

模拟零重力及低重力环境的索驱动 机器人专利导航报告

山东亿九电气发展有限公司

济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）

前言

《山东省航空航天产业规划》要求聚力打造全国航空航天产业新高地，为新时代社会主义现代化强省建设提供有力支撑，为加快建设航空航天强国作出山东贡献。山东亿九电气发展有限公司公司与清华大学集聚多方研发力量，紧密跟随国家的科技发展战略，开发了模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人产品，采用先进的索驱动技术，结合精密的控制系统，实现高度逼真的重力模拟效果，用于模拟零重力及低重力环境，服务于航天飞行器的设计、性能测试以及飞行员的训练。

本导航报告针对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航进行分析，分析全球全国的模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航发展现状，分析全球全国专利发展态势，分析模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航创新主体的相关专利活动，并结合企业创新需求，充分利用专利信息，避免无效研发，开展专利检索，制定切合企业模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航产业发展的最佳方案。

专利数据库有 incoPat、中国国家知识产权局数据库、欧洲专利局数据库、美国专利局数据库、印度专利局数据库、巴西专利局数据库、日本专利局数据库、德国专利局数据库等；非专利数据平台有知网、万方和维普等。

本项目的实施通过引入索驱动机器人装置的专利技术，可以有效促进当地机器人产业的发展，形成以高新技术为核心的产业群，提升

区域经济的竞争力将吸引更多的技术人才和资金投入到航天机器人领域，促进济宁市航天领域机器人产业的集聚和升级，开发更多的专利产品，促进区域性核心专利的井喷式发展。

本导航的应用对象是济宁市区域内索驱动机器人企业及山东亿九电气发展有限公司。通过该专利导航项目，能够帮助清晰研发方向，提高专利挖掘和布局能力，形成高价值专利组合，并通过提供具体策略助力企业专利能力提升，通过专利实现对技术、产品以及市场份额的控制，增强企业的市场竞争力。

目录

前言.....	1
第一章引言.....	13
1.1 研究背景.....	13
1.2 研究目的.....	13
1.2.1 项目需求.....	14
1.2.2 主要研究内容.....	14
1.2.3 拟解决关键问题.....	15
1.3 研究内容.....	16
1.3.1 研究思路.....	16
1.3.2 术语说明.....	16
1.3.3 技术分解.....	17
1.3.4 专利检索.....	19
1.3.5 重点专利筛选规则.....	21
1.4 相关事项约定.....	22
1.4.1 同族专利.....	22
1.4.2 近期部分数据不完整说明.....	22
1.4.3 专利“项”数与“件”数.....	23
1.4.4 相关术语.....	23
第二章 索驱动机器人产业发展现状.....	26
2.1.1 定义与原理.....	26
2.1.2 零重力或低重力模拟方法和设备.....	26

2.1.3 索驱动机器人的优势.....	31
2.1.4 索驱动机器人的应用.....	34
2.2 政策情况.....	36
2.2.1 国家层面政策.....	36
2.2.5 地方政策支持.....	37
2.3 技术原理.....	37
2.3.1 索驱动原理.....	38
2.3.2 控制系统.....	38
2.3.3 动力学建模与仿真.....	39
2.4 技术进展.....	39
2.4.1 国内技术进展.....	39
2.4.2 国外技术进展.....	41
2.5 未来发展趋势.....	42
2.5.1 智能化自主控制.....	42
2.5.2 多机器人协同作业.....	43
2.5.3 高精度感知与测量.....	44
2.5.4 轻量化与高性能材料应用.....	45
2.6 面临的挑战.....	46
2.6.1 动力学建模与控制的复杂性.....	46
2.6.2 系统的稳定性和可靠性.....	47
2.6.3 多机器人协同作业的协调与管理.....	47
2.6.4 材料选择与轻量化设计.....	48

2.7 小结.....	49
第三章 索驱动机器人专利态势分析.....	50
3.1 全球专利态势分析.....	50
3.1.1 专利申请趋势.....	50
3.1.2 技术发展历程.....	51
3.1.3 专利布局分析.....	54
3.1.4 重要创新主体.....	55
3.2 中国专利整体态势.....	58
3.2.1 专利申请趋势.....	58
3.2.2 技术发展历程.....	59
3.2.3 专利布局分析.....	60
3.2.4 申请人分析.....	62
3.2.5 专利技术分析.....	68
3.2.6 主要技术人才分析.....	72
3.2.7 专利运营情况.....	77
3.3 小结.....	79
第四章 索驱动机器人技术热点分析.....	81
4.1 驱动系统技术热点.....	81
4.1.1 高精度索驱动系统.....	82
4.1.2 柔性索驱动系统.....	84
4.2 控制系统技术热点.....	86
4.2.1 智能控制系统.....	86

4.2.2 多自由度运动平台.....	89
4.3 机械结构技术热点.....	90
4.4 材料轻量化设计技术热点.....	93
4.5 应用领域技术.....	94
4.5.1 航天领域.....	94
4.5.2 医疗领域.....	95
4.5.3 工业领域.....	96
4.6 核心及热点专利.....	97
4.6.1 核心及热点专利列表.....	97
4.6.2 核心及热点专利分析.....	104
4.6 小结.....	109
第五章 山东亿九电气发展有限公司专利分析.....	111
5.1 公司基本情况.....	111
5.2 专利数量与时间分布.....	112
5.3 专利类型分布.....	112
5.4 专利技术领域分布.....	113
5.5 专利技术分析.....	114
5.5.1 专利列表.....	114
5.5.2 核心专利分析.....	115
5.5.3 专利技术特点.....	117
5.6 小结.....	119
第六章 合作伙伴及竞争对手分析.....	120

6.1 清华大学.....	120
6.1.1 合作伙伴简介.....	120
6.1.2 主要技术创新.....	121
6.1.3 核心专利分析.....	122
6.2 哈尔滨工业大学.....	124
6.2.1 合作伙伴简介.....	124
6.2.2 主要技术创新.....	124
6.2.3 核心专利分析.....	126
6.3 天津航天机电设备研究所.....	127
6.3.1 合作伙伴简介.....	127
6.3.2 主要技术创新.....	128
6.3.3 核心专利分析.....	129
6.4 北京卫星环境工程研究所.....	130
6.4.1 合作伙伴简介.....	130
6.4.2 主要技术创新.....	131
6.4.3 核心专利分析.....	133
6.5 中国科学院沈阳自动化研究所.....	134
6.5.1 合作伙伴简介.....	134
6.5.2 主要技术创新.....	134
6.5.3 核心专利分析.....	135
6.6 北京戴纳实验科技股份有限公司.....	136
6.6.1 竞争对手简介.....	136

6.6.2 主要技术创新.....	136
6.6.3 核心专利分析.....	138
6.7 北京吾天科技有限公司.....	139
6.7.1 竞争对手简介.....	139
6.7.2 主要技术创新.....	140
6.7.3 核心专利分析.....	141
6.8 小结.....	142
第七章山东亿九电气发展有限公司创新发展策略建议.....	144
7.1 加强技术研发与创新.....	144
7.1.1 加大研发投入.....	144
7.1.2. 培养专业人才.....	151
7.1.2. 开展产学研合作.....	152
7.2 拟解决关键问题的建议.....	154
7.2.1 精确控制问题.....	154
7.2.2 系统可靠性.....	159
7.2.3 动力学建模与仿真.....	162
7.2.4 环境适应性.....	166
7.2.5 技术创新与突破.....	171
7.3 拓展市场应用领域.....	174
7.3.1 开拓新市场.....	174
7.3.2 加强市场调研.....	176
7.3.3 建立品牌形象.....	178

7.4 知识产权发展建议.....	179
7.4.1 知识产权战略规划.....	179
7.4.2 知识产权管理体系建设.....	180
7.4.3 知识产权运营与管理.....	180
7.5 总结.....	181
第八章总结.....	183
8.1 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术概述.....	183
8.2 山东亿九电气发展有限公司技术创新与专利布局.....	184
8.3 技术研发面临的挑战与解决思路.....	184
8.4 创新发展策略建议.....	185
附件一 图目录.....	187
附件二 表目录.....	189

专利导航项目组主要成员名单及责任分工：

李兴国，现任济宁市市场监督管理局知识产权保护科副科长，主持了专利导航、专利培训、业务指导工作。筹备建立专利导航项目组，并组织了相关培训工作、专利导航政策解读、项目验收，具有丰富的知识产权相关事项经验。

王洪静，现任济宁市市场监督管理局知识产权保护科副科长，协助主持了专利导航、专利培训、业务指导工作。协助筹备建立专利导航项目组，并组织了相关培训工作、专利导航政策解读、项目验收，具有丰富的知识产权相关事项经验。

宋海波，现任邹城市知识产权服务中心知识产权发展和维权援助部部长，协助主持了专利导航、专利培训、业务指导工作。协助筹备建立专利导航项目组，并组织了相关培训工作、专利导航政策解读、项目验收，具有丰富的知识产权相关事项经验。

王长伟，山东亿九电气发展有限公司经理，负责项目的执行和管理工作。他在项目管理、团队协作、客户服务等方面具有丰富的经验。他能够为客户提供专业的知识产权信息服务，包括专利检索、侵权调查、知识产权保护等方面的服务。

李淑花，济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）总经理，负责项目具体实施和验收工作，从事知识产权代理服务5多年，获得专利代理师资格证，参与专利导航多项、积累了丰富的经验和知识，具有较强的服务意识和团队协作能力，能够为客户提供高质量的服务。

李建雪，济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）技术经理，

曾参与过多个知识产权信息公共服务项目的开展和实施。他了解知识产权信息公共服务的重要性，能够为项目提供专业的技术支持和服务。他曾参与过知识产权信息公共服务平台的建设和维护工作，负责平台的技术支持和客户服务工作。他能够根据客户需求提供定制化的服务，帮助客户解决知识产权信息服务方面的问题。

窦振康，济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）技术专家，获得专利代理师资格证，对知识产权法律法规、专利检索、侵权调查等方面有着深入的了解和熟练的操作技巧。在客户服务方面，他非常注重客户需求，能够细致入微地了解客户的具体需求，并为他们提供定制化的服务。他还积极参加各种行业活动，不断学习和更新自己的知识，以保持对知识产权信息服务领域的敏锐度和专业度。深知知识产权信息服务对于企业的重要性，因此始终以高度的责任感和敬业精神为客户提供优质的服务，他的专业知识和服务态度得到了众多客户的认可和信赖。

张烨，济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）特聘专家，博士专家，一直致力于为客户提供高质量的知识产权信息服务。熟练掌握知识产权法律法规、专利检索、侵权调查等方面的知识，并且能够将这些知识应用于实际工作中。他注重客户的需求，能够快速了解客户的具体需求，并为客户提供个性化的服务。指导专业组对调研和评估工作的全面性和专业性进行把关，提出合理方案。为项目提供专业的技术支持。

桂进，济宁仁礼信知识产权代理事务所（普通合伙）专利情报分

析人员，获得专利代理师资格证，具有较强的学习能力和创新能力，能够不断更新自己的知识和技能，熟练掌握了知识产权法律法规、专利检索、侵权调查等方面的知识，能够为客户提供专业的知识产权信息服务。他还积极参加各种行业活动和培训，不断提升自己的专业水平和服务能力。他的专业知识和服务态度得到了众多客户的认可和信赖，他的经验和能力可以为客户提供有力的支持，帮助客户在知识产权领域取得更好的成果。

第一章引言

1.1 研究背景

随着太空探索的不断深入，人类对太空环境中的作业需求日益增加。在太空环境中，微重力或零重力条件对机器人的操作和控制提出了新的挑战。模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人作为一种重要的地面模拟工具，为太空机器人技术的研究和开发提供了关键支持。

近年来，索驱动机器人技术在模拟零重力和低重力环境方面取得了显著进展。通过高精度传感器和先进的控制系统，索驱动机器人能够实时监测和调整绳索的张力，从而精确控制模拟负载平台的运动和姿态。这种技术不仅在太空探索中具有重要应用，还在医疗、材料科学和工业制造等领域展现出广阔的应用前景。

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的研究不仅有助于推动太空机器人技术的发展，还为相关领域的科学研究和技术开发提供了重要的实验平台。通过深入研究索驱动机器人的动力学特性和控制策略，可以进一步提高其性能和可靠性，为未来的太空探索和应用奠定坚实的基础。

1.2 研究目的

山东亿九电气发展有限公司创建于 2009 年，是一家专业从事航天领域设备、智能配用电设备和模块化箱式变电站研发、生产与销售的高新技术企业；目前，公司年产值近 10 亿元，且逐年上升，国内市场占有率达 30%以上。公司荣获国家高新技术企业、山东省专精特新中小企业、山东省企业技术中心、山东省知名品牌（产品）、山东

省优质品牌产品等荣誉称号；现已是清华大学产学研基地，并与中国电力科学院、北京工业大学合作研发国际先进水平的索驱动机器人产品。

本项目的实施通过引入索驱动机器人装置的专利技术，可以有效促进当地机器人产业的发展，形成以高新技术为核心的产业群，提升区域经济的竞争力将吸引更多的技术人才和资金投入到航天机器人领域，促进济宁市航天领域机器人产业的集聚和升级，开发更多的专利产品，促进区域性核心专利的井喷式发展。

1.2.1 项目需求

①**技术趋势洞察**：了解和掌握模拟零重力及低重力环境下索驱动机器人技术的最新发展动态、国际领先水平和发展趋势。

②**知识产权保护**：确保自主研发的技术成果得到有效的知识产权保护，避免侵权行为，并最大化专利资产价值。

③**市场竞争情报**：分析竞争对手的专利布局情况，预测市场准入门槛和潜在的法律风险。

④**技术研发指引**：通过专利导航发现技术空白点和突破方向，为技术研发指明道路，减少重复投入。

⑤**专利策略制定与风险规避**：为企业提供专利布局建议，帮助企业保护其技术创新，规避新产品侵权风险。

1.2.2 主要研究内容

①**专利信息收集**：系统搜集国内外有关模拟零重力及低重力环境索驱动机器人的所有专利文献，建立专利数据库。

②**专利态势分析**：对专利数量、类型、地域分布、申请人构成等进行统计分析，描绘技术发展趋势图谱。

③**关键技术解析**：深入解读关键专利技术特征，识别核心技术、重要组件和控制方法，剖析技术链路。

④**专利质量评价**：对专利的新颖性、创造性和实用性进行评估，发掘高质量核心专利和高价值技术。

⑤**知识产权风险评估**：分析潜在的侵权风险、无效风险和诉讼风险，并制定相应的规避和应对策略。

⑥**专利布局策略**：根据行业现状和未来发展，结合自身技术优势，设计合理、前瞻性的专利布局方案。

1.2.3 拟解决关键问题

①**精确控制问题**：在零重力或低重力环境下提高机器人的操控精度和稳定性。

②**系统可靠性**：确保长时间操作中系统的可靠性和安全性。

③**动力学建模与仿真**：建立准确的动力学模型，进行有效的运动预测和控制。

④**环境适应性**：使机器人能够适应不同的微重力环境和任务需求。

⑤**技术创新与突破**：在机械设计、控制算法和材料应用等方面寻求技术突破。

⑥**知识产权战略**：构建有效的专利保护网，避免侵权风险，增强市场竞争力。

通过该专利导航项目，通过专利导航项目，济宁市相关企业、科

研机构已经制定并实施了精准的专利布局计划，围绕索驱动机器人源的关键技术进行专利申请，形成了涵盖机械设计、算法控制、材料应用等方面的专利集群，提高了整体技术的自主知识产权保护力度，促进企业在索驱动机器人源领域的专利申请和布局，增强企业自主创新能力。

1.3 研究内容

1.3.1 研究思路

本项目是以专利信息为基础，结合产业信息及政策信息，梳理模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的发展方向和发展现状，从技术角度分析产业发展的整体态势和面临的问题，重点对山东亿九电气发展有限公司专利分析及模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利核心技术分析，通过竞争对手分析和核心专利分析等，为亿九电气的创展发展提供建议，帮助企业清晰研发方向，提高专利挖掘和布局能力，形成高价值专利组合，并通过提供具体策略助力企业专利能力提升，通过专利实现对技术、产品以及市场份额的控制，增强企业的市场竞争力，并制定切合本地索驱动机器人产业发展的最佳方案。

1.3.2 术语说明

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航的专业术语较多，本报告列举核心且常用的专业术语，如等进行解释。

表 1 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航专业术语说明

专业术语	术语说明
机器人	机器人是一种能够自动执行任务的机器装置，它融合了机械工程、电子工程、计算机科学等多个学科领域的技术。机器人通常具有一定的自主性，能够通过传感器感知环境信息，经过内

专业术语	术语说明
	部控制系统处理后，驱动机械结构完成各种任务。
索驱动	索驱动机器人是一种利用绳索来传递动力和运动的机器人。它通过多根绳索连接机器人的负载平台和固定基座，利用绳索的张力来控制机器人的运动和姿态。索驱动机器人具有高灵活性、长行程和高精度控制的特点，能够在复杂的环境中进行操作。
零重力及低重力	零重力是指物体处于失重状态，即物体所受的重力加速度为零。在太空环境中，当物体处于自由落体状态时，就会出现零重力现象。低重力则是指物体所受的重力加速度远小于地球表面的重力加速度（约 9.8m/s^2 ），但不为零。
机器人控制	机器人控制是机器人技术的核心环节，涉及对机器人运动和行为的精确管理和调节。控制系统通过接收来自传感器的各种信息，如位置、速度、力等，经过处理和分析后，生成控制指令驱动机器人的执行器进行相应的动作。
动力学建模与仿真	主要涉及机器人的运动学和动力学特性。通过建立机器人的动力学模型，可以模拟其在不同工况下的行为，从而进行性能评估和优化。

1.3.3 技术分解

基础框架是整个机器人的支撑结构，为绳索驱动单元、导向装置和控制系统等提供安装和固定点。它需要具备足够的强度和刚度，以确保机器人在运行过程中的稳定性和安全性。**基础框架的设计要考虑机器人的工作空间、负载能力和运动精度等因素，通常采用高强度的金属材料或复合材料制造。**

绳索是索驱动机器人中传递动力和运动的关键部件。它通常由高强度、低伸长率的材料制成，如钢丝绳或高性能合成纤维绳。**绳索的一端连接到驱动单元，另一端连接到模拟负载平台。通过改变绳索的长度和张力，可以控制模拟负载平台的运动和姿态。绳索的数量和布**

置方式会影响机器人的运动自由度和精度，常见的有九索冗余驱动方案等。

绳索驱动单元负责驱动绳索的收放，从而控制模拟负载平台的运动。它通常由电机、减速器、制动器和传动机构等组成。**电机提供动力，减速器降低转速并增加扭矩，制动器用于精确控制电机的停止和启动，传动机构将电机的旋转运动转换为绳索的直线运动。**驱动单元的性能直接影响机器人的运动精度和速度，需要具备高精度、高响应速度和高可靠性。

绳索导向装置用于引导绳索的运动方向，确保绳索在运动过程中不会发生缠绕、干涉或偏离预定轨迹。它通常由滑轮、导轨、轴承等组成。**滑轮可以减少绳索与导向装置之间的摩擦，导轨用于限制绳索的运动方向，轴承提供支撑和旋转功能。**导向装置的设计要考虑到绳索的运动速度、负载能力和工作环境等因素，以确保其稳定性和耐用性。

模拟负载平台是用于承载被测试物体或设备的平台。它需要具备足够的强度和刚度，以承受被测试物体的重量和惯性力。平台的设计要根据被测试物体的形状、尺寸和质量等因素进行优化，以确保其在模拟零重力和低重力环境下的稳定性和可靠性。模拟负载平台通常配备有各种传感器和测量设备，用于实时监测其运动状态和受力情况。

传感器用于实时监测机器人的运动状态、受力情况和环境信息等。常见的传感器包括**位置传感器、速度传感器、力传感器、加速度传感器**等。控制系统根据传感器反馈的数据，通过控制算法对驱动单元进

行调节，以实现模拟负载平台的精确控制。控制系统通常由计算机、控制器、驱动器和软件等组成，需要具备高精度、高响应速度和高可靠性。

1.3.4 专利检索

本报告采用的专利数据文献主要来自星河智源的专利数据库，星河智源数据库通过精心打造和优化，能够助力企业加速研发进程、精准商业决策、有效规避专利侵权风险。我们结合先进的 AI 技术构建了高质量数据底座，平台拥有 1.9 亿+全球专利数据，1.5 亿+期刊和商标数据，覆盖全球 172 国家和地区，360° 全字段覆盖，数据全面、准确、及时，与权威官方机构保持同步更新，以此为基础，对其进行多维度深加工，形成不同的数据模型。

基于具体项目需求，结合前期技术研究，针对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航技术开展专利分析，通过对专利信息的深度挖掘，分别从宏观态势和重点企业两个维度进行研究。

宏观态势维度，从专利申请态势、申请人分布等解读技术发展现状、产业格局，并针对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航技术进行深度解读，梳理专利技术路线图，分析产业未来发展方向。

重点企业维度，针对重点企业从企业专利布局、技术路线、合作研发、研发团队等维度进行对标分析，分析企业技术发展现状，研判企业产业定位。

进行检索时，采用“精准检索”的方法进行检索，项目组根据模

拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的技术分支进行分类检索，然后进行汇总分析。除了应用分类号之外，还增加了中英文的关键词，以优化检索结果的准确性。因此采用了先检索分数据，后通过合并数据得到储能产业的总数据。

每次进行检索之后，都对数据进行抽样人工查阅、筛选，确定准确检索要素和主要噪音源，并将相应文献的关键词和分类号进行提炼，同时基于检索过程，对检索策略进行反复调整、反馈，最终确定全面完善的检测策略。全面检索时将充分、精确扩展关键词和分类号，采用合理的检索要素搭配，利用检索工具的截词符、同在运算符和逻辑算符，并将不同数据库的检索数据进行转库，合并得到相对全面、准确的检索数据。

具体检索步骤如下：

第一步：技术主题分析；报告进行之初，项目组先对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航进行了全面了解，提炼基本技术要素，并针对检索要素确定分类号、关键词、主要申请人等信息。

第二步：确定主题词，进行初步检索；根据初步确定的检索要素和分类号关键词，在数据库进行初步检索，人工抽验结果后，扩展、提炼准确的检索分类号和关键词。

第三步：再次检索，确认并进行初步查全查准；利用上一步骤确定的分类号和关键词再次构建检索式进行检索，人工抽验后，确认检索策略是否出现偏差，选择个别申请人进行检索，发现缺漏的分类号和关键词后，重新构建检索式。

第四步：构建检索式，进行检索；将修正后的检索式进行应用检索，获取结果后，进行查全查准验证。检验是否符合数据要求。

第五步：根据检索结果浏览文摘进行筛选和验证；构建去噪要素。人工抽样查验数据的准确性，通过分析这些文献及其提示的内容来验证初步选择的分类号及检索方式是否正确。此外，还可以根据专利文献的背景技术或著录项目重新获得新的检索信息，也可以再次删除不相关的专利文献。在文摘浏览的过程中也会发现检索式的制定是否合理，若分类号选择正确，检索式组配适当，就会得到较好的检索结果；如果不符合检索主题的专利多，则要重新研究修改检索式进行重新检索。

第六步：去噪后，再次查全查准，终止检索。利用二次筛选后获得的新信息再次进行查全查准。比如，通过背景技术中给出的参考文献或申请人等名字信息或者通过著录项目中的分类号、优先权及名字、国别等信息进行查全查准。数据合格后终止检索。

检索要素	检索式
索驱动机器人	(TAC:((零重力 OR 微重力 OR 低重力 OR 模拟零重力 OR zero-g OR Low Gravity OR microgravity OR Simulate zero gravity OR Simulate low gravity OR Simulated microgravity) AND (索驱动 OR 弹力绳 OR 橡胶绳 OR rope drive OR Cable driven OR rope OR cord) AND (机器人 OR 机器 OR 设备 OR 平台 OR 多自由度平台 OR 装置 OR 设施 OR robot OR golem OR Multi degree of freedom platform OR platform OR facilities OR Installation OR device OR equipment OR facility OR prepare OR device OR equipment facility prepare set up try implement OR set up defenses)) AND IPC:(B64G7)) AND FILTER=(IPC:("B64G7/00"))

1.3.5 重点专利筛选规则

在对重点企业进行专利分析时，会选取重点专利进行深度解读。其中，重点专利的筛选从企业技术研发和专利价值两个维度进行综合考量。

(1) 企业技术研发维度，即企业重点研发方向以及所取得的关键技术突破为重点专利选取需特别考量的因素。

(2) 专利价值维度，即基于专利的技术属性、法律属性以及经济属性进行综合考量。技术维度方面，主要考量指标包括被引证数、同族数、权利要求数说明书页数。法律维度的评价指标包括有无复审、无效。经济维度的评价指标包括是否经过许可、转让、质押。

1.4 相关事项约定

1.4.1 同族专利

同一项发明创造在多个国家申请专利而产生的一组内容相同或基本相同的文件，称为一个专利族，从技术角度来看，属于同一专利族的多个专利申请可现为同一项技术。本报告中，针对技术分析时对同族专利进行了合并统计，针对国家或地区分布进行分析时各件专利进行了单独统计。

1.4.2 近期部分数据不完整说明

在本次所采集的数据中，由于下列多种原因导致了 2022 年及其之后提出的专利申请的统计数量是不完全的。如 PCT 专利申请可能自申请日起 30 个月甚至更长时间之后才进入国家阶段，从而导致与之相对应的国家公布时间更晚；发明专利申请通常自申请日（有优先权的，自优先权日）起 18 个月（要求提前公布的申请除外）才能被公布；

以及实用新型专利申请在授权后才能获得公布,其公布日的滞后程度取决于审查周期的长短等。

1.4.3 专利“项”数与“件”数

项:在进行专利申请数量统计时,对于数据库中以一族(这里的“族”指的是同族专利中的“族”)数据的形式出现的一系列专利文献,计算为1“项”。以“项”为单位进行的统计主要出现在外文数据的统计中。一般情况下,专利申请的项数对应于技术的数目。

1.4.4 相关术语

以下对本报告中出现的术语进行解释。

有效:在本报告检索截止日为止,专利权处于有效状态的专利申请。

无效:在本报告检索截止日为止,已经丧失专利权的专利或自始至终未获得授权的专利申请,包括专利申请被视为撤回或撤回、专利申请被驳回、专利权被无效、放弃专利权、专利权因费用终止、专利权届满等。

技术产出日期:依照申请的最早优先权日确定每年申请量,无优先权的以申请日为准。

申请人:通过对专利申请人的统计分析,获得主要创新主体。
新进入者:新进入者较为集中的技术方向通常是领域中技术发展的热点方向之一,对相关的新进入者的实体关系进行分析,明晰其控制权的权属关系,从而获得相关的技术热点方向:

专利引证:具有较高价值度的专利技术通常会被更多地作为在后

专利技术的引用参考,因此专利的被引次数能够一定程度反映专利的质量和影响力。

专利转让/许可:专利的转让和许可可能一定程度反映专利技术运营转化的流动性,也一定程度反映专利技术的产业价值、技术价值和经济价值。

核心专利:核心专利的确定应当综合考量其技术价值、经济价值及法律价值等。在本报告中,列示的核心专利或为高价值专利或风险较低专利。

WIPO:世界知识产权组织简称“WIPO”,该组织是联合国保护知识产权的一个专门机构,根据《成立世界知识产权组织公约》而设立。

WO:代表世界知识产权组织 WIPO 表示该专利经 PCT 条约,由 WIPO 进行登记,然后分别进入多个国家进行具体申请的专利,这些专利在 WIPO 中进行公开,因此公开号中以“WO”进行标识。公开号为“WO”的专利,仅能表明这些专利预期通过 PCT 途径,在全球获取统一认可的申请日并不能表明这些专利就一定是在“国际”或者“全球”进行了布局;具体情况仍需进一步跟踪这部分专利在各国的申请趋势才能明确这类专利是否具有海外布局的情况。

PCT:专利合作条(PatentCooperationTreaty),简称 PCT,从名称上可以看出,专利合作条约是专利领域的一项国际合作条约。自采用巴黎公约以来,它被认为是该领域进行国际合作最具有意义的进步标志。但是,它主要涉及专利申请的提交,检索及审查以及其中包括的技术信息的传播的合作性和合理性的一个条约。PCT 不对“国际专利

授权”：授予专利的任务和责任仍然只能由寻求专利保护的各个国家的专利局或行使其职权的机构掌握（指定局）。参加该条约的国家（下称各缔约国）组成联盟，对保护发明的申请的提出、检索和审查进行合作，并提供特殊的技术服务。本联盟称为国际专利合作联盟。

EPO：欧洲专利局（EPO）是根据欧洲专利公约，于 1977 年 10 月 7 日正式成立的一个政府间组织。其主要职能是负责欧洲地区的专利审批工作。欧专局有 38 个成员国，覆盖了整个欧盟地区及欧盟以外的 10 个国家，早期 19 个国家为：奥地利、比利时、丹麦、法国、德国、希腊、爱尔兰、意大利、列支敦士登、卢森堡、摩纳哥、荷兰、葡萄牙、瑞典、瑞士、西班牙、英国、塞浦路斯、芬兰。依照欧洲专利公约的规定，一项欧洲专利申请，可以指定多国获得保护。一项欧洲专利可以在任何一个或所有成员国中享有国家专利的同等效力。

EP：是直接向欧专局递交的欧洲专利申请。

第二章 索驱动机器人产业发展现状

本章将全面深入地探讨了模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的发展现状，涵盖技术原理、应用优势、政策支持、技术进展以及面临的挑战等多个方面。

2.1.1 定义与原理

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人通过多根绳索连接基础框架和模拟负载平台，利用绳索的张力来抵消负载的重力，从而模拟零重力或低重力环境。其核心原理是通过精确控制绳索的长度和张力，实现对模拟负载平台的运动和姿态控制。

2.1.2 零重力或低重力模拟方法和设备

1. 抛物线飞行训练法

原理：抛物线飞行训练法是通过飞机进行抛物线飞行来模拟微重力环境。飞机在爬升到一定高度后，进行一段抛物线飞行轨迹，在这个过程中，飞机内部会短暂地出现微重力状态。这种微重力状态通常可以持续 20 到 30 秒左右，为参训人员提供了一个接近真实太空微重力环境的体验。

训练过程：在抛物线飞行训练中，参训人员通常会穿着专门的航天服，携带必要的生命支持设备和实验仪器。在飞机进入抛物线飞行阶段后，参训人员会在飞机内部进行各种操作训练，如设备操作、样本采集、实验操作等。同时，飞机内部还会配备专业的教练和医护人员，对参训人员进行指导和监护，确保训练的安全和有效进行。

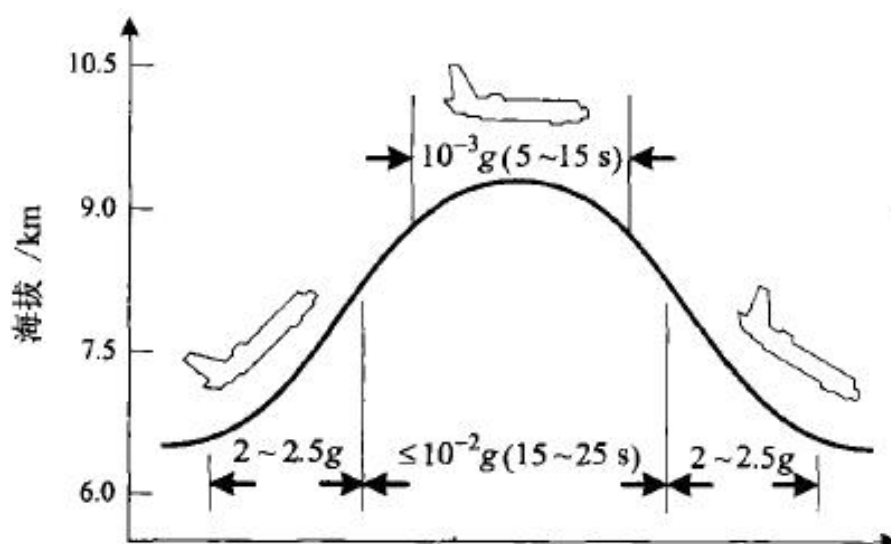


图 1 抛物线飞行训练法原理图

优势：抛物线飞行训练法能够提供真实的微重力环境体验，让受训人员在接近实际太空环境的条件下进行操作训练，有助于提高他们的适应能力和操作技能。此外，这种方法还可以用于进行一些科学实验和研究，为太空探索提供重要的数据支持。

局限性：然而，抛物线飞行训练法也存在一些局限性。首先，微重力状态的持续时间较短，通常只有 20 到 30 秒，这限制了受训人员进行复杂操作训练的时间。其次，抛物线飞行的加速度变化较大，可能会对受训人员的身体产生一定的不适感，如晕动症等。此外，抛物线飞行训练的成本较高，需要专业的飞机和设备，以及专业的飞行人员和教练团队，这使得这种方法的普及和应用受到一定的限制。

2. 浮力平衡法

原理：浮力平衡法是利用浮力原理来模拟微重力环境。通过将受训人员或设备置于液体或气体中，利用浮力来抵消重力的影响，从而实现微重力环境的模拟。这种方法通常需要使用大型的水池或气体浮力装置，以提供足够的浮力来抵消重力。

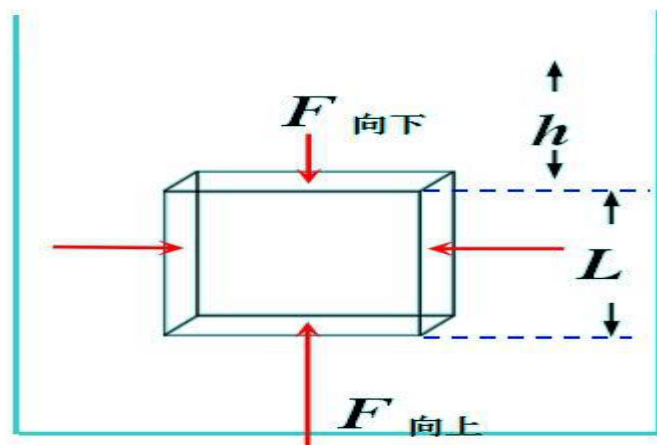


图 2 浮力平衡法基本原理

训练过程：在浮力平衡法训练中，参训人员通常会穿着专门的浮力服，携带必要的生命支持设备和实验仪器。他们会被放入大型的水池或气体浮力装置中，通过调整浮力服的浮力，使参训人员在液体或气体中处于悬浮状态，模拟微重力环境。在悬浮状态下，参训人员可以进行各种操作训练，如设备操作、样本采集、实验操作等。同时，水池或气体浮力装置中还会配备专业的教练和医护人员，对参训人员进行指导和监护，确保训练的安全和有效进行。

优势：浮力平衡法能够提供较长时间的微重力环境模拟，让参训人员有足够的时间进行各种操作训练。此外，这种方法还可以用于进行一些科学实验和研究，为太空探索提供重要的数据支持。与抛物线飞行训练法相比，浮力平衡法的成本相对较低，设备和设施相对简单，更容易普及和应用。

局限性：然而，浮力平衡法也存在一些局限性。首先，浮力平衡法只能模拟微重力环境，无法完全模拟太空中的其他环境因素，如辐射、真空等。其次，参训人员在液体或气体中进行操作训练时，会受到液体或气体阻力的影响，这与太空中的实际操作环境有所不同，可

能会对训练效果产生一定的影响。此外，浮力平衡法需要使用大型的水池或气体浮力装置，设备和设施的维护和管理成本较高，也需要专业的人员进行操作和维护。

3. 索驱动机器人装置

原理：索驱动机器人装置是通过绳索驱动来模拟微重力环境。这种装置通常由多个绳索和驱动单元组成，通过调整绳索的长度和张力，可以模拟出微重力环境下的运动和受力情况。

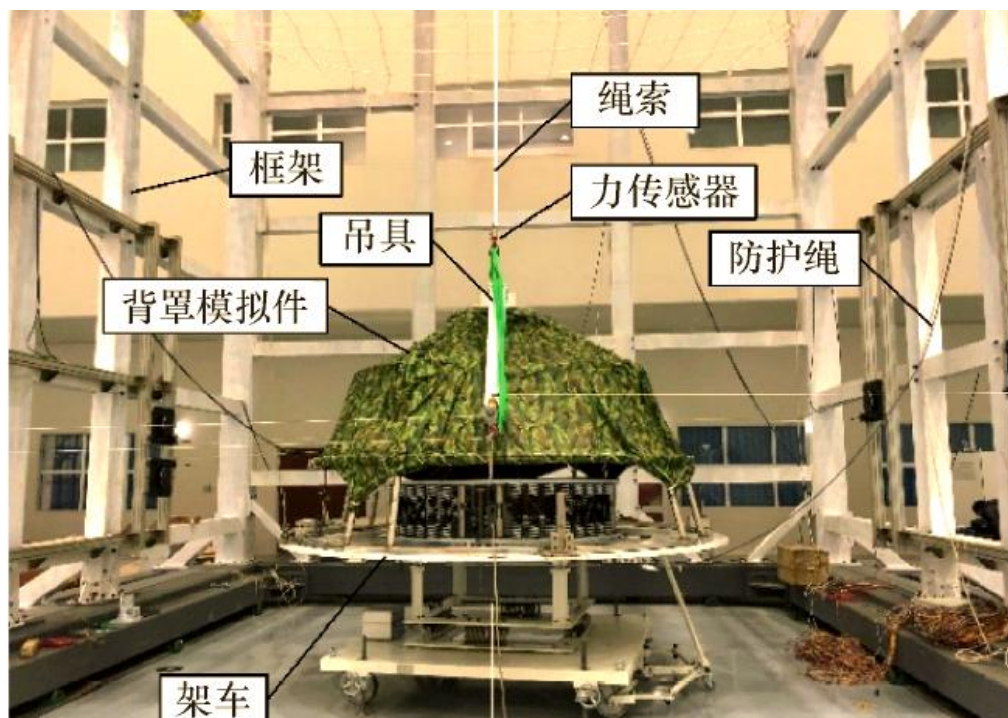


图 3 索驱动机器人模拟微重力环境示意图

训练过程：在索驱动机器人装置训练中，参训人员通常会站在装置的平台，通过调整绳索的长度和张力，使参训人员感受到微重力环境下的运动和受力情况。参训人员可以在平台上进行各种操作训练，如设备操作、样本采集、实验操作等。同时，装置还会配备专业的教练和医护人员，对参训人员进行指导和监护，确保训练的安全和有效进行。

优势：索驱动机器人装置能够提供较大的工作空间和较高的运动控制精度，可以模拟出微重力环境下的各种运动和受力情况。此外，这种方法还可以用于进行一些科学实验和研究，为太空探索提供重要的数据支持。与抛物线飞行训练法和浮力平衡法相比，索驱动机器人装置的成本相对较低，设备和设施相对简单，更容易普及和应用。

局限性：然而，索驱动机器人装置也存在一些局限性。首先，这种装置只能模拟微重力环境，无法完全模拟太空中的其他环境因素，如辐射、真空等。其次，参训人员在装置上进行操作训练时，会受到绳索驱动的限制，这与太空中的实际操作环境有所不同，可能会对训练效果产生一定的影响。此外，索驱动机器人装置需要专业的人员进行操作和维护，设备的维护和管理成本较高。

4. 虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术

原理：虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术是通过计算机生成的虚拟环境来模拟微重力环境。通过佩戴 VR 头盔或使用 AR 设备，参训人员可以进入一个虚拟的微重力环境，进行各种操作训练。



图 4 虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术原理图

训练过程：在 VR 与 AR 技术训练中，参训人员通常会佩戴 VR 头盔或使用 AR 设备，进入一个虚拟的微重力环境。在这个虚拟环境中，参训人员可以进行各种操作训练，如设备操作、样本采集、实验操作等。同时，虚拟环境还可以模拟出太空中的其他环境因素，如辐射、真空等，提供更加真实的训练体验。此外，虚拟环境还可以根据训练需求进行定制和调整，提供更加个性化的训练方案。

优势：VR 与 AR 技术能够提供高度沉浸式的训练体验，让参训人员在虚拟环境中感受到真实的微重力环境。此外，这种方法还可以模拟出太空中的其他环境因素，提供更加全面的训练内容。与传统的训练方法相比，VR 与 AR 技术的成本相对较低，设备和设施相对简单，更容易普及和应用。此外，VR 与 AR 技术还可以根据训练需求进行定制和调整，提供更加个性化的训练方案。

局限性：然而，VR 与 AR 技术也存在一些局限性。首先，虚拟环境的生成和渲染需要较高的计算能力，设备和系统的性能要求较高。其次，参训人员在虚拟环境中进行操作训练时，可能会受到虚拟环境的限制，这与太空中的实际操作环境有所不同，可能会对训练效果产生一定的影响。此外，VR 与 AR 技术需要专业的人员进行操作和维护，设备的维护和管理成本较高。

2.1.3 索驱动机器人的优势

轻量化：索驱动机器人采用柔性索作为驱动元件，代替了传统的刚性连杆和复杂的机械结构。这种设计显著降低了机器人的整体重量，使得机器人更加轻便灵活。例如，在一些需要高速运动的应用场景中，

较轻的重量可以减少惯性，提高机器人的加速度和响应速度。

结构简单：索驱动机器人的结构相对简单，主要由索、滑轮、驱动装置等组成。这种简化的结构不仅降低了制造成本，还减少了维护的复杂性。相比之下，非索驱动机器人通常具有更复杂的机械结构，如多关节机械臂、齿轮传动系统等，这些结构不仅增加了机器人的重量，还提高了制造和维护的难度。

大工作空间：索驱动机器人能够实现较大的工作空间。由于索的长度可以灵活调整，机器人可以在三维空间中进行大范围的运动。例如，在一些需要覆盖大面积的工作场景中，如物流仓库的货物搬运、大型建筑的施工等，索驱动机器人可以轻松地到达各个位置，提高工作效率。

可重构性强：索驱动机器人的工作空间可以通过调整索的长度和布局来重新配置。这种可重构性使得机器人能够适应不同的工作需求 and 环境变化。例如，在一些需要频繁改变工作布局的生产线上，索驱动机器人可以快速调整工作空间，满足新的生产任务。

高速运动：索驱动机器人具有较高的运动速度。由于索的拉力可以快速传递，机器人可以在短时间内实现快速运动。例如，在一些需要高速分拣和搬运的工业应用中，索驱动机器人可以显著提高生产效率。

高精度：索驱动机器人可以通过精确控制索的长度和张力来实现高精度的运动控制。例如，在一些需要高精度定位的应用场景中，如医疗手术、精密装配等，索驱动机器人可以实现毫米级甚至更高的定

位精度。

高负载自重比：索驱动机器人具有较高的负载自重比。由于机器人的重量较轻，而索的拉力可以有效地传递和分散负载，使得机器人能够在较轻的自重下承载较大的负载。例如，在一些需要搬运重物的应用场景中，索驱动机器人可以轻松地完成任

负载适应性强：索驱动机器人对负载的变化具有较强的适应性。通过调整索的张力和长度，机器人可以适应不同重量和形状的负载。例如，在一些需要处理多种类型货物的物流应用中，索驱动机器人可以灵活地调整负载能力，满足不同的搬运需求。

制造成本低：索驱动机器人的制造成本相对较低。由于其结构简单，主要由索、滑轮、驱动装置等组成，这些部件的制造和加工相对容易，成本较低。相比之下，非索驱动机器人通常需要复杂的机械加工和高精度的零部件，制造成本较高。

维护简单：索驱动机器人的维护相对简单。由于其结构简单，没有复杂的机械传动系统，维护时只需要检查和更换索、滑轮等部件即可。相比之下，非索驱动机器人需要定期检查和维护复杂的机械结构和传动系统，维护成本较高。

适应复杂环境：索驱动机器人具有较强的适应性，可以在复杂的环境中工作。例如，在一些需要在狭小空间或不规则地形中工作的应用场景中，索驱动机器人可以通过调整索的长度和布局，灵活地适应环境变化。

应用场景灵活多变：索驱动机器人的应用场景非常广泛，可以应用于工业生产、物流搬运、医疗手术、太空探索等多个领域。例如，在医疗手术中，索驱动机器人可以实现

高精度的手术操作；在太空探索中，索驱动机器人可以用于太空望远镜的调整和维护。

2.1.4 索驱动机器人的应用

索驱动机器人在航天领域的应用非常广泛，可以为**航天飞行器的设计、测试、航天员训练、空间对接实验、火箭发射模拟以及太空实验与研究**等提供重要的支持和保障。

1. 航天飞行器设计与测试

零重力环境模拟：航天飞行器在太空中处于零重力环境，该装置可以通过模拟零重力环境，帮助工程师在地面上测试飞行器的设计和性能。例如，可以模拟飞行器在零重力下的运动状态，测试其姿态控制系统、推进系统等关键部件的性能。**低重力环境模拟：**对于在月球或其他低重力环境下的任务，该装置可以模拟 $1/6$ 重力等低重力环境，帮助测试飞行器在这些环境下的运动和受力情况，确保其在实际任务中的可靠性和安全性。

2. 航天员训练

失重训练：航天员在太空中会经历长时间的失重状态，该装置可以模拟零重力环境，帮助航天员适应失重条件下的工作和生活。例如，可以模拟航天员在太空中进行舱外活动（EVA）时的运动和操作，提高其在实际任务中的操作技能和应对能力。**低重力训练：**对于在月球或其他低重力环境下的任务，该装置可以模拟低重力环境，帮助航天员适应这些环境下的运动和操作。例如，可以模拟航天员在月球表面进行行走和操作时的受力和运动情况，提高其在实际任务中的适应性

和安全性。

3. 空间对接实验

零重力对接模拟：空间对接是航天任务中的关键环节，该装置可以模拟零重力环境下的空间对接过程。通过模拟两个航天器在零重力环境下的相对运动和受力情况，可以帮助工程师测试和优化对接机构的设计和控制算法，提高对接的成功率和可靠性。**低重力对接模拟：**对于在低重力环境下的空间对接任务，该装置可以模拟低重力环境，帮助测试对接过程中的受力和运动情况。例如，可以模拟在月球轨道上进行的空间对接任务，确保对接过程的顺利进行。

4. 火箭发射模拟

低重力发射模拟：对于在月球或其他低重力环境下的火箭发射任务，该装置可以模拟低重力环境下的火箭发射过程。通过模拟火箭在低重力环境下的运动和受力情况，可以帮助工程师测试和优化火箭的设计和控制算法，提高发射的成功率和可靠性。**羽流扰动模拟：**火箭发射过程中会产生羽流扰动，该装置可以通过叠加干扰力模拟羽流扰动对火箭的影响。通过模拟羽流扰动对火箭的受力和运动的影响，可以帮助工程师更好地理解 and 应对这些扰动，提高火箭的稳定性和可靠性。

5. 太空实验与研究

太空环境模拟：该装置可以模拟太空中的零重力或低重力环境，为科学家提供一个地面实验平台，进行各种太空环境下的实验和研究。例如，可以模拟太空中的微重力环境，研究微重力对生物、材料等的

影响，为太空探索和科学研究提供支持。干扰力研究：通过叠加干扰力，该装置可以模拟太空中的各种干扰力，如太阳风、微流星体撞击等。通过研究这些干扰力对航天器的影响，可以帮助科学家更好地理解太空环境，为航天器的设计和防护提供依据。

2.2 政策情况

2.2.1 国家层面政策

国家政策持续发力，促进微重力模拟技术高速发展。政策明确研究重点：政策文件中对微重力科学不同分支领域的强调，如微重力流体物理、燃烧科学、空间材料科学、空间生命科学等，为科研机构 and 人员指明了具体的研究方向，使他们能够有针对性地开展研究，避免研究的盲目性和分散性，集中力量攻克关键科学问题。促进学科交叉融合：微重力空间模拟涉及多学科领域的知识和技术，政策的推动促使不同学科之间的交流与合作更加紧密，形成了跨学科的研究团队和合作机制，有利于打破学科壁垒，激发创新思维，推动微重力科学研究向纵深发展。

发布时间	发布单位	政策名称	主要内容
2020 年	国务院	《国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知》	通知中提出要在 2030 年使我国人工智能理论、技术与应用总体达到世界领先水平，成为世界主要的人工智能创新中心。这为微重力模拟环境相关的智能控制与自主决策技术研发等提供了宏观政策支持，促使科研人员利用人工智能技术提升微重力模拟实验的精度和效率，推动微重力环境下机器人遥科学等领域的研究。
2021 年	国家航天局	《中国载人空间站科学与应用发展规划（2021—2030 年）》	该规划指出要加强微重力科学等领域的研究，利用中国空间站的建设契机，开展微重力流体物理、燃烧科学等实验，为微重力模拟环境下的科学研究提供了明确的方向和目

			标，促进相关地面模拟设备和技术的发展。
2021 年	国家航天局	《中国航天科技创新体系建设“十四五”发展规划（2021 年）》	规划强调要加强航天科技的基础研究和前沿技术创新，提升航天科技创新能力，为包括微重力模拟环境技术在内的航天相关技术研发提供了政策支持和引导，鼓励科研机构和企业加大在该领域的投入和创新。
2024 年	中国科学院、国家航天局、中国载人航天工程办公室	《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050 年）》	规划中提到微重力科学是空间科学的重要发展方向之一，聚焦微重力多过程耦合新体系下复杂流体物理基础理论等问题，明确了微重力科学研究的目标和任务，进一步推动了微重力模拟环境相关技术的发展和设施建设。

2.2.5 地方政策支持

山东省作为我国重要的工业基地之一，在航空航天和机器人领域也有一定的发展基础。山东省政府出台了一系列支持航空航天和机器人产业发展的政策措施，如《山东省高端装备制造业发展规划（2018-2025 年）》等，将航空航天装备、机器人等列为高端装备制造业的重点发展领域。山东省人民政府办公厅印发《山东省航空航天产业规划》，明确提出建设国家级微重力时间、水平、载荷等技术实验平台，推动微重力模拟技术在航空航天领域的应用和发展。山东省科学技术厅等 18 部门印发《山东省人工智能产业科技创新行动计划（2025 - 2027 年）》，实施企业主体“培优育强”创新行动，加强人工智能企业梯度培育，建立人工智能“硬科技”企业库，对首次认定的高新技术企业等按政策给予激励，涉及智能制造、智慧政务、智慧家庭、智慧海洋等领域。

这些政策措施为模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术在山东省的发展提供了良好的政策环境。

2.3 技术原理

2.3.1 索驱动原理

索驱动原理的核心在于绳索的张力控制。通过精确控制每个绳索的张力，可以实现机器人在空间中的精确运动和姿态调整。这种控制方式需要高精度的传感器和先进的控制算法来确保系统的稳定性和准确性。例如，在水下近端索驱动机器人中，通过螺旋桨提供的推进力实现绳索张紧，推进力的大小和方向可以通过螺旋桨的转速和变向机构进行调节。这种设计显著增大了机器人的工作空间，解决了现有水下多自由度机器人作业空间不足的问题。

2.3.2 控制系统

索驱动机器人的控制系统是实现机器人精确运动和姿态控制的关键。控制系统通常由以下几个部分组成：

传感器系统：用于实时监测机器人的状态，包括位置、速度、加速度、姿态等。常见的传感器有编码器、陀螺仪、加速度计和力传感器等。

控制器：负责处理传感器数据，并根据预设的控制算法生成控制信号。控制器可以是基于 PID 控制、模糊控制、神经网络控制等先进控制策略。

驱动器：将控制器生成的控制信号转换为实际的驱动信号，驱动绳索的收放。驱动器通常包括电机、减速器和制动器等。

通信系统：用于实现控制器与传感器、驱动器之间的数据传输和通信。通信系统需要具备高可靠性和实时性，以确保控制信号的及时传递。

2.3.3 动力学建模与仿真

动力学建模与仿真是索驱动机器人研究的重要环节。通过建立机器人的动力学模型，可以分析机器人的运动特性和力学行为，为控制系统的设计和优化提供理论依据。动力学建模通常包括以下几个步骤：

建立运动学模型：描述机器人各部分之间的几何关系和运动关系。运动学模型通常包括正运动学模型和逆运动学模型。

建立动力学模型：描述机器人在运动过程中的力和力矩关系。动力学模型通常基于牛顿欧拉方程或拉格朗日方程建立。

参数辨识：通过实验数据或仿真数据，辨识动力学模型中的未知参数，提高模型的准确性。

仿真验证：利用仿真软件对动力学模型进行验证和优化。仿真软件可以模拟机器人的实际运动过程，评估控制策略的效果。

2.4 技术进展

2.4.1 国内技术进展

动力学建模与自标定策略：清华大学唐晓强教授团队建立了近端索驱动机器人的运动学和动力学模型，分析了其动力学特性，还提出一种不依赖外部测量的自标定方法，通过 IMU 位姿估计获取标定过程的动平台位姿，并利用零速度更新和零位置更新策略减小 IMU 传感器的积分漂移。

控制目的	文献	控制方法	自由度	驱动方式	传感器	应用领域
运动规划控制	Wang 等 ^[23]	约束路径规划方法	空间 (3T)	PLC + 直流伺服	微张力传感器	/
	Zhang 等 ^[24]	连续路径运动规划	空间 (3T3R)	直流伺服	张力传感器	/
轨迹跟踪	Harandi 等 ^[25]	自适应阻尼分配控制	平面 (2T1R)	PCI 卡 + 直流电机	3D 视觉	/
	Zake 等 ^[26]	姿态伺服控制	空间 (3T3R)	直流伺服	3D 视觉	/
	Wang 等 ^[27]	自适应非奇异终端滑模	空间 (3T)	交流伺服	/	/
	Zhang 等 ^[28]	快速终端滑模控制	空间 (3T3R)	PLC + 直流伺服	张力传感器	/
索力分配	Li 等 ^[29]	索力分布与控制策略	空间 (3T)	力矩电机	张力传感器	康复训练
	Ueland 等 ^[30]	优化力分配策略	平面 (2T1R)	/	张力传感器	船舶
	Fazeli 等 ^[31]	鲁棒容错约束控制	平面 (2T1R)	直流电机	3D 视觉	/
	Gouttefarde 等 ^[32]	通用索力分配策略	空间 (3T3R)	PLC + 直流伺服	张力传感器	仓储
振动抑制	Jamshidifar 等 ^[33]	抑振稳定器	平面 (2T1R)	PLC + 直流伺服	加速度传感器	仓储
	Sun 等 ^[34]	主动抑振控制策略	空间 (1R1T)	交流电机	3D 视觉	航天
	Sancak 等 ^[35]	面外抑振策略	平面 (2T1R)	PLC + 交流伺服	加速度传感器	/
负载自适应	Picard 等 ^[36]	滑模鲁棒控制	空间 (3T3R)	同步电机	张力传感器	/
避障	Meziane 等 ^[37]	人机交互控制策略	空间 (3T3R)	伺服电机	张力传感器	/

图 5 近年柔索驱动机器人控制方法典型研究

位姿估计算法：将 IMU 测量融入正运动学计算，提出一种基于卡尔曼滤波器的机器人位姿估计算法（ESKF 算法），提高了对索驱动机器人在微重力环境下位姿估计的精度。

运动控制算法：基于奇异摄动理论的级联控制方案，将复杂弹性系统分解为降阶子系统，简化控制算法设计，并利用相关定理分析系统稳定性。还设计了反馈线性化控制、超螺旋滑模控制器，以及一种基于滑模扰动观测的模型预测控制器，通过数值仿真验证了这些算法的有效性。

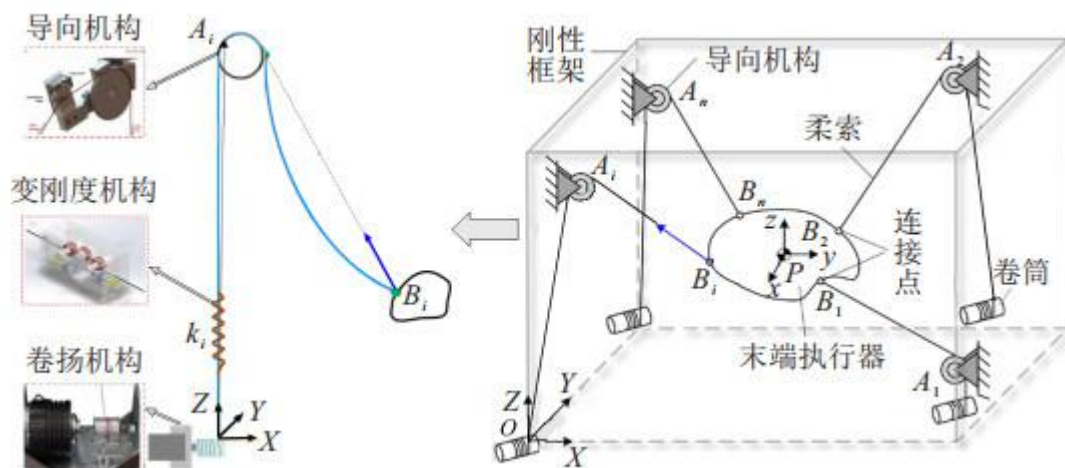


图 6 柔索驱动机器人关键结构与子系统

柔索驱动式航天员虚拟微重力训练系统：针对现有航天员地面微重力训练设备存在的问题，提出了一种柔索驱动的航天员虚拟微重力训练系统。建立了系统的动力学模型，提出了一种使用弹簧产生柔索张力的并联柔索全位置型控制方法，并引入力/速局部反馈的控制策略，实验表明该系统克服多余力效果明显，可获得较高的驱动力控制精度，虚拟质量在操作力作用下的运动符合微重力环境中的运动规律，且有较高的模拟精度。

FAST 馈源支撑系统：国家天文台 FAST 项目的馈源柔性索支撑系统是其三大创新之一。通过国际合作与自主研究，掌握了全过程数值仿真技术，建立了数值仿真模型，并进行了大量实验。该系统实现了馈源舱在高空的高精度跟踪和定位，突破了传统望远镜的刚性馈源支撑模式。

2.4.2 国外技术进展

在国外，索驱动并联机器人也有诸多应用。例如，日本的“月亮女神”（Kaguya）月球探测器采用了索驱动机构进行月面着陆模拟实验，通过控制索的长度和张力，模拟月球表面的低重力环境，以验证

探测器的着陆性能。欧洲航天局（ESA）也在其一些航天器的地面测试中使用索驱动装置来模拟微重力环境，以测试航天器的对接、着陆等关键操作。

英国伦敦大学学院（UCL）：UCL 的航空航天工程系在索驱动模拟微重力环境技术方面有一定成果。他们开发了一种基于索驱动的微重力模拟平台，用于研究航天器在微重力环境下的动力学行为和控制策略。该平台采用多根柔索驱动，能够模拟航天器在微重力环境中的姿态和位置变化，为航天器的设计和控制提供了重要的实验数据。

美国斯坦福大学：斯坦福大学的研究团队在索驱动机器人领域也有深入研究。他们提出了一种新型的索驱动机构，通过优化索的布局和驱动方式，提高了机器人在模拟微重力环境中的运动精度和稳定性。该机构能够更灵活地调整航天器模型的姿态和位置，以适应不同的实验需求

2.5 未来发展趋势

2.5.1 智能化自主控制

智能化自主控制是索驱动机器人未来发展的关键趋势之一。在模拟零重力及低重力环境中，机器人需要具备更高的自主性和智能化水平，以应对复杂多变的任务需求。具体而言，机器人将能够通过先进的传感器技术和数据处理算法，实时感知自身状态和周围环境信息，如位置、速度、姿态、力等，并基于这些信息进行自主决策和运动规划。例如，在空间站维护任务中，机器人可以自主识别需要维修的设备位置，规划最优路径，避开障碍物，实现精准的维修操作。此外，

智能化自主控制还包括机器人的自适应控制能力，即机器人能够根据任务环境的变化和自身状态的实时反馈，自动调整控制策略和参数，以保持系统的稳定性和性能。

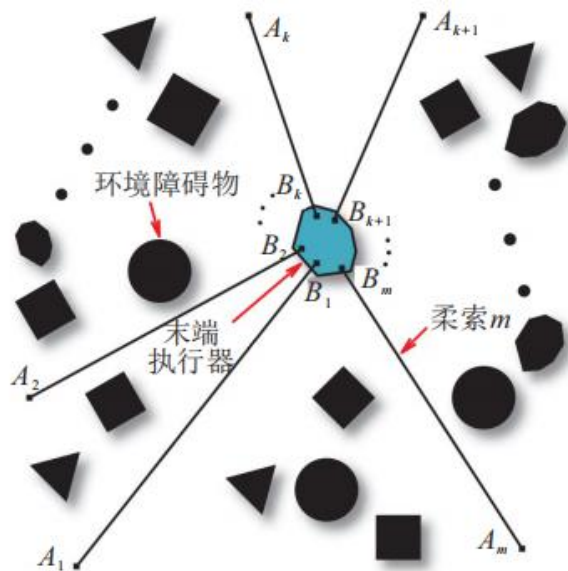


图 7 索驱动机器装置智能避障

例如，在面对未知的低重力环境或外部干扰时，机器人可以自适应地调整索驱动的张力和运动轨迹，确保任务的顺利进行。这种智能化自主控制能力将大大提高索驱动机器人在模拟零重力及低重力环境中的应用效率和可靠性，减少对地面控制的依赖，提升任务执行的灵活性和自主性。

2.5.2 多机器人协同作业

多机器人协同作业是另一个重要的发展趋势。在复杂的模拟零重力及低重力环境中，单个索驱动机器人可能难以完成一些大型或复杂的任务，如大型空间结构的组装、维护等。因此，多机器人协同作业将成为未来的发展方向。通过多机器人之间的协同配合，可以实现更高效的任务执行和更广泛的工作覆盖。

例如，在空间站的建设中，多个索驱动机器人可以协同工作，分别负责不同的任务模块，如结构件的运输、安装、连接等，通过精确的协同控制，实现大型空间结构的高效组装。此外，多机器人协同作业还可以提高任务的可靠性和容错能力。当某个机器人出现故障或异常时，其他机器人可以及时接替其任务，确保任务的连续性和完整性。通过建立高效的通信和协调机制，多机器人系统可以实现信息共享和任务分配，优化整体任务执行效率。这种协同作业模式将为模拟零重力及低重力环境中的复杂任务提供更强大的支持和保障。

2.5.3 高精度感知与测量

高精度感知与测量技术的发展将为索驱动机器人在模拟零重力及低重力环境中的应用提供重要支持。在这些特殊环境中，机器人需要具备高精度的位置、姿态和力的感知能力，以实现精确的运动控制和任务操作。未来，随着传感器技术的不断进步，索驱动机器人将配备更加先进和高精度的传感器，如微型化、高灵敏度的惯性测量单元（IMU）、激光雷达、视觉传感器等。这些传感器可以实时获取机器人的状态信息和环境数据，并通过数据融合技术，提供更加准确和可靠的感知结果。

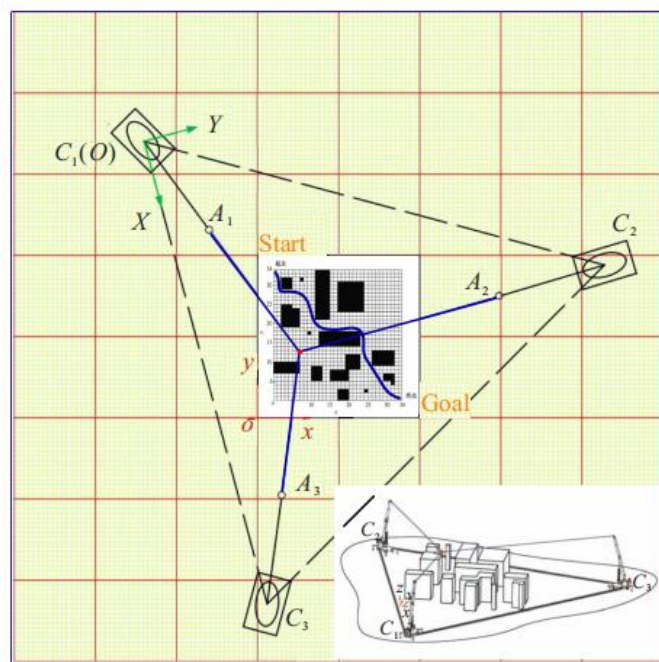


图 8 索驱动机器人路径规划与感知

例如，在空间微重力环境下的操作任务中，机器人可以通过高精度的力传感器和视觉传感器，精确感知操作对象的位置、姿态和受力情况，实现精准的抓取、操作和装配。此外，高精度测量技术还将应用于机器人的自身状态监测和故障诊断，通过实时监测机器人的运动参数和结构状态，及时发现潜在的问题和故障隐患，提高系统的可靠性和安全性。这种高精度感知与测量能力将为索驱动机器人在模拟零重力及低重力环境中的高效、可靠运行提供坚实的基础。

2.5.4 轻量化与高性能材料应用

轻量化与高性能材料的应用是索驱动机器人未来发展的重要方向之一。在模拟零重力及低重力环境中，机器人的重量和惯性对运动性能和能耗有重要影响。通过采用轻量化设计和高性能材料，可以显著降低机器人的重量和惯性，提高其运动灵活性和响应速度，同时减少能耗。例如，采用高强度、低密度的复合材料和合金材料，可以制

造出更加轻量化和坚固的机器人结构部件，如索驱动系统的支架、动平台等。

轻量化材料清单主要包括以下几类材料：

主要材料	材料特点
铝合金	其性价比高，广泛应用于机器人结构件
镁合金	镁合金更轻且具备良好阻尼性能，适合承载部位减重。
碳纤维	碳纤维强度高、刚性好，常用于四肢和外壳等对重量敏感的部位。
高性能工程塑料	聚醚醚酮（PEEK）、聚酰胺（PA）、聚苯硫醚（PPS）、液晶聚合物（LCP）、热塑性弹性体（TPE）和超高分子量聚乙烯（UHMW-PE）等。PEEK 以其优异性能，在高端应用中逐步取代金属材料。

2.6 面临的挑战

2.6.1 动力学建模与控制的复杂性

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人在动力学建模与控制方面面临着巨大的挑战。首先，索驱动系统的动力学模型具有高度的非线性和耦合性。由于绳索的柔性特性以及索与机器人本体之间的相互作用，系统的动力学行为变得非常复杂。例如，在水下近端索驱动机器人中，绳索的张力不仅受到机器人运动的影响，还受到水流阻力、浮力等多种因素的影响，导致动力学模型的建立和求解变得非常困难。其次，控制策略的设计也面临挑战。为了实现机器人的精确运动控制，需要设计复杂的控制算法来应对系统的非线性和耦合性。例如，对于具有多个自由度的索驱动机器人，需要采用先进的控制方法，如模糊

控制、神经网络控制等，来提高系统的鲁棒性和控制精度。此外，动力学建模与控制的复杂性还体现在系统的实时性和稳定性要求上。在模拟零重力及低重力环境中，机器人需要实时响应外部环境的变化，同时保持系统的稳定运行，这对控制系统的实时性和稳定性提出了很高的要求。

2.6.2 系统的稳定性和可靠性

在模拟零重力及低重力环境中，索驱动机器人的稳定性和可靠性面临严峻考验。首先，绳索的柔性特性使得系统容易受到外界干扰的影响，导致稳定性下降。例如，在水下作业中，水流的冲击和波动会对绳索产生额外的张力和振动，影响机器人的运动精度和稳定性。其次，系统的可靠性也受到多方面因素的影响。索驱动机器人通常具有多个绳索和驱动装置，任何一个部件的故障都可能导致整个系统失效。例如，在空间站维护任务中，如果某根绳索断裂或驱动装置故障，可能会导致机器人无法正常工作，影响任务的完成。此外，系统的稳定性和可靠性还受到材料性能、制造工艺、维护保养等因素的影响。在模拟零重力及低重力环境中，机器人需要使用高性能的材料和先进的制造工艺，以提高系统的可靠性和耐久性。同时，定期的维护保养也是确保系统稳定运行的重要措施。

2.6.3 多机器人协同作业的协调与管理

在复杂的模拟零重力及低重力环境中，多机器人协同作业是实现大型任务的重要手段。然而，多机器人协同作业面临着协调与管理的挑战。首先，多机器人之间的通信和协调是一个关键问题。在模拟零

重力及低重力环境中，机器人之间的通信可能会受到环境因素的影响，如信号延迟、干扰等，导致信息传输不及时或不准确。其次，多机器人协同作业的任务分配和规划也是一个难点。如何根据每个机器人的能力和状态，合理分配任务，优化作业流程，是提高协同作业效率的关键。例如，在空间站建设中，多个索驱动机器人需要协同完成构件的运输、安装和连接等任务，需要精确的任务分配和协调。此外，多机器人协同作业还涉及到系统的容错能力和安全性。当某个机器人出现故障或异常时，需要及时调整任务分配，确保其他机器人能够继续完成任务，同时保证整个系统的安全运行。

2.6.4 材料选择与轻量化设计

首先，机器人需要使用高性能的材料来满足特殊环境的要求。例如，在空间站和深空探测任务中，机器人需要使用耐高温、耐辐射、低膨胀系数的材料，以保证在极端环境下的稳定运行。其次，轻量化设计是提高机器人运动性能和降低能耗的重要手段。通过采用轻量化设计，可以减少机器人的重量和惯性，提高其运动灵活性和响应速度。然而，轻量化设计需要在保证结构强度和刚度的前提下进行，这对材料选择和结构设计提出了很高的要求。例如，在水下近端索驱动机器人中，需要采用高强度、低密度的复合材料来制造机器人的结构部件，以实现轻量化设计。此外，材料选择和轻量化设计还涉及到制造工艺和成本控制。高性能材料和轻量化设计通常需要先进的制造工艺，这会增加制造成本。因此，在材料选择和轻量化设计时，需要综合考虑性能、成本和制造工艺等因素。

2.7 小结

第二章全面深入地探讨了模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的发展现状，涵盖技术原理、应用优势、政策支持、技术进展以及面临的挑战等多个方面。

在技术原理方面，详细阐述了索驱动机器人的工作原理，即通过多根绳索连接基础框架和模拟负载平台，利用绳索张力抵消负载重力，实现对模拟负载平台的运动和姿态控制。同时，介绍了多种零重力或低重力模拟方法和设备，包括抛物线飞行训练法、浮力平衡法、索驱动机器人装置以及虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，分析了各自的优势与局限性。

在应用优势方面，从结构与重量、运动性能、成本与维护、适应性与灵活性等维度，对比了索驱动机器人与传统机器人的差异，突显了索驱动机器人的独特优势。

政策支持方面，梳理了国家在科技创新政策、产业扶持政策、科研投入政策、人才培养政策以及地方政策等方面对索驱动机器人技术的扶持，为技术发展提供了有力保障。

技术进展方面，展示了国内外索驱动机器人技术的快速发展态势。最后，分析索驱动机器人面临的挑战，包括动力学建模与控制的复杂性、系统的稳定性和可靠性、多机器人协同作业的协调与管理、材料选择与轻量化设计等方面的难题，为未来技术发展方向提供了重要参考。

第三章 索驱动机器人专利态势分析

本章针对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人进行专利态势分析，本章仅对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的专利进行宏观分析，以期把握整体专利态势，摸清各层级区域范围内（全球、全国）关于模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的专利竞争格局，相关核心技术分析将在下一章进行分析。

3.1 全球专利态势分析

3.1.1 专利申请趋势



图 9 全球模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利申请趋势

1958 年到 1960 年代，专利数量很低，此时宇宙航行技术刚起步，主要是一些政府项目，比如苏联和美国的太空竞赛。1970 年代，专利数量开始增加，但增长缓慢，这因为太空探索主要集中在政府项目，私营部门参与较少。1980 年代，专利数量显著增长，这与太空技术商业化有关，比如通信卫星的广泛应用，以及更多国家和公司参与太空探索。1990 年代，专利数量继续增长，但增速放缓，主要集中在

卫星通信和地球观测等领域，国际空间站的建设也起了作用。2000 年代，专利数量波动，2005 年左右达到一个小高峰，这与私营部门在太空探索中的活跃有关，比如 SpaceX 的成立。2010 年代，专利数量回升，与太空旅游和深空探索的兴起有关。2016 年，专利数量达到一个显著高峰，且专利申请逐年上升，相关技术发展增速。

2010 年后专利申请数量增加的原因主要有几个方面：一是全球航天领域的政策支持，比如各国加大了对航天领域的投入；二是技术进步，尤其是航天飞行器 and 人造卫星技术的快速发展；三是市场需求和资本投入的增加，为技术研发提供了资金支持；四是各国在航天领域的合作更加频繁，促进了技术交流和创新；五是中国在航天领域的快速发展，成为全球专利申请增长的重要推动力。

3.1.2 技术发展历程

国外索驱动机器人技术的发展相对较早，经历了多个阶段，取得了丰富的研究成果和应用成果。以下国外索驱动机器人技术发展的主要阶段和成果：

1. 初步探索阶段（20 世纪 80 年代 20 世纪 90 年代）

技术引入与基础研究：20 世纪 80 年代中期，美国麻省理工学院的研究人员 Landsberger 研究了缆线驱动并行机器人的设计，根据海洋环境下操作的要求设计了 3 种自由度的缆线驱动并行机器人。这一时期，国外科研机构 and 高校开始对索驱动机器人技术进行基础研究，包括机械设计、控制理论和传感器技术等。

实验室研究与原型开发：20 世纪 90 年代，国外一些高校和科研

机构开始进行索驱动机器人的实验室研究，开发了一些原型机。例如，1989 年，Dagalakis 等开发了绳驱动并行机器人 ROBOCRANE，目前，第一代的 ROBOTCRANE 驱动机器人正在造船、建设和其他产业中使用。



图 10 全球索驱动机器人技术发展历程

2. 技术发展阶段（20 世纪 90 年代 2000 年）

应用领域拓展：20 世纪 90 年代后期以后，德国杜斯堡精华大学机械电气综合研究所就对有线电视电缆并联驱动器和并联电机运动控制

装置的实验项目研究开展了深入研究，开发设计出了一台实验用的原型机 SEGESTA。这一时期，索驱动机器人技术开始在多个领域得到应用，包括制造业、物流、医疗等。这一时期，国外科研机构和企业开始对索驱动机器人进行技术创新和优化。例如，通过改进索的材料和结构设计，提高了索的承载能力和耐用性；通过优化控制算法，提高了机器人的运动精度和稳定性。

3. 快速发展阶段（2000 年 2010 年）

产业化与商业化：2000 年以后，国外索驱动机器人技术进入快速发展阶段，开始实现产业化和商业化。国外一些企业开始生产索驱动机器人，并在多个领域得到广泛应用。例如，2013 年，来自德国 Frunhofer 研究所的 IPanema 柔性电缆机器人在德国斯图加特召开的并行电缆机器人研究会议上首次展出，随后它在业界被广泛应用于检查和组装。索驱动机器人在多个领域得到应用，包括制造业、物流、医疗、航天等。例如，在医疗领域，索驱动机器人被用于康复治疗系统，如 MACARM 康复治疗系统；在航天领域，索驱动机器人被用于模拟低重力环境，帮助航天员进行适应性训练。

4. 高端应用与国际化阶段（2010 年至今）

高端应用拓展：近年来，国外索驱动机器人技术在高端应用领域取得突破。例如，意大利物理学者 Bergamasco 特别分析了 6 个自由度缆线驱动的并联机构的工作空间和冗余度，并设计了一个有力反馈功能的控制器。这一技术在高端制造和精密操作领域得到应用。国外索驱动机器人技术继续走向国际市场，与国际企业和科研机构进行合

作。例如，加拿大学者 Gosselin 开发了一种超大型空间平移运动并联运动机构的原型，并解出了电缆驱动并联机器人的边界解析式。这一技术在国际航天和空间探索领域得到应用。

3.1.3 专利布局分析

专利区域分析通过对具体区域的专利状况进行分析和对比，形成各区域整体专利布局状况，为政府决策者提供分析和对比各区域的专利状况的机会。这种分析有助于了解产业创新发展状况、区域专利质量，最终为政策决策提供相关建议。例如，通过对不同地区的专利数量、类型、以及技术创新的方向进行分析，可以揭示出哪些地区在特定技术领域内具有较强的研究和开发能力，哪些地区可能成为未来的技术创新中心。这种信息对于政府制定区域发展战略、引导资源合理分配、促进技术创新和产业升级具有重要意义。此外，专利区域分析还能帮助企业了解竞争对手的地理位置和技术布局，为企业战略调整和市场进入提供参考。通过分析不同地区的专利申请情况，企业可以评估潜在的市场机会和风险，从而做出更加明智的商业决策。

图中展示的是模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航专利来源国分布，图表时间跨度从 1985 年到 2025 年，专利申请数量呈现出明显的上升趋势，这表明全球对电缆驱动机器人技术的兴趣和投资不断增加。从 2010 年开始，专利申请数量显著激增，中国在这一领域成为主导者。

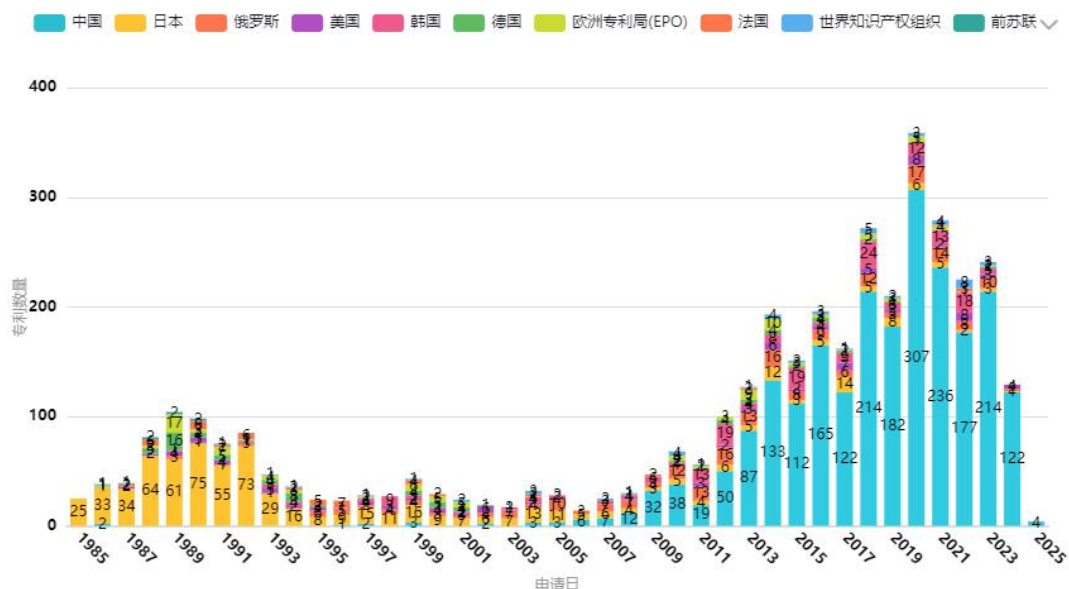


图 11 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利来源国分布

中国的专利申请数量从 2010 年到 2020 年呈指数级增长。2019 年专利数量达到峰值，为 307 项，随后 2020 年为 236 项，2021 年为 214 项。这表明中国拥有强大的研发生态系统，并且在电缆驱动机器人技术上具有战略重点。日本在这一领域起步较早，20 世纪 80 年代末和 90 年代初专利数量显著。例如，1988 年有 64 项专利，1990 年有 75 项专利。然而，2000 年代增长放缓，近年来专利数量相对稳定但较低。这可能反映了日本在机器人技术其他领域的重点转移，或者在电缆驱动机器人方面的创新速度放缓。美国在专利格局中保持了稳定的存在，专利数量逐年稳步增长。2019 年有 24 项专利，此后数量基本保持稳定。韩国的专利申请数量适度增加，2019 年达到峰值，为 19 项。这表明韩国对这项技术的兴趣日益增加，可能由其电子和制造业推动。德国的专利数量稳定但较低，2019 年达到峰值，为 12 项。这可能是由于德国在其他类型的机器人或自动化技术上的重点。

3.1.4 重要创新主体

图中给出的是模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航全球专利申请人排名，韩国航空宇宙研究院（KARI）以 126 项专利遥遥领先，其次是三菱重工（MHI）和三菱电机，分别有 62 项和 56 项。其他公司如太洋日本酸素、日立、石川岛播磨重工业、日本氧气、东芝、国家航天开发局和 Aerospatiale 也位列其中。

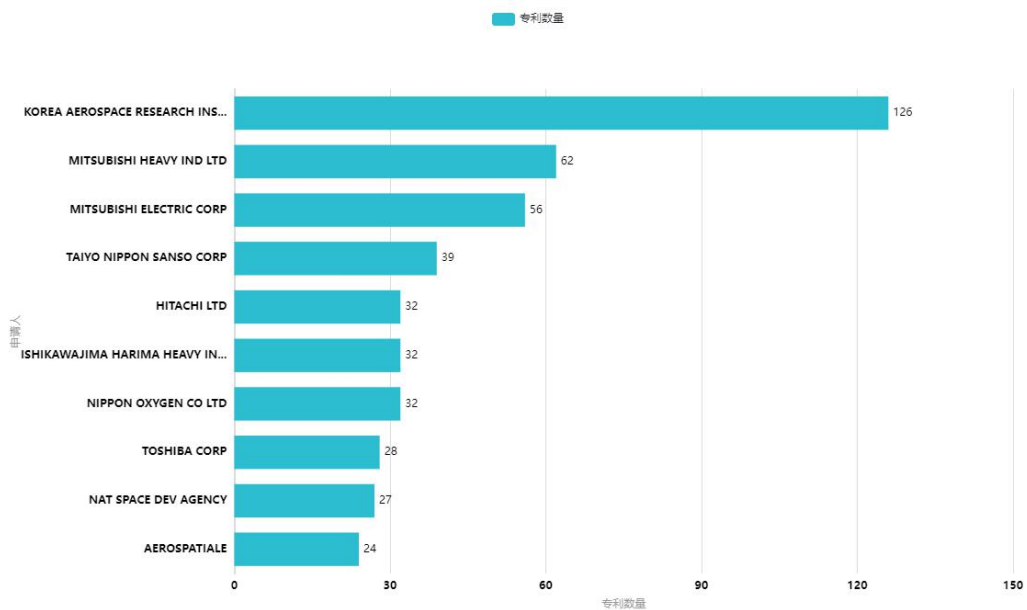


图 12 索驱动机器人专利申请人情况

韩国航空宇宙研究院（KARI）在专利数量上占据主导地位。KARI 在模拟零重力和低重力环境方面可能有显著的技术突破。开发了先进的索驱动系统，用于模拟这些环境，这对于航天器测试和宇航员训练至关重要。

三菱重工（MHI）在航空航天领域有丰富的经验，在索驱动机器人的机械设计和控制系统方面做出了创新。开发了更高效、更精确的驱动系统，以提高模拟环境的准确性。

三菱电机（MitsubishiElectric）则专注于电子和控制系统。开发了先进的传感器和反馈机制，以确保机器人在模拟零重力和低重力

环境时的稳定性和精确性。

太洋日本酸素 (TaiyoNipponSanso) 是一家气体和材料公司，在材料科学方面做出了贡献，开发了用于索驱动机器人的轻质和高强度材料，这对于在低重力环境中操作至关重要。

日立 (Hitachi) 以其广泛的科技产品而闻名，在机器人系统的整体集成方面做出了创新，确保各个组件能够无缝协同工作，以实现精确的重力模拟。

石川岛播磨重工业 (IshikawajimaHarimaHeavyIndustries, IHI) 在航空航天和国防领域有深厚背景，在索驱动机器人的机械结构和动力系统方面做出了贡献，提高了系统的可靠性和性能。

东芝 (Toshiba) 在电子和人工智能领域有强大的研发能力，开发了用于索驱动机器人的智能控制系统，利用机器学习来优化操作和提高效率。

国家航天开发局 (NATSPACEDEVAGENCY) 在航天应用方面做出了贡献，开发了专门用于太空任务的索驱动机器人，这些机器人需要在极端条件下可靠地模拟重力环境。

Aerospatiale (现为 EADS) 在欧洲航天项目中做出了贡献，开发了用于卫星测试和宇航员训练的索驱动机器人系统。

通过这些技术创新，这些创新主体共同推动了索驱动机器人技术的发展，使其在模拟零重力和低重力环境方面取得了显著进步。这些进步不仅对航天领域具有重要意义，还对其他需要精确重力模拟的领域产生了深远影响。

3.2 中国专利整体态势

3.2.1 专利申请趋势

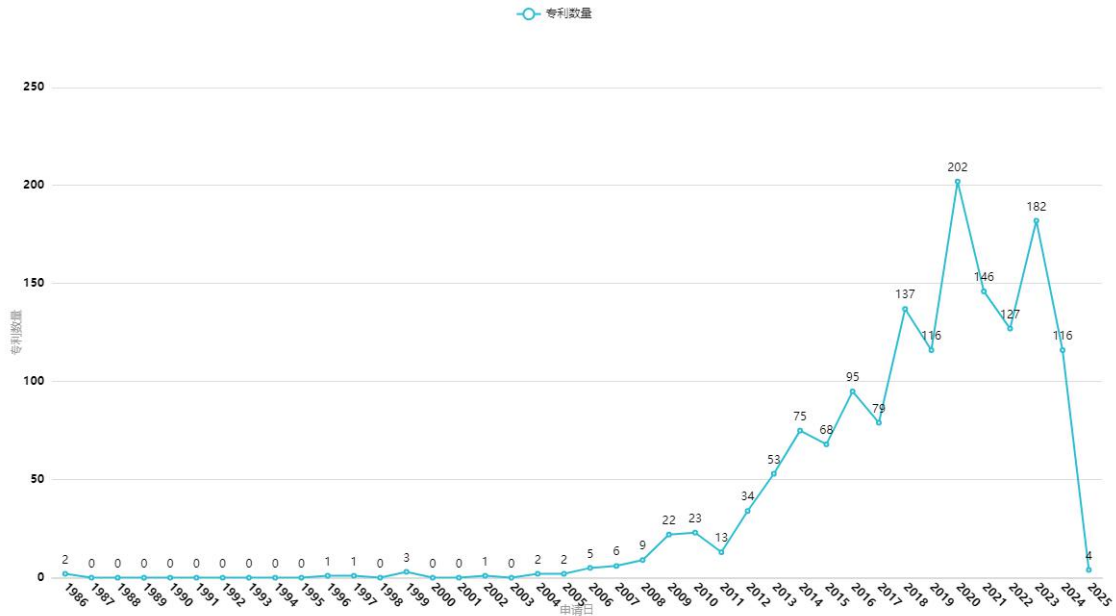


图 13 索驱动机器人国内专利申请趋势

图 12 展示了从 1966 年到 2024 年的“索驱动机器人”专利申请数量。横轴是年份，纵轴是专利数量，专利申请数量最多 250 个。从 2000 年以前，专利申请数量很少，每年基本是个位数，偶尔有两位数。这说明早期这个领域的研究和开发活动不活跃，技术也不成熟。2000 年后，专利申请数量开始增加，尤其是 2010 年之后，增长更加明显。2010 年左右，专利申请数量显著上升，到 2016 年达到一个高峰，接近 200 个。这可能是因为国家对航天领域的重视和投入增加，技术进步也促进了创新。2017 年后，专利申请数量有所波动，2018 年和 2019 年有所下降，但 2020 年又出现一个小高峰，随后 2021 年和 2022 年再次下降。这可能是因为竞争加剧或政策变化影响了专利申请的积极性。2023 年和 2024 年的数据不完整，这可能是因为数据

尚未完全统计导致专利申请减少。

3.2.2 技术发展历程

中国索驱动机器人技术的发展起步相对较晚，但近年来取得了显著进展。以下是国内索驱动机器人技术发展的主要阶段和成果：

1. 初步探索阶段（20 世纪 80 年代 20 世纪 90 年代）

技术引入与基础研究：20 世纪 80 年代，中国开始引入机器人技术，主要集中在工业机器人领域。这一时期，国内科研机构 and 高校开始对机器人技术进行基础研究，包括机械设计、控制理论和传感器技术等。索驱动机器人技术作为机器人技术的一个分支，也开始受到关注。20 世纪 90 年代，国内一些高校和科研机构开始进行索驱动机器人的实验室研究，开发了一些原型机。这些原型机主要用于基础的运动学和动力学研究，为后续的技术发展奠定了基础。

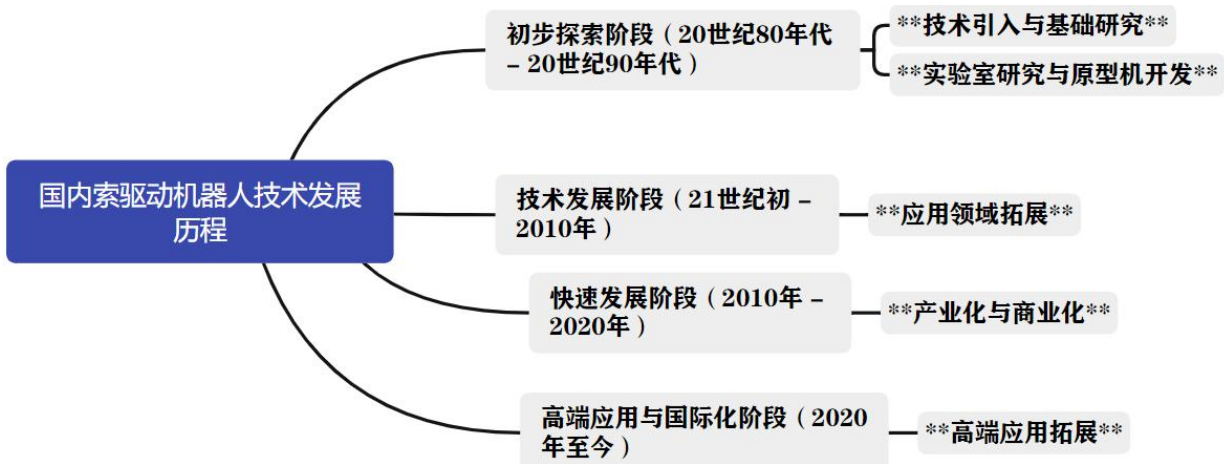


图 14 国内索驱动机器人发展历程

2. 技术发展阶段（21 世纪初 2010 年）

应用领域拓展：21 世纪初，随着中国制造业的快速发展，索驱动机器人技术开始在工业领域得到应用。例如，在物流、仓储和制造业中，索驱动机器人被用于货物搬运和分拣，提高了生产效率和自动

化水平。这一时期，国内科研机构和企业开始对索驱动机器人进行技术创新和优化。例如，通过改进索的材料和结构设计，提高了索的承载能力和耐用性；通过优化控制算法，提高了机器人的运动精度和稳定性。

3. 快速发展阶段（2010 年 2020 年）

产业化与商业化：2010 年以后，中国索驱动机器人技术进入快速发展阶段，开始实现产业化和商业化。国内一些企业开始生产索驱动机器人，并在多个领域得到广泛应用。例如，行远科技的柔性索驱动并联机器人通过对机器人构型的全新设计，突破了刚性机器人面临的瓶颈问题，能大幅降低自动化装备的成本，并绕开了核心部件受制于国外的困局，有望推动国产机器人性能以及市场占有率的大幅提升。

4. 高端应用与国际化阶段（2020 年至今）

高端应用拓展：近年来，中国索驱动机器人技术在高端应用领域取得突破。例如，行远科技的柔性索驱动机器人已经应用于国内高端领域的头部企业，在产能效率和减员增效方面取得了良好的市场反馈。在分拣和包装等场景中，成为提高效率、降低成本、提升智能化水平的生产力工具，并准备大力推广在食品、医药、新能源、物流及 3C 等诸多行业中的应用。

3.2.3 专利布局分析

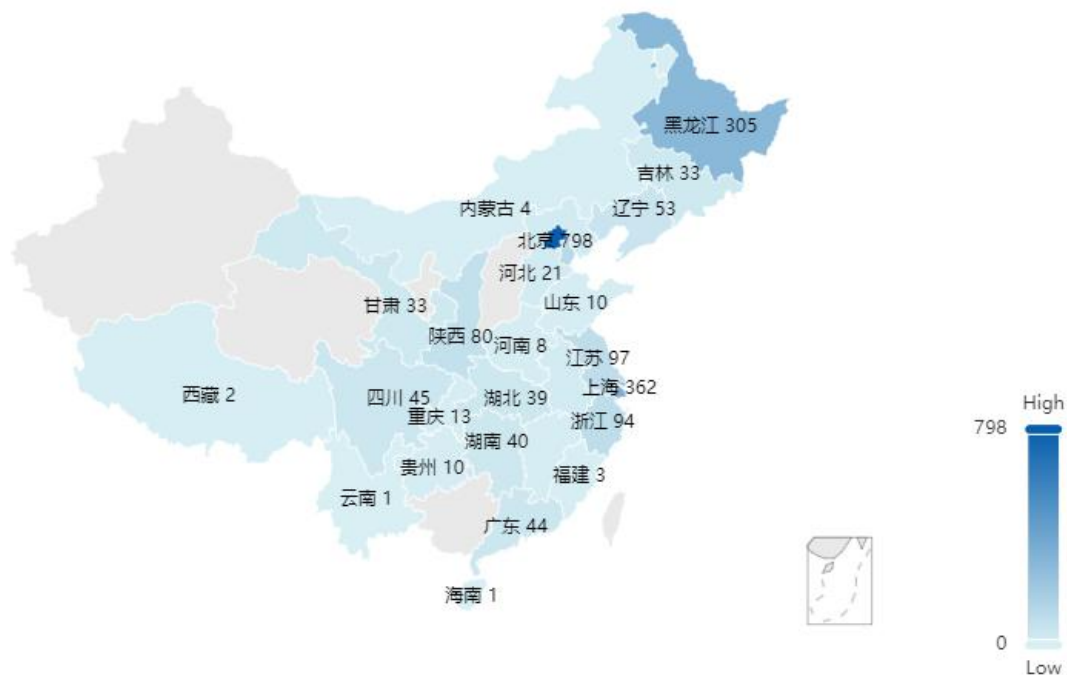


图 15 索驱动机器人国内专利省份分布

图中展示了中国各省市关于“模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人”的专利申请数量。颜色越深，表示专利申请数量越多。从图上可以看到，北京、上海、黑龙江、江苏、浙江等地的专利申请数量较多，而西藏、云南、海南等省份的专利申请数量较少。

北京的专利申请数量最高，达到了 798 件。这是因为北京是中国的政治、文化和科技中心，拥有众多高校和科研机构，如清华大学、北京大学等，这些机构在航天和机器人技术领域投入巨大。此外，北京还聚集了大量高科技企业，对创新技术的需求和投入也推动了专利申请的数量。

上海的专利申请数量为 362 件。上海作为中国的经济中心，拥有强大的工业基础和先进的制造业。上海的高校和研究机构，如上海交通大学、复旦大学等，在机器人技术方面有深厚的研究基础。上海的

国际化程度较高，吸引了大量外资企业和国际人才，这些因素共同促进了专利申请的活跃度。

黑龙江的专利申请数量为 305 件。虽然黑龙江近年来经济发展相对滞后，但在航空航天领域有悠久的历史 and 传统优势，特别是在哈尔滨工业大学等高校的支持下，相关领域的研究和开发一直保持较高水平。

江苏和浙江的专利申请数量分别为 97 件和 94 件。这两个省份都是中国的经济强省，制造业和高新技术产业发达。江苏的苏州、无锡等地，以及浙江的杭州、宁波等地，都是高新技术产业的聚集地。江苏和浙江的高校和研究机构，如南京大学、浙江大学等，在机器人技术方面有较强的研究实力。此外，这两个省份的企业对技术创新的重视程度较高，积极申请专利以保护知识产权。

相比之下，西藏、云南、海南等省份的专利申请数量较少。这可能与这些地区的经济发展水平、科研投入和产业结构有关。这些地区的高校和研究机构相对较少，企业在高新技术领域的投入也相对较低，导致专利申请数量较少。

3.2.4 申请人分析

3.2.4.1 申请人类型分析

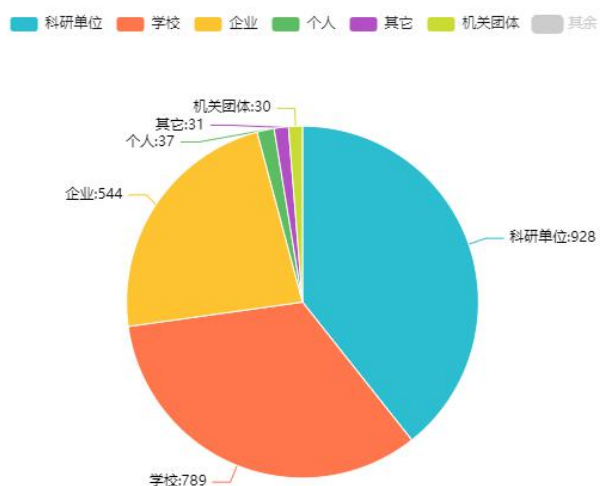


图 16 索驱动机器人国内专利申请人类型

图中展示了国内模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人申请人的类型分布。图中的颜色代表了不同的申请人类型，包括科研单位、学校、企业、个人、机关团体。科研单位的申请数量最多，申请专利 928 件，这说明科研单位是这一领域的主要创新力量。科研单位通常有较强的研发能力和资源，能够进行深入的基础研究和技术开发。学校紧随其后，申请专利 789 件。学校作为科研的重要基地，特别是在培养人才和进行前沿研究方面，具有独特的优势。许多高校都有专门的实验室和研究团队，专注于机器人技术及相关领域的研究，因此在专利申请上也表现突出。企业方面，申请专利 544 件。企业作为技术创新的主体，通常会将研究成果转化为实际产品，推动技术的商业化应用。在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人这一领域，企业可能更关注技术的实际应用和市场前景，因此也有较多的专利申请。

从整体上看，科研单位、学校和企业是主要的专利申请人，这表明模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人这一领域得到了广泛的关注和投入。科研单位和学校在基础研究和人才培养方面发挥了重要

作用，而企业则在技术应用和产业化方面起到了关键作用。

3.2.4.2 申请人主体分析

从图中可以看出，国内在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域，专利申请数量呈现出明显的集中趋势。哈尔滨工业大学以 296 项专利遥遥领先，显示出其在该领域的研发实力。北京卫星环境工程研究所紧随其后，拥有 157 项专利，反映了其在航天技术上的深厚背景。上海卫星工程研究所 90 项专利位列第三，体现了上海地区在航天技术领域的活跃度。天津、北京、南京等地的高校和研究机构也表现不俗，专利数量均在 40 项以上，说明这些地区在索驱动机器人技术的研发上具有较强的综合实力。企业如山东亿九电气发展有限公司和曼纽科医疗器械（湖南）有限公司也出现在榜单中，尽管专利数量相对较少，但它们的参与表明该技术在产业化应用方面具有一定的潜力。总体来看，高校和研究机构在该领域的专利申请中占据主导地位，而企业的参与为技术的市场化提供了动力。

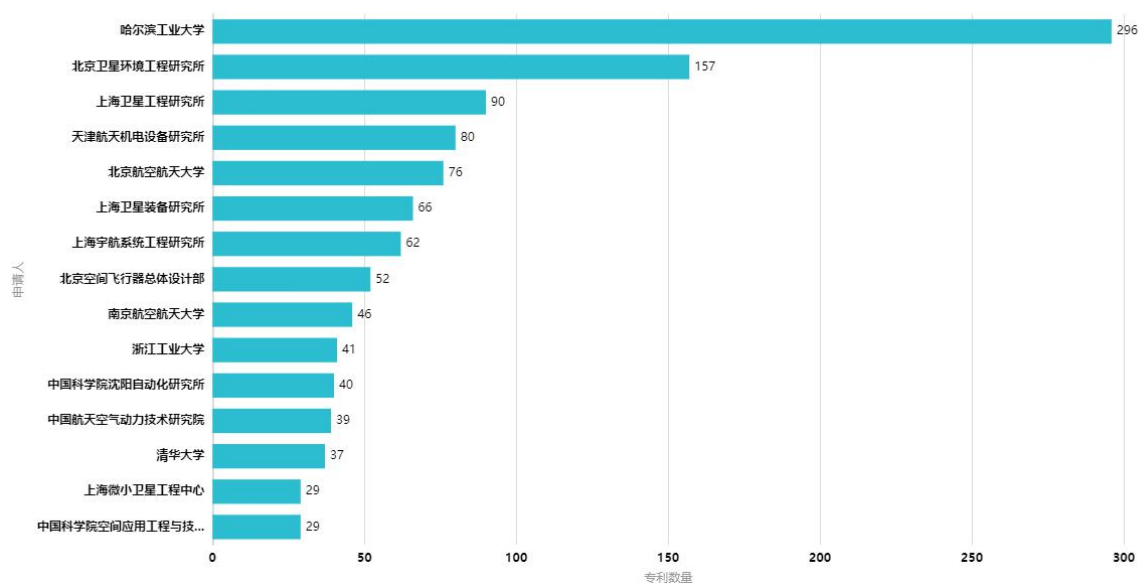


图 17 索驱动机器人国内专利申请人排名

清华大学在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域具有显著的技术优势。其主要技术创新包括：**高精度索驱动系统**：开发了高精度的索驱动系统，能够实现精确的运动控制和负载平衡。**智能控制系统**：引入了先进的智能控制算法，提高了系统的稳定性和可靠性。**多自由度运动平台**：设计了多自由度的运动平台，能够模拟复杂的运动轨迹和操作任务。清华大学在该领域的专利布局广泛，涵盖了索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN104443448A：一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置。CN113734479B：一种面向航天应用的终端驱动索并联运载装置。CN114194424B：一种卫星抓手重力卸载装置及其使用方法。

哈尔滨工业大学在航天机器人领域具有深厚的技术积累，其主要技术创新包括：**六自由度模拟器气浮滑轮系统**：开发了六自由度模拟器气浮滑轮系统，能够实现高精度的运动控制。**空间六维力加载与测量装置**：设计了空间六维力加载与测量装置，能够精确测量和控制机器人的力和运动。**绳索牵引机器人**：开发了绳索牵引机器人，用于太空物资运输和装配任务。哈尔滨工业大学的专利布局广泛，涵盖了索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN112382160B：一种六自由度模拟器气浮滑轮系统。CN114435629B：一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器

北京航空航天大学在航空航天领域具有显著的技术优势，其主要技术创新包括：**多自由度平台**：开发了多自由度平台，能够模拟复杂的运动轨迹和操作任务。**智能控制算法**：引入了先进的智能控制算法，

提高了系统的稳定性和可靠性。高速重载搬运机构：设计了高速重载搬运机构，能够实现高效的物资运输和装配任务。北京航空航天大学的专利布局主要集中在索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN115019596A：一种多自由度平台。CN115096594B：一种采用索驱机构进行空间六维力加载与测量的装置。

大连理工大学在机械工程和自动化领域具有较强的研发能力，其主要技术创新包括：电主轴动态加载试验装置：开发了电主轴动态加载试验装置，能够实现高精度的动态加载和测量。索驱动并联机器人：设计了索驱动并联机器人，能够实现高效的运动控制和负载平衡。智能监测系统：引入了智能监测系统，能够实时监测机器人的运行状态，确保系统的安全性和可靠性。大连理工大学的专利布局主要集中在索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN118329611A：一种运用索驱机构的电主轴动态加载试验装置。CN115096594B：一种采用索驱机构进行空间六维力加载与测量的装置。

上海交通大学在机械工程和自动化领域具有显著的技术优势，其主要技术创新包括：索驱动并联机器人：开发了索驱动并联机器人，能够实现高效的运动控制和负载平衡。智能控制系统：引入了先进的智能控制算法，提高了系统的稳定性和可靠性。多自由度运动平台：设计了多自由度的运动平台，能够模拟复杂的运动轨迹和操作任务。上海交通大学的专利布局广泛，涵盖了索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN118329611A：一种运用索驱机构的电主轴动态加载试验装置。CN115096594B：一种采用索驱机构进行空间六维

力加载与测量的装置。

中国科学院在航天、航空、机械工程等领域具有深厚的技术积累，其主要技术创新包括：六自由度模拟器气浮滑轮系统：开发了六自由度模拟器气浮滑轮系统，能够实现高精度的运动控制。空间六维力加载与测量装置：设计了空间六维力加载与测量装置，能够精确测量和控制机器人的力和运动。绳索牵引机器人：开发了绳索牵引机器人，用于太空物资运输和装配任务。中国科学院的专利布局广泛，涵盖了索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN112382160B：一种六自由度模拟器气浮滑轮系统。CN114435629B：一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人。

南京航空航天大学在航空航天领域具有显著的技术优势，其主要技术创新包括：多自由度平台：开发了多自由度平台，能够模拟复杂的运动轨迹和操作任务。智能控制算法：引入了先进的智能控制算法，提高了系统的稳定性和可靠性。高速重载搬运机构：设计了高速重载搬运机构，能够实现高效的物资运输和装配任务。南京航空航天大学的专利布局主要集中在索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN115019596A：一种多自由度平台。CN115096594B：一种采用索驱机构进行空间六维力加载与测量的装置。

北京卫星制造厂有限公司在航天制造领域具有显著的技术优势，其主要技术创新包括：六自由度模拟器气浮滑轮系统：开发了六自由度模拟器气浮滑轮系统，能够实现高精度的运动控制。空间六维力加载与测量装置：设计了空间六维力加载与测量装置，能够精确测量和

控制机器人的力和运动。绳索牵引机器人：开发了绳索牵引机器人，用于太空物资运输和装配任务。北京卫星制造厂有限公司的专利布局广泛，涵盖了索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN112382160B：一种六自由度模拟器气浮滑轮系统。CN114435629B：一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人。

曼纽科医疗器械（湖南）有限公司在医疗器械领域具有较强的研发能力，其主要技术创新包括：高效索驱动机构：开发了高效的索驱动机构，提高了系统的响应速度和负载能力。轻量化设计：采用了轻量化材料和结构设计，减少了机器人的重量，提高了其在低重力环境下的运动效率。智能监测系统：引入了智能监测系统，能够实时监测机器人的运行状态，确保系统的安全性和可靠性。曼纽科医疗器械（湖南）有限公司的专利布局主要集中在索驱动机器人的核心技术和应用领域。主要专利包括：CN104443448A：一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置。CN114435629B：一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人。

3.2.5 专利技术分析

图 11 展示了国内索驱动机器人专利的 IPC 分类号分布情况，通过与索驱动模拟零重力环境技术的联系进行分析，可以得出以下结论：

在索驱动模拟零重力环境技术领域，训练设备专利数量多，**G09B9/00（教育；训练设备）**说明国内重视模拟训练。如航天员训练设备，利用索驱动模拟零重力环境，提升训练的真实性和效果，表明国内在索驱动机器人技术于教育和训练设备应用的创新活跃，研发力

量集中，旨在提高训练质量，满足航空航天等领域的专业人员培训需求。

B64G7（航天器的运行），索驱动模拟零重力环境技术在航天器运行中的应用，主要体现在对航天器在太空中运动的模拟和操作支持上。这有助于研究航天器的运行姿态、轨道控制以及与其他航天器的相对运动，对于保障航天任务的顺利进行具有重要意义。

A41C17（一般用的头带）国内在一般用头带相关的索驱动机器人技术方面有一定创新，专利数量较少，但表明研发人员开始关注将索驱动技术和人体工程学相结合，设计出更符合人体需求的头带产品。

G06F17（数字计算；数据处理）索驱动模拟零重力环境技术要借助数字计算和数据处理技术，进行运动控制、实时监测和数据分析等，以提高模拟的准确性和稳定性。国内在数字计算和数据处理相关的索驱动机器人技术领域有一定成果，这些专利主要涉及运动控制算法、数据采集与分析等方面，为索驱动模拟零重力环境技术提供了重要的技术支持，推动了该技术的智能化和自动化发展。

G01M17（材料或物体的平衡或动态测试）在索驱动模拟零重力环境中，对材料或物体进行平衡和动态测试时，可借助相关技术获取准确的测试结果，评估材料或物体在微重力环境下的性能和行为，为航天材料和设备的研发提供依据。国内在材料或物体的平衡或动态测试方面的索驱动机器人技术有一定创新，专利数量虽少，但体现了对材料和物体性能测试的重视，将索驱动技术应用于测试领域，有助于提高测试的精度和可靠性，为相关研究和工程应用提供有力支持。

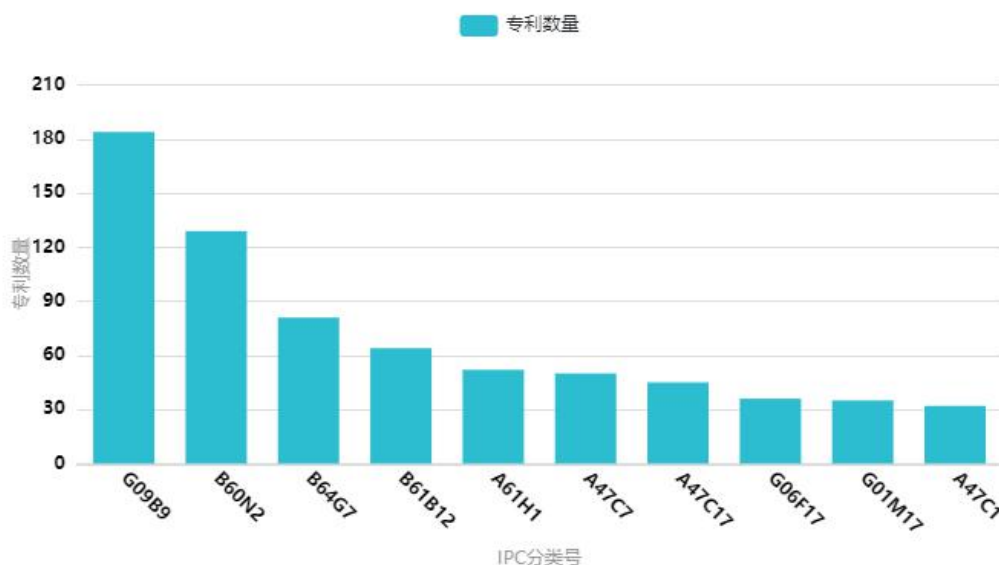


图 18 索驱动机器人国内专利 IPC 技术分布

表 2 专利 IPC 分类号释义

IPC 分类号(大组)	专利数量
G09B9(供教学或训练用的模拟机[2006.01])	184
B60N2(专门适用于车辆的座椅；车辆上座椅的布置或安装（铁路车辆座椅入 B61D33/00；自行车座椅入 B62J1/00；飞行器座椅入 B64D11/06，B64D25/04，B64D25/10）[2006.01])	129
B64G7(宇宙航行条件的模拟装置，例如用于航天员的条件适应（用于教学或训练的模拟器入 G09B9/00）[2006.01])	81
B61B12(不包含在组 B61B7/00 到 B61B11/00 中的缆索铁道系统或动力和无动力两用系统的部件、零件或附件（铁路用制动器入 B61H；转车盘入 B61J1/06）[2006.01])	64
A61H1(被动锻炼用器械（A61H5/00 优先）；振动器；脊柱按摩装置，例如身体冲击装置，对未骨折的骨骼进行简单拉伸或校直的体外装置（2）)	52
A47C7(椅子或凳子的部件、零件或配件（安装在地板上的入 A47B91/08）[2006.01])	50

A47C17(沙发；长沙发；床（床架入 A47C19/00；弹簧床垫本身入 A47C23/00；无靠背的长沙发底入 A47C23/00；填充式床垫本身入 A47C27/00；有特殊看护装置的床入 A61G7/00）[2006. 01])	45
G06F17(特别适用于特定功能的数字计算设备或数据处理设备或数据处理方法（信息检索，数据库结构或文件系统结构，G06F16/00）[2019. 01])	36
G01M17(车辆的测试（流体密封性测试入 G01M3/00；车身或底盘弹性的测试，例如，扭矩测试入 G01M5/00；车辆前灯装置的对光测试入 G01M11/06；测试发动机如入 G01M15/00）[2006. 01])	35
A47C1(专门适用于特殊目的的椅子（涉及可垂直调节特征的入 A47C3/20；可变换的椅子入 A47C13/00；专门适用于病人或残疾人的椅子或专用运输工具入 A61G3/00，A61G5/00；手术用椅、牙科用椅入 A61G15/00）[2006. 01])	32

国内在索驱动机器人技术方面，特别是在模拟零重力环境相关技术领域，已取得了一定成果，涵盖了多个应用领域。这些专利成果不仅反映了国内在该领域的技术创新和研发投入，也显示出索驱动模拟零重力环境技术在航空航天、教育训练、医疗保健等领域的广泛应用前景。



图 19 索驱动机器人专利热词分析

3.2.6 主要技术人才分析

齐乃明，哈尔滨工业大学航天学院教授、博士生导师，主要研究方向包括航天器微低重力模拟及空间装备研制技术等。作为负责人，在国内首次完成了航天科技集团空间技术研究院总体部项目“大型空间机械臂动力学及地面零重力试验”，及“微振动地面模拟试验系统”的研究。完成或承担国家自然科学基金 4 项，国家部委共性技术项目 1 项及预研基金项目 1 项，CAST 基金 1 项，SAST 基金 1 项，黑龙江省自然科学基金项目 1 项，申请国家专利 60 余项、哈工大科技成果金奖 1 项，发表学术论文 200 余篇。

模拟零重力技术方面的主要研究包括：空间机械臂零重力试验，提出了多维、大尺度、多柔体分布式重力补偿理论及方法，建立了基于动力学响应等效的多维、多柔体重力补偿的动力学方程。发明了分布式解耦气浮式重力补偿方法，解决了 7 自由度 10 米跨度的大型空间机械臂全维度、近零重力装配和高保真试验的技术难题，完成了国内首套为月球车六分之一重力模拟而研制的“基于视觉跟踪测量的二维随动跟踪系统”，还首创了气浮式零重力装配及试验技术创新的零重力总装新模式，解决了复杂异形部件深度套接的技术瓶颈，有效保证了装配精度和装配过程中产品的安全，加快了研发进度。

以气悬浮技术为依托研制了多套飞行运动模拟器，按运动自由度划分包括三自由度平动运动模拟器、三自由度姿态运动模拟器、五自由度运动模拟器和六自由度运动模拟器。还承担了军委科技委项目，开发了基于仿生壁虎材料的对接装置。

智能对接算法开发：系统地开展了空间交汇对接、在轨服务等的地面试验研究，开发新型对接装置及基于在轨学习的智能对接算法。为航天五院开发了国内首套空间站大型空间机械臂零重力试验系统，为航天八院完成了在轨服务全流程试验。

霍明英是哈尔滨工业大学航天学院的教授，主要研究方向包括高精度微低重力模拟等。

专利成果：一种四足机器人用六自由度气浮式零重力模拟系统及方法：霍明英等人发明的该系统通过在支撑平台上设置竖直向气膜组件，在模拟平台上设置与竖直向气膜组件正对的竖直向喷气组件，且在模拟平台底部设置万向球头，并在支撑平台上设置与万向球头配合的球窝，从而实现六自由度运动。该系统利用气浮原理实现模拟平台的零重力状态，适用于四足机器人的六自由度运动模拟，可用于研究其步态、平衡和运动控制策略。参与“玉兔号”月球车六分之一重力模拟系统：主要负责该系统中的系统软件编制。

平面三自由度零重力模拟技术：霍明英等研制了三套平面三自由度模拟器，通过多组平面止推气垫实现分布式点重力补偿，与气浮平台间形成气膜，实现在气浮平台上的无摩擦平面三自由度运动。该项技术对于验证航天器的编队飞行策略、绕飞、目标接近及捕获等在轨飞行任务具有较好的地面演示验证能力。

奚晓鹏，研究员，解决了宇航空间机构悬吊法微低重力模拟的多项核心技术，发明了主被动复合式高精度恒拉力控制技术，通过双电机宏微控制、主被动响应结合的恒拉力技术，解决了恒拉力控制系统

精度低、拉力跟踪滞后的问题。奚晓鹏参与研发了气浮式零重力模拟试验技术，该技术基于气浮原理，利用静压气体将物体悬浮，形成高刚度气膜，创造近似零摩擦环境，实现太空微重力环境高保真模拟。项目组发明了高保真零重力试验系统、高精度强适应性气浮式零重力模拟系统以及铅垂向高精度动态重力补偿和回转干扰补偿核心器件和装置，研制了国内精度最高、最完整的在轨服务技术验证平台，首次实现全流程在轨服务技术地面验证。

奚晓鹏参与的项目成果已应用于多个航天型号产品的地面微低重力模拟测试，具有多项自主知识产权，相关成果获 2015 年黑龙江省技术发明一等奖，为我国航天事业的发展提供了重要的技术支持。

刘延芳，哈尔滨工业大学，建立了多自由度宇航空间机构的场-力等效转换理论模型，为微低重力模拟提供了理论基础。补偿力施加机构：发明了一类具有三自由度质心随动功能的补偿力施加机构，可更精准地模拟微低重力环境下物体的运动。双层大跨度大惯性吊点水平跟踪技术：发明了双层大跨度大惯性吊点水平跟踪技术，提高了悬吊法微低重力模拟的精度和稳定性。主被动复合式高精度恒拉力控制技术：发明了主被动复合式高精度恒拉力控制技术，解决了恒力输出难题，提升了模拟效果的真实性和可靠性。申请了大量与模拟零重力技术相关的发明专利，涵盖恒张力机构、气浮式零重力模拟试验技术等多个方面，多专利已获得授权，为技术的产业化应用奠定了基础。其研究成果获得了国家技术发明奖二等奖、黑龙江省科学技术一等奖等多项奖励，得到了学术界和工业界的广泛认可。

单晓杭，浙江工业大学机械工程学院，教授级高工，在模拟零重力技术方面开展了深入研究并取得了显著成果。单晓杭团队在大型太阳翼机构近零阻力驱动的零重力环境地面模拟方法方面取得重大突破，为神舟十六号地面测试提供了环境基础，确保太阳翼在太空环境下成功展收。团队研发的国内唯一大型太阳翼超低频模态测试系统，为太阳翼的性能测试提供了强力保障，完成太阳翼地面测试 330 余次，助力 220 余次航天器顺利发射。国内首套大型太阳翼零重力环境模拟系统：成功研制国内首套大型太阳翼零重力环境模拟系统，实现了对大型太阳翼机构展开及其地面测试设备长距离随动同步技术的突破。悬吊式零重力模拟系统的水平位置随动技术：在悬吊式零重力模拟系统的水平位置随动技术方面，单晓杭团队的研究成果有助于提高零重力模拟的精度和稳定性。

马广程，研究内容主要在微重力振动隔离系统的动态建模与控制方面。

微重力振动隔离系统的动态建模与控制：在 2023 年发表论文《Dynamic Modeling and Control for a Double-State Microgravity Vibration Isolation System》，研究了微重力振动隔离系统的动态建模与控制。

有限时间自适应控制：2024 年在《NONLINEAR DYNAM》期刊上发表论文《Finite-time adaptive control for microgravity vibration isolation system with full-state constraints》，探讨了具有全状态约束的微重力振动隔离系统的有限时间自适应控制。

分层控制：2024 年在《IEEE T AERO ELEC SYS》期刊上发表论文《Hierarchical Control for Microgravity Vibration Isolation System: Collision Avoidance and Execution》，研究了微重力振动隔离系统的分层控制，包括碰撞避免和执行。

自适应神经控制：2023 年在《ACTA ASTRONAUT》期刊上发表论文《Adaptive neural control of microgravity active vibration isolation system subject to output constraints》，针对输出约束的微重力主动振动隔离系统进行了自适应神经控制研究

朱战霞，研究领域主要集中在竖直方向零重力补偿技术以及悬吊式零重力模拟系统。

竖直方向零重力补偿技术：2018 年参与设计的竖直方向恒力补偿装置，利用主动悬吊法补偿机械臂的重力，并通过二维直线运动单元主动跟随机械臂运动，保证吊丝拉力方向的竖直。

悬吊式零重力模拟系统：2018 年参与研究的悬吊式零重力模拟系统，采用可消除系统干扰的随动控制方法，提出基于干扰力对时间积分为零的随动控制方法，并构造基于调节吊索摆角的随动控制系统。同时，提出基于 PSD 和激光自准直技术的吊索空间摆角测定方案，用于目标体位置的高精度、高帧频测量。

表 3 国内索驱动机器人模拟零重力微重力相关发明人

发明人	专利数量	所在单位	主要研究动向
齐乃明	62	哈尔滨工业大学	空间机械臂零重力试验/研制了多套飞行运动模拟器
霍明英	46	哈尔滨工	六自由度气浮式零重力模

		业大学	拟系统
奚晓鹏	29	北京戴纳实验科技有限公司;	主被动复合式高精度恒拉力控制技术
刘延芳	28	哈尔滨工业大学	恒张力机构、气浮式零重力模拟试验技术
单晓杭	27	浙江工业大学	大型太阳翼零重力环境模拟系统
夏红伟	26	哈尔滨工业大学	飞行器控制及仿真技术、智能导航定位技术及其应用、机器视觉及其应用技术
马广程	25	哈尔滨工业大学	微重力振动隔离系统的动态建模与控制方面
李鹏	24	天津航天机电设备研究所	微低重力模拟技术、多自由度零重力补偿技术等
朱战霞	24	西北工业大学	竖直方向零重力补偿技术以及悬吊式零重力模拟系统

3.2.7 专利运营情况

专利运营主要包括专利转让、许可、质押融资等方式。在索驱动机器人模拟低重力环境的技术领域，鉴于该技术的高端性与集中性，

产生的相关运营活动较少，索驱动机器人模拟零重力专利转让呈现出企业与高校共同参与、转让数量相对均衡的特点。企业如伸瑞科技(北京)有限公司等，凭借自身在相关领域的市场敏锐度和技术应用能力，积极受让专利，推动技术向实际产品的转化；高校如哈尔滨工业大学、西安电子科技大学等，依托强大的科研实力和研发团队，在技术研发和专利产出方面具有优势，通过转让专利将科研成果转化为实际生产力，促进技术的推广和应用。转让数量集中在 4 项或 3 项，表明专利价值和市场需求相对稳定，各方对技术的商业化前景持乐观态度，推动了索驱动机器人模拟零重力技术在不同领域的应用和发展。

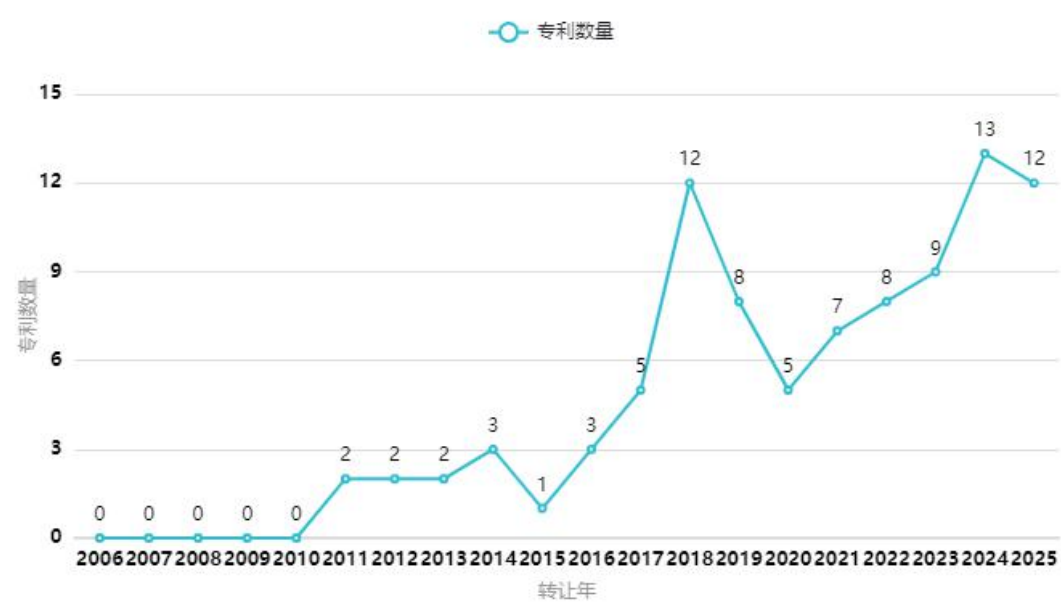


图 20 索驱动机器人模拟零重力专利转让趋势

表 4 索驱动机器人模拟零重力专利转让情况

转让人	专利数量
伸瑞科技(北京)有限公司	4
哈尔滨工业大学	4
四川泛美智慧实业有限公司	4
成都泛美视界科技有限公司	4
西安电子科技大学	4
重庆幻羽科技有限公司	4
宁波康福特健身器械有限公司	3

山东大学	3
中国电子科技集团公司第十八研究所	2
中国电子科技集团公司第四十一研究所	2

3.3 小结

本章围绕模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术，展开了全面而深入的专利态势分析，旨在揭示该技术在全球及中国的发展脉络、竞争格局与创新主体分布。全球模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利申请自 1958 年起经历了低谷到显著增长的过程。1958 年至 1960 年代因技术刚起步申请量低，1970 年代缓慢增长，1980 年代商业化推动下增长显著，1990 年代增速放缓，2000 年代波动中于 2005 年达小高峰，2010 年代回升并于 2016 年后快速增长。专利技术发展历经初步探索、技术发展、快速发展及高端应用与国际化四个阶段。国外技术起步早且成果丰富，中国近年成为专利申请增长的重要力量。专利布局上，中国自 2010 年起呈指数级增长，2019 年达峰值 307 项。全球专利申请主要集中在少数国家，中国表现突出，日本起步早但近年增长放缓，美国稳定增长，韩国和德国申请量适度增加。重要创新主体中，韩国航空宇宙研究院以 126 项专利领先，三菱重工、三菱电机等企业也在机械设计、控制系统等方面各有创新贡献，共同推动了索驱动机器人技术的发展。

中国模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利申请趋势可分为四个阶段：20 世纪 80 至 90 年代的初步探索，21 世纪初至 2010 年的技术发展，2010 至 2020 年的快速发展，以及 2020 年至今的高端应用与国际化。申请趋势显示，2000 年前该领域研究开发活动不

活跃，2000 年后开始增加，2010 年后增长显著，2016 年达高峰，2017 年后波动但 2020 年出现小高峰。专利布局方面，北京、上海、黑龙江、江苏、浙江等地申请数量较多，其中北京以 798 件居首。申请人类型中科研单位、学校和企业是主要力量，科研单位申请量居首。申请人主体上，哈尔滨工业大学以 296 项专利领先，北京卫星环境工程研究所等紧随其后。专利技术分析显示，国内在模拟零重力环境相关技术领域成果涵盖多个应用领域，技术创新活跃。主要技术人才如齐乃明、霍明英等在该领域取得显著成果，为技术发展提供支撑。

第四章 索驱动机器人技术热点分析

随着全球对航天探索和深海作业的投入不断增加，模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术的研发和创新也日益活跃，专利申请数量逐年攀升，反映出该领域的竞争态势愈发激烈。本章将深入剖析模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的专利核心技术，旨在揭示其技术发展脉络、创新趋势以及主要创新主体的技术布局。

4.1 驱动系统技术热点

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人驱动系统技术是一种通过绳索驱动来模拟太空或其他低重力环境的关键技术。其核心在于利用多根绳索连接机器人负载平台与驱动单元，通过高精度的电机控制和传感器反馈，实现对负载平台的精确力和位姿控制。例如，九索驱动方案采用“上六下三”的绳索布局，上方六根绳索控制负载平台的六自由度运动，下方三根绳索用于力的张紧或补偿。

系统通过传感器实时监测负载平台的受力和位姿状态，结合索张紧力优化分配算法，计算出每根绳索所需的拉力和长度变化指令，进而驱动电机实现绳索的伸缩。这种技术不仅能够模拟零重力或低重力环境下的复杂运动，还可以施加干扰力以模拟真实环境中的外力作用，具有工作空间大、承载能力强、控制精度高、安全性好等优点，广泛应用于航天器地面验证试验、宇航员训练以及康复器械等领域。

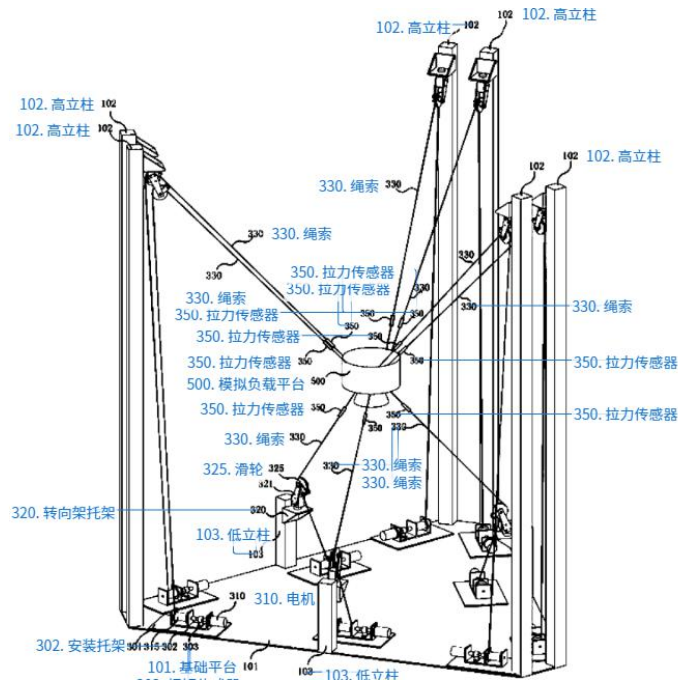


图 21 索驱动系统典型装置图

4.1.1 高精度索驱动系统

高精度索驱动系统是索驱动机器人的核心部件之一，其主要功能是通过精确控制索的张力和长度，实现机器人的精确运动。该系统通常采用高精度的电机和传动装置，结合先进的控制算法，确保索的运动精度和稳定性。它通常由多根绳索连接驱动单元与负载平台，通过电机驱动绳索的伸缩来实现负载平台的精准运动控制。该系统具备高精度的运动控制能力，能够精确地调节绳索的长度和张力，从而实现负载平台在空间中的六自由度运动，模拟出零重力或低重力环境下的物体运动状态。其控制系统会根据传感器反馈的力和位姿数据，对每根绳索进行闭环或半闭环控制，确保运动的精准性和稳定性。

专利名称/申请人/申请日	技术优点	技术待改进
一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置 (CN104443448A) 清华大学 2014-12-18	八根绳索空间对称布局, 控制精度较高; 可模拟零重力或低重力环境下的运动, 应用前景广阔; 可通过叠加外部干扰力, 增强模拟环境的多样性	绳索数量较多, 系统复杂度相对较高, 可能影响系统的可靠性和维护成本
一种模拟零重力和低重力的九索驱动机器人装置 (CN104477420A) 哈尔滨工业大学 2014-09-28	九索冗余驱动方案, 系统冗余度和可靠性高; “上六下三”布局, 对模拟负载平台的位姿和运动控制更灵活; 干扰力模拟更灵活, 环境真实性高	绳索数量多, 控制系统复杂, 可能导致成本上升; 下方三根绳索的力张紧或补偿控制可能存在一定的精度挑战
一种高速高精度目标平面运动模拟装置 (CN107526339A) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 2017-09-29	高精度运动控制, 满足高精度要求; 结构简单, 易于拆装和维护; 适应性强, 可适应不同运动轨迹和速度要求	主要针对平面运动模拟, 对于复杂空间运动的模拟能力有限; 对控制系统的实时性和精度要求较高
一种刚柔耦合式微重力环境模拟训练装置 (CN114141097A) 中国运载火箭技术研究院 2021-03-31	高精度力交互控制, 模拟力交互过程真实; 结构简单, 易于控制和维护; 应用前景广阔, 可扩展到多个领域	对力觉传感器的精度和可靠性要求较高; 刚柔耦合式设计可能在某些复杂情况下导致动力学建模和控制难度增加
追随式零重力模拟试验方法 (CN101482455A) 中国空间技术研究院	有效克服阻力和外界干扰力, 模拟零重力状态真实; 应用适应性强, 适用	主要适用于空间可展开机械装置的展开试验, 应用场景相对局限; 对导轨

2008-01-23	于多种空间可展开机械装置；可在真空环境中进行试验，技术支持性强	和吊索等机械部件的精度和稳定性要求较高
------------	---------------------------------	---------------------

表 5 高精度索驱动系统专利技术迭代热点

4.1.2 柔性索驱动系统

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的柔性索驱动系统是一种通过多根绳索（如八根或九根）协同工作，模拟物体在零重力或低重力环境下受力及六自由度运动的装置。该系统由基础框架、绳索、绳索驱动单元、绳索导向装置、模拟负载平台、传感器和控制系统组成。绳索的一端连接在绳索驱动单元上，另一端通过绳索导向装置连接在模拟负载平台，通过电机驱动绳索的伸长或缩短，控制系统根据传感器测得的绳索受力和位移数据，对每根绳索的长度和拉力进行反馈控制，从而实现对模拟负载平台的精确位姿控制和力施加，以模拟出零重力或低重力环境下的物体运动状态。这种系统在航天领域具有重要应用价值，可用于模拟飞行器在空间的运动状态和羽流扰动，为航天员训练和空间机器人研发提供关键技术支持

专利名称/申请人/申请日	技术优点	技术待改进
US5110294A Deutsche Forsch Luft Raumfahrt 1990-03-16	创新性地提出了一种通过绳索悬架和配重系统来模拟机械手在空间中的操作，解决了传统二维仿真无法真实模拟空间操作的问题。通过偏心绳索联动装置，最大限度地减少了机械手和绳索之间的碰撞，提高了仿真系统的可靠性和精度。	该专利主要针对航天器机械手的地面模拟，应用场景相对较窄。且系统较为复杂，需要较多的组件进行协同工作，可能在实际操作中存在一定的调试和维护难度。
DE102017108847B3 Deutsches Zentrum Für Luft Und Raumfahrt E.V. 2017-04-19	创新性地将卫星处理装置与机器人技术相结合，实现了卫星在不同工作站之间的高效运输和精确处理。通过移动平台和机器人的协同工作，简化了卫星处理过程中的操作步骤，减少了对复杂设备的依赖。	该专利主要针对卫星的地面处理，对于其他类型的索驱动应用场景可能不具有直接的适用性。且装置的移动平台和机器人系统需要较高的精度控制，对技术要求较高。
CN107757955A 北京卫星环境工程研究所 2016-08-15	创新性地提出了一种通过二维随动平台和恒拉力控制单元来实现多关节空间机构的重力卸载，解决了传统方法无法满足高精度和高适应性的问题。通过力传递机构的设计，实现了对多关节空间机构的全自由度微重力模	该专利主要针对多关节空间机构的重力卸载，对于其他类型的索驱动应用场景可能需要进行一定的调整和优化。且力传递机构较为复杂，可能在实际应用中存在一定的成本和维护问题。

	拟，提高了重力卸载的精度和适应性。	
CN108382615A 上海微小卫星工程中心 2017-12-29	创新性地提出了一种通过导轨和滑车系统来实现卫星高精度有效载荷的多自由度微重力装调，解决了传统方法无法满足高精度装调的问题。通过吊索组件和伺服电机的配合，实现了对卫星高精度有效载荷的精确位姿控制，提高了装调的精度和效率。	该专利主要针对卫星高精度有效载荷的微重力装调，对于其他类型的索驱动应用场景可能需要进一步开发和改进。且导轨和滑车系统需要较高的精度和稳定性，对制造和安装要求较高。
CN108423202A 天津航天机电设备研究所 2017-01-19	创新性地提出了一种通过倒吸式轴承和滑轮组来实现航天器展开机构的微低重力模拟，解决了传统方法无法满足高精度和高适应性的问题。通过气浮技术和电磁技术的结合，实现了对导磁平板的非接触吸附，提高了装置的稳定性和精度。	该专利主要针对航天器展开机构的微低重力模拟，对于其他类型的索驱动应用场景可能需要进行一定的调整和优化。且倒吸式轴承和滑轮组系统较为复杂，可能在实际应用中存在一定的成本和维护问题。

4.2 控制系统技术热点

4.2.1 智能控制系统

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的智能控制系统是基于先进的传感器技术、控制算法和人机交互界面，实现对机器人精确

操作和实时监控的系统。该系统通过集成多种传感器，如力传感器、位移传感器和角度传感器，实时采集机器人的状态信息，并利用先进的控制算法，如模糊控制、神经网络控制和自适应控制，对机器人的运动进行精确控制。同时，系统还具备故障诊断和安全保护功能，能够及时发现并处理异常情况，确保机器人的稳定运行。

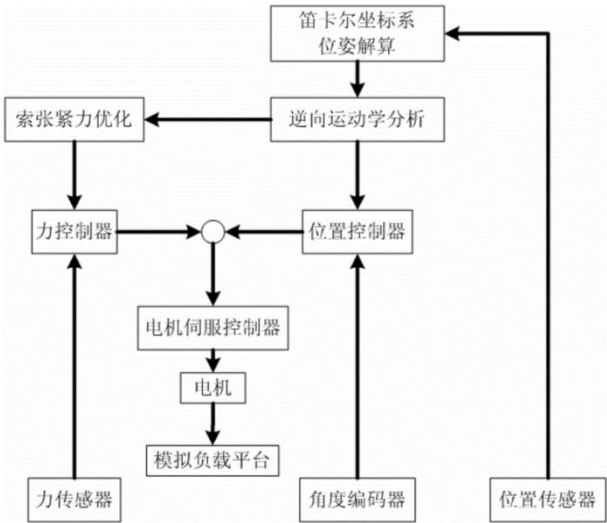


图 22 控制系统技术典型控制流程图

此外，智能控制系统还提供了友好的人机交互界面，操作人员可以通过图形化界面直观地监控机器人的工作状态，并进行远程操作和参数调整。这种智能控制系统不仅提高了索驱动机器人的操作精度和效率，还增强了其在复杂环境下的适应性和可靠性，为模拟零重力及低重力环境下的科学实验和工程应用提供了有力支持。

表 7 智能控制系统技术专利迭代热点

专利名称和申请人	技术优点	技术待改进
一种六自由度模拟器 气 浮 滑 轮 系 统 (CN112382160A) . 哈尔滨工业大学、北京	1、高精度、高频响的六自由度运动控制；2、减小摩擦，提高零重力模拟系统精度；3、主、被动恒力输出装置，实现重力动态平衡；4、提高卫星地面仿真精度；适用于六自由度卫	对气体供应有一定要求，需要稳定的气源支持气浮滑轮和气浮导向座的正常运作。

卫星环境工程研究所	星模拟器。	
基于气浮滑轮的六自由度微重力试验系统 (CN113619818A) 哈尔滨工业大学	1、实现六自由度微重力模拟；2、实时补偿喷气消耗气体的重力；3、载荷重力完全卸载，提供零重力条件；4、提高卫星地面仿真精度，适用于空间机构对接等试验。	系统复杂，涉及多个部件的精确配合，如气浮滑轮、配重框、随动框等，增加了制造和调试难度。
一种六自由度气浮式运动模拟器 (CN105321398A) 北京精密机电控制设备研究所、中国运载火箭技术研究院	1、高精度六自由度运动控制；2、iGPS 和惯性导航系统结合，提高定位和姿态控制精度；3、适用于多种空间智能飞行器的全物理仿真；4、气浮与喷气技术结合，实现高精度、高响应运动控制。	对环境适应性要求较高，例如气浮轴承和喷气喷嘴的工作效果可能受温度、气压等环境因素的影响。
一种气浮和轮式结合的卫星运动模拟器通用底盘 (CN115057014A) 上海宇航系统工程研究所	1、气浮和轮式结合，实现在气浮台上的平面内三方向可控运动；2、高精度位置和姿态控制；3、承载能力强、控制精度高、加速效果好；4、适用于全尺寸全物理的卫星姿态和轨道控制模拟。	对控制系统的实时性和准确性要求极高，因为要处理来自多个传感器的数据并进行复杂的路径规划和运动控制。
一种微低重力模拟装置及模拟试验方法 (CN108423202A) 天津航天机电设备研究所	1、无摩擦、非接触的运动控制；2、实现悬吊点在三维空间内的精确运动控制；3、采用倒吸式轴承结合气浮技术和电磁技术，创新性强。	对电磁系统的稳定性要求高，电磁体线圈电流的精确控制难度较大。

4.2.2 多自由度运动平台

模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的多自由度运动平台是一种专为模拟外太空微重力或低重力环境而设计的高精度设备。该平台通过复杂的索驱动机制和先进的智能控制系统,能够实现多个自由度的精确运动,包括平动、转动以及各种复合运动,从而为机器人提供全方位的运动模拟。其高度灵活的运动能力,使得机器人能够在模拟的零重力或低重力环境中进行各种复杂的操作和实验,为航天技术的研究与发展提供了重要的地面测试手段。

专利名称	申请人	技术优点	技术待改进
一种多自由度运动模拟平台	北京航空航天大学; 北京航空航天大学 宁波创新研究院	解决了传统模拟平台偏航角度受限的问题,动态性能高,驱动部件不运动,减小惯性负载。	系统较为复杂,需要八根绳索及多个导向装置和吊机机构。
一种多自由度平台	北京航空航天大学; 北京航空航天大学 宁波创新研究院	实现了负载框架在三维空间内的六自由度运动,满足大范围偏航需求,动态性能高,可驱动较大负载。	对弧形框架和转盘的结构设计要求高,制造成本可能较高。
一种多自由度运动模拟平台	南京全控航空科技有限公司	解决了传统模拟平台在多角度轴线上无法连续翻转的问题,实现了对第二三自由度模拟平台的精确控制。	绞盘系统和绳索的组合需要精确的协调,系统复杂度较高。
一种绳索牵引模拟器	中仿智能科技(上海)股份有限公司	解决了传统模拟器运动范围有限的问题,实现了对模	对控制单元的要求较高,需要精确控制上方

		拟仓的精确控制。	和下方绳索牵引装置的绳索长度变化。
一种五自由度持续载荷模拟平台	中国工程物理研究院总体工程研究所	实现了五自由度的运动模拟,能够提供持续可控的高过载及快速过载变化的环境模拟。	系统结构复杂,包括多自由度运动平台、垂直运动系统等,成本较高。
一种多自由度运动模拟平台	北京航空航天大学; 北京航空航天大学 宁波创新研究院	解决了传统模拟平台偏航角度受限的问题,动态性能高,驱动部件不运动,减小惯性负载。	系统较为复杂,需要八根绳索及多个导向装置和吊机机构。

4.3 机械结构技术热点

“模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人”的机械结构技术主要涉及多个关键组成部分,包括基础框架、绳索、绳索驱动单元、绳索导向装置、模拟负载平台、传感器和控制系统。基础框架作为整个装置的支撑结构,通常由基础平台和多根立柱组成,立柱分为高立柱和低立柱,用于安装绳索驱动单元和绳索导向装置。绳索是连接基础框架和模拟负载平台的关键部件,通过绳索驱动单元的控制,实现模拟负载平台的运动。绳索驱动单元通常由电机和滚筒组成,通过电机驱动滚筒转动,从而改变绳索的长度,实现对模拟负载平台的精确控制。绳索导向装置则用于引导绳索的走向,确保绳索在运动过程中保持稳定。

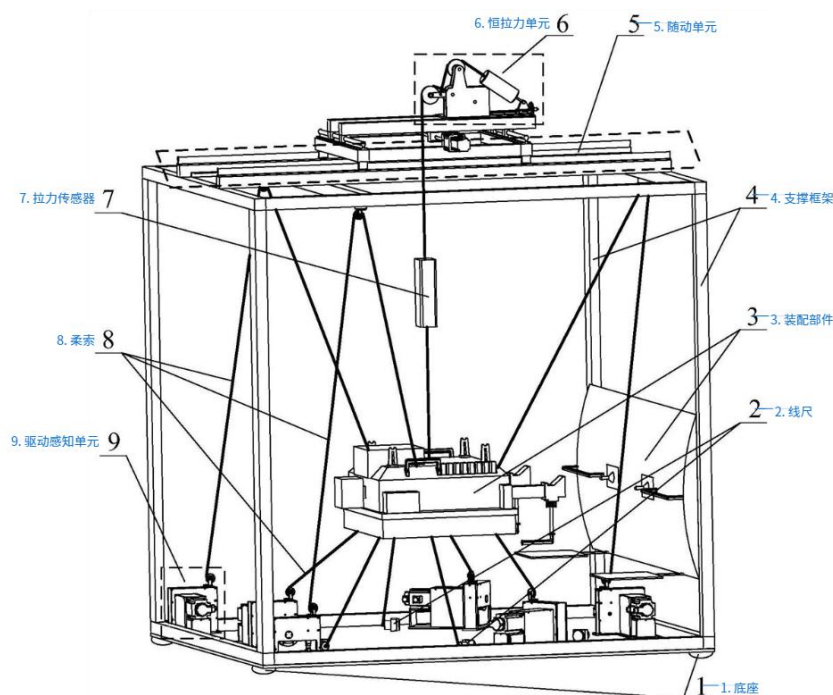


图 23 索驱动模拟低重力经典机械结构技术

模拟负载平台是整个装置的核心部分，用于模拟在零重力或低重力环境下的物体运动，其上安装有各种传感器和执行器，以实现运动状态的实时监测和控制。传感器用于测量绳索的拉力、位移以及模拟负载平台的位姿等关键参数，为控制系统提供反馈信息。控制系统则根据传感器测得的数据，计算出每个绳索需要施加的拉力和长度变化，通过绳索驱动单元实现对模拟负载平台的精确控制，从而模拟出零重力或低重力环境下的运动状态。

表 8 索驱动模拟低重力经典机械结构技术技术热点

专利名称/申请人/申请日	技术优点	技术待改进
一种用于低重力漫步的模拟系统 清华大学 2011-3-16	能够自动适应实验人员的身高和体重，在地面漫步模拟过程中实时提供精确重力补偿，操作安全、结构简单、成本低廉	相较于其他专利，未明确提及多自由度和智能化控制的创新点，可能在复杂运动模拟方面有所局限

小型绳系卫星弹射机构及其弹射方法 南京航空航天大学 2014-5-7	结构简单、工作性能稳定、弹射过程平稳、方向稳定准确，可重复多次进行绳系卫星仿真试验，具有显著的实用性和可靠性	专利主要关注于弹射机构，未明确提出在微重力模拟环境下的悬吊式重力补偿方法或动态平衡控制的创新点
用于航天器在轨失重环境模拟的大承载低刚度悬吊系统 上海卫星装备研究所 2016-12-21	能够模拟在轨失重状态并隔离外部传递至产品的振动干扰，使用方便、安装简便、工作可靠、占用空间小	相较于其他专利，未详细说明多自由度运动平台的具体实现方式，可能在复杂运动模拟方面有所局限
载人航天器密封舱泄复压地面模拟试验系统 北京空间技术研制试验中心 2018-1-16	能够正确模拟航天器密封舱在轨空间环境，解决传统试验方法中无法正确模拟密封舱热边界条件的问题，有效避免真空容器内带电设备发生真空放电现象	专利主要侧重于模拟密封舱的泄复压环境，未明确提出多自由度的运动控制或重力补偿的创新点，可能在运动模拟方面功能有限
一种模拟微重力环境物件搬运训练的装置及其摩擦力矩补偿方法 哈尔滨工程大学 2020-12-11	提出了一种能够模拟微重力环境物件搬运训练的装置及其摩擦力矩补偿方法，训练成本低、操作简单	专利主要聚焦于物件搬运训练，未明确提出在多自由度精准控制方面的创新点，可能在复杂运动模拟方面有所局限
一种多目标六自由度微重力地面模拟系统及使用方法 哈尔滨工业大学 2021-5-11	能够实现多个航天器的六自由度微重力地面模拟，具有普适性强、结构简单、全自由度动力学仿真等特点	相较于其他专利，未详细说明如何进一步提高模拟的准确性和稳定性，可能在特定制备需求下存在局限性
一种低重力环境模拟装置 上海航天设备制造总厂	提供了一种可以满足探月设备装配和测量所用的低重力	专利主要侧重于低重力环境模拟装置的结构设计，未明确

2014-5-20	环境模拟装置，便于装拆、工作可靠、精度高、使用方便	提出多自由度运动平台或智能控制算法的创新点，可能在复杂运动模拟方面有所局限
-----------	---------------------------	---------------------------------------

4.4 材料轻量化设计技术热点

轻量化设计是索驱动机器人的重要技术之一，其主要目标是通过优化材料和结构设计，减少机器人的重量，提高其在低重力环境下的运动效率。轻量化设计通常采用轻质高强度材料，如碳纤维、铝合金等，结合先进的制造工艺，实现机器人的轻量化。

表 9 材料轻量化设计专利核心热点

专利名称/申请人/申请日	技术优点	技术待改进
用于对空间飞行器的单元进行定位以对其进行测试的装置 (RU203086U1) 莫斯科航空学院 2020-10-23	主平台采用非磁性轻质材料且具有 Vaffel 结构，可减轻重量；配备独立馈电系统和车载管理计算机，具有无线连接，提高测试灵活性和准确性。	专利申请人是国外院校，技术细节和国内适配性需进一步评估；Vaffel 结构设计可能增加制造难度；未提及与其他测试设备的兼容性。
一种适用于超长轻质结构展开的地面模拟零重力试验系统 (CN111017274A) 中国运载火箭技术研究院 2019-10-30	采用二维随动+气磁混合悬吊的自适应零重力方式，实现平面内无摩擦高精度随动；解决超长结构气浮悬吊展开所需的高精度大面积平台实现难题。	系统复杂，成本较高；对操作人员的技术要求较高；维护难度大。
超大面积高收纳比轻质展开机构的展开试验装置 (CN112278337A) 上海航天设备制造总厂有限公司 2020-09-28	采用轻质材料和巧妙的多功能结构设计，确保太阳翼展开机构的可靠展开；通过倾斜设置的支撑台，	主要针对太阳翼结构，通用性有限；需进一步验证在不同环境下的稳定性。

	保证太阳翼卷轴的水平运动，提高试验精度。	
一种悬吊式微重力模拟装置及控制方法(CN109720609A) 中国空间技术研究院 2018-11-30	采用轻质材料和视觉伺服的随动控制系统，模拟精度高；适用于特定的表取采样装置微重力模拟，也可扩展到其他空间任务。	视觉伺服系统成本较高；对环境光线有一定要求，可能影响测量精度。
适用轻小着陆支架月面着陆性能验证的试验装置和方法(CN118850368A) 中国运载火箭技术研究院 2021-07-23	采用轻质材料和无线拉力传感器，提高试验测试精度；通过伺服电机与拉力机构的无级接力控制，满足大行程恒重力场试验需求。	主要针对轻小着陆支架，通用性有限；无线传感器的稳定性需进一步验证。
一种小型空间一维伸展机构地面零重力试验装置(CN103192999A) 中国科学院 2013-03-15	采用轻质材料和凯夫拉绳，设计简便易行，体积小质量轻；对环境的适应性强，可有效工作在真空及热环境条件下。	负载能力有限，仅适用于小型机构；伸展机构的精度和稳定性有待提高。

4.5 应用领域技术

4.5.1 航天领域

在航天领域，索驱动机器人被用于模拟低重力环境，帮助航天员进行适应性训练。通过精确控制索的张力和长度，可以模拟航天器在低重力环境下的运动状态，提高训练的真实性和有效性。

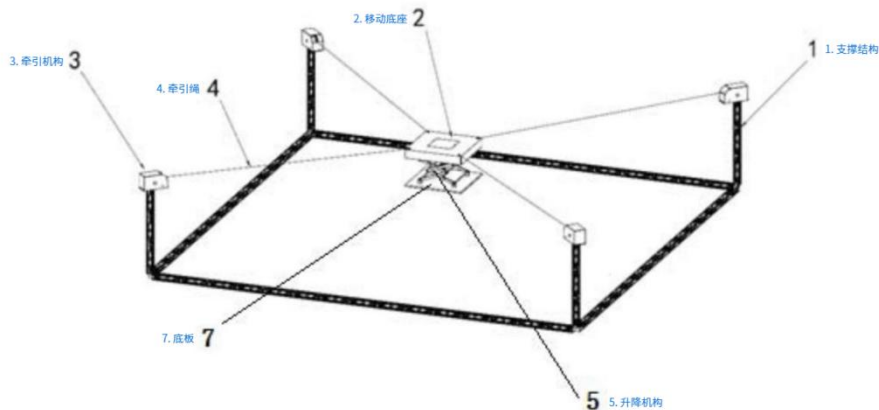


图 24 一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人附图

国家航天开发局在该领域具有显著的技术优势，其专利 CN114435629B “一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人”中，详细描述了索驱动机器人在航天领域的应用方法。该专利通过优化索驱动系统的结构和控制算法，提高了机器人的适应性和可靠性，实现了精确的航天器操作和维护。

4.5.2 医疗领域

在医疗领域，索驱动机器人被用于手术机器人的微重力操作训练。通过精确控制索的张力和长度，可以实现手术机器人的精确操作，提高手术的精确度和成功率。

曼纽科医疗器械(湖南)有限公司在该领域具有显著的技术优势，其专利 CN104443448A “一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置”中，详细描述了索驱动机器人在医疗领域的应用方法。该专利通过优化索驱动系统的结构和控制算法，提高了机器人的适应性和可靠性，实现了精确的手术操作。

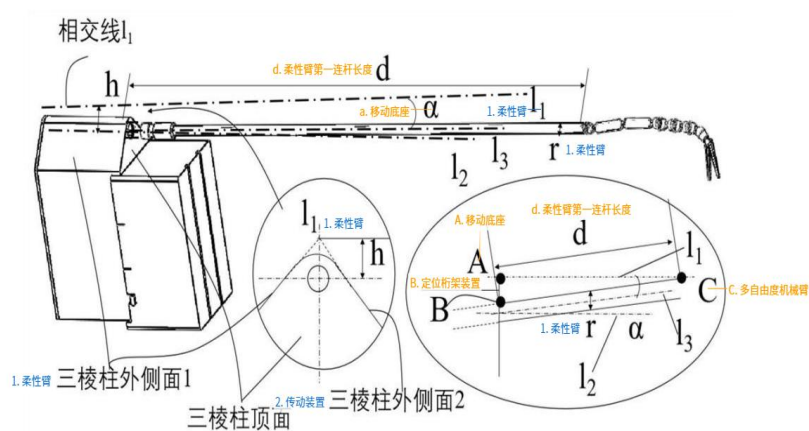


图 25 索驱动结构在医疗中的应用图

应用案例：在微创手术中，索驱动机器人被用于手术机器人的操作。例如，通过精确控制索的张力和长度，可以实现手术机器人的精确操作，提高手术的精确度和成功率。

4.5.3 工业领域

在工业领域，索驱动机器人被用于货物搬运和分拣操作。通过精确控制索的张力和长度，可以实现货物的精确搬运和分拣，提高生产效率和自动化水平。

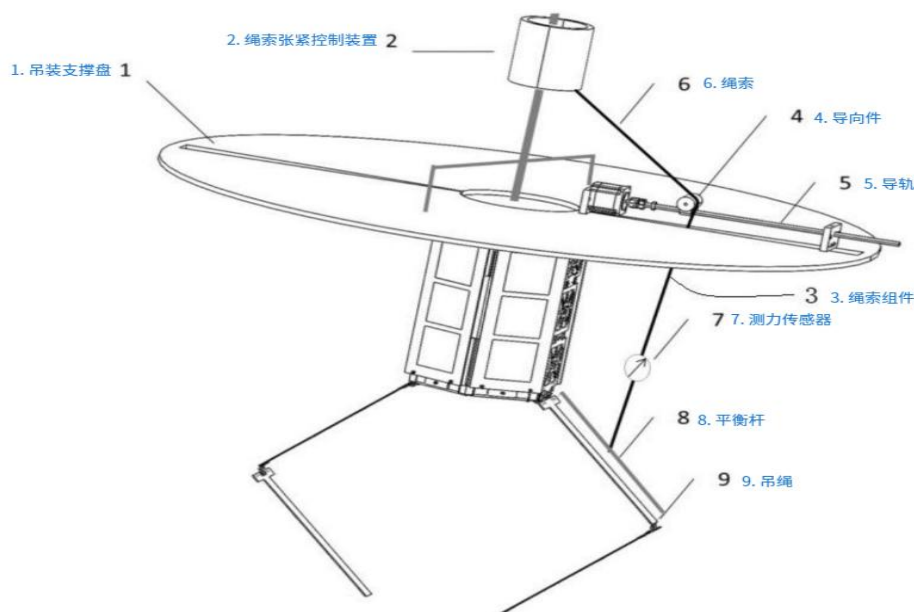


图 26 索驱动机器人被用于货物搬运和分拣操作的示意图

行远科技在该领域取得了显著的成果，其专利 CN114194424B“一种卫星抓手重力卸载装置及其使用方法”中，详细描述了索驱动机器人在工业领域的应用方法。该专利通过优化索驱动系统的结构和控制算法，提高了机器人的适应性和可靠性，实现了精确的货物搬运和分拣。

4.6 核心及热点专利

4.6.1 核心及热点专利列表

核心专利是指在特定技术领域中具有关键性、基础性和不可替代性的专利，其对应的技术是制造某种产品或提供某种服务所必须使用的，且难以通过规避设计手段绕开。本节通过检索筛选，找出以下核心专利：

公开(公告)号	标题	法律状态/事件	当前申请(专利权)人	申请日	被引用专利数量
CN109080860A	一种全域自平衡重力卸载装置	授权	燕山大学	2018-06-11	8

CN113002810A	分布式多位姿运动重力卸载宇航员地面训练系统	授权	天津大学	2021-03-31	8
CN113525733A	双层结构的六自由度微重力试验系统	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-16	8
CN106347718A	一种服务于高微重力科学实验的隔振平台	授权	中国科学院空间应用工程与技术中心	2016-11-08	7
CN114476148A	星载平板式天线重力卸载装置及方法	授权	上海卫星工程研究所	2022-01-25	7
CN110395415A	一种通用零重力卸载装置	授权	西安空间无线电技术研究所	2019-07-16	7
CN108408088A	一种基于恒力弹簧的二维展开零重力模拟装置和方法	授权	北京卫星制造厂	2017-12-26	7
CN113184234A	一种主被动混合驱动自适应重力卸载宇航员地面训练系统	授权	天津大学	2021-06-03	6
CN108394571A	模拟微重力下柔性表面粘附运动的测试平台与测量方法	授权	南京航空航天大学	2018-02-06	6
CN106114920A	一种具有负载大范围可调功能的微重力模拟张力控制机构	授权	哈尔滨工业大学	2016-06-21	6
CN108820268A	一种基于绳系可回收的无人机空间微重力控制系统和方法	授权	中国科学院空间应用工程与技术中心	2018-08-22	6
CN104443448A	一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置	授权	清华大学 山东亿九电气发展有限公司	2014-10-27	51
CN110637511B	平衡空间展开及多维运动机构重力影响的随动机构	授权 国防解密	上海宇航系统工程研究所	2015-08-27	5
CN113460338A	一种多功能天线重力卸载装置	授权	上海航天测控通信研究所	2021-07-02	5
CN205060041U	电池阵零重力展开双向驱动装置	授权	天津航天机电设备研究所	2015-09-24	5
CN113104241A	一种探测器着陆试验初始飞行状态的模拟方法及装置	授权	北京空间飞行器总体设计部	2021-02-24	5
CN113911408A	一种用于模拟重力卸载太阳翼展开机构、系统及使用方法	授权	清华大学 北京卫星制造厂有限公司	2021-11-15	5
CN212023036U	一种地面模拟航天装备维修的悬吊装置	授权	北京吾天科技有限公司	2020-04-09	5
CN208842647U	一种二维悬吊式零重力模拟装置	授权	天津航天机电设备研究所	2018-08-31	5
CN106564630A	一种用于大型抛物柱面天线展开的重力平衡与随动系统	授权	上海卫星工程研究所	2016-11-09	4
CN106542128A	大口径花瓣式空间机构地面展开试验装置	授权	上海卫星装备研究所	2016-12-07	4
CN111806734A	重力补偿系统、航天器相对运动地面悬吊实验系统及方法	授权	中国人民解放军国防科技大学	2020-07-02	4
CN115465481A	星间天线三维空间展开过程用	授权	上海卫星工程研究所	2022-09-1	4

	重力卸载装置及使用方法			5	
CN110758783A	一种航天器分离试验装置的扰动力施加机构	授权	清华大学	2019-12-10	4
CN108248901A	载人航天器密封舱泄复压地面模拟试验系统	授权	北京空间技术研制试验中心	2018-02-12	4
CN113264203A	一种多目标六自由度微重力地面模拟系统和使用方法	授权	哈尔滨工业大学	2021-05-31	4
CN113479354A	一种被动自适应分布式人体重力卸载系统	授权	天津大学	2021-06-03	4
CN102009749A	一种用于低重力漫步的模拟系统	授权	清华大学	2010-08-02	37
CN104118580A	一种低重力模拟装置及方法	授权	上海宇航系统工程研究所	2014-07-14	35
CN108423202A	一种微低重力模拟装置及模拟试验方法	授权 一案双申	天津航天机电设备研究所	2018-05-11	35
CN104477420A	一种模拟零重力和低重力的九索驱动机器人装置	授权	清华大学	2014-10-27	33
CN213323769U	一种太阳翼重力卸载装置	授权	苏州馥昶空间技术有限公司	2020-10-15	3
CN113928604A	深空探测航天器高温隔热屏性能测试装置及方法	授权	上海卫星装备研究所	2021-10-19	3
CN211969779U	一种可拆卸组合式的空间展开结构地面试验装置	授权 一案双申	航天科工空间工程发展有限公司	2019-12-31	3
CN108674700A	基于串联双杆机构的低干扰力支撑式平面位置随动跟踪系统	授权	哈尔滨工业大学	2018-05-21	3
CN113501148A	极坐标跟踪式气浮滑轮导向配重悬吊微低重力模拟系统	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-18	3
CN116080940A	双星高速交会运动时空同步模拟装置及其方法	授权 权利转移	哈尔滨工业大学	2023-03-31	3
CN110356596A	一种利用磁补偿方法模拟流体微重力环境的装置	授权	上海交通大学 上海宇航系统工程研究所	2019-07-02	3
CN114229049A	一种基于减重配重和倾角感应的低重力模拟装置及方法	授权	北京控制工程研究所	2021-11-25	3
CN208731250U	一种一维悬吊式零重力模拟装置	授权	天津航天机电设备研究所	2018-08-31	3
CN113928605A	一种用于变质量负载的微低重力环境模拟装置与方法	授权	华中科技大学 天津航天机电设备研究所	2021-11-15	3
CN103979121A	一种含谐波传动的空间机械臂模拟装置	授权	清华大学	2014-04-30	27
CN108033039A	一种可调姿态的索驱动太空悬浮装配状态模拟装置	授权	清华大学	2017-12-21	27

CN106081173A	三维主动悬吊式空间飞行器微重力模拟装置	授权	哈尔滨工业大学	2016-07-19	26
CN106477074A	一种新型航天器在轨超静失重环境模拟试验系统	授权	上海卫星装备研究所	2016-11-29	23
CN107933980A	主被动结合式悬吊零重力模拟系统和模拟方法	授权	哈尔滨工业大学	2017-11-17	23
CN103253385A	一种空间六自由度受控与失重模拟装置	授权	哈尔滨工业大学	2013-05-29	21
CN107757955A	多关节空间机构重力卸载装置	授权	北京卫星环境工程研究所	2017-09-18	21
CN106516181A	用于航天器在轨失重环境模拟的大承载低刚度悬吊系统	授权	上海卫星装备研究所	2016-11-09	21
CN112520077A	空间机械臂悬吊微重力模拟方法	授权	天津航天机电设备研究所	2020-11-05	21
CN104290932A	空间机构六自由度微重力模拟实现系统纵向重力补偿装置	授权	哈尔滨工业大学	2014-10-21	21
CN110171584A	批量化生产卫星星座系统真空热试验方法	授权 权利转移	上海中科辰新卫星技术有限公司	2019-06-19	20
CN103964001A	小型绳系卫星弹射机构及其弹射方法	授权	南京航空航天大学	2014-03-28	20
CN105905320A	一种具有偏航随动的主动重力补偿系统	授权	北京航空航天大学	2016-06-13	20
CN109515769A	多星悬吊式微重力模拟系统	授权	哈尔滨工业大学	2018-11-26	20
KR1020200061775A	접이식 매커니즘 전개 시험을 위한 0g 시험 장치	授权	한국항공우주연구원	2018-11-26	2
CN113479356A	哑铃形气浮滑轮纵向重力补偿装置	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-16	2
CN104085542A	一种旋转运动航天器传输系统	授权	北京卫星环境工程研究所	2013-11-27	2
CN113697135A	微重力展开装置	授权	上海航天设备制造总厂有限公司	2021-09-02	2
CN110304285A	单端承载旋转释放装置	授权	北京强度环境研究所 中国运载火箭技术研究院	2019-07-09	2
CN114633905A	利用有高度落差的设施进行微重力实验的装置	授权	中国科学院国家空间科学中心	2022-03-29	2
CN214776673U	一种零重力展开装置	授权 一案双申	北京九天微星科技发展有限公司 唐山九天微星航天科技有限公司	2021-02-19	2
CN116767519A	一种磁气重力平衡航天模拟器对接试验装置	授权	哈尔滨理工大学	2023-06-18	2
US20180134420A1	Apparatus for driving	授权	KOREA INSTITUTE OF	2015-12-0	19

	three-dimensional microgravity cable	期限延长	INDUSTRIAL TECHNOLOGY	9	
CN103662109A	一种模拟月面微重力装置	授权	上海宇航系统工程研究所	2013-11-20	19
CN108001713A	双星组合体航天器在轨分离地面试验装置及检测方法	授权	上海卫星装备研究所	2017-11-20	17
CN109625344A	柔性伸展臂一体化展开微重力补偿控制系统	授权	上海卫星装备研究所	2018-12-12	16
CN109760860A	一种双臂协同抓捕非合作旋转目标的地面试验系统	授权	上海航天控制技术研究 所	2018-12-11	14
CN107539502A	用于航天器环境试验的调温调压装置	授权	北京卫星环境工程研究 所	2016-07-18	13
CN111086662A	一种适用于多自由度实验对象的三维主动重力卸载装置	授权	哈尔滨工业大学	2019-12-31	13
CN106697340A	一种体验微重力的装置	授权	北京航空航天大学	2017-02-24	13
CN113619818A	基于气浮滑轮的六自由度微重力试验系统	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-16	13
CN109625345A	一种多维动态微重力环境模拟方法及系统	授权	上海航天控制技术研究 所	2018-12-13	12
CN104129510A	一种防干涉微低重力补偿系统	授权	天津航天机电设备研究 所	2014-08-18	12
CN111038748A	一种气浮支撑三维主动移动的重力卸载装置	授权	哈尔滨工业大学	2019-12-31	11
CN112407345A	空间机械臂悬吊微重力模拟装置	授权 一案双 申	天津航天机电设备研究 所	2020-11-05	11
CN112340071A	大型重载气浮悬挂展开试验装置与测试方法	授权	上海卫星装备研究所	2020-11-13	11
CN105539889A	一种悬吊式无重力模拟试验床及其使用方法	授权	上海交通大学	2015-12-29	10
CN112498754A	一种模拟微重力环境物件搬运训练的装置及其摩擦力矩补偿方法	授权	哈尔滨工程大学	2020-11-16	10
CN104803015A	大扬程气浮高精度重力卸荷装置	未缴年 费	哈尔滨工业大学	2015-05-09	10
CN109383852A	一种适用于真空罐的卷筒式伸杆天线零重力补偿装置	授权	北京航空航天大学 北 京空间飞行器总体设计 部	2018-12-19	1
CN209351630U	空间姿态模拟台高精度轴系稳定系统	授权	九江精密测试技术研究 所	2018-10-18	1
DE102023108354A1	Vorrichtung zur Simulation der Schwerelosendynamik eines freitreibenden	授权	DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V.	2023-03-31	1

	Gegenstandes im Raum unter Gravitationseinwirkung				
CN214296514U	超大面积高收纳比轻质展开机构的展开试验装置	授权 一案双申	天津航天机电设备研究所	2020-11-20	1
CN112278337A	超大面积高收纳比轻质展开机构的展开试验装置	授权 一案双申	天津航天机电设备研究所	2020-11-20	1
CN216887274U	一种模拟微重力效应的装置	授权	中国科学院城市环境研究所	2021-12-15	1
CN110844127A	航天飞行器舱分离试验用吊运缓冲系统	授权	西安航天动力试验技术研究所	2019-10-25	1
CN115636115A	太阳翼二次展开重力卸载试验装置	授权	哈尔滨工业大学	2022-10-28	1
CN113428391A	一种结合气浮球轴承与气浮平面止推轴承的单球式气浮滑轮装置	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-09	1
CN117864443A	电磁弹射式微重力实验装置用隔振实验舱及其实验方法	授权	中国科学院空间应用工程与技术中心	2023-12-18	1
CN113859592A	空间飞行器舱门零重力平衡展收试验装置及使用方法	授权	上海航天设备制造总厂有限公司	2021-10-14	1
CN108163231A	一种吊挂装置	授权	中国科学院沈阳自动化研究所	2016-12-07	0
CN105151332B	空间飞行器全物理地面仿真系统推力装置	授权	哈尔滨工业大学	2015-09-07	0
CN115783317A	一种多自由度空间机械臂重力平衡悬吊装置	授权	中国科学院沈阳自动化研究所	2022-11-28	0
CN221541982U	一种用于模态试验中的悬吊装置	授权	天津航天瑞莱科技有限公司 北京强度环境研究所	2023-12-25	0
CN111572824A	一种模拟空间自由目标的目标装置	授权	上海航天控制技术研究所	2020-05-19	0
CN207791198U	一种失重模拟试验装置及系统	授权	智凌云科技(北京)有限公司	2017-10-09	0
CN215399396U	一种二维悬挂式重力卸载装置	授权	西安科佳光电科技有限公司	2021-08-09	0
CN115320897A	非对称侧板二维展开太阳翼的重力卸载装置及其配重计算方法	授权	北京空间飞行器总体设计部	2022-07-20	0
CN113928606A	一种航天器多次对接与分离信号模拟装置	授权	北京卫星环境工程研究所	2021-11-22	0
CN207208499U	一种转接臂卸载装置	授权	西安三石航天科技有限公司	2017-06-26	0
CN114229051A	空间站舱外电动工具的旋钮功	授权	北京卫星环境工程研究	2022-01-2	0

	能考核的热真空试验装置		所	5	
CN112977898A	一种地基周期性倾斜轨道低重力环境模拟设施	授权	中国科学院力学研究所	2021-03-29	0
CN117246536A	一种用于多级可展开遮光罩的重力卸载系统	授权	天津航天机电设备研究所	2023-11-20	0
CN219029775U	一种组合式红外加热笼	授权	西安中科西光光电科技有限公司	2022-12-21	0
CN218055675U	航天航空高强度抗振展开结构	授权 权利转移	上海飞野航空科技有限公司	2022-09-14	0
CN222496662U	一种可调节式航天机械支撑装置	授权	航天星云(广州)科技有限公司	2024-06-21	0
CN212023035U	一种模拟微重力环境的火箭分离试验装置	授权 质押	长沙天仪空间科技研究院有限公司	2019-12-06	0
CN117864442A	一种地下真空管弹射式微重力实验装置及实验方法	授权	中国科学院空间应用工程与技术中心	2023-12-18	0
CN117818914A	地外天体探测与软着陆 GNC 分布式地面模拟装置及方法	授权	哈尔滨工业大学	2024-03-04	0
CN116513508A	一种空间对接机构重力卸载实验平台及其使用方法	授权	北京航空航天大学	2023-04-04	0
CN114590422A	一种用于空间机构复合运动微重力展开的三摇臂试验装置	授权	天津航天机电设备研究所	2022-05-09	0
JP6230779B2	宇宙探査機開発テストベッドシステム	授权	ザ・ボーイング・カンパニー	2012-07-06	0
CN109398768A	适用于空间站舱段级航天器的超大红外热流模拟装置	授权	北京卫星环境工程研究所	2018-10-23	0
CN113120261A	一种地面模拟航天员操控仪器设备的辅助装置	授权	北京吾天科技有限公司	2021-04-30	0
CN115072014A	一种适用于空间对接模拟的无级变载重力平衡装置	授权	哈尔滨工业大学	2022-08-22	0
CN212423541U	交变磁场模拟及测试装置	授权	浙江工业大学	2020-05-13	0
CN212423543U	基于磁悬浮的太阳翼大型测试系统	授权	浙江工业大学	2020-05-13	0
CN213705825U	一种太空行走模拟装置	授权	北京中高睿嘉会展有限公司	2020-10-20	0
CN113636116A	哑铃形变径气浮滑轮纵向重力补偿装置	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-16	0
CN114194424A	一种卫星抓手重力卸载装置及其使用方法	授权	清华大学 北京卫星制造厂有限公司	2021-12-10	0
CN221820253U	一种具备克服重力及滚动摩阻功能的空间系绳机构地面验证装置	授权	中国人民解放军战略支援部队航天工程大学	2024-05-15	0
CN116062198A	面向超大型航天结构的虚实融	授权	中山大学 中山大	2023-04-0	0

	合地面试验系统及方法		学·深圳	6	
CN114852382A	一种小天体探测附着机构地面多模式力混合测试平台	授权 一案双申	中国科学院沈阳自动化研究所	2022-04-26	0
CN217260716U	小天体探测附着机构地面多模式力混合测试平台	授权 一案双申	中国科学院沈阳自动化研究所	2022-04-26	0
CN220147586U	一种悬吊式低重力模拟装置	未缴年费	天津科技大学	2023-04-17	0
CN116062197A	绳网拖曳地面试验中的重力卸载与距离相模拟装置与方法	授权	哈尔滨工业大学	2023-03-06	0
CN113602538A	一种气浮式微重力模拟器及模拟方法	授权	哈尔滨工业大学	2021-08-12	0
CN117048862A	一种低重力落塔实验平台及方法	授权	中国科学院力学研究所	2023-10-12	0

4.6.2 核心及热点专利分析

4.6.2.1 核心专利分析

通过将索驱动机器人模拟零重力环境的专利被引用次数大于 20 次专利进行归类总结，得出在该领域所研究的核心问题与核心技术手段。

核心技术问题 1：低重力环境下航天器多自由度运动模拟

相关技术手段：利用多根绳索组成冗余并联机构，通过传感器和控制系统实时反馈控制每根绳索的长度和拉力，精确控制模拟负载平台的位姿和运动，实现六自由度运动模拟。

相关专利：CN104443448A《一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置》、CN104477420A《一种模拟零重力和低重力的九索驱动机器人装置》。

核心技术问题 2：月球车等多部件机构产品低重力行走性能模拟

相关技术手段：采用多点吊挂装置，通过多套恒张力控制系统和高响应伺服运动平台，实时跟踪并控制吊挂力，使其始终通过物体质心，从而准确获取月球车月面行走性能参数。

相关专利：CN104118580A《一种低重力模拟装置及方法》。

核心技术问题 3：航天器在轨超静失重环境模拟及微振动测试

相关技术手段：构建包括消声试验室、大承载隔振平台和大承载低刚度悬吊系统的试验系统，利用空气弹簧隔振器、低刚度悬吊系统等有效隔离地面振动和噪声，模拟航天器在轨失重状态并进行高精度微振动测试。

相关专利：CN106477074A《一种新型航天器在轨超静失重环境模拟试验系统》。

核心技术问题 4：复杂航天器可展开机构的高精度微重力试验

相关技术手段：运用倒吸式轴承、滑轮组、导磁平板、回转机构和圆弧导轨组合，结合气浮垫和磁铁机构实现非接触平衡点稳定，运用电磁技术调整吸附力，减少悬吊点惯量和摩擦，为航天器可展开机构提供三维空间内的低扰动微低重力模拟环境。

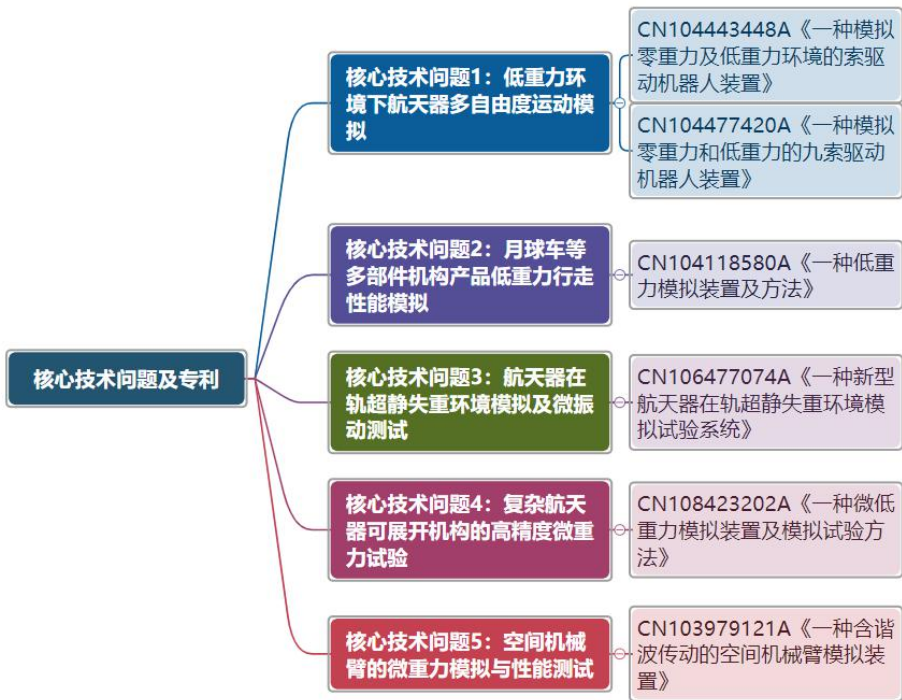
相关专利：CN108423202A《一种微低重力模拟装置及模拟试验方法》。

核心技术问题 5：空间机械臂的微重力模拟与性能测试

相关技术手段：设计含谐波传动的空间机械臂模拟装置，包含机械臂回转运动机构、微重力模拟与测试机构、臂杆刚化调节机构和运动精度测试机构，采用伺服电机驱动与谐波减速器传动，调节臂杆刚

度和悬吊绳索张力，实现微重力环境下的动力学性能测试。

相关专利：CN103979121A《一种含谐波传动的空间机械臂模拟装置》。



4.6.2.1 研究热点分析

结合近三年索驱动机器人模拟零重力环境的相关专利，请结合表格内容，将专利内容研究热点进行归类。

研究热点 1：微重力模拟装置的优化与创新

针对不同类型物体和机构的微重力模拟需求，设计出多种新型微重力模拟装置，通过采用先进的技术手段，如电磁弹射、真空竖井、气浮平台、多自由度机械臂等，提高微重力模拟的精度、稳定性和适应性，同时降低装置的复杂性和成本，为各种航天任务的地面模拟实验提供更有效、更可靠的平台。

相关专利：一种悬吊式低重力模拟装置（CN220147586U）、电磁

弹射式微重力实验装置用隔振实验舱及其实验方法（CN117864443A）、一种地下真空管弹射式微重力实验装置及实验方法（CN117864442A）、一种低重力落塔实验平台及方法（CN117048862A）、面向超大型航天结构的虚实融合地面试验系统及方法（CN116062198A）

研究热点 2：特定航天部件的重力卸载与模拟

针对航天器的特定部件，如太阳翼、星间天线、遮光罩等，在地面展开、测试和实验过程中，设计专门的重力卸载装置，以实现对这些部件在模拟太空环境中的精确重力卸载和运动模拟，确保部件在发射和在轨运行中的性能和可靠性，解决现有技术在重力卸载精度、适应性和操作便捷性方面的不足。

相关专利：一种多自由度空间机械臂重力平衡悬吊装置（CN115783317A）、太阳翼二次展开重力卸载试验装置（CN115636115A）、星间天线三维空间展开过程用重力卸载装置及使用方法（CN115465481A）、一种用于多级可展开遮光罩的重力卸载系统（CN117246536A）



图 27 三年索驱动机器人模拟零重力环境的相关专利研究热点

研究热点 3：空间任务的地面仿真与测试

围绕空间探测、空间对接、空间装配等复杂航天任务，构建地面仿真测试系统，包括模拟天体环境、引力、地形、大气等多因素的综合模拟装置，以及实现空间机构运动、对接、附着等过程的高精度模拟和测试，为任务规划、控制算法验证、系统优化等提供有力支持，降低任务风险和成本。

相关专利：地外天体探测与软着陆 GNC 分布式地面模拟装置及方法（CN117818914A）、一种空间对接机构重力卸载实验平台及其使用方法（CN116513508A）、小天体探测附着机构地面多模式力混合测试平台（CN114852382A）

研究热点 4：微重力环境下运动模拟与控制

研究如何在地面模拟微重力环境下物体的运动特性，包括设计具有多自由度运动模拟能力的装置，如气浮平台、摇臂试验装置、双轴气浮转台等，结合先进的控制技术和传感器，实现对物体运动的精确

控制和跟踪，为研究航天器的姿态控制、轨道转移、交会对接等运动特性提供实验平台，提高对微重力环境下动力学行为的理解和控制能力。

相关专利：双星高速交会运动时空同步模拟装置及其方法（CN116080940A）、绳网拖曳地面试验中的重力卸载与距离相模拟装置与方法（CN116062197A）、一种用于空间机构复合运动微重力展开的三摇臂试验装置（CN114590422A）、一种磁气重力平衡航天模拟器对接试验装置（CN116767519A）

研究热点 5：装置的结构与功能创新

对航天模拟装置的结构和功能进行创新设计，如采用高强度抗振结构、自适应分布式人体重力卸载系统、无级变载重力平衡装置等，提升装置的性能、可靠性和适用性，满足不同场景下的特殊需求，同时也推动了航天模拟技术的发展和进步。

相关专利：航天航空高强度抗振展开结构（CN218055675U）、一种适用于空间对接模拟的无级变载重力平衡装置（CN115072014A）、一种可调节式航天机械支撑装置（CN222496662U）、一种被动自适应分布式人体重力卸载系统（CN113479354A）。

4.6 小结

本章节深入剖析了模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的专利核心技术，涵盖驱动系统、控制系统、机械结构、材料轻量化设计以及应用领域等多个方面，揭示了该技术领域的创新趋势和主要创新主体的技术布局。在驱动系统技术中，高精度索驱动系统和柔性索

驱动系统是关键，通过多根绳索连接机器人负载平台与驱动单元，利用高精度电机控制和传感器反馈，实现对负载平台的精确力和位姿控制。控制系统技术方面，智能控制系统和多自由度运动平台是核心，基于先进的传感器技术、控制算法和人机交互界面，实现对机器人的精确操作和实时监控。机械结构技术涉及基础框架、绳索、绳索驱动单元、绳索导向装置、模拟负载平台、传感器和控制系统等多个关键组成部分，通过优化设计提高系统的稳定性和控制精度。材料轻量化设计通过采用轻质高强度材料和先进的制造工艺，减少机器人的重量，提高其在低重力环境下的运动效率。应用领域技术方面，索驱动机器人在航天、医疗、工业等领域具有广泛的应用前景，如航天员训练、手术机器人操作、货物搬运和分拣等。此外，章节还列出了多项核心专利，这些专利在各自的技术领域中具有关键性、基础性和不可替代性，为模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的研发和应用提供了重要的技术支持。

第五章 山东亿九电气发展有限公司专利分析

随着科技的飞速发展，企业的创新能力和知识产权保护水平成为衡量其核心竞争力的重要指标。山东亿九电气发展有限公司作为一家在电气领域具有重要影响力的企业，其专利布局和技术创新成果不仅反映了企业的研发实力，也为行业发展提供了宝贵的参考。本文通过对山东亿九电气发展有限公司的专利数据进行系统分析，从专利数量、技术领域分布、专利质量、合作情况以及核心专利分析等多个维度，深入探讨其在电气领域的创新策略和知识产权管理现状。

5.1 公司基本情况

山东亿九电气发展有限公司成立于 2009 年 6 月 23 日，位于山东省济宁市金乡县经济开发区，是一家专注于高低压成套开关设备、箱式变电站、电力变压器等电气设备研发、生产和销售的高新技术企业。公司注册资本为 10018 万元人民币，法定代表人为王长伟。公司总占地面积超过 150 亩，拥有 10000 余平方米的研发中心、成果展示中心和办公楼，以及 60000 余平方米的现代化生产车间。凭借先进的数控生产线和严格的质量管理体系，山东亿九电气发展有限公司的产品畅销全国，成为多家国内外大型企业的合格供应商。公司产品涵盖智能箱式变电站、电力变压器、高压开关柜、低压开关柜、配电箱等 100 多个型号。公司已通过 ISO9001 质量管理体系认证、ISO14001 环境管理体系认证、OHSAS18001 职业健康安全管理体系认证等多项认证。此外，公司还获得了“国家级高新技术企业”“省级专精特新企业”“省级文明单位”等多项荣誉。山东亿九电气发展有限公司以

“发展智能电力，打造智慧城市”为企业愿景，致力于为客户提供安全、优质的用电产品及服务。

5.2 专利数量与时间分布

山东亿九电气发展有限公司自成立以来，一直重视技术研发和专利申请。根据统计，截至 2024 年，该公司共申请了超过 30 项专利，涵盖了从 2011 年到 2024 年的各个时间段。专利申请数量逐年增加，尤其在 2014 年至 2020 年期间，专利申请数量显著增长，这表明公司在这一时期加大了研发投入，积极拓展技术创新领域。

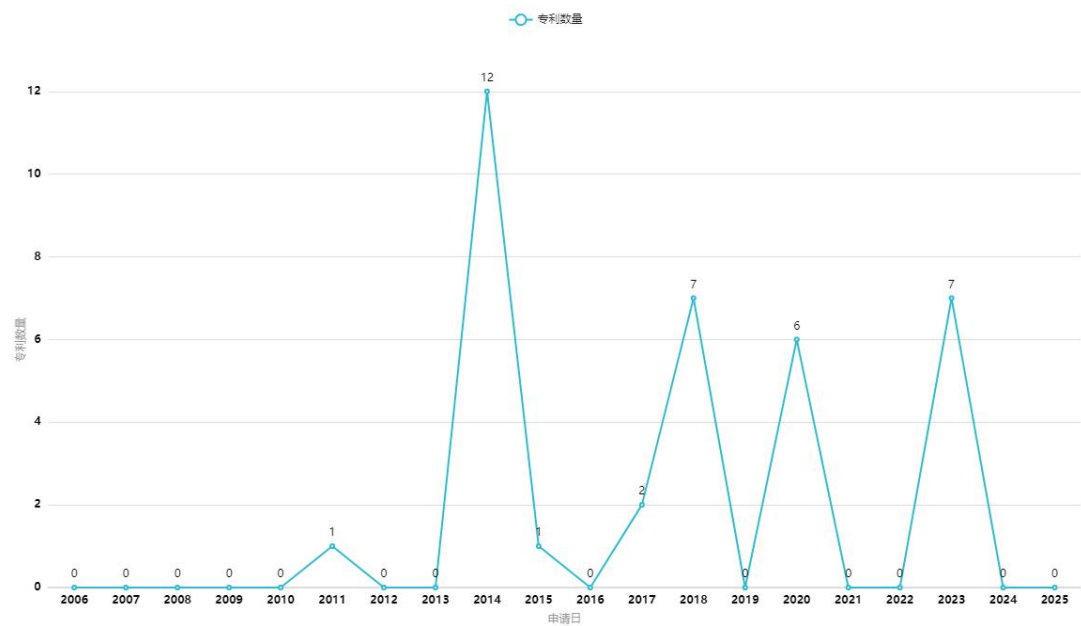


图 28 山东亿九电气发展有限公司专利申请趋势

5.3 专利类型分布

从专利类型来看，山东亿九电气发展有限公司的专利主要分为发明申请、实用新型和外观设计三种类型。其中，实用新型专利占比最高，达到 60%以上，这表明公司在具体技术改进和结构创新方面具有显著优势。发明专利占比较大，约为 30%，五件发明专利申请均已授权，显示出公司在核心技术领域的深厚积累和创新能力。

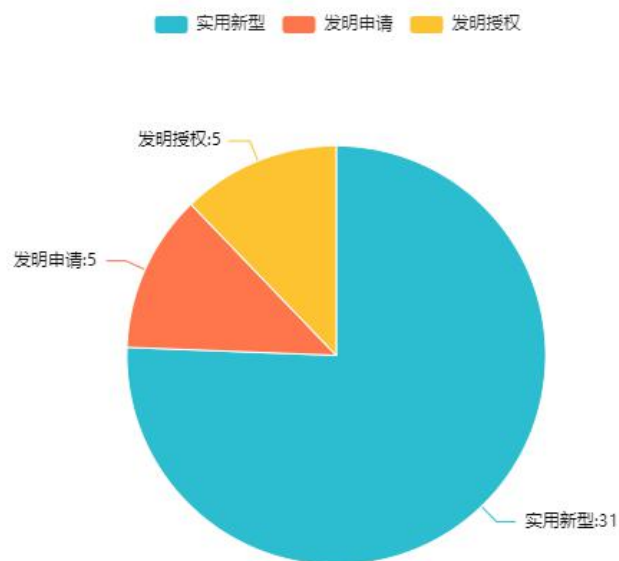


图 29 山东亿九电气发展有限公司专利类型

5.4 专利技术领域分布

山东亿九电气发展有限公司的专利技术领域广泛，涵盖了变电站、配电柜、电气连接装置、智能控制装置等多个方面。其中，变电站相关专利占比较高，包括智能变电站、箱式变电站、移动式变电站等技术领域。此外，公司在高低压开关柜、电气配件连接装置、自动化控制装置等领域的专利布局也较为完善。

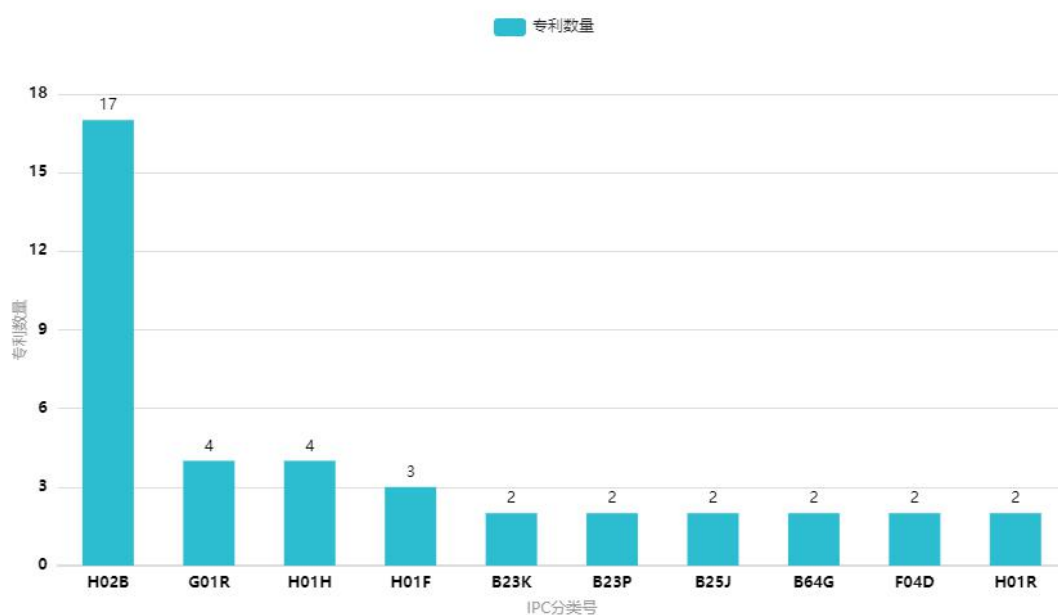


图 30 专利技术 IPC 分布



图 31 技术词云图

5.5 专利技术分析

5.5.1 专利列表

表 10 济宁亿九电气专利列表

公开（公告）号	标题(中文)	公开类型
CN111525295A	一种智能变电站电线连接器	发明授权
CN213017464U	一种电气配件的连接装置	实用新型
CN204277870U	一种配电箱组装夹具	实用新型
CN213041412U	一种变电站智能监控装置	实用新型
CN220604460U	一种电力变压器油箱	实用新型
CN204195126U	一种高低压开关柜组焊夹具	实用新型
CN204198348U	整体升降式变电站	实用新型
CN207798912U	一种便捷式单电表箱	实用新型
CN220732091U	一种基于物联网的高压开关柜	实用新型
CN202008968U	复合式塑壳断路器	实用新型
CN204205344U	一种抗击防震型箱式变电站	实用新型
CN204205332U	一种防盗型配电箱	实用新型
CN207800416U	一种高压负荷开关与下接地开关的联锁装置	实用新型
CN221352540U	一种变压器制造中的自动整形机	实用新型
CN103846649A	一种用于精密装配的两级并联机器人装置	发明授权
CN220510593U	一种低压配电柜的散热装置	实用新型
CN207542610U	一种用于户外配电箱的支架结构	实用新型
CN212968795U	一种新型箱式变电站	实用新型
CN212968796U	一种新型移动式变电站	实用新型
CN207475032U	一种具有散热结构的配电柜	实用新型
CN204194547U	一种箱变壳体冲孔模具	实用新型
CN204204556U	一种低噪音箱变壳体	实用新型

CN117117687A	一种户外高低压配电柜	发明授权
CN207798909U	一种能够实现快卸的电表箱	实用新型
CN207801303U	一种户外用防风箱式变电站	实用新型
CN104443448A	一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置	发明授权
CN204205349U	一种户外配电箱	实用新型
CN212786200U	一种新型自动化控制装置	实用新型
CN207798911U	一种组合密封式电表箱	实用新型
CN221447830U	一种安全性高的配电箱	实用新型
CN207801233U	一种智能化箱式变电站	实用新型
CN204205538U	一种电缆分支箱	实用新型
CN220628528U	一种室外用高压配电柜	实用新型
CN204205348U	一种低压成套开关柜	实用新型
CN207801304U	一种具有自调平升降功能的变电站	实用新型
CN104912831A	一种基于单片机控制的自动调温电风扇	发明授权

5.5.2 核心专利分析

1. 电力设备及配件类

一种智能变电站电线连接器 (CN111525295A)；该专利设计了一种具有熔断保护功能的智能变电站电线连接器，通过熔断丝连通两侧电线，当负荷过大时，熔断丝熔断，电路断开，解决负荷问题后可快速更换熔断丝，恢复电路。一种电气配件的连接装置 (CN213017464U)；该装置通过滑动导轨和活动滑块的设计，能够固定不同尺寸的电气配件，并通过缓冲弹簧减少振动对配件的影响。一种配电箱组装夹具 (CN204277870U)；该夹具通过可移动的伸缩臂调整夹持机构的长度，适用于不同规格的配电箱拼装，具有通用性强、操作方便的特点。一种变电站智能监控装置 (CN213041412U)；该装置包括巡检车、滚动装置、控制面板、高温警报器和数据采集装置，能够对变电站内部设备进行实时监控和录像。

2. 散热及通风设备类

一种低压配电柜的散热装置(CN220510593U)；该装置通过散热风扇、防尘网和卡合机构设计，能够有效散热并便于风扇的拆卸和更换。应用场景：适用于低压配电柜的散热，特别是在需要高效散热和便于维护的场合。一种具有散热结构的配电柜(CN207475032U)；该配电柜通过上板、下板和挡板设计，能够有效分割内部空间，提高散热效率。应用场景：适用于需要高效散热的配电柜，特别是在内部空间较大的场合。一种户外高低压配电柜(CN220510593U)；该配电柜通过固定机构、封闭机构和排气机构设计，能够在恶劣天气下保持稳定性和防护能力。应用场景：适用于户外高低压配电柜，特别是在需要防雨、防尘和高效散热的场合。

3. 自动化及智能控制类

一种用于精密装配的两级并联机器人装置(CN103846649A)；该装置通过绳索并联机构和 Stewart 并联机构组合，实现大工作空间和重载荷条件下的精密装配。应用场景：适用于航天器对接、飞机装配等需要高精度和大工作空间的场合。一种新型自动化控制装置(CN212786200U)该装置通过消防警报装置、防潮装置和散热装置设计，能够提高控制装置的安全性和可靠性。应用场景：适用于需要高安全性和可靠性的自动化控制装置，特别是在易受潮和火灾风险的场合。

4. 其他设备及配件类

一种防盗型配电箱(CN204205332U)；该配电箱通过螺栓固定在墙体上，设置红外发射器和接收器，当箱门被打开时，报警器会发出警报。应用场景：适用于需要高安全性的配电箱，特别是在户外或公共

场所。一种能够实现快卸的电表箱(CN207798909U)；该电表箱通过快卸装置设计，能够快速拆卸和安装，提高维护效率。应用场景：适用于需要频繁维护和更换的电表箱，特别是在户外或公共场所。一种户外用高压配电柜(CN220628528U)；该配电柜通过雨棚、储水槽和冷凝管设计，能够有效防雨和散热。应用场景：适用于户外高压配电柜，特别是在需要防雨和高效散热的场合。

5.5.3 专利技术特点

1. 专利数量逐年增加。公司自 2011 年开始申请专利，截至 2024 年已申请超过 30 项专利，尤其在 2014 年至 2020 年期间，专利申请数量显著增长，表明公司在这段时间内加大了研发投入，积极拓展技术创新领域。

2. 专利类型多样。专利类型包括发明授权、实用新型和外观设计，其中实用新型专利占比最高，达到 60%以上，显示出公司在具体技术改进和结构创新方面的优势。发明专利占比约为 30%，且均已授权，体现了公司在核心技术领域的深厚积累和创新能力。

3. 技术领域广泛。专利技术领域涵盖变电站、配电柜、电气连接装置、智能控制装置等多个方面，其中变电站相关专利占比较高，包括智能变电站、箱式变电站、移动式变电站等技术领域。此外，公司在高低压开关柜、电气配件连接装置、自动化控制装置等领域的专利布局也较为完善。

4. 核心技术突出。专利技术主要集中在提高设备的安全性、可靠性和维护效率。例如，智能变电站电线连接器具有熔断保护功能，能

够在负荷过载时自动断开电路；电气配件连接装置通过滑动导轨和滑动滑块设计，能够固定不同尺寸的电气配件；配电箱组装夹具通过可移动的伸缩臂调整夹持机构的长度，适用于不同规格的配电箱拼装。

5. 应用场景广泛。专利技术广泛应用于电力系统、工业自动化、户外设备等多个领域。例如，智能变电站电线连接器适用于智能变电站中需要高可靠性和快速修复的电线连接场景；电气配件连接装置适用于电气柜内安装不同尺寸的电气配件；配电箱组装夹具适用于配电箱制造过程中需要拼装不同规格箱体的场合。

6. 创新能力强。公司在核心技术领域的创新能力强，多项发明专利已授权，显示出公司在技术创新方面的深厚积累。例如，一种用于精密装配的两级并联机器人装置，通过绳索并联机构和 Stewart 并联机构组合，实现大工作空间和重载荷条件下的精密装配，适用于航天器对接、飞机装配等高精度场合。

7. 重视实用性和安全性。专利技术注重实用性和安全性，多项专利设计了防盗、防震、防眩光等功能。例如，防盗型配电箱通过螺栓固定在墙体上，设置红外发射器和接收器，当箱门被打开时，报警器会发出警报；抗击防震型箱式变电站通过弧形防震面、防眩光涂层和缓冲垫设计，能够有效防震、防眩光和防潮。

8. 关注环保和节能。部分专利设计了散热和节能功能，例如低压配电柜的散热装置通过散热风扇、防尘网和卡合机构设计，能够有效散热并便于风扇的拆卸和更换；具有散热结构的配电柜通过上板、下板和挡板设计，能够有效分割内部空间，提高散热效率。

9. 智能化和自动化。公司在智能化和自动化领域也有显著的专利布局，例如智能化箱式变电站通过滑块、导轨和传感器设计，能够实时监测变电站内部状态，提高安全性；基于单片机控制的自动调温电风扇通过单片机控制、温度传感器和涡流管设计，能够根据环境温度自动调节风速和温度。

5.6 小结

第五章详细剖析了山东亿九电气发展有限公司的专利情况，揭示了其在电气领域的创新实力与知识产权管理状况。公司自 2009 年成立以来，始终注重技术研发与专利申请，截至 2024 年已申请超 30 项专利，且专利数量逐年递增，2014 至 2020 年期间增长尤为显著。专利类型涵盖发明申请、实用新型与外观设计，其中实用新型占比超 60%，发明专利约占 30%且均已授权，彰显了公司在技术改进、结构创新及核心技术领域的深厚底蕴。技术领域方面，公司专利广泛覆盖变电站、配电柜、电气连接装置、智能控制装置等，变电站相关专利尤为突出，同时在高低压开关柜等领域的专利布局也较为完善。通过对 30 余项专利的详细列举与核心专利的深入分析，进一步凸显了公司在电力设备及配件、散热及通风设备、自动化及智能控制等多领域的技术创新与应用，其核心技术聚焦于提升设备安全性、可靠性及维护效率，广泛适用于电力系统、工业自动化、户外设备等多个场景，为行业发展提供了重要参考与借鉴。

第六章 合作伙伴及竞争对手分析

随着航天技术的快速发展，对零重力及低重力环境的模拟需求日益增加。模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人作为一种重要的地面实验设备，广泛应用于航天器设计、宇航员训练以及空间对接等研究领域。近年来，国内外多个创新主体围绕这一技术领域展开了深入研究和专利布局，取得了显著成果。本文旨在分析主要创新主体在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域的技术创新和专利布局情况，揭示各主体的技术优势和发展趋势，为相关领域的研究和应用提供参考。

6.1 清华大学

6.1.1 合作伙伴简介

清华大学(TsinghuaUniversity)是中国顶尖的综合性大学之一，位于北京市海淀区。学校成立于1911年，最初名为“清华学堂”，后历经多次变革和发展，成为涵盖理学、工学、文学、艺术学、历史学、哲学、经济学、管理学、法学、教育学和医学等多学科的综合性大学。清华大学以其严谨的学风、优秀的师资队伍和卓越的科研成果而闻名，培养了众多杰出人才，为国家的科技进步和社会发展做出了重要贡献。模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人是航天领域的重要研究方向，广泛应用于航天器设计、宇航员训练以及空间对接等任务。清华大学作为国内顶尖的科研机构，在该领域开展了深入研究并取得了显著成果。清华大学在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人方面的研究进展，包括机器人构型设计、动力学建模与分析、控制

策略开发以及实验验证等方面的工作，展示了其在该领域的技术优势和创新贡献。

6.1.2 主要技术创新

动力学模型与分析

建立运动学和动力学模型：清华大学研究人员为近端索驱动机器人建立了详细的运动学和动力学模型，深入分析了近端驱动构型的动力学特性。在此基础上，进一步分析了空间微重力环境下机器人的工作空间和加速度性能，利用线搜索法求解工作空间，并提出平移加速度空间以定量描述机器人加速度性能。

优化设计与性能提升：通过质量分布优化和参数化设计，实现了机器人的轻量化和高性能化。例如，采用轻质材料和紧凑结构设计，降低了机器人的惯性，提高了其在低重力环境下的运动灵活性和响应速度。



图 32 清华大学技术创新词云图

控制策略

自标定方法：提出了一种不依赖外部测量的自标定方法，通过惯性测量单元（IMU）位姿估计获取标定过程的动平台位姿，并利用零速度更新和零位置更新策略减小 IMU 传感器的积分漂移，从而获取动平台位姿的准确估计。

位姿估计算法：将 IMU 测量融入正运动学计算，提出了一种基于卡尔曼滤波器的机器人位姿估计算法（ESKF 算法），提高了位姿估计的精度和可靠性。

运动控制算法：设计了一种基于奇异摄动理论的级联控制方案，将复杂弹性系统分解为降阶子系统，简化了控制算法设计。在此基础上，进一步设计了反馈线性化控制和超螺旋滑模控制器，并提出了一种基于滑模扰动观测的模型预测控制器，利用扰动观测器补偿模型偏差和外部扰动，避免了滑模控制器的抖振缺陷。

实验验证

地面微重力模拟实验平台：搭建了地面微重力模拟实验平台，用于验证上述理论和算法的有效性。通过在该平台上进行实验，对自标定策略、ESKF 算法以及不同运动控制算法进行了综合评估，对比了不同控制算法的实验性能。

实验结果评估：实验结果表明，在存在多种扰动的情况下，所构建的控制策略能够达到预定的定位精度要求，验证了所提出的技术方案在模拟零重力及低重力环境中的有效性和可行性。

6.1.3 核心专利分析

表 11 清华大学索驱动模拟低重力核心专利分析表

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种用于低重力漫步的模拟系统	关立文	横梁、导轨、滑块、定滑轮等，通过液压缸、电动机驱动丝杠或直线电机驱动，实时提供恒力	自动适应身高体重，实时精确重力补偿，提高真实度，结构简单、成本低、操作安全
一种含谐波传动的空间机械臂模拟装置	阎绍泽、赵杰亮、吴嘉宁、谷勇霞	机械臂回转机构、微重力模拟机构、臂杆刚化调节机构等，伺服电机与谐波减速器传动	研究谐波减速器动力学特性，悬吊机构简单无干涉，可调臂杆刚度，扩展地面实验功能
一种模拟零重力和低重力的九索驱动机器人装置	唐晓强、邵珠峰、王伟方、汪劲松、曹凌、季益中、田斯慧、李煜琦	基础框架、九根绳索、驱动单元、导向装置等，传感器测拉力和位移，控制系统控制绳索长度或力	九绳索冗余驱动，大空间高动态，六自由度运动，“上六下三”布局各向同性好，可模拟羽流干扰
一种可调姿态的索驱动太空悬浮装配状态模拟装置	唐晓强、崔志伟、季益中、刘小光、侯森浩、孙海宁	支撑框架、线尺、装配部件、随动单元等，线尺测位姿，恒拉力单元抵重力，驱动感知单元调姿态	地面模拟太空装配，实时感知外力，任意调整姿态，研究太空装配和维修技术
一种航天器分离试验装置的扰动力施加机构	唐晓强、侯森浩、康珊珊、季益中、孙海宁、韦金昊、黎帆、李东兴	底板、预紧及自动脱离装置、力施加装置等，空气弹簧、单向离合器、扭矩离合器等	机械系统代替电机，降低复杂度，提高响应速度，多种缆盘提供大范围扰动力，保护系统安全
一种用于模拟重力卸载太阳翼展开机构、系统及其使用方法	王辉、何磊、吴动波、何鹏鹏、鲁利刚、郑树杰、姚迪、郭宇元	运动台、悬吊上部平台、恒力机构等，模拟太阳翼环向展开	高效重力卸载，结构轻便，操作可靠性高，提供可靠实验装置和过程数据
一种卫星抓手重力卸载装置及其使用方法	王辉、何磊、吴动波、何鹏鹏、韩建超、王海元、张跃、高明强、王静、张梦梦	吊装支撑盘、绳索张紧控制装置等，绳索组件连接卫星抓手，导向组件保持绳索竖直	多指单元重力卸载，完全模拟微重力测试，结构简单轻便，操作性好
模拟地外天体低重力环境冷发射起飞的试验装置及方法	隋毅、王禹衡、唐晓强、黎光宇、黄伟、	支撑框架、移动滑台系统、主动绳索系统等，模拟弹射和点火试验	首次提出模拟装置，可重复使用降低成本，绳索控制长行程大空间，柔性容错率高

	房冠辉、张剑勇、张宏伟		
--	-------------	--	--

6.2 哈尔滨工业大学

6.2.1 合作伙伴简介

哈尔滨工业大学（HarbinInstituteofTechnology）是一史悠久、实力雄厚的顶尖学府。哈工大以理工科见长，尤其在航天、机械、材料、计算机等领域成果斐然，为国家的航天事业等诸多重大工程输送了大量优秀人才。其科研团队参与众多前沿项目，如航天飞行器研制等，科研实力强劲。学校师资队伍杰出，汇聚了众多两院院士、国家级教学名师等。在国际上，哈工大也享有较高声誉，与多所世界知名高校开展广泛交流合作，致力于培养具有国际视野、创新精神和实践能力的高素质人才，不断朝着建设中国特色世界一流大学的目标迈进。

6.2.2 主要技术创新

竖向零重力补偿技术创新：该校创新性地解决了竖向零重力补偿这一微低重力补偿中的瓶颈技术，利用重力补偿系统抵消竖向运动平台的重力，实现航天器在地球重力场环境下的竖向自由运动，突破了摩擦、高动态响应、承载能力等技术难题。

悬吊法模拟零重力环境创新：哈尔滨工业大学的空间机械臂舱上运动测试系统采用主动悬吊加主动位置跟踪的模拟方法实现零重力环境的模拟，通过位置跟踪偏差检测装置或系统对吊点的随动误差进行测量，然后通过电机带动传动装置对跟踪误差进行补偿，从而实现吊点的随动控制，提高了模拟的精度。



图 33 哈尔滨工业大学技术创新词云图

结构设计创新：邵珠峰教授创新性地 在并联机器人上应用了索驱动结构，推出了全新的柔性工业机器人品类，实现了并联机器人在精度、负载、运动范围等方面的性能提升。

控制技术创新：在索驱动并联机器人的控制方面，该校研究人员开发了多种先进的控制算法，如基于强化学习的避障控制器，用于绳牵引并联机器人在动态障碍物环境下的动态避障，提高了机器人的智能化水平和适应性。

驱动方式创新：在微小型机器人领域，该校刘英想教授团队创新性地采用压电驱动方式，设计出了一种基于刚性圆环结构的 3 厘米尺度四足压电机机器人，解决了传统电磁驱动方式在微型化过程中存在的结构复杂、电磁干扰等问题，实现了平面灵活运动和大负载能力的兼备。

运动方式创新：该团队借鉴自然界中硬壳动物的运动方式，通过圆环基体不同振动模态间的复合叠加，在足端生成了多维致动轨迹，实现了平面的直线和旋转运动，为微小型机器人的运动方式提供了新的思路。

6.2.3 核心专利分析

表 12 哈工大核心专利分析表

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
空间机构六自由度微重力模拟实现系统纵向重力补偿装置	袁秋帆、齐冀、刘延芳、齐乃明	利用被动比例配重与主动伺服补偿相结合的方式，通过球轴承、中央立柱和直线电机等组件实现高精度重力补偿。	补偿重力大、精度高、不引入附加质量、易于控制，解决重型空间机构纵向重力补偿难题。
双层结构的六自由度微重力试验系统	于泽、霍明英、赵钧、齐乃明、赵策、林桐、冯文煜	下层平台通过气浮滑轮与配重平衡实现竖直零重力模拟，结合麦克纳姆轮主动驱动跟踪上层平台位姿，实时补偿气体质量。	提高航天器地面仿真精度，减少附加质量，适用于高精度分布式航天器及复杂任务模拟。
空间六自由度受控与失重模拟装置	赵杰、朱延河、臧希喆、刘玉斌、李长乐	通过竖向、平面并联及俯仰偏航机构组合模拟六自由度，采用被动重力平衡块与主动伺服补偿结合实现竖直重力补偿。	控制简便，结构紧凑，成本低，载重能力强，满足动态响应要求。
具有负载大范围可调功能的微重力模拟张力控制机构	班晓军、卢鸿谦、尹航、王博、黄显林	利用导轨、丝杠、滑块和手轮机构调整弹簧预紧力适应不同负载，阻尼机构提供运动阻力实现吸能减震。	负重大范围可调，适应不同负载，避免控制系统带宽矛盾，适用于吊索式微重力模拟张力控制。
基于气浮滑轮的六自由度微重力试验系统	于泽、齐乃明、霍明英、赵策、赵钧、林桐、冯文煜、乔云一、薛驭风	上层姿态模拟平台结合下层气浮滑轮重力补偿平台，通过气浮滑轮与配重平衡实现竖直零重力模拟，气足实现水平二维平动。	载荷重力完全卸载，提高卫星地面仿真精度，适用于空间机构对接与抓捕动力学模拟。
三维主动悬吊式空间飞行器微重力模拟装置	刘振、于海涛、项升、丁亮、李楠、高海波、邓宗全	通过角度传感器反馈主动控制随动平台位置和吊索张力，利用力矩电机及卷筒抵消空间飞行器重力。	解决三维主动悬吊微重力模拟问题，减轻装置重量，扩大模拟空间，降低造价，适用于空间飞行器运动功能与精度测

气浮式微重力模拟器及模拟方法	姚蔚然、宋海旭、张欧阳、刘健行、卢彦岐、吴立刚、孙光辉、高亚斌	利用气泵形成供气盖与受气座间的气隙，气浮轴承下表面与平台间气隙实现微重力模拟。	试。 舍弃气瓶，解决空间占用与安全风险，突破时长限制，增加持续工作时间。
适用于空间对接模拟的无级变载重力平衡装置	刘世伟、薛渊、陆一凡、王智海、陶思源	主臂旋转配合补偿滑轮组与起升滑轮组实现负载水平移动与重力平衡，改变绳索拉力和方向适应不同负载。	无级变载、调节范围大，无需额外修改尺寸与参数，满足不同重量机构测试，提高空间环境地面模拟效率与可靠性。
主被动结合式悬吊零重力模拟系统和模拟方法	霍明英、刘一骄、陈磊、齐乃明、曹世磊、赵钧、叶炎茂、范子琛	零重力模拟子系统结合水平随动系统和竖直恒力悬吊系统，通过龙门架、滚轮控制系统等实现地面微低重力模拟。	实现高精度地面零重力模拟实验，结构稳定，定位精准，总体配合实现高效实验。
多目标六自由度微重力地面模拟系统及其使用方法	刘延芳、周芮、齐乃明、余佳宇、齐骥、倪晨瑞、王旭、霍明英、赵钧、刘振	六自由度仿真平台结合二维主动运动、坚直升降、被动跟踪、恒力保持及转动系统，运动测量系统采用多相机组合。	普适性强、结构简单，全自由度动力学仿真，仿真数量多，降低航天器失效概率，稳定性与精度高。
多星悬吊式微重力模拟系统	霍明英、周芮、齐乃明、范子琛、于泽、徐嵩、刘延芳	结合矢量主动跟随平台与气浮被动跟随平台，通过全局测量系统实现微重力模拟器精确位置跟随，减小附加惯量。	适用于多星交错运动模拟，六自由度、大行程、低干涉、高精度、高响应速度，解决多星模拟干涉问题，提高精度与效率。

6.3 天津航天机电设备研究所

6.3.1 合作伙伴简介

天津航天机电设备研究所（又称中国航天科技集团有限公司第五研究院五一八研究所）始建于 1966 年，位于天津市滨海高新区航天五院超大型航天器研发制造及应用产业基地内，是我国从事航天器

地面机电设备、航天器机构件、结构件和卫星应用产品研制的科研事业单位。在模拟低重力方面，研究所取得了显著成果。其建成了天津市微低重力环境模拟技术重点实验室，成功研制出总面积达 1200 平方米、单块平台水平度达到 2 角秒、拼缝高度差达到 10 微米的大型超平支撑平台。该平台本体由 200 块特供的天然济南青花岗岩拼接而成，科研人员针对天津的地质条件，采用摩擦桩和高标号水泥浇筑的方法为平台建设提供稳定基础，还设计了基于 CANopen 总线的分布式控制系统，通过闭环控制保障调节精度，并研制了自主巡航的检测车对平台进行精度测量和自动调平，大幅提高了工作效率和支撑平台的保障能力。该平台是气浮式微重力试验研究的基础设施，除服务“嫦娥五号”任务外，还开展了空间站大型展开机构等 10 余项各类型号 and 创新的试验任务，未来还将为载人登月、空间编队飞行、深空探测等重大工程任务提供支撑。

6.3.2 主要技术创新

装置设计创新：设计了一种模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人装置，该装置包括基础框架、绳索、绳索驱动单元、绳索导向装置、模拟负载平台、传感器和控制系统。八根绳索采用空间对称的“上四下四”方式布局，这种布局方式能够更好地模拟零重力或低重力环境下的运动。

控制技术创新：控制系统根据传感器给出的力和位移数据对各个绳索进行长度和力闭环或半闭环控制，进而模拟出模拟负载平台在零重力或低重力环境下的运动。同时，可以选用一根或多根绳索叠加施

加外部干扰力，以模拟更复杂的受力情况。

应用创新：该装置克服了传统模拟方法工作空间受限制或动态性不足的问题，能够实现零重力或低重力环境下模拟负载平台的 6 自由度运动控制和受力模拟，为航天飞行器的设计和测试提供了更有效的工具。



图 34 天津航天机电设备研究所技术创新词云图

6.3.3 核心专利分析

表 13 天津航天机电设备研究所核心专利分析表

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种微低重力模拟装置及模拟试验方法	齐放、李鹏、赵宝山、李跃华	利用倒吸式轴承与滑轮组配合，气浮技术和电磁技术控制吸附力，使悬吊点在三维空间运动时仅受竖直拉力。	低成本，无机械结构降低惯量影响，提高模拟精度；无摩擦、非接触降低干扰，进一步提高精确性。
空间机械臂悬吊微重力模拟方法	齐放、吴跃民、李博、朱朝晖	通过主动控制机械摆臂系统和多点悬吊结构，卸载机械臂及关节重力，保留运动自由度和范围。	实现多个吊点重力卸载，允许机械臂大范围运动，消除重力对航天器姿态影响，提高试验真实性和准确性。
一种宇航员在轨维修地面零重力	高长建、胡政、左祥	桁架支撑系统、维修工具零重力支撑系统等协同工作，模拟	真实模拟宇航员维修工作状态，减轻试

模拟装置	赧、李广彦、曾磊	宇航员零重力状态下的维修操作。	验人员训练压力，可防护试验人员，多自由度调整宇航员位置。
空间机械臂悬吊微重力模拟装置	齐放、吴跃民、李博、朱朝晖	相机实时测量六自由度台位置与姿态，控制系统驱动机械摆臂安装平台跟随运动。	实现多个吊点重力卸载，允许机械臂大范围运动，消除重力对航天器姿态影响，提高试验真实性和准确性。
一种用于多级可展开遮光罩的重力卸载系统	刘瑒、林秋红、仲红亮、邱慧、张泽	采用支撑桁架子系统、重力卸载子系统、测力子系统，利用配重系统和滑轮组进行重力补偿。	不引入张力主动控制装置，降低成本，提高卸载效率；优化分配悬吊力，减小附加力矩，更好模拟空间微重力环境。
一种防干涉微低重力补偿系统	冉江南、陈建鹏、刘鹏、莫丽东	由支撑架、跟踪补偿系统、回转驱动系统等组成，采用主动重力补偿和直线运动系统。	二维平面运动结合极坐标形式，减少干涉；主动补偿提高精度；二维微调平台增强适应性和精度。
一种微低重力模拟装置	齐放、李鹏、赵宝山、李跃华	倒吸式轴承、滑轮组、悬吊机构等配合，电磁技术控制吸附力，使悬吊点仅受竖直拉力。	低成本，无机械结构降低惯量影响，提高模拟精度；无摩擦、非接触降低干扰，进一步提高精确性。
一种二维悬吊式零重力模拟装置	侯玮杰、李鹏、李跃华、王云峰	一级线性导轨和二级线性导轨垂直设置，滑块上设随动机构，利用圆形气浮垫吊装航天器。	二维随动粗跟随和气浮垫无摩擦自适应，提高通用性和精度，满足异形天线等航天器微低重力试验需求。
一种一维悬吊式零重力模拟装置	侯玮杰、李鹏、李跃华、王利桐	导轨上设主动跟随机构，滑块上设随动机构和检测机构，气浮导轨和气浮轴承吊装航天器。	主被动联合跟随、粗精跟随结合，提升卸载精度，降低加工成本；降低随动滞后影响，优化悬吊随动系统性能。

6.4 北京卫星环境工程研究所

6.4.1 合作伙伴简介

北京卫星环境工程研究所（五院 511 所）始建于 1968 年，隶属于中国航天科技集团有限公司第五研究院，是中国航天器空间环境工程的发源地和航天器系统集成的主力军。作为中国载人航天、导航定位、深空探测、通信广播、对地观测、空间科学与技术试验六大类航天器系统集成、空间环境技术研究和工程实施的核心单位，该所拥有 1 个可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室，以及北京市重点实验室等 3 个省部级重点实验室。该所承担了中国载人航天器系列、导航卫星系列、通信卫星系列、对地观测卫星系列、月球与深空探测卫星系列、科学实验卫星系列和返回式卫星系列等航天器的总装、集成与专业测试、环境试验工作，具备各类航天器空间环境模拟试验设备及地面机械支持设备、设施的研制能力，已建成较为完善的航天器总装、环境试验及 AIT 地面设备研制与设施建设的技术体系与服务体系。在先进装配、新一代工艺装备、高精度测量、空间热环境模拟、动力学仿真、磁环境、空间综合环境效应等多个技术领域开展前沿研究，取得省部级科技成果 160 余项。

6.4.2 主要技术创新

北京卫星环境工程研究所在“模拟微重力及零重力”方面取得了显著的研究进展，主要体现在以下几个方面：

航天器多级自由边界模拟系统姿态平衡协调控制

为消除空间与地球机械环境不一致对航天器在轨运行精度的影响，建立了航天器设施和平台部分的自由边界模拟系统及自动控制模块，设计并实现了航天器重力卸载过程的平衡协调控制算法，通过力

和位移闭环控制实现。通过硬件建设和软件编程，进行了现场实验，验证了控制系统的可行性和稳定性，为未来航天器地面模拟实验中重力卸载过程控制系统的设技提供了技术支持和工程经验。



图 35 北京卫星环境工程研究所技术词云图

航天器在轨自由悬浮状态模拟装置及构建方法

涉及航天器力学环境试验技术领域，包括微振动试验基座、航天器平台支撑卸载机构、载荷支撑机构等多个部分，用于支撑卸载航天器平台和载荷的重力，以模拟航天器在轨自由边界条件。解决了多级非对称式载荷的重力如何平稳卸载的技术难题，能够对局部存在较大偏心的多级非对称式载荷的重力进行卸载。

宇航空间机构的悬吊法微低重力模拟关键技术及应用

针对宇航天间机构在发射前需要进行的地面试验,研究了悬吊法微低重力模拟技术,通过可控的悬吊力抵消试验对象的全部或部分自重,避免了传统方法带来的动力学特性失真和运动自由度、运动空间

及运动时间受限等问题。提出了基于场力等效转换的多自由度宇航空间机构微低重力模拟方法，发明了具有三转动自由度被动自适应功能的悬吊力等效施加机构和悬吊点三平动自由度的高精度力位混合跟踪控制技术，研发了多套微低重力模拟系统，应用于“嫦娥三号”着陆器太阳翼和舱盖、“嫦娥三号”和“嫦娥四号”月球车、火星车、“试验七号卫星”机械臂和“空间站核心舱”机械臂等型号产品的地面总装、测试和试验任务。

6.4.3 核心专利分析

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种微低重力模拟装置及模拟试验方法	齐放、李鹏、赵宝山、李跃华	包括试验支架、吊具、滑轮组件、缓冲锁定机构、绳索、拉力传感器及配重机构，通过配重和缓冲机构模拟零重力环境	能满足大型航天器垂直被动式零重力分离试验需求，准确模拟分离速度，提高试验准确性和安全性
多关节空间机构重力卸载装置	孟凡伟、代海林、董恣、蒋志广、邢帅、王鹏飞、刘同辉、常冬林、孙振业、高峰、孟少华、张成立、刘孟周、杜瑞兆	包括机架、二维随动平台、拉力控制单元、力传递机构，通过恒拉力控制单元和力传递机构实现全自由度微重力模拟	实现空间机构全自由度微重力模拟，重力卸载精度高，适应能力强，适用于高速和复杂运动的测试
一种航天器多次对接与分离信号模拟装置	冯伟、傅子敬、田娜、李海飞、王临政、谢久林、徐奕柳	包括航天器和压紧分离装置，通过横向调节座、纵向调节座、分离开关主体等实现对接与分离信号模拟	实现航天器与地面试验塔架多次对接与分离，操作简单，提高试验效率和安全性
多体低重力模拟装置及真空热环境下多体低重力模拟方法	包佳仪、范超、王晶、关怡宣、毕研强、刘守文、苏新明、洪辰伟、鄂东梅	包括支撑架、恒张力悬吊组件、随动组件、位置偏移传感器，位于密封容器内，模拟真空低温环境下的低重力条件	适用于航天员月球表面活动训练，提高体感模拟真实度，确保运动自由度和安全性

6.5 中国科学院沈阳自动化研究所

6.5.1 合作伙伴简介

中国科学院沈阳自动化研究所成立于 1958 年，是我国重要的自动化研究机构。该所主要研究方向为机器人、智能制造与光电信息技术，在这些领域取得了众多科研成果。例如，该所研发的仿生软体机器鱼在水下机器人领域取得了重要进展，其成果发表于国际机器人领域顶级期刊《IEEETransactionsonRobotics》。此外，该所的“弱刚性大型航天构件数字孪生精密装配技术”入选“2024 中国智能制造十大科技进展”。研究所拥有正式员工 1400 余人，其中包括中国工程院院士 3 人，具有高级职称的技术人员 700 余人。在人才培养方面，该所拥有博士培养点 5 个、硕士培养点 8 个，博士后流动站 2 个。在国际合作方面，与国际知名高校及科研机构开展深入合作研究及联合试验。研究所还拥有机器人学国家重点实验室等多个国家级和省部级科研平台。

6.5.2 主要技术创新

模拟微重力及零重力研究进展

中国科学院沈阳自动化研究所并未查到在“模拟微重力及零重力”方面的研究进展，但该研究所在机器人学领域有着深厚的积累和丰富的经验，尤其在水下仿生游动机器人方面取得了重要突破。例如，该所机器人学研究室微纳米课题组设计开发了一款基于仿生肌肉驱动与嵌入式柔性感知的软体机器鱼，相关成果发表于国际机器人领域顶级期刊《IEEETransactionsonRobotics》。这款软体机器鱼通过模拟

鱼类的肌肉驱动和侧线感知系统，实现了多驱动单元协同控制、嵌入式柔性感知和环境自适应智能切换，能够适应不同的游动环境。

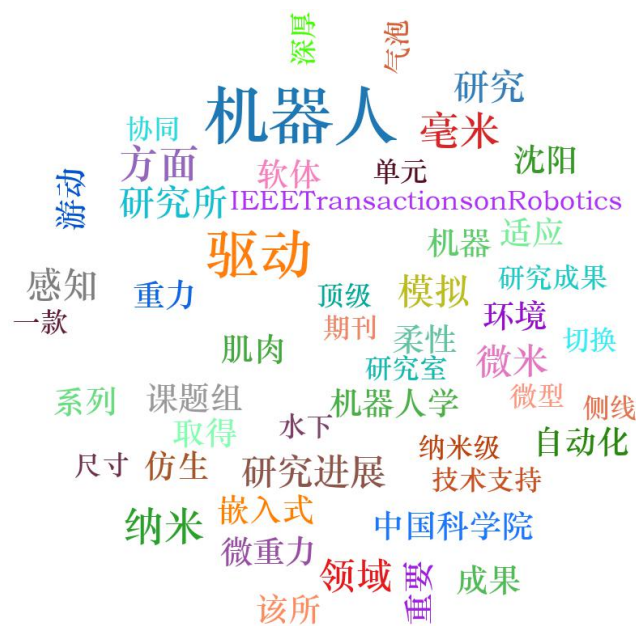


图 36 中国科学院沈阳自动化研究所技术创新词云

索驱动机器人研究进展

中国科学院沈阳自动化研究所在索驱动机器人方面的研究主要集中在微型机器人和微纳米机器人领域。例如，该所微纳米机器人课题组致力于小尺寸机器人研究，针对毫米级、微米级、纳米级机器人开展了系列研究，在磁驱动毫米机器人、光驱动毫米机器人、热驱动毫米机器人、气泡微米机器人、细胞微米机器人、混合驱动纳米机器人等方面取得了系列成果。这些研究成果为索驱动机器人的发展提供了重要的理论和技术支持。

6.5.3 核心专利分析

表 14 中国科学院沈阳自动化研究所核心专利分析

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种吊挂装置	卢晓东、张伟、任虎存、黄昊、张金跃	通过螺杆旋转带动滑套在横梁上水平移动，实现产品吊挂调节。	调节方便、精度高、安全可靠。

一种 1/6g 低重力平衡吊挂装置	徐志刚、肖杰、贺云、刘勇、李峰、白鑫林、王军义	多体吊挂方式抵消重力差，模拟月球低重力环境。	实时重力平衡、精确控制、适应性强。
一种重力平衡吊挂装置	徐志刚、李灏、刘勇、贺云、王军义	双弧形滑动导轨装置，使吊挂力作用点通过重力平衡系统质心。	吊挂力作用点精准、结构简单。
一种多自由度空间机械臂重力平衡悬吊装置	孙银金、刘勇、徐志刚、贺云、位亚强、张啸、李秋实、王元钰	夹持滚动内环夹紧机械臂连杆，利用球铰副确保钢丝绳延长线通过连杆质心。	高精度平衡、不阻碍运动、稳定可靠。

6.6 北京戴纳实验科技股份有限公司

6.6.1 竞争对手简介

北京戴纳实验科技股份有限公司专注于科研服务，致力于为客户提供全生命周期的 AI+黑灯实验室解决方案。将这些技术成果深度融入黑灯实验室的搭建与运营中，全方位推动科研场景向全流程智能化、无人化、数据化升级。戴纳科技全面服务于黑灯实验室的全生命周期，涵盖实验室设计（包括咨询、可研、初设、施工图、BIM 设计等环节）、实验室机电模块自动化生产、现场实现乐高积木式的快速装配实施、AI+黑灯实验室实现完全无人化自动操作等。

6.6.2 主要技术创新

微重力随机定位仪

技术原理：采用两轴随机定位技术，通过运动控制算法实时调整双轴转动速度，随机改变样品重力矢量的方向，进而抵消重力影响，实现 $10^{-1}g$ — $10^{-5}g$ 微重力环境模拟。可广泛应用于再生医学、癌症研究、蛋白质构造解析、植物微重力研究等众多领域，为科研人员在地面开展微重力模拟实验提供了重要的技术支持。采用先进的计算机控制技术，可通过预设模式选择模拟重力效应，也可调整转速、运

行时间、微重力数值等，还能监测实验样本生长水平。产品采用灵活的台式设计，可选配人工气候培养箱/二氧化碳培养箱，以适应不同生物体和模型在实验设置方面的特殊需要。



图 37 北京戴纳实验科技有限公司技术创新词云

微重力试验台

2025 年 4 月 22 日取得的“一种微重力试验台”专利，其技术在于通过设置吸盘，以使吸盘的内侧壁对样品进行吸附并对其移动进行微重力测试，减少了样品下落过程中产生的摩擦力，降低了因摩擦力导致实验数据误差较大的问题，提高了样品微重力测试的精确性。

生物微重力效应一体机

2025 年 2 月 20 日取得的“一种为生物提供模拟微重力效应的一体机”专利，该装置包括箱体，箱体一侧设有显控屏、位于显控屏下侧的固定筒、回型板等结构，回型板内部弹性且滑动配合有 U 型杆，U 型杆上装设有刮板，通过 U 型杆带动刮板在显控屏一侧滑动，利用

毛刷去除显控屏一侧积累的杂质，解决了显控屏杂质积累影响实验数据准确性的难题，提升了箱体内部温度湿度、二氧化碳浓度、光照等参数的监测准确性。

6.6.3 核心专利分析

表 15 北京戴纳实验科技有限公司核心专利分析

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种用于微重力装置的信息获取方法及系统	邢希学、张京军、奚晓鹏、龚长华	通过位姿相机和部件信息处理获取微重力装置非运行状态信息，基于视觉伺服获取运动轨迹，传输至云端服务器进行分析。	减少了能源浪费，获取的信息更加精准，帮助技术人员更好地识别影响因素。
一种微重力实验重力调节控制系统	奚晓鹏、迟海鹏、张怀东、邢希学	包括微重力模拟子系统、重力控制子系统和回转补偿子系统，通过双轴回转器和随机定位仪实现微重力环境的调节和外力补偿。	实现了对不同种类生物细胞的微重力实验研究，通过实时参数调节和外力补偿，提高了实验结果的准确性。
一种用于悬浮细胞微重力效应模拟的培养系统	张怀东、迟海鹏、龚长华、奚晓鹏	提供细胞培养子系统、微重力模拟子系统等，利用回转器和随机定位仪模拟微重力环境，采集细胞生长数据并实时显示。	实现了根据不同种类细胞的培养基制备，实时显示细胞在微重力环境下的生长变化，满足多种类细胞的微重力生长模拟需求。
一种用于微重力实验室的自动化系统	张京军、龚长华、奚晓鹏、迟海鹏	设计自动化系统，包括数据获取子系统、模拟子系统和计算子系统，实现实验室数据的共享和协同。	实现了实验室数据的共享和协同，提高了实验效率和安全性，可远程查看和控制实验室参数。
一种微重力模拟实验系统	龚长华、奚晓鹏、迟海鹏、张怀东	包括细胞培养模块、实验制样模块等，利用细胞回转器模拟微重力环境，通过扫描电子显微镜实时获取和分析细胞图像。	有效获取细胞在微重力环境与正常重力环境下的不同发育规律，为微重力细胞模拟实验提供了准确的参考。
一种模拟微重力效应的一体机	迟海鹏、张怀东、邢希学、张京军	设计一体机，包括可拆卸的箱体、隔板、微重力发生组件等，支持多组不同培养环境的微重力实验。	实现了在不同培养环境下进行微重力实验的同时控制温度和光照，提高了实

			验精度，能够适应不同尺寸的实验样品容器。
一种微重力环境实验的反馈控制系统	邢希学、张京军、奚晓鹏、龚长华	设计反馈控制系统，包括微重力参数设置模块、微重力环境模拟模块等，实现对微重力环境的快速校准和自适应变化。	实现了对微重力环境的快速校准和自适应变化，降低了重复实验的成本，简化了操作流程，减少了设备的外形尺寸和重量。
一种模拟微重力效应的装置	迟海鹏、张怀东、邢希学、张京军	设计包括样品台和内部弹力网的装置，通过弹性组件调节弹力网的弹性。	减少了实验者在微重力测试时的失重风险，使得测试过程更加便捷和安全。
一种微重力模拟系统及方法	邢希学、张京军、奚晓鹏、龚长华	设计微重力模拟系统，包括信息获取子系统、处理子系统和微重力构建子系统，通过传感器检测环境数据并构建微重力模拟环境。	实现了微重力实验装置的体积减少，降低了外来因素的影响，延长了实验时间，使实验结果更可靠。
一种微重力悬浮系统	张怀东、迟海鹏、龚长华、奚晓鹏	设计微重力悬浮系统，包括微重力子系统、悬浮模拟子系统等，构建坐标系模拟运动轨迹，获取细胞的重力响应时间和加速度。	实现了不同类别细胞的最佳实验参数设置，提高了微重力细胞培养技术的效率，为研究人员提供了数据分析的基础。

6.7 北京吾天科技有限公司

6.7.1 竞争对手简介

北京吾天科技有限公司是一家专注于航天产品应用研发和服务的军民融合型高科技公司。公司具备雄厚的研发实力，建立了完备的军工产品设计、研制与生产质量体系，通过了国标及国军标认证，是国家及中关村高新技术企业。以技术创新为核心驱动力，不断加大研发投入，紧跟技术发展趋势，采用先进的设计理念和工艺技术，提升产品性能和质量。主要聚焦于航天器结构与机构技术领域，完成了多系列卫星太阳翼结构与机构、空间连接分离机构、高精度伺服系统等

产品研制，其产品定型后先后服务于航天研究院所、中科院及著名高校等多家单位，并成功完成 12 颗卫星配套产品的在轨交付。

6.7.2 主要技术创新

太阳翼零重力展开试验装置：吾天科技与武汉天拓宇航智能装备有限公司共同申请的专利“一种太阳翼零重力展开试验装置”，包括展开架系统、导轨系统和吊挂系统。该装置承受载荷大，展开空间充足，展开摩擦阻力小且通用性强，能有效满足太阳翼在地面模拟零重力环境下的展开试验需求。

平面三自由度零重力模拟技术：通过气垫与气浮平台配合形成气膜，产生支撑力补偿平台重力，实现平台二维位置及偏航三个平面自由度的无摩擦运动，可用于验证航天器的编队飞行策略、绕飞、目标接近及捕获等在轨飞行任务的地面演示验证。

竖向零重力补偿技术：利用重力补偿系统抵消竖向运动平台的重力，实现航天器在地球重力场环境下的竖向自由运动，是微低重力补偿中的关键瓶颈技术之一。该公司在此领域开展研究，有望攻克相关技术难题，为实现更高精度和更全面的零重力模拟提供技术支持。



图 38 北京吾天科技有限公司技术创新词云

6.7.3 核心专利分析

表 16 北京吾天科技有限公司核心专利分析

专利名称	发明人	主要技术手段	技术优势
一种地面模拟航天装备维修的悬吊装置	马超、贾志昂、施维慰、高蓓、刘颖	包括悬吊组件、连接组件、工具组件和人体保护组件，悬吊组件有导轨横梁、框架支柱、电葫芦和电动小车，连接组件有连接架和安全绳，工具组件含弹簧平衡器和旋转转盘，人体保护组件为带肩部吊点的防护服。	安全性高、操作方便、适用面广，保障维修人员作业安全，避免空中悬停晃动，工具使用便捷，结构可靠性高。
一种地面模拟航天员操控仪器设备的辅助装置	张秋霞、贾志昂、祝国伟、张芳、李雨时、邓颖	包括主体框架、设备安装部和人员悬挂部，设备安装部有设备安装板和姿态调节组件，人员悬挂部有宇航服、牵引绳和牵引设备，还设有红外监测点和电控部。	可在地面模拟航天员操控仪器设备，姿态自动匹配，提高实验人员舒适度，方便数据收集。
一种太阳翼零重力展开试验装置	许冶、马超、夏俊辉、万建武、柏俊松、贾志昂、施维慰	包括展开架系统、导轨系统和吊挂系统，展开架有水平桁架和立柱桁架，导轨系统含纵向导轨和横向导轨组件，吊挂系统含 SADA 吊挂和板间吊挂。	承受载荷大、展开空间充足、摩擦阻力小、通用性强，适应不同型号尺寸太阳翼试验需求。
一种用于电机驱动展开太阳翼联动解耦机构	吴君、张秋霞、孙闯、赵国雍、李磊、张芳、李雨时	包括内连接杆、SADA-B 轴电机、外连接杆、根部铰链联动绳、板间铰链联动绳和	解决 SADA-B 轴展开后无法回转问题，实

		两个解耦机构，解耦机构含联动架、限位架、联动轮、拨销、驱动弹簧和转轴。	现太阳翼板展开后 B 轴单独回转摆动，不影响其他板间轴线锁定状态。
--	--	-------------------------------------	-----------------------------------

6.8 小结

随着航天技术的飞速发展，模拟零重力及低重力环境的需求日益增长，成为航天器设计、宇航员训练和空间对接等研究的关键。本章深入剖析了该领域的多个核心参与主体，涵盖顶尖高校、科研机构及高新企业，全方位剖析了各主体的技术创新、专利布局及研发实力，旨在为行业研究与实践提供系统参考。通过对各主体的技术优势、发展趋势和专利成果进行细致解读，不仅展现了当前的研究热点和发展脉络，也为未来的技术合作与竞争策略制定提供了坚实依据。

本章对模拟零重力及低重力环境索驱动机器人的合作伙伴和竞争对手进行了全面分析，深入探讨了各机构的研发实力、技术优势和专利布局。首先，聚焦于清华大学和哈尔滨工业大学等顶尖高校，详细剖析了它们在动力学建模、控制策略、实验验证等方面的创新成就，以及在核心专利上的技术突破。接着，对天津航天机电设备研究所和北京卫星环境工程研究所等科研机构的研发进展、技术创新和专利成果展开讨论，突出了它们在模拟装置设计、控制技术以及航天器环境模拟方面的专业实力。此外，还对北京戴纳实验科技股份有限公司和北京吾天科技有限公司等企业进行了深入分析，探讨了其在微重力模拟技术和航天产品应用研发方面的创新能力和服务优势，以及核心专利所体现的技术价值和市场潜力。整体而言，本章系统梳理了模拟零

重力及低重力环境索驱动机器人领域的技术与专利格局,揭示了各主体的独特优势与未来发展方向。

第七章山东亿九电气发展有限公司创新发展策略建议

山东亿九电气发展有限公司作为电气领域的一颗新星，近年来在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术研发上取得了显著进展。这一技术在航天、科研等多个领域有着广泛的应用前景，为公司的发展带来了新的机遇。以下是针对山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人方面的创新发展策略建议。

7.1 加强技术研发与创新

7.1.1 加大研发投入

持续增加在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术研发上的资金投入，引进先进的研发设备和测试平台，为技术创新提供坚实的物质基础。围绕下列技术热点进行研发：

一、智能化控制与多机器人协作技术

山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人研发中，智能化控制与多机器人协作技术将是重要的发展方向。随着人工智能和机器学习技术的不断进步，索驱动机器人可以通过先进的传感器和算法实现自主决策和路径规划。例如，利用深度学习算法，机器人可以对复杂环境进行实时感知和分析，从而自动调整运动轨迹和操作策略。此外，多机器人协作技术也将成为关键。在太空探索和深海探测等任务中，单个机器人往往难以完成复杂的任务，而多机器人协作可以提高任务的效率和可靠性。通过建立高效的通信机制和协同控制算法，多个索驱动机器人可以实现信息共享和任务分配，共同完成复杂的操作。例如，在太空基地建设中，多个机器人可

以协同进行物资搬运和结构组装，大大提高工作效率。

表 17 机器人协同相关核心专利

公开（公告）号	标题（中文）	申请人
CN110515732A	一种基于资源受限机器人深度学习推理的任务分配方法	中国人民解放军国防科技大学
CN114924513A	一种多机器人协同控制系统及方法	中迪机器人(盐城)有限公司
CN113326872A	一种多机器人轨迹规划方法	广州中国科学院先进技术研究所
CN102122171A	一种基于智能移动机器人的多微纳探测器组网联合演示验证系统	北京航空航天大学
KR102776079B1	实时控制多个移动机器人协同执行单个任务的机器人控制装置和系统以及控制机器人的方法	Funzin
CN109814556A	一种多机器人协作探索未知环境与地图构建的装置与方法	东南大学
CN108229685A	一种空地一体的无人智能决策方法	中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
CN112631173A	脑控无人平台协同控制系统	中国人民解放军国防科技大学
GB2614519A	网络化机器人蜘蛛探索者单元	Adrian Lynley Ashley
CN114193447B	多机器人控制方法、电子设备及存储介质	达闼机器人股份有限公司
US20220136807A1	与无人飞机编队通信的装甲车辆的操作部分	John Cockerill Defense Sa
CN106997201A	多机器人协作的路径规划方法	上海电气集团股份有限公司
CN106647808A	一种基于模糊控制算法的 AUVs 搜索和围捕任务分配控制方法	南宁市健佳网络科技有限公司
CN115097816A	一种模块化多机器人协作控制方法	深圳市大族机器人有限公司
US20210031365A1	用深度学习预测机器人任务的系统和方法	Teradyne Inc
CN117420760A	适用于机器人自主协作的多模态控制算法融合方法	东莞市新佰人机器人科技有限责任公司
CN106774345A	一种进行多机器人协作的方法与设备	上海仙知机器人科技有限公司
CN115113626A	一种机器人分布式控制系统及其方法	威康(深圳)智能有限公司
CN113110455A	一种未知初始状态的多机器人协同探索方法、装置及系统	哈尔滨工业大学
CN119270736A	基于人工智能的机器人远程协同	江苏华爵检测技术股份

	调度方法及系统	有限公司；江苏省产品质量监督检验研究院
CN119376326A	基于动态环境感知建模的多类型机器人协同作业方法	浙江大学
CN111781922A	一种适用于复杂动态场景的基于深度强化学习的多机器人协同导航方法	中山大学
CN119292079A	基于边缘计算的多机器人协同控制方法及系统	天津赛威工业技术有限公司
CN110587606A	一种面向开放场景的多机器人自主协同搜救方法	中国人民解放军国防科技大学
CN113780893A	一种多机器人协同任务的分配方法、设备及介质	山东新一代信息产业技术研究院有限公司
CN113716075A	一种基于机器人编队的太空垃圾智能清理系统	南京信息工程大学
CN110333739A	一种基于强化学习的AUV行为规划及动作控制方法	哈尔滨工程大学
CN119045587A	一种全自动储存仓及其控制方法	浙江优纳特科学仪器有限公司
CN108638065A	一种排爆机器人双臂协同控制系统	河南科技学院
CN107127757A	一种多机器人协作柔索驱动拣研装备动态任务分配方法	西安科技大学
CN115113592A	一种异构无人系统协同控制方法	武汉烁威智能科技有限公司
CN113189983A	一种面向开放场景的多机器人协同多目标采样方法	中国人民解放军国防科技大学
CN115373409A	一种复杂环境下水下机器人协同捕捞海生物的路径规划方法	哈尔滨工程大学
KR102771512B1	一种灾害救援用集群机器人系统及利用其在灾害环境下寻找和搬运物体的方法	Univ Korea Ind Univ Coop Found
CN117697763A	一种基于大模型的双臂操作任务学习方法和系统	北京智源人工智能研究院
CN111240319A	室外多机器人协同作业系统及其方法	南京理工大学；宝时得科技(中国)有限公司
CN119105491A	基于人工智能的多级任务多机器人协同运动规划系统	北京理工大学珠海学院；珠海冷火电子科技有限公司
KR1020130055127A	提供质量的协作空间用于机器人系统开发平台使用的通信网络	Korea Institute Of Industrial Technology
CN119115967A	面向地下空间探测的多异构机器人自主任务分配系统	北京航空航天大学杭州创新研究院
US20200166952A	客车设备和客车驱动的多机器人	Institute For

1	协同操作系统的协同操作控制方法	Information Industry
CN114454176A	机器人的控制方法、控制装置、机器人和存储介质	深圳鹏行智能研究有限公司
CN119005347A	一种多智能体驱动的机器人人工智能化学家系统	中国科学技术大学
CN117892954A	多机器人协同搜索任务自适应角色选择方法及系统	山东大学
CN109408157A	一种多机器人协同任务的确定方法及装置	西北工业大学
CN116442219A	一种智能机器人控制系统及方法	东莞市新佰人机器人科技有限责任公司
CN115284288A	多机器人在线任务分配和执行方法、装置及存储介质	清华大学
CN119204629A	一种多机器人任务调度方法、系统、设备及存储介质	山东新巨龙能源有限责任公司
CN110427029A	一种多机器人协同巡逻与调度的方法	广州高新兴机器人有限公司
CN118642377A	一种基于机器学习的机器人智能群控方法	湖南科瑞特科技有限公司
CN112306654A	一种面向移动群智感知的人机协作任务分配方法	西北工业大学

二、新型驱动与控制技术

在驱动与控制技术方面，山东亿九电气发展有限公司可以探索新型驱动技术，如磁悬浮驱动和智能材料驱动。磁悬浮驱动技术可以减少机械摩擦，提高机器人的运动精度和寿命。智能材料驱动则可以实现更灵活的运动控制，适应复杂的环境变化。此外，优化控制算法也是重要的研究方向。通过引入先进的控制策略，如自适应控制和模糊控制，机器人可以在复杂的零重力和低重力环境中保持稳定的性能。例如，自适应控制可以根据环境变化实时调整控制参数，从而提高机器人的适应性和可靠性。同时，利用虚拟仿真技术进行控制算法的测试和优化，可以降低研发成本和风险。

表 18 新型驱动与控制技术相关核心专利

CN117970922A	一种基于 MRAC 控制算法的移动机器人控制方法	长三角哈特机器人产业技术研究院；安徽师范大学
CN111030509A	一种基于力失衡驱动的二维平面悬浮运动的装置和方法	重庆大学
CN111338234A	一种磁悬浮控制算法验证系统、方法及装置	中车青岛四方机车车辆股份有限公司
CN118319211A	一种磁悬浮球形胶囊机器人的磁控系统	河南科技大学
CN118391292A	一种多级磁悬浮鼓风机调节系统及其控制方法	来安县科来兴实业有限责任公司
CN115576200A	一种下推式磁悬浮系统的自适应控制方法	嘉应学院
CN116466630A	一种磁悬浮运输控制系统	苏州元磁智控科技有限公司；苏州博古特智造有限公司
CN111367197A	一种磁流变隔减震装置控制系统	南京东瑞减震控制科技有限公司；南京林业大学
CN107024881A	一种磁悬浮机器人	歌尔科技有限公司
CN207096728U	一种磁悬浮机器人	歌尔科技有限公司
CN116671851A	胶囊机器人的主动运动控制方法与系统、可读存储介质	哈尔滨工业大学(深圳)(哈尔滨工业大学深圳科技创新研究院)
CN119805916A	机器人运动控制参数优化方法、系统、智能终端及介质	深圳市人工智能与机器人研究院；深圳国创具身智能机器人有限公司
CN111061221A	一种磁悬浮电主轴自适应混合控制方法	常州工学院
CN117243550A	一种胶囊机器人的主动运动控制方法与可读存储介质	哈尔滨工业大学(深圳)(哈尔滨工业大学深圳科技创新研究院)
CN109854622A	一种基于智能材料可控制轴系径向振动的主动磁轴承系统	中国船舶科学研究中心(中国船舶重工集团公司第七〇二研究所)
CN114434449A	一种新型粒子群自适应阻抗控制方法及装置	北京科技大学
CN114675677A	宏微运动执行器设计工作台运动控制方法	容德精机(江苏)机床有限公司
CN118151534A	一种具有自适应特性的电永磁吸盘控制系统及方法	南通茂业电子科技有限公司
KR1020110014375A	集成控制系统用于真实和虚拟机器人	Simlab Co., Ltd.

CN116300610A	一种基于特征模型算法的双核 DSP 磁悬浮控制系统	浙江中源磁悬浮技术有限公司；杭州电子科技大学
--------------	---------------------------	------------------------

三、新材料与结构优化

新材料和结构优化是提升索驱动机器人性能的关键。山东亿九电气发展有限公司可以研发更轻、更强、更耐久的材料，以提高机器人的负载能力和使用寿命。例如，采用碳纤维复合材料可以显著减轻机器人的重量，同时保持高强度和刚度。在结构设计方面，优化索驱动机器人的结构布局可以提高其运动精度和稳定性。例如，采用冗余驱动设计，如九索驱动方案，可以提高系统的可靠性和容错能力。此外，通过有限元分析和拓扑优化等方法，可以进一步优化机器人的结构设计，使其在满足性能要求的同时，最大限度地减少材料使用和重量。

表 19 新材料与结构优化相关核心专利

CN118821342A	一种液压驱动机器人轻量化设计与制造方法	哈尔滨工业大学
CN117067259A	一种用于狭小空间操作机械臂的高刚度关节设计方法	大连理工大学
CN119772866A	一种适用于仿生蛇机器人绳索快速拆装的模块化驱动系统	西北工业大学
IN202311021341A	不同材料悬臂梁的有限元分析	Lovely Professional University
CN114692342A	一种超小型管道软体机器人大变形驱动器结构设计方法	湖南城市学院
CN113927627A	基于关节刚度放大装置的主动变刚度欠驱动冗余机器人	中国科学技术大学
KR1020240135946A	用于优化工作刚度的 4 轴 delta 根	Ls Electric Co Ltd
CN105718684A	一种主动控制结构动刚度的记忆合金驱动件优化布局方法	西安交通大学
W02021102402A1	具有腿式和空中运动模式的形态功能机器人	Northeastern University
CN114065412A	一种机器人大臂加强筋的设计方法	伯朗特机器人股份有限公司
CN115625735A	一种连续体机器人的线缆布局方法	西安交通大学

CN118761289A	一种重载工业机械臂设计方法	佛山大学
CN115847389A	一种连续体机器人的刚度控制和补偿方法	北方工业大学；北京控制工程研究所
CN208117853U	一种碳纤维七轴机器人	佛山智汇君彰新材料科技有限公司
CN119587165A	一种变刚度和驱动结合的连续体机器人及其优化设计方法	南京航空航天大学
CN118578367A	一种绳驱动超冗余机器人的逆解优选及高精度协同控制系统	浙江理工大学
CN116141374A	一种刚柔混合的变刚度连续体机械臂	武汉理工大学
CN107486850A	一种柔索驱动机器人变刚度弹性关节	四川大学
CN118821342A	一种液压驱动机器人轻量化设计与制造方法	哈尔滨工业大学
CN117067259A	一种用于狭小空间操作机械臂的高刚度关节设计方法	大连理工大学

四、高精度传感器与人机交互技术

高精度传感器和人机交互技术是提升索驱动机器人性能和用户体验的重要手段。山东亿九电气发展有限公司可以开发高精度、高灵敏度的传感器，以更准确地感知机器人自身状态和外部环境信息。例如，利用光纤传感器可以实现对索力和位移的高精度测量，从而为精确控制提供支持。在人机交互方面，改进操作界面和交互方式，使操作更加直观、便捷，可以提高工作效率和安全性。例如，采用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术，操作人员可以通过沉浸式环境进行机器人控制和任务规划，从而提高操作的准确性和效率。

表 6 高精度传感器与人机交互技术相关核心专利

IN201721004845A	一种基于虚拟现实的机器人系统	Kanade Hrishikesh Dinkar
KR1020190091870A	使用运动传感器和 VR 的机器人控制系统	Pusan National University Industry-University Cooperation Foundation

BRPI2013472A2	具有具有感官反馈和虚实控制的拟人特性的潜水机器人	A A Netto Vasconcelos De Melo Ind
KR1020190007283A	当人接触机器人时收集反应的装置及其方法	Electronics And Telecommunications Research Institute
CN111716365A	基于自然行走的沉浸式远程交互系统及方法	山东大学
CN117260775A	一种基于 BCI 与 VR 融合机器人工作环境的人机交互操作系统及方法	成都正西机器人有限公司
CN109129523A	基于人机交互的移动机器人实时远程控制系统	燕山大学
WO2021154407A1	在制造或工业环境中使用虚拟/增强现实与协作机器人交互的系统和方法	Raytheon Company
IN202511012629A	支持双触摸轻触触觉的虚拟现实 (VR) 控制器	Chandigarh University
IN202411072958A	用于增强 XR 体验的基于电机驱动立方体的 AR 对象跟踪和交互设备	Altie Reality Private Limited
KR102474117B1	用于传感器融合辅助虚拟现实微操作环境中的位置跟踪的系统	Daegu Gyeongbuk Inst Science & Tech
CN117532660A	复合材料直筒型机器人标定专用感知构件及其使用方法	无锡学院
KR1020240131035A	沉浸式机器人系统及其控制方法	Seo
KR101850410B1	仿真基于虚拟现实机器人示教装置和方法	Korea Institute Of Industrial Technology
US20220001538A1	用于向人操作员传送与机器人的操作环境内的人无法察觉的标记相关联的信息的增强现实系统和方法	Sarcos Corp
CN215848224U	一种基于 VR 技术的机器人控制装置	四川天府新区信息职业学院
US10078377B2	融合手跟踪的惯性手持控制器的六自由度混合真实感输入	Microsoft Technology Licensing Llc
US20210237275A1	在制造或工业环境中使用虚拟/增强现实与协作机器人交互的系统和方法	Raytheon Company
WO2022010944A1	用于向人操作员传送与机器人的操作环境内的人无法察觉的标记相关联的信息的增强现实系统和方法	Sarcos Corp

7.1.2. 培养专业人才

吸引和培养一批在索驱动机器人技术领域具有深厚专业知识和丰富实践经验的技术人才，建立一支高素质的研发团队，为公司的技术创新提供智力支持。

校企合作与行业交流

校企合作：与高校、科研机构建立长期稳定的合作关系，共同开展科研项目、人才培养、实习实训等合作。例如，与高校联合培养研究生，为企业输送高层次人才；设立实习基地，为高校学生提供实习机会，提前选拔优秀人才。可合作培养人才的高校有：哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、清华大学、华中科技大学、西北工业大学、中国人民解放军国防科技大学、北京理工大学、天津大学、中山大学、上海交通大学、燕山大学等，

行业交流：积极参与行业组织、协会的活动，加强与同行企业的交流与合作。例如，参加行业展会、技术研讨会、标准制定等活动，了解行业最新动态，提升企业的知名度和影响力；与同行企业开展技术交流、合作研发等，共同推动行业发展。

国际合作：关注国际前沿技术和发展趋势，积极开展国际合作。例如，与国外高校、科研机构、企业开展合作项目、学术交流、人才引进等活动，引进国外先进技术和管理经验，提升企业的国际化水平

7.1.2. 开展产学研合作

与高校、科研机构建立紧密的产学研合作关系，共同开展技术研发和创新，借助外部科研力量提升公司的技术创新能力，加速技术成果的转化和应用。

以下是山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人方面开展产学研合作的一些建议：

合作高校	合作方向
山东大学	山东大学在机器人技术领域具有较强的科研实力，特别是在机械设计、自动化控制等方面。可以与山东亿九电气发展有限公司合作开展索驱动机器人的动力学建模与仿真、控制算法优化等研究，共同开发高性能的索驱动机器人控制系统。
北京理工大学	北京理工大学在机器人工程专业方面具有丰富的经验和优秀的师资力量。可以合作进行索驱动机器人的智能控制技术研究，如开发基于人工智能的自主导航和避障算法，提升机器人在复杂环境下的适应能力。
哈尔滨工业大学	哈尔滨工业大学在航天领域和机器人技术方面有深厚的研究基础。可以合作开展索驱动机器人在空间环境下的应用研究，如模拟空间站舱内服务需求，开发适用于空间微重力环境的机器人装置。
清华大学	清华大学在机器人技术的前沿研究方面具有领先优势。可以合作进行索驱动机器人的新型驱动技术研究，如探索磁悬浮驱动、智能材料驱动等新技术，提高机器人的驱动效率和性能。
上海交通大学	上海交通大学在机械工程和自动化领域有较强的研究能力。可以合作开展索驱动机器人的多机器人协同控制技术研究，实现多台机器人之间的高效通信和协调作业。
北京航空航天大学	北京航空航天大学在航空航天领域和机器人技术

	方面有丰富的研究经验。可以合作开展索驱动机器人在航空航天领域的应用研究，如开发用于太空探索和卫星维修的机器人装置。
浙江大学	浙江大学在机器人技术和自动化控制方面有较强的研究实力。可以合作进行索驱动机器人的虚拟仿真技术研究，利用虚拟仿真平台进行机器人设计、测试和优化，降低研发成本和风险。

合作方式

联合研发项目：与高校和科研机构联合申请国家和地方的科研项目，共同开展索驱动机器人的技术研发和应用研究。

实习实训基地：建立实习实训基地，为高校学生提供实践机会，同时为企业培养潜在的人才资源。

技术咨询与服务：邀请高校和科研机构的专家为企业提供技术咨询和培训服务，提升企业的技术水平和创新能力。

专利与成果共享：与合作院校和科研机构共享研发成果，共同申请专利，推动技术成果的转化和应用。

通过与这些院校和科研机构的合作，山东亿九电气发展有限公司可以在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域取得更大的技术突破和创新成果。

7.2 拟解决关键问题的建议

7.2.1 精确控制问题

以下是一些解决山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境下索驱动机器人精确控制问题的思路：

1. 优化控制算法

采用先进的控制理论：研究和应用先进的控制理论，如自适应控制、模糊控制、滑模控制等，以提高机器人在复杂环境下的适应性和控制精度。例如，自适应控制可以根据环境变化自动调整控制参数，从而更好地应对零重力或低重力环境中的不确定性因素。

引入机器学习算法：利用机器学习算法，如深度强化学习、深度神经网络等，对机器人的运动数据进行学习和分析，从而优化控制策略。例如，通过在线深度 Q 学习方法，可以提高机器人在关键点的定位精度。

采用闭环控制：通过闭环控制方式，实时监测机器人的状态信息，并根据反馈信息进行调整，以确保机器人按照预定轨迹进行平稳、快速和稳定的运动。

2. 提高传感器精度

采用高精度传感器：使用高精度的传感器，如激光测距传感器、视觉传感器、力传感器等，以更准确地感知机器人自身状态和外部环境信息。例如，惯性测量单元（IMU）传感器可实现机器人的定位与导航，已成为机器人精确定位的重要组成部分。

传感器融合技术：采用多种传感器融合技术，如卡尔曼滤波、数据融合算法等，将不同类型的传感器数据进行融合，以提高传感器系统的可靠性和精度。

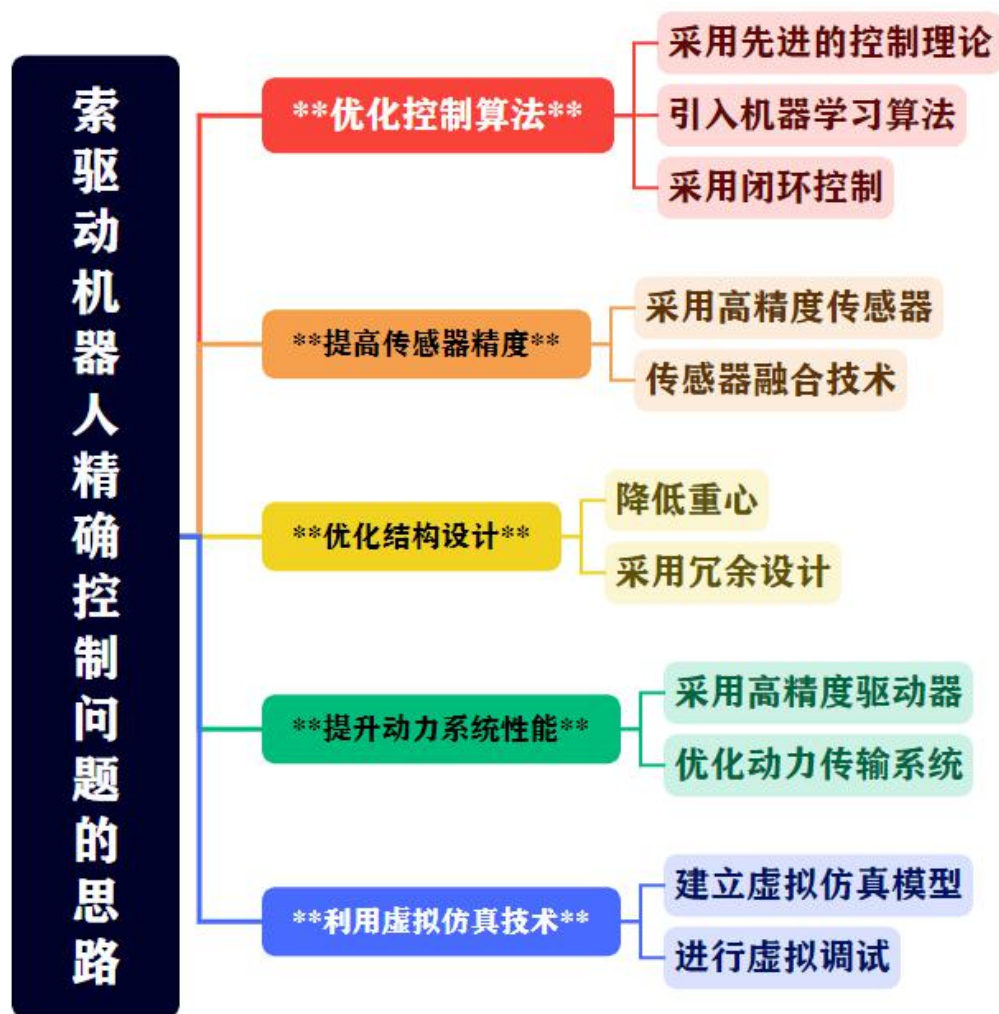


图 39 精确控制问题解决的思维方案

3. 优化结构设计

降低重心：通过优化机器人的结构设计，降低重心位置，以提高机器人的稳定性。例如，可以在机器人底部增加配重，或者调整机器人的结构布局，使重心更接近支撑面。

采用冗余设计：采用冗余设计，如多索驱动、备份控制系统等，以提高机器人的可靠性和容错能力。例如，九索驱动机器人装置采用九索冗余驱动方案，可以提高系统的可靠性和稳定性。

4. 提升动力系统性能

采用高精度驱动器：使用高精度的驱动器，如伺服电机、步进电机等，以提高机器人的运动精度和稳定性。

优化动力传输系统：优化动力传输系统，如采用高精度的减速器、传动装置等，以减少动力传输过程中的误差和损耗。

5. 利用虚拟仿真技术

建立虚拟仿真模型：利用虚拟仿真技术建立机器人的虚拟模型，对机器人的运动和控制进行仿真和优化。通过虚拟仿真，可以在不实际制造机器人的情况下，对机器人的性能进行评估和优化，从而降低研发成本和风险。

进行虚拟调试：在虚拟仿真环境中进行机器人的调试和优化，通过调整控制参数和算法，提高机器人的性能和稳定性。

表 7 解决精确控制问题相关核心专利

CN119720736A	基于强化学习的机器人高精度运动控制算法	无锡广盈集团有限公司
CN119704206A	一种基于内嵌深度融合算法的机器人稳定与平衡控制方法	江苏汀贝科技有限公司
CN119146965A	基于动态环境感知的实时运动规划系统	国家电网有限公司；国网天津市电力公司；国网天津市电力公司培训中心
CN119772885A	基于深度学习的智能机器人控制方法及系统	沈阳工程学院
CN119123954A	一种拉绳位移传感器及其控制方法	东莞朗硕自动化科技有限公司
CN108502053A	一种轮式机器人平台精确控制方法	安徽新华学院
CN118848989A	一种智能机械臂的路径导航控制方法及系统	郑州西亚斯学院
CN118443000A	机器人导航与避障的自适应多模态传感器融合方法及系统	华能核能技术研究院有限公司
CN119610131A	一种多自由度机器人操作系统	集美大学

CN118225083A	基于多传感器融合的机器人导航定位方法	苏州明泰智能装备有限公司
CN103064283A	一种基于人体重心变化的自学习轮椅控制方法	北京工业大学
CN118466203A	基于双闭环控制和自适应卡尔曼滤波的目标追踪控制方法	南通大学
CN119079886A	多传感器融合 SLAM 技术的叉式移动机器人系统	昆山源之正智能科技有限公司
CN118682753A	基于深度学习的协作机器人控制方法、系统及存储介质	无锡埃姆维工业控制设备有限公司
DE102022205999 A1	一种基于深度学习的机器学习算法的训练方法	Robert Bosch Gesellschaft Mit Beschränkter Haftung
CN119115936A	一种堆垛机器人末端多传感器识别方法及其安装机构	立维勒智能科技(苏州)有限公司
CN119458337A	一种基于联邦学习的机器人装配优化方法及系统	广州里工实业有限公司
CN117325182A	一种融合多自适应调控机制的机器人柔顺控制方法	广东省科学院智能制造研究所
CN119576016A	一种面向重负载机器人的运行姿态控制方法、系统及存储介质	深圳市陶氏精密技术有限公司
CN118269102A	一种人工智能机器人姿态控制方法及系统	廊坊市珍圭谷科技股份有限公司
CN107656531A	一种海洋机器人姿态控制方法、装置和系统	深圳华清精密科技有限公司
CN118092246A	一种用于电子元件加工的定位系统	深圳市盛鸿运科技有限公司
JP2014180748A	一种仿人翻转损伤减少	Honda Motor Co Ltd
CN119550335A	一种多模态信息融合的机器人运动规划方法及设备	武汉轻工大学
CN115256415A	基于安全运动的风电机舱多感融合小型化机器人及方法	国核信息科技有限公司
CN111444954A	一种基于多模态感知与学习的机器人自主装配方法	广东省智能制造研究所
CN115319764A	在复杂受限环境下基于多模态融合的机器人及运行方法	中国科学技术大学
CN118463977A	一种面向高运动动态机器人的高精度串级 SLAM 系统	西南交通大学
CN119610142A	一种智能化特种机器人便携式图数一体遥控系统	徐州思润智能科技有限公司
CN112596534A	基于深度强化学习的四足机器人的步态训练方法、装置、电子设备及介质	杭州未名信科科技有限公司；浙江省北大信息技术高等研究院

7.2.2 系统可靠性

以下是一些解决山东亿九电气发展有限公司模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人系统可靠性和安全性的思路：

硬件方面

1. 冗余设计：采用冗余设计，如增加备用的驱动器、控制器、传感器等关键部件，以确保在某个部件出现故障时，系统能够自动切换到备用部件，继续正常运行，从而提高系统的可靠性和安全性。

2. 高质量材料与元件：选用高质量、高可靠性的材料和元件，以提高机器人在长时间操作中的稳定性和耐用性。例如，使用耐磨损、耐腐蚀的材料制造机械结构部件，选用高精度、高可靠性的传感器和电机。

3. 定期检查与维护：建立定期检查和维护制度，对机器人的关键部件进行检查和维护，如清洁、润滑、紧固等，以确保其正常运行。同时，定期对传感器进行校准，以保证其准确性和可靠性。

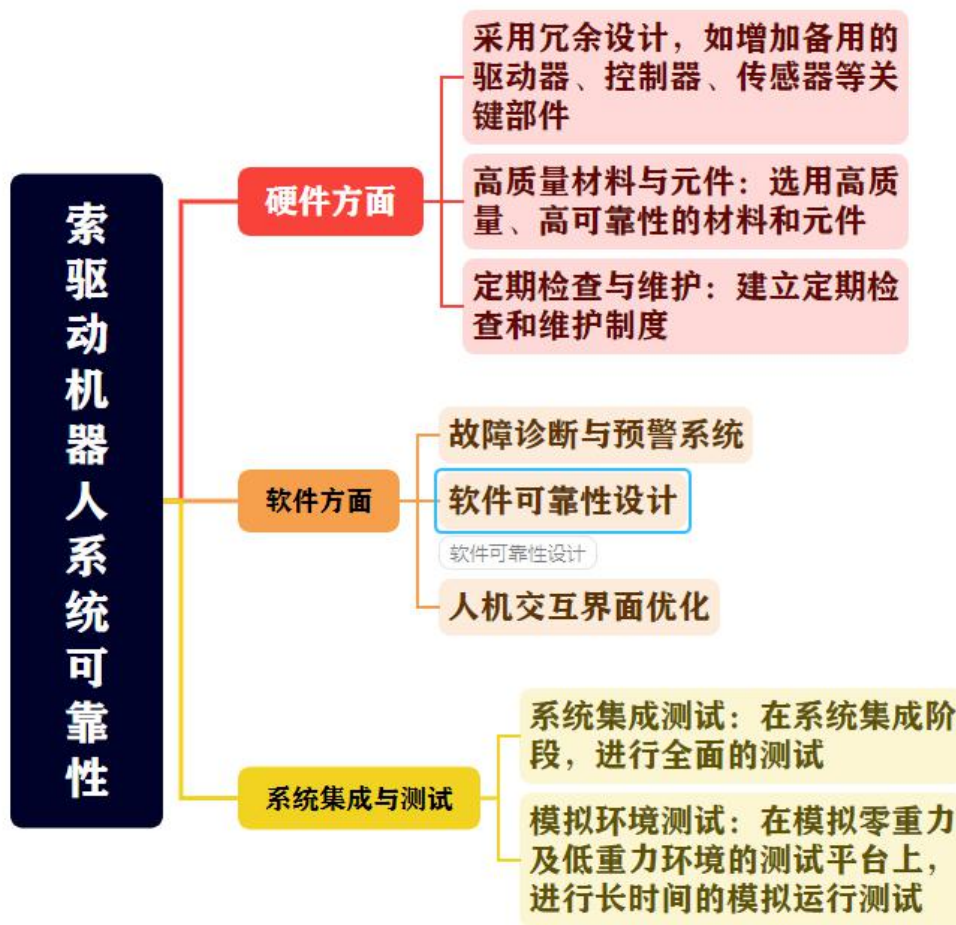


图 40 提高系统可靠性解决方案

软件方面

1. 故障诊断与预警系统：开发先进的故障诊断和预警系统，通过实时监测机器人的运行状态，及时发现潜在的故障隐患，并发出预警信号，以便提前采取措施进行处理，避免故障的发生和扩大。

2. 软件可靠性设计：采用成熟的软件开发方法和工具，进行严格的软件测试和验证，以提高软件的可靠性和稳定性。同时，定期对软件进行更新和升级，修复已知的漏洞和缺陷。

3. 人机交互界面优化：优化人机交互界面，使其更加直观、易用，减少操作人员的误操作。同时，提供详细的操作指南和帮助信息，以

便操作人员能够正确、安全地操作机器人。

系统集成与测试

1. 系统集成测试：在系统集成阶段，进行全面的测试，包括功能测试、性能测试、可靠性测试等，以确保各个部件和子系统之间的兼容性和协同工作能力，及时发现和解决系统集成过程中出现的问题。

2. 模拟环境测试：在模拟零重力及低重力环境的测试平台上，进行长时间的模拟运行测试，以验证机器人在实际工作环境中的可靠性和安全性。通过模拟测试，可以提前发现和解决在实际应用中可能出现的问题，提高系统的稳定性和可靠性。

表 8 提高系统可靠性相关核心专利

CN112536819A	一种故障处理方法、装置、机器人及存储介质	深圳优地科技有限公司
CN119377075A	一种驱控一体化二次开发平台的测试方法、系统和介质	深圳华中数控有限公司
CN118906037A	一种机器人伺服驱动集成系统	江苏辛艾络科技研发有限公司
CN107291589A	在机器人操作系统中提升系统可靠性的方法	中国电子科技集团公司第三十二研究所
US20150149392A1	用于为技术人员管理机器人修理资源集合的软件应用程序	Shawn Patrick Bolich
US7117390B1	实用，冗余，容错，自重构的嵌入式系统体系结构	Paul R Klarer; David R Hayward; Wendy A Amai
WO2019081660A1	硬件模块，机器人系统和用于操作机器人系统的方法	Creaholic S A
CN116494223A	一种基于深度学习的智能机器人控制方法	清华大学；河南清祥人工智能研究院有限公司
CN105856225A	用于运行多轴机器、特别是机器人的方法和系统	库卡罗伯特有限公司
CN119458376A	一种用于机器人的故障自检报错系统	韩春栋
EP3476545A1	用于操作机器人系统的硬件模块的基于计算机的库存的方法	Creaholic Sa
CN111007713A	一种符合功能安全的异构冗余整车控制器	沈阳中科一唯电子技术有限公司
CN107600417A	一种携带冗余度机械臂的飞行机	华南理工大学

	机器人硬件系统设计方法	
CN106773642A	一种基于容错策略的球形机器人控制系统设计方法	哈尔滨工大天才智能科技有限公司
CN119335939A	绕包机器人远程监控与维护系统	国网上海市电力公司
JP07328970A	保持用于机器人控制装置的方法	Fanuc Ltd
CN112001042A	一种变压器检测机器人的硬件系统设计方法及硬件系统	山东电力设备有限公司；西北工业大学
CN212825427U	一种应用于机器人控制系统的安全控制硬件平台	中科新松有限公司
W00184313A2	方法和系统用于实现联网计算机中的高可用性系统	Sun Microsystems Inc
IN202341087472 A	用于自动垃圾收集器的机器人系统	Sri Eshwar College Of Engineering
CN114398759A	一种服务机器人的模块化图形表示方法	苏州大学
CN110376875A	一种用于控制系统的硬件冗余技术实现方法	沈阳中科博微科技股份有限公司
JP2002113675A	机器人控制系统和软件引入用于机器人控制方法	Sony Corp
KR101631007B1	机器人控制装置	Mitsubishi Electric Corp
US20060241811A1	运动控制系统和方法	Brown David W; Clark Jay S
KR102014001049 8A	软件测试装置和测试方法。	Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.
CN108681279A	一种携带冗余度机械臂的飞行机器人电源驱动器的设计方法	华南理工大学
CN116956578A	一种伺服电机控制系统的软件开发方法	黄河科技学院
EP4124948A1	具有机器人工艺自动化的工艺流水线	Sap Se
KR102268053B1	机器人过程自动化智能安全故障诊断系统	Vway Co Ltd

7.2.3 动力学建模与仿真

以下是一些解决山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的动力学建模与仿真问题的思路：

1. 选择合适的建模方法

拉格朗日方法：采用拉格朗日方程建立动力学模型，可以考虑系统的约束条件和能量关系，适用于复杂多体系统的建模。

牛顿-欧拉方法：通过牛顿-欧拉方程描述机器人的动力学行为，能够直接考虑力和力矩的作用，适合于实时仿真和控制。



图 41 动力学建模与仿真系统解决方案

2. 利用专业软件工具

Adams 软件：Adams 是机械系统动力学仿真软件，能够模拟和分析机械系统的动态行为，提供多体动力学的解决方案。

Simpack 软件：Simpack 作为专家级机电系统运动学/动力学仿真

分析软件，求解器技术先进、模块丰富，具有独特的齿轮分析、接触分析、NVH 分析、实时仿真等技术，能准确模拟现实应用中的机械/机电系统。

Matlab/Simulink：使用 Matlab 的符号计算功能和 Simulink 的可视化环境，可以进行精确的动力学建模和仿真，支持多种控制策略的实现。

3. 考虑环境因素

零重力和低重力模拟：在建模过程中，需要考虑模拟零重力和低重力环境的特殊条件，如通过悬挂系统或浮力装置来实现。参数调整：根据实际的重力环境参数，调整模型中的重力加速度和其他相关参数，以确保模型的准确性。

4. 模型验证与优化

实验验证：通过实验平台对建立的动力学模型进行验证，比较仿真结果与实际测量数据，评估模型的准确性。参数优化：利用优化算法对模型参数进行优化，提高模型的精度和可靠性。

5. 控制策略集成

实时控制：将动力学模型与控制策略相结合，实现机器人的实时运动控制。仿真验证：在仿真环境中测试控制策略的有效性，优化控制参数，提高系统的稳定性和性能。

通过以上方法，山东亿九电气发展有限公司可以建立准确的动力学模型，进行有效的运动预测和控制，从而提升索驱动机器人在模拟零重力及低重力环境下的性能和可靠性。

表 8 动力学建模与仿真相关核心专利

CN119720545A	一种模块化机器人动力学建模方法	北京邮电大学
CN116149204A	一种双足机器人的动力学建模与控制方法	五八智能科技(杭州)有限公司
CN117131704A	一种面向机器人在轨组装的耦合动力学建模方法及系统	中山大学
CN116861596A	一种 6 自由度并联机器人的动力学建模方法及系统	常熟理工学院
CN110083982A	多肢腿式机器人分布式动力学建模方法	山东大学
CN112743545A	一种六轴工业机器人的动力学建模方法	清华大学
CN111783248A	一种工业机器人动力学建模及动力学参数识别方法	南京航空航天大学
CN104143021A	一种空间绳网机器人的逼近动力学建模方法	西北工业大学
CN115048684A	一种陆空两栖机器人的爬行模态动力学建模方法	中国兵器工业计算机应用技术研究所；天津商业大学
CN115157238A	一种多自由度机器人动力学建模和轨迹跟踪方法	郑州大学
CN107562968A	一种足式机器人动力学建模的混合计算方法	沈阳新松机器人自动化股份有限公司
CN103729517A	一种空间柔性网机器人系统动力学建模方法	西北工业大学
CN115890674A	一种基于末端力控传感器的多轴机器人动力学建模方法	杭州柳叶刀机器人有限公司
CN118643736A	一种模型数据双驱动机器人动力学建模方法	天津大学
CN116184860A	磁吸履带式爬壁机器人动力学建模与控制方法	北京国领智能科技有限公司
CN117634093A	一种双足仿生机器人动力学建模方法、装置及介质	湖南大学；清华大学
CN113191045A	一种并联机器人动力学建模的全局独立广义位移坐标方法	嘉兴学院
CN108038286A	一种二自由度冗余驱动并联机器人的动力学建模方法	长安大学
CN113021331A	一种七自由度协作机器人动力学建模与辨识方法	沈阳智能机器人创新中心有限公司；沈阳智能机器人国家研究院有限公司；中国科学院沈阳自动化研究所
CN107256284A	一种实时交互式四足机器人多步	中国北方车辆研究所

	态动力学建模方法及系统	
CN113146617A	一种柔性机器人动力学建模及轨迹跟随控制方法及装置	中山大学
CN116551679A	含闭环约束结构的仿人机器人全身正/逆动力学建模方法	之江实验室
CN116652937A	一种机器人柔性碰撞动力学建模与阻抗控制方法	广州大学
CN108621159A	一种基于深度学习的机器人动力学建模方法	首都师范大学
CN107169196A	空间机器人由末端执行器向基座的动力学建模方法	西北工业大学
CN113534817A	移动机器人动力学建模和轨迹跟踪控制方法及装置	山东科技大学
CN118313155A	一种人形机器人用行星滚柱丝杠系统动力学建模方法	广西大学
CN114442649A	一种双足机器人混杂动力学建模和运动规划方法	之江实验室
CN110539302A	一种工业机器人整体动力学建模及动力学参数辨识方法	南京航空航天大学
CN115329562A	一种基于 MATLAB 的 VCSEL 阵列外腔锁相过程的动力学建模仿真方法	北京工业大学

7.2.4 环境适应性

以下是一些解决机器人在不同微重力环境中适应性问题的思路：

1. 结构设计优化

模块化设计：采用模块化设计思路，使机器人的不同部件可以根据任务需求和微重力环境的变化进行快速更换和调整。例如，针对不同的微重力环境，可以更换不同材质、不同形状或不同质量的索驱动模块，以适应不同的重力条件和任务要求。

轻量化设计：在保证结构强度和刚度的前提下，尽量采用轻量化材料和结构设计，以降低机器人的整体重量，减少在微重力环境下对索驱动系统的负担。例如，可以采用高强度铝合金、碳纤维复合材料

等轻质高强度材料。

仿生结构设计：借鉴自然界中生物的适应性结构，如壁虎的脚趾结构，设计具有黏附能力和适应性的机器人结构。例如，可以设计具有微纳结构的黏附脚垫，使机器人能够在微重力环境下稳定地附着在各种表面上。

2. 驱动与控制技术改进

自适应控制算法：开发自适应控制算法，使机器人能够根据实时感知的微重力环境参数（如重力加速度、姿态变化等）自动调整驱动参数和控制策略。例如，采用模糊控制、神经网络控制等智能控制方法，实现对机器人运动的精确控制和自适应调整。

多模态运动控制：赋予机器人多种运动模式，如行走、攀爬、飞行等，使其能够根据不同的微重力环境和任务需求灵活切换运动方式。例如，在微重力环境下，机器人可以通过调整索驱动系统的张力和角度，实现类似于“漂浮”或“滑翔”的运动方式。

冗余驱动设计：增加驱动系统的冗余度，如采用多索驱动或冗余关节设计，以提高机器人在微重力环境下的可靠性和容错能力。当某个驱动部件出现故障时，其他冗余部件可以继续工作，确保机器人能够完成任务。

3. 感知与反馈增强

高精度传感器应用：配备高精度的传感器，如力传感器、位移传感器、加速度传感器、陀螺仪等，以实时感知机器人的状态和微重力环境的变化。例如，通过力传感器监测索驱动系统的张力变化，及时

调整驱动参数，以适应微重力环境下的受力变化。

视觉与触觉融合感知：结合视觉传感器和触觉传感器，实现对环境的多维度感知。例如，利用视觉传感器获取环境的几何信息和障碍物分布，利用触觉传感器感知机器人与环境的接触力和摩擦力，从而更好地适应微重力环境下的复杂任务。

环境感知与建模：利用传感器数据构建微重力环境的数字模型，使机器人能够提前预判环境变化，并据此调整运动轨迹和控制策略。例如，通过激光雷达或视觉传感器获取环境的三维模型，结合机器学习算法，预测微重力环境下物体的运动状态和机器人的运动趋势。

4. 材料与表面处理创新

高性能材料选择：选用具有高强度、高韧性、低密度和良好热稳定性的材料，以提高机器人在微重力环境下的性能和可靠性。例如，采用新型铝基碳化硅复合材料、镍基钛记忆合金等高性能材料，能够有效抵御太空中的极端温差和辐射环境。

表面处理技术：对机器人的表面进行特殊处理，如涂层、镀膜等，以增强其抗磨损、抗腐蚀和抗辐射能力。例如，在机器人的表面涂覆一层防辐射涂层，可以有效减少微重力环境下宇宙射线对机器人的损害。

自修复材料应用：探索自修复材料在机器人中的应用，使机器人在受到轻微损伤时能够自动修复，提高其在微重力环境下的生存能力和任务完成率。



图 42 提高环境适应性的系统解决方案

5. 虚拟仿真与测试

微重力环境模拟：利用虚拟仿真技术建立微重力环境的数字模型，通过模拟不同的微重力条件和任务场景，对机器人的设计和性能进行测试和优化。例如，采用悬吊系统或磁悬浮系统模拟微重力环境，进行机器人的运动学和动力学分析。

数字孪生技术：构建机器人的数字孪生模型，实现对机器人在微重力环境下的实时监控和性能评估。通过数字孪生模型，可以提前预

测机器人的故障和性能变化，及时进行维护和调整。

虚拟测试与优化：在虚拟仿真环境中进行大量的机器人测试，收集数据并进行分析，以优化机器人的设计和控制策略。例如，通过虚拟测试评估不同结构设计和控制算法在微重力环境下的性能表现，选择最优方案进行实际应用。

表 8 提高环境适应性相关核心专利

CN118124799A	一种用于扑翼飞行机器人的环境适应性起落机构	苏州大学
CN119805941A	智能感知机器人的环境适应性自优化方法及系统	超级视线科技有限公司
CN111562017A	包含环境适应性控温和测温方法的人体温度筛查机器人	清华大学；烟台清科嘉机器人联合研究院有限公司
CN110153996A	一种高环境适应性软体机器人用仿生足	江苏大学
CN102736628A	一种具有环境适应性的足式机器人稳定性控制方法及系统	华中科技大学
CN118528286A	一种环境适应性强的准确智能化导航机器人	蚌埠学院
CN119058843A	多环境适应性强的履带式地震应急救援机器人	河北石安特智能科技有限公司
CN114470551A	环境适应性强的深井自动探测救援机器人的救援方法	西华大学
CN118049560A	一种模块化多环境适应性预充气管道机器人	西南石油大学
JP2020044591A	自主作业支援机器人的环境适应性增强系统、作业模拟装置及其程序	Waseda Univ; Future Robotics Co Ltd
US20110077773A1	具有多智能体系统的环境适应性形状	Yu Chih Han; Nagpal Radhika
CN112643692A	高环境适应的刚柔耦合移动机器人	重庆大学
CN119567266A	用于感知机器人的适应性行为规划系统	爱泊车科技有限公司
CN207115190U	一种多环境适应探测机器人	金华市兴飞机器人有限公司
CN117621107A	一种具有实时辐射应对和环境适应技术的核电机器人系统	北京大学
CN209654854U	提高管道机器人适应性的拓展装	深圳市蓝德智能机器人

	置	有限公司
CN107247455A	一种多环境适应探测机器人及其进行铁路检修的方法	金华市兴飞机器人有限公司
CN110843953A	一种具有缓冲与助推功能的并联式机器人腿	北京理工大学
CN108469732A	基于DMP的机器人工作空间适应性行走控制系统及方法	同济大学
CN115233946A	一种多环境适应式重量增强型外墙全自动喷涂机器人	江苏淮洋建筑材料有限公司
CN113119084A	一种基于IIC总线的模块化机器人及控制方法	同济大学
CN115503819A	一种机器人转向方法及装置	山东新一代信息产业技术研究院有限公司
CN109987167A	一种面向涉核复杂环境的高度适应性机器人通用运动平台	中国核动力研究设计院
KR1020200063879A	基于人工智能的环境适应型时间同步的多移动机器人覆盖方法及系统	Research & Business Foundation Sungkyunkwan University
CN211164007U	一种具有高适应性的机器人	黎明职业大学
CN105564528A	一种机器人高适应性足部机构	大连理工大学
CN116627066A	一种用于复杂环境的智能服务机器人	浙江师范大学
CN118990626A	多场景下的机器人适应性测试方法及平台	江苏宁昆机器人智能科技有限公司
CN114995459A	机器人的控制方法、装置、设备及存储介质	乐聚(深圳)机器人技术有限公司
CN116690601A	一种驱动箱分离的可升降连续型机器人	天津大学

7.2.5 技术创新与突破

以下是山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人方面的机械设计、控制算法和材料应用等领域的技术突破解决思路：

机械设计方面

1. 结构优化：采用轻量化设计，使用高强度铝合金或碳纤维复合

材料等轻质高强度材料，减少机器人自身重量，提高负载能力。同时，优化索驱动系统的布局，采用多索冗余设计，提高系统的可靠性和冗余度。

2. 关节设计：设计高精度、低摩擦的关节，采用先进的轴承技术和润滑方式，减少关节磨损，提高运动精度和寿命。可以借鉴 HoST 框架中的平滑正则化技术，减少剧烈动作，降低关节磨损风险。

3. 模块化设计：采用模块化设计思想，将机器人分解为多个可替换的模块，便于维护和升级。例如，可以将驱动单元、传感器、控制系统等设计成独立的模块，方便更换和升级。

控制算法方面

1. 先进控制算法：采用自适应控制、模糊控制、滑模控制等先进控制算法，提高机器人在复杂环境下的稳定性和精度。例如，可以设计基于奇异摄动理论的级联控制方案，简化控制算法设计，并利用吉洪诺夫（Tikhonov）定理分析系统稳定性。

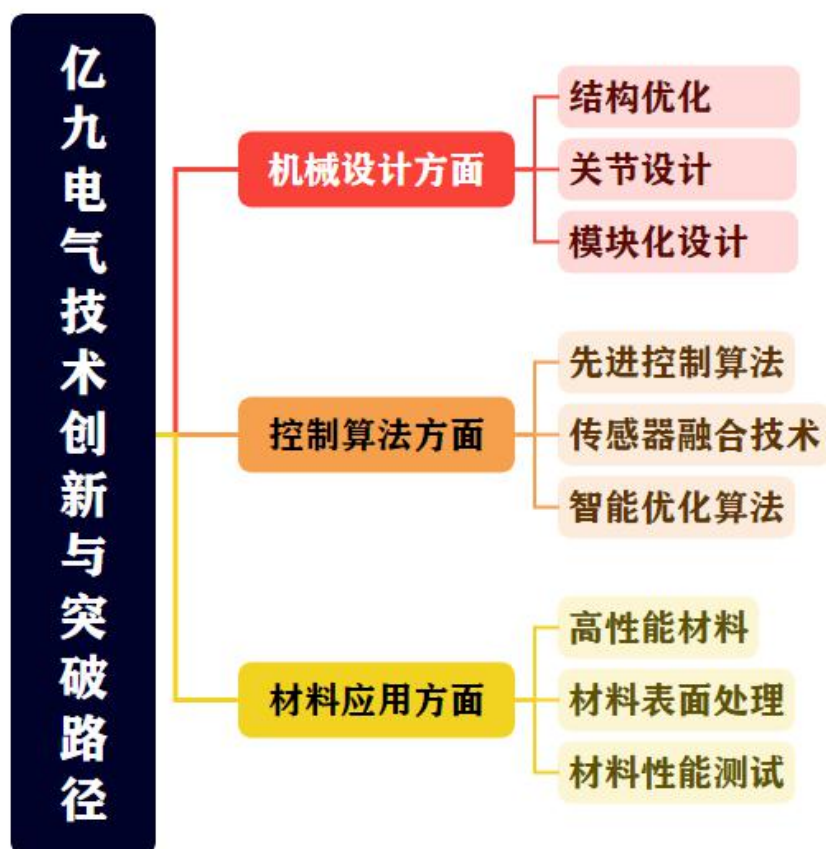


图 43 技术创新与突破路径指导

2. 传感器融合技术：采用多种传感器融合技术，如力传感器、位移传感器、视觉传感器等，实现对机器人状态的全面感知。可以借鉴互补滤波法或卡尔曼滤波法，将不同传感器的数据进行融合，提高数据的可靠性和准确性。

3. 智能优化算法：采用智能优化算法，如遗传算法、粒子群优化算法等，对控制参数进行优化，提高控制性能。例如，可以利用扰动观测器补偿模型偏差和外部扰动，同时避免滑模控制器的抖振缺陷。

材料应用方面

1. 高性能材料：采用高性能材料，如形状记忆合金、智能材料等，提高机器人的性能和适应性。例如，可以采用形状记忆合金制作机器

人关节，使其具有自恢复功能，提高机器人的可靠性和寿命。

2. 材料表面处理：采用先进的材料表面处理技术，如涂层技术、镀膜技术等，提高材料的耐磨性、耐腐蚀性和润滑性。例如，可以在索驱动系统的绳索表面涂覆一层耐磨涂层，减少绳索的磨损，提高其使用寿命。

3. 材料性能测试：建立完善的材料性能测试平台，对新材料的性能进行测试和评估，为材料的选择和应用提供科学依据。例如，可以对不同材料的强度、刚度、韧性等性能进行测试，选择最适合索驱动机器人的材料。

7.3 拓展市场应用领域

7.3.1 开拓新市场

在巩固现有市场的基础上，积极开拓新的市场应用领域，如航天、航空、科研、军事等，扩大产品的市场覆盖面。

航天航空领域

卫星与航天器制造：与卫星制造企业合作，提供模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人，用于卫星的组装、测试和维护。例如，在卫星发射前的地面测试阶段，使用该机器人模拟太空环境，确保卫星在实际发射和运行中的可靠性。

航空零部件制造：为航空零部件制造商提供机器人，用于在模拟低重力环境下进行零部件的加工和装配，提高零部件的精度和质量，满足航空领域对零部件高精度的要求。

医疗健康领域

康复医疗设备：开发专门用于康复治疗的索驱动机器人，模拟零重力及低重力环境，帮助患者进行康复训练，减轻患者在康复过程中的痛苦和负担，提高康复效果。

医疗设备制造：与医疗设备制造商合作，提供机器人用于医疗设备的生产制造，如在模拟低重力环境下进行精密仪器的组装和调试，提高医疗设备的制造精度和可靠性。

科研教育领域

高校与科研机构合作：与高校和科研机构建立合作关系，提供机器人用于科研实验和教学活动，帮助学生和研究人员更好地理解和研究零重力及低重力环境下的物理现象和工程问题。

科普教育：开发面向公众的科普教育产品，如模拟零重力及低重力环境的体验设备，用于科普展览和教育活动，提高公众对航天科技和机器人技术的兴趣和认知。

工业自动化领域

电子电气行业：针对电子电气行业的生产制造需求，提供机器人用于电子元件的组装、检测和包装等环节，提高生产效率和产品质量，满足电子电气行业对自动化和智能化生产的需求。

汽车制造行业：与汽车制造商合作，提供机器人用于汽车零部件的生产制造和整车装配过程，如在模拟低重力环境下进行大型零部件的搬运和装配，提高生产效率和安全性。

物流仓储领域

自动化仓库：开发用于自动化仓库的索驱动机器人，模拟零重力

及低重力环境，提高货物的搬运和存储效率，降低人工成本和劳动强度。

物流配送：与物流企业合作，提供机器人用于物流配送过程中的货物装卸和搬运，提高物流配送的效率和准确性。

特种作业领域

危险环境作业：开发用于危险环境作业的索驱动机器人，如在核电站、化工厂等场所进行设备维护和检修工作，模拟零重力及低重力环境，提高机器人在复杂环境下的作业能力和安全性。

救援与抢险：与救援机构合作，提供机器人用于地震、洪水等灾害现场的救援和抢险工作，模拟零重力及低重力环境，提高机器人在复杂地形和环境下的救援能力。

7.3.2 加强市场调研

定期开展市场调研，了解市场需求和行业发展趋势，及时调整市场策略，为产品的市场推广提供有力支持。

政策导向分析：关注国家及地方政府出台的关于机器人产业的政策文件，如《“十四五”机器人产业发展规划》等，了解政策对机器人产业的支持方向和重点领域，以及对模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人相关应用领域的扶持政策。

资金支持与补贴政策：调研政府对机器人研发企业的资金支持和补贴政策，如专项科研基金、税收优惠、财政补贴等，评估企业可获得的政策资源，以降低研发成本，加速技术成果转化。

知识产权保护政策：了解国家和地方政府在知识产权保护方面的

法律法规和政策措施，确保企业的技术创新成果得到有效保护，激励企业加大创新投入。

应用领域需求分析：深入了解模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人在不同应用领域的需求情况，如航空航天、深海探测、工业制造、医疗康复、教育科研等。分析各领域对机器人的功能、性能、精度、可靠性等方面的具体要求，以及市场需求的规模和增长趋势。

客户群体调研：识别和分析潜在的客户群体，包括企业、科研机构、政府部门等。了解他们的采购决策因素、预算限制、使用习惯和售后服务需求等，以便制定针对性的市场策略。

市场需求预测：结合行业发展趋势和市场动态，对未来几年模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的市场需求进行预测，为企业的产品研发和市场拓展提供参考依据。

竞争对手分析：识别国内外主要的竞争对手，包括在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域具有技术优势和市场份额的企业。分析他们的产品特点、技术实力、研发能力、市场策略、销售渠道和客户群体等，找出自身的竞争优势和差距。

市场竞争格局：研究模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人市场的竞争格局，包括市场集中度、竞争激烈程度、市场进入壁垒等。了解市场上的主要竞争力量和竞争态势，为企业制定竞争策略提供依据。

差异化竞争策略：基于对竞争对手和市场需求的分析，探索企业的差异化竞争策略，如技术创新、产品性能提升、成本控制、个性化

服务等，以提高企业的市场竞争力。

机器人技术发展动态：关注机器人领域的最新技术发展动态，如人工智能、机器学习、传感器技术、驱动技术、控制算法等。了解这些技术在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人中的应用前景和潜力，为企业技术研发提供方向。

行业技术标准与规范：调研模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人行业的技术标准和规范，包括国内外相关标准的制定情况、更新趋势和实施情况。确保企业的产品符合行业标准，提高产品的市场认可度和竞争力。

技术合作与创新机会：探索与高校、科研机构、其他企业等进行技术合作的机会，共同开展技术研发和创新。了解行业内的技术合作模式和创新生态，为企业的技术发展提供支持。

7.3.3 建立品牌形象

品牌定位与策略制定

明确品牌定位：确定品牌希望消费者联想到的核心属性，如高科技、高质量、专业服务等，并将品牌定位与消费者心理诉求关联，使其在潜在客户心智中具有独特印象。**品牌差异化与价值主张：**强调品牌的独特性，如独家技术、独特设计、行业领先的品质管控标准等，确立明确的价值主张，让消费者理解品牌为何值得信赖。

品牌视觉形象设计

Logo 设计：创建一个简洁、易记且具有代表性的品牌标志，体现企业的核心价值 and 特点。**制定传播策略：**根据目标客户群体的特点，

选择合适的传播渠道，如社交媒体、行业媒体、专业论坛、线下展会等。内容创作与营销：创作有吸引力的传播内容，如品牌故事文章、产品介绍视频、用户案例分享等，引发受众的情感共鸣，提高品牌知名度与美誉度。口碑营销与公关活动：鼓励客户分享品牌体验，建立良好的口碑传播体系；策划公关活动，如新品发布会、公益活动等，吸引媒体关注与报道，提升品牌的社会影响力与公信力。

7.4 知识产权发展建议

7.4.1 知识产权战略规划

制定明确的知识产权目标：根据企业的整体发展战略，制定具体的知识产权目标，如专利申请数量、商标注册数量、技术秘密保护数量等，并将这些目标分解到各个部门和研发项目中，确保知识产权工作与企业战略紧密结合。

进行专利布局：围绕模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人的核心技术，进行全方位、多层次的专利布局。可以采用地毯式策略，将产品制造流程的每一个步骤都用专利覆盖，形成专利保护网，阻止竞争对手进入；同时，也可以采用包围策略，以多个应用性专利包绕或围住竞争对手的基础或关键性专利，阻断其商业化的途径。

加强商标保护：及时对企业的商标进行注册，确保获得专用权。注册时应考虑国内外市场，并选择合适的类别进行申请。同时，建立商标监测机制，定期对市场中可能侵犯企业商标的行为进行监控，及时发现并处理侵权行为。

重视技术秘密保护：对于一些不适宜申请专利但具有商业价值的

技术秘密，如独特的算法、设计图纸、实验数据等，要采取严格的保密措施，如与员工签订保密协议、限制访问权限、加强物理和信息安全管理等，防止技术秘密泄露。

7.4.2 知识产权管理体系建设

建立专门的知识产权管理机构：设立专门的知识产权管理部门，负责企业知识产权的创造、运用、保护和管理等工作。该部门应配备专业的知识产权管理人员，明确其职责和权限，确保知识产权工作有序开展。

完善知识产权管理制度：制定完善的知识产权管理制度，包括专利管理制度、商标管理制度、技术秘密管理制度等。明确知识产权的申请、维护、使用、转让等流程和规范，确保知识产权管理工作的规范化和标准化。

加强知识产权人才培养：重视知识产权人才的培养和引进，鼓励员工参加知识产权培训和学习，提高员工的知识产权意识和专业水平。同时，可以与高校、科研机构等合作，引进专业的知识产权人才，为企业知识产权工作提供支持。

加强与外部机构的合作：与专业的知识产权代理机构、律师事务所等建立长期稳定的合作关系，借助其专业的知识和经验，提高企业知识产权申请的成功率和管理水平。同时，积极参与行业协会、知识产权联盟等组织的活动，加强与同行企业的交流与合作，共同应对知识产权问题。

7.4.3 知识产权运营与管理

加强知识产权的评估与管理：定期对企业的知识产权进行评估，了解其价值和市场潜力，为知识产权的运营和管理提供依据。同时，建立知识产权管理信息系统，对知识产权的申请、维护、使用等情况进行实时监控和管理，提高知识产权管理的效率和水平。

促进知识产权的转化与运用：积极寻求知识产权的转化和运用途径，如通过专利许可、转让、质押融资等方式，将知识产权转化为企业的经济收益。同时，加强与高校、科研机构等的合作，推动知识产权的产业化和商业化应用。

加强知识产权的风险管理：建立知识产权风险预警机制，及时发现和评估企业在知识产权方面可能面临的风险，如侵权风险、专利无效风险等，并采取相应的措施加以防范和应对。同时，购买知识产权保险，降低企业因知识产权纠纷而遭受的经济损失。

7.5 总结

本文围绕山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术研发和创新发展战略进行了全面探讨。首先强调了技术研发与创新的重要性，建议公司加大研发投入，围绕智能化控制、新型驱动技术、新材料应用等技术热点展开研发，并培养专业人才以支持技术创新。同时，提出公司应开展产学研合作，与多所高校和科研机构建立合作关系，共同推进技术研发和创新，合作方向涵盖动力学建模、智能控制、传感器技术等多个领域。

针对索驱动机器人在精确控制、系统可靠性、动力学建模与仿真、环境适应性以及技术创新与突破等方面的关键问题，提出了相应的解

决思路和建议。例如，在精确控制方面，建议优化控制算法、提高传感器精度、优化结构设计等；在系统可靠性方面，提出了硬件冗余设计、软件可靠性设计、故障诊断与预警系统等措施。

在市场应用领域拓展方面，建议公司开拓新市场，如航天航空、医疗健康、科研教育、工业自动化、物流仓储和特种作业等领域，并加强市场调研以了解市场需求和行业发展趋势。同时，强调了建立品牌形象的重要性，提出了品牌定位、视觉形象设计、品牌传播与推广、品牌维护与危机管理以及品牌文化建设等方面的建议。

最后，在知识产权发展方面，提出了知识产权战略规划、管理体系建设、运营与管理等方面的建议，旨在帮助公司制定明确的知识产权目标，建立完善的知识产权管理制度，加强知识产权的评估、转化、运用和风险管理，以提升公司的核心竞争力。

第八章总结

本文全面探讨了山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术研发和创新发展战略。首先,本文概述了索驱动机器人技术的发展现状,包括其在航天、医疗、工业等领域的广泛应用,以及国内外在该领域的技术进展和专利布局。接着,本文深入分析了山东亿九电气发展有限公司的技术创新成果,包括其在驱动系统、控制系统、机械结构等方面的核心专利技术。此外,本文还探讨了公司在技术研发过程中面临的挑战,如精确控制、系统可靠性、动力学建模与仿真、环境适应性等,并提出了相应的解决思路。最后,本文为山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域的创新发展提供了具体策略建议,包括技术研发、市场拓展、知识产权保护等方面。

8.1 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术概述

本文首先介绍了模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人技术的基本原理和应用背景。索驱动机器人通过多根绳索连接基础框架和模拟负载平台,利用绳索的张力来抵消负载的重力,从而模拟零重力或低重力环境。这种技术在航天领域具有重要应用,如航天飞行器设计、航天员训练、空间对接实验等。文章详细阐述了索驱动机器人的结构组成,包括基础框架、绳索、绳索驱动单元、绳索导向装置、模拟负载平台、传感器和控制系统等,并解释了各部分的功能和作用。此外,文章还介绍了索驱动机器人的多种应用方法,如抛物线飞行训练法、浮力平衡法、刚性并联机构模拟设备、索驱动机器人装置以及

虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，分析了各自的优势与局限性。通过这些介绍，本文为读者提供了一个全面的索驱动机器人技术概览，为后续的深入分析奠定了基础。

8.2 山东亿九电气发展有限公司技术创新与专利布局

山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域取得了显著的技术创新成果。公司在驱动系统、控制系统、机械结构等方面拥有多项核心专利技术。例如，在驱动系统方面，公司开发了高精度索驱动系统和柔性索驱动系统，通过多根绳索协同工作，实现对模拟负载平台的精确位姿控制和力施加。在控制系统方面，公司设计了智能控制系统和多自由度运动平台，基于先进的传感器技术、控制算法和人机交互界面，实现对机器人的精确操作和实时监控。在机械结构方面，公司通过优化设计，提高了系统的稳定性和控制精度。此外，公司还注重材料轻量化设计，采用轻质高强度材料和先进的制造工艺，减少机器人的重量，提高其在低重力环境下的运动效率。通过这些技术创新，山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域建立了坚实的技术基础，并通过专利布局保护了其知识产权。

8.3 技术研发面临的挑战与解决思路

尽管山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域取得了显著进展，但仍面临一些技术挑战。例如，在精确控制方面，公司需要进一步优化控制算法，提高传感器精度，优化结构设计，以确保机器人在复杂环境下的稳定性和精度。在系统

可靠性方面，公司需要加强硬件冗余设计，提高软件可靠性，建立故障诊断与预警系统，以提高系统的可靠性和安全性。在动力学建模与仿真方面，公司需要选择合适的建模方法，利用专业软件工具，考虑环境因素，进行模型验证与优化，以提高模型的准确性和可靠性。在环境适应性方面，公司需要通过结构设计优化、驱动与控制技术改进、感知与反馈增强等措施，提高机器人在不同微重力环境下的适应性。针对这些挑战，本文提出了一系列解决思路，包括技术改进、系统优化、材料创新等，为公司的技术研发提供了参考。

8.4 创新发展策略建议

为了进一步推动山东亿九电气发展有限公司在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域的技术创新和市场拓展，本文提出了一系列创新发展策略建议。在技术研发方面，公司应加大研发投入，围绕智能化控制、新型驱动技术、新材料应用等技术热点展开研发，并培养专业人才以支持技术创新。同时，公司应开展产学研合作，与高校和科研机构建立合作关系，共同推进技术研发和创新。在市场拓展方面，公司应开拓新市场，如航天航空、医疗健康、科研教育、工业自动化等领域，并加强市场调研以了解市场需求和行业发展趋势。此外，公司应建立品牌形象，通过优质的产品和服务提高品牌知名度和美誉度。在知识产权保护方面，公司应制定明确的知识产权目标，建立完善的知识产权管理制度，加强知识产权的评估、转化、运用和风险管理。通过这些策略，山东亿九电气发展有限公司可以进一步提升其在模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人领域的核心竞争力，实

现可持续发展。

附件一 图目录

图 1 抛物线飞行训练法原理图.....	27
图 2 浮力平衡法基本原理.....	28
图 3 索驱动机器人模拟微重力环境示意图.....	29
图 4 虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术原理图.....	31
图 5 近年柔索驱动机器人控制方法典型研究.....	40
图 6 柔索驱动机器人关键结构与子系统.....	41
图 7 索驱动机器装置智能避障.....	43
图 8 索驱动机器人路径规划与感知.....	45
图 9 全球模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利申请趋势	50
图 10 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利来源国分布	55
图 11 索驱动机器人专利申请人情况.....	56
图 12 索驱动机器人国内专利申请趋势.....	58
图 13 索驱动机器人国内专利省份分布.....	61
图 14 索驱动机器人国内专利申请人类型.....	63
图 15 索驱动机器人国内专利申请人排名.....	64
图 16 索驱动机器人国内专利 IPC 技术分布.....	70
图 17 索驱动机器人专利热词分析.....	72
图 18 索驱动机器人模拟零重力专利转让趋势.....	78
图 19 索驱动系统典型装置图.....	82
图 20 控制系统技术典型控制流程图.....	87

图 21	索驱动模拟低重力经典机械结构技术.....	91
图 22	一种应用于太空物资运输和装配的绳索牵引机器人附图	95
图 23	索驱动结构在医疗中的应用图.....	96
图 24	索驱动机器人被用于货物搬运和分拣操作的示意图.....	97
图 25	山东亿九电气发展有限公司专利申请趋势.....	112
图 26	山东亿九电气发展有限公司专利类型.....	113
图 27	专利技术 IPC 分布.....	114
图 28	技术词云图.....	114
图 29	清华大学技术创新词云图.....	122
图 30	哈尔滨工业大学技术创新词云图.....	125
图 31	天津航天机电设备研究所技术创新词云图.....	129
图 32	北京卫星环境工程研究所技术词云图.....	132
图 33	中国科学院沈阳自动化研究所技术创新词云.....	135
图 34	北京戴纳实验科技有限公司技术创新词云.....	137
图 35	北京吾天科技有限公司技术创新词云.....	141
图 36	精确控制问题解决的思维方案.....	156
图 37	提高系统可靠性解决方案.....	160
图 38	动力学建模与仿真系统解决方案.....	163
图 39	提高环境适应性的系统解决方案.....	169
图 40	技术创新与突破路径指导.....	173

附件二 表目录

表 1 模拟零重力及低重力环境的索驱动机器人专利导航专业术语说明.....	16
表 2 专利 IPC 分类号释义.....	70
表 3 国内索驱动机器人模拟零重力微重力相关发明人.....	76
表 4 索驱动机器人模拟零重力专利转让情况.....	78
表 5 高精度索驱动系统专利技术迭代热点.....	84
表 6 智能控制系统技术专利迭代热点.....	错误！未定义书签。
表 7 索驱动模拟低重力经典机械结构技术技术热点.....	91
表 8 材料轻量化设计专利核心热点.....	93
表 9 济宁亿九电气专利列表.....	114
表 10 清华大学索驱动模拟低重力核心专利分析表.....	123
表 11 哈工大核心专利分析表.....	126
表 12 天津航天机电设备研究所核心专利分析表.....	129
表 13 中国科学院沈阳自动化研究所核心专利分析.....	135
表 14 北京戴纳实验科技有限公司核心专利分析.....	138
表 15 北京吾天科技有限公司核心专利分析.....	141
表 16 机器人协同相关核心专利.....	145
表 17 新型驱动与控制技术相关核心专利.....	148
表 18 新材料与结构优化相关核心专利.....	149