



第二章

机械与运载工程前沿

2.1 工程研究前沿

2.1.1 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 2.1）。其中，属于传统研究深化的有：电磁波吸收材料与多尺度结构设计、机械超材料设计方法、直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究、超临界压缩空气储能技术研究、多车网联协同自动驾驶方法、基于液晶弹性体的软体机器人研究、多声源定位方法。新兴前沿则包括：生物混合机器人、基于视觉的触觉传感器、近空间太阳能飞艇。2019—2024 年，各前沿相关的核心论文发表情况见表 2.2。

（1）电磁波吸收材料与多尺度结构设计

电磁波吸收材料是一类能够高效吸收入射电磁波，并通过磁损耗、介电损耗或电阻损耗等机制将其能量转化为热能或其他形式能量予以耗散的功能材料。多尺度结构设计指在微观、介观和宏观多个尺度层次上协同调控材料的组成与结构。基于该策略开发的吸波材料，可有效克服传统材料的低频宽带吸收性能不足、功能单一等局限，推动吸波材料向高效化、轻量化、智能化等多功能集成方向发展。

当前研究主要聚焦于以下方向：通过物理或化学方法调控零维、一维和二维吸收剂的组成

表 2.1 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	电磁波吸收材料与多尺度结构设计	31	2 882	92.97	2023.1
2	机械超材料设计方法	23	845	36.74	2021.3
3	直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究	6	301	50.17	2023.3
4	生物混合机器人	4	734	183.50	2020.8
5	超临界压缩空气储能技术研究	10	1 420	142.00	2020.1
6	多车网联协同自动驾驶方法	18	1 637	90.94	2022.1
7	基于液晶弹性体的软体机器人研究	37	1 608	43.46	2022.2
8	基于视觉的触觉传感器	22	614	27.91	2021.1
9	近空间太阳能飞艇	6	1 074	179.00	2019.5
10	多声源定位方法	22	1 492	67.82	2020.5

表 2.2 机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	电磁波吸收材料与多尺度结构设计	3	1	1	0	6	20
2	机械超材料设计方法	3	4	5	6	4	1
3	直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究	0	0	0	0	4	2
4	生物混合机器人	1	1	0	2	0	0
5	超临界压缩空气储能技术研究	3	3	4	0	0	0
6	多车网联协同自动驾驶方法	0	1	4	6	6	1
7	基于液晶弹性体的软体机器人研究	1	4	9	7	6	10
8	基于视觉的触觉传感器	3	5	4	6	4	0
9	近空间太阳能飞艇	4	1	1	0	0	0
10	多声源定位方法	7	7	3	2	2	1

及其在微观至介观尺度上的结构参数，借助形状各向异性优化其电磁参数，增强电磁波能量耗散能力，从而提升材料针对多频段电磁波的吸收性能；同时，通过宏观结构设计突破本征电磁特性的限制，实现低频、宽频乃至动态可调谐的电磁波吸收。从发展趋势来看，吸波性能逐步向更低频、超宽频、宽角域与智能可调谐方向扩展，吸波材料正从单一吸波功能向多功能集成转变；应用形式也从涂层向结构功能一体化、集成化与智能制造方向演进，以满足未来高性能飞行器、舰船雷达隐身和电子设备电磁防护等领域的迫切需求。

（2）机械超材料设计方法

机械超材料（mechanical metamaterials）是一类通过精巧结构设计实现非常规力学性能的人造材料，其性能往往超越传统材料固有极限，如负泊松比、可编程刚度、极端能量吸收、非线性波动调控等。该研究前沿的核心在于基于力学原理与结构几何特征的多尺度设计方法，通过参数化建模、优化算法以及智能制造，实现从微观结构到宏观力学性能的映射与调控。当前研究方向主要包括：基于拓扑优化与人工智能（AI）的超材料结构设计；基于拓扑优化的逆向设计方法、人工智能驱动的生成式设计、多尺度计算与性能预测，以及面向增材制造的工艺一体化设计等。未来，机械超材料设计方法将朝着智能化、跨尺度化与应用导向化方向发展：通过机器学习与数字孪生加速设计迭代，实现与4D打印等先进制造技术的深度结合，并推动其在航空航天、智能防护、生物医用材料等领域的广泛应用。

（3）直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究

直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究旨在通过开发高效、稳定的催化剂与选择性隔膜，实现直接以海水为原料电解制氢。该技术可以缓解电解水技术对高纯度淡水的依赖，具有资源丰富、环境友好、潜力巨大等优势，是未来绿色氢能制备的重要方向之一。其核心挑战在于解决海水中的氯离子腐蚀、钙镁离子沉积对催化剂、隔膜以及电解槽寿命的负面影响，从而推动

低成本、规模化绿氢生产，服务于海洋能源与碳中和战略。

目前该领域的主要研究方向包括：① 抗腐蚀催化剂设计——开发非贵金属或低贵金属负载催化剂（如过渡金属硫化物、磷化物），通过界面工程调控电子结构，抑制氯离子吸附与析氯副反应，提升析氧反应（oxygen evolution reaction, OER）选择性；② 高选择性隔膜材料——研究阴离子交换膜或防水透气膜等，以阻隔氯离子及杂质（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）渗透，防止电极污染与结垢；③ 系统集成与工程优化——结合机械设计与材料科学，开发耐腐蚀电解槽结构、流体动力学调控技术，以及能量管理策略，提升系统在真实海水环境下的耐久性与能效。具体的技术发展趋势将聚焦于材料-器件-系统的多尺度协同创新，催化剂向“自修复”与“自适应”方向发展，隔膜追求高选择性与机械强度一体化，电解槽设计将结合人工智能与高通量筛选，加速材料迭代等。

（4）生物混合机器人

生物混合机器人是指将硅基人工材料（如电子电路、机械结构、纳米材料等）与碳基生物系统（如细胞、组织、微生物等）有机整合而成的一类新型机器人系统，旨在构建兼具生物系统独特的感知修复能力以及机电系统精准可靠特性的智能实体。目前，该技术主要可分为两类：一类是由肌肉细胞或微生物与微纳功能组件集成的微观生物混合机器人；另一类是由动物组织与机电系统融合构成的宏观生物混合机器人。相较于传统的硅基机器人，生物混合机器人展现出更优异的柔性、自愈能力、能量转换效率以及生化感知与响应功能。如何实现碳基与硅基系统的有机融合，是推动该领域发展的核心科学问题。

该领域的发展主要围绕两大核心思路展开。其一是利用硅基技术增强碳基生命，即通过硅基材料和电子器件对传统碳基生命的特定功能进行监测、调控、增强乃至部分替代，以提升生物系统的整体效能。具体的技术发展趋势包括多模态感知与神经接口技术、用于疾病监测诊断与治疗的植入式器件、生物执行器工程与控制技术等。其二是碳基与硅基的深度融合，即将生物组织与人工硅基结构深度耦合，形成统一的功能整体，构建真正意义上的“活机器”。具体的技术发展趋势包括仿生启发下的碳基-硅基异质结构设计、基于干细胞和类器官的可再生功能模块开发、基于多源生物信号融合的自主感知与决策技术等。

（5）超临界压缩空气储能技术研究

超临界压缩空气储能（supercritical compressed air energy storage, SC-CAES）系统在用电低谷时，通过压缩机将空气压缩至超临界状态（同时存储压缩热），并利用存储的冷能将超临界空气冷却液化储存（储能）；在用电高峰，液态空气加压吸热至超临界状态（同时液态空气中的冷能被回收存储），并进一步吸收压缩热后通过膨胀机驱动电机发电（释能）。SC-CAES通过回收利用压缩机的压缩热解决了对化石燃料的依赖问题；通过空气的液态储存，储能密度比气态空气大幅提高，解决了对大型储气室的依赖问题；通过采用储热、储冷、超临界换热等新技术提高了系统的效率。由于综合了储热、液态空气存储和空气的超临界特性等优点，SC-CAES拥有能量密度高、不受地理条件限制、储能周期不受限制、对环境友好和能够回收废热等优点。

目前该领域的主要研究方向包括超临界条件下压缩和膨胀过程中空气流动与损失机理、蓄热与蓄冷材料的特性及传热机理、超临界压缩空气储能系统能量耦合机理与集成控制方法等。发展趋势聚焦于进一步提升系统效率、提高系统动态响应速度与运行可靠性、降低系统建设与运维成本等。SC-CAES 将与人工智能、数字孪生、多能互补系统深度融合，从日内调峰拓展至多时间尺度储能及工业余能回收等多场景应用，推动构建更智能、高效、可持续的新型电力系统。

(6) 多车网联协同自动驾驶方法

多车网联协同自动驾驶方法是指利用先进车辆网联技术，将多个车辆的状态信息、感知信息、决策意图等关键要素进行实时共享、融合和分析，实现驾驶环境全方位感知和更加安全的驾驶行为决策与运动规划。多车网联协同自动驾驶是单车自主驾驶的未来技术形态，旨在通过感知协同和决策协同，解决单车因传感器视角视距限制、遮挡、恶劣天气等因素造成的感知能力不足挑战，以及因其他交通参与者行为强不确定性引发的预测、决策能力不足挑战，最终实现更安全、高效的智能交通系统。

目前该领域的主要技术方向包括低时延高弹性通信组网技术、多车异步信息时序一致性融合方法、带宽受限条件下协同感知方法、分布式智能协同决策与规划、信息安全与抗干扰等。在通信不确定性挑战客观存在的背景下，设计强鲁棒、高抗扰的融合感知与智能协同决策系统是未来该领域的技术发展方向。具体的技术发展趋势包括基于无监督学习的柔性时空对齐技术、基于事件触发与注意力机制的通信感知协同技术、数据和知识混合驱动的容错型协同决策等。产业应用预期会从港口、矿区、园区、工厂等封闭场景向复杂开放交通场景发展，涉及车辆未来可达数亿辆，具备万亿规模产业潜力。

(7) 基于液晶弹性体的软体机器人研究

基于液晶弹性体的软体机器人研究核心在于将液晶弹性体这一兼具液晶各向异性与聚合物弹性的智能材料，通过材料特性与机器人结构设计、驱动控制深度融合，实现传统刚性机器人难以完成的柔性运动与环境交互。将液晶弹性体的刺激响应特性与软体机器人的柔性需求“强强联合”，既发挥材料的高效驱动优势，又通过机器人系统设计拓展其功能边界，构建出能在复杂环境中灵活作业的智能系统。

目前该领域的主要研究内容包括：材料与结构的适配设计，研究液晶弹性体分子排列、交联密度等参数与机器人肢体结构的匹配规律，通过优化算法实现材料性能与结构刚度、变形范围的协同；多场驱动的控制逻辑，探索光、热、电等多刺激源对液晶弹性体的耦合驱动机制，建立驱动信号与机器人运动姿态的映射模型，开发相关控制算法，实现软体机器人的高精度动作控制；仿生运动原理的转化，借鉴生物协同运动模式，研究驱动单元的分布式布局方案，基于机器学习构建运动与结构的映射模型，将生物运动转化为模块化驱动结构，提升运动的灵活性。未来的发展趋势在于解决能量密度与续航能力问题，提升在复杂环境中的适应性与可靠性，推动其在医疗健康、极端环境作业与微创手术等领域落地。

(8) 基于视觉的触觉传感器

基于视觉的触觉传感器是一类借助视觉采集与数据处理技术实现触觉信息感知的新型传感

器。其核心原理是通过传感器内部的小型摄像头，透过透明弹性体观测不透明“皮肤”（外膜）在接触物体时的变形，再结合光度立体算法等技术，将捕捉到的变形图像转化为包含接触位置、力度大小、物体纹理及形状的相关数据，从而模拟人类触觉感知功能。

相较于基于其他原理的触觉传感器，该触觉传感器的优势是分辨率高、结构简单、能够感知的数据模态丰富等。同样，它也面临着透明弹性体部分容易磨损、感知范围相对较小、相关算法开发还不成熟等问题。

目前该领域的主要研究方向包括：基于视觉的触觉传感器感知结构优化、触觉图像与点云高速处理技术开发，以及与其他模态数据的融合以完成更复杂任务等。随着相关技术的不断发展，基于视觉的触觉传感器的发展趋势可以概括为：更好用的传感器（提高感知精度与耐久度）、更先进的算法（提高感知稳定性与准确性，并与其他数据模态更好地融合）以及更复杂的应用场景（如人机交互、具身智能任务等）。

（9）近空间太阳能飞艇

近空间太阳能飞艇主要是指采用浮力克服自重、采用太阳能持久供电和配置推进装置抗风飞行的一种临近空间长航时飞行器，具有超长航时、站高望远、精准控制、定点驻留和较大载重的特点，兼具静轨卫星“区域连续看”和低空飞机“近距离看得清”的优势，是开发利用临近空间的重要载体，其主要工作任务包括高分辨对地观测、远程侦察监视、原位气象探测和广域通信覆盖等方面。

目前该领域的主要技术方向包括基于热力学的飞艇总体设计、高耐候轻质蒙皮材料技术、大型柔性囊体气密技术、高效率循环能源技术、不依赖卫星的高精度持久导航定位技术、稀薄气体下高效率推进技术、智能任务规划与飞控技术等。面向加快开发利用临近空间的发展需求，具备更长航时、更大载重、更强操控能力的近空间太阳能飞艇是该领域未来的发展方向，具体技术发展趋势包括具有跨年飞行能力的超长航时技术、功能结构一体化载荷技术、长时无人自主值守技术、多艇组网智能运控技术等。

（10）多声源定位方法

水下声纳相当于舰艇的眼睛和耳朵。多声源定位方法主要是指利用声纳水听器阵列接收的各种海面舰船辐射噪声、水下潜航器辐射噪声、海上资源勘探及主动声纳发射的人工信号，实现对目标声源的具体位置（包括声源方位、距离、深度和速度）进行估计的方法。这是在水声学、海洋工程、国防安全等领域的重要课题，其核心挑战在于水下潜航器的目标源级逐年降低、海面强干扰很多，再加上水听器阵列孔径有限导致的时空增益及分辨率不足、水声环境复杂多变导致的环境适配、阵形畸变及一致性导致测向误差等因素，最终导致对水下弱目标探测定位异常困难，迫切需要发展基于高时空分辨、环境宽容的自适应声源定位稳健方法。目前，该领域主要研究方向包括：基于自适应波束形成的多声源方位估计方法、基于高分辨率子空间谱估计方法、联合时延估计与定位方法、基于稀疏信号恢复（压缩感知）的定位方法、基于匹配声场处理水下目标声源定位、基于深度学习的水下多声源定位方法等。本项技术未来发展趋势是，发展基于压缩感知的水平阵高分辨测向处理算法，提高目标方位分辨能力；发展稳健高增益的

水声阵列信号处理技术,提高空间处理增益;发展基于匹配声场空间频率干涉结构的长时间累计技术,提高时间处理增益;发展基于深度学习宽容性匹配声场定位技术,提高多目标定位方法的环境宽容性;发展基于声场物理特征的目标深度定位技术,提高水面和水下目标的辨别能力;发展无人自主智能的探测跟踪定位技术,更好改进声纳的综合探测能力。

2.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

2.1.2.1 电磁波吸收材料与多尺度结构设计

面对现代电子系统与装备对电磁兼容、隐身与防护性能要求的日益提升,微波吸收材料的研究正朝着低频化、宽频带、多功能一体化等方向迅速发展。传统微波吸收材料依赖铁氧体、磁性金属微粉等吸收剂的电磁损耗机制实现吸波性能,但仍存在低频段吸收性能不足、功能单一等挑战,难以满足现代平台对轻量化与紧凑集成以及适应复杂电磁环境与多物理场耦合等实际工况需求。多尺度结构设计作为应对上述挑战的核心途径,通过在微观、介观与宏观尺度上协同调控材料组分、分布状态与几何结构设计,可显著优化阻抗匹配、拓展吸收频带,并实现结构-功能一体化集成,为高性能电磁波吸收材料研制提供了创新途径。从发展历程来看,早期以 Dallenbach 层与 Salisbury 屏为代表的结构设计奠定了单层吸波材料中阻抗匹配与损耗机制的理论基础。近年来,碳纳米管、石墨烯、片状磁性微粉及磁性纤维等各向异性吸收剂的广泛应用,显著拓展了电磁参数的调控维度,有效提升了材料吸波性能。在此背景下,多尺度结构设计已成为该领域的重要研究方向,持续推动吸波材料向高效化与多功能化发展。

当前的研究重点主要集中在 3 个方面:一是开发新型材料体系,依托理论模型与算法实现逆向设计,制备具有优异本征损耗特性的吸收剂;二是聚焦微观-介观-宏观多尺度协同结构设计,通过形状各向异性吸收剂取向分布、阻抗梯度化多层分级以及设计构建人工超材料等方法,精准调控电磁参数与阻抗匹配,增强损耗机制,突破材料本征性能局限;三是发展可工程化的先进制备工艺,如大面积印刷与增材制造等低成本规模化技术,全面提升材料在复杂环境下的可靠性与耐久性,支撑实际装备应用。随着人工智能与增材制造等新技术的深度融合,微波吸收材料的多尺度结构设计正逐步迈向数字化与智能化。通过融合多尺度建模与机器学习逆向设计,可实现从目标性能需求到材料与结构的高效精准映射;同时,进一步强化多功能协同与集成能力,推动吸波材料在雷达隐身、多领域电磁防护应用,从而显著提升综合系统的整体效能。

该前沿中核心论文数排名第一的国家是中国,篇均被引频次排名第一的国家是新加坡(表 2.3)。在核心论文的主要产出国家中,中国与新加坡、韩国、美国的合作是最多的(图 2.1)。核心论文数排名第一的机构是青岛大学、南京航空航天大学与复旦大学,篇均被引频次排名前三的机构是华南理工大学、湖南大学与青岛大学(表 2.4)。在核心论文的主要产出机构中,复旦大学与之江实验室之间的合作最多(图 2.2)。施引核心论文数排名第一的国家是中国(表 2.5),施引核心论文数排名前三的机构是西北工业大学、青岛大学与南京航空航天大学(表 2.6)。图 2.3 为“电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿的发展路线。

表 2.3 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”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	31	100.00	2 882	92.97	2023.1
2	新加坡	2	6.45	473	236.50	2021.0
3	美国	2	6.45	163	81.50	2023.5
4	韩国	2	6.45	59	29.50	2024.0
5	日本	1	3.23	110	110.00	2020.0

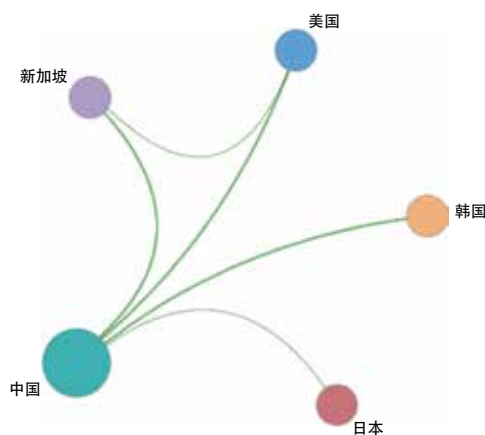


图 2.1 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.4 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”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	青岛大学	8	25.81	1 095	136.88	2022.0
2	南京航空航天大学	8	25.81	1 079	134.88	2022.4
3	复旦大学	8	25.81	842	105.25	2022.9
4	西北工业大学	7	22.58	866	123.71	2023.7
5	湖南大学	3	9.68	476	158.67	2022.7
6	之江实验室	3	9.68	169	56.33	2023.7
7	北京理工大学	3	9.68	52	17.33	2024.0
8	上海大学	3	9.68	35	11.67	2024.0
9	华南理工大学	2	6.45	337	168.50	2024.0
10	北京航空航天大学	2	6.45	211	105.50	2023.5

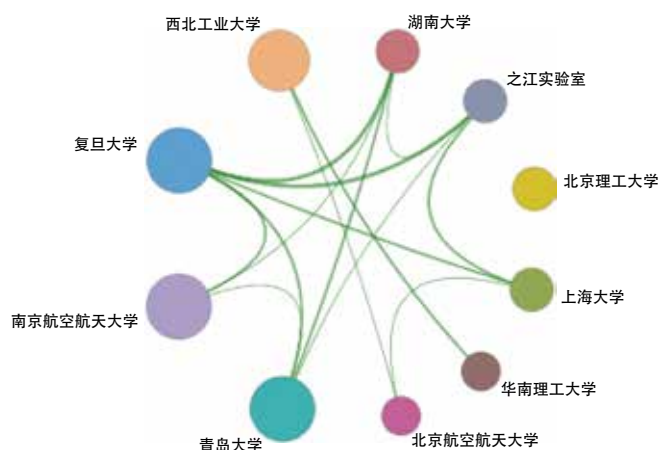


图 2.2 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.5 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”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	1 886	84.35	2023.0
2	美国	68	3.04	2022.7
3	印度	48	2.15	2023.3
4	韩国	41	1.83	2023.6
5	英国	38	1.70	2023.4
6	新加坡	35	1.57	2022.5
7	沙特阿拉伯	34	1.52	2023.4
8	伊朗	27	1.21	2023.1
9	澳大利亚	24	1.07	2023.1
10	埃及	19	0.85	2023.2

表 2.6 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”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	233	21.07	2022.9
2	青岛大学	171	15.46	2022.1
3	南京航空航天大学	131	11.84	2022.2
4	中国科学院	97	8.77	2023.2
5	四川大学	85	7.69	2023.7
6	复旦大学	78	7.05	2023.1
7	哈尔滨工业大学	73	6.60	2022.9
8	南京大学	65	5.88	2022.1
9	湖北汽车工业学院	64	5.79	2023.8
10	陕西科技大学	59	5.33	2022.8



图 2.3 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿的发展路线

2.1.2.2 机械超材料设计方法

“机械超材料”的概念雏形可追溯至 20 世纪对复合材料结构的研究，但其真正的飞跃始于 21 世纪初。随着增材制造技术的成熟，制造复杂微观结构成为可能，推动了该领域的实验验证和理论发展。早期研究多集中于发现具有单一奇特性质（如拉胀性）的结构。现状是研究已进入“按需设计”的阶段。传统的试错式设计已被计算驱动的“逆向设计”所取代。特别是拓扑优化方法，通过将性能目标转化为数学优化问题，自动寻找最优的材料分布。当前最前沿的趋势是人工智能的深度介入。机器学习模型，尤其是深度学习，被用于建立微观结构与宏观性能之间的超快速映射关系，极大地加速了设计进程。生成对抗网络等甚至能“创造”出全新的、反直觉的高性能结构。未来的趋势是向着多功能、动态可调、环境自适应的智能超材料设计迈进，并实现从设计到制造的无缝数字化闭环。

当前研究方向主要集中在以下方面：① 拓扑优化与人工智能驱动的设计——通过遗传算法、深度学习、生成对抗网络等实现高效搜索与优化；② 可编程与可重构结构——通过可调几何单元实现多状态力学响应，适应复杂工况；③ 多物理场耦合超材料——如力-电耦合用于自供能

传感、力-热耦合用于自适应散热；④ 跨尺度设计与制造——结合增材制造与纳米加工，实现微观-宏观一体化。

机械超材料设计方法是颠覆性的，它从根本上改变了材料研发的范式，从“发现”材料转变为“发明”材料。这允许工程师打破传统材料性能的界限，获得前所未有的性能组合，例如既轻便又坚韧、既能吸能又可导波的材料。这种能力为诸多尖端领域提供了全新的解决方案：在航空航天领域，可设计出轻质高强的缓冲吸能结构和蒙皮；在生物医疗领域，可定制与人体组织力学性能完美匹配的植入体或组织支架；在软体机器人领域，能创造可编程的软质执行器；在防护装备领域，可用于开发新一代的隐身装甲和减震平台。因此，掌握先进的超材料设计方法，已成为提升国家高端装备制造核心竞争力的关键。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数最多的是中国，篇均被引频次排在前三位的是美国、德国与法国（表 2.7）；中国与法国的合作最多（图 2.4）。在核心论文的主要产出机构中，核心论文数排名第一的是西北工业大学，篇均被引频次排在第一位的是同济大学（表 2.8）。在所有合作机构中，西北工业大学与洛林大学的合作最多（图 2.5）。施引核心论文数排在第一位的国家是中国（表 2.9）。施引核心论文数排名前三的机构是西北工业大学、天津大学与北京交通大学（表 2.10）。图 2.6 为“机械超材料设计方法”工程研究前沿的发展路线。

表 2.7 “机械超材料设计方法”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	19	82.61	749	39.42	2021.3
2	法国	6	26.09	248	41.33	2021.5
3	韩国	4	17.39	96	24.00	2021.5
4	美国	2	8.70	105	52.50	2020.0
5	德国	1	4.35	52	52.00	2020.0
6	新加坡	1	4.35	37	37.00	2021.0

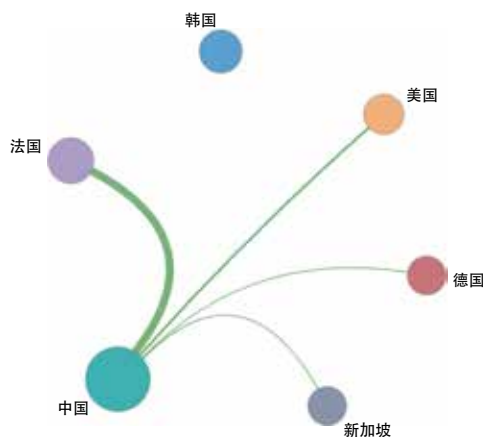


图 2.4 “机械超材料设计方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.8 “机械超材料设计方法”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	西北工业大学	9	39.13	357	39.67	2021.2
2	洛林大学	6	26.09	248	41.33	2021.5
3	首尔大学	4	17.39	96	24.00	2021.5
4	北京交通大学	3	13.04	158	52.67	2021.3
5	天津大学	3	13.04	158	52.67	2021.3
6	重庆大学	2	8.70	109	54.50	2019.5
7	忠南大学	2	8.70	66	33.00	2020.0
8	韩国机械材料研究院	2	8.70	61	30.50	2020.5
9	西安交通大学	2	8.70	28	14.00	2022.5
10	同济大学	1	4.35	80	80.00	2020.0

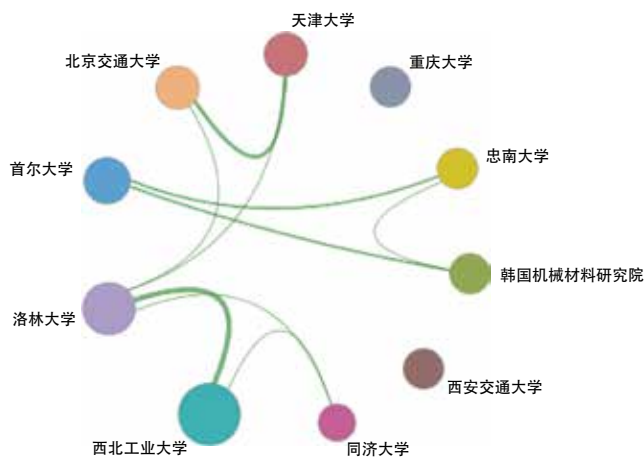


图 2.5 “机械超材料设计方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.9 “机械超材料设计方法”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	316	67.09	2022.6
2	法国	36	7.64	2021.6
3	美国	32	6.79	2022.8
4	韩国	30	6.37	2023.0
5	新加坡	13	2.76	2023.0
6	德国	12	2.55	2021.9
7	俄罗斯	10	2.12	2022.6
8	英国	7	1.49	2022.4
9	澳大利亚	6	1.27	2023.0
10	意大利	5	1.06	2023.4

表 2.10 “机械超材料设计方法”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	西北工业大学	43	16.29	2022.4
2	天津大学	33	12.50	2022.5
3	北京交通大学	28	10.61	2022.2
4	同济大学	27	10.23	2022.6
5	西安交通大学	27	10.23	2022.2
6	洛林大学	26	9.85	2021.4
7	中国科学院	19	7.20	2022.8
8	哈尔滨工业大学	16	6.06	2023.1
9	南京航空航天大学	15	5.68	2022.7
10	香港科技大学	15	5.68	2022.2

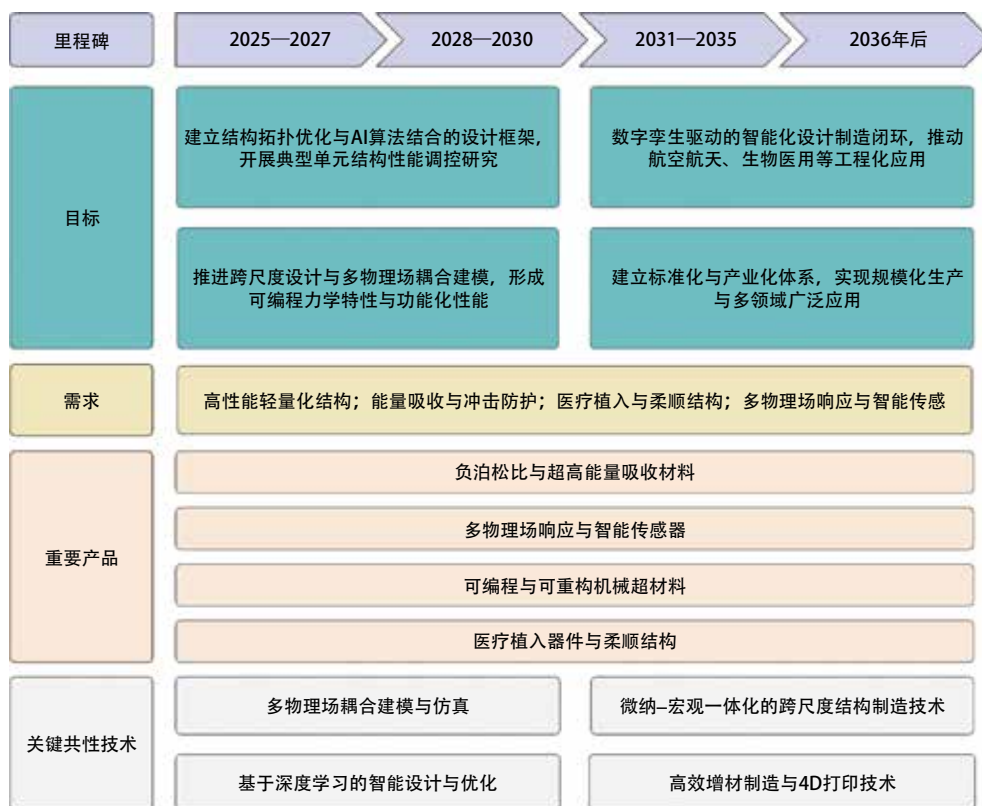


图 2.6 “机械超材料设计方法”工程研究前沿的发展路线

2.1.2.3 直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究

随着可再生能源制氢需求的爆炸式增长，传统电解水制氢必须使用高纯淡水的高成本模式受到挑战。直接电解海水生产绿色氢气迎来新机遇，其核心工程挑战在于：海水是一个复杂的化学体系，富含氯离子、镁离子、钙离子、微生物和悬浮颗粒等，直接电解会导致催化剂中毒、腐蚀、隔膜结垢堵塞等一系列致命问题。因此，直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究的本质是设计能够抵抗极端复杂电解液环境的高性能抗腐蚀催化剂与高选择性隔膜，并实现两者的协同集成，构建出新一代工业级电解槽。

近年来，随着材料科学与电化学的深度结合，直接海水电解（DSE）研究取得了显著突破。2022年，谢和平等报道了一种基于防水透气膜的电解槽（*Nature*, 2022, 612: 673-678），在 $250\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度下稳定运行超过3 200 h，标志着DSE向实用化迈出了关键一步。同时，在催化剂方面，NiFe层状双氢氧化物（LDH）、 Cr_2O_3 修饰的 CoO_x 等材料展现出在高碱度局部微环境中卓越的抗氯离子腐蚀和抗沉淀能力。目前研究处于从实验室原理验证向工业化示范突破的关键阶段。研究主要分为以下3个方面：

1) 高选择性抗中毒催化剂的微观设计与宏量制备：重点探索在阳极高电位和 Cl^- 环境下兼具高活性与超高稳定性的OER催化剂。研究方向从“克级”的实验室合成向“公斤级”的工程化制备工艺转变，满足工业应用需求是未来趋势。

2) 高选择性、抗结垢隔膜的结构设计与传质机理：开发新型复合隔膜，其核心是实现离子的精准筛分。深入研究孔道结构、表面电荷、亲疏水性对离子传输路径的影响，并赋予隔膜自清洁或防生物污损功能是未来趋势。

3) 电解槽工程设计与多物理场耦合优化：耐腐蚀流场设计，优化腔体结构与流道，确保海水均匀分布，避免死区导致杂质浓缩结晶；热管理设计，电解过程产热，需高效热控系统维持温度稳定，防止盐分因过饱和而析出；系统智能调控，根据海水水质、温度、电流密度变化动态调整运行参数，实现自适应稳定运行。

总之，直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究在材料科学、电化学、海洋工程与机械工程等多学科交叉领域具有重要研究价值，对保障国家能源安全、推动海洋经济高质量发展和促进生态文明建设等具有重要意义。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数排在第一位的是中国，篇均被引频次并列第一的是澳大利亚、加拿大与英国（表 2.11）；加拿大、澳大利亚、英国三方互为合作方，中国则分别与加拿大、澳大利亚、英国和新加坡等开展合作（图 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中国科学院，篇均被引频次并列第一的是斯威本科技大学、牛津大学、萨里大学与多伦多大学（表 2.12）；清华大学与中国科学院之间合作最多（图 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 2.13）。施引核心论文的主要产出机构中，发文量排名第一的是中国科学院（表 2.14）。图 2.9 为“直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿的发展路线。

表 2.11 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”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	6	100.00	301	50.17	2023.3
2	澳大利亚	1	16.67	136	136.00	2023.0
3	加拿大	1	16.67	136	136.00	2023.0
4	英国	1	16.67	136	136.00	2023.0
5	以色列	1	16.67	56	56.00	2023.0
6	新加坡	1	16.67	21	21.00	2024.0

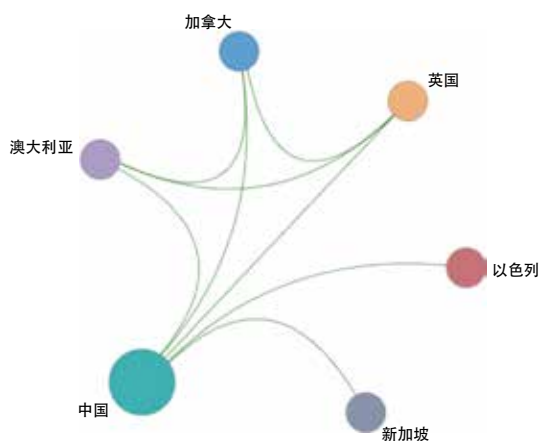


图 2.7 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.12 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”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	5	83.33	283	56.60	2023.2
2	清华大学	2	33.33	157	78.50	2023.5
3	斯威本科技大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
4	牛津大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
5	萨里大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
6	多伦多大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
7	巴伊兰大学	1	16.67	56	56.00	2023.0
8	中国地质大学(武汉)	1	16.67	56	56.00	2023.0
9	华中科技大学	1	16.67	56	56.00	2023.0
10	同济大学	1	16.67	56	56.00	2023.0

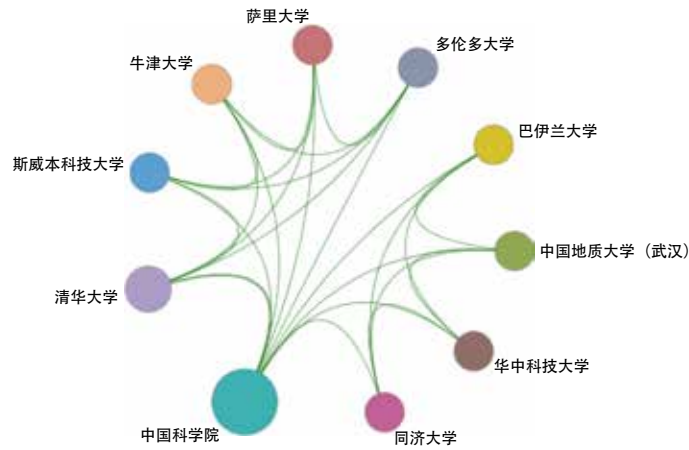


图 2.8 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.13 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”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	267	75.85	2023.9
2	澳大利亚	20	5.68	2023.8
3	韩国	15	4.26	2023.9
4	印度	9	2.56	2024.0
5	美国	8	2.27	2023.9
6	沙特阿拉伯	8	2.27	2023.9
7	加拿大	7	1.99	2023.9
8	日本	6	1.70	2024.0
9	德国	5	1.42	2024.0
10	英国	4	1.14	2023.8

表 2.14 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”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	30	18.18	2023.9
2	青岛科技大学	17	10.30	2023.9
3	四川大学	16	9.70	2023.9
4	山东师范大学	15	9.09	2023.8
5	电子科技大学	15	9.09	2023.8
6	崂山实验室	14	8.48	2023.8
7	清华大学	13	7.88	2023.8
8	成都大学	12	7.27	2023.7
9	香港城市大学	12	7.27	2023.8
10	华中科技大学	11	6.67	2024.0

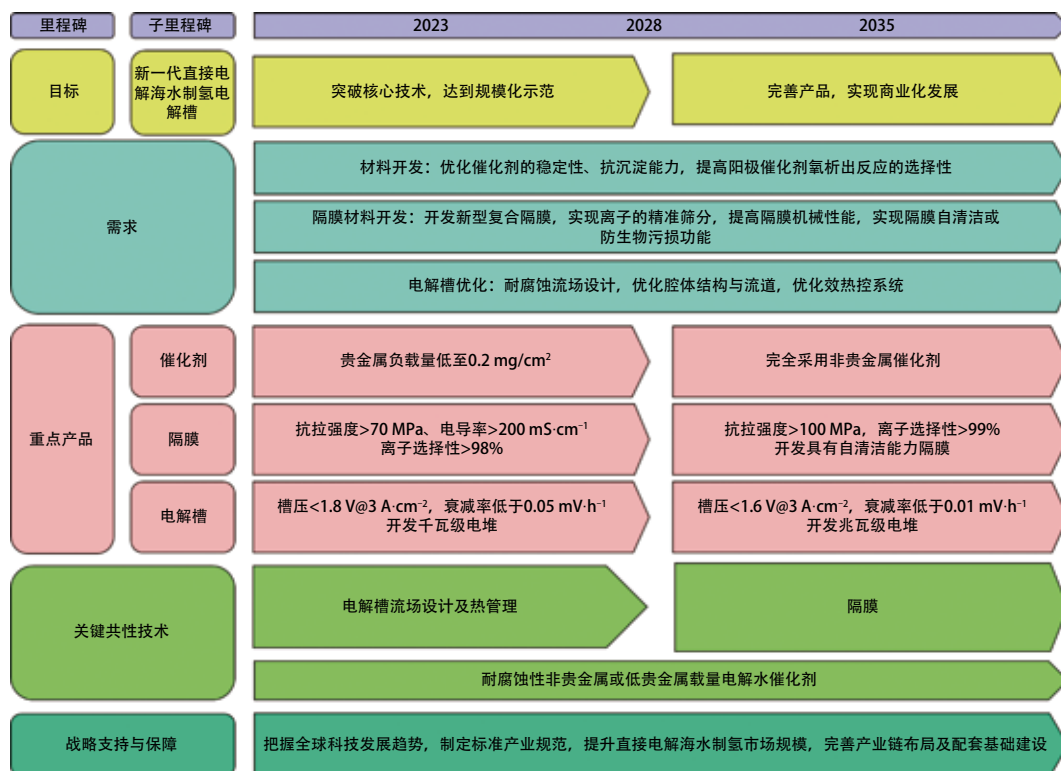


图 2.9 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿的发展路线

2.2 工程开发前沿

2.2.1 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 2.15）。其中，属于传统研究深化的有：低空无人机集群反制技术、多无人机协同打击任务分配方法、有人-无人系统协同作战任务规划方法、车路云一体化交通系统控制、无人船与水下机器人协同水下地形测量技术、基于大模型的故障诊断技术。新兴前沿则包括：高能量密度全固态动力电池技术、基于智能网的低空交通管理技术、存储芯片 3D 堆叠封装技术、三维立体集成封装的微流道散热技术。各开发前沿涉及的核心专利 2019—2024 年公开情况见表 2.16。

（1）高能量密度全固态动力电池技术

高能量密度全固态动力电池技术是应用于新能源汽车、航空航天、低空经济和高端储能等领域的前沿技术。其核心内涵是通过采用固态电解质取代传统电解液，突破能量密度和安全性的瓶颈，实现高比能、高安全和高稳定。相比于传统锂离子电池，全固态动力电池不仅大幅提升质量与体积能量密度，还能有效抑制热失控和枝晶生长，具备更高的本征安全。

当前研究热点主要集中在 3 个方面：一是固态电解质材料的开发，包括硫化物、氧化物、聚

表 2.15 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	引用数	平均被引数	平均公开年
1	高能量密度全固态动力电池技术	15	21	1.40	2022.3
2	低空无人机集群反制技术	138	612	4.43	2022.3
3	多无人机协同打击任务分配方法	11	53	4.82	2022.5
4	有人-无人系统协同作战任务规划方法	22	93	4.23	2022.9
5	基于智能网的低空交通管理技术	6	40	6.67	2023.5
6	车路云一体化交通系统控制	4	0	0.00	2022.8
7	存储芯片 3D 堆叠封装技术	19	78	4.11	2022.0
8	无人船与水下机器人协同水下地形测量技术	1	20	20.00	2022.0
9	三维立体集成封装的微流道散热技术	42	164	3.90	2022.5
10	基于大模型的故障诊断技术	31	39	1.26	2023.9

表 2.16 机械与运载工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	高能量密度全固态动力电池技术	1	2	1	3	3	5
2	低空无人机集群反制技术	13	20	8	19	35	43
3	多无人机协同打击任务分配方法	0	0	2	4	3	2
4	有人-无人系统协同作战任务规划方法	0	0	2	6	6	8
5	基于智能网的低空交通管理技术	0	0	0	1	1	4
6	车路云一体化交通系统控制	0	0	0	2	1	1
7	存储芯片 3D 堆叠封装技术	1	2	3	8	1	4
8	无人船与水下机器人协同水下地形测量技术	0	0	0	1	0	0
9	三维立体集成封装的微流道散热技术	3	1	1	15	12	10
10	基于大模型的故障诊断技术	0	0	0	0	2	29

合物及其复合体系，目标是实现室温下 10^{-3} S/cm 以上的离子电导率，同时具备优异的化学稳定性；二是电极-电解质界面调控，通过人工界面膜、梯度结构等策略降低界面阻抗并抑制副反应；三是工程化与应用技术，涵盖薄膜电池、叠层电池及车规级模组开发，重点解决产品设计、制造技术与装备、装机应用等难题。

提高能量密度和安全性是未来全固态电池发展的核心趋势。预计 2025—2030 年将实现 400 W·h/kg 以上的能量密度和 1 000 次以上的循环寿命，并在消费电子和新能源汽车中实现小规模应用；2030—2035 年，能量密度有望突破 500 W·h/kg，循环寿命达到 2 000 次以上，实现在新能源汽车领域规模应用，以及在电动航空、无人机、人形机器人、深空探测等领域的高端应用，推动智能电网与氢能的协同发展。

（2）低空无人机集群反制技术

低空无人机集群反制技术是反无人机技术的一个重要分支，是一项综合运用智能探测、行为

识别、干扰劫持、多模式毁伤等多种手段实施体系化主动防御的前沿技术。该技术除了具备反制“低慢小”目标的基本属性外，还要面临集群异质化、通信组网多样化、协同控制复杂化、群体决策自主化等新挑战。因此，破解集群的“协同优势”并兼顾时效性与可靠性，是当前无人机集群反制领域的研究重点。

该领域研究方向主要包括：① 极端环境集群态势感知，旨在解决集群目标测不准、辨不清、意图难判的瓶颈难题；② 综合反制决策与效能评估，旨在利用人工智能驱动多元反制的决策生成；③ 先进毁伤与干扰截停，聚焦于新型有效打击或干扰手段；④ 多元协同的复杂系统集成，旨在集成多元“软硬”手段形成协同反制能力。未来发展趋势主要集中于电磁等主导的多模态精准探测、高效低成本大范围新毁伤新机制、多元反制技术协同毁伤等，以形成人工智能赋能的“精准威胁感知—智能匹配决策—高效行动打击”的技术闭环。

（3）多无人机协同打击任务分配方法

无人机在未来战争中将逐渐成为主战装备之一。目前，多个国家已列装多型无人机，更有众多新型号在研。在俄乌冲突和以伊冲突中，无人机发挥了至关重要的作用，受到了广泛的关注，人们由此看到了未来战争的可能景象。

复杂环境下多目标打击将是无人机在军事应用中面临的典型任务之一。考虑环境约束和无人机自身动力学约束，在对地面、水面和空中的固定目标、移动目标和机动目标执行打击任务中，多无人机实现协同打击效能最大的任务分配方法是亟待研究的关键问题。

在机器人领域，关于任务分配方法已经有许多研究成果，这些成果可以应用于打击固定目标和移动目标情景下的多无人机任务分配问题，但难以处理多约束复杂环境下机动目标协同打击的任务分配问题。机动目标在感知到无人机来袭时，会采取逃逸策略，甚至采取协同规避对策，使得多无人机的协同打击任务分配问题十分复杂。而在未来以无人武器为主的战争中，多无人机对多机动目标（包括无人机、无人车、无人艇、有人驾驶装备和作战人员）实施协同打击将是常规任务，多无人机任务分配方法和技术是一个重要的发展方向，相关发展趋势包括复杂环境协同感知方法、机动目标协同识别与定位方法、协同任务生成方法和协同任务分配方法等。

（4）有人—无人系统协同作战任务规划方法

有人—无人系统协同作战任务规划方法是现代军事领域的重要研究方向，其核心是利用人工智能、大数据、物联网等技术，结合地形、地貌、气象、电磁等因素，基于网络信息系统，实现各有人—无人作战要素的战场信息按需共享、战场态势一致认知、作战行动智能筹划、作战资源一体调度、临机情况快速响应、有人—无人整体联动，旨在构建有人系统与无人系统混合编组，发挥二者互补增效优势，提升整体作战效能。

有人—无人系统协同作战任务规划方法相关技术包括态势感知、态势认知、任务理解、任务分解分配、机动路线规划、侦察规划、火力打击规划、通信中继规划、方案评估、协同控制、人机协同、互联互通互操作等。

围绕有人—无人系统 OODA [即 observation（观察）、orientation（判断/调整）、decision（决策）和 action（执行）] 全流程，目前相关研究主要集中在多源异构信息融合、威胁判断

与打击清单生成、有人-无人协同路径规划、协同侦察规划、火力分配、有人-无人协同控制、人机协同等方面，未来的技术发展趋势包括云-边-端协同架构、智能杀伤网、人机互信、多智能体强化学习、多模态感知与态势认知、基于大模型的行动策略规划、基于博弈对抗的临机决策、未知/拒止环境下分布式协同控制等。

（5）基于智能网的低空交通管理技术

智能网是物联网与人工智能融合的新架构，其核心是人、机、物三元主体的智能互联。基于智能网的低空交通管理系统通过融合通信、感知、导航、气象与算力网络，实现对无人机、电动垂直起降飞行器（eVTOL）等低空飞行器的协同调度与安全监理。系统采用“通感算控”一体化架构，具备实时监测、风险预警、动态处置等能力，是低空经济的关键基础设施。

当前该技术的主要研究方向包括低空立体通信（5G-A/星链多链路冗余）、高精度感知（雷达/光电/ADS-B融合）、飞行风险消减规避、微气象预测和云边端智能决策等，以解决城市复杂环境中的实时管控问题。

实现低空空域空中交通高效运行，“低空安全”是核心挑战。智能网技术需要从“造得安全、飞得合规、管得到位”3个层面系统构建低空安全闭环体系：通过通感融合实现电子围栏、身份认证与动态禁飞区管理；借助高精度导航和实时气象降低碰撞风险；结合AI与数字孪生构建空天地监管平台，实现异常飞行快速响应。

无人驾驶航空器本体的自主安全能力是低空交通管理的重要基础，其与智能网的协同互补，才能实现从被动响应到主动免疫的安全范式转变，实现“全空域覆盖、全流程可控、全要素智能”目标，突破高可靠与低成本瓶颈，可为我国低空交通发展提供核心支撑。

（6）车路云一体化交通系统控制

车路云一体化交通系统（vehicle-road-cloud integrated transportation system, VRCITS）是指通过新一代信息与通信技术将人、车、路、云的物理空间、信息空间融合为一体，基于系统协同感知、决策与控制，实现智能网联汽车交通系统安全、节能、舒适及高效运行的信息物理系统，由车辆及其他交通参与者、路侧基础设施、云控平台、相关支撑平台、通信网等部分组成。目前传统车辆缺乏与其他交通参与者以及基础设施的实时协同，缺少全局交通信息支撑，只能做出局部最优决策，VRCITS代表着智能交通系统从“局部智能”向“全局智慧”的演进。为了应对VRCITS信息跨域融合、分层决策与协同控制的复杂性，传统的交通系统设计方法、构型，以及协同优化控制策略等需要进行优化升级，同时需强化自动驾驶合规与防御性驾驶机制，并建立可持续成长的系统架构，同时完善自动驾驶安全性测试评价体系。

目前该领域的主要技术方向包括车路云一体化复杂系统架构设计、车路云融合感知、智能决策优化、动态调度与协同控制等。发挥VRCITS数据的海量性、完备性、准确性优势，人工智能驱动的车路云一体化协同行驶控制关键技术是该领域未来的发展方向，重点涵盖面向自动驾驶合规与安全的协同决策机制、符合防御性驾驶理念的动态行为响应、支持系统可持续成长的演进路径，以及融入安全性测试评价的闭环验证方法。具体的技术发展趋势包括数据驱动的车端和路侧感知方法、基于多模态模型的路侧开集感知技术、车端结合监督学习和强化学习的自动驾驶大模型预训练与微调的方法、宏微观协同规划与长短时域协同决策的车云协同网络系统等。

(7) 存储芯片 3D 堆叠封装技术

存储芯片 3D 堆叠封装是一种采用硅通孔、微凸块、混合键合等高密度互连技术，实现存储芯片垂直方向堆叠，以突破存储器二维微缩瓶颈的前沿技术。其核心目标是打破“存储墙”，提升存储芯片容量和带宽。

该技术领域的主要发展方向是基于“材料-结构-工艺-系统”4个维度，在有限空间内高效、可靠堆叠更多存储单元，实现带宽、能效与功能密度代际跃迁。其发展趋势包括持续优化 3D NAND 和 DRAM 单元，持续推动 PCRAM、MRAM、RRAM、FeRAM 等新型存储介质性能提升；持续优化混合键合、超薄晶圆减薄等超高互连密度技术，实现更高 3D 堆叠层数；研究基于高效热界面材料与集成微流道冷却等高效热管理技术，解决高密度堆叠热问题；创新设计与工艺架构，实现存储、控制、计算芯粒高并行度异构集成。探索玻璃通孔、光电集成及二维材料等新材料与新技术，支撑下一代系统级互连架构的发展，满足人工智能与高性能计算系统需求。

该技术领域的具体研究方向主要包括：小尺寸硅通孔、微间距混合键合、极小间距布线、超大面积中介层技术等；微流道冷却、导热界面材料、相变散热等；多芯片-封装-系统级的协同优化、跨尺度多物理场精确建模和仿真等；多模态感存算融合架构、低功耗数模混合电路优化、异构集成系统架构等。

(8) 无人船与水下机器人协同水下地形测量技术

无人船与水下机器人协同水下地形测量技术是指利用无人船和水下机器人通过协同作业，对水下地形进行高精度测绘和数据采集的前沿技术。其核心概念在于实现水面与水下平台的无缝协作：无人船负责水面导航、通信中继、GPS 支持和能源补给，水下机器人搭载多波束声呐、侧扫声呐等设备进行地形扫描。这种模式有效克服单一平台的通信、定位和续航局限，适用于海洋勘探、河床监测、海底资源调查和灾害评估等领域。与传统单一测量方法相比，该技术在复杂水域（如深海或湍流区）中展现更高效率和安全性，通过实时数据共享与任务分配优化作业流程。例如，无人船可充当“母舰”，为水下机器人提供动态路径规划和紧急回收支持，提升测量覆盖范围与数据准确性。

目前该领域的主要技术方向包括多平台协同控制算法、声学光学传感器数据融合、高精度定位导航、能量管理和通信优化。研究重点强调鲁棒路径规划和避障机制，确保系统在干扰环境下的稳定运行。例如，采用分布式控制架构，实现无人船与水下机器人的自主任务协商，支持高效数据采集和实时三维建模。未来发展趋势聚焦智能化与自主化。基于人工智能的自主决策技术将成为核心，如利用机器学习进行实时地形识别和异常检测；结合深度学习进行多模态传感器融合来提升测量精度；此外，可重构协同架构，如无人船搭载机器人集群，支持大规模并行测量。随着 5G 和卫星通信整合，该技术将扩展至远程海洋监测，推动环境保护与资源开发创新。

(9) 三维立体集成封装的微流道散热技术

三维立体集成封装的微流道散热技术是一种针对堆叠芯片封装的先进冷却方案，通过在封装内部加工微米级流道，引入液冷强制对流换热，有效缓解封装热点和热阻问题，具有高效、高集成度、散热均匀等优势，在提升芯片性能和长期可靠性方面具有重要意义。

主要技术方向包括：① 加工工艺优化——开发与封装工艺兼容的加工方法，提高流道尺寸

精度和表面质量，确保结构强度和密封性能；② 系统集成协同——突破微流道与微泵、电光互连结构集成技术，提升系统紧凑性和可靠性；③ 流道设计创新——针对不同应用场景和封装结构，运用机器学习等仿真方法，对微流道进行全局优化，改善均温性、降低压降、提高散热效率；④ 关键材料择优——开发适合规模化制造的结构材料，探索高比热容单相流体和高相变潜热两相流体，实现协同高效散热。

三维立体集成封装的微流道散热技术正朝着极限散热、多维协同和智能化方向发展。通过结合微纳加工等新技术，实现精密流道可控制备；推进电-热-流-光多维设计，构建高集成度三维协同布局；发展自适应流道优化方法，促进热点预测和流体分配智能化；解决流道材料疲劳、密封失效等关键挑战，确保长期稳定性，形成面向三维立体集成封装的完整热管理方案。

(10) 基于大模型的故障诊断技术

基于大模型的故障诊断技术是指利用具备大规模参数和强泛化能力的智能模型，对工业设备系统运行数据进行建模与分析，实现设备健康状态评估、故障识别与定位的智能诊断方法。目前典型的基于大模型的故障诊断技术主要是在大规模预训练模型基础上发展而来的。与通用大模型相比，面向故障诊断的大模型更加注重复杂时序信号与多源数据的处理，强调在资源受限的工业边缘环境下高效运行、可解释、诊断可靠。为适应多样化的诊断任务，需要在诊断跨任务迁移、领域知识增强、多模态感知融合以及轻量化优化等方面进行优化升级。

目前，大模型驱动的机械故障诊断主要技术方向包括基于推理大模型的诊断逻辑迁移方法、融合领域知识的知识增强建模方法、基于振动视觉等多源传感器的多模态数据融合方法、面向工业应用的轻量化优化方法等。结合大模型强大的表征和推理能力，发展形成大模型驱动的机械故障诊断新范式，是该领域未来的重要发展方向。具体的技术发展趋势包括：基于推理能力的跨任务诊断大模型，融合知识图谱的可解释与可靠诊断模型，多模态感知下的变工况故障诊断方法，以及面向边缘部署的轻量化与高效推理设计等。

2.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.2.1 高能量密度全固态动力电池技术

随着新能源汽车、电动航空与战略储能对高比能、高安全的需求攀升，传统液态锂离子电池在能量密度、热稳定性与电解液安全性上已接近极限。全固态动力电池以固态电解质取代可燃液态体系，被视为下一代储能的关键突破。自 20 世纪 80 年代提出以来，全固态电池研究已历经材料探索、原型验证到产业化初启，日本、韩国及欧美车企率先布局，中国亦将其纳入国家重点研发计划。

全固态电池的演进可概括为“性能—安全—规模”三重跨越：早期（1980—2010）主要探索硫化物、氧化物和聚合物电解质的导电机理；近十余年（2010—2023）通过界面工程与原型验证，室温离子电导率突破 10^{-3} S/cm，循环寿命提升至百次量级；未来十年将迈向规模化和多场景应用，预计 2028—2035 年单体能量密度可达 400~500 W·h/kg，循环寿命提升至 1 000~2 000 次，并在电动航空、长续航车辆和分布式储能中实现商业化。

全固态电池的重要性在于突破“安全底线”与“性能天花板”：固态电解质不可燃，可显著

抑制热失控；同时兼容锂金属负极和高电压正极，为能量密度持续提升打开空间，进而重塑交通电动化、智能电网与国防动力格局。

当前研究热点集中于以下三大方向：

1) 固态电解质材料：硫化物导电性与润湿性优，但受空气敏感与成本制约；氧化物稳定而界面阻抗大；聚合物加工性好但室温导电率低。多相复合、离子液体辅助与纳米结构调控是兼顾导电性与稳定性的前沿策略。

2) 电极-电解质界面：锂枝晶、硅基体积膨胀及高电压正极副反应是寿命瓶颈，通过人工固体电解质界面膜（SEI膜）、弹性缓冲层和原位反应调控可有效降低阻抗并延长寿命。

3) 结构与工程化：干法成膜、层压与共烧结工艺，以及先进封装和热管理方案，是实现致密界面、低成本和规模化制造的关键。

展望未来，全固态电池发展将经历“三步走”：近期（2025年前），率先在可穿戴电子和高端3C产品小规模应用；中期（2028—2035年），完成车规级模组验证并实现产业化和规模应用于，同时实现在无人机和人形机器人领域的应用；长期（2035—2040年），借助富锂层状、硫基正极、金属锂负极和智能电池管理技术，支撑电动航空、深空探测和分布式储能，成为高安全高比能的终极能源体系。

目前，该前沿中核心专利公开量和平均被引数排名第一的国家是中国（表 2.17）。核心专利的主要产出国家之间暂无合作。核心专利公开量最多的机构是中南大学（表 2.18）。核心专利的主要产出机构中，中南大学与深圳市国拓智能机械有限公司之间存在合作（图 2.10）。图 2.11 为“高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.17 “高能量密度全固态动力电池技术”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	13	86.67	21	100.00	1.62
2	德国	1	6.67	0	0.00	0.00
3	美国	1	6.67	0	0.00	0.00

表 2.18 “高能量密度全固态动力电池技术”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	中南大学	2	13.33	7	33.33	3.50
2	北京新能源汽车股份有限公司	1	6.67	5	23.81	5.00
3	南京金龙客车制造有限公司	1	6.67	5	23.81	5.00
4	重庆九环新越新能源科技发展有限公司	1	6.67	2	9.52	2.00
5	深圳市国拓智能机械有限公司	1	6.67	2	9.52	2.00
6	中国第一汽车股份有限公司	1	6.67	1	4.76	1.00
7	江苏智泰新能源科技有限公司	1	6.67	1	4.76	1.00
8	6K 公司	1	6.67	0	0.00	0.00
9	中国科学院物理研究所	1	6.67	0	0.00	0.00
10	梅赛德斯-奔驰集团股份公司	1	6.67	0	0.00	0.00

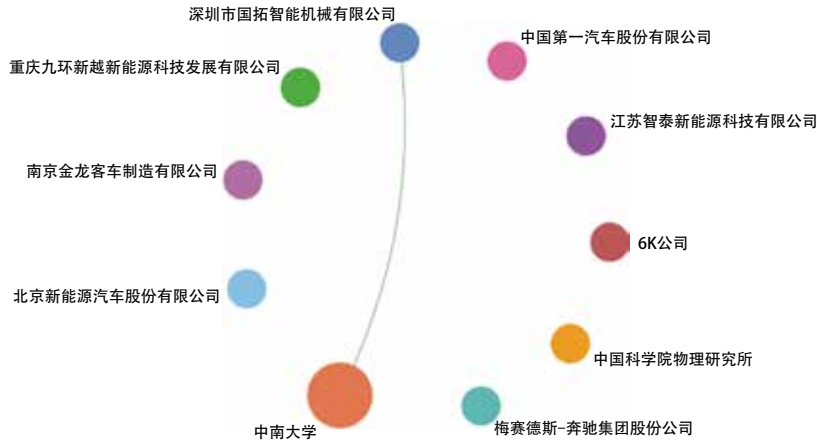


图 2.10 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

里程碑	子里程碑	2025—2027	2028—2035	2035—长期
目标	基于固态电解质构建兼具高安全性、高比能、低成本的电池体系	室温离子电导率大于 10^{-3} S/cm 单体能量密度突破400 W·h/kg	动力电池产业化，单体能量密度突破500 W·h/kg 循环寿命达到1 000~2 000次，安全性能满足严格热失控测试	高能正极（富锂层状、硫基）与复合电解质体系实现突破 在电动航空、长续航电动车和战略储能领域实现广泛应用
需求	提升固态电池的离子导电性与界面稳定性，通过高导电固态电解质和界面工程协同优化，实现高能量密度、长循环寿命与安全可靠的微型及动力电池应用 推进多功能复合材料与智能电池管理系统的集成，兼顾高能量密度、循环寿命与热稳定性，为长续航电动车、电动航空及战略储能等高要求领域提供可靠动力解决方案			
重点产品	新一代具有高安全、高比能、低成本的固态电池体系	硫化物复合半固态电池 氧化物/聚合物复合半固态电池	锂金属负极准固态电池 无隔膜准固态电池	多功能复合材料全固态电池模块 高比能、高安全、低成本全固态动力电池系统
关键共性技术		高导电固态电解质设计技术 正负极兼容材料与界面工程技术	复合材料协同优化与多模态设计技术 固-固接触稳定化及组装工艺技术	智能电池管理与热安全控制技术 规模化制造与成本可控工艺技术

图 2.11 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2.2 低空无人机集群反制技术

低空无人机集群凭借灵活部署、低成本与高效适配等优势在支撑低空经济发展的同时，也伴随多重风险，如侵犯隐私、威胁航空安全、危害公共和国家安全等。由此看出，发展有效的低空无人机集群反制技术，对保障和维持低空经济有序发展具有重要的战略意义。

低空无人机集群反制需要在复杂低空电磁和强动态扰动环境下，借助智能探测、行为识别、干扰劫持、多模式毁伤等多种手段，实施体系化的主动防御。该技术正由早期的常规火力、拦截网、猛禽等物理/生物手段单点反制，进入“软硬”兼施、群对群的多点/集群体系化反制阶段，尤其是当前可综合运用常规火力、高功率微波、激光、电磁压制与网络劫持，实现“点”杀伤和“面”压制。未来该技术将向具备高抗扰、低成本、大范围毁伤能力的“精准威胁感知—智能匹配决策—高效行动打击”完整技术体系发展。

该领域研究方向主要涵盖：① 集群态势感知是反制体系的敏感单元，正由单一雷达/光电探测发展为以电磁等主导的多源融合与 AI 预测，旨在提升极端环境下集群行为意图探测能力。② 综合反制决策与效能评估作为反制技术体系的智慧大脑，正由人工规则向半自动算法、AI+博弈论、自适应优化演进，其中，面向大规模异质集群的高动态、非线性和随机行为的自主决策是该方向的研究重点。③ 先进毁伤与干扰截停技术是反制体系的手腕拳脚，软硬结合，既打击通信或控制，又摧毁实体。该技术正向定向能武器发展，微波武器已由单纯链路干扰扩展为电磁脉冲区域杀伤，激光武器正从低功率致盲发展到百千瓦级烧蚀，但仍存在系统功耗高、作用范围有限、多目标拦截能力不足、环境适应性差等问题。未来该方向将聚焦于发展依托定向能、等离子体等技术的高效低成本大范围毁伤新机制。④ 多元协同的复杂系统集成，强调多层统筹与跨域协同，将电子战、网络劫持、定向能或物理打击与效果评估深度集成，目标在于形成高效协同、自适应的综合防御体系。

目前，该前沿中核心专利公开量排名第一的国家是中国，平均被引数排名第一的国家是加拿大（表 2.19）。核心专利公开量排名第一的机构是四川华讯新科科技有限公司（表 2.20）。核心专利的主要产出国家之间、主要产出机构之间均未见合作。图 2.12 为“低空无人机集群反制技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.19 “低空无人机集群反制技术”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	122	88.41	268	43.79	2.20
2	美国	7	5.07	225	36.76	32.14
3	俄罗斯	3	2.17	9	1.47	3.00
4	印度	2	1.45	0	0.00	0.00
5	日本	2	1.45	0	0.00	0.00
6	加拿大	1	0.72	110	17.97	110.00
7	土耳其	1	0.72	0	0.00	0.00

表 2.20 “低空无人机集群反制技术”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	四川华讯新科科技有限公司	6	4.35	15	2.45	2.50
2	中国电子科技集团公司	5	3.62	3	0.49	0.60
3	中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所	4	2.90	24	3.92	6.00
4	国防科技大学	4	2.90	6	0.98	1.50
5	西北工业大学	4	2.90	1	0.16	0.25
6	雷神技术公司	3	2.17	162	26.47	54.00
7	北京航空航天大学	3	2.17	30	4.90	10.00
8	北京理工大学	3	2.17	14	2.29	4.67
9	沈阳航空航天大学	3	2.17	12	1.96	4.00
10	中国航天空气动力技术研究院	3	2.17	9	1.47	3.00

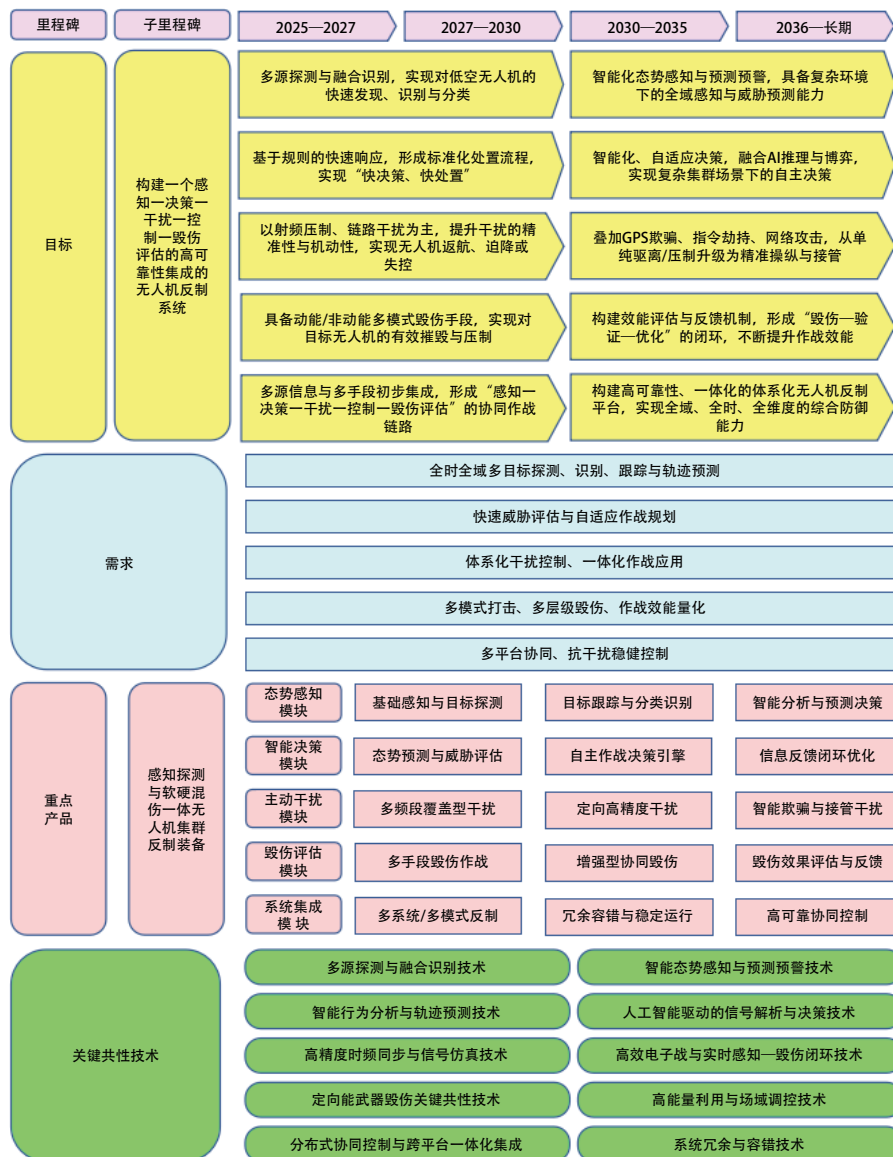


图 2.12 “低空无人机集群反制技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2.3 多无人机协同打击任务分配方法

随着无人机技术的不断成熟和完善，其军事应用的优势日益显现，近年来其在军事冲突中所发挥的作用更使人们认识到，无人机在未来战争中将成为重要的军事装备。随着无人机在军事中的大量应用，无人机集群协同执行任务将成为典型的应用模式。为完成无人机集群执行协同打击任务，有众多可行的方案，为了提高作战效能，多无人机协同打击任务分配方法和技术十分重要。

在自动化技术的发展中，尤其是机器人技术和先进航空技术的发展中，任务分配方法已得到深入研究，已有大量的相关研究成果。但是这些方法难以处理在复杂环境和复杂约束下机动目标协同打击中的任务分配问题。当被打击目标具有机动规避的功能时，协同打击问题便成为一类协同动态博弈问题，此时协同打击任务分配问题变得甚为复杂，加之环境约束和无人机自身的动力学等约束，使得该问题极具挑战性。

在执行对机动目标的打击任务时，需要规避障碍和危险区域（如敌方的防空火力范围），还要避免己方无人机之间的碰撞，因此需对存在障碍场景中具有避碰约束下的协同动态博弈问题开展研究，为制定协同打击策略奠定理论基础。在制定协同打击策略时，关于被打击目标和己方无人机的位置信息有两种形式，即全局位置信息和相对位置信息，前者可以获得被打击目标和己方无人机在三维空间的坐标信息，而后者只能获得相对位置信息，需分别研究基于不同类型位置信息的协同打击策略的分析和制定方法。无人机的杀伤能力（弹药的爆破能力和杀伤半径）和其所携带的能量（电池或燃油）总是有限的，研究这些约束条件下的协同打击策略分析与制定方法具有重要的实际意义。在多无人机对多机动目标实施协同打击策略分析中，打击策略可以分解为一对一和多对一的形式，从而形成子任务。当无人机携带的载荷相异（弹药、能量、通信设备和计算设备相异）时，需根据子任务需求进行无人机编组。以打击效能最大为目的，进行无人机编组和子任务分配，实现协同打击的任务分配方法和技术是多无人机军事应用中极为重要的关键技术。在机间协同的同时，进行空地协同，整合空中无人机机载资源和地面装备（包括通信、侦察和打击等），实现无人机体系化协同打击，将极大地提高无人机集群的作战效能。

目前，该前沿中核心专利的主要产出国家是中国（表 2.21）。核心专利公开量最多的机构是哈尔滨工业大学和国防科技大学（表 2.22）。核心专利主要产出国家之间、主要产出机构之间均未见合作。图 2.13 为“多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿的发展路线。

表 2.21 “多无人机协同打击任务分配方法”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	中国	11	100.00	53	100.00	4.82

表 2.22 “多无人机协同打击任务分配方法”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	哈尔滨工程大学	2	18.18	16	30.19	8.00
2	国防科技大学	2	18.18	13	24.53	6.50
3	北京航空航天大学	1	9.09	13	24.53	13.00
4	合肥工业大学	1	9.09	5	9.43	5.00
5	北京中科星通技术有限公司	1	9.09	2	3.77	2.00
6	海鹰航空通用装备有限责任公司	1	9.09	2	3.77	2.00
7	航空工业信息中心	1	9.09	1	1.89	1.00
8	电子科技大学	1	9.09	1	1.89	1.00
9	北京理工大学	1	9.09	0	0.00	0.00



图 2.13 “多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：陈学东¹ 郭东明

院士专家组：

曹喜滨 丁荣军 樊会涛 甘晓华 赫晓东 侯 晓 焦宗夏 卢秉恒 李 东 刘 宏
冷劲松 李 骏 李 克 强 李 魁 武 刘 怡 昕 林 忠 钦 马 玉 山 孙 逢 春 史 丽 萍 王 超
吴 光 辉 王 海 峰 王 树 新 王 田 天 王 向 明 王 云 鹏 王 玉 明 王 自 力 项 昌 乐 徐 芭 南

¹ 华中科技大学。

徐青 杨德森 严新平 郑津洋 周建平 朱坤 邹汝平 朱英富

工作组:

马天宝 马将 骆鸿 李明雨 范利武 牛士超 孙冬柏 罗国强 杨立军 王同敏
李秦川 王中钢 王从思 贺威 黄田 杨树明 李建利 梅云辉 吴广宁 陈玉丽
黄明辉 汪爱英 陶友传 毕传兴 詹梅 路新 付世晓 王开云 于靖军 刘巍
段吉安 王天友 尧命发 王建民 管仁国 赵立东 王立平 闫永达 陈伟球 王时龙
周天丰 黄昔光 豆志河 王树青 朱继宏 李好 吴德发 王新云 康重庆 朱恂
张景瑞 胡家兵 孙剑 周志成 黄海鸿 欧阳钢 李升波 史铁林 夏奇 龙胡
刘智勇 陈惜曦

执笔组:

龚荣洲 王鲜 赵伟 李箐 贺永 何超凡 陈海生 徐少兵 高博麟 吴志刚
张涛 董希旺 刘东旭 宋俊 黄云辉 赵剑 陈旺 潘泉 缪向水 谢少荣
罗小兵 陈雪峰 赵志斌

