

## 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、装填率低的屏障；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，已有部分企业与科研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

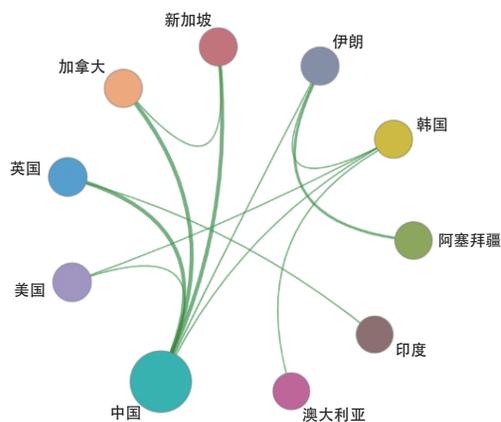


图 1.2.1 “高超声速飞行器技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

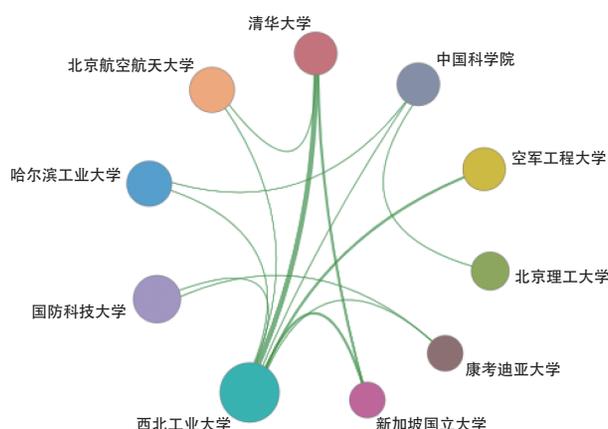


图 1.2.2 “高超声速飞行器技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>，但其在燃料制备过程中消耗 CO<sub>2</sub>，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<sub>x</sub> 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

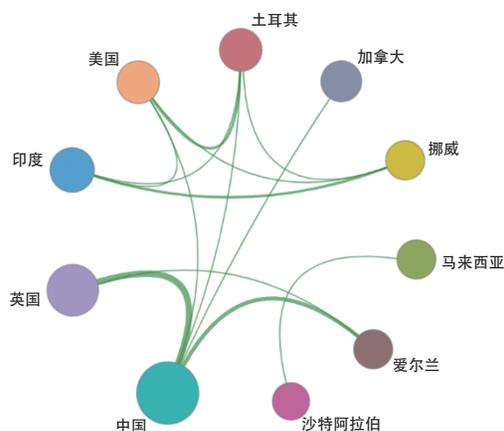


图 1.2.4 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

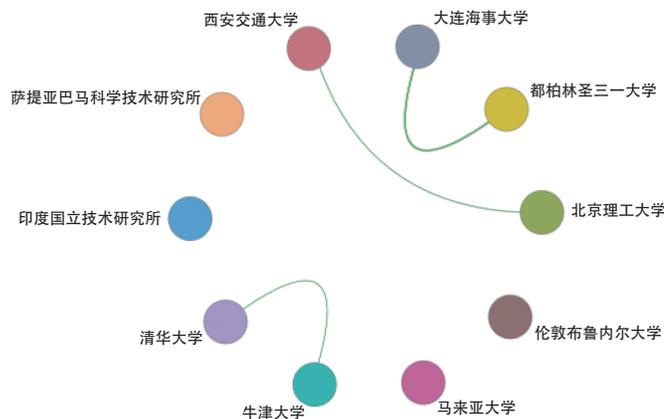


图 1.2.5 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

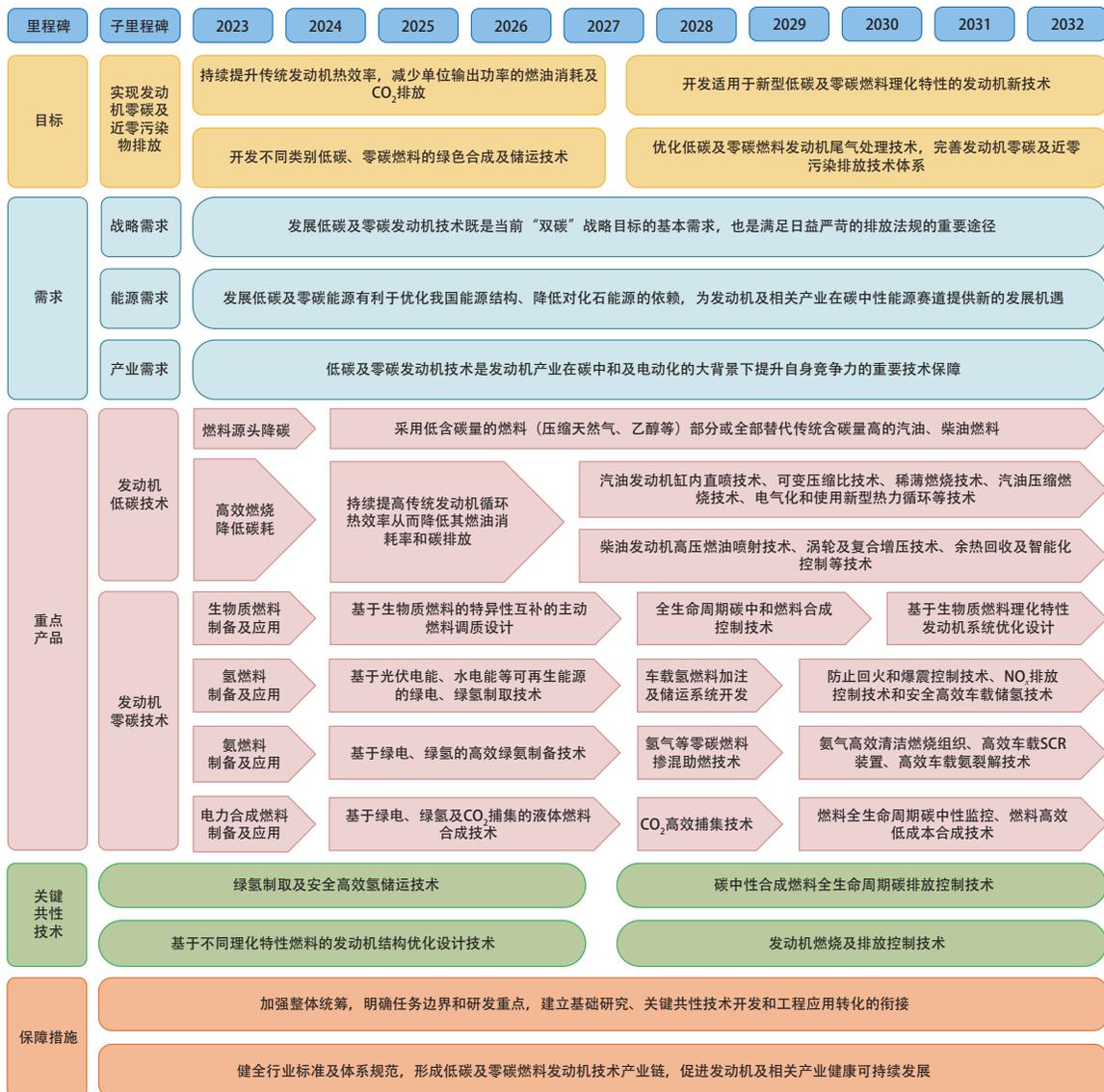


图 1.2.6 “低碳及零碳燃料发动机技术”工程研究前沿的发展路线

### 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

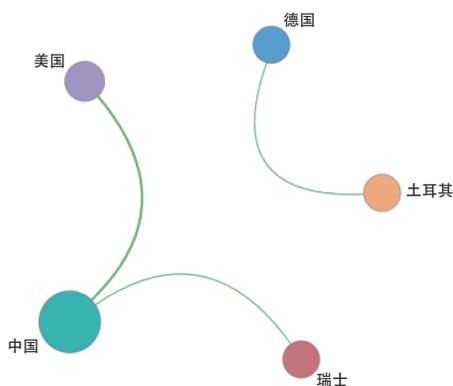


图 1.2.7 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

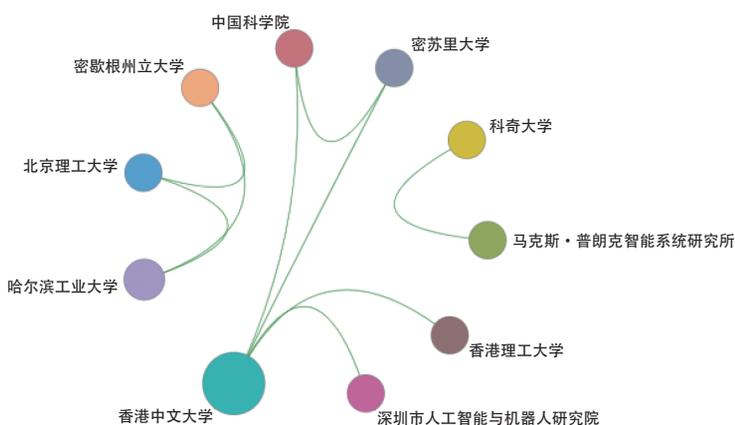


图 1.2.8 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

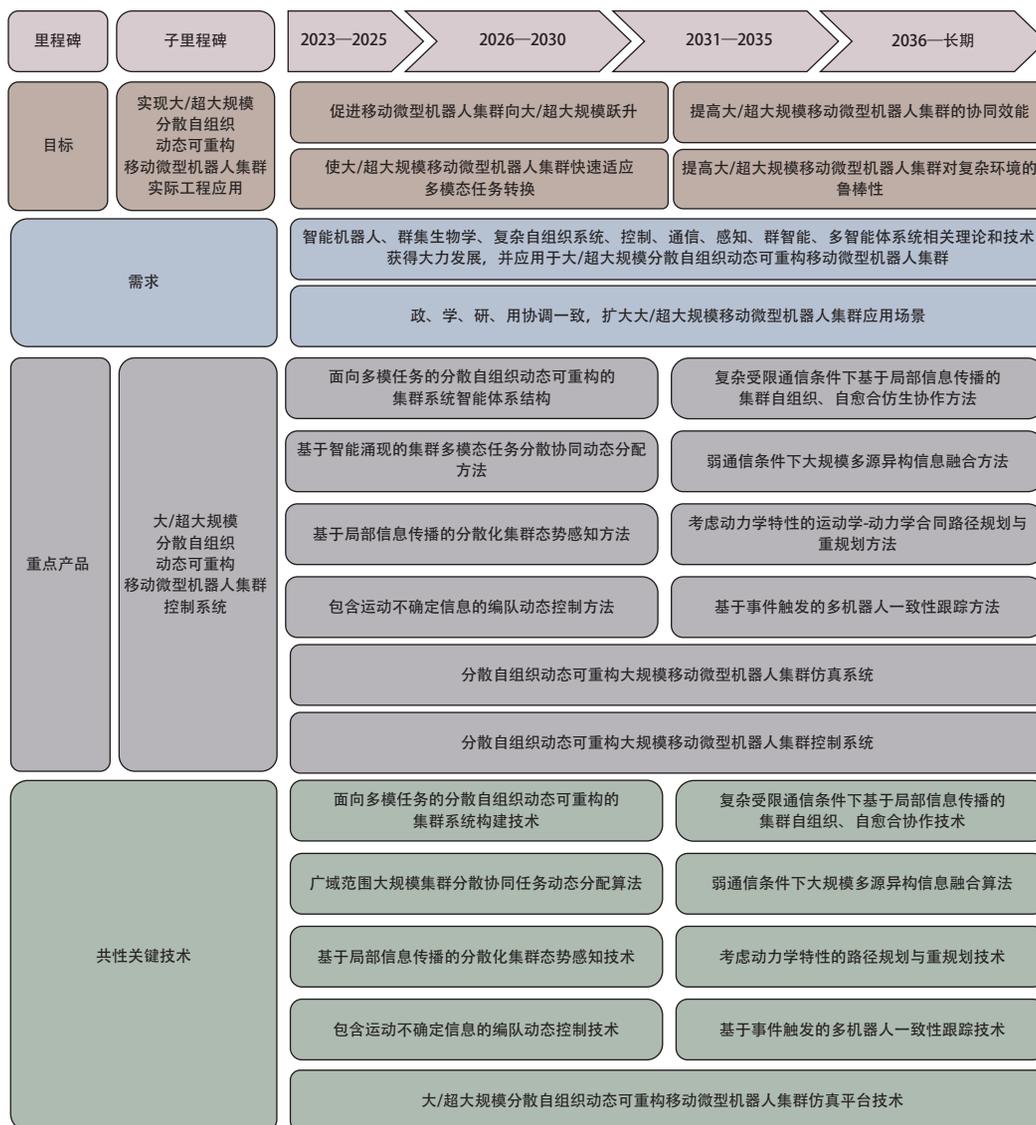


图 1.2.9 “动态可重构移动微型机器人集群”工程研究前沿的发展路线

## 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。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几十千克的无人飞行器，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。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

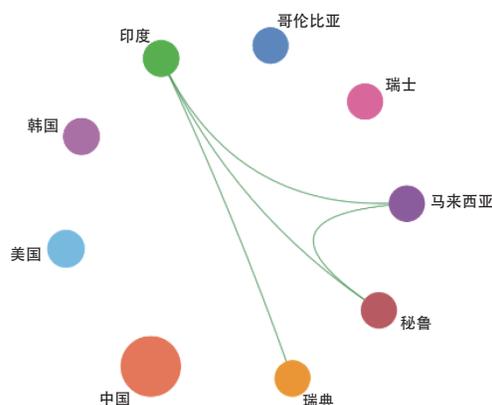


图 2.2.1 “多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

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 3M TOP 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

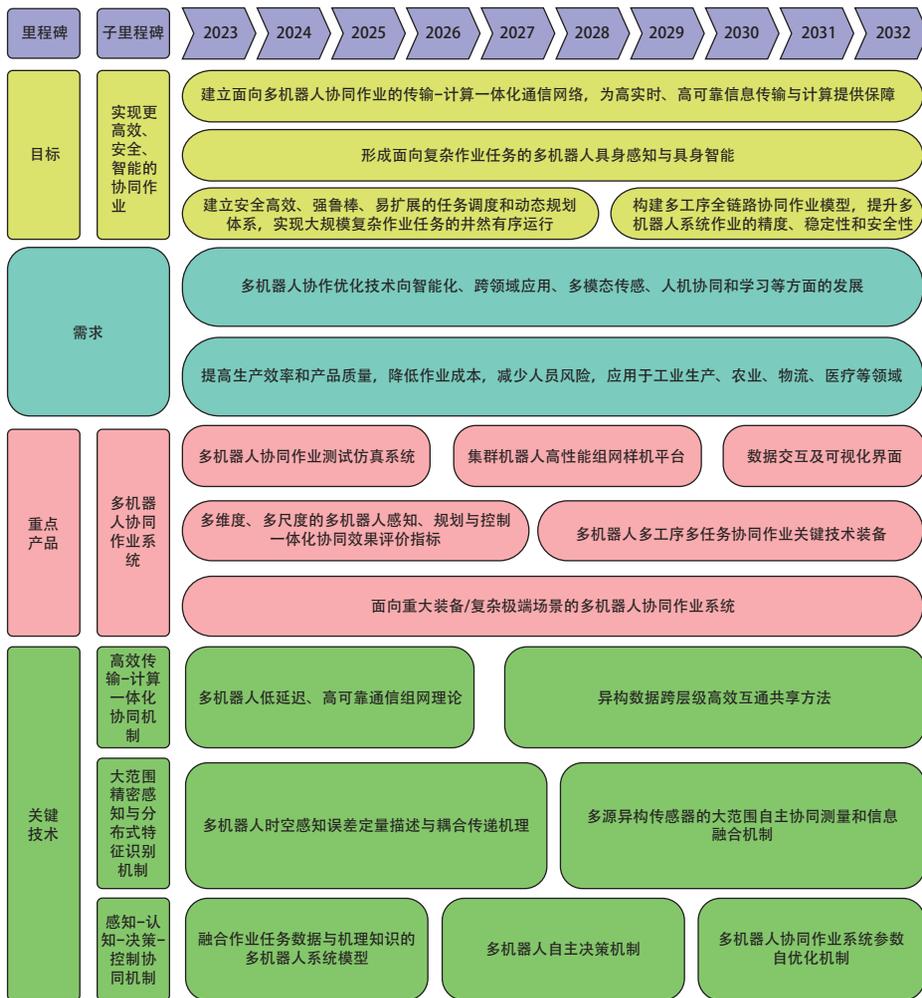


图 2.2.2 “多机器人协同作业优化技术”工程开发前沿的发展路线

### 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

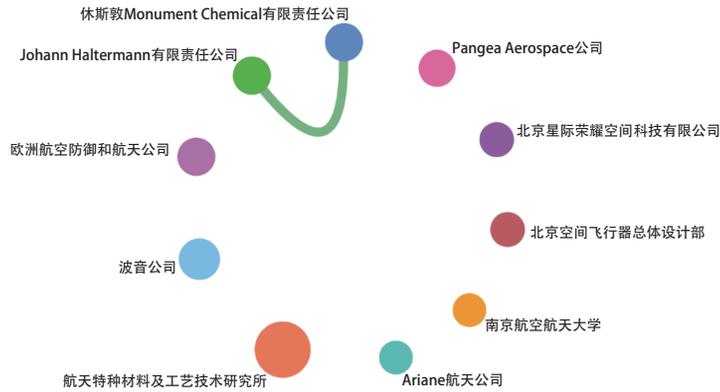


图 2.2.3 “低成本可回收复用航天器”工程开发前沿主要机构间的合作网络

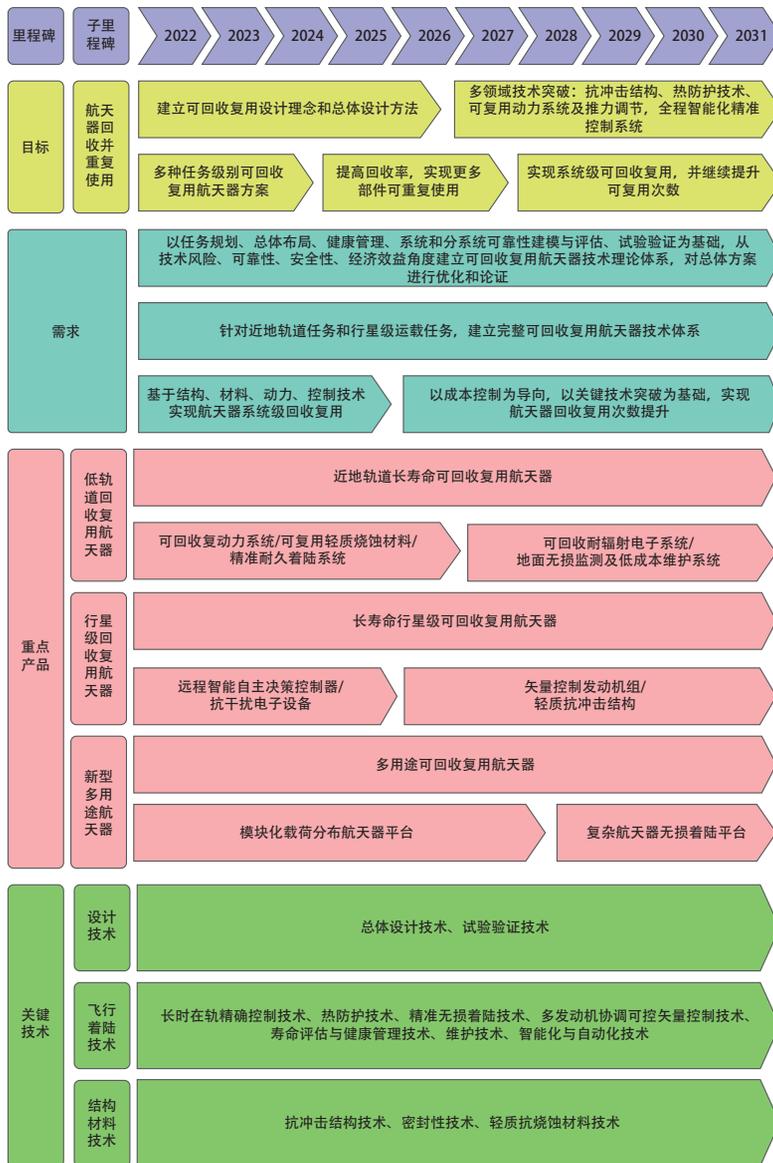


图 2.2.4 “低成本可回收复用航天器”工程开发前沿的发展路线

### 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喬虹（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	裔虹(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

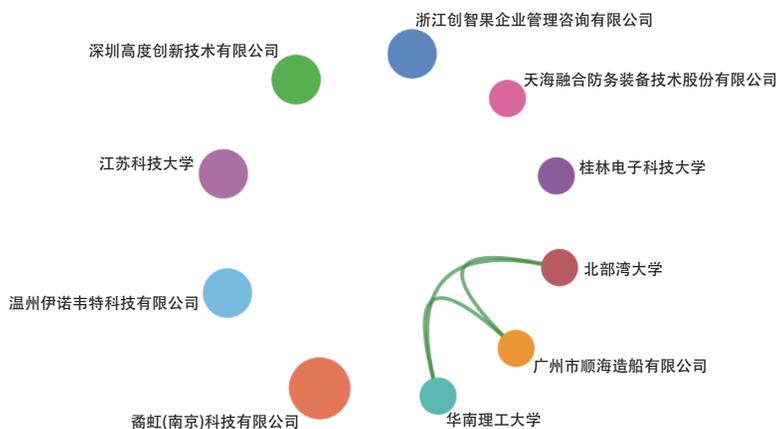


图 2.2.5 “水下无人救援机器人”工程开发前沿主要机构间的合作网络

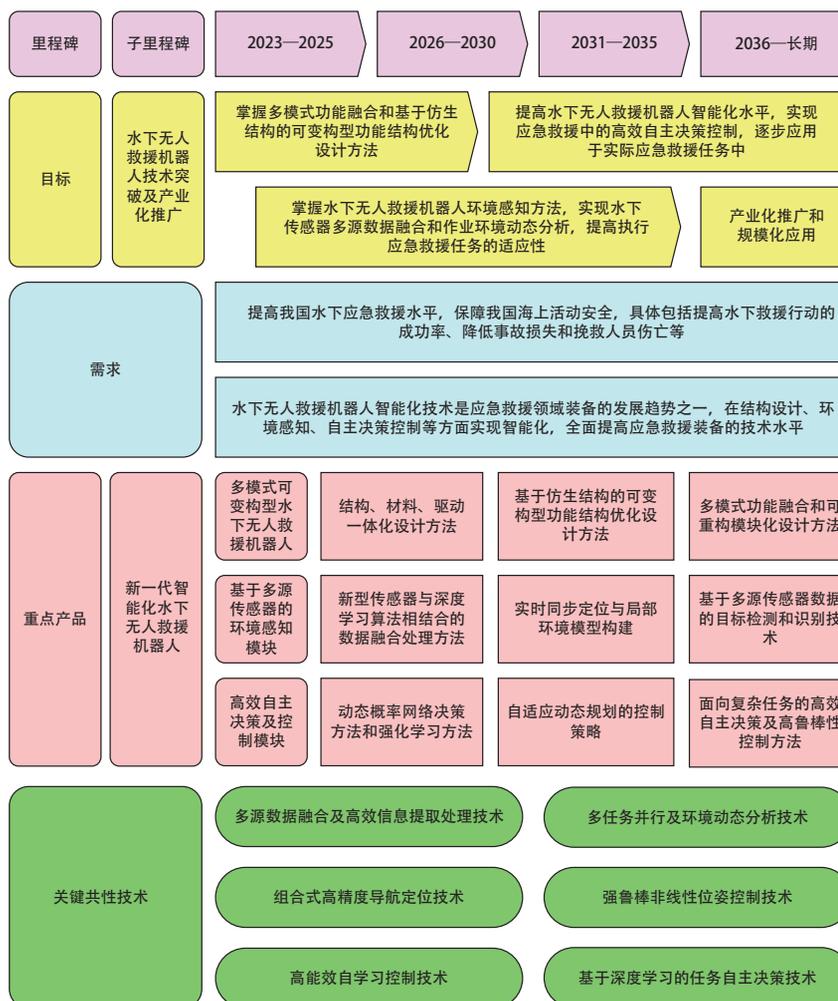


图 2.2.6 “水下无人救援机器人”工程开发前沿的发展路线

## 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<sup>1</sup> 金东寒 朱坤 王国庆 肖龙旭 葛世荣 陈学东<sup>2</sup>  
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

<sup>1</sup> 合肥通用机械研究院。

<sup>2</sup> 华中科技大学。

厉 侃 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