种群动态监测和虫情测报、借助卫星高分影像和无人机影像（可见光、多光谱和高光谱数据）监测森林病虫害面积的变化和预测病虫害发生趋势。

“基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是美国、中国和印度（表 1.2.9）。该研究前沿的核心论文篇均被引频次分布在 45.00~123.00，除埃及和印度外，其他国家篇均被引频次均超过了 50.00。核心论文的主要产出机构（表 1.2.10）方面，伊斯兰堡通信卫星大学、苏丹王子大学、华盛顿大学、夏威夷大学和夏威夷大学马诺阿分校的核心论文数及被引频次较多。施引核心论文的主要产出国家（表 1.2.11）方面，中国、印度和美国排在前三位。施引核心论文的主要产出机构（表 1.2.12）方面，中国科学院、伊斯兰堡通信卫星大学和迪肯大学排在前三位。国家间的合作较为普遍、网络复杂（图 1.2.7），其中埃及、印度和沙特阿拉伯的合作相对更为紧密。由图 1.2.8 可知，同一国家内的不同机构及不同国家的各机构间均存在一定的合作关系，如首尔大学与滑铁卢大学，夏威夷大学与夏威夷大学马诺阿分校，华盛顿大学、苏丹王子大学和伊斯兰堡通信卫星大学间均有紧密合作。

基于深度学习的林木病虫害诊断能够更精确地识别和预测病虫害。目前，基于深度学习的林木病虫害诊断研究还存在数据不平衡和标注困难、模型泛化能力不强、数据隐私和安全保护不足等问题。因此未来需要加强对林木病虫害模型的高效性与通用性、多模态信息及数据的深入挖掘研究，如探究基于 AI 大模型的林木病虫害识别方法，集成病虫害图像、三维形态特征、遥感影像及 DNA 信息等的多模态信息融合与识别，群体学习与跨地区合作、基于病虫害区域智能监测网络的大数据分析及预警系统、模型可解释性与可视化研究等（图 1.2.9）。

表 1.2.9 “基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	5	27.78	436	87.20	2019.4
2	中国	5	27.78	263	52.60	2019.4
3	印度	4	22.22	196	49.00	2020.2
4	沙特阿拉伯	3	16.67	249	83.00	2021.0
5	巴基斯坦	2	11.11	219	109.50	2020.0
6	澳大利亚	2	11.11	124	62.00	2019.0
7	巴西	2	11.11	105	52.50	2020.0
8	埃及	2	11.11	90	45.00	2020.0
9	加拿大	1	5.56	123	123.00	2017.0
10	韩国	1	5.56	123	123.00	2017.0

表 1.2.10　“基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国矿业大学（北京）	2	11.11	122	61.00	2019.5
2	伊斯兰堡通信卫星大学	1	5.56	150	150.00	2020.0
3	苏丹王子大学	1	5.56	150	150.00	2020.0
4	华盛顿大学	1	5.56	150	150.00	2020.0
5	夏威夷大学	1	5.56	131	131.00	2018.0
6	夏威夷大学马诺阿分校	1	5.56	131	131.00	2018.0
7	首尔大学	1	5.56	123	123.00	2017.0
8	滑铁卢大学	1	5.56	123	123.00	2017.0
9	延世大学	1	5.56	123	123.00	2017.0
10	埃默里大学	1	5.56	123	123.00	2021.0

表 1.2.11　“基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	395	28.66	2021.2
2	印度	217	15.75	2021.5
3	美国	215	15.60	2020.9
4	沙特阿拉伯	109	7.91	2021.5
5	英国	78	5.66	2021.1
6	韩国	77	5.59	2021.1
7	巴基斯坦	76	5.52	2021.4
8	澳大利亚	62	4.50	2020.7
9	意大利	55	3.99	2020.9
10	西班牙	47	3.41	2021.4

表 1.2.12　“基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	34	17.62	2021.4
2	伊斯兰堡通信卫星大学	25	12.95	2021.3
3	迪肯大学	17	8.81	2019.3
4	苏丹王子大学	16	8.29	2021.0
5	西北理工大学	16	8.29	2021.1
6	华盛顿大学	15	7.77	2021.9
7	诺维阿应用科学大学	14	7.25	2021.9
8	阿卜杜拉国王科技大学	14	7.25	2021.9
9	沙特国王大学	14	7.25	2021.8
10	中南大学	14	7.25	2021.4

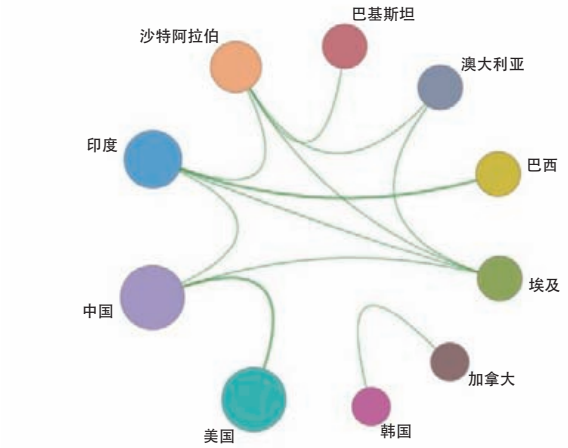

图 1.2.7 “基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿主要国家间的合作网络

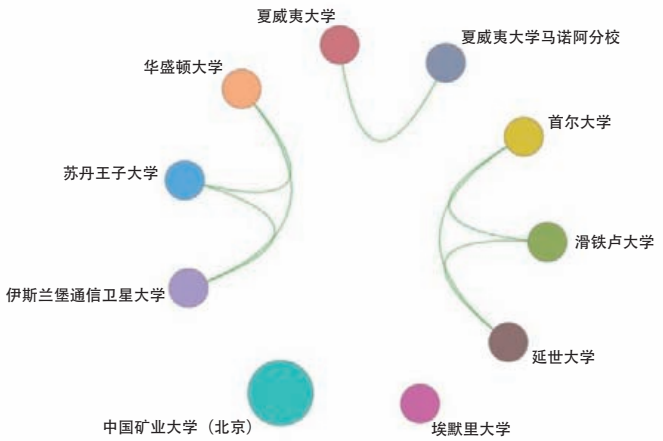

图 1.2.8 “基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿主要机构间的合作网络

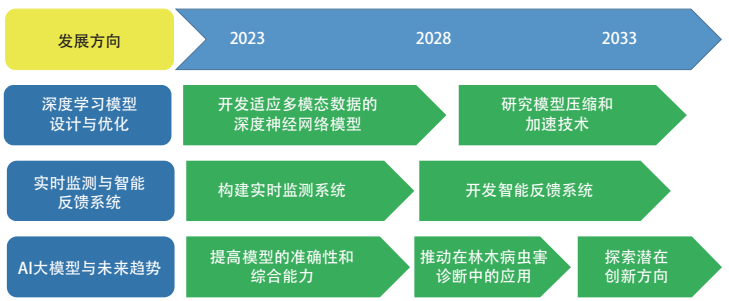

图 1.2.9 “基于深度学习的林木病虫害诊断”工程研究前沿的发展路线

2　工程开发前沿

2.1　Top 11 工程开发前沿发展态势

农业领域的 Top 11 工程开发前沿主要涉及农业绿色发展、智慧农业、农业工程等方向，并且体现多学科的交叉应用（表 2.1.1）。其中，与农业绿色发展相关的开发前沿包括“作物绿色超高产栽培技术”“基于结构生物学的绿色农药分子设计”“园艺作物高品质种质资源开发与利用”“堆肥过程有机质高效转化与污染物减控协同技术”“林木废弃物生物炼制”；与智慧农业相关的开发前沿包括“无人农场关键技术”“水产动物生态化繁育技术”；同时，基因编辑技术的深入应用是科研人员热衷的研究对象，相关研究前沿包括“畜禽基因组选配育种技术”“作物基因新型编辑器开发与应用”。各前沿涉及的核心专利 2017—2022 年公开情况见表 2.1.2。“基于结构生物学的绿色农药分子设计”的平均被引数高达 19.61，说明农业绿色

表 2.1.1　农业领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	作物基因新型编辑器开发与应用	4 658	63 027	13.53	2020.3
2	作物绿色超高产栽培技术	181	437	2.41	2019.7
3	园艺作物高品质种质资源开发与利用	88	137	1.56	2020.3
4	基于结构生物学的绿色农药分子设计	111	2 177	19.61	2018.8
5	堆肥过程有机质高效转化与污染物减控协同技术	797	6 983	8.76	2018.9
6	新型高效动物疫苗创制	52	119	2.29	2019.0
7	饲料的预消化发酵生物加工制备	73	76	1.04	2019.3
8	畜禽基因组选配育种技术	856	1 587	1.85	2020.0
9	无人农场关键技术	1 000	3 541	3.54	2019.7
10	林木废弃物生物炼制	46	71	1.54	2019.5
11	水产动物生态化繁育技术	52	25	0.48	2020.6

表 2.1.2　农业领域 Top 11 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	前沿名称	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	作物基因新型编辑器开发与应用	281	455	695	807	1 128	1 292
2	作物绿色超高产栽培技术	20	24	43	23	39	32
3	园艺作物高品质种质资源开发与利用	10	10	7	7	26	28
4	基于结构生物学的绿色农药分子设计	36	18	20	14	11	12
5	堆肥过程有机质高效转化与污染物减控协同技术	176	183	187	125	65	61
6	新型高效动物疫苗创制	6	17	9	12	8	0
7	饲料的预消化发酵生物加工制备	0	23	21	15	9	5
8	畜禽基因组选配育种技术	85	106	142	138	205	180
9	无人农场关键技术	127	171	144	167	219	172
10	林木废弃物生物炼制	9	10	6	2	7	12
11	水产动物生态化繁育技术	5	1	3	5	25	13

发展近年来得到了科研人员的广泛关注。“作物基因新型编辑器开发与应用”的核心专利最多，公开量达4 658 件（2022 年高达 1 292 件），引用量高达 63 027，远高于其他开发前沿。“新型高效动物疫苗创制”的核心专利最少，在 2022 年未出现核心专利。

（1）作物基因新型编辑器开发与应用

基因编辑是指对生命遗传物质进行精确插入、删除或替换的遗传操作技术。基因编辑技术通过对生物体内功能基因或调控序列进行精准编辑，实现对目标基因的修复、有利基因的强化和有害基因的清除等，最终达到改进生物体功能的目的。作为当前最具颠覆性、引领性的生物育种前沿技术，基因编辑技术已成为发达国家和跨国种业公司的优先发展方向，是当前全球农业生物技术领域竞争的制高点。利用基因编辑技术，我国科学家实现了多种作物重要农艺性状的遗传改良，创制出新的优异种质。但由于基因编辑底盘核酸酶（如 Cas9、Cas12a 等）原始核心专利被美国等少数国外机构所垄断，我国作物基因编辑产品的产业化应用存在核心专利受制于人的潜在风险。因此，打破国外基因编辑技术底盘工具的专利垄断，挖掘具有我国自主知识产权的新型基因编辑底盘核酸酶，在作物中开发相应的基因敲除、碱基编辑、DNA 片段插入和替换等基因编辑技术体系，对保障我国基因编辑技术产业安全具有重要意义。

（2）作物绿色超高产栽培技术

作物绿色超高产栽培是指稳靠达到农田生态环境友好、资源高效利用、作物品质优良、单位面积产量可重演或突破所在区域顶级水平的栽培工程技术模式。

我国农产品需求量大，而人均耕地等资源少，因此在有限的耕地上探求作物更高的产量无疑是契合国情的基本方向。长期以来，我国在大田作物超高产栽培上已有多方面的探索，已涌现出较多高产典型，创造了不少超高产纪录。但以往多专注于单产的突破，实践中对秸秆全量还田固碳减排、肥水药剂绿色高效利用的关注不够，对超高产优质高效协同形成规律与机理也缺乏研究，形成的超高产栽培技术稳定性差，在大面积生产上难以复制与推广。因此，在新时期我国更为迫切地需要提高农产品自给率的形势下，针对上述问题深入研究大田作物绿色超高产规律与技术就显得格外重要。其核心科技问题主要包括：① 大田作物绿色超高产形成规律及扩库强源畅流机理与调控途径；② 绿色超高产种植方式与栽培新模式；③ 超高产秸秆全量无污还田土壤固碳培肥技术；④ 超高产体制下肥水药剂绿色高效利用机理与技术；⑤ 区域化绿色超高产全程机械化栽培技术集成与可复制性示范。

通过作物栽培学的自主创新及与生理学、环境生态学、信息学、机械工程学等前沿科学的交叉融合，创建中国特色作物绿色超高产栽培新理论、新技术，实现大田作物产量、品质、生产效率与生产效益的协同突破，作物综合生产能力提升 30% 以上，将有效推进我国作物生产现代化。

（3）园艺作物高品质种质资源开发与利用

园艺种质资源是指携带不同种质的园艺植物的总称，包括各种园艺作物的栽培种（变种、栽培种和类型）、野生种、野生和半野生近缘种，以及人工创造的品种或品系或遗传材料等。园艺种质资源是园艺优质种质挖掘与创新、园艺作物遗传育种与产业发展的物质基础。我国是众多园艺作物的起源地，拥有丰富的园艺种质资源，但对园艺种质资源尤其是高品质资源的开发利用仍显不足。其核心技术需求主要包括：① 园艺作物高品质种质资源的收集、评价与利用，建立高品质园艺作物种质资源库；② 园艺作物表型的多性状、高通量、精准化鉴定技术创新与应用；③ 野生种质资源中高品质相关基因的挖

掘与应用技术，高品质重要基因的功能解析与调控网络；④ 通过有性杂交、物理与化学诱变、基因工程等手段，创制园艺作物高品质种质资源。相关技术的突破将极大地推动我国高品质园艺作物育种工作的发展。

（4）基于结构生物学的绿色农药分子设计

农药开发的传统方法是从各种化学起始物衍生出大量的先导化合物，然后直接在生物体上测试，通过设计—合成—测试—分析循环的不同轮次来进行优化，最终获得新的农药。据统计，成功开发一个新农药，需要合成 14 万个化合物，历时超过 10 年，投资近 3 亿美元，且研发成本和周期还在不断上升。而基于分子靶标的三维结构信息进行农药分子设计，能够快速地发现候选化合物，已经成为新型绿色农药研发的主流方法。在基于靶标结构的绿色农药分子设计中，主要技术方向包括以下两方面。首先，获得靶标的三维结构信息以及靶标分子与活性小分子之间的相互作用信息是进行分子设计的前提。通过分析靶标活性位点的结构特征、参与小分子结合的关键残基和不同物种靶标结构的差异性，能为高效、特异性的绿色农药设计提供基础。近年来，随着冷冻电镜等结构生物学技术的快速发展，越来越多的农药分子靶标的结构得到了解析，如几丁质合成酶、鱼尼丁受体等，但是可供使用的农药分子靶标的结构仍然较少，许多农药的分子靶标和结构信息匮乏，需要进一步推进相关的研究。其次，基于结构生物学的分子设计技术是缩短研发周期的关键。在分子设计中，需要综合考虑苗头化合物的虚拟筛选、从苗头化合物到先导化合物的优化、化合物的成药性分析、物理化学性质及毒理学性质预测、候选化合物选择等多个关键环节，构建基于结构生物学的绿色农药分子设计体系和平台。近年来，蓬勃发展的人工智能技术也为分子设计提供了新的机会，将人工智能技术与先进的分子设计方法结合，将进一步提升绿色农药创制效率。

（5）堆肥过程有机质高效转化与污染物减控协同技术

堆肥过程有机质高效转化与污染物减控协同是指通过人工控制，在一定的水分、物料配比和氧气浓度条件下，功能微生物将原料中的有机质发酵转变为稳定腐殖质的过程，并在这个过程中促进腐殖化进程，减少因矿化作用或者堆肥环境造成的温室气体、臭气等污染气体排放。其核心技术需求主要包括：① 筛选兼具木质纤维素降解与腐殖质合成功能的微生物，研发以生物炭为载体的复合微生物菌剂，实现堆肥过程有机质定向腐殖化与污染气体减排协同；② 基于以废治污理念，筛选不同堆肥阶段调控腐殖化与污染物减控最为适宜的添加材料，进而构建并优化分阶段材料介导技术体系，实现堆肥过程靶向调控；③ 探明物理材料、化学材料、生物材料等外源材料介导的污染气体排放微生物驱动机制，阐明污染物排放规律，创新污染气体靶向调控与养分固持技术；④ 研发膜堆肥供风系统、监测系统、远程控制装备和系统，创新纳米多孔碳支架薄膜等在内的智能膜材料。相关技术的突破是保障国家农业有机废弃物安全资源化利用的关键，将为农业资源生态开发提供技术支撑和解决方案。

（6）新型高效动物疫苗创制

动物疫苗是一种用于保护动物免受特定疾病或病原体感染的生物制剂。通过引入灭活或致弱的病原体、部分组分或遗传信息，激活动物的免疫系统产生免疫保护反应，以提高动物对疾病的抵抗力。我国当前畜牧业养殖规模、饲养密度持续增长，伴侣动物数量增多，重大动物疫病和人兽共患病严重危害行业稳定发展与人类健康，而高效安全的疫苗免疫是疫病防控的核心手段之一。相较于欧美发达国家，我国在动物新型疫苗原创技术平台、抗原筛选与递送、佐剂制备上创新水平相对不足，提升空间较大。当

前该领域技术方向和发展趋势主要包括：新型疫苗筛选和递送通用技术研发；动物新型疫苗精准靶位筛选与设计；兼具安全性和有效性的黏膜免疫疫苗、亚单位疫苗、基因缺失标志疫苗、多表位疫苗、活载体疫苗、核酸疫苗、转基因植物可饲疫苗等新型疫苗开发；可区分野毒感染与免疫的疫苗策略及配套鉴别诊断试剂盒研发；完善的动物疫病监测和疫苗免疫效果评价体系构建；动物疫苗高效低成本的制备工艺、稳定保存等产业化关键技术的自主开发等。相关技术的突破将为国家重大动物疫病的防控以及净化根除提供技术支撑和解决方案。

（7）饲料的预消化发酵生物加工制备

饲料预消化技术是低抗、无抗饲养和个性化特色畜产品市场需求增加的必然结果。饲料的生物预消化发酵是通过酶解或微生物发酵技术对饲料进行预消化，将大分子营养物质降解为易被动物吸收的小分子物质，降低饲料中的有毒有害物质和抗营养因子，改善饲料适口性，增加饲料中粗蛋白质含量，提高饲料营养物质消化吸收效率，促进畜禽高效生长。饲料的预消化发酵生物加工制备体系主要包括：① 解析预消化饲料原料特性，依据原料空间结构和化学键类别判断其潜在消化关键点，明确所需关键酶；② 筛选优质安全的发酵菌株，深入研究其产酶种类与特性，挖掘产酶基因并调控高效表达，包括菌酶协同等；③ 优化发酵工艺，调控温度、pH 值、时间等发酵条件，创造良好的发酵环境，充分发挥酶的高催化效率与潜质；④ 评价应用效果，通过体内外、多层次畜禽养殖和验证试验，多层次评估预消化发酵产物的有效性和安全性。开发安全健康、高效环保的新型饲料产品，对促进畜禽养殖业高效可持续发展、提高畜牧业经济效益具有重要意义。

（8）畜禽基因组选配育种技术

畜禽基因组选配（genomic mating，GM）育种技术是指利用待选种用个体的基因组信息实施优化的选种和选配，可以控制群体近交的增长速率，实现长期且可持续的遗传进展。随着基因组选择技术的发展，在追求性状极致遗传进展的同时，群体的遗传多样性显著降低，限制了其他性状的选择空间，同时造成高产动物之间的亲缘系数较高，存在近交衰退的风险。由此，基于基因组信息的最优化选配技术逐渐受到重视。利用基因组信息，在控制近交、保持群体遗传多样性和最大化遗传进展等方面综合考虑，制定可持续选择的育种规划。目前，美国奶牛育种理事会已在奶牛群体中开展基因组选配的应用，相较于随机交配，基因组选配技术可使母犊牛价值提高 78 美元 / 头。利用 GM 实现种用动物的优化选择与选配，既需要考虑种用动物自身的遗传，也需要考虑配偶间的遗传关系和互补性，以及一些品种特有的特征和特性，从而使群体遗传杂合度的降低、近交系数的增加以及选择世代间遗传背景基因频率的改变都最小化。因此，GM 是一个非常复杂的问题。目前的研究大多考虑单一性状的加性遗传效应，多性状系统以及非加性遗传效应将是未来的研究方向。除优化选配方案外，GM 方法还可以应用于以下方面：① 发现未知的祖先或纠正不准确的家系；② 估计杂交动物或确认品种纯度的品种构成；③ 在基因组水平避免近交和估计非加性遗传效应；④ 发现和监测新的缺陷或经济性状的个体；⑤ 预测高产或低产个体出现的概率等多种情形或应用领域。GM 适用于在珍稀甚至濒危地方物种中构建 GM 核心育种体系，也可用于构建高产动物 GM 核心育种体系，这将为在优化选育中推广并应用 GM 奠定技术基础。

（9）无人农场关键技术

目前，我国农村劳动力老龄化、女性化、副业化日趋严重，“谁来种地”已成为我国农业和世界农业共同面临的问题。实践证明，采用智能农机和智慧决策管理等无人农场技术，可以大幅度提高劳动生产率、

土地产出率和资源利用率。解决“谁来种地”的有效途径是发展智慧农业，无人农场则是实现智慧农业的重要途径。无人农场关键技术包括：① 数字化感知技术，包括无人农场的作业环境、作业对象和作业机械信息的精准感知技术，以及实现全环节、全流程数字化的物联网技术；② 智能化决策技术，结合大数据、云计算、人工智能等技术，开展数据挖掘、知识发现等技术研究，实现农场生产决策智能化；③ 精准化作业技术，包括智能农机装备技术、多机协同技术、自主驾驶技术和精准作业技术，实现无人化智能装备自主精准作业；④ 智慧化管理技术，包括农作物生长管理、农机管理和农场管理，实现农业生产耕、种、管、收高效协同作业以及农场生产全流程智慧化管理。无人农场关键技术的突破将为解决“谁来种地”的问题提供技术支撑和解决方案，加快无人农场规模化应用，促进智慧农业发展。

（10）林木废弃物生物炼制

林木废弃物生物炼制，又称林木生物质炼制（相较于石油炼制而言），是以木材采伐和加工过程产生的废弃木质纤维生物质为原料，采用热化学、生物等处理方法生产液体燃料（燃料乙醇、生物柴油等）、平台化学品（糠醛、糠醇等）、饲料添加剂、生物基材料等产品的技术，包括生物转化和热化学转化两条路线。生物转化是以微生物或酶为催化剂，结合工业生物技术手段，将生物质绿色化转化的技术，其主要研究方向包括：以黄酮类、单宁类、萜类、苯丙素类等活性组分为主的林源次生代谢产物提取、分离和利用技术；以乳酸、乙二醇、丁二酸、呋喃二甲酸等材料前驱单体开发为主的制备技术；以生物天然气、纤维素乙醇、丁醇等燃料化学品制备为主的燃料制备技术。热化学转化是以热解、液化、气化等方式实现木质纤维转化的技术，其主要研究方向包括：以高品质燃气、先进碳材料前驱体等制备的热解气碳联产技术；以糠醛、酚类等平台化学品及液体燃料等制备的液化技术；以平台化学品为单体或以纤维素、木质素等为基体的生物基功能材料制备技术。近年来，随着生物炼制技术革新，我国在基础理论创新、关键核心及前瞻技术储备等方面存在不足，未来行业发展的主要方向包括：① 以原料利用多元化、转化体系高效化和产品高值化为主要目标，从可再生原料到终端产品的全产业链技术体系构建；② 研发生物转化及热化学转化交叉耦合技术，及其关键装备开发与技术体系构建。

（11）水产动物生态化繁育技术

水产动物生态化繁育技术是指通过减少人为操作，模拟自然产卵环境，维护亲本的动物福利，减少亲本损耗，使亲本可重复利用，做到“模拟自然，少人操作”。其理念是力求让水产动物在模拟的生态环境下自然受精，少用或者不用激素催产，尽量少人为干预收集精子和卵子，让水产动物繁育回归自然。近年来，随着养殖产业的迅猛发展，我国水产动物苗种需求急剧增长，而传统的繁育操作不利于亲本的持续性利用，带来巨大的经济损失，也不利于动物福利；此外，人工激素的使用不仅影响水产动物正常的生理活动，同时也带来环境污染的风险。因此，开展水产动物生态化繁育是产业向绿色生态化转型的重要策略。水产动物生态化繁育的核心技术包括：① 生态化亲本培育技术；② 模拟自然生态条件催产和受精；③ 生态化孵化和苗种培育。相关技术的突破将促进水产动物繁育向生态化转型，推动生态渔业高质量发展。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　基于结构生物学的绿色农药分子设计

基于结构生物学的绿色农药分子设计主要是指利用农药分子靶标的三维结构信息，理性地、精准地设

计开发绿色农药。绿色农药创制是一项十分复杂的多学科交叉集成的系统工程，具有投资大、周期长和风险高的特点。据统计，利用传统方法成功开发一种新农药，需要合成 14 万个化合物，历时超过 10 年，投资近 3 亿美元，而且近年来研发成本和周期还在不断上升。如果能够通过结构生物学的方法获得靶标的关键位点信息，结合计算机辅助药物设计方法对关键位点进行高通量的虚拟筛选和精准设计候选化合物，就能缩短研发周期、降低研发成本。

蛋白质的结构生物学和计算机辅助药物设计研究始于 20 世纪 60 年代，将两种技术结合形成基于结构生物学的药物设计最初主要应用在医药开发，在农药领域的应用较晚。然而，自 2013 年 Lamberth 等在 *Science* 上发表的文章《Current challenges and trends in the discovery of agrochemicals》中指出“Structure-based design is a growing discipline within crop protection research（基于结构的农药设计是作物保护研究领域中一门不断发展的学科）”以来，基于结构生物学的绿色农药分子设计已经成为新农药创制的主流方法，并成功创制了一批新型的绿色农药。例如，基于琥珀酸脱氢酶（SDH）的结构，通过药效团连接碎片虚拟筛选方法（PFVS），设计开发了对水稻纹枯病、马铃薯晚疫病等具有良好防效的氟苯醚酰胺和氯苯醚酰胺；基于对羟基苯基丙酮酸双氧化酶（HPPD）的结构，通过靶向结合口袋关键残基 Gln293 构象变化的分子设计策略，开发了具有全新骨架结构的除草剂喹草酮和甲基喹草酮；基于脱落酸（ABA）受体结构，通过虚拟筛选的方式，筛选到了新的 ABA 受体激动剂 Opabactin（OP）。因此，基于结构生物学的绿色农药分子设计已在农药研发领域占据重要地位，并取得了许多成功的案例，这一方法的应用为寻找高效、环境友好的农药提供了新思路和工具。

基于一个分子靶标的结构，可以设计开发出数十种乃至上百种农药。以杀虫剂为例，目前全球超过 80% 的杀虫剂是基于四个结构明确的分子靶标开发的，分别是烟碱乙酰胆碱受体、乙酰胆碱酯酶、GABA 门控氯离子通道和压控钠离子通道。近年来，冷冻电镜技术和人工智能技术的兴起，为基于结构生物学的绿色农药分子设计与开发带来了前所未有的机遇。冷冻电镜技术的应用使得许多之前难以研究的农药分子靶标的结构得到了解析，如苯甲酰脲类农药的潜在靶标几丁质合成酶以及双酰胺类农药的靶标鱼尼丁受体。这一技术的突破使得我们能够更深入地了解农药与靶标之间的相互作用，为农药设计提供了更准确的基础。此外，人工智能技术不仅能够用于靶标结构的预测，还为农药分子设计方法的迭代和创新注入了新的活力，这一技术的发展有望进一步加快农药创制的进程。综上所述，冷冻电镜技术和人工智能技术的发展为基于结构生物学的绿色农药设计与开发提供了巨大的推动力。随着这些技术的不断进步和应用，我们可以期待更多高效、环境友好的农药的创制，为农业生产和环境保护做出积极贡献。

“基于结构生物学的绿色农药分子设计”相关核心专利的主要产出国家、主要产出机构、主要国家间的合作网络和主要机构间的合作网络分别见表 2.2.1、表 2.2.2、图 2.2.1 和图 2.2.2。核心专利公开量排名前三的国家是美国（54 件，占比为 48.65%）、丹麦（24 件，占比为 21.62%）和德国（16 件，占比为 14.41%）。中国有 7 件专利，排名第五，占比为 6.31%。美国、丹麦、瑞典、德国和澳大利亚之间有合作关系，其他国家间没有合作。核心专利产出最多的机构是诺维信公司（29 件），加利福尼亚大学和拜耳公司分别排在第二和第三位。被引数比例排名前四的机构是诺维信公司（50.44%）、加利福尼亚大学（13.64%）、Concentric Ag 公司（7.58%）和 Inocucor 科技公司（7.58%）。平均被引数最高的机构是诺维信公司，达到 37.86。拜耳公司与巴斯夫股份公司，英国环境、食物及乡郊事务部与杜伦大学，Concentric Ag 公司与

表 2.2.1　“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	54	48.65	1 064	48.87	19.70
2	丹麦	24	21.62	944	43.36	39.33
3	德国	16	14.41	146	6.71	9.12
4	英国	8	7.21	41	1.88	5.12
5	中国	7	6.31	21	0.96	3.00
6	澳大利亚	3	2.70	47	2.16	15.67
7	比利时	2	1.80	42	1.93	21.00
8	新西兰	2	1.80	0	0.00	0.00
9	加拿大	1	0.90	33	1.52	33.00
10	瑞典	1	0.90	10	0.46	10.00

表 2.2.2　“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	诺维信公司	29	26.13	1 098	50.44	37.86
2	加利福尼亚大学	10	9.01	297	13.64	29.70
3	拜耳公司	10	9.01	87	4.00	8.70
4	巴斯夫股份公司	9	8.11	113	5.19	12.56
5	纳幕尔杜邦公司	9	8.11	79	3.63	8.78
6	英国环境、食物及乡郊事务部	8	7.21	41	1.80	5.12
7	杜伦大学	8	7.21	41	1.88	5.12
8	AgroSpheres 公司	7	6.31	84	3.86	12.00
9	Concentric Ag 公司	5	4.50	165	7.58	33.00
10	Inocucor 科技公司	5	4.50	165	7.58	33.00

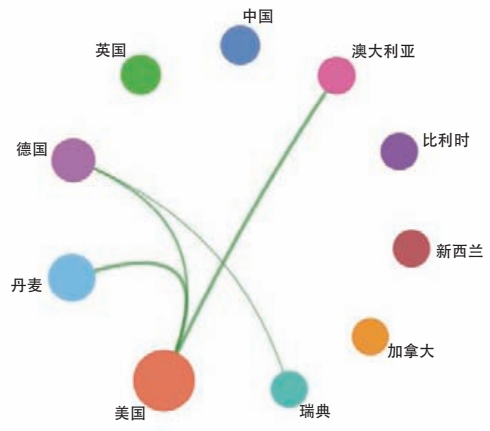

图 2.2.1　“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿主要国家间的合作网络

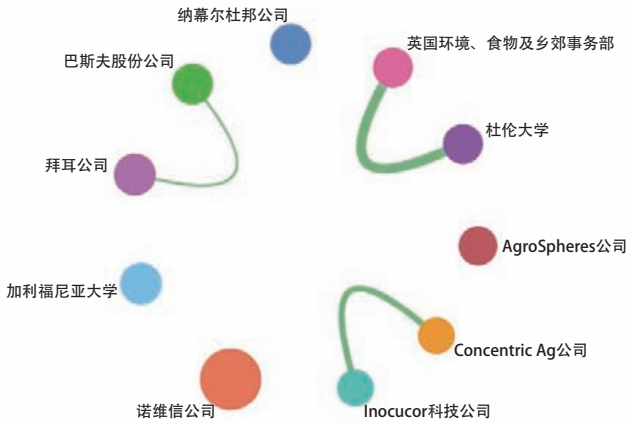

图 2.2.2　“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿主要机构间的合作网络

图 2.2.3　“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿的发展路线

Inocucor 科技公司之间有合作关系。

图 2.2.3 为“基于结构生物学的绿色农药分子设计”工程开发前沿的发展路线。未来 10 年，该工程开发前沿有望在以下两个方面取得进展。一是技术创新。随着人工智能、计算机辅助技术和大数据等新兴技术的不断发展，基于结构生物学的绿色农药分子设计领域也在不断创新。例如，可以利用人工智能和计算机辅助技术来开发新的农药分子设计方法和合理药物设计新平台；基于计算机辅助设计平台，构建覆盖广泛化学空间的小分子化合物库和发展高通量筛选方法，设计出具有易于修饰和衍生的新型农药分子骨架。二是环境保护。绿色农药分子设计也需要考虑对环境的影响。例如，可以通过开发基于靶标抗性预测的药物合理设计新方法，从源头上降低新农药创制抗性和交互抗性的风险。此外，还可以通过研究农药在环境中的代谢行为和代谢产物的安全性，以及代谢半衰期等因素来评估农药分子的环境安全性。总之，基于结构生物学的绿色农药分子设计领域在不断创新和发展，旨在通过技术创新和环境保护来实现更安全、更高效、更环保的农药生产。这一领域仍然面临着许多挑战，需要不断探索和创新才能取得更大的进展。

2.2.2　饲料的预消化发酵生物加工制备

饲料预消化技术是低抗、无抗饲养和个性化特色畜产品市场需求增加的必然结果。饲料的生物预消化发酵是通过酶解或微生物发酵技术对饲料进行预消化，将大分子营养物质降解为易被动物吸收的小分子物质，降低饲料中的有毒有害物质和抗营养因子，改善饲料适口性，增加饲料中粗蛋白质含量，提高饲料营

养物质消化吸收效率，促进畜禽高效生长。预消化饲料既有蛋白原料（发酵豆粕、发酵棉籽蛋白、烘爆大豆、水解鱼蛋白粉、棉籽酶解蛋白、小麦水解蛋白），又有能量原料（烘爆玉米、预糊化大米），是饲料产品的重要组成成分。按照饲料产品产值的 20% 计算，预消化原料产值的潜力高达 2 000 亿元。

我国饲料预消化发酵技术的发展历程大体可概括为三个阶段：第一阶段，20 世纪 80 年代的糖化饲料、青贮饲料等；第二阶段，20 世纪 90 年代将益生菌制成菌剂作为饲料添加剂加入基础日粮中；直到发展到现第三阶段的微生物发酵预消化饲料。近些年来，由于畜产品的社会需求量大大增加，造成优质蛋白质饲料原料缺乏以及长期使用抗生素产生的危害日益凸显，饲料预消化发酵技术得到了迅速发展。目前饲料预消化发酵在畜牧生产中已经开展了广泛的研究和应用，如在日粮中添加乳酸菌发酵液体饲料、葡萄皮发酵饲料等能够改善猪的肠道健康，提高生长性能；在蛋鸡养殖中，基础日粮中添加豆粕蛋白发酵饲料能够增加产蛋率、降低料蛋比和粪便中氨气的浓度。

饲料的预消化发酵生物加工制备体系主要包括：① 解析预消化饲料原料特性，依据原料空间结构和化学键类别判断其潜在消化关键点，明确所需关键酶；② 筛选优质安全的发酵菌株，深入研究其产酶种类与特性，挖掘产酶基因并调控高效表达，包括菌酶协同等；③ 优化发酵工艺，调控温度、pH 值、时间等发酵条件，创造良好的发酵环境，充分发挥酶的高催化效率与潜质；④ 评价应用效果，通过体内外、多层次畜禽养殖和验证试验，多层次评估预消化发酵产物的有效性和安全性。开发安全健康、高效环保的新型饲料产品，对促进畜禽养殖业高效可持续发展、提高畜牧业经济效益具有重要意义。

“饲料的预消化发酵生物加工制备”相关核心专利的主要产出国家和机构分别见表 2.2.3 与表 2.2.4。核心专利公开量排名前三的国家是中国（64 件，占比为 87.67%）、美国（6 件，占比为 8.22%）和韩国（2 件，占比为 2.74%）。各主要产出国家间没有合作关系。核心专利产出最多的机构是 Locus IP 公司（4 件），青岛农业大学排在第二位（2 件），其他机构核心专利产出均为 1 件。被引数比例排名前四的机构是 Locus IP 公司（10.53%）、纳幕尔杜邦公司（6.58%）、中国水产科学研究院淡水渔业研究中心（6.58%）和南京市水产科学研究所（6.58%）。平均被引数最高的机构是纳幕尔杜邦公司、中国水产科学研究院淡水渔业研究中心和南京市水产科学研究所，均为 5.00。南京市水产科学研究所与中国水产科学研究院淡水渔业研究中心有合作关系，其他机构间无合作关系（图 2.2.4）。图 2.2.5 为“饲料的预消化发酵生物加工制备”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3　“饲料的预消化发酵生物加工制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	64	87.67	62	81.58	0.97
2	美国	6	8.22	13	17.11	2.17
3	韩国	2	2.74	0	0.00	0.00
4	斯洛伐克	1	1.37	1	1.32	1.00

表 2.2.4 “饲料的预消化发酵生物加工制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 %	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	Locus IP 公司	4	5.48	8	10.53	2.00
2	青岛农业大学	2	2.74	1	1.32	0.50
3	纳幕尔杜邦公司	1	1.37	5	6.58	5.00
4	中国水产科学研究院淡水渔业研究中心	1	1.37	5	6.58	5.00
5	南京市水产科学研究所	1	1.37	5	6.58	5.00
6	杭州更蓝生物科技有限公司	1	1.37	3	3.95	3.00
7	河北省农林科学院旱作农业研究所	1	1.37	3	3.95	3.00
8	开封嘉骏生物科技有限公司	1	1.37	3	3.95	3.00
9	深圳合民生物科技有限公司	1	1.37	3	3.95	3.00
10	湖北希普生物科技有限公司	1	1.37	2	2.63	2.00

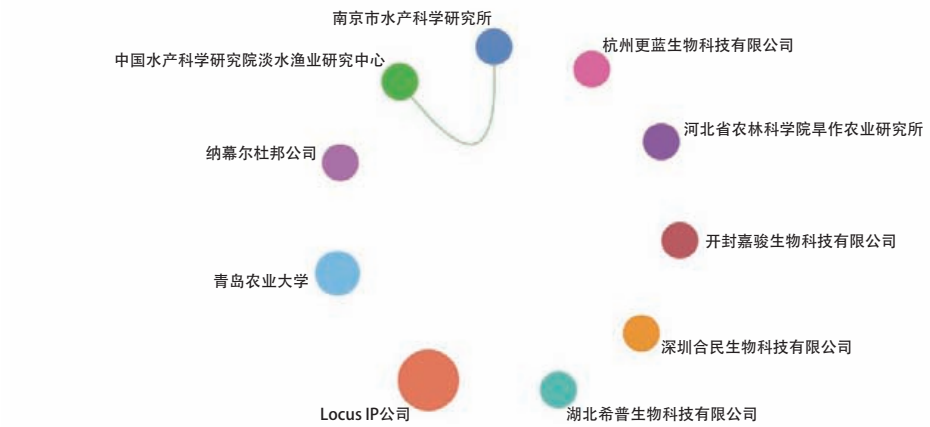

图 2.2.4 “饲料的预消化发酵生物加工制备”工程开发前沿主要机构间的合作网络

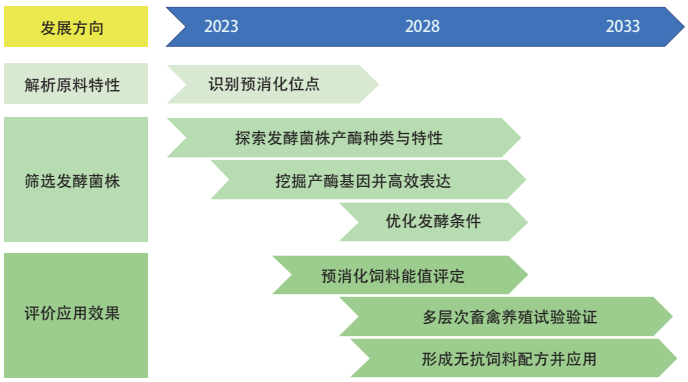

图 2.2.5 “饲料的预消化发酵生物加工制备”工程开发前沿的发展路线

2.2.3　水产动物生态化繁育技术

水产动物为人民群众提供了重要的优质蛋白质和优质脂肪。近年来开展的鱼类、贝类、虾蟹类等育种工作，不仅大大提高了产量，同时也提升了养殖产品的品质。随着人民群众对优美生态环境需求的日益增长，水产动物繁育亟须由传统方法向生态化转型。例如，我国养殖产量最大的草鱼在繁殖过程中需要进行激素催产和人工授精。在此过程中有可能损伤亲鱼内脏，也易造成皮肤感染，造成大量亲鱼产后死亡，不利于亲鱼的持续性利用，带来巨大的经济损失，也不利于动物福利；此外，人工激素的使用不仅影响鱼类正常的生理活动，同时也带来环境污染的风险。水产动物生态化繁育的目的是通过减少人为操作，模拟自然产卵环境，维护亲本的动物福利，减少亲本损耗，使亲本可重复利用，做到“模拟自然，少人操作”。相较于传统繁育技术，生态化繁育起步较晚。目前尝试的多种生态化繁育方案已经获得部分进展，有效地保护了优质亲本资源。生态化繁育的目标是通过模拟自然生态化的繁育条件，力求让水产动物在模拟生态环境下自然受精，少用或者不用激素催产，少用人为干预以收集精子和卵子，让水产动物繁育回归自然。

水产动物生态化繁育的优势主要表现在以下方面。① 亲本损伤低。相比于传统的人工繁育，水产动物生态化繁育仅仅需要构建亲本原生环境，少用或者不用人工激素，尽量避免采用人工干预授精，可以使亲本损失降到最低。② 环境友好。动物生态化繁育技术在繁殖过程中严格控制催产激素的用量，避免对环境造成负担。③ 成本较低。提高了亲本在催产后的存活率，为后续的繁育保存了大规模的亲本资源，且动物生态化繁育技术仅需要少量的人工操作，降低了人力成本。④ 动物福利。传统繁育技术涉及的人工操作较多，而生态化繁育技术通过拟生态化发展，有益于保障鱼类福利。综上，水产动物生态化繁育特别适合亲本资源宝贵的养殖品种，是推动绿色发展、符合生态文明建设要求的重要技术手段，是具有巨大潜力的水产动物繁育策略。

水产动物生态化繁育是随着生态、环保理念兴起而出现的新技术和研究热点，已经在部分水产动物繁育中开展研究，并取得了重要进展。然而，由于发展时间较短，其尚处于初级阶段。自 2020 年以来，水产动物生态化繁育领域有近 52 项成果发表，这些研究多集中于部分可以在人工养殖条件下自主排卵、受精的物种等。而对于需要人工催产的物种特别是鱼类的研究鲜有报道，其滞后原因包括：大多数良种场繁育工作研究人员和操作人员适应了高强度、高产出的苗种产出操作，为了追求短期的利益，忽略了生态效益；对水产动物生态化繁育的理念认识较为薄弱，未能开展相应的系统研究；水产养殖物种较多，对每一物种开展相关研究并建立生态化繁育技术体系需要较长期的研究，而生态化繁育研究起步较晚。

为克服困难促进水产动物生态化繁育技术发展，目前亟须：① 开展生态化繁育技术研究，突破技术瓶颈，针对重点养殖物种，明确生态化繁育条件的关键因子、参数，最终形成低成本、标准化、易操作的生态化繁育技术流程；② 构建生态化繁育技术体系，在建立生态化繁育技术流程的基础上，进一步开展小试和中试，根据不同物种、地域、养殖模式进行规模化试验，取得系统的生态化繁育模式；③ 在主要繁育基地、苗种场开展生态化繁育技术示范推广，建立高质量的生态化繁育苗种场，为实施水产动物生态化繁育技术推广提供标准化的范例。此外，由于繁育工作涉及亲本、子代、人工等消耗，需要大量的资金投入，应促进研究机构和育种公司进行长期稳定的合作和投入。

“水产动物生态化繁育技术”相关核心专利主要产出国家和主要产出机构分别见表 2.2.5、表 2.2.6。各主要产出机构间无合作。图 2.2.6 为“水产动物生态化繁育技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.5 “水产动物生态化繁育技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	52	100	25	100	0.48

表 2.2.6 “水产动物生态化繁育技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	安徽省农业科学院水产研究所	2	3.85	0	0.00	0.00
2	深圳市兴日生实业有限公司	2	3.85	0	0.00	0.00
3	重庆文理学院	1	1.92	4	16.00	4.00
4	江苏粤海饲料有限公司	1	1.92	4	16.00	4.00
5	浙江省海洋水产养殖研究所	1	1.92	4	16.00	4.00
6	华南农业大学	1	1.92	3	12.00	3.00
7	西南大学	1	1.92	2	8.00	2.00
8	天津市水产研究所	1	1.92	2	8.00	2.00
9	绵阳市安州区新民农业科技有限公司	1	1.92	1	4.00	1.00
10	青岛瑞滋海珍品发展有限公司	1	1.92	1	4.00	1.00

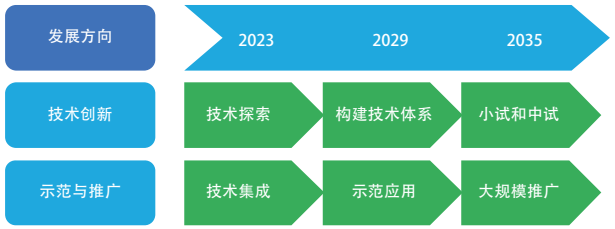

图 2.2.6 “水产动物生态化繁育技术”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：张福锁

专家组：

陈　建　陈　威　陈源泉　戴景瑞　戴兆来　董朝斌　付梦姣　高　辉　高元鹏　郭伟龙　韩丹丹
韩建永　韩　军　郝格非　胡　炼　胡　群　胡小平　胡雅杰　李道亮　李德发　李　虎　李九玉
李天来　李扬阳　刘德俊　刘　军　刘　俊　刘少军　刘　伟　刘　杨　罗锡文　齐明芳　沈建忠
汤陈宸　王桂荣　王　晖　王军辉　王军军　王　奎　王小艺　韦　维　魏海燕　魏　可　吴孔明

武振龙　叶　俊　臧　英　张福锁　张海鹏　张洪程　张守攻　张　帅　张小兰　张彦龙　张　涌
赵金标　周　磊　周　毅　朱齐超

课题组：

初晓一　董朝斌　郜向荣　韩丹丹　胡　盼　李红军　李云舟　刘德俊　刘　军　刘晓娜　刘　杨
齐明芳　师丽娟　孙会军　王军军　姚银坤　臧　英　张海鹏　赵　杰　周丽英　周　毅　朱齐超

执笔组：

陈　建　陈　威　董朝斌　戴兆来　付梦姣　高　辉　高元鹏　郭伟龙　韩丹丹　郝格非　胡　炼
胡小平　胡雅杰　胡　群　刘　军　刘　俊　刘　伟　刘　杨　李　虎　李九玉　李扬阳　罗锡文
齐明芳　王桂荣　王军军　王　奎　王小艺　韦　维　魏海燕　魏　可　武振龙　叶　俊　张福锁
张洪程　张　帅　张彦龙　张　涌　赵金标　周　磊　周　毅

八、医药卫生

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

医药卫生领域组所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及基础医学、临床医学、生物医学工程、生物信息学、免疫学和发育生物学等学科方向，包括“复杂疾病的多组学特征研究”“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”“衰老重编程”“器官移植免疫稳态调控及重塑”“阿尔茨海默病的单克隆抗体疗法”“生物大分子相分离和无膜细胞器”“灵长类类器官构建及发育机制研究”“人类泛基因组与疾病泛基因组”“染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制”。各前沿所涉及的核心论文 2017—2022 年的发表情况见表 1.1.2。

（1）复杂疾病的多组学特征研究

复杂疾病是指由多种遗传和环境因素共同驱动的疾病类型。由于缺乏精准治疗手段，复杂疾病严重影响人们的生命健康，带来巨大的社会负担。因此有必要进一步深入研究复杂疾病的特征，探索精准诊疗策略。随着科技的进步，高通量组学测序技术逐渐成熟，成为研究复杂疾病的重要途径。近年来，随着组学的检测维度不断拓展，整合多组学的方法不断被开发，结合多组学手段的研究模式成为挖掘复杂疾病特征、实现临床应用的重要发展方向。多组学在研究复杂疾病中的应用主要体现在：生物标志物的鉴定和治疗靶点的筛选。复杂疾病的多组学特征作为医学研究的重要前沿领域，世界多国均对其有较大的研究投入，并开展广泛合作。我国目前处于与国外同类研究跟跑到并跑的态势。未来仍需进一步构建标准化、大样本、多中心、时空配对的组学队列和生物样本库；利用新兴的组学技术、结合表型数据以全面评估组学特征；

表 1.1.1 医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	复杂疾病的多组学特征研究	9 428	848 396	89.99	2018.5
2	持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析	504	40 148	79.66	2018.2
3	人体核心微生物组及其与宿主互作机制	82	6 879	83.89	2018.6
4	衰老重编程	106	7 255	68.44	2019.1
5	器官移植免疫稳态调控及重塑	174	13 417	77.11	2018.8
6	阿尔茨海默病的单克隆抗体疗法	170	9 066	53.33	2019.0
7	生物大分子相分离和无膜细胞器	614	74 515	121.36	2018.7
8	灵长类类器官构建及发育机制研究	40	1 784	44.60	2020.3
9	人类泛基因组与疾病泛基因组	165	17 103	103.65	2018.6
10	染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制	290	32 576	112.33	2018.2

表 1.1.2　医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	复杂疾病的多组学特征研究	2 626	2 421	2 178	1 439	631	133
2	持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析	193	138	96	49	24	4
3	人体核心微生物组及其与宿主互作机制	20	20	21	15	6	0
4	衰老重编程	22	24	19	16	17	8
5	器官移植免疫稳态调控及重塑	37	45	37	25	26	4
6	阿尔茨海默病的单克隆抗体疗法	35	40	29	29	23	14
7	生物大分子相分离和无膜细胞器	118	174	162	115	40	5
8	灵长类类器官构建及发育机制研究	2	3	6	5	17	7
9	人类泛基因组与疾病泛基因组	43	43	37	29	11	2
10	染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制	99	82	69	31	9	0

利用网络分析、机器学习进一步整合绘制复杂疾病相关影响通路以及关系网络；运用多种体内外模型探索精准诊疗新策略。

（2）持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析

持续性病毒感染反复发作且难以治愈，甚至可引发肿瘤，严重危害人类健康。持续性病毒感染与再激活机制非常复杂，病毒基因复制调控及其与宿主免疫系统的相互作用等多种因素均参与其中。阐明相关机制将为相关感染性疾病的防治提供新靶点和新策略，不仅为已知的病毒性疾病提供更有效的治疗方法，而且可为应对未来出现的新型病毒提供战略储备。持续性病毒感染机制涉及病毒基因组的长期持续存在、对细胞和机体防御机制的逃逸、对病毒致细胞病变作用的抑制等。在持续性病毒感染过程中，病毒可能被再激活，产生病理效应，使得疾病过程更为复杂。目前，针对持续性感染的主要干预策略包括靶向病毒复制和靶向病毒特异性免疫反应两大路径。持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析是病毒学研究的重要前沿领域，科技先行国家均已取得显著研究成果。我国在该领域处于与国际同类研究并跑的态势。需从系统生物学视角发展基因编辑、多组学、类器官、新型人源化动物模型等新技术，从分子、细胞、器官、动物及人体水平揭示病毒潜伏与持续性感染、病毒再激活、炎 - 癌转化、病毒与宿主相互作用及致病的机制，发现有效的干预靶点和新型诊疗标识，发展新型抗病毒策略。

（3）人体核心微生物组及其与宿主互作机制

人体微生物是维持人体健康的关键因素，识别人体内普遍存在、维持宿主内环境稳态的核心微生物至关重要。目前，随着高通量多组学测序技术、无菌动物等新技术的发展，一系列研究进展旨在通过研究人体核心微生物与其宿主的复杂网络关联及互作机制，实现对维持宿主内环境稳态的微生物相关靶点的识别及干预，从而促进人类健康。主要的研究方向包括：鉴定人体核心微生物组；阐明人体核心微生物组维持宿主健康的作用机制；制定基于核心微生物组的健康干预治疗策略；设计个性化核心微生物组导向的疾病预防治疗方案。人体核心微生物组及其与宿主互作机制研究作为医药卫生领域的重要前沿方向，世界多国均有较大的研究投入。我国目前处于跟跑的态势，未来应进一步发挥我国人群数量优势，建立高水平、以人体微生物为核心的资源平台，绘制中国人群的微生物组图谱，全面表征中国人群核心微生物的组成和功

能。此外，研究人员还应加强人类遗传学、高通量培养组、人工智能等研究技术方法在解码人体核心微生物组特征中的应用，进一步推动机制研究的转化，加快微生物组研究的发展；布局活体生物药，积极开展临床试验，加快微生物临床应用推广并扩大产业化规模；鼓励个性化定制，最终促进人类微生物组在精准医疗领域的应用和转化。

（4）衰老重编程

人口老龄化及衰老相关疾病高发是全球共同面临的重大挑战。衰老是增龄伴随的机体功能性衰退的过程，具有程序化、异质性、复杂性和传染性等特点。近年来，衰老重编程研究蓬勃发展，实现了在细胞、组织或活体水平延缓甚至逆转衰老过程，从而为开发衰老及相关疾病的干预策略奠定基础。目前，衰老重编程研究主要涵盖以下方面：① 综合运用生物学、医学和计算机信息学等交叉学科技术，揭示细胞、器官、机体衰老及退行病变的演化规律，鉴定衰老的生物标志物；② 利用基因编辑技术和靶向递送技术，调节衰老相关基因表达，重启年轻化分子调控网络；③ 通过引入重编程因子等手段，改变细胞染色质状态，重塑表观遗传印记；④ 利用衰老细胞清除药物、衰老相关分泌表型抑制剂或衰老疫苗，靶向清除衰老细胞，促进组织再生；⑤ 通过改善肠道菌群稳态及多样性、调节营养信号分子表达，重塑机体组织微环境。近年来，我国科学家在衰老机制与干预领域取得了一系列重要成果，尤其是在鉴定衰老标志物和衰老调控基因、开发衰老干预技术和发展表观遗传重编程策略等方面。然而，目前衰老重编程的研究主要集中在动物模型上，缺乏临床转化医学研究。因此，针对性地开展临床试验，评估衰老干预策略的有效性和安全性，有助于推动人类衰老干预的基础和转化医学研究，积极应对人口老龄化带来的严峻挑战。

（5）器官移植免疫稳态调控及重塑

器官移植是挽救终末期器官衰竭患者的重要治疗策略，移植排斥及长期使用免疫抑制剂带来的毒副作用仍是临床器官移植的重要瓶颈问题，维持移植后免疫稳态及重塑是决定器官移植患者预后的关键因素。诱导免疫耐受策略较常规免疫抑制药物的长期应用具有明显的治疗优势，可减少或避免免疫抑制药物导致的毒副作用，减轻患者负担，提高生活质量。靶向诱导免疫耐受是生物医药及科学研究领域的前沿方向，同时面向临床重大需求。器官移植后机体免疫应答反应复杂多样，不同类型免疫反应（急性 / 慢性排斥、细胞 / 抗体介导排斥）状态下，器官移植物、外周免疫器官和外周血中的免疫细胞发挥复杂且异质的作用。各类免疫细胞及其亚群分别表现为免疫促进和抑制的差异表型与功能，共同构成复杂而精细调控的免疫微环境及其网络。围绕器官移植免疫稳态调控及重塑的前沿问题，系统鉴定器官移植前后的全身及局部免疫应答动态变化时空特征，深入研究器官移植后不同排斥反应类型的免疫细胞和分子动力学特征和主要分子调控网络，解析器官移植物供受者免疫细胞动态变化及重构的时空演化及其与预后的关联性，建立器官移植后免疫耐受诱导及免疫稳态重塑的诊断和治疗体系，探索免疫稳态调控及重塑与机体抗肿瘤、抗感染免疫的时相关系及发展相关诊治策略，明晰不同免疫抑制剂对免疫稳态及重塑的影响特点及临床意义，从而指导临床精准调控免疫稳态的重建，实现器官移植后免疫稳态长期合理维持，进一步提高器官移植患者临床预后。

（6）阿尔茨海默病的单克隆抗体疗法

阿尔茨海默病（Alzheimer’s disease, AD）是以认知衰退和行为障碍为特征的神经退行性疾病。随着全球人口老龄化趋势加剧，阿尔茨海默病成为全球社会经济健康负担最重的疾病之一。阿尔茨海默病的发病机制复杂，至今仍未完全破译其具体机制。β 淀粉样蛋白（amyloid β-protein, Aβ）级联假说是目前阿尔茨

海默病发病机制中最为经典的假说。因此基于 Aβ 病理学，减少 Aβ 产生、降低 Aβ 集聚和增强 Aβ 清除这三类药物研究方向成为预防与治疗阿尔茨海默病的重要策略。其中，靶向增强 Aβ 清除的被动免疫疗法，即抗 Aβ 人源化单克隆抗体疗法成为前沿方向。多年来，全球药企投入巨额经费进行阿尔茨海默病药物的研发，但研发历程极其曲折，失败率远超过其他疾病领域。由于安全性问题或缺乏临床疗效证据，绝大多数以失败告终。2021 年，美国食品药品监督管理局（FDA）在有争议的情况下通过加速审批流程，重新批准人 IgG1 单克隆抗体阿杜那单抗（Aducanumab）上市，引发了激烈讨论。2022 年，针对 Aβ 寡聚体的抗体仑卡奈单抗（Lecanemab）发布Ⅲ期临床试验结果。该结果显示其可使阿尔茨海默病患者的认知能力下降速度减慢 27%，帮助处于阿尔茨海默病早期阶段的患者保持心智，达到主要终点和所有关键次要终点，且治疗副作用发生率较低，既能延缓疾病进程，又能改善临床症状。2023 年，FDA 批准 Lecanemab 上市。虽然 Lecanemab 的疗效及安全性仍需进一步探索，但不失为一个证明 Aβ 假说的成功范例，堪称阿尔茨海默病治疗领域近年来最为重大的进展之一。既往临床中对阿尔茨海默病的治疗以对症治疗为主，而无法延缓患者疾病进展。仑卡奈单抗的Ⅲ期临床研究数据取得阳性结果无疑为全球阿尔茨海默病相关的研究者、临床医生和患者带来了新的希望，将驱动整个业界向阿尔茨海默病的单抗药物治疗进行更多的投入，从而惠及广大的患者，助力临床诊疗实践。

（7）生物大分子相分离和无膜细胞器

细胞具有高度精细化的结构，以确保复杂的生化反应精确而有序地发生。因此对细胞内部精细结构的认知对于理解细胞的功能和调控至关重要。在真核生物细胞中，除了被磷脂膜包被的有膜细胞器外，还有多种由生物大分子自发聚集形成的无膜细胞器。无膜细胞器以其动态灵活性而迅速响应和调控一系列重要生理功能，如转录和翻译调控、信号转导等。因此了解无膜细胞器的作用机制以及其如何与有膜细胞器共同实现细胞区室化，成为生命科学领域的新前沿和挑战。近年来的突破性发现揭示了无膜细胞器生成的核心机制，即生物大分子通过多价互作形成的相分离现象。国际范围内跨学科的科学家团队正以前所未有的速度积极探索新型无膜细胞器及生理功能，深刻了解无膜细胞器的物化性质，以及其组装、调控和解体等复杂动态过程。此外，相分离的异常是多种重大恶性疾病（如癌症和神经退行性疾病等）的直接诱因。科学家们积极探索通过干预异常相分离来为一些目前无法有效干预的疾病提供新的治疗方法。而我国科学家在相分离和无膜细胞器领域的研究走在世界前列。展望未来，生物大分子相分离和无膜细胞器研究将继续引领生命科学的前沿。深入探索相分离现象的普遍调控机制和规律，进一步理解细胞结构和功能的复杂性，将掀起医学、生物技术、药物研发等领域的革命浪潮。

（8）灵长类类器官构建及发育机制研究

类器官是指小的、自组织的三维组织培养物，来源于干细胞的分化。类器官可以通过培养多能干细胞（PSC）或诱导性多能干细胞（iPSC）、胚胎干细胞（ESC）、成体干细胞（ASC）和来自健康供体或患者的肿瘤细胞来产生。业已建立了源自各种器官（大脑、视网膜、肺、胃、肝脏、胆管、胰腺和肾脏）的类器官。由于其在体外具有模拟特定组织结构的生物学和生理学特性的能力，学界对类器官使用的兴趣日益浓厚。类器官有望在组织形态发生和器官发生、再生医学和组织工程、药物治疗测试、毒理学筛选和疾病模型等不同研究方向提供体外建模的应用系统。类器官具有独特的优势，因为它们几乎可以模仿所有生理条件，并保存亲本的遗传稳定性。此外，类器官生长快，培养成功率高，可解决患者来源的肿瘤异种移植模型的低肿瘤形成效率的问题，有利于疾病建模和药物筛选研究，并可逆转致病突变以治疗由突变引起

的疾病。类器官模型保留了体内天然组织的组织学和基因表达特性，它们与天然组织的高度相似性使其成为细胞系和动物模型的宝贵补充，具有很高的临床价值和科学价值。类器官为研究人类的发育、生理和疾病提供了前所未有的机会，构建具有良好应用前景的新型临床前模型。然而，即使近期取得了进展，但在使用类器官进行研究方面仍然存在挑战，如缺乏标准化的培养条件、类器官的可用性有限、难以完全反映天然器官的复杂性。研究人员应专注于将该技术与其他先进技术和模型相结合，以进一步提高未来研究的准确性。在我国，类器官研究受到高度重视，并取得了实质性的进展，作为一项重大的技术突破被用于疾病模型的建立中，挖掘疾病诊疗的新靶标，探索诊疗新策略。

（9）人类泛基因组与疾病泛基因组

人类基因组数据是现代人类遗传学和基因组学研究的重要资源。随着新一代测序技术发展以及对个体全基因组测序数据不断增加，发现不同种族之间的基因组序列存在一定差异，表明现有的参考基因组尚无法反映人与人之间的基因组多样性，难以满足当下及未来对人类基因组特别是疾病基因组研究发展的需求，故提出开展泛基因组研究十分必要。泛基因组是体现某物种不同个体之间遗传物质变异的 DNA 序列集合，或者说是该物种所有个体的基因库。泛基因组研究涉及三个要素：核心基因、非必需基因和群种特异性基因。核心基因是指某物种所有个体均具备的基因。以人类为例，就是每一个人都有的基因。核心基因主导物种的基本生物学功能，并决定物种主要表型特征。非必需基因是指在一部分个体中存在，而在另一部分个体中缺失的基因。群种特异性基因是指仅出现在某个族群个体中的基因。因此，非必需基因与群种特异性基因不是决定生命基本活动所必需的基因，与对环境压力的适应性反应有关。泛基因组研究可发现大片段基因结构变异，或基因的“有或无”变异，此种变异可导致人类对某些疾病易感性增加。国内外已有几项令人瞩目的成果发布，包括美国科学家公布的首个人类泛基因组草图，中国科学家公布的 36 个少数民族泛基因组特征，以及中国科研人员利用自主构建的人类泛基因组分析流程（HUPAN）完成的全球首个中国人胃肿瘤泛基因组学特征。当前，泛基因组研究尚有许多分析技术瓶颈有待突破。泛基因组分析发现的新型基因变异与人类疾病的关系也需要深入研究。

（10）染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制

染色质动态修饰是指在染色质水平上发生的化学修饰变化，这些修饰可以影响基因表达的调控。常见的染色质动态修饰包括 DNA 甲基化、组蛋白修饰和非编码 RNA 等。染色质动态修饰在细胞发育、生理适应和疾病发生发展过程中起着重要的调控作用。它们可以调节基因的表达模式，使细胞能够适应不同的环境和生理需求。此外，异常的染色质动态修饰也与多种疾病的发生和发展密切相关，包括癌症、神经系统疾病和心血管疾病等。目前，染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制主要包括四个方面：一是基因表达调控，染色质动态修饰可以改变染色体的结构，进而影响基因的可及性和转录活性；二是组织特异性，不同细胞和组织在基因的表达模式上存在差异，这些差异部分是由染色质动态修饰所产生的；三是基因组稳定性，染色质动态修饰可以保护基因组免受外部环境和内部因素的损伤；四是转录调节，染色质动态修饰可以影响转录因子和其他调节因子的结合特异性，从而调节基因的转录活性。近年来，利用新兴的技术和方法，如高通量测序、基因组编辑技术和多组学技术，国内外在染色质动态修饰对组织器官发育的影响机制研究方面取得了更加深入和全面的认识。这些研究成果为“关联解析”染色质动态修饰的机制与功能、系统建立和解码表观遗传“关联信息”提供了重要的参考和启示。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　复杂疾病的多组学特征研究

复杂疾病是指由多种遗传和环境因素共同驱动的疾病类型，如自身免疫性疾病、神经退行性疾病、肿瘤、内分泌疾病、心血管疾病等。由于对复杂疾病的致病机制缺乏深入透彻的认识，目前仍缺乏有效、精确的治疗手段。随着人口老龄化等社会背景的变化，复杂疾病的患病率逐年上升，严重影响人们的生命健康，并给卫生系统带来巨大负担。因此，有必要鉴定生物标志物，发现新的治疗靶点，开发有效、个性化的治疗方法。既往使用的传统分析手段（如流行病学调研、临床指标分析等）难以分辨复杂疾病中的“病因 - 疾病多对多”现象且存在选择性偏倚等局限性。随着科技的进步，多种高通量、多组学测序技术逐渐成熟，现已广泛应用于医学研究。通过组学手段可能是未来研究复杂疾病的重要途径。

多组学是指利用高通量技术检测获得的、存在生物样本中的不同维度的数据信息，包括基因组、转录组、蛋白组、代谢组、蛋白修饰组、微生物组等。近年来，多组学技术飞速发展，新的组学维度不断被开发和研究。不断拓展的组学维度提供了更全面的疾病分子图谱，揭示了传统的全基因组关联分析（genome-wide association study, GWAS）之外的信息，比如挖掘到存在于非编码序列中的变异因素，揭示重要代谢分子在肿瘤进展中的价值等。除了增加组学维度以外，研究者还致力于开发整合多个组学维度数据的方法。例如，通过整合匹配的基因组和基因表达数据，在全基因组范围内识别能够影响基因表达水平的遗传变异，即表达数量性状基因座（expression quantitative trait loci, eQTL）的方法。充分利用这些多组学数据以及分析手段，是挖掘复杂疾病特征，并实现临床应用的发展方向。

多组学在研究复杂疾病中的应用主要体现在两个方面，即生物标志物的鉴定和治疗靶点的筛选。而无论是生物标志物还是治疗靶点的进一步探索，都需要建立在对疾病认识加深的基础上。一方面，通过对复杂疾病多组学数据的检测，研究者能够以差异分析的方式将不同维度组学特征与疾病相关联，以探索复杂疾病的发病机制、调控因素等。另一方面，也可以结合传统的流行病学和临床信息相关数据，探索外界因素影响疾病的具体分子机制及因果关系。最终通过整合研究结果，从影响发病的相关因素中筛选早期诊断的可能方式，从影响疾病发展的机制中探索精准治疗的方式和方法。目前，研究者正致力于克服多组学队列数量和样本的限制以及多平台组学数据标准化组合分析手段的不足，以达到更早诊断、更优治疗的目标。

当前，“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿中核心论文数排名前三位的国家分别是美国、中国和英国（表 1.2.1）。其中，中国核心论文占比为 26.39%，是该前沿的主要研究国家之一。从主要国家间的合作网络（图 1.2.1）来看，核心论文数排名前十的国家之间合作密切。

“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿中核心论文数排名前十位的机构来自美国、中国、英国和丹麦。其中排名前三位的机构来自美国和中国，分别是哈佛大学、中国科学院和加利福尼亚大学圣迭戈分校（表 1.2.2）。从主要机构间的合作网络（图 1.2.2）来看，各国科研机构之间有较强合作。

综合以上统计分析结果，对于“复杂疾病的多组学特征研究”这一前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势。

进一步深挖复杂疾病的多组学特征对深入认识、准确治疗复杂疾病具有重要意义。高质量队列的构建是研究复杂疾病多组学特征的基石。标准化、大样本、多中心、时空配对的组学队列的构建为后续研究提

供了丰富的研究维度和广阔的分析空间。目前，部分研究机构已通过密切的国际合作建立了相关的组织特异性多组学信息数据库，进一步推动了多组学整合研究的进步。此外，为了突破样本获取的局限，对诸如获取活检样本较困难的帕金森病、阿尔茨海默病等神经退行性疾病，结合表型数据（如影像学信息）以及构建体外类器官模型是现下可行的途径。在此基础之上，随着更多更精细的组学技术的出现，研究者对影响疾病的细胞亚群及其空间结构和作用机制有更加深层次的理解，如单细胞转录组、空间转录组、蛋白修饰组等。进一步，利用网络分析、机器学习等方法，对多平台队列和多维度组学信息进行整合加工，绘制复杂疾病相关影响通路以及关系网络，是挖掘其中潜藏信息的可靠手段。以上的新技术和更加丰富的组学资源，有助于在未来推动对复杂疾病的预防、诊断和治疗。“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿的发展路线如图 1.2.3 所示。

表 1.2.1 “复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	4 174	44.27	421 943	101.09	2018.5
2	中国	2 488	26.39	196 360	78.92	2018.8
3	英国	1 082	11.48	108 847	100.60	2018.6
4	德国	1 002	10.63	99 737	99.54	2018.7
5	加拿大	616	6.53	65 952	107.06	2018.6
6	法国	610	6.47	62 675	102.75	2018.5
7	意大利	554	5.88	49 721	89.75	2018.6
8	荷兰	535	5.67	58 463	109.28	2018.6
9	澳大利亚	517	5.48	46 441	89.83	2018.6
10	西班牙	456	4.84	40 483	88.78	2018.6

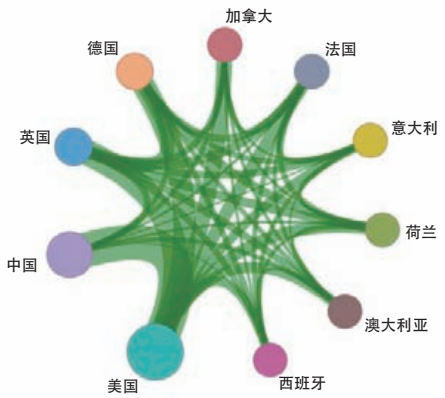

图 1.2.1 “复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2　“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	哈佛大学	495	5.25	65 133	131.58	2018.8
2	中国科学院	438	4.65	40 153	91.67	2018.9
3	加利福尼亚大学圣迭戈分校	248	2.63	32 491	131.01	2018.7
4	哥本哈根大学	226	2.40	25 923	114.70	2018.7
5	斯坦福大学	207	2.20	26 167	126.41	2018.9
6	密歇根大学	169	1.79	16 829	99.58	2018.8
7	浙江大学	166	1.76	13 933	83.93	2019.1
8	贝勒医学院	165	1.75	23 176	140.46	2018.8
9	宾夕法尼亚大学	165	1.75	17 229	104.42	2018.7
10	伦敦帝国理工学院	161	1.71	14 924	92.70	2018.6

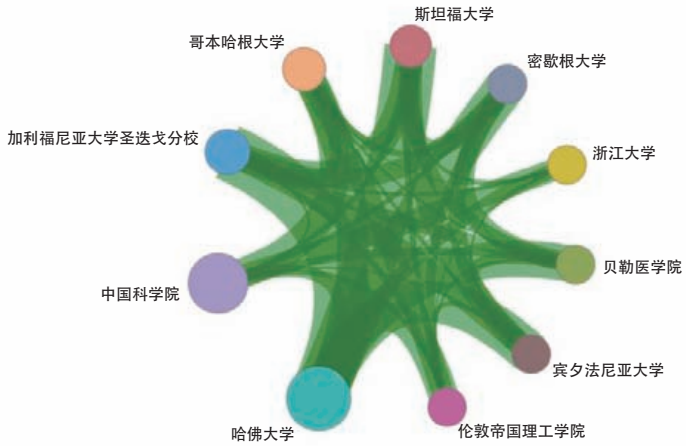

图 1.2.2　“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

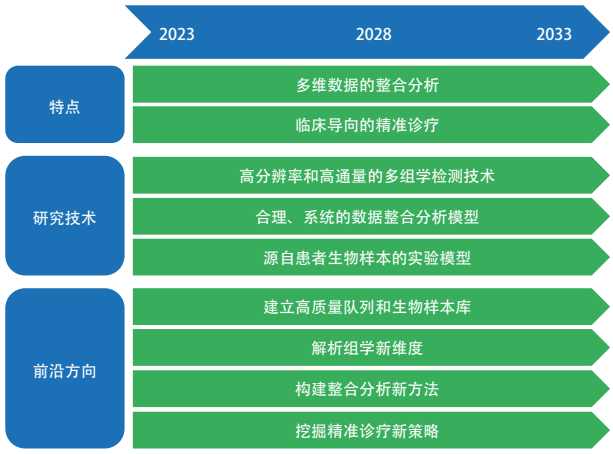

图 1.2.3　“复杂疾病的多组学特征研究”工程研究前沿的发展路线

1.2.2 持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析

病毒感染的结局由病毒复制与宿主防御系统间的相互作用决定，因此可形成急性感染（acute infection）和持续性感染（persistent infection）两类不同的临床表现。人类单纯疱疹病毒、巨细胞病毒、EB 病毒等疱疹病毒，乙型肝炎病毒，乳头瘤病毒，人类免疫缺陷病毒，丙型肝炎病毒等多种病毒可形成持续性感染，因此是医学病毒学研究重点关注的领域之一。有些病毒的持续性感染可不断复制产生子代病毒，如丙型肝炎病毒；有些则表现为潜伏感染（latent infection），在特定情况下可被再激活，产生子代病毒，如疱疹病毒。持续性病毒感染的建立取决于两个条件：一是病毒抑制其致细胞病变效应，避免被感染的宿主细胞死亡；二是病毒有效逃逸宿主的免疫清除（包括固有免疫和获得性免疫），从而可在宿主细胞内不断复制或者在感染细胞内潜伏。病毒再激活是指感染宿主细胞的潜伏期病毒进入裂解期，病毒再次复制和传播。持续性病毒感染引起的病程多为慢性或反复发作，难以治愈，甚至可引发肿瘤或自身免疫性疾病，严重危害人类健康并造成社会重大经济负担。持续性病毒感染与再激活机制非常复杂，准确了解相关机制，不仅可为相关感染性疾病防治提供新靶点、新策略以及更有效的治疗，更可为应对未来可能出现的新型病毒提供战略储备。

持续性病毒感染机制研究主要涉及病毒复制调控和免疫调节两方面。病毒复制调控与再激活的研究主要包括病毒基因组编码产物及其结构、功能与调控机制，宿主细胞内病毒基因组复制维持机制，病毒基因组转录复制调控机制，病毒基因组整合机制，病毒潜伏—裂解性感染转换机制，病毒致宿主细胞死亡方式及其调控机制，病毒感染致癌机制，宿主限制因子及其作用机制等；免疫调节方面的研究主要包括病毒抗原表达受限机制、病毒抗原变异机制、免疫赦免部位感染机制、病毒诱导免疫抑制机制、T 细胞等免疫细胞耗竭机制等。持续性病毒感染干预策略可分为两大类——靶向病毒复制和靶向病毒特异性免疫反应。靶向病毒复制主要是阻断病毒生命周期的特定阶段，包括靶向病毒本身或病毒复制所需的宿主因子；靶向病毒特异性免疫反应主要是恢复宿主有效免疫应答来消除病毒感染。

由于病毒学、免疫学、分子生物学、细胞生物学等学科的不断发展，在解析持续性病毒感染和再激活机制研究方面取得了显著进展。例如：人类免疫缺陷病毒可通过基因组整合以及高度变异等逃避免疫监视，持续感染淋巴细胞；水痘－带状疱疹病毒在多种特化细胞和中枢神经系统中处于免疫赦免状态，导致神经系统持续感染；乙型肝炎病毒可导致 T 细胞耗竭，形成持续性感染。靶向病毒复制是最常用的病毒感染干预策略，主要包括抗病毒化合物、干扰素和治疗性靶细胞修饰等。靶向病毒特异性免疫反应的干预策略尚未实现临床大规模应用，但广谱中和抗体、Toll 样受体激动剂和治疗性疫苗在动物模型与临床试验中已显示出令人鼓舞的初步结果。

当前，“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿中核心论文数位于前三位的国家分别是美国、中国和德国（表 1.2.3）。其中，中国核心论文占比为 34.33%，是该前沿的主要研究国家之一。从主要国家间的合作网络（图 1.2.4）来看，核心论文数排名前十的国家之间均有密切的合作关系。

“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿中核心论文数排名前十的机构来自美国、中国和英国。其中排名前三的机构来自美国和中国，分别是哈佛大学、美国国家过敏和传染病研究所和中国科学院（表 1.2.4）。从主要机构的合作网络（图 1.2.5）来看，美国科研机构间有较强合作，其他机构间有部分合作。

综合以上统计分析结果，对于“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”这一前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势。

表 1.2.3　“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	285	56.55	24 544	86.12	2018.2
2	中国	173	34.33	12 280	70.98	2018.3
3	德国	58	11.51	4 749	81.88	2018.6
4	英国	56	11.11	5 076	90.64	2018.7
5	法国	51	10.12	4 369	85.67	2018.4
6	加拿大	31	6.15	3 177	102.48	2018.0
7	日本	26	5.16	1 515	58.27	2018.5
8	澳大利亚	21	4.17	1 764	84.00	2018.6
9	荷兰	18	3.57	1 397	77.61	2018.0
10	比利时	16	3.17	1 087	67.94	2018.6

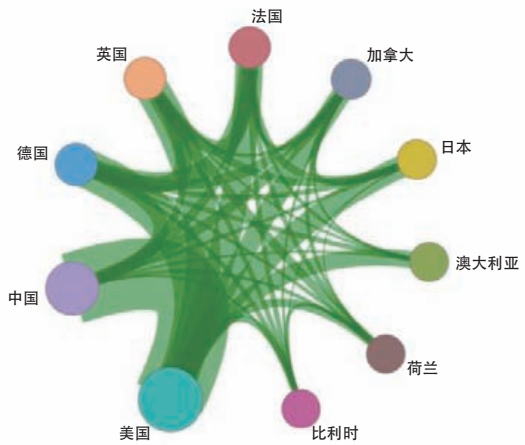

图 1.2.4　“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿主要国家间的合作网络

深入揭示持续性病毒感染和再激活机制亟须加强病毒学、免疫学、分子生物学、细胞生物学等基础学科与前沿生物技术的发展，以及与材料学和生物技术、工程技术间的深度交叉融合，大幅提升对持续性病毒感染和再激活机制的解析能力，开发有效抗病毒药物、免疫疗法、细胞疗法和新型疫苗等新一代病毒干预技术，有效支撑慢性或重大感染性疾病的防控与诊治需求。长期以来，对于持续性病毒感染和再激活机制的研究多是基于单个病毒或宿主基因、单个信号通路、单个干预靶标的研究，认识不够全面和深入，基础研究的科学发现难以转化到临床实践，需要从系统生物学的视角，利用多组学、人工智能、高通量筛选等新技术，全景化、动态性、跨尺度、多维度阐明相关机制。缺乏合适的细胞和动物模型更是制约了对相关机制的探索，类器官、人源化动物模型等新技术的出现可提供新的研究平台。在干预策略方面，基因编辑技术已成功应用于靶向多种病毒基因组，但在靶向效率、脱靶效应、递送平台、病毒突变逃逸等方面依然存在挑战；治疗性疫苗研发需紧密结合材料科学和工程技术，在抗原设计、递送系统、佐剂开发等关键环节取得突破；靶向阻断免疫检查点在抗人类免疫缺陷病毒感染上显示出一定的潜力，但生物标志物的选择、耐药性的产生以及可能的不良反应是亟待解决的问题。多项研究显示，过继性 T 细胞疗法在清除病毒感染及在干细胞移植后的抗病毒免疫上是有效的，其在治疗呼吸道病毒或免疫缺陷病毒的临床前研究中

已显示出一定的前景，相关疗法的适应证也将会逐步扩大，其安全性和有效性还需要进一步验证。图 1.2.6 为“持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.4 “持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	哈佛大学	50	9.92	5 480	109.60	2018.3
2	美国国家过敏和传染病研究所	31	6.15	2 259	72.87	2018.5
3	中国科学院	21	4.17	1 771	84.33	2018.4
4	中山大学	19	3.77	1 545	81.32	2018.2
5	华盛顿大学	18	3.57	2 472	137.33	2018.3
6	宾夕法尼亚大学	17	3.37	1 836	108.00	2018.4
7	加利福尼亚大学旧金山分校	16	3.17	1 646	102.88	2018.4
8	中国农业科学院	15	2.98	838	55.87	2018.9
9	杜克大学	14	2.78	1 079	77.07	2018.4
10	牛津大学	13	2.58	1 303	100.23	2018.9

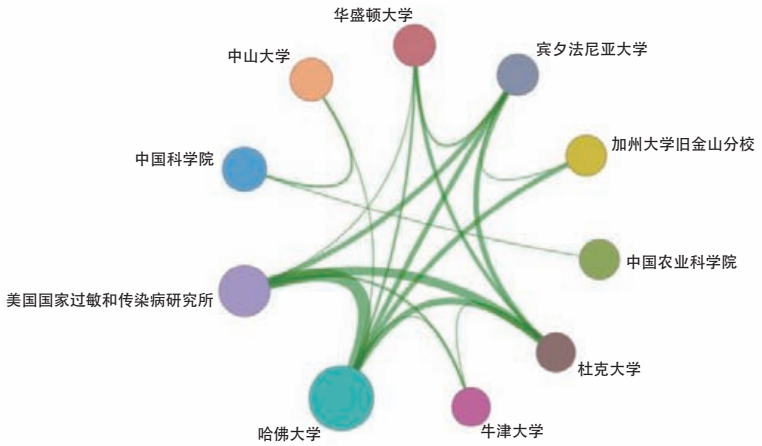

图 1.2.5 “持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿主要机构间的合作网络

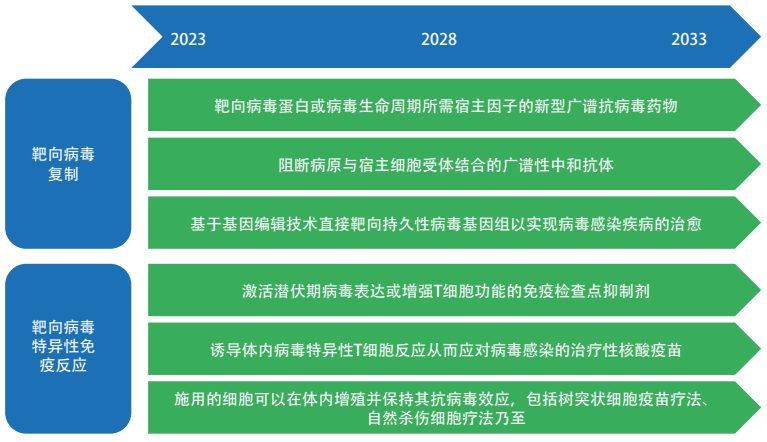

图 1.2.6 “持续性病毒感染和再激活机制及干预靶点解析”工程研究前沿的发展路线

1.2.3　人体核心微生物组及其与宿主互作机制

人体微生物通过参与人体的营养代谢、免疫调节、炎症反应以及内分泌调节等生理过程，与宿主之间形成共生关系，对维持人体健康起着关键作用。然而，由于人体微生物种类数量繁多，且与宿主相互之间的关系错综复杂，寻找影响人体健康的核心微生物组就成为学界关注的前沿热点。人体核心微生物组是指人类个体中普遍存在且对人体维持健康具有重要影响的微生物群落。但是，准确定义人体核心微生物组仍存在一定挑战，这主要体现在人体微生物在个体间的差异性巨大、微生物在个体内不稳定等方面。因此，揭示维持健康人群肠道稳态的核心微生物组、深入明晰核心微生物组与宿主互作机制非常重要；相关工作将对健康菌群状态的识别、复杂疾病发病机制的解析以及精准干预具有重要的理论价值和临床意义。

人体核心微生物组的探索和发掘仍存在较大挑战。该科学问题至今尚未解决是由诸多因素造成的，包括微生物间及其与宿主之间的共生互作机制尚不明晰、微生物组分析方法仍不成熟等。因此，未来的研究需要从宿主 - 菌群互作入手解析人体微生物组的决定因素；开发新的微生物组分析框架和方法，揭示健康人体微生物组的动态变化规律及因果关系；结合高通量培养组等新技术挖掘微生物组基因、组成、功能及互作网络对宿主健康的影响。从不同的角度进行探索，深化对人体核心微生物组的理解，阐明微生物组 - 宿主的互作机制，为疾病精准防治提供理论指导和数据支撑。

近年来，人们逐渐揭示了微生物与人类的共生关系，并发现肠道微生物与宿主共进化、共代谢的模式及其在维持机体代谢稳态中发挥的重要作用。目前世界范围内多项大科学计划，如美国人类微生物组计划（Human Microbiome Project）、荷兰微生物组计划（Dutch Microbiome Project）等绘制了不同地区的人类微生物组图谱，并基于宏基因组、宏蛋白质组、代谢组等多组学数据解析了人体微生物的基因与功能。此外，这些计划还探索了宿主遗传因素在微生物产生、成熟以及与宿主共进化过程中发挥的作用，揭示了人体微生物及其代谢物对调控机体生理病理状态的作用机制。与此同时，基于模式动物的实验验证为微生物组与人类疾病的关系研究提供了机制解析和因果证据支持。然而，现有人类核心微生物组的量化主要基于丰度的指标，这种类型的核心微生物组很可能忽视了一些在生态和功能上具有重要意义的微生物。此外，微生物与宿主关系的研究在很大程度上依赖于小样本人群或动物实验，且相关测序和分析方法均存在较大局限性。最后，由于饮食和生活方式等方面的巨大差异，来自西方人群的微生物组研究结果不一定适用于亚洲人群。

当前，“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿中核心论文发表数位于前三位的国家分别是美国、中国和法国（表 1.2.5）。其中，中国核心论文占比为 28.05%，是该前沿的主要研究国家之一。从主要国家间的合作网络（图 1.2.7）来看，核心论文数排名前十的国家之间均有密切的合作关系。

“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿中核心论文数排名前十的机构主要来自美国和欧洲国家。其中排名前三的机构来自美国和荷兰，分别是哈佛大学、加利福尼亚大学圣迭戈分校和瓦赫宁根大学与研究中心（表 1.2.6）。从主要机构间的合作网络（图 1.2.8）来看，部分机构之间有合作关系。

综合以上统计分析结果，对于“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”这一前沿，我国目前处于与国外同类研究跟跑的态势。未来应进一步发挥我国人群数量优势，建立高水平、以人体微生物为核心的资源平台，绘制中国人群的微生物组图谱，全面表征中国人群核心微生物的组成和功能。

人体核心微生物组的解析对于新型药物开发和复杂疾病的精准防治都有重要意义。识别人体核心微生

物组、解析其调控宿主生理病理状态的作用机制以及开发针对性的治疗策略是当前微生物组领域面临的主要挑战。要克服这些挑战，首先，需要结合新技术和新方法（如全基因组测序、单细胞测序、高通量培养组、前沿人工智能复杂网络分析算法以及器官芯片等）来帮助识别人体核心微生物组，探索核心微生物组对宿主健康的作用机制，并进行相关的临床转化。其次，新药物设计理念亦需跟进，使粪菌移植、基于益生菌的活体生物药、工程菌、益生元、靶向性营养干预等干预方法取得更多突破性进展。最后，整合宿主遗传信息解析核心微生物组的宿主遗传机制能够进一步推动基于微生物组的精准医疗进展；发现和运用微生物及微生物来源代谢物，开发新型个体化益生菌、益生元及后生元，提升肠道菌群的转化及应用价值，详见图 1.2.9。

综上所述，识别维持人体健康稳态的核心微生物组，并基于此开发相关的疾病精准治疗策略，需要不断推进技术的发展、优化针对核心菌群的干预策略，以及加强国际合作与交流，以实现人体微生物组领域的基础研究和临床转化的进一步突破。

表 1.2.5 “人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	33	40.24	2 980	90.30	2018.7
2	中国	23	28.05	2 065	89.78	2018.8
3	法国	15	18.29	1 925	128.33	2018.7
4	英国	15	18.29	1 730	115.33	2018.8
5	澳大利亚	13	15.85	1 605	123.46	2018.6
6	德国	10	12.20	1 511	151.10	2018.8
7	加拿大	10	12.20	1 370	137.00	2019.0
8	荷兰	9	10.98	1 343	149.22	2019.4
9	意大利	8	9.76	702	87.75	2018.6
10	印度	5	6.10	895	179.00	2019.2

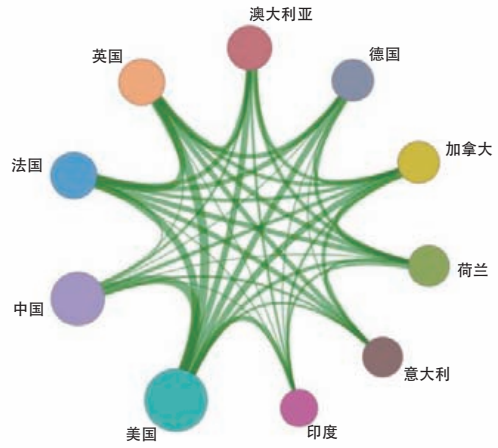

图 1.2.7 “人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6　“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	哈佛大学	5	6.10	279	55.80	2019.6
2	加利福尼亚大学圣迭戈分校	4	4.88	359	89.75	2019.2
3	瓦赫宁根大学与研究中心	3	3.66	996	332.00	2019.3
4	明尼苏达大学	3	3.66	759	253.00	2019.0
5	科克大学	3	3.66	534	178.00	2019.7
6	基尔大学	3	3.66	400	133.33	2017.0
7	赫尔辛基大学	3	3.66	397	132.33	2019.0
8	伦敦国王学院	3	3.66	227	75.67	2019.3
9	慕尼黑大学	3	3.66	222	74.00	2019.7
10	悉尼新南威尔士大学	3	3.66	217	72.33	2018.7

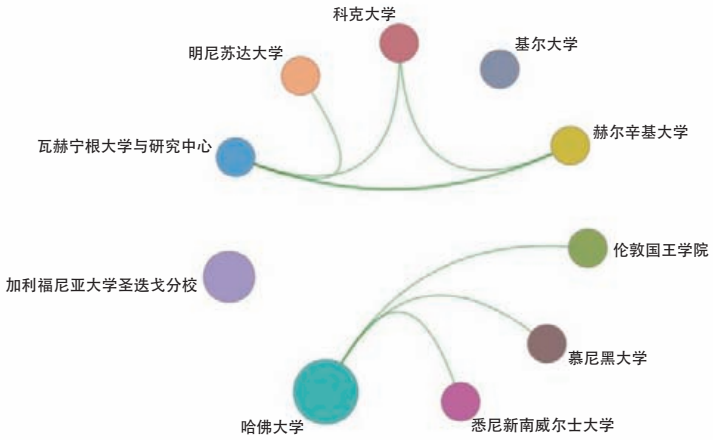

图 1.2.8　“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

图 1.2.9　“人体核心微生物组及其与宿主互作机制”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

医药卫生学领域 Top 10 工程开发前沿涉及基础医学、临床医学、药学、中药学、医学信息学与生物医学工程等学科方向（表 2.1.1），其中，新兴前沿包括“T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”“单细胞空间转录组技术”“嵌合抗原受体 NK 细胞疗法”“单分子蛋白质测序技术”“大语言模型在数字医疗中的应用”“表观遗传编辑技术”；作为传统研究深入的前沿包括“抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”“医学纳米机器人在肿瘤治疗中的应用”“合成免疫学技术”“小核酸药物研发”。各前沿相关的核心专利 2017—2022 年施引情况见表 2.1.2。

（1）T 细胞受体工程化 T 细胞疗法

T 细胞受体工程化 T 细胞疗法（TCR-T 细胞疗法）属于一种体外重定向细胞免疫疗法，主要通过将能特异性识别肿瘤细胞的抗原肽 – 主要组织相容性复合物（peptide-major histocompatibility complex, pMHC）的 TCR 基因转入到 T 细胞内，使其表达外源性 TCR，从而使相关 T 细胞改变特异性并具备杀伤肿瘤细胞的能力。2002 年，Rosenberg 团队率先发现，肿瘤浸润性淋巴细胞（TIL）经过体外扩增回输后，可以特异性杀伤肿瘤细胞，但由于在其他肿瘤中不易获取到 TIL，且获得所需治疗量的 TIL 扩增时间较长，从而使研究者探究在正常外周血淋巴细胞（PBL）上导入 TCR 基因是否可以用来治疗肿瘤。直至 2006 年，Rosenberg 团队首次证明了经过基因修饰的 TCR-T 细胞在治疗黑色素瘤时可以发挥显著临床效果，从而证明了 TCR-T 细胞疗法的可行性。经过 20 余年的飞速发展，TCR-T 细胞疗法已经在世界各地被用于实体瘤的临床疗效测试，且临床试验也显示了令人鼓舞的疗效。尽管如此，构建一个具备优秀亲和力和功能的 TCR-T 细胞来清除肿瘤细胞，并且防止肿瘤复发，仍然面临诸多挑战。这些挑战主要包括靶点 / 抗原的筛选、肿瘤免疫逃逸、脱靶和安全性、T 细胞耗竭和功能障碍。克服这些挑战，将是未来 TCR-T 细胞疗法取得临床成功的关键。同样是靶向 pMHC 的 TCR 药物，由 Immunocore 公司研发的能在体内重定向 T 细胞的双特

表 2.1.1 医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	T 细胞受体工程化 T 细胞疗法	429	1 447	3.37	2020.2
2	抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤	334	1 815	5.43	2019.9
3	单细胞空间转录组技术	162	942	5.81	2020.4
4	嵌合抗原受体 NK 细胞疗法	332	829	2.50	2020.5
5	医学纳米机器人在肿瘤治疗中的应用	2 505	5 842	2.33	2020.3
6	合成免疫学技术	431	726	1.68	2019.6
7	小核酸药物研发	1 723	3 078	1.79	2019.8
8	单分子蛋白质测序技术	398	2 302	5.78	2019.7
9	大语言模型在数字医疗中的应用	2 042	7 062	3.46	2020.7
10	表观遗传编辑技术	97	552	5.69	2020.2

表 2.1.2　医药卫生领域 Top10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	T 细胞受体工程化 T 细胞疗法	23	31	83	86	101	105
2	抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤	44	44	35	59	74	78
3	单细胞空间转录组技术	13	8	21	27	38	55
4	嵌合抗原受体 NK 细胞疗法	14	25	35	62	87	109
5	医学纳米机器人在肿瘤治疗中的应用	227	221	276	426	679	676
6	合成免疫学技术	63	73	72	57	86	80
7	小核酸药物研发	239	241	271	301	299	372
8	单分子蛋白质测序技术	54	56	56	76	89	67
9	大语言模型在数字医疗中的应用	62	99	203	355	630	693
10	表观遗传编辑技术	9	6	22	7	28	25

异性 T 细胞接合器 Kimmtrak，于 2022 年成为第一个获得 FDA 批准的 TCR 疗法。这意味着靶向 pMHC 的 TCR 疗法取得了具有里程碑意义的重大突破。因此，虽然 TCR-T 疗法目前还存在一些壁垒，但随着科研技术的发展，TCR-T 细胞疗法必将为人类攻克癌症带来新突破和希望。

（2）抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤

抗体偶联药物（antibody-drug conjugate，ADC）由三部分组成：① 抗体（antibody），负责有选择性地靶向肿瘤微环境；② 连接子（linker），负责连接抗体和偶联物；③ 偶联物（drug），发挥抗肿瘤活性的有效载荷。经典的 ADC 其偶联物为小分子细胞毒性药物，靶头为可特异性结合肿瘤相关抗原的单克隆抗体，实现对癌细胞的精确打击，可减少对正常细胞的伤害。目前，全球已有 15 款此类 ADC 药物获批上市：6 款用于血液肿瘤，9 款用于实体肿瘤，靶点涉及 CD33、CD30、CD22、CD79b、HER2、Nectin-4、Trop-2、BCMA、EGFR、CD19 和 TF。其中，5 款 ADC 在中国上市。伴随着多样化的偶联物的尝试，“抗体偶联万物”的概念得以提出。ADC 的偶联物部分可泛化为非细胞毒小分子药物、细胞因子、酶、寡核苷酸、细菌外毒素、生物聚合物、放射性核素、光敏剂等。在抗体部分，靶头也可由经典的单克隆抗体替换为纳米抗体、双特异性抗体等。近年来，人们发现经典的细胞毒性 ADC 可介导免疫原性细胞死亡，从而提高肿瘤组织免疫原性，促进免疫细胞的瘤内招募，实现对“冷肿瘤”的杀伤。基于此，细胞毒性 ADC 可联合肿瘤免疫疗法治疗恶性肿瘤。另外，当偶联物为免疫调节药物时，此类 ADC 可直接调节肿瘤免疫来治疗恶性肿瘤。

（3）单细胞空间转录组技术

随着精准医学治疗时代的到来，单细胞多组学技术正在推动癌症、发育生物学、微生物学、免疫学及神经科学领域向前发展，逐渐成为生命科学研究各类学科的焦点。但常规单细胞测序技术在将实体组织解离成单个细胞的过程中，不可避免地丢失了对器官与组织功能息息相关的空间构象信息。空间转录组学技术则通过整合单细胞和空间转录组测序，不仅能够获得转录组的表达信息，而且还能对表达特定基因的细胞进行定位、获得细胞组成与空间排列信息，从而更加精确地理解各种细胞的空间结构，以及构成这种结构的细胞间通信的潜在机制，最终能够揭示不同环境和器官系统中离散细胞亚群内部运行的方式。2020 年，

单细胞空间转录组技术被 Nature Methods 评为年度技术，进一步证实了该技术具有巨大的发展空间。未来，空间转录组技术将会在各个研究领域改变人们了解复杂组织的方式，特别是对病变组织和健康组织进行比较分析的单细胞空间转录组学研究有助于阐明预后、最佳治疗和潜在的治疗靶点。

（4）嵌合抗原受体 NK 细胞疗法

嵌合抗原受体 NK 细胞疗法（CAR-NK 细胞疗法）是指通过嵌合抗原受体（CAR）基因修饰 NK 细胞，赋予 NK 细胞靶向识别肿瘤细胞的能力，经过体外扩增后输注入人体，从而达到肿瘤治疗效果的一种细胞免疫疗法。嵌合抗原受体的基因线路包括编码能特异性靶向识别肿瘤细胞的 CAR（或 NKR/TCR）等胞外结构域及跨膜结构域和胞内信号结构域，并可插入能够增强细胞存活、促进免疫细胞浸润和抵抗肿瘤微环境的功能元件，通过病毒或非病毒体系递送到 NK 细胞内，经大规模体外扩增培养后输送到患者体内。CAR-NK 细胞疗法主要应用于肿瘤治疗领域，亦应用于自身免疫性疾病、感染性疾病及衰老等相关疾病的临床治疗。作为机体杀伤肿瘤的“天然职业杀手”，NK 细胞具有安全性好、通用和现货型的特点，其来源广泛、成本低，尤其在实体肿瘤治疗中显示出潜力。这些优势赋予 CAR-NK 细胞疗法广阔的市场应用前景和更好的工业化生产潜力。目前已有数十项 CAR-NK 细胞临床试验治疗正在进行中，已显示出安全性和有效性。这吸引了多家国际巨头投资布局 NK 细胞研发领域，全球市场规模持续增长。目前的免疫细胞疗法尚不能做到对免疫细胞在体内活动的精准可控调控，而把合成生物学技术应用于 CAR-NK 免疫治疗，可以利用逻辑回路、反馈开关、智能操控等技术，定量、可控、规模化地操控 NK 细胞的功能而生产制备智能化的 CAR-NK 细胞药物，实现将“活的”、可操纵的、智能化的合成免疫细胞药物的规模化和产业化。所以，克服当前限制免疫治疗疗效的因素，将 CAR-NK 细胞疗法应用于重大疾病的免疫治疗，将决定下一代免疫治疗的最后赢家。

（5）医学纳米机器人在肿瘤治疗中的应用

可注射医用抗肿瘤纳米机器人是一种利用纳米加工技术制造的、可通过静脉注射在体内进行肿瘤精确定位、诊断和治疗的纳米功能组装体。该纳米机器人通常以纳米尺度的生物材料为骨架结构，借助化学、生物修饰及功能化，实现活体内靶向输运；在血流、磁场、光场、声波、化学能、生物能等能量形式下实现有效驱动，穿越生物屏障，抵达肿瘤病灶；感知和响应肿瘤微环境病生理标志物，开启或关闭特定功能。医用纳米机器人在抗肿瘤领域具有广阔的应用前景，包括肿瘤监测、诊断、肿瘤微环境调控和肿瘤综合治疗等。目前，医用纳米机器人的研发依旧处于早期阶段，面临着诸多挑战。如何实现医用纳米机器人的规模化制备、确保纳米机器人在体内的生物安全性问题、克服血液中自主巡航和精准控制的技术难题等是未来该领域需要克服的主要技术瓶颈。尽管存在挑战，医用纳米机器人在抗肿瘤领域展现出巨大的潜力和价值，有望为肿瘤患者提供更加精确的个性化治疗方案，提高治疗效果，并延长患者的生存期，改善患者的生活质量。未来，该领域将朝着功能多样化、驱动智能化、生物可降解等方向发展。医用纳米机器人还可能会与人工智能和机器学习等技术相结合，实现自主决策和自我优化治疗方案等功能。作为一种新型的抗肿瘤策略，医用纳米机器人将有望克服传统抗肿瘤治疗策略面临的治疗响应率低、预后疗效差、易产生耐药等问题。

（6）合成免疫学技术

当前免疫疗法针对大多数种类肿瘤（特别是实体瘤）的疗效仍有待提高，因此亟须进一步发展免疫治疗的技术和手段。另外，经过数十年的积淀，传统的免疫工程已逐渐发展到工程免疫学的合成生物学阶段，

从而在前沿免疫学理论与现代合成生物学技术的高度融合交叉下诞生出“合成免疫学”这一新兴学科。合成免疫学以肿瘤、自身免疫性疾病、病毒性疾病、器官移植等为免疫治疗的疾病谱，以免疫分子、细胞、系统等不同层面的功能单元或模块为基础，借鉴数学二进制和逻辑电路运算等原理，设计构建逻辑门、开关、正 / 负反馈、振荡器等功能模块，并组成合成免疫学线路，通过逻辑运算，输出智能化、可控、增效而减毒的免疫应答，从而提高免疫治疗的安全性和有效性。合成免疫学通过这种以可预测、可定量、可调控、可编程为特征的理性设计，重塑、纠偏、再造机体的免疫系统，实现重大疾病的免疫治疗和规模化产业化。合成免疫学的诞生，极大地推动了重大疾病的免疫治疗现代理论、技术途径和产品研发的飞速发展。未来，合成免疫学需要发现和鉴定更多的功能单元或模块，以充实其工具箱，并进一步提高基因转染能力，为构建更复杂的基因线路和更智能的合成免疫细胞打下基础。

（7）小核酸药物研发

小核酸药物是指能利用反义寡核苷酸（ASO）、小干扰 RNA（siRNA）、微小 RNA（miRNA）等核酸小分子特异性地沉默疾病基因的表达，以治愈特定疾病的药物，范围涵盖了 ASO、siRNA、miRNA、小激活 RNA（saRNA）、信使 RNA（mRNA）、RNA 适配体（Aptamer）等。小核酸药物的开发过程中，最大的难点是向患者注射小核酸药物后，药物如何在体内存留足够长的时间，并精准进入靶向细胞发挥治疗功能，同时最大程度地避免误伤正常细胞。通过化学修饰和递送系统可以解决这些问题，使核酸药物发挥治疗功能。小核酸药物的优势是特异性靶向多个基因从而治疗疾病，可干涉细胞的增殖、血管生成、转移、化疗抗性等，这些优势使得小核酸药物被开发用于包括肿瘤、多种罕见病（如肌萎缩性脊髓侧索硬化、杜氏肌营养不良、脊髓性肌萎缩）、病毒性疾病、肾脏疾病、心血管疾病等。首个小核酸药物于 1998 年上市，目前全球上市的小核酸药物有十余款，约 80% 是 2015 年以后上市的。从适应证布局来看，已上市的小核酸药物大部分是针对遗传病。小核酸药物相比现有的小分子药物和抗体药物具有靶点筛选快、研发成功率高、不易产生耐药性、治疗领域更广泛、长效性等优点，具有较大的发展潜力。未来，随着小核酸药物的应用领域和技术领域不断突破创新，市场需求和市场规模将持续扩大，小核酸药物将会迎来更广阔的发展空间。

（8）单分子蛋白质测序技术

单分子蛋白测序技术（single-molecule protein sequencing），是一种在单分子水平上对组成蛋白质的氨基酸序列进行测量的技术。蛋白测序相较于核酸测序面临更大的挑战：蛋白质结构复杂，且由 20 种天然存在的氨基酸构成（相比之下，DNA 由四种核苷酸组成），具有更强的异质性。一些蛋白质在细胞中的含量仅为几个分子水平，而且蛋白质缺乏类似核酸扩增的技术，目前检测极低丰度的蛋白质较为困难。蛋白质序列的研究对于预测蛋白质结构、疾病的检测和药物开发具有重要意义。单分子蛋白测序技术的实现将会为蛋白组学研究、数字生物学、疾病诊断及医疗发展等方面带来新的变革。由于蛋白质可以提供关于健康和疾病的关键信息，国内外科学家高度重视单分子蛋白测序技术的研究，近期取得了基于荧光和纳米孔的单分子蛋白测序方法的一定突破，例如美国 Quantum-Si 公司研发的蛋白测序光学芯片和我国科学家实现的纳米孔单氨基酸分辨。发展高时空分辨率的测量技术、高通量的测序方法、更精确快速的信号分析算法，将是促进单分子蛋白测序技术突破的关键。单分子蛋白测序与蛋白组学、医学研究、人工智能技术的深度融合，将为蛋白质结构的解析、人类疾病的早期诊断以及生物药品的研发带来新的进步，也将促使单分子蛋白测序发展成为一种便捷、快速、应用场景多元化的生物技术。

（9）大语言模型在数字医疗中的应用

大语言模型（large language model, LLM）指的是在大规模文本语料上训练、包含百亿级别（或更多）参数的语言模型，旨在理解和生成人类语言。它们在大量文本数据上训练，可以执行文本总结、翻译、情感分析等广泛任务，其中以 GPT-4 最受欢迎。LLM 在处理输入数据时主要包括三个主要步骤：首先是词嵌入并将单词转换为高维向量表示，然后通过多个 Transformer 层来传递数据，最后经 Transformer 层处理后，模型根据上下文进行预测序列中最可能的下一个单词或标记来生成文本。LLM 具备了理解和生成文本的强大能力，在现代医学快速发展中崭露头角。在改善医疗诊治水平方面，LLM 帮助临床医生规范诊疗过程中产生的文本数据，并提供更准确的医学诊断和个性化治疗建议。在医学影像辅助诊断方面，LLM 帮助放射科医生解读医学影像，生成格式统一语言规范的结构化描述性报告，为影像数据管理与深度挖掘工作提质增效。在促进新药研发方面，LLM 通过实现最大全球全库级的文献综述与荟萃分析，辅助临床研究人员研发新的治疗方法和新药物，识别潜在的药物靶点，并预测药物副作用。在患者健康管理方面，LLM 结合个体的基因、病史、生活习惯等信息，智能提供个性化的医疗和健康管理建议，帮助人们更好地预防疾病和自我管理慢性病。可以预见，LLM 在数字医疗领域的未来前景充满希望。尽管在伦理治理、数据安全性与人机协作方面仍存在挑战，但随着数字医疗生态系统逐渐成熟与人工智能技术的代际跃迁，LLM 与医学专业知识的融合将彻底改变传统的医疗服务模式，为智能医学分析与决策赋予新的意义和内涵。

（10）表观遗传编辑技术

表观遗传编辑（epigenetic editing, EE）技术是在不改变基因组序列的情况下，通过改变 DNA 甲基化、组蛋白修饰等表观遗传标记的方式，实现精确调控目标基因表达的技术。该技术既保持了传统基因编辑工具的高度特异性，又避免了 DNA 损伤带来的潜在遗传风险。表观遗传编辑技术还可进行多靶点同时编辑，实现精确且高度可控的调整，使其在治疗复杂的多基因疾病以及个性化治疗方面拥有广泛的应用潜力。随着表观遗传编辑技术非临床研究数据的积累、核酸药物递送系统的发展成熟，该技术将逐步进入临床阶段，为癌症，糖尿病、病毒性感染、自身免疫疾病等复杂性疾病的患者提供新的治疗选择。基于表观遗传编辑技术在疾病治疗领域的广阔前景，我国和欧美发达国家均高度重视对该技术研发的投入。目前表观遗传编辑药物的研发已初见成效，国内外已有多家公司披露其表观遗传编辑药物在临床前的研究数据。高精度、多样化的表观遗传编辑工具盒，安全高效的核酸药物递送系统的开发，核酸药物的规模化生产，将是未来表观遗传编辑临床转化的关键。表观遗传编辑和表观组学，有机化学，纳米科学，人工智能技术的深度融合，将为表观遗传编辑的优化和递送系统的开发提供新的思路，为众多的疾病治疗带来新的希望。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 T 细胞受体工程化 T 细胞疗法

T 细胞受体工程化 T 细胞疗法（TCR-T）是一种新型细胞免疫疗法。将特异性识别肿瘤抗原的 T 细胞受体（TCR）基因导入患者自身的 T 细胞内，使其表达特异性外源 T 细胞受体。T 细胞上的 CD3 分子跨膜区通过盐桥与 TCR 两条肽链的跨膜区连接形成 TCR-CD3 复合体，有效识别并结合 MHC 呈递的抗原，产生激活 T 细胞的第一信号，在其他协同信号分子参与下形成免疫突触，促进 T 细胞的分裂与分化，引导 T

细胞杀伤病变细胞。

TCR-T 可以识别胞外抗原、胞膜抗原和胞内抗原，可以识别 90% 以上的抗原。癌症是导致全球人口死亡的主要原因之一，是一个重要的公共卫生问题，数据显示，当前估计有 1810 万例新发癌症病例和 960 万例癌症死亡。传统的手术、化疗和放疗（RT）三大治疗方法存在大伤口、耐药性和肿瘤易复发等缺点，而包括 TCR-T 细胞治疗在内的免疫疗法，是通过增强人体免疫系统来抑制肿瘤形成或生长，在过去二十年中正成为越来越可靠的癌症治疗方法，并有望形成新的支柱型产业。TCR-T 细胞免疫治疗应用广泛，可治疗癌症、病毒感染等疾病。目前处于临床试验阶段的 TCR-T 细胞疗法主要是针对实体肿瘤进行研究。

2002 年 Rosenberg 团队、Cassian Yee 团队发现，从黑色素瘤患者中分离出的肿瘤浸润淋巴细胞（tumor infiltrating lymphocyte，TIL）和患者外周血中分离的抗原特异性 CD8+T 细胞，经体外扩增后回输给患者后，可以特异性杀伤肿瘤细胞并取得一定疗效。但这些 T 细胞不易获取，且体外扩增时间长，回输后抗肿瘤效果较弱。在这样的背景下，人们探究能否在正常外周血淋巴细胞（peripheral blood lymphocyte，PBL）上导入已知的抗原特异性 TCR 基因，这便是 TCR-T 细胞的由来。2006 年 Rosenberg 小组在 *Science* 上发表的一篇文章显示，经基因修饰的 TCR-T 细胞在黑色素瘤的治疗中显示了较好的应用前景——参与试验的 17 例患者中，有 2 例出现了抗肿瘤响应。该研究首次证明了基因改造 TCR 用于肿瘤治疗的可行性。

TCR-T 技术在发展进程已经有多次迭代，可分为四代：

第一代 TCR-T。从患者的肿瘤组织中分离出肿瘤浸润性 T 细胞亚群，或患者外周血抗原特异性 T 细胞，经体外扩增后回输治疗。由于这种 T 细胞克隆技术不稳定，个体差异很大，因此产业化有一定的局限性。

第二代 TCR-T。是通过 T 细胞克隆获得抗原特异性的野生型 TCR 序列，再转导至患者的外周 T 细胞，这种方法增强了 TCR-T 产业化潜能。

第三代 TCR-T。是用亲和力优化了的 TCR 基因转导患者的 T 细胞，以加强 TCR-T 的肿瘤浸润，抗肿瘤的免疫逃逸等功能，整体提高 TCR-T 的疗效和安全性。

第四代 TCR-T。是在有效的 TCR-T 平台的基础上引入抗耗竭机制、肿瘤趋化与浸润机制、适应肿瘤微环境的代谢特征的功能、通用性功能等，以进一步提升 TCR-T 细胞免疫治疗的抗肿瘤能力，并增强疗效与安全性，并且有望降低患者经济负担。

全球 TCR-T 细胞疗法主要瞄准了实体肿瘤市场，在国际上已经成为研究的热点。截至 2023 年 9 月，在 Clinical Trials 上有近 300 项使用 TCR-T 细胞疗法的研究正在进行中。适应证包括转移性非小细胞肺癌、肝细胞癌、多发性骨髓瘤、软组织肉瘤、头颈癌、黑色素瘤、脂肪肉瘤、宫颈癌等。同样是靶向 pMHC 的 TCR 药物，2022 年由 Immunocore 公司研发的能在体内重定向 T 细胞的双特异性 T 细胞接合器 Kimmtrak 成为率先获得 FDA 批准的 TCR 疗法，这意味着靶向 pMHC 的 TCR 疗法获得了里程碑意义的突破。

目前，该前沿核心专利产出数量较多的国家是美国、中国和英国（表 2.2.1）；从主要产出国家间的合作网络来看，美国与中国、德国、瑞士、英国之间的合作更为频繁（图 2.2.1）。核心专利产出数量排在前列的机构为美国卫生与公众服务部、广东香雪精准医疗技术有限公司和得克萨斯大学（表 2.2.2），各机构间不存在合作关系。从核心专利主要产出国家和机构可以看出，我国在 TCR-T 细胞疗法的研发和产业布局方面均处于世界前列。我国 TCR-T 临床申请数量位居全球第二，广东香雪精准医疗技术有限公司、北京鼎成肽源生物技术有限公司、成都益安博生物技术有限公司和中国科学院广州生物医药与健康研究院成为核心专利产出数量排名前列的机构。在广东香雪精准医疗技术有限公司，中国学者团队领导研发

TAEST16001TCR-T 细胞治疗，并以此申请了中国首个 TCR-T 的 IND，临床 I 期结果提示，其在软组织肉瘤上的客观缓解率（ORR）为 41.7%。

TCR-T 细胞疗法治疗肿瘤虽然有着巨大的潜能，但是如何使其在临床中被广泛应用且发挥最佳疗效仍是目前需要重点研究的方向，主要包括：如何降低生产成本和制作复杂性；如何提高 T 细胞的存留时间；如何对抗肿瘤微环境的抑制作用；如何通过促进表位扩散来防止肿瘤逃逸。随着其他高尖端的工程化技术的发展，如人工智能、CRISPR-Cas9、高通量筛选、单细胞测序等，TCR-T 细胞疗法在抗原 / 靶点预测、最优亲和力 TCR 筛选、T 细胞功能稳定性等研究中取得了重大发展。针对目前 TCR-T 细胞疗法面对的挑战，其前沿发展方向包括建立基于人工智能预测有效抗原靶点的新模型、构建新一代改善肿瘤微环境且可有效清除肿瘤的 TCR-T 细胞、构建通用型 TCR-T 产品等，都将进一步深化 TCR-T 细胞疗法在临床中的应用发展。图 2.2.2 为“T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.1 “T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	372	44.66	2 560	64.63	6.88
2	中国	278	33.37	691	17.45	2.49
3	英国	51	6.12	262	6.61	5.14
4	德国	37	4.44	196	4.95	5.30
5	日本	21	2.52	40	1.01	1.90
6	韩国	16	1.92	38	0.96	2.38
7	法国	14	1.68	89	2.25	6.36
8	瑞士	13	1.56	162	4.09	12.46
9	加拿大	12	1.44	38	0.96	3.17
10	以色列	10	1.20	10	0.25	1.00

注：选择公开日期为 2017 年 1 月 1 日到 2022 年 12 月 31 日，下同。

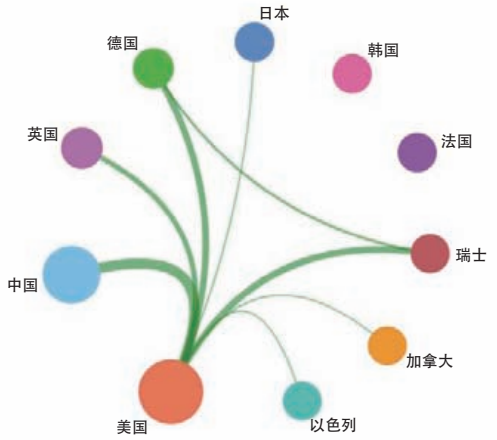

图 2.2.1 “T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.2　“T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国卫生与公众服务部	23	2.76	162	4.09	7.04
2	广东香雪精准医疗技术有限公司	22	2.64	91	2.30	4.14
3	得克萨斯大学	21	2.52	90	2.27	4.29
4	北京鼎成肽源生物技术有限公司	19	2.28	3	0.08	0.16
5	TCR2 Therapeutics 公司	18	2.16	118	2.98	6.56
6	成都益安博生物技术有限公司	16	1.92	65	1.64	4.06
7	宾夕法尼亚大学	13	1.56	97	2.45	7.46
8	加利福尼亚大学	12	1.44	54	1.36	4.50
9	中国科学院广州生物医药与健康研究院	12	1.44	32	0.81	2.67
10	Adaptimmune 公司	10	1.20	86	2.17	8.60

图 2.2.2　“T 细胞受体工程化 T 细胞疗法”工程开发前沿的发展路线

2.2.2　抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤

抗体偶联药物（ADC）联合免疫疗法：由于耐药机制和患者机体差异，单用 ADC 产生的临床受益程度和持续时间仍不理想，而一些 ADC 在免疫健全的临床前动物模型中表现出更强的抑瘤作用及肿瘤免疫疗法联用潜力，潜在机制为 ADC 介导免疫原性细胞死亡，增强免疫细胞浸润和促进 PD-L1 或 MHC 表达等，以提高免疫疗法的敏感性。ADC 与免疫疗法的联合应用是一种新兴策略，但验证其优于标准治疗方法的随机临床试验仍需广泛尝试。

1）联合抗 PD-1/PD-L1 或抗 CTLA-4 抗体：Trastuzumab emtansine（偶联 DM1）、Trastuzumab deruxtecan（偶联 Dxd）和 Disitamab vedotin（偶联 MMAE）等 HER2 靶向的 ADC 已完成与免疫检查点抑制剂（immune checkpoint inhibitor，ICI）联合应用的探索，并表现出协同遏制肿瘤进展的作用。在一项公

开的 ADC 联合 ICI 的随机临床试验（KATE2 研究）中，比较了预治疗 HER2+ 乳腺癌患者中 Trastuzumab emtansine 联合 Atezolizumab（PD-L1 抗体）与 Trastuzumab emtansine 联合安慰剂的疗效，联合疗法对 PD-L1 阳性人群有益。在 ICI 难治性黑色素瘤和非小细胞肺癌患者模型中，AXL 特异性 ADC enapotamab vedotin 可诱导 T 细胞浸润和抗原呈递增强，促进抗 PD-1 抗体药效，实现有效联合。

2）联合其他免疫疗法：Polatuzumab vedotin（靶向 CD79b，偶联 MMAE）可通过 AKT 和 ERK 信号通路，增强肿瘤 CD20 的丰度，从而与抗 CD20 抗体和 CD20/CD3 双特异性抗体疗法联合。Belantamab mafodotin（靶向 BCMA，偶联 MMAF）可与 OX40 激动剂组合，增加肿瘤浸润性 T 细胞和树突状细胞的活化，实现协同抗肿瘤作用。该药物在临床上正积极开展联合用药研究，如 DREAMM-5 项目，以探索其联合抗 ICOS 抗体、OX40 激动剂、抗 PD-1 抗体等的价值。

免疫刺激 ADC：免疫刺激抗体偶联药物（immune-stimulating antibody conjugate，ISAC）由免疫刺激功能的小分子化合物偶联抗体组成，其旨在触发肿瘤相关髓系细胞的激活，进而诱导全面抗肿瘤免疫反应。ISAC 与传统 ADC 在结构形式上相同，均为抗体与小分子的偶联物；但是，ADC 中的小分子多为细胞毒性药物，而 ISAC 中的小分子多为 TLR 激动剂或 Sting 激活剂；此外，传统 ADC 的抗体大多靶向肿瘤特异性抗原，而 ISAC 除靶向肿瘤特异性抗原外，也可靶向肿瘤相关髓系细胞抗原。

ISAC 利用抗体可介导小分子免疫激动剂靶向递送至肿瘤微环境并实现局部释放，解决小分子激动剂系统给药的免疫毒性问题。作用机制上，其可通过抗体介导的内吞作用实现肿瘤相关髓系细胞的激活并增加其抗原提呈功能，进一步激活 T 细胞，最终通过同时驱动先天免疫和适应性免疫实现肿瘤杀伤作用，并诱导长期免疫记忆；ISAC 可成功将冷肿瘤变热，解决单免疫检查点抑制剂响应率低等问题。

目前，涉足 ISAC 的领头羊公司主要有 Bolt Biotherapeutics、Silverback Therapeutics、Tallac Therapeutics、Mersana Therapeutics、Takeda 和 ImmuneSensor Therapeutics。此外，Jacobio、Chinook Therapeutics、Novartis、Sutro Biopharma、ALX Oncology、Seven and Eight Biopharmaceuticals，以及国内的恒瑞医药、百济神州、信达、中国科学院上海药物研究所、深圳大学等也均布局了该领域。其中，Bolt Biotherapeutics、Silverback Therapeutics 和 Tallac Therapeutics 研发的产品是基于 TLR 激动剂的 ISAC，而 Mersana Therapeutics、Takeda 和 ImmuneSensor Therapeutics 则是基于 Sting 激动剂的 ISAC。抗体靶点主要集中于 HER2、NECTIN4、CCR2、CD22、PD-L1、SIRPA、ASGR1、TROP-2、CD73 等。但是，在临床上，ISAC 由于存在缓解率低、剂量爬坡难等问题，目前该领域仍需探索和优化。

除以上偶联小分子免疫激动剂的 ADC 外，抗体偶联免疫激动型细胞因子药物也在临床前和临床中得到广泛研究。常见偶联的细胞因子包括：IL-2、IFN-γ 和 IL-15 等。

目前，该前沿核心专利产出数量较多的国家是美国、中国和瑞士（表 2.2.3）；从主要产出国家间的合作网络来看，德国与荷兰之间，美国与中国、瑞士等国家间均存在合作关系（图 2.2.3）。核心专利产出数量排在前列的机构有再生元制药公司、Immunomedics 公司、Sapreme 科技公司等（表 2.2.4）；Sapreme 科技公司与夏瑞蒂医科大学之间、得克萨斯大学与 Immunomedics 公司之间存在合作关系（图 2.2.4）。

目前全球 ADC 在研管线重点布局在非小细胞肺癌、胃癌、卵巢癌、结直肠癌和乳腺癌五大主要病种，我国在研管线主要分布在非小细胞肺癌、胃癌、胃食管交界处癌、乳腺癌和尿路上皮癌五大瘤种。发展的 ADC 药品在研管线中，HER2 靶点最为集中。

基于“抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程的开发应用，在联合治疗方面，需要筛选 ADC 联合肿瘤免疫疗法的优化组合，逐渐确定能够协同对抗恶性肿瘤的组合策略和机制，提高 ADC 和肿瘤免疫疗法的临床响应率与疗效；在免疫刺激性 ADC 开发角度，需要探索抗体靶点和免疫刺激性偶联物靶点的组合，同时优化迭代抗体类型、连接子类型、偶联策略、偶联物活性等，以最大化药物治疗窗口，实现药理活性和安全性的平衡。学术界和工业界正在进行广泛的努力，建立调节肿瘤微环境的新型 ADC 药物或联合治疗方案，并逐步了解其药理学及相关的预测性生物标志物组合，在特征良好的患者衍生异种移植模型中进行临床前评估，从而选择最有前景、基于 ADC 的组合或免疫刺激性 ADC，为恶性肿瘤的精准治疗提供新的临床选择（图 2.2.5）。

表 2.2.3　“抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	194	58.08	1 235	68.04	6.37
2	中国	61	18.26	240	13.22	3.93
3	瑞士	19	5.69	124	6.83	6.53
4	德国	18	5.39	85	4.68	4.72
5	韩国	13	3.89	58	3.20	4.46
6	荷兰	12	3.59	80	4.41	6.67
7	英国	12	3.59	67	3.69	5.58
8	法国	12	3.59	36	1.98	3.00
9	印度	7	2.10	52	2.87	7.43
10	加拿大	5	1.50	3	0.17	0.60

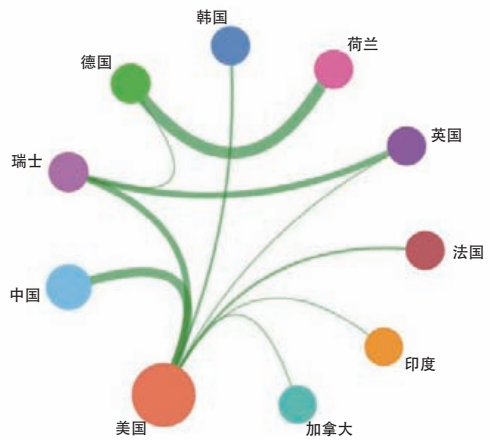

图 2.2.3　“抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	再生元制药公司	14	4.19	126	6.94	9.00
2	Immunomedics 公司	11	3.29	99	5.45	9.00
3	Sapreme 科技公司	11	3.29	32	1.76	2.91
4	夏瑞蒂医科大学	9	2.69	31	1.71	3.44
5	Seagen 公司	9	2.69	29	1.60	3.22
6	诺华公司	8	2.40	62	3.42	7.75
7	得克萨斯大学	7	2.10	25	1.38	3.57
8	OSE Immunotherapeutics 公司	7	2.10	22	1.21	3.14
9	正大天晴药业集团股份有限公司	7	2.10	16	0.88	2.29
10	阿斯利康制药有限公司	6	1.80	38	2.09	6.33

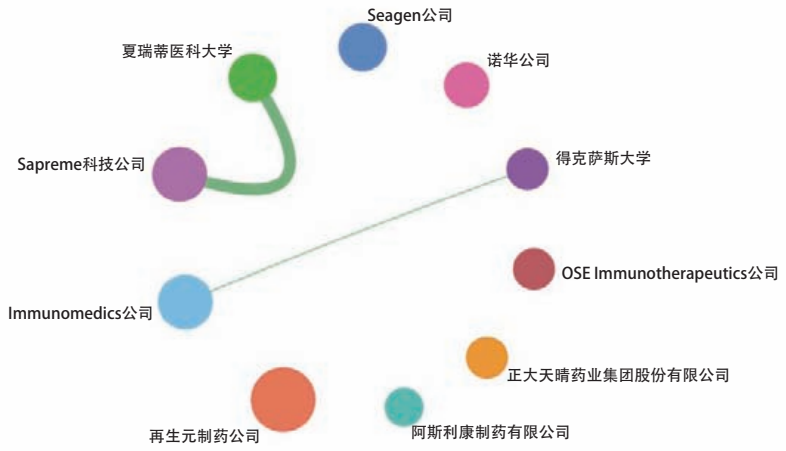

图 2.2.4 “抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程开发前沿主要机构间的合作网络

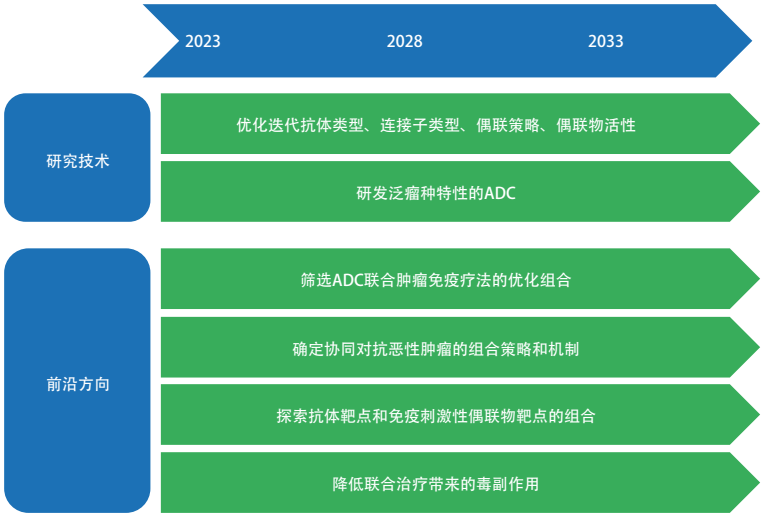

图 2.2.5 “抗体偶联药物免疫联合治疗恶性肿瘤”工程开发前沿的发展路线

2.2.3　单细胞空间转录组技术

器官组织是由不同的细胞亚群组成的，这些细胞亚群在既定组织中的空间位置与其功能密切相关。单细胞 RNA 测序（scRNA-seq）表征单个细胞的转录组，可以揭示特定器官内的细胞亚群。然而，在 scRNA-seq 的组织分离步骤中，单个细胞的分离破坏了它们在原生组织中的空间定位信息。考虑到空间信息对于了解正常和病变组织的细胞间信号通路至关重要。单细胞空间转录组学可以在其原生组织环境中定位具有转录特征的单细胞，从而加深人们对特定细胞亚群的作用及其在发育、稳态和疾病中的相互作用的理解。

单细胞空间转录组数据包含单细胞转录组测序和单细胞三维空间坐标信息。此类数据分析分为两部分：第一部分通过 scRNA-seq 数据的降维和聚类来建立细胞亚型，第二部分通过单细胞三维空间坐标信息通过解卷积和映射，将指定的基于 scRNA-seq 定义的细胞亚型定位到组织的特定生态位或区域。评估定位细胞亚群空间排列的算法可以进一步评估 scRNA-seq 数据预测的配体 – 受体相互作用。由此计算出的与细胞空间构象相对应的配体 – 受体相互作用能将单细胞测序洞察的细胞分型扩展到驱动表型变化的蛋白质互作水平的细胞信号研究。

目前，空间转录组学技术主要集中在通过二代测序（空间条形码）或荧光标记（HPRI）来检测 mRNA 转录。除了改进去卷积和绘制图谱的算法外，一个需要关注的焦点是开发更多的深度学习模型，以帮助区分特定空间转录组的哪些特征是最有生物学意义的。并且，定义三维空间转录组和实时细胞追踪是未来研究的新领域，通过三维单分子荧光原位杂交数据进行计算重建或推断 scRNA-seq 细胞的位置。

通过在空间上解析与分子生物学中心法则不可或缺的其他生物分子，超越时空转录组的解析，可以更深入地了解组织功能。例如 DBiT-seq 可以在同一组织上对蛋白质和 mRNA 转录物进行空间解析。基因组序列的三维原位成像、RNA 的亚细胞分辨率以及核仁和 RNA 的三维染色质组织的同步成像都存在于单细胞尺度。它们有望应用于完整的组织的检测，并彻底改变人们对中心法则机制如何在细胞的三维环境中发挥作用的理解，从而揭示发育轨迹和肿瘤等疾病的内部发生机制。

未来，通过单细胞空间转录组技术在临床中的应用，对患者单细胞或患者来源的体外模型的分析将有助于探索疾病的分子机制，确定疾病期间出现的罕见细胞类型和细胞亚群的空间定位。此外，单细胞空间转录组技术将有助于发现新的治疗靶点。新发现药物的疗效将在患者衍生的体外模型中进行测试，并使用单细胞测序技术进行监测，以确定患者对治疗发生特异性反应的细胞类型，用于制定个体患者的最佳治疗策略。

目前，该前沿核心专利产出数量较多的国家是美国、中国和德国（表 2.2.5）；从主要产出国家间的合作网络来看，美国与英国之间存在合作关系（图 2.2.6）。核心专利产出数量排名前列的机构为哈佛 – 麻省理工博德研究所、麻省理工学院、加利福尼亚大学（表 2.2.6）。哈佛 – 麻省理工博德研究所、麻省理工学院、哈佛大学和加利福尼亚大学之间存在合作关系（图 2.2.7）。

随着空间转录组学分析的发展，解开确定的、与疾病相关的细胞类型及其基因模块将变得越来越具有挑战性。越来越多的细胞类型在组织中被识别和定位，Seurat Integration、Harmony、LIGER 等工具可能会升级以整合不同实验测定的数据，来确定每个组织中始终能观察到的特定细胞类型。整合单细胞和空间转录组技术正在迅速发展，根据所提出的生物学问题，实验方法可以将任何空间转录组学方法与 scRNA-seq 结合起来。除了开发增强的方法外，选择整合这些数据的算法也是至关重要的，因为空间转录组学方法还未有以单细胞分辨率、scRNA-seq 深度和整个转录组覆盖率对组织进行空间解析的方法。这种整合的方法可以在空间上绘制发育和疾病中的特定细胞亚群，并阐明这些细胞亚群协同形成组织表型的机制（图 2.2.8）。

表 2.2.5 “单细胞空间转录组技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	83	51.23	743	78.87	8.95
2	中国	61	37.65	190	20.17	3.11
3	德国	4	2.47	1	0.11	0.25
4	英国	2	1.23	4	0.42	2.00
5	荷兰	2	1.23	3	0.32	1.50
6	日本	2	1.23	1	0.11	0.50
7	比利时	2	1.23	0	0.00	0.00
8	瑞士	1	0.62	0	0.00	0.00
9	芬兰	1	0.62	0	0.00	0.00
10	法国	1	0.62	0	0.00	0.00

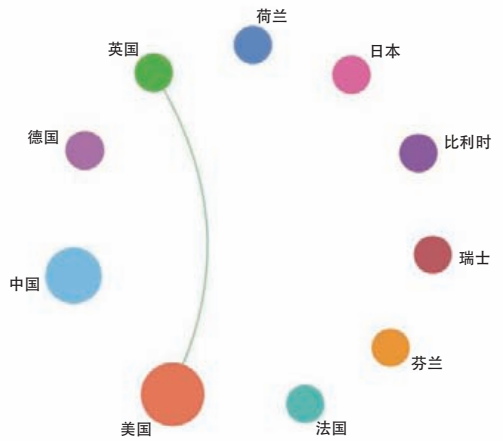

图 2.2.6 “单细胞空间转录组技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.6 “单细胞空间转录组技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	哈佛 – 麻省理工博德研究所	17	10.49	173	18.37	10.18
2	麻省理工学院	15	9.26	203	21.55	13.53
3	加利福尼亚大学	7	4.32	43	4.56	6.14
4	斯坦福大学	7	4.32	22	2.34	3.14
5	Bio-Rad 生命医学产品有限公司	6	3.70	50	5.31	8.33
6	哈佛大学	5	3.09	107	11.36	21.40
7	10x Genomics 有限公司	5	3.09	86	9.13	17.20
8	华盛顿大学	4	2.47	19	2.02	4.75
9	东南大学	4	2.47	12	1.27	3.00
10	Sigma-Aldrich 公司	4	2.47	11	1.17	2.75

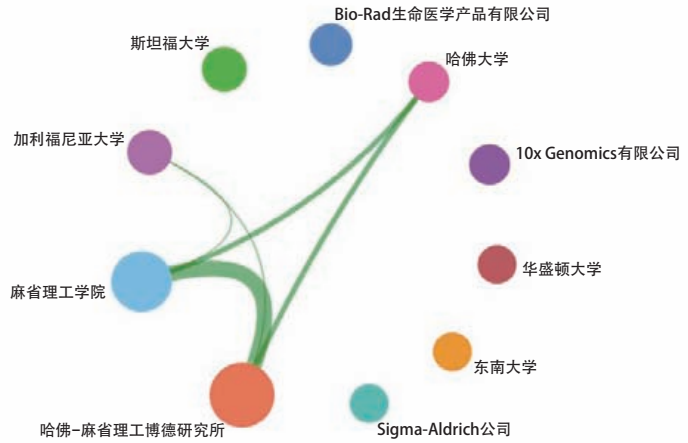

图 2.2.7　“单细胞空间转录组技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

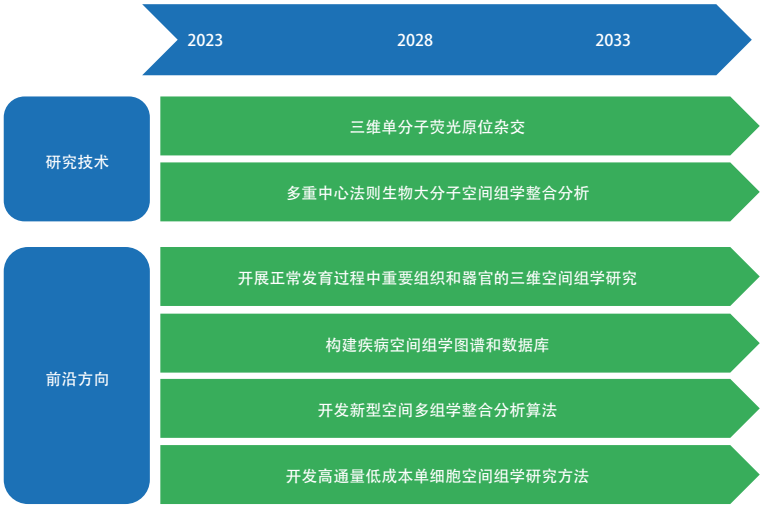

图 2.2.8　“单细胞空间转录组技术”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

领域课题组组长：陈赛娟　张伯礼

院士专家组：

高天明　夏宁邵　杨建华　周宏伟　赵小阳　夏来新　郑　磊　徐兵河　吉训明　胡　豫　张路霞
金　阳　曾春雨　聂勇战　刘　杰　张爱华　叶　静　吴川杰　董家鸿　夏　强　董念国　江　涛
万　钧　黎成权　陈志宇　梁　霄　宁国琛　赵铱民　施松涛　邓旭亮　白玉兴　杨　驰　叶　玲
张玉峰　陈发明　邬堂春　胡志斌　余宏杰　刘　玮　李　颖　陈　瑞　郑钜圣　郑　琰　何永捍

韩天澍　王超龙　田金州　陈家旭　张俊华　刘存志　杨洪军　贾振华　倪敬年　肖　伟　果德安
段金廒　曹　鹏　吴志生　宋晓亭　张　磊　曹　岗

工作组：

丁　宁　赵西路　奚晓东　严晓昱　陈银银　奚闻达　尹　为　张佳楠　巫慧怡　褚敬申

文献情报组：

仇晓春　邓珮雯　吴　慧　樊　嵘　寇建德　刘　洁　陶　磊　江洪波　陈大明　陆　娇　毛开云
袁银池　范月蕾　张　洋

报告执笔组：

邵志敏　江一舟　王健伟　唐小利　郑钜圣　刘光慧　宋默识　李静宜　赵　勇　李丕龙　于颖彦
姜　泓　李　懿　柳　其　宫丽崑　刘　峰　田志刚　聂广军　张银龙　毕嘉成　冯建东　王兴鹏
何　萍　李泽宇　彭文博

九、工程管理

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域，本年度10个全球工程研究前沿分别是："工业5.0环境下人机共融智能制造研究""物流无人机调度与路径优化研究""重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究""交通路网韧性提升与保障研究""大数据驱动的社会公共安全事件演化规律及治理研究""大数据环境下产品质量与可靠性技术研究""能源经济和环境系统交互影响机理与协同发展规律研究""制造企业数字赋能价值创造内在机理研究""精准医疗过程优化研究""数据要素的定价和收益共享分配机制研究"。其核心论文发表情况见表1.1.1和表1.1.2。其中，"工业5.0环境下人机共融智能制造研究""物流无人机调度与路径优化研究""重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究"为重点解读的前沿，后文对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

（1）工业5.0环境下人机共融智能制造研究

工业5.0是制造业发展的新阶段，在4.0基础上强调以人为本，实现更可持续、更具弹性的生产。作为工业5.0核心内容的人机共融智能制造，是由人类和智能机器组成人–人、人–机和机–机在实体物理空间与虚拟信息空间相互作用、协调一致、紧密共生的整体，利用人类与智能机器的协作和共同进化，将机器人的高精度和强度与人类的先进认知和灵活性相结合，以适应不断变化的情况和需求。随着智能感知、脑机接口、物联网等前端技术和云计算、大数据、大模型与人工智能（AI）等基础技术发展，机器逐步具有了智能化和自主化特征，使传统机器动作执行的单一功能转变为感知、理解、规划、决策与执行的复合功能，机器逐步地从受控对象发展为自主智能体，人机关系从"辅助、从属"向"合作、平等"与"融合、

表1.1.1　工程管理领域Top 10工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	工业5.0环境下人机共融智能制造研究	29	2 270	78.28	2021.2
2	物流无人机调度与路径优化研究	45	4 913	109.18	2018.9
3	重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究	45	986	21.91	2020.1
4	交通路网韧性提升与保障研究	4	227	56.75	2020.0
5	大数据驱动的社会公共安全事件演化规律及治理研究	13	870	66.92	2018.2
6	大数据环境下产品质量与可靠性技术研究	17	99	5.82	2019.8
7	能源经济和环境系统交互影响机理与协同发展规律研究	11	144	13.09	2021.2
8	制造企业数字赋能价值创造内在机理研究	25	628	25.12	2019.2
9	精准医疗过程优化研究	31	383	12.35	2019.8
10	数据要素的定价和收益共享分配机制研究	15	230	15.33	2020.1

表 1.1.2　工程管理领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究	0	1	3	3	4	18
2	物流无人机调度与路径优化研究	5	11	15	11	3	0
3	重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究	3	4	6	7	10	13
4	交通路网韧性提升与保障研究	0	1	0	1	2	0
5	大数据驱动的社会公共安全事件演化规律及治理研究	4	4	3	2	0	0
6	大数据环境下产品质量与可靠性技术研究	3	1	5	1	1	6
7	能源经济和环境系统交互影响机理与协同发展规律研究	0	1	0	2	1	7
8	制造企业数字赋能价值创造内在机理研究	6	4	5	3	3	4
9	精准医疗过程优化研究	3	4	4	11	3	6
10	数据要素的定价和收益共享分配机制研究	1	3	2	2	1	6

共生”不断深化。传统人机交互领域主要关注机器如何适应人以实现高效合作，而人机共融智能制造在此基础上重点研究人机相互感知 – 认知 – 信任、人机协同组织 – 规划 – 决策、人机协同交互 – 控制 – 进化三个层次技术，以实现个性化、超复杂产品的规模化、柔性化、自动化生产。未来，人机共融智能制造的加速发展必将推动制造业新商业模式和价值链的出现。

（2）物流无人机调度与路径优化研究

人口稠密城市用于建设道路的土地资源严重短缺，随之而来的交通拥堵和污染问题日益严重。随着物流无人机的快速发展，开拓三维空间，将地面物流运输向空中转移，成为城市物流发展新趋势。国内外众多物流企业早已发现无人机配送的效率优势，已经启动全面验证。国际物流巨头亚马逊公司采用 Prime Air 无人机集中发展仓库到郊区客户的末端配送，DHL 致力于打造无人机站点间实现偏远地区货物配送。2019 年，UPS 与 CVS 药店合作为郊区及乡村地区提供家庭医疗物资运输；Wing 聚焦商用送餐无人机研究。中国迅蚁科技有限公司从城郊邮政配送起步，逐步过渡到城市配送、医疗试剂运输。美团利用自身餐饮配送资源优势，着力发展城市无人机即时配送。京东聚焦乡村最后一公里，同时拓展干 – 支 – 末三级无人机运输网络。与传统地面物流运输相比，无人机物流运输虽然速度大大增加，但也同时存在单机载重量小、航程短、需要频繁更换电池等诸多不足，因此无人机物流路径规划、无人机与地面车辆配合运输路径规划、调度优化等问题成为无人机物流兴起之后，异于地面物流调度而特有的研究问题。

（3）重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究

重大工程是指投资规模巨大、实施周期长、技术复杂，对社会、经济及生态环境等影响深远的大型公共项目。在以创新驱动高质量发展的背景下，重大工程成为推动创新高峰形成的重要平台，构筑共荣共生的重大工程创新生态系统是工程管理领域的研究前沿之一。重大工程创新生态系统是在重大工程技术创新过程中，创新主体（包括业主、设计方、施工方、咨询机构、高校、科研机构、政府部门等）为重大工程面临的技术挑战寻求系统有效解决方案所形成的多主体联系紧密、交互演化的生态系统。重大工程创新生态系统中的“共生”是不同类型的创新主体在攻克技术挑战、寻求解决方案过程中互为对方提供支撑而形成的互利共存依赖关系。针对重大工程创新生态系统中创新主体间的共生逻辑研究治理策略，能够促进创新生态系统的高效运转和创新主体的协同发展，为优化重大工程创新管理提供参考。

（4）交通路网韧性提升与保障研究

随着交通出行需求的快速增长和不同灾害及突发事件的频发，保障和提升交通路网的运输能力和效率变得尤为重要，维护与增强交通路网韧性已成为工程管理研究领域最为关键和迫切的前沿问题之一。交通路网韧性是指交通系统在外部扰动或打击下抵抗或吸收其影响，并能够恢复到系统常态运行水平的能力。根据上述交通路网韧性的概念和定义，现有研究主要从以下几个方面开展路网韧性的保障与提升工作。首先，从交通路网韧性建模与评估角度研究基于网络拓扑结构和系统性能的路网韧性测量方法与评估指标体系；其次，通过路网致灾因子监测、灾害预警模拟、路网冗余性分析、通行能力分析和容量优化设计，开展事件前交通路网韧性的保障方法和增强技术研究；再次，研究事件中路网对灾害影响的抵抗与吸收能力的提升，包括关键基础设施识别与管理、路网应急资源配置优化、路网响应决策、路网应急管控等；最后，从路网修复策略优化、修复资源配置、系统功能恢复提升等方面开展事件后路网恢复决策与资源配置优化研究，保障交通路网系统韧性的可靠与快速提升。当前研究仍需在灾害强度分布特征、出行需求演化与突变规律、多模式交通系统耦合、复杂系统协同优化等方面开展创新性数据挖掘和机理解析工作。在可预见的未来，该研究前沿将在综合交通一体化、车路协同、多网融合、大数据技术、智能管控等新兴学科方向上产生新增长点，为交通基础设施系统运维与管理研究带来挑战和机遇。

（5）大数据驱动的社会公共安全事件演化规律及治理研究

随着社会经济的快速发展，城市化进程在不断深化的同时，也为各类社会公共安全事件提供了孕灾环境。自然灾害、生产事故、交通事故、违法犯罪、传染疾病等突发事件发生频率日益上升，成为维护城市安全、经济发展、社会稳定面临的实际威胁。同时，随着科技的发展，以 5G 技术、深度学习、云服务等技术为基础的大数据技术为社会公共安全事件研究与治理提供了进步契机。大数据技术是指对多源、海量数据进行采集、分析与应用的技术，已广泛应用于金融业、制造业、公共事业等领域。近年来，大数据技术在社会公共安全事件研究与治理领域已有深度应用，研究对象涉及大数据采集、分析、应用的各个阶段，主要研究内容包括：在以 5G 技术、区块链技术为代表的新技术驱动下，社会公共安全事件大数据的感知、采集与储存；应用数据挖掘、深度学习、AI 等大数据分析算法技术，研究社会公共安全事件孕灾机理与演化规律；基于物联网、数据中心等数字化新基建的发展，研究大数据驱动的社会公共安全事件治理技术，并探索构建相应管理体系。随着智慧城市建设的深化，大数据技术在社会公共安全事件研究与治理领域的应用前景更为广阔。未来研究趋势将与智慧城市的多级结构高度绑定，包括基于城市信息模型（city information model，CIM）的大数据感知、分析与应用，以及基于已建成的智慧城市的经验教训总结与迭代优化等。

（6）大数据环境下产品质量与可靠性技术研究

随着科学技术尤其是信息技术的发展，工业大数据呈现井喷的势头，为产品的质量与可靠性分析、控制和水平提升提供了数据支撑环境及条件。工业大数据不仅覆盖了产品设计、制造、运维、报废、回收再制造等全寿命周期过程，而且还涉及产品使用环境、用户感知等数据信息，有力促进了 AI 在产品制造、使用、运维等过程的深入应用。大数据环境下产品质量与可靠性前沿研究可以分为两个方面。第一，以“设计—制造—销售—使用”全过程数智化为基础的产品质量分析理论与方法，重点研究方向包括：面向产品全寿命周期和全供应链的质量与可靠性工业大数据横向、纵向集成以及数据融合和打通理论与技术，融合在线检测、工艺机理分析、动态优化、预测控制等技术的智能制造系统智慧质量管控，考虑物联网、区块链、

标识解析等技术的产品全生命周期质量精准追溯，多模型融合和数字孪生驱动的产品数字化质量管控，智能传感、知识图谱、自然语言处理等技术赋能的产品智慧运维服务，嵌入区块链技术的网络协同供应链质量管控，基于工业大模型技术的个性化定制产品智能设计与质量管控等；复杂产品可靠性分析理论与方法，重点关注摆脱单元统计独立假设束缚、考虑单元关联泛在的复杂装备可靠性建模、分析、评价及优化理论与方法，数据与模型联合驱动的复杂装备剩余寿命预测、运维分析理论和方法等。第二，以强调人机共融为基础的产品质量和可靠性分析理论与方法，重点研究方向包括：人机（智能化机器）协同的产品质量控制与管理方法，人与智能化产品融合系统的可靠性建模、分析及优化理论与方法等。

（7）能源经济和环境系统交互影响机理与协同发展规律研究

当前，全球经济社会与能源环境系统正发生深刻变化，气候治理、能源安全、环境改善与社会经济发展目标间的交互不断加深，决策后果与风险传导的级联性、复合性、不确定性愈发突出。因此，能源 – 环境 – 经济复杂系统在仿真建模时愈加重视系统要素间的协同联系，以保障环境经济系统安全、稳妥推进“双碳”目标。当前的主要研究方向包括以下几个方面：① 面向“双碳”的复杂系统建模与演化趋势分析。大量能源模型与气象模式、土地利用模型耦合，构建复杂综合评估模型，如国际应用系统分析研究所（IIASA）开发的 MESSAGEix-GLOBIOM 等，以实现多元情景仿真，发挥重要路径决策支撑作用。② 减污降碳目标驱动下的多要素协同发展路径研究。在能源 – 环境 – 经济复杂系统建模基础上，加入多要素约束函数，以最大化协同效益与公众福利、最小化政策成本为基本原则，优化减污降碳的协同路径。③ 主体适应行为的测量与建模。在减污降碳复杂决策网络中，主体具有自适应性，面对政策与市场环境变化采取针对性调整策略，影响系统演化过程。通过适应行为量化，实现行为 – 气候 – 经济的交叉仿真，筛选高效适应手段，是当前的重要前沿。此外，减污降碳决策面临多种来源的不确定性，包括模型预测结果、极端气候事件、技术成本跃迁等方面。未来，如何开展深度不确定下的能源 – 环境 – 经济系统稳健决策是重要的发展方向，需整合多个利益相关者视角制定决策，探索多种可能情景下风险、成本和稳健性之间的三维权衡。

（8）制造企业数字赋能价值创造内在机理研究

制造企业数字赋能价值创造，是指制造企业运用 AI、数字孪生、边缘计算等技术，遵循数据感知、智能认知、动态决策、精准执行的逻辑流程，通过建立适当的感知机制感知事物、获取数据；运用系统分析模型将海量数据转化为有价值的信息和知识，从而认知事物；针对多元的应用场景开展动态决策，对数据、物资、人力、财务等各类资源进行高度整合，从而促进制造企业各项活动高效有序地开展；依据动态决策的结果精准执行行动方案，实时反馈、有效控制，从而实现降本提质增效，高效价值创造的过程。首先，制造企业通过将数字技术融入战略决策、研究开发、物料采购、生产制造、营销服务、组织管理过程，提升企业运营能力，拓展企业的边界与功能，增强企业对运行状态的描述、诊断、预测、决策和控制的能力，进而推动企业价值创造效果、效率和效益的显著提升。其次，数字技术促进产业链、价值链、创新链和资金链之间的融通，增强企业之间的协同和合作，促进产业要素变革、组织变革、创新体系变革和商业模式变革，推进制造业转型升级。再次，制造企业数字赋能价值创造的过程中需要解决隐私泄漏、数据确权、算法偏见、技术滥用等数据安全与算法安全问题，确保企业安全与产业稳定，这要从政策和技术层面不断完善。

（9）精准医疗过程优化研究

精准医疗是一种基于数据驱动方法的个性化医疗模式，它可以根据患者的遗传、环境和生活方式信息，为患者提供最佳的预防和治疗策略。精准医疗的主要任务包括个性化调整治疗方案、早期诊断、药物发现、

生物标志物识别等。精准医疗的基础是大规模、多维度、高质量的生物医学数据，如基因组数据、体征数据等，这些数据可以通过测序技术、可穿戴设备等获取。这些数据的普及使个性化、精准化、低成本的疾病预防、诊断和治疗成为可能。新冠[1]疫情期间，大规模测序数据和人口流动数据也促进了传染病精准防控的研究及落地。精准医疗的方法包括数学建模和优化算法，可以根据患者的健康状态和治疗效果，制定最优的治疗决策规则。这些决策规则可以考虑治疗措施对患者的即时效应和延迟效应，或对治疗效果、患者生活质量等多个预期目标进行优化。对于癌症、阿尔茨海默病等慢性疾病，专家已提出以精准医疗取代传统的最大耐受剂量用药策略。精准医疗还可以借助“虚拟生理人类（virtual physiological human，VPH）”模拟人体内各种生理过程和器官功能，以及使用大语言模型进行生物医学信息检索。精准医疗在癌症、阿尔茨海默病、传染病等多个领域有广泛的应用前景。通过探索疾病发生机制，包括识别疾病相关的生物靶点和反映治疗效果的生物标志物，精准医疗能够为患者提供更有效、更安全的药物治疗。通过利用大数据分析和AI技术，精准医疗能够为患者提供更及时、更便捷的诊断服务。通过利用可穿戴设备和智能手机等移动设备，精准医疗能够为患者提供更个性化、更持续的健康管理。精准医疗领域生机蓬勃，是学术界和业界投资最活跃的一个领域。精准医疗的过程优化在数据收集整理、模型构建、决策分析各个层面都发挥着重要作用，需要来自医学、信息科学和管理科学的学者进行交叉研究合作，以进一步提升中国健康卫生水平。

（10）数据要素的定价和收益共享分配机制研究

充分释放数据要素价值的关键之一在于数据要素流通，而活跃数据要素流通的关键之一在于有效的价格机制和收益共享分配机制。目前，数据要素定价的机制和方法以及收益分配机制和方法的研究在计算机科学、数据科学、管理学、经济学等多个领域取得了一些成果。在数据要素定价方面，计算机科学领域主要基于数据对AI模型的贡献度以及基于隐私补偿进行数据定价的研究；数据科学和经济学领域提出了依据公平性、收益最大化、无套利等价、信息熵等原则进行数据定价的方法；管理学领域针对不同场景提出了专家评估打分法、层次分析法、供需匹配法等数据定价的方法。在数据要素收益共享分配方面，管理学领域主要针对互联网服务平台中的多方收益共享问题开展研究；经济学领域主要侧重于基于数据的边际贡献来开展研究。随着中国数据要素基础制度建设的不断加快，数据要素流通市场及其支撑技术和基础设施环境的有序推进，数据产品化程度将不断成熟，数据要素的定价和收益共享分配机制研究亟待系统、深入地开展。该领域未来的发展趋势包括：① 充分体现数据要素新特征的市场价格形成机制、定价机制及其基础理论和方法；② 结合数据要素全生命周期，基于数据要素流通前沿技术的支撑，体现“由市场评价贡献、按贡献决定报酬”的收益共享分配机制、规则的研究；③ 结合数据要素产权结构性分置，开展基于应用场景的数据定价和收益共享分配方法的研究，包括公共数据授权运营中的各类定价方法与收益共享分配规则的研究。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　工业5.0环境下人机共融智能制造研究

早在19世纪中期，人机工程学就被提出了，主要研究作业中人、机器及环境三者间的协调问题，以让

1　新型冠状病毒感染，简称新冠。

人高效且安全地使用机器。20世纪80年代，随着计算机的普及，人机交互主要研究机器与人的反馈交互作用，使机器更加适应人的使用。自2008年起，在个性化制造需求驱动下，人机协作开始成为工业制造的普遍共识，人与机器可以在制造过程中共享资源和能力。这一阶段主要探索集中于非语义感知和浅层智能层面，然后融合认知计算、大模型、知识演化等技术，在工业5.0环境下人机协作走向了共生、主动、共融。

现阶段人机共融智能制造研究主要集中以下三个方面：① 人机相互感知－认知－信任是人机共融的基础，一方面通过物联网、数字孪生等技术实现人对机器任务执行的全面认识，另一方面通过知识学习和工效学分析，机器感知识别人的意图；② 人机协同组织－规划－决策是人机共融的主要内容，从整体系统进行自组织，规划人机运动和系统资源分配，并对生产过程进行智能决策；③ 人机协同交互－控制－进化是人机共融的核心，在人与机器丰富交互基础上，通过深度学习等方法，将人的认知模型引入机器智能，优化机器技能策略，具备更高层级智能水平，胜任更加复杂的协作任务。

目前，人机共融智能制造尚处于由交互协同转向底层双向认知、上层智能融合的初级阶段，还存在诸多挑战，例如：人－机－环境感知解析与实时认知、人－机信任与机器心理问题、异常情况下多人多机任务组织分配、即插即用可扩展人－机AI智能体等。人机共融智能制造正处于发展的上升期，坚定不移地朝全方位、多类型、体系化迈进，加速渗透行业应用。

“工业5.0环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是美国、中国和瑞典（表1.2.1），主要产出机构包括瑞典皇家理工学院、香港理工大学、帕特雷大学等（表1.2.2）。从主要国家间的合作网络（图1.2.1）来看，美国与其他国家间的合作非常密切；从主要机构间的合作网络（图1.2.2）来看，瑞典皇家理工学院、香港理工大学、帕特雷大学与北京理工大学之间的合作较为密切。由表1.2.3可以看出，施引核心论文数排名第一的国家为美国，中国排第二。由表1.2.4可以看出，施引核心论文数排名靠前的机构是瑞典皇家理工学院、乔治·华盛顿大学和奥卢大学。

表1.2.1 “工业5.0环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例/%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	13	44.83	633	48.69	2021.5
2	中国	7	24.14	569	81.29	2021.7
3	瑞典	5	17.24	446	89.20	2021.4
4	希腊	5	17.24	183	36.60	2022.0
5	印度	4	13.79	493	123.25	2020.8
6	韩国	3	10.34	402	134.00	2021.7
7	澳大利亚	3	10.34	392	130.67	2020.7
8	德国	3	10.34	297	99.00	2021.7
9	意大利	3	10.34	283	94.33	2020.3
10	土耳其	3	10.34	242	80.67	2020.7

表 1.2.2　“工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	瑞典皇家理工学院	4	13.79	366	91.50	2021.8
2	香港理工大学	3	10.34	177	59.00	2022.0
3	帕特雷大学	3	10.34	112	37.33	2022.0
4	奥克兰大学	2	6.90	285	142.50	2021.5
5	约翰内斯堡大学	2	6.90	278	139.00	2022.0
6	北京理工大学	2	6.90	81	40.50	2022.0
7	浙江大学	2	6.90	81	40.50	2022.0
8	乔治·华盛顿大学	2	6.90	73	36.50	2022.0
9	柏林经济法学院	2	6.90	71	35.50	2022.0
10	迪肯大学	1	3.45	281	281.00	2019.0

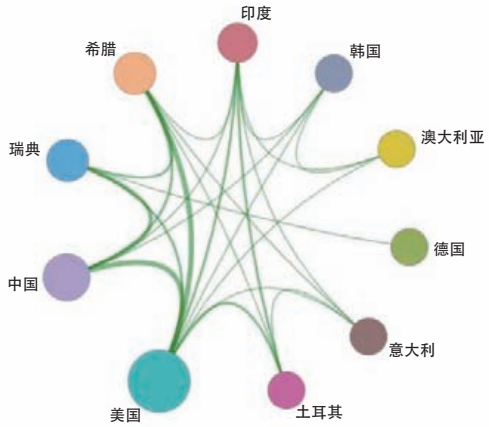

图 1.2.1　“工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

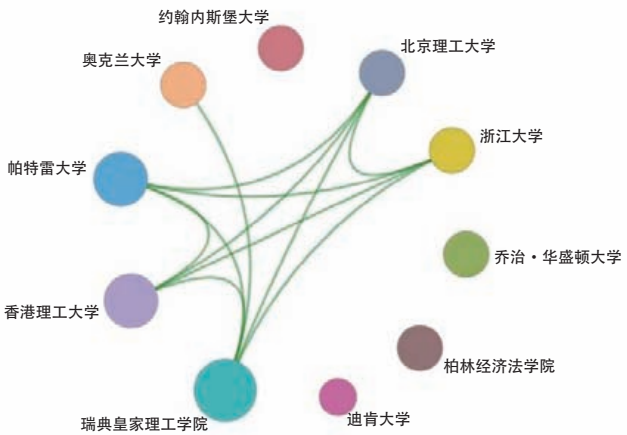

图 1.2.2　“工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	美国	31	17.32	2021.4
2	中国	29	16.20	2021.5
3	英国	21	11.73	2021.2
4	印度	21	11.73	2021.2
5	意大利	15	8.38	2020.5
6	沙特阿拉伯	11	6.15	2021.6
7	瑞典	11	6.15	2021.5
8	加拿大	11	6.15	2020.6
9	德国	10	5.59	2021.3
10	巴西	10	5.59	2020.9

表 1.2.4 “工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	瑞典皇家理工学院	6	13.95	2021.8
2	乔治·华盛顿大学	5	11.63	2021.6
3	奥卢大学	4	9.30	2021.5
4	伊斯兰密利亚大学	4	9.30	2020.8
5	韦洛尔理工学院	4	9.30	2022.0
6	约翰内斯堡大学	4	9.30	2021.2
7	香港理工大学	4	9.30	2022.0
8	塔伊夫大学	3	6.98	2021.7
9	柏林经济法学院	3	6.98	2022.0
10	迪肯大学	3	6.98	2021.3

图 1.2.3 为“工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿的发展路线。在个性化超复杂产品的规模化、柔性化和自动化生产需求推动下，突破人机相互感知 – 认知 – 信任、人机协同组织 – 规划 – 决策、人机协同交互 – 控制 – 进化等关键技术，从“个人智能融合”逐步迈向“群体智能融合”和“智能共同演进”，实现人机互生共融的新制造模式。

图 1.2.3　“工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿的发展路线

1.2.2　物流无人机调度与路径优化研究

近年来，面对无人机、地面起降设施、物流仓库等多种物流元素，国内外学者研究问题包括路径规划、调度优化、航迹优化和运营管理等内容。

（1）城市场景下物流无人机路径规划问题

主要包括无人机旅行商问题（TSP-D）、多无人机路径问题（VRP-D），车辆 – 无人机联合路径问题几大类重要研究。为了突破无人机飞行距离受限于电池电量而航程较短的不足，车辆 – 无人机联合配送路径规划逐渐成为兼顾车、机优势的研究重点。由此衍生出车辆辅助无人机、无人机辅助车辆、独立配送和并行配送等多类问题模型。当前研究采用成本、路径、时间窗、能耗和碳排放等多个目标优化。除借鉴经典的路径规划方法外，最新研究中还将城市场景中存在的飞行限制、公众安全与隐私因素、最后一公里配送中需求变化等动态因素引入路径规划，确保结果更为可行，这也是未来无人机物流配送路径研究的重点。

（2）无人机调度问题

无人机调度问题是路径规划问题的拓展与延伸，重点关注更为实时的多机配送任务分配、地面保障资源安排等内容。综合考虑可用配送时间、保障设施容量、充电换电设施布局等要素的无人机调度问题是当下研究热点。其中既包括车辆 – 无人机混合调度、无人机机群调度等问题，也包括对充电、仓库、起降场等设施布局的研究。最近的一些研究中，已开始将城市环境中的不确定影响因素（如风场、高大障碍物、禁飞区、坠地伤人等第三方风险等因素，以及充电站、重复访问节点、货物补给点等因素）纳入约束条件之中。可以预见，整合物流仓库位置、机队规模、电池充电、非线性能耗、无人机故障等更为复杂要素的调度优化模型，将成为新的研究重点。

（3）航迹优化与运营管理

与路径规划侧重二维路径设计不同，航迹优化关注三维空间中航迹设计。相关优化模型中，除将飞行

时间最短、能耗最小作为优化目标外，主要考虑各类空中限制区、地面障碍物带来的约束。运营管理研究重点关注无人机物流影响因素、政策技术环境体系、市场规模、商业模式等内容。

针对以上物流配送路径及调度优化问题的算法可分为精确算法和启发式算法两大类。精确算法和求解器多用于小规模问题的精确解求解；启发式算法多用于大规模问题的近似最优解求解。其中，启发式算法研究重点关注解的质量、收敛速度、改进空间。随着模型复杂度不断增加，提升算法效率和求解精度成为新的关注点。分析对比精确算法、求解器和启发式算法求解结果，构建算法验证标准体系将成为新的研究领域。

电驱动零排放无人机高度契合可持续发展潮流。基于社会生态视角的物流碳排放评估研究是当下的热门研究方向之一，其中地面货车、电动车、摩托车是几类常见的研究评估对象。针对无人机物流运输，减少车–机组合配送系统 CO_2 排放的绿色路由问题，已经成为新的研究方向。未来可深入探讨太阳能、风能等清洁能源构成的充电网络中，无人机配送系统效率与充电布局关系。此外，由于无人机贴近地面飞行，噪声、坠地伤人、窥探公众隐私等也有较大的研究价值。

“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿中核心论文数排名前三位的国家是美国、中国和德国（表 1.2.5），核心论文主要产出机构为美国东北大学、麻省理工学院、美国波特兰州立大学等（表 1.2.6）。从主要国家间的合作网络（图 1.2.4）来看，加拿大、美国、中国与其他国家间的合作较多；从主要机构间的合作网络（图 1.2.5）来看，美国东北大学、麻省理工学院的合作较为紧密。由表 1.2.7 可以看出，中国的施引核心论文数排名第一。由表 1.2.8 可以看出，施引核心论文数排名靠前的机构是世宗大学、中国科学院和德比大学。图 1.2.6 为“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.5　“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	17	37.78	1 641	96.53	2019.2
2	中国	5	11.11	444	88.80	2019.0
3	德国	4	8.89	294	73.50	2018.2
4	土耳其	3	6.67	481	160.33	2018.0
5	新加坡	3	6.67	309	103.00	2019.3
6	意大利	3	6.67	295	98.33	2019.0
7	加拿大	3	6.67	250	83.33	2019.0
8	印度	3	6.67	169	56.33	2020.0
9	丹麦	2	4.44	206	103.00	2018.0
10	西班牙	2	4.44	201	100.50	2019.5

表 1.2.6　“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国东北大学	3	6.67	231	77.00	2020.7
2	麻省理工学院	3	6.67	223	74.33	2020.0
3	波特兰州立大学	3	6.67	218	72.67	2018.7
4	新加坡国立大学	2	4.44	259	129.50	2019.5
5	耶拿大学	2	4.44	177	88.50	2019.5
6	纽约州立大学宾厄姆顿分校	2	4.44	111	55.50	2020.0
7	波尔图技术与科学研究所	1	2.22	564	564.00	2017.0
8	特拉斯 – 蒙特什与阿尔图杜罗大学	1	2.22	564	564.00	2017.0
9	加拉塔萨雷大学	2	6.90	71	35.50	2022.0
10	鲁汶天主教大学	1	3.45	281	281.00	2019.0

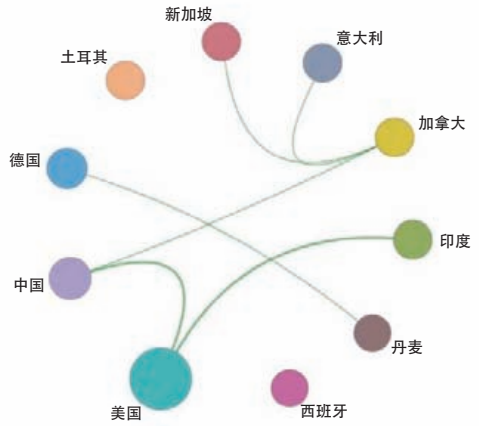

图 1.2.4　“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

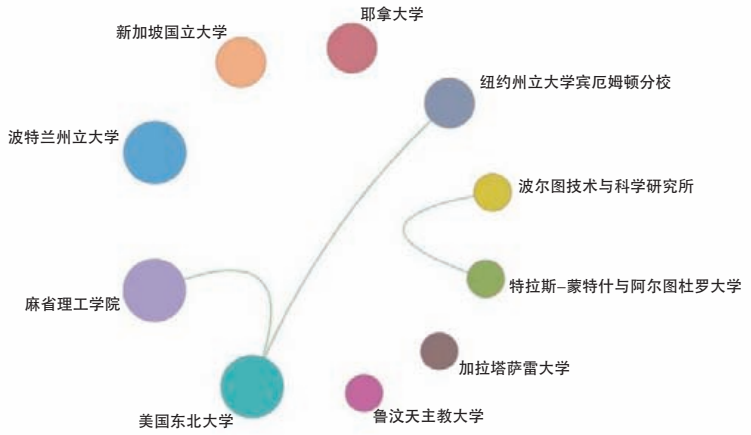

图 1.2.5　“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	98	24.69	2020.3
2	美国	82	20.65	2019.9
3	英国	46	11.59	2020.1
4	德国	27	6.80	2019.7
5	韩国	26	6.55	2019.7
6	法国	24	6.05	2020.0
7	意大利	23	5.79	2020.2
8	西班牙	22	5.54	2019.4
9	印度	18	4.53	2020.7
10	加拿大	16	4.03	2020.5

表 1.2.8 “物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	世宗大学	6	13.95	2021.8
2	中国科学院	5	11.63	2021.6
3	德比大学	4	9.30	2021.5
4	东南大学	4	9.30	2020.8
5	新加坡国立大学	4	9.30	2022.0
6	香港理工大学	4	9.30	2021.2
7	浙江大学	4	9.30	2022.0
8	澳门大学	3	6.98	2021.7
9	荣旋大学	3	6.98	2022.0
10	庆熙大学	3	6.98	2021.3

1.2.3 重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究

结合当前研究现状和重大工程管理实践，重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究前沿主要包括以下两方面的内容。

（1）重大工程创新生态系统的共生演化与价值共创

近年来，重大工程实践中的技术创新挑战日益增加。一方面，重大工程中各方利益相关主体的多样化诉求、新兴技术变革与数智赋能趋势使创新在重大工程中的战略性地位愈加凸显，创新成为关乎重大工程成功的关键因素。另一方面，重大工程创新活动面临创新情境独特、目标需求刚性、阶段动态演化、技术集成复杂等挑战，涉及诸多不同于一般企业技术创新的管理问题。有鉴于此，重大工程创新管理研究的关注点需要从传统技术创新体系向创新生态系统转变。创新生态系统是基于工程创新实践活动形成的具有“生命力”和“进化力”的平台。它将创新起因与活动过程、参与主体与生境要素、资源集聚与力场涌现纳入一个系统框架，具有克服单一、线性、静态、封闭等研究缺陷的潜力。生态系统之所以能够形成，是因为系统中的各类主体彼此建立联系，形成一个联系紧密、交互演化的整体，各主体基于价值共创的共识进行资源的协同以形成价值共同体。围绕重大工程创新生态系统的共生演化与价值共创，存在以下需要进一步探讨的研究问题：面向创新能力提升的重大工程自组织与他组织学习；重大工程创新生态系统的动态演化机理；数字化转型背景下重大工程创新生态系统的

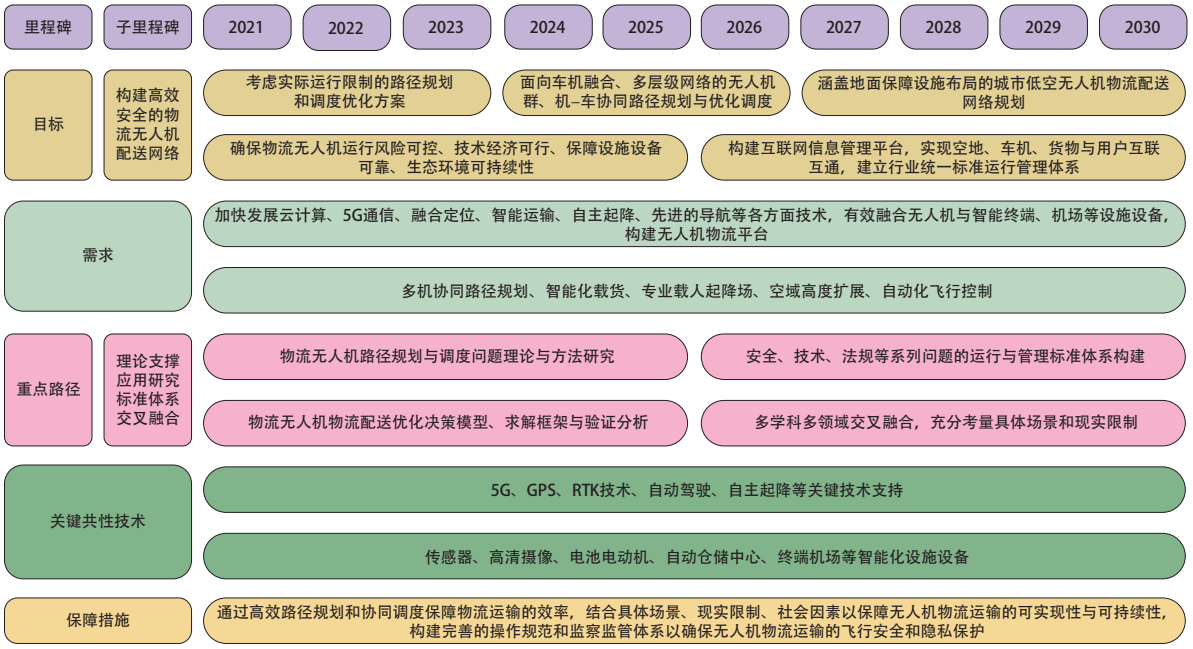

图 1.2.6　“物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿的发展路线

价值共创行为模式；基于共生互惠关系的重大工程创新生态系统资源编排与价值分配等。

（2）重大工程创新生态系统的治理机制

相较于一般工程，重大工程具有多维度、多层次、多阶段的复杂性，其管理实践亦面临多方面的复杂性问题。为在有限的时间内集聚资源展开攻关，重大工程的治理往往与举国体制密切相关。因此，针对重大工程的治理研究主要围绕特定方面或体制机制背景展开，如面向重大工程社会责任的“企业–政府–社会”治理框架、针对重大工程组织模式的“政府–市场”二元治理机制等。创新生态系统组成的基本要素是物种（创新主体），物种联结形成了各种群落，物种和群落在共生竞合的相互作用中推动系统整体演化。故面向重大工程创新生态系统的治理需要立足于复杂系统观，结合不同类型创新主体间的交互关系及其深层特征，设计有针对性的治理策略，推动重大工程创新生态系统向高效、协调共生型演化，形成支撑高质量、高水平、高影响力创新成果产出–扩散–转换的重要平台。目前，存在以下需要进一步探讨的研究问题：重大工程创新生态系统的协同演化治理；举国体制下的重大工程创新生态系统治理；重大工程创新生态系统的平台治理策略等。

已有研究成果显示，“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是中国、英国和澳大利亚，篇均被引频次排名前三的国家是新加坡、澳大利亚和美国（表 1.2.9）。在核心论文主要产出国家的合作网络（图 1.2.7）中，中国与澳大利亚、美国和荷兰的合作较多。其中，中国学者基于港珠澳大桥等重大工程，构建了重大工程创新生态系统形成、演化与治理的理论分析框架，刻画了创新生态系统集成者的角色，揭示了创新生态系统价值共创的机理。依托于伦敦地铁、希思罗机场航站楼、邦纳高速公路桥等重大工程，国外学者探讨了重大工程创新生态系统的意义建构、“机会窗口”、渐进式与开放式创新、跨组织学习等方面的内容。

“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中核心论文数排名前三的机构是同济大学、伦敦大学学院和上海交通大学（表 1.2.10）。在核心论文主要产出机构的合作网络（图 1.2.8）中，同济大学、

重庆大学和华中农业大学间，以及阿尔托大学与奥卢大学间的合作较多。表 1.2.11 显示，中国、英国和澳大利亚的施引核心论文数名列前茅。表 1.2.12 显示，施引核心论文数排名前三的机构是同济大学、伦敦大学学院和上海交通大学。图 1.2.9 为“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.9 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	21	46.67	397	18.90	2020.4
2	英国	12	26.67	241	20.08	2020.2
3	澳大利亚	6	13.33	311	51.83	2018.0
4	美国	4	8.89	192	48.00	2017.8
5	芬兰	4	8.89	106	26.50	2019.8
6	德国	2	4.44	62	31.00	2019.0
7	加拿大	2	4.44	60	30.00	2020.0
8	挪威	2	4.44	20	10.00	2021.0
9	荷兰	2	4.44	8	4.00	2021.5
10	新加坡	1	2.22	57	57.00	2018.0

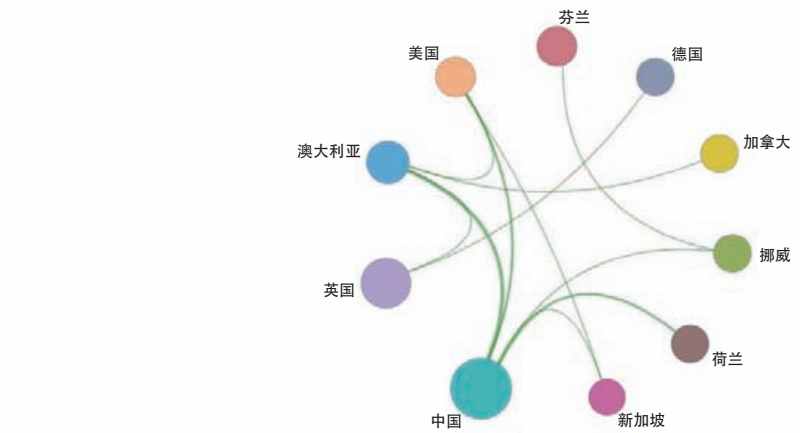

图 1.2.7 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	同济大学	9	20.00	180	20.00	2020.3
2	伦敦大学学院	4	8.89	143	35.75	2018.8
3	上海交通大学	3	6.67	162	54.00	2019.0
4	阿尔托大学	3	6.67	98	32.67	2019.3
5	重庆大学	3	6.67	24	8.00	2021.3
6	南京大学	2	4.44	76	38.00	2020.5
7	利兹大学	2	4.44	55	27.50	2020.5
8	奥卢大学	2	4.44	49	24.50	2019.5
9	华中农业大学	2	4.44	47	23.50	2019.5
10	苏塞克斯大学	2	4.44	30	15.00	2020.5

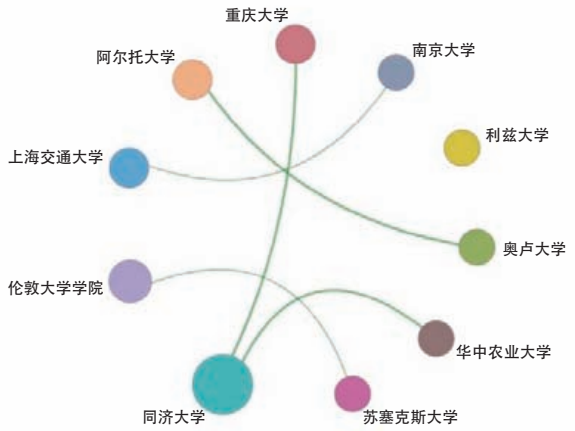

图 1.2.8　“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	233	34.37	2021.1
2	英国	108	15.93	2020.6
3	澳大利亚	101	14.90	2020.6
4	美国	60	8.85	2021.0
5	意大利	33	4.87	2021.7
6	加拿大	29	4.28	2021.0
7	印度	25	3.69	2021.2
8	芬兰	25	3.69	2021.0
9	挪威	25	3.69	2020.4
10	荷兰	22	3.24	2021.4

表 1.2.12　“重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	同济大学	45	19.91	2021.0
2	伦敦大学学院	27	11.95	2020.2
3	上海交通大学	26	11.50	2020.9
4	利兹大学	22	9.73	2020.8
5	香港理工大学	19	8.41	2020.6
6	重庆大学	18	7.96	2021.6
7	米兰理工大学	15	6.64	2021.8
8	南京审计大学	14	6.19	2021.0
9	悉尼科技大学	14	6.19	2020.3
10	迪肯大学	13	5.75	2020.5

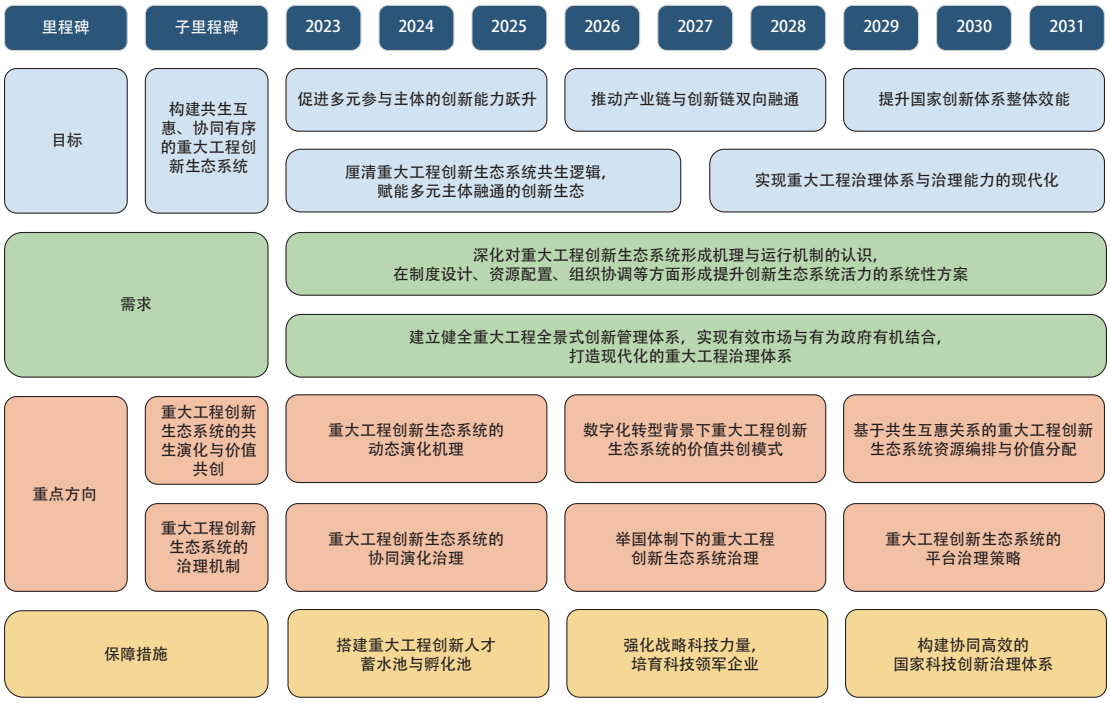

图 1.2.9 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

在工程管理领域中，本年度 10 个全球工程开发前沿分别是：“线性规划和整数规划求解器”“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”“基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”“健康居家养老智能系统平台”“城市安全风险综合监测预警平台”“基于智能仿真的供应链风险管理平台”“工业装备健康监测与数据融合分析系统”“能源系统外部冲击和内部扰动的预测预警系统”“基于联邦学习的金融风险管理系统”“网络视听推荐算法与内容监管智能平台”。其核心专利情况见表 2.1.1 和表 2.1.2。这 10 个工程开发前沿包含了医学、建筑、交通、计算机等众多学科。其中，“线性规划和整数规划求解器”“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”“基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”为重点解读的前沿，后文会对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

（1）线性规划和整数规划求解器

线性规划和整数规划求解器以工程软件的形式，将数学规划算法用于公共机构与商业组织大规模复杂问题的优化求解。该技术已经广泛应用于国防、能源、制造、交通、通信、金融等各个领域，并创造了巨大的应用价值。求解器的研发技术门槛高、难度大，需要同时精通数学优化理论并掌握大规模计算机系统工程开发能力的科技人才。与此同时，求解器的研发还需要投入大量的时间与资金，投资风险较高。目前，全球主流求解器市场被 IBM、Gurobi、FICO 三家美国公司的产品所垄断，市场竞争门槛极高。自 2018 年

表 2.1.1　工程管理领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	线性规划和整数规划求解器	103	328	3.18	2020.3
2	基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统	66	1 090	16.52	2020.9
3	基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统	26	208	8.00	2020.0
4	健康居家养老智能系统平台	53	177	3.34	2019.8
5	城市安全风险综合监测预警平台	94	237	2.52	2020.6
6	基于智能仿真的供应链风险管理平台	59	334	5.66	2020.9
7	工业装备健康监测与数据融合分析系统	23	379	16.48	2020.4
8	能源系统外部冲击和内部扰动的预测预警系统	16	121	7.56	2020.2
9	基于联邦学习的金融风险管理系统	35	74	2.11	2021.51
10	网络视听推荐算法与内容监管智能平台	15	196	13.07	2019.13

表 2.1.2　工程管理领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	线性规划和整数规划求解器	6	15	9	16	24	8
2	基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统	0	1	8	13	20	16
3	基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统	1	4	5	7	2	34
4	健康居家养老智能系统平台	4	11	11	5	8	13
5	城市安全风险综合监测预警平台	9	4	10	8	22	10
6	基于智能仿真的供应链风险管理平台	4	3	0	7	17	9
7	工业装备健康监测与数据融合分析系统	3	0	2	5	5	31
8	能源系统外部冲击和内部扰动的预测预警系统	2	2	1	3	2	66
9	基于联邦学习的金融风险管理系统	0	0	0	4	9	30
10	网络视听推荐算法与内容监管智能平台	2	6	1	3	0	28

开始，国内的研发团队陆续推出了自主研发的国产求解器，包括中国科学院的开源求解器 CMIP、杉数科技的 COPT、阿里云的 MindOPT 以及华为的天筹（OPTV）求解器等。在求解器产品发展的三十多年里，全世界的研发团队不断优化其性能，提升求解器的运算效率和求解大规模问题的能力。传统的求解器研发技术主要基于数学规划领域的理论和算法，包括单纯形法、对偶理论、分支定界法、启发式算法等。然而，近年来计算机领域软硬件的技术革新以及 AI 与机器学习算法的发展为线性规划和整数规划求解器提供了新的研发方向，包括并不限于大规模分布式并行计算、AI 和量子计算等。当前求解器的发展趋势主要着力于解决大规模问题及复杂问题的快速求解，从而为机构和企业提供更好的全局优化决策，提高企业面对变化的随机应对能力。

（2）基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统

随着工业互联网与大数据技术的不断发展，及其与制造领域的深度融合，智能工厂中生产设备、传感器等工业要素得以紧密地连接和交互，海量生产数据能够实时地采集、共享和分析。在此背景下，工厂的运维管理模式逐渐向数字化、网络化、智能化的方向迈进，基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统应运而生。该系统以人、机、料、法、环的全面互联为基础，以生产过程全生命周期数据的采集与管理为支撑，借助 AI 工具，能够实时监控生产进程、精准把握设备状态以及智能下达运维指令等，构建向全产业链、全价值链延伸的全新服务型运维体系。围绕提升运维系统的数据管理联动性与实时性、设备管控精准性与时效性、系统运行可靠性与集成性的需求，现有研究重点落脚于工业大数据采集及管理技术研究、工业大数据驱动的设备故障诊断及维护技术研究、系统层面的技术整合与开发三个方面。然而，智能工厂运维系统仍面临智能化不足、集成化难度大、数据安全性要求高等诸多挑战。因此，需求导向的运维系统定制化开发、多源异构数据融合技术研究以及加密与认证技术优化等方面或将成为未来关注的焦点。

（3）基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统

建筑方案的自动生成是指计算机根据项目背景、设计目标和要求，通过自动化的方式创建出建筑设计的构想和方案。参数化设计技术可以实现上述过程，然而生成的建筑方案依赖于设计人员自主构建的参数化模型，因此，自动化和智能化的水平有限。作为设计人员经验与智慧的结晶，既有的建筑设计资料由于其多学科交叉、形式多样、时效性强等复杂特征，在之前的研究中未被充分利用。随着深度学习技术对多维度、多模态、多尺度数据特征挖掘能力的逐渐增强，以既有设计资料和系统开发技术为基础，由深度学习驱动的建筑方案自动生成方法与系统已成为加速建筑设计行业智能化转型升级的关键引擎、重要途径和全新载体。建筑设计图纸是既有设计资料中的核心内容，同时也是设计方案主要的视觉呈现方式。近年的学术研究以计算机行业图像生成研究领域的思维范式为参考，从建筑方案设计的角度出发，重点探讨了建筑方案语义表达、建筑风格迁移、建筑设计多模态特征融合、深度生成模型的应用与改进、自动合规性检查等议题。为了进一步提升自动生成建筑方案的可靠性和整个设计系统的智能化水平，平衡规则性和创造性的人机协同设计模式、复杂建筑参数化模型驱动的设计资料数据增强、设计规范歧义条文的识别与自动合理性检查、融合多学科引擎和设计规律的建筑方案生成方法及系统开发等将成为研究的主流趋势。

（4）健康居家养老智能系统平台

伴随着“倒金字塔”“空巢”式家庭以及高龄失能老人数量的快速增长，人口老龄化问题日趋严峻。截至 2022 年底，中国 65 周岁及以上老年人达 2.1 亿，占全国总人口的 14.9%；空巢老人占比已超过半数，大量老年人面临着居家养老困境。为解决该难题，健康居家养老智能系统平台融合医疗、社区、企业多方参与，综合利用物联网、云计算、大数据以及 AI 等先进技术，以期全方位满足老年人居家养老需求。当前主要研究方向有：① 新型智能感知和实时监测技术研发；② 疾病与风险预测及管理系统研发；③ 智能预警与在线诊断系统研发；④ 智能居家互联系统研发。展望未来，随着新一代智能技术的不断涌现和居家养老智能化的发展，提升服务的全域化、精准化、多样化和融合化将成为该行业未来的发展趋势。全域化的趋势综合医疗、养老、社区、企业与政府等多参与方，提供融合生活、医疗、健康、娱乐等一体化服务平台；精准化的发展将借助新兴数据分析和 AI 技术，实现对老年人健康状况的更为准确的预测和评估；多样化的服务将更加强调个体差异和需求的多样性，满足老年人多方面的个性化需求，增进晚年生活幸福感；融合化的发展将促使不同领域的技术和资源融合共享，实现更高效的综合居家养老服务。

（5）城市安全风险综合监测预警平台

城市安全风险综合监测预警平台是指从城市整体安全运行和城市“大应急”的战略视角，充分利用物联网、云计算、大数据、AI 等现代信息技术，围绕城市自然灾害、公共卫生事件、事故灾难、社会安全事件与宏观环境等风险类型，构建支持城市安全风险监测网络、灾害态势感知、智能风险研判预警与联动处置的数字化平台，以提升城市风险识别、防范、化解、管控的智能化水平，保障城市安全发展。目前，中国城市安全风险综合监测预警平台已进入试点建设阶段。然而，快速城镇化使得城市人口增多，基础设施系统不断扩建，城市系统日趋复杂；同时，气候变化下极端事件频发，多灾种集聚和灾害链特征日益凸显，城市面临的自然灾害、人为事故等综合性和系统性安全风险激增。在此背景下，城市安全风险综合监测预警平台建设与发展方向包括：完善跨部门、跨区域数据共享与协调联动机制；研究天基、空基和地基监测精度互校、尺度互补的城市全面感知技术；利用 AI、数字孪生等先进技术，开发城市安全风险尤其是多灾种级联耦合风险的精准与智能化识别、研判及预测技术；强化预警信息多手段、多渠道、多受众发布技术；提升监测预警硬件设施内在韧性，增强平台信息安全风险防控能力。

（6）基于智能仿真的供应链风险管理平台

当前，数字化与全球化的蓬勃发展为供应链提供了海量的数据和信息与新兴技术的支持。然而，也使得供应链高度复杂，不确定性和风险水平上升，市场变化更加迅速。日益复杂和不稳定的环境对供应链的风险管理提出了更为严峻的挑战。智能仿真的研究方法在数字时代下的供应链风险管理中展现出独特的优势。基于智能仿真的供应链风险管理平台通过构建虚拟的供应链环境，不但能模拟已有供应链方案，还能模拟不同参与者的行为、决策和交互，以及可能的风险事件的发生和传播，更准确地模拟供应链的复杂性、动态性和多变性，从而帮助决策者评估不同的风险对供应链的影响，并制定相应的风险应对策略。基于智能仿真的供应链风险管理平台强调多样性的风险事件建模、决策支持、多尺度仿真和协同决策等方面的创新，因而被广泛应用于风险评估与预测、供应链调整与优化、应急响应计划以及风险管理培训与演练等方向。同时，智能仿真系统往往是一种分布仿真模型，可以在包含云在内的各种网络环境下运行，智能体根据可使用的众多计算机的运算负荷选择驻留或移动在不同的服务器平台上，因此，可实现大规模供应链精细仿真和整体系统的计算优化。未来，基于智能仿真的供应链风险管理平台有望进一步融合更先进的 AI 技术优化决策，如机器学习和深度学习，以提高预测风险精准度与时效性。平台也朝着高度定制化的方向发展，以满足不同行业、企业和风险场景的特定需求，为用户提供更个性化的分析和决策支持。总体而言，基于智能仿真的供应链风险管理平台将高速发展，成为数字时代供应链风险管理的重要支撑工具。

（7）工业装备健康监测与数据融合分析系统

工业装备健康监测与数据融合分析系统综合运用先进传感、5G、AI 算法和专家系统，融合云计算、雾计算、边缘计算等数据处理范式，实现工业装备健康状态实时感知、故障精准诊断与预测，以便采取预防性维修策略，避免故障突发。当前，面对工业装备结构复杂、工况多变、故障样本匮乏等问题，相关学者依托大数据、数字孪生等技术，提出了新的数据生成及融合分析理论、故障迁移诊断与预测方法，并探讨了相应的最优运维决策手段。其中，海量多模态监测数据的高度融合需要确定数据融合层级，评估多模态数据融合优先级，以及在复杂工业场景中考虑人因要素分析决策。以服役完好率最高、非计划停机时间最短、运行维护成本最低为目标，研究制定工业装备最优运行维护方案。工业装备健康监测与数据融合分析系统快速发展，实现了对数控机床、航空航天装备、工业机器人等高附加值装备有效的健康管理，产生

了重大的经济效益和社会效益，未来将形成多学科交叉的工程开发研究新前沿，主要包括结合区块链技术确保工业装备监测数据的隐私性和安全性，基于数字孪生技术进行场内及场外联合监测和健康管理，通过3D 打印制造维护备件从而节约材料、缩短运维时间，利用生成式 AI 技术辅助制定预防性维修策略，等等。

（8）能源系统外部冲击和内部扰动的预测预警系统

重大突发事件往往会对能源安全产生不可忽视的影响，外部冲击和内部扰动同时影响着能源系统安全。外部冲击包括能源贸易冲突、重大公共安全事件及地缘政治动荡等。内部扰动包括短时气象波动、极端天气干扰及设施的不正常工况等。不同结构的能源供应消费体系，外部冲击与内部扰动的传导路径和反馈机制呈现出相应的复杂性及多元性，对系统安全运行的影响具有显著的时空异质性，其风险测度、规律识别、预警预测、影响评估、应对策略均亟须深入研究。主要研究方向包括：能源系统气象预测技术；能源系统重大突发事件传导机制、演化规律及扩散机理研究技术；能源系统外部冲击和内部扰动的早期识别及预测预警关键技术；能源系统协同安全预警机制、多元安全保障机制、应急供应机制及风险应对机制。未来的发展趋势包括：① 气象扰动预测技术，如超短时天气预测、海洋大尺度长期风能预测方法、大气环流稳态及扰动预测校正方法、雷电预警方法；② 能源系统冲击的早期预警机制，如基于统计规律的关键指标识别及预警系统、基于大数据的宏观危机分析工具、基于卫星及遥感的能源基础设施风险识别技术；③ 能源系统冲击的扩散机理研究，如基于气候模型的动态降尺度研究、基于全球大气模型的气候变化传导路径研究。

（9）基于联邦学习的金融风险管理系统

联邦学习是一种建立机器学习模型的算法框架。这一框架既能够使多个数据拥有方联合完成机器学习模型的训练任务，又能够保护他们各自数据的隐私安全；联合训练获得的机器学习模型可以被各个数据拥有方共享和使用。在模型的训练过程中，原始数据不会离开数据提供方，各方数据以加密的方式在多方之间传递和交换；训练得到的模型在性能上可以接近由完整数据训练得到的模型的性能。在金融风险管理实践中，金融机构总是努力通过获取与分析更多来源的数据信息以缓解信息不对称、降低风险承担。但受数据安全与隐私保护的限制，很多可用于金融风险管理的高价值信息不能被金融机构直接使用，从而难以充分发挥其商业价值。联邦学习可使金融数据与其他领域数据融合，建立更加精准和全局的算法模型，为金融风险管理提供更加全面的信息。目前，这方面的研究主要集中在：融合金融机构和其他企事业单位的数据构建融资者画像，评估个人的信用等级和偿付能力、衡量（小微）企业经营现状和发展前景，实现对融资者的风险测评；结合贷款进程中的还款情况以及贷款期间与贷款者相关的数据信息，建立贷中的风险预警模型；多家金融机构数据联合，开展信用卡欺诈检测、反洗钱预警与识别研究；保险公司融合与投保人相关的多方数据开展保险产品的定价研究等。未来可能的研究趋势主要包括：金融风险管理过程中联邦学习生态的形成与发展模式；金融风险管理联邦学习大数据平台构建；金融风险管理联邦学习各数据方的遴选决策和贡献度测度；金融风险管理场景下联邦式机器学习方法开发；金融联邦学习模型的可解释性；基于联邦学习的大规模金融风险认知图谱；金融垂直领域生成式人工智能（artificial intelligence generated content，AIGC）与联邦学习等。

（10）网络视听推荐算法与内容监管智能平台

网络视听推荐算法是一种数据驱动的技术，基于用户兴趣和行为，预测并匹配个性化内容，推动数字经济发展。它分析用户的观看记录、搜索和社交行为，从海量资源中推荐用户感兴趣的内容。随着技术的进步，算法结合多模态特征、个人属性、领域信息等，可实现更准确的个性化推荐，提升服务质量，增强互联网平台核心竞争力。① 数据分析技术：传统算法利用历史行为预测兴趣，但大数据时代需整合新闻、视频等数据。算

法整合多模态特征，分析关联，提供精准推荐。大语言模型如 BERT 应用于推荐系统，处理多元数据，提取丰富语义信息，全面推荐体验。② 产品与服务智能推荐技术：算法应确保推荐公平性，避免歧视和信息茧房，传播正能量。增加推荐多样性，减少信息孤岛，维护用户隐私安全。构建健全的数据安全和个人信息保护策略，应对信息泄漏问题。③ 不同业务场景的系统开发：电商领域需平等优质推荐，避免消费能力不同引发不平等。视频网站应扩展推荐信息范围，避免用户信息孤岛。社交媒体应减少观点极化，构建准确的推荐机制，引导健康发展。在全球范围内，美国与中国是主要竞争国家，专利公开量多且被引数高。中国鸿海精密工业股份有限公司领先。中国高校强调理论创新，工业界关注实际效果。美国专注于提升用户体验，重点是移动智能终端的个性化内容推荐，包括深度学习和多模态推荐技术。未来展望显示网络视听推荐算法将在多个方面持续发展。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　线性规划和整数规划求解器

线性规划和整数规划求解器研究的重点是如何将数学规划理论与计算机应用技术相结合。其中，数学规划理论是数学规划求解器的理论根基。1947 年，“线性规划之父”George Dantzig 提出了单纯形法（simplex method），有效地解决了线性规划问题，该算法在后来被评为 20 世纪最伟大的算法之一。1979 年，L. Khachiyan 发明了椭球算法（ellipsoid algorithm），首次证明了线性规划问题可以在多项式时间内求解。然而，该算法的计算性能较差，难以有效应用。1984 年，N. Karmarkar 发明了内点算法（interior point algorithm），这是线性规划第一个可实际应用的多项式时间算法。在整数规划领域，Ralph E. Gomory 于 1958 年发现了第一个一般线性整数规划的收敛算法——割平面算法（cutting plane algorithm）。之后的研究者又提出了分支定界、分支切割等算法。20 世纪 80 年代，随着计算机技术的发展，人们开始尝试用计算机开发求解器软件。当前全球主流的三大商用求解器包括 IBM CPLEX、Gurobi 和 FICO Xpress。其中，CPLEX 于 1988 年由美国数学家 Robert Bixby 等开发，1997 年被 ILOG 公司收购，2009 年被 IBM 收购。2008 年，CPLEX 求解器团队的几位核心开发人员（Zonghao Gu、Edward Rothberg、Robert Bixby 等）创立了 Gurobi（Gurobi 的取名源于三位创始人姓氏的前两个字母）。1983 年，英国爱丁堡的 Dash Optimization 团队开发了 Xpress。该公司于 2008 年被美国金融信用商 FICO 收购。除了上述商用求解器，海外的开源求解器还包括德国 ZIB 研究所开发的 SCIP、美国谷歌的优化工具套件 OR-Tools 以及 COIN-OR 基金会维护的 CBC（COIN-OR branch and cut）等。近年来，国内研究团队也陆续推出了自主研发的国产求解器。2018 年，中国科学院戴彧虹团队推出了国内首款开源整数规划求解器 CMIP。2019 年，杉数科技推出了中国首个商用线性规划求解器 COPT。2020 年，阿里达摩院决策智能实验室推出了商用求解器 MindOpt。华为也于 2021 年推出了天筹（OPTV）AI 求解器。2023 年 6 月底，在美国亚利桑那州立大学 Hans Mittelmann 教授提供的求解器测试平台上，杉数科技、Gurobi 和华为研发的求解器分别位列线性规划求解器前三名；Gurobi 和杉数科技研发的求解器分别位列整数线性规划测评的第一、第二名。

在求解器的发展过程中，计算机硬件速度的提升与求解器算法效率的优化，使得求解器的综合效率不断提高，可解问题规模不断增大。其中，计算机硬件速度的提升包括更快的 CPU 主频、更大的内存带宽、处理器物理架构的升级、指令集升级、多核多线程技术、32 位到 64 位的提升、编译器的升级等。线性规划和整数规划算法效率的优化主要来源于算法的并行化（如线性规划的 barrier 算法、MILP 的树搜索），

以及整数规划启发式算法的应用（包括 RINS、局部分支、MCF 割）等。

未来，随着新一代计算机技术的涌现和计算机算力的提升，分布式并行计算、AI 和量子计算或将成为值得重视和前瞻布局的研究方向。

1）分布式并行计算。目前主流的商业求解器 CPLEX 和 Gurobi 只能支持 32 个核心的并发计算，单纯增加运算核心数并不能提升求解效率。如何优化求解器算法，使其充分利用分布式服务中成千上万个 GPU 核心的运算资源，提升大规模问题的求解速度，是未来的研究方向之一。

2）AI 算法。近年来，有研究学者尝试在求解器优化算法中融合 AI 技术，提升线性规划和整数规划的求解效率。然而，现有的机器学习算法需要对已有问题进行模型训练。当问题特征发生变化时，该模型是否能保障现实中一般性问题的求解效果还有待进一步研究。

3）量子计算。量子优化是量子计算领域近年来颇受关注的一个研究分支，主要研究如何利用量子计算加速优化问题的求解。目前，对于带约束的优化问题，量子优化提出的理论包括量子模拟退火、量子内点法、量子线性规划、量子半正定规划等。这些理论有待量子计算机实用化之后进一步验证。

此外，除了线性规划和整数规划这两类实际应用中最常见的问题之外，目前数学规划求解器还致力于解决更加复杂的问题，包括二次规划、二阶锥规划、半正定规划以及混合整数非线性规划等。

“线性规划与整数规划求解器”工程开发前沿中核心专利数排名前三的国家是中国、美国和日本（表 2.2.1）；从主要国家间的合作网络（图 2.2.1）来看，中国与德国、美国、英国之间，美国与英国、法国、中国之间存在合作。核心专利的主要产出机构包括国际商业机器公司、国网电子商务有限公司等（表 2.2.2）等，其中，国网电子商务有限公司与清华大学存在一定的合作（图 2.2.2）。

中国的求解器产品近年来发展迅速，已经走出国门，服务国际企业。随着中国对求解器研究的不断投入，越来越多的成果不断涌现。中国自主研发的求解器产品将逐步赶超国际一流求解器的技术水准，并在国际市场占据一席之地。

线性规划与整数规划求解器经历了从理论研究到求解器开发、优化与应用这两个阶段。未来的重点发展方向包括两个方面：① 问题拓展，求解的问题范畴拓展至二次规划、二阶锥规划、半正定规划、整数非线性规划等问题；② 技术革新，将数学优化理论之外的理论融入线性规划与整数规划求解器的开发，进一步提升求解效率，拓展应用场景。目前研究学者重点关注的方向主要为大规模分布式计算、AI 以及量子计算，图 2.2.3 展示了该前沿未来的发展路线。

表 2.2.1 “线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国	61	59.22	182	55.49	2.98
2	美国	26	25.24	75	22.87	2.88
3	日本	8	7.77	8	2.44	1.00
4	德国	5	4.85	54	16.46	10.80
5	加拿大	2	1.94	2	0.61	1.00
6	沙特阿拉伯	2	1.94	2	0.61	1.00
7	英国	2	1.94	0	0.00	0.00
8	哥伦比亚	1	0.97	7	2.13	7.00
9	法国	1	0.97	5	1.52	5.00

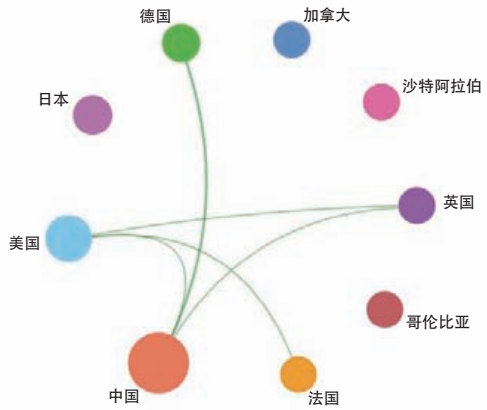

图 2.2.1　“线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.2　“线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	国际商业机器公司（IBM）	16	15.53	28	8.54	1.75
2	国网电子商务有限公司	9	8.74	21	6.40	2.33
3	北京百度网讯科技有限公司	8	7.77	49	14.94	6.12
4	广西电网有限责任公司	6	5.83	8	2.44	1.33
5	中国计量大学	5	4.85	14	4.27	2.80
6	富士通集团	5	4.85	3	0.91	0.60
7	清华大学	4	3.88	19	5.79	4.75
8	西门子集团	4	3.88	4	1.22	1.00
9	日本制铁株式会社	3	2.91	6	1.83	2.00
10	山东大学	2	1.94	26	7.93	13.00

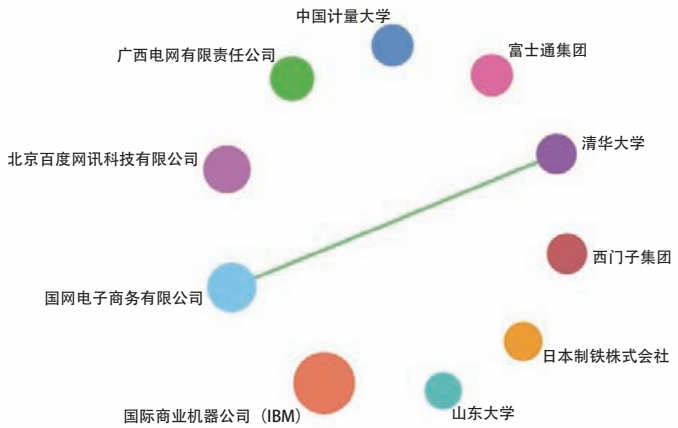

图 2.2.2　“线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿主要机构间的合作网络

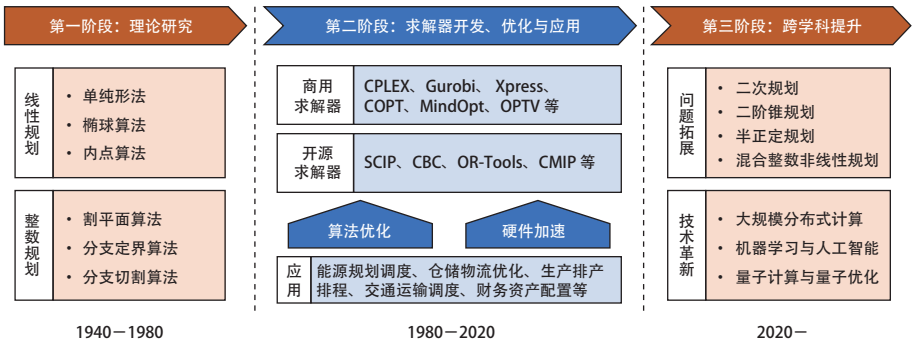

图 2.2.3　“线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿的发展路线

2.2.2　基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统

基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统是一种以数据驱动为核心的工厂运行维护管理系统，通过实时、全面采集生产过程数据，深度挖掘数据蕴含的知识，实现对运行过程和生产资源更具准确性、时效性的监控管理。从专利分析来看，目前关于该系统的主要研究领域集中在以下方面。

（1）工业大数据采集及管理技术

工业大数据采集技术实现对生产设备、工艺流程等相关运行数据的采集；工业大数据管理技术则对采集所得数据进行处理、分析与存储。二者共同为生产系统的监管、运维活动安排提供有力支持。该技术的研究热点涵盖智能传感网络设计与部署、数据质量评估与优化、多源异构数据融合处理等方面。

（2）工业大数据驱动的设备故障诊断及维护技术

工业大数据驱动的设备故障诊断及维护技术是通过数据挖掘、AI 等方法分析采集到的设备数据，识别提取设备运行的故障类型并定位故障，继而提供可参考的维护计划、方式等。当前开发热点包括故障诊断模型的建立、故障根因分析、维护计划的信息化管理等方面。

（3）基于工业互联网的智能工厂运维系统

基于工业互联网的智能工厂运维系统以工业互联网为基础，贯穿大数据的采集、分析和应用环节，实现生产过程和资源的智能化运行维护管理。系统集成多种关键使能技术和功能服务，涵盖数据采集及管理技术、设备故障诊断及维护技术、实时监控及远程操作服务等。目前，边缘智能、云计算、数字孪生等信息化技术成为赋能系统数智化升级的重要引擎。

从核心专利数量来看，专利公开量最多的国家为中国，平均被引数最高的国家是美国（表 2.2.3），其中，意大利与以色列之间建立有相关合作（图 2.2.4）。专利公开量排名靠前的机构为 ioCurrents 公司和河南省四通锅炉有限公司（表 2.2.4），各机构之间无合作关系。

展望未来，基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统将朝着更具智能化、集成化和安全性的方向发展。AI 技术的进步将使系统能够更加准确地自主预测设备故障和生产风险；同时，数据融合技术的发展将增强系统集成化程度，推动全流程价值链的高端跃升；此外，数据加密与认证技术的优化将提升系统对多方数据的隐私保护和安全管理能力，为运维系统的可靠性和安全性发展奠定坚实基础。图 2.2.5 为“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.3　“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	35	53.03	88	8.07	2.51
2	韩国	19	28.79	7	0.64	0.37
3	美国	11	16.67	976	89.54	88.73
4	以色列	1	1.52	19	1.74	19.00
5	意大利	1	1.52	19	1.74	19.00

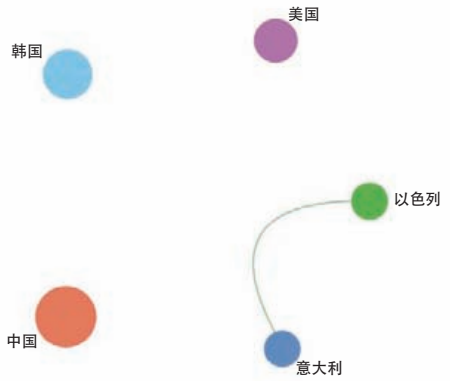

图 2.2.4　“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4　“基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	ioCurrents 公司	6	9.09	720	66.06	120.00
2	河南省四通锅炉有限公司	5	7.58	4	0.37	0.80
3	爱肯科技股份有限公司	4	6.06	32	2.94	8.00
4	清华大学	4	6.06	9	0.83	2.25
5	DLIT 有限公司	4	6.06	0	0.00	0.00
6	韩国电子部品研究院	3	4.55	5	0.46	1.67
7	纬创资通股份有限公司	3	4.55	3	0.28	1.00
8	SFIP 公司	2	3.03	237	21.74	118.50
9	Mobileye 视觉科技有限公司	2	3.03	38	3.49	19.00
10	广州博依特智能信息科技有限公司	2	3.03	18	1.65	9.00

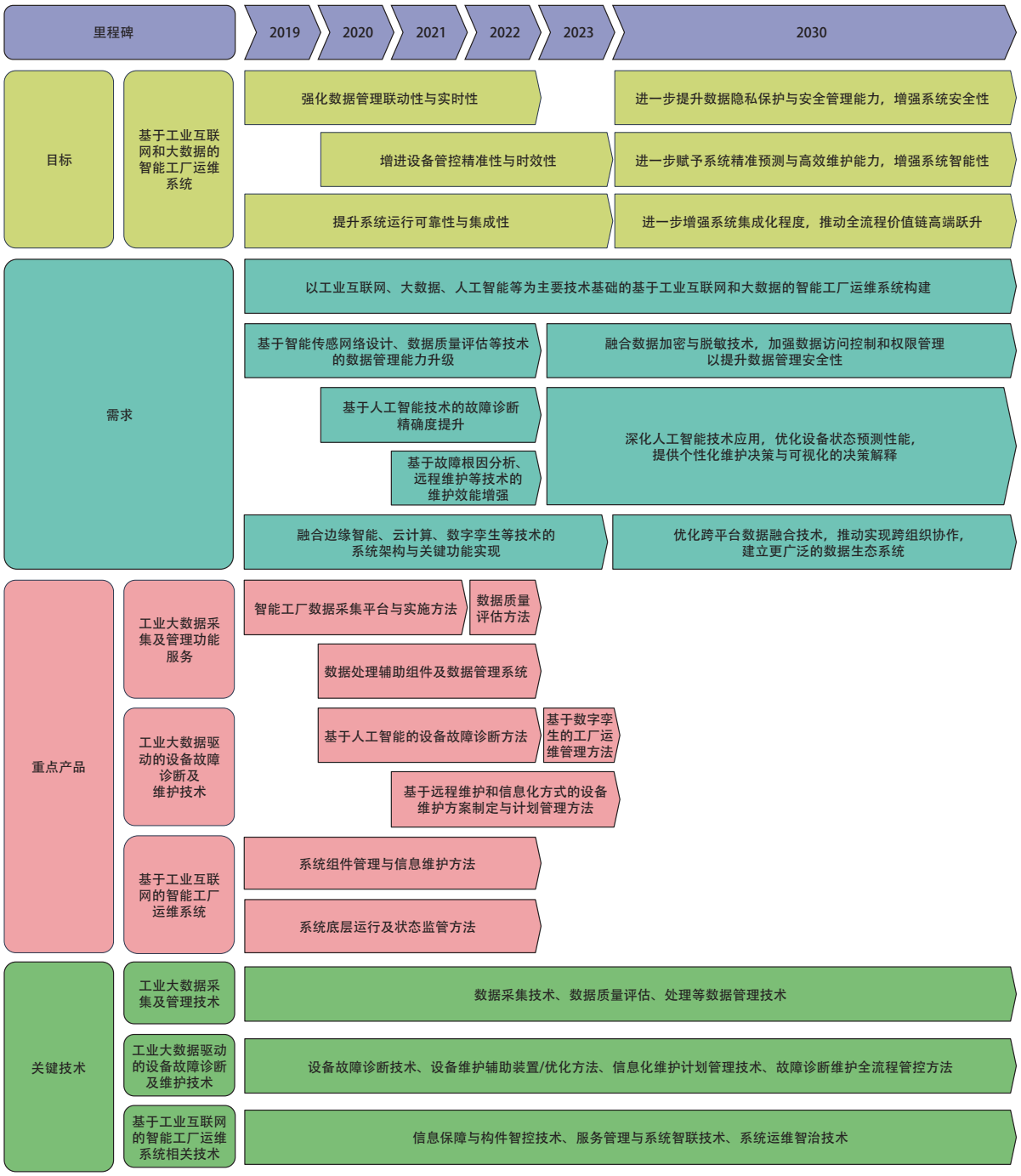

图 2.2.5 “基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统

基于深度学习的建筑方案自动生成旨在利用深度学习技术，以智能化的方式自动创构建筑设计方案。其核心在于从既有设计资料中提取并学习建筑设计的内在规律，以相对客观的方式实现对项目需求的自动响应。相关方法和系统能够解放设计人员的生产力，使他们专注于更高层次的创意构思与重要决策，

减轻传统设计模式中人为的设计成本和品质的不确定性，进一步提升建筑设计数字化、自动化与智能化的水平。

作为该前沿的技术基石，深度学习模型在各主要研究方向的发展中起到了关键的支撑作用。其中，针对图像和语义分割任务的全卷积神经网络在2014年被提出，之后被广泛应用于建筑方案的自动语义化。同年提出的两种深度生成模型——变分自动编码器和生成对抗网络，被认为是图像生成和风格迁移的关键新引擎。相关研究尝试建立了建筑功能划分、建筑平面图、结构平面图三者之间的逐级联系，并通过引入注意力机制、物理引擎、多模态特征融合策略等技术手段来提高平面图的生成质量，然而这些研究主要关注低层到高层建筑，少有涉及空间结构和超高层建筑。由于图论可表示不同元素之间的拓扑关系，2017 年提出的图卷积网络可解决生成梁、柱、墙等构件的空间布置问题。同年提出的变换器模型则被应用于自动合规性检查，旨在将以自然语言表达的规范条文转化为计算机可以处理的代码或逻辑表达式，确保生成方案合规性、安全性和质量，但相关研究尚未有效解决歧义设计条文的识别和处理问题。

以一系列自动生成方法为核心，研发安全、高效、稳定的设计系统能够为设计人员提供更高质量的定制化服务。由于自动生成方法本身在可行性和可靠性方面还面临诸多挑战，相关系统的研发尚处于初期阶段。除了自动生成方法、可视化界面、文件传输和文件格式转换外，现有自动生成系统少有集成自动合规性检查、交互式方案修改、方案评价、多人协作、用户隐私保护、文件加密、模型渲染和智能优化等重要功能模块。

“基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿中核心专利的总体公开情况见表 2.2.5 和表 2.2.6。其中，核心专利数排名前三的国家是美国、韩国和中国，主要产出机构有 Azova 有限公司、硕索福特株式会社、国际商业机器公司等。在国家层面，各国目前并没有较多的合作；可能是因为 AI 技术的管制措施和机构主攻研究方向之间的差异，各国之间尚未形成紧密的合作关系。而在机构层面，ChangSoft I&I 公司与延世大学之间有合作往来（图 2.2.6）。

以提升自动生成建筑方案的可行性、可靠性和多样性为目标，图 2.2.7 展示了该前沿的发展路线。充分利用新一代数字化交互技术和深度生成模型，丰富和加强人机协同设计方式和水平，平衡设计方案的规则性和创造性；基于本体论思想，研究多专业分析引擎和设计规律的融合策略，开发对应建筑方案自动生成系统；对于设计资料不足的复杂建筑，通过参数化建模和云计算技术完成海量的补充分析，实现数据增强；明确设计条文歧义的类型，提出识别和修改歧义条文的方法，并与现有自动合规性检查框架融合。

表 2.2.5　“基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	15	57.69	206	99.04	13.73
2	韩国	9	34.62	2	0.96	0.22
3	中国	1	3.85	0	0.00	0.00
4	日本	1	3.85	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	Azova 有限公司	4	15.38	12	5.77	3.00
2	硕索福特株式会社	4	15.38	0	0.00	0.00
3	国际商业机器公司（IBM）	3	11.54	15	7.21	5.00
4	谷歌公司	2	7.69	86	41.35	43.00
5	TIBCO 软件有限公司	2	7.69	38	18.27	19.00
6	Nuance 通信有限公司	1	3.85	50	24.04	50.00
7	AMD 有限公司	1	3.85	5	2.40	5.00
8	ChangSoft I&I 公司	1	3.85	1	0.48	1.00
9	三星电子有限公司	1	3.85	1	0.48	1.00
10	延世大学	1	3.85	1	0.48	1.00

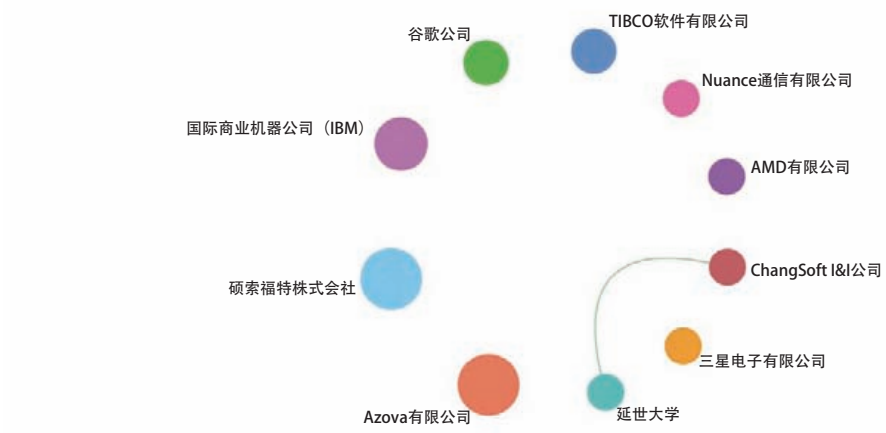

图 2.2.6 “基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

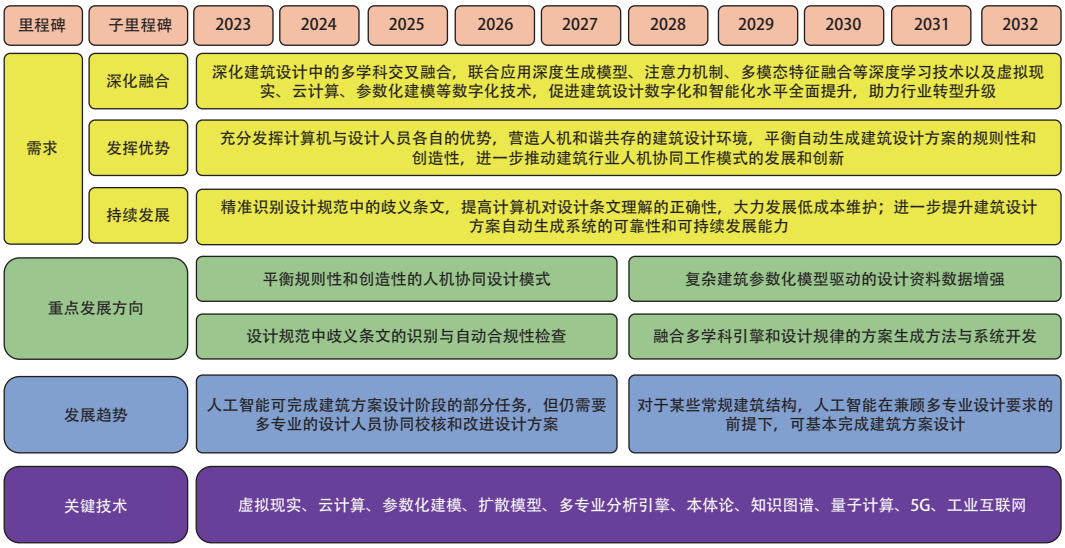

图 2.2.7 “基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：

丁烈云　何继善　胡文瑞　向　巧

课题组成员：

陈晓红　柴洪峰　陈清泉　傅志寰　刘人怀　陆佑楣　栾恩杰　凌　文　孙永福　邵安林　王基铭
王礼恒　王陇德　汪应洛　王众托　薛　澜　许庆瑞　徐寿波　杨善林　殷瑞钰　袁晴棠　朱高峰
郑静晨　赵晓哲　Miroslaw Skibniewski　Peter E. D. Love　毕　军　蔡　莉　陈　劲　程　哲
丁进良　杜文莉　方东平　冯　博　高自友　胡祥培　华中生　黄季焜　黄　伟　黄思翰　江志斌
康　健　骆汉宾　李　恒　李永奎　李　政　李慧敏　李　果　李小冬　李玉龙　刘晓君　刘炳胜
刘德海　罗小春　吕　欣　林　翰　马　灵　欧阳敏　裴　军　任　宏　司书宾　唐加福　唐立新
唐平波　王红卫　王慧敏　王孟钧　王先甲　王要武　王宗润　魏一鸣　吴德胜　吴建军　吴启迪
吴泽洲　吴　杰　许立达　肖　辉　杨　海　杨洪明　杨剑波　叶　强　杨　阳　於世为　袁竞峰
曾赛星　周建平　张跃军　镇　璐　周　鹏　朱文斌

工作组成员：

钟波涛　王红卫　骆汉宾　聂淑琴　常军乾　郑文江　穆智蕊　张丽南　李　勇　董惠文　杨　静
胡啸威　关琪力

执笔组成员：

研究前沿：

张映锋　任新惠　曾赛星　王　歌　路庆昌　谢　驰　徐鹏程　李　静　翁文国　贺治超　何　桢
司书宾　王凯波　毕　军　张　炳　刘苗苗　杨建勋　张振刚　张清鹏　黄丽华

开发前沿：

梁　哲　乔　非　何　政　郭熙铜　张晓飞　欧阳敏　王　剑　林　杰　朱海平　吴　军　陈新宇
张　维　张永杰　郑润达　程志勇

总体组成员

顾问：周　济　陈建峰

项目组长：杨宝峰

项目组成员（排名不分先后）：

李培根　郭东明　潘云鹤　费爱国　谭天伟　元英进　翁史烈　周守为
崔俊芝　聂建国　曲久辉　郝吉明　张福锁　张守攻　陈赛娟　张伯礼
丁烈云　卢春房　吴　向　延建林　周炜星　吉久明　蔡　方　蒋志强
郑文江　穆智蕊

综合组执笔：

穆智蕊　郑文江　延建林

数据支持：

科睿唯安

工作组：

组　长：黎青山　陈永平　龙　杰

执行组长：吴　向　延建林

副组长：丁　宁　陈姝婷　闻丹岩　周　源　郑文江

成　员（排名不分先后）：

姬　学　高　祥　何朝辉　宗玉生　张　松　王小文　张秉瑜　聂淑琴
穆智蕊　李佳敏　潘腾飞　刘宇飞　郭鹏远　周海川

致谢：

感谢高等教育出版社有限公司、科睿唯安公司、中国工程院院刊（系列）编辑部、中国工程院战略咨询中心、中国工程科技知识中心、中国工程院各学部和学部办公室、哈尔滨医科大学、华东理工大学、华中科技大学、浙江大学、天津大学、上海交通大学、同济大学、清华大学、中国农业大学、上海交通大学医学院附属瑞金医院、《中国工程科学》杂志社的大力支持！

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，我社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话（010）58581999 58582371

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街 4 号 高等教育出版社法律事务部

邮政编码 100120

全球工程前沿
Engineering Fronts