

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、回收再制造等全生命周期过程,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:面向产品全生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。精准医疗领域生机勃勃,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在以下三个方面: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

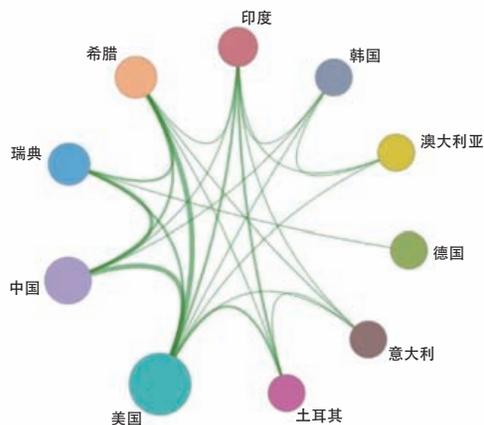


图 1.2.1 “工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

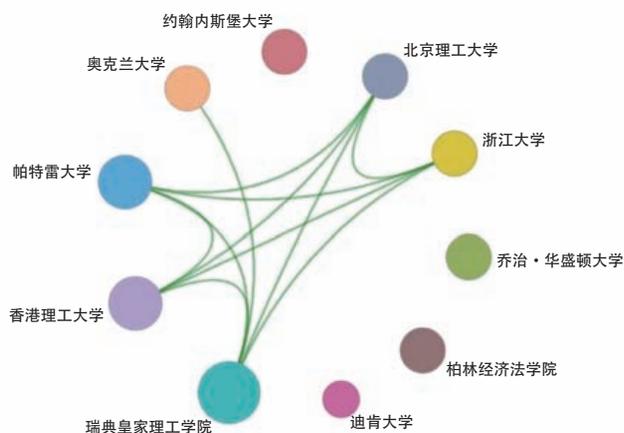


图 1.2.2 “工业 5.0 环境下人机共融智能制造研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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。

里程碑	子里程碑	个体智能融合			群体智能融合				智能共同演进			
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
目标	以人为本实现更可持续、更具弹性的生产	机器能够理解和配合人的意图保护人的安全，服从人的指挥			人机智能深度融合				人机数字化、虚拟化，知识化、协同演化			
		机器实时状态被人感知，人与机器技能转移			机器的柔性、智能、安全和模块化程度提高				实现人机共生共融的新制造模式			
需求		个性化、超复杂产品的规模化、柔性化、自动化生产										
		AI算法、大模型蓬勃发展支撑生产模式更新升级										
关键技术		人机协同交互-控制-进化： 协作机器人交互方式设计、机器人柔顺和主动控制、多机器人协同控制、具身智能、群体智能										
		人机协同组织-规划-决策： 异常情况下多人多机任务自组织分配、人-机协作预测、工作单元设计与配置、混合智能体协同规划等										
		人机相互感知-认知-信任： 人-机器人-工作空间感知回路技术、人-机相互认知和共情决策、人-机信任与机器心理等										
共性支撑技术		物联网、数字孪生、边缘智能等前端技术和云计算、大数据、大模型与人工智能等基础技术										
		ROS2等机器控制系统、高端工业软件以及脑机接口、5G/6G通信网络、高性能计算芯片等基础设施										

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的解的质量、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 CO₂ 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

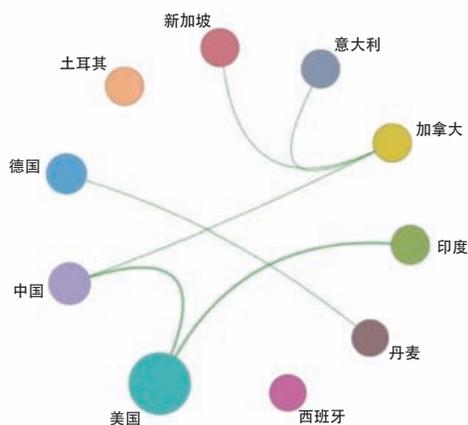


图 1.2.4 “物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

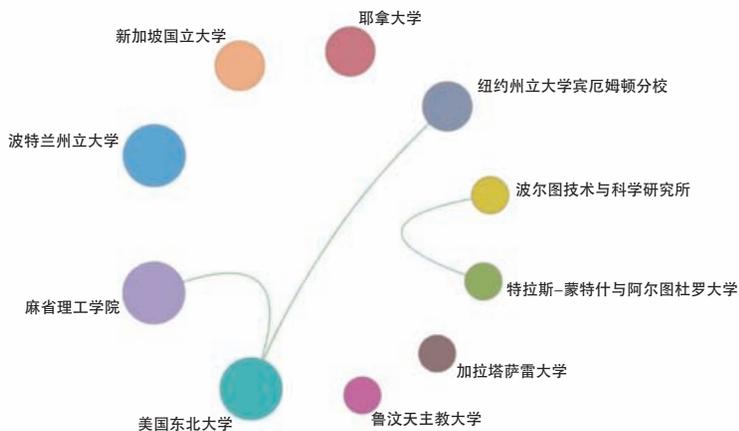


图 1.2.5 “物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

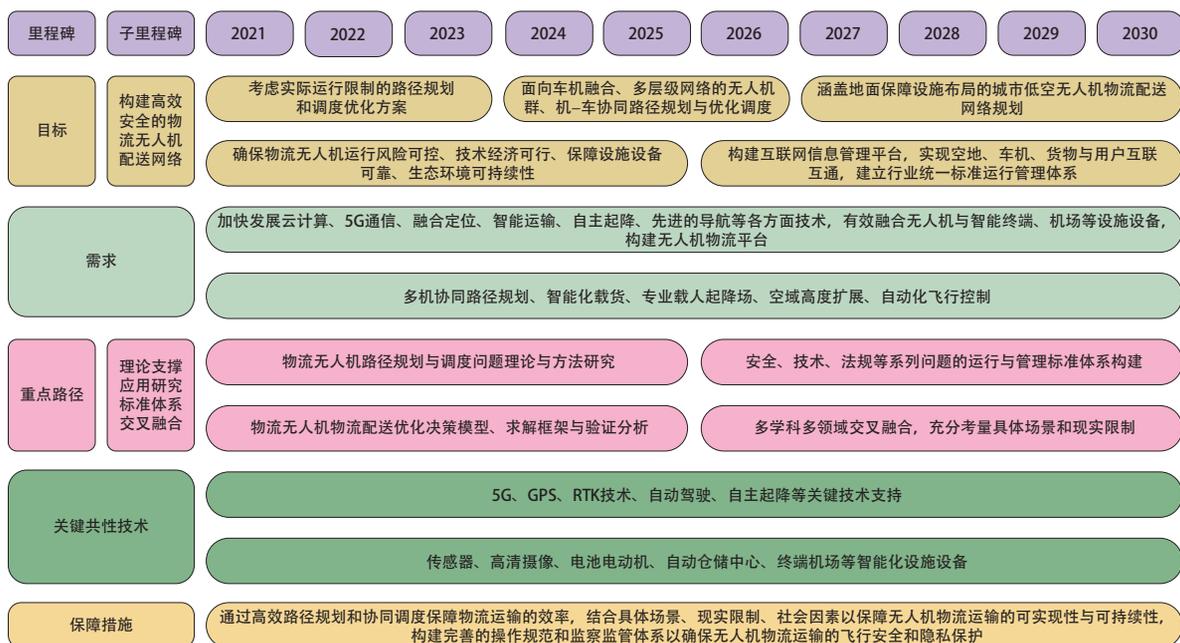


图 1.2.6 “物流无人机调度与路径优化研究”工程研究前沿的发展路线

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

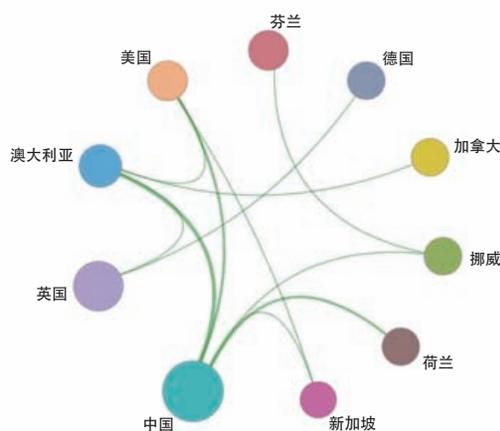


图 1.2.7 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

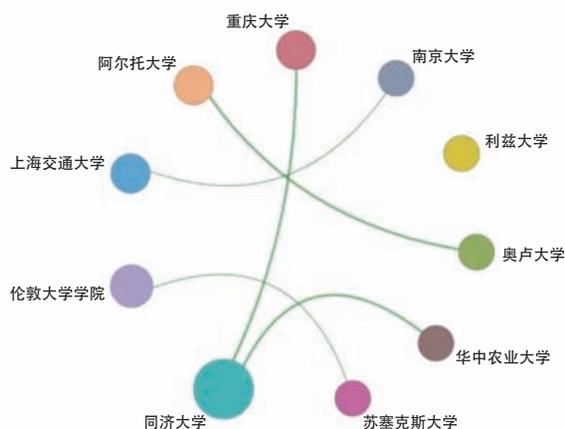


图 1.2.8 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

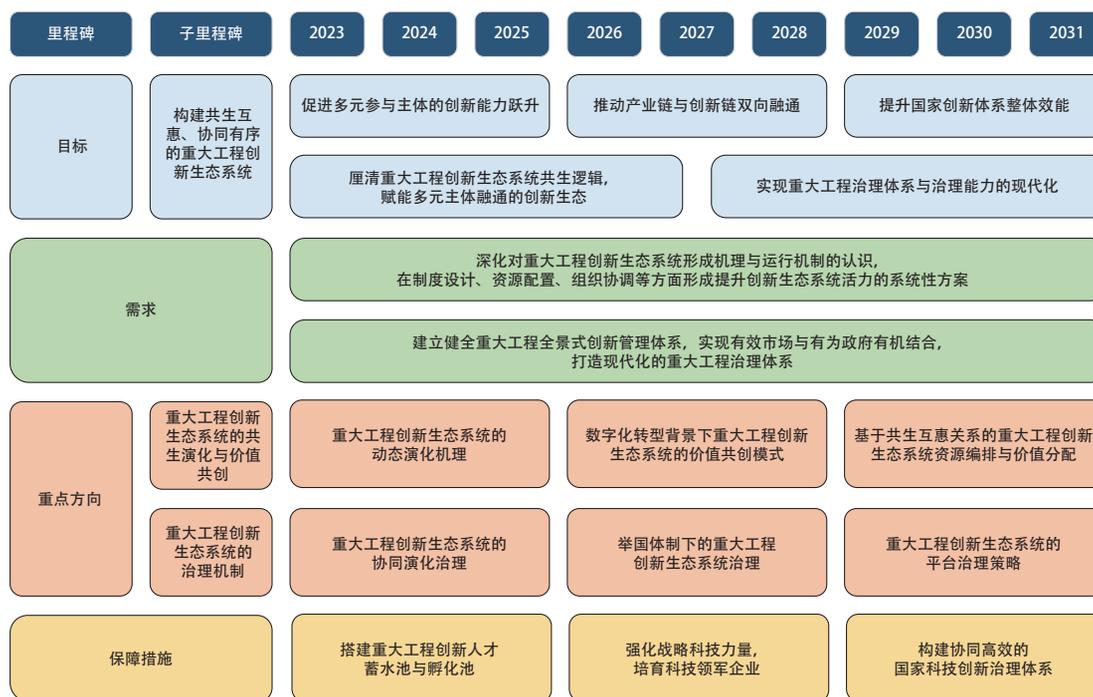


图 1.2.9 “重大工程创新生态系统共生逻辑及治理研究”工程研究前沿的发展路线

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 智能家居互联系统研发。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。在金融风险管理的实践中，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，中国科学院戴或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

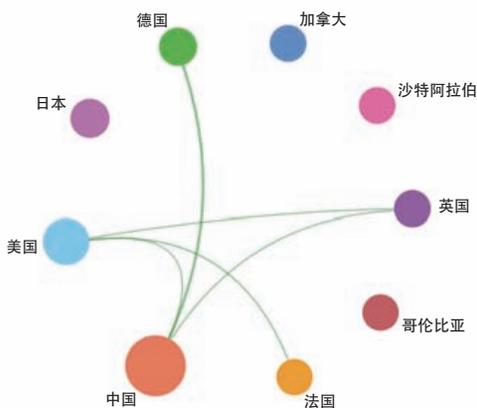


图 2.2.1 “线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿主要国家间的合作网络

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

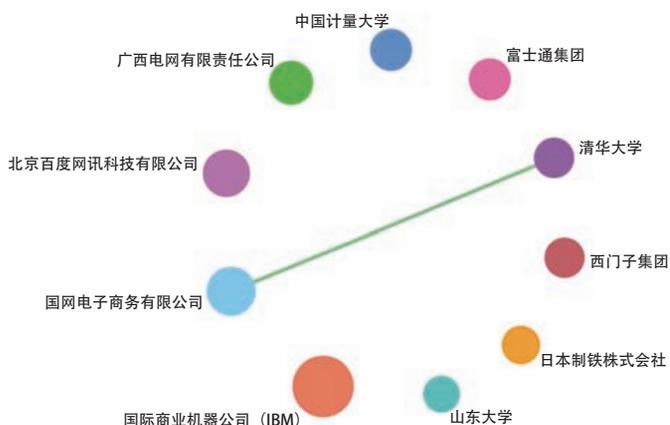


图 2.2.2 “线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿主要机构间的合作网络

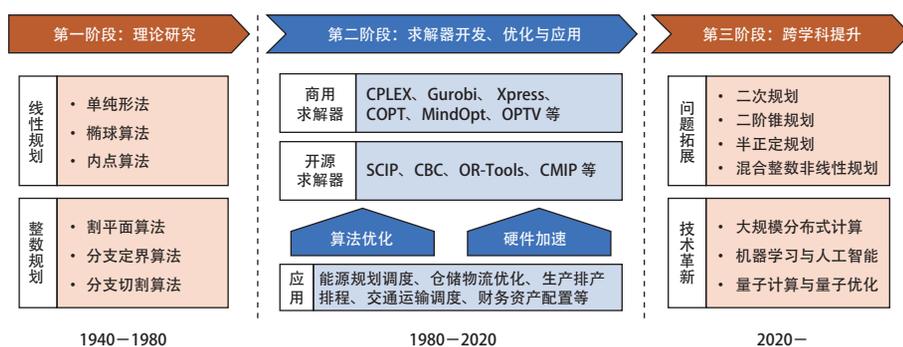


图 2.2.3 “线性规划和整数规划求解器”工程开发前沿的发展路线

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

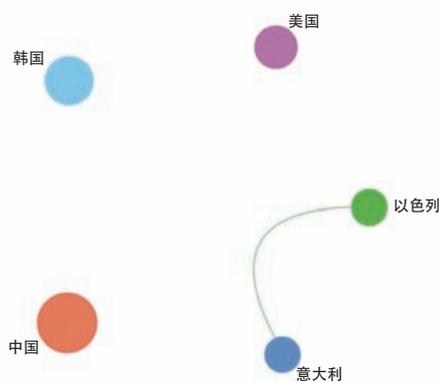


图 2.2.4 “基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿主要国家间的合作网络

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

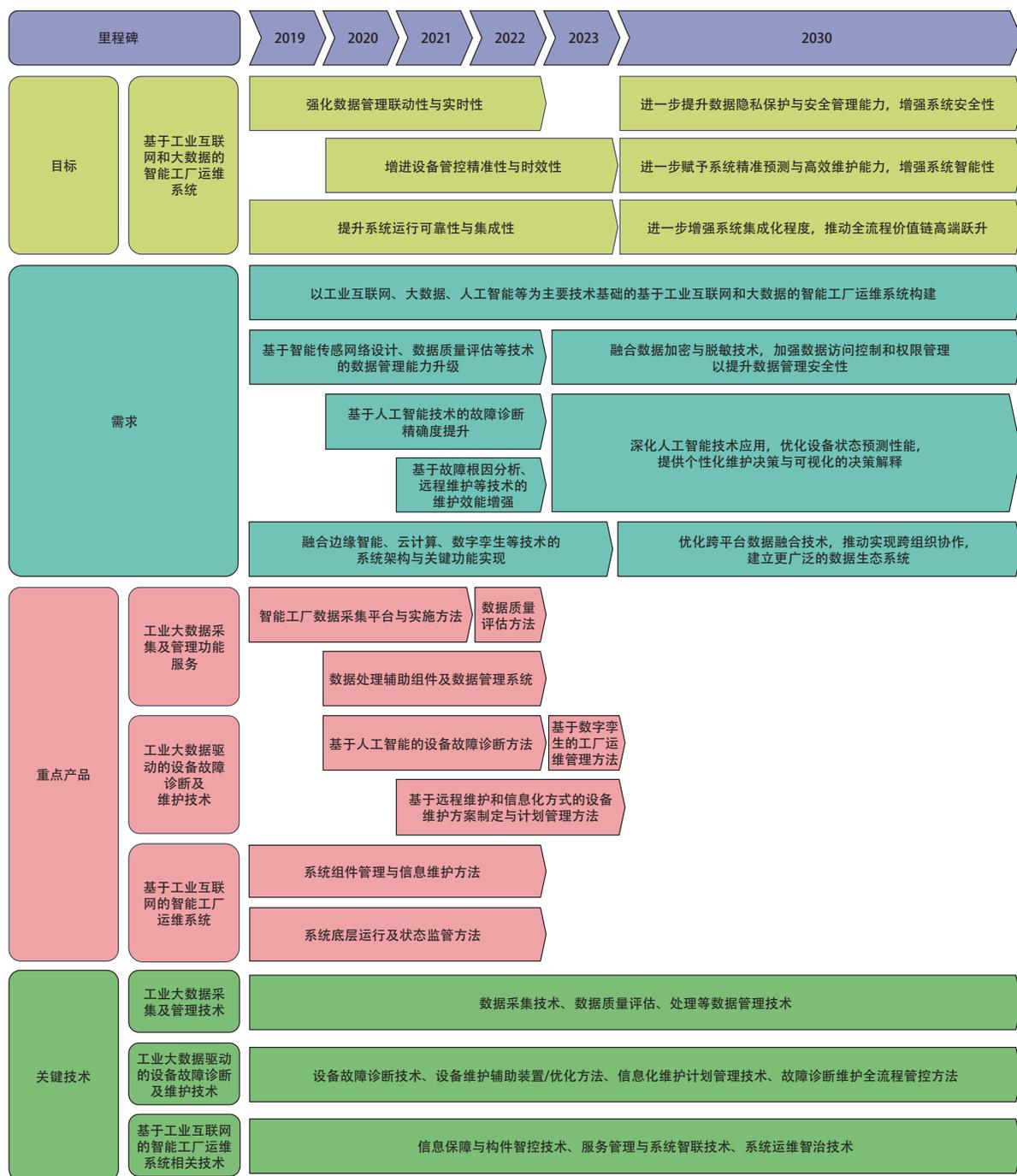


图 2.2.5 “基于工业互联网和大数据的智能工厂运维系统”工程开发前沿的发展路线

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

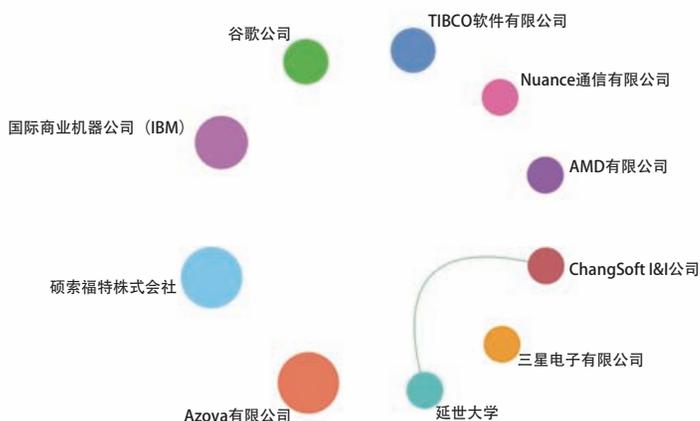


图 2.2.6 “基于深度学习的建筑方案自动生成方法与系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

里程碑	子里程碑	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
需求	深度融合	深化建筑设计中的多学科交叉融合，联合应用深度生成模型、注意力机制、多模态特征融合等深度学习技术以及虚拟现实、云计算、参数化建模等数字化技术，促进建筑设计数字化和智能化水平全面提升，助力行业转型升级									
	发挥优势	充分发挥计算机与设计人员各自的优势，营造人机和谐共存的建筑设计环境，平衡自动生成建筑设计方案的规则性和创造性，进一步推动建筑行业人机协同工作模式的发展和创									
	持续发展	精准识别设计规范中的歧义条文，提高计算机对设计条文理解的正确性，大力发展低成本维护；进一步提升建筑设计方案自动生成系统的可靠性和可持续发展能力									
重点发展方向		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				
		设计规范中歧义条文的识别与自动合规性检查					融合多学科引擎和设计规律的方案生成方法与系统开发				
发展趋势		人工智能可完成建筑方案设计阶段的部分任务，但仍需要多专业的设计人员协同校核和改进设计方案					对于某些常规建筑结构，人工智能在兼顾多专业设计要求的前提下，可基本完成建筑方案设计				
关键技术		虚拟现实、云计算、参数化建模、扩散模型、多专业分析引擎、本体论、知识图谱、量子计算、5G、工业互联网									

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
赵晓哲 Mirosław 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