

人形机器人技术与产业发展研究

徐程浩^{1,2}, 王耀南^{1,2*}, 莫洋^{1,2}, 朱青^{1,2}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 长沙 410082)

摘要: 随着人工智能、高端制造、新材料等技术的不断融合与突破, 我国人形机器人产业迎来爆发式增长, 技术创新和政策支持推动形成了多元化竞争格局, 但人形机器人产业发展仍面临核心技术差距大、规模化量产难、商业化落地难等问题。本文在介绍人形机器人主要细分领域与技术前沿的基础上, 深入分析了全球人形机器人在政策、技术、产业布局方面的发展现状与趋势, 梳理了我国人形机器人技术与产业发展态势, 总结了我国人形机器人发展面临的机遇与挑战, 从技术创新、定点示范、法律法规完善、政策引导等方面提出了具体发展路径。研究建议, 鼓励核心技术突破、强化产业布局、建设人形机器人基础设施、实施示范性工程, 推动我国人形机器人产业克服技术难题、完善产业生态、实现大规模量产和商业化落地, 提升我国人形机器人产业领域的全球竞争力。

关键词: 人形机器人; 核心零部件; 大模型; 具身智能

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Humanoid Robot Technology and Industry Development

Xu Chenghao^{1,2}, Wang Yaonan^{1,2*}, Mo Yang^{1,2}, Zhu Qing^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. National Engineering Research Center of Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082, China)

Abstract: With the continuous breakthroughs in technologies such as artificial intelligence, advanced manufacturing, and new materials, China's humanoid robot industry is experiencing explosive growth. Technological innovation and supportive policies have fostered a diversified and competitive landscape. However, China's humanoid robot industry still faces significant challenges, including lagging core technologies, high difficulty in mass production, and obstacles to commercialization. This study explores the major subfields and technological frontiers of humanoid robotics, offering an in-depth analysis of global trends in policies, technologies, and industrial development. It examines the current state of humanoid robotics in China and identifies key opportunities and challenges. Furthermore, the study proposes strategic recommendations to address these challenges, focusing on technological innovation, pilot demonstration, improvement in laws and regulations, and policy support. Specifically, the research recommends encouraging breakthroughs in core technologies, strengthening industrial layout, building humanoid robot infrastructure, and implementing demonstrative projects. These efforts aim to help China's humanoid robot industry overcome technical challenges, improve its industrial ecosystem, and achieve large-scale production and commercialization, thereby enhancing the global competitiveness of the industry.

Keywords: humanoid robot; core components; large model; embodied intelligence

收稿日期: 2024-10-09; **修回日期:** 2024-12-20

通讯作者: *王耀南, 湖南大学电气与信息工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为机器人技术与智能控制; E-mail: yaonan@hnu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“全球未来信息产业发展趋势及我国开辟新领域新赛道战略研究”(2023-XBZD-21), “湖南省人工智能产业创新发展战略研究”(2023-DFZD-61)

本刊网址: ssc.ae.engineering.org.cn

一、前言

机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志^[1]。推动智能机器人产业和技术的发展可以提高生产效率，降低生产成本，进一步促进生产方式发生深刻变革，推动传统制造向智能制造转型。同时，随着全球人口老龄化、劳动力短缺问题愈加严重^[2]，智能机器人可以有效代替人力执行繁重、危险的任务，填补劳动力空缺。近年来，世界各主要发达国家和地区针对智能机器人发展制定了一系列政策规划，围绕技术革新、行业标准、财政支持等进行全面布局，如欧盟的“地平线 2020 计划”^[3]和美国的“国家机器人计划 3.0”^[4]。当前，智能机器人技术已成为新一轮国际科技竞争的新焦点，是我国亟需抢占主导权的新赛道、建立领先优势的新领域。

人形机器人，也称为类人机器人或仿人机器人，是一种设计模仿人类外貌、结构和行为的机器人；通常具有类似于人的肢体结构，包括但不限于头、躯干、双臂和双腿，并且能够执行一些与人类相似的动作和任务。人形机器人是智能机器人技术的结晶，集中了智能机器人领域的尖端技术，涉及智能机器人上、下游的大多数产业链。人形机器人技术包含了机械工程、电气工程、人工智能等领域的高精尖技术。发展人形机器人可以带动广泛的制造业升级和技术革新，带动上、下游产业协同

发展，促进经济增长，具有巨大的市场价值和发展潜力。人形机器人不仅能够特定行业如医疗护理、家庭服务、教育娱乐等领域中发挥重要作用，还能够更广泛的工业生产和公共服务领域中替代人类完成危险或重复性高的工作，进一步释放劳动力，提高社会生产力。随着技术的不断进步和应用领域的拓展，人形机器人的未来发展前景十分广阔。

人形机器人的发展面临诸多挑战，包括高昂的研发成本、技术瓶颈、较低的可靠性和有限的功能性等。早期的人形机器人多停留在实验室研究阶段，难以满足实际应用的需求。然而，随着大模型技术的进步和高端制造业的发展，上述情况正在发生根本性的变化。如图 1 所示，大模型技术的应用为解决人形机器人在感知、认知、决策等方面的难题提供了新的可能，使其能够更好地适应复杂多变的工作环境。此外，高端制造业的进步提高了人形机器人的生产效率和产品质量，降低了制造成本，使大规模商业化成为可能。这一系列进展标志着人形机器人正从实验室研究向产业化应用迈进，将开启新的发展阶段。

本文深入分析以人形机器人为代表的智能机器人技术及产业的发展内涵，结合全球范围内相关产业和技术的发展现状，探讨我国在人形机器人领域的发展需求与策略。首先，概述人形机器人的定义，介绍人形机器人相关技术的细分领域，调研和梳理国际上主要国家和地区在人形机器人领域的政

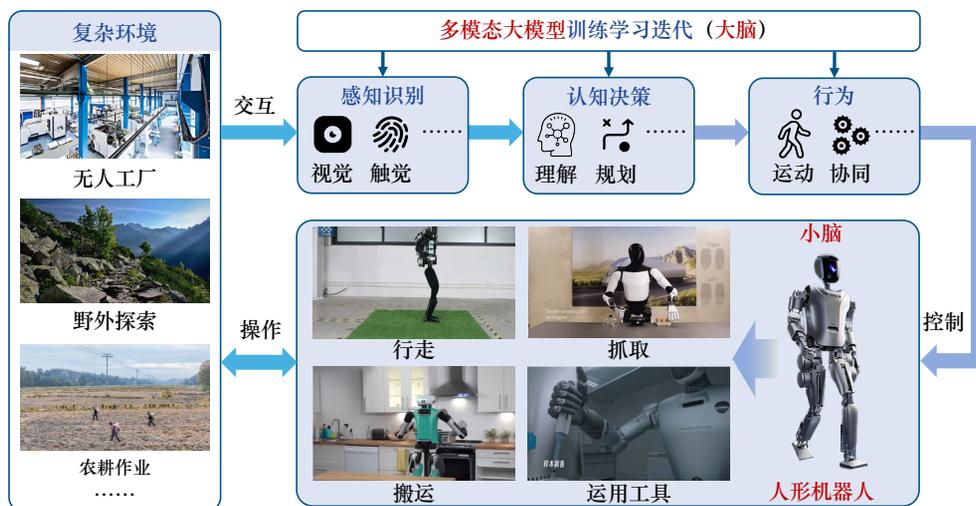


图1 大模型驱动的人形机器人

策、技术和产业布局，揭示全球人形机器人技术发展的最新趋势。在此基础上，进一步聚焦我国在发展人形机器人及相关技术方面面临的机遇与挑战，提出具体的发展路径和对策建议，为我国人形机器人产业的发展提供理论依据和实践指导，也为管理部门制定相关政策提供参考。

二、人形机器人的主要细分领域与技术前沿

现代人形机器人的核心技术体系由“大脑”“小脑”“肢体”三部分组成^[5]。其中，“大脑”作为核心，早期仅能处理基本环境感知和执行预设任务，现已可以利用视觉感知大模型、生成大模型和语言大模型等先进技术，实现高级感知、创造性想象、精准决策和情感交互，显著提升了机器人在复杂环境中的适应性和任务处理能力。“小脑”负责将“大脑”的决策转化为流畅且稳定的动作指令，通过强化学习和模仿学习，克服早期动作僵硬和易失稳的问题，具备了通用任务执行能力。“肢体”则由先进的零部件构成，从早期动力不足、自由度低的笨重设计，发展到现在能够完成高精度任务，拥有更高的灵活性、耐用性，甚至超越人类的能力。随着技术的进步，人形机器人“大脑”“小脑”

和“肢体”三部分的协同优化，显著提升了人形机器人的整体性能。

(一) 人形机器人“大脑”

人形机器人的“大脑”作为决策系统的中枢，融合了高性能计算平台与前沿算法，承担和处理来自多种传感器的复杂数据流任务，实现对周围环境的精准感知，还可在此基础上进行深层次的分析与高级决策。如图2所示，通过集成多模态大模型，“大脑”进一步提升了机器人在数据处理和人机交互方面的能力^[6-8]。具体来说，人形机器人的“大脑”功能可以分为感知、想象、决策和情感4个主要方面。这些能力的实现依赖于多模态大模型技术，使人形机器人能够深入解析视觉、听觉、触觉等多维度的感官信息，进而提供更加自然流畅且智能的互动体验。

通过利用最新的视觉感知技术，人形机器人的感知能力已经实现了对复杂场景的精确分割和物体识别^[9]，使其能够在数据有限的情况下有效学习并执行如导航、避障和抓取可变形物体等任务^[10-12]。高级想象力即借助生成模型（如扩散模型和生成对抗网络），赋予机器人艺术创作和现实世界模拟的能力，使其能够在虚拟空间中进行创新和预测^[13]。

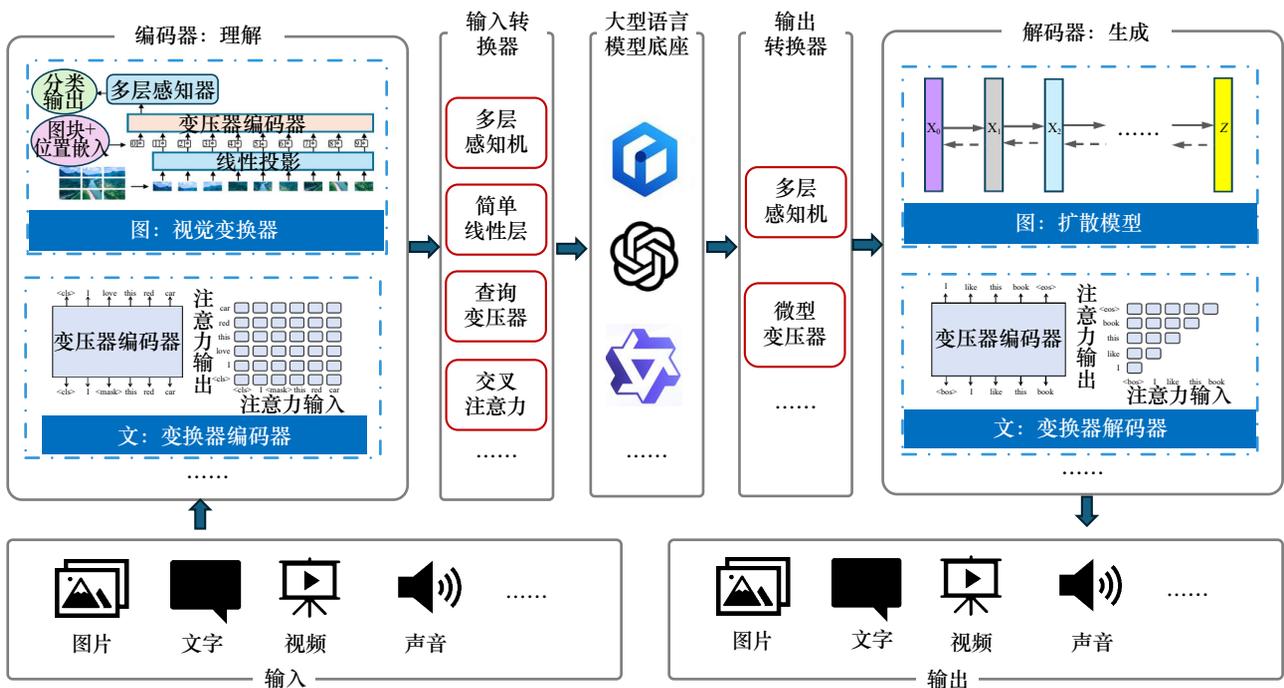


图2 多模态大模型架构

这些技术不仅为机器人提供了创造图像、音乐、文本等形式艺术作品的可能性，还增强了其仿真物理现象和环境交互的能力^[14-16]。

大语言模型赋予了人形机器人逻辑推理和语言处理等高级决策能力^[17]，增强了机器人的语言理解与生成、阅读理解与问答、计划补全等功能，提升了其在动态环境中的适应性和任务执行中的灵活性^[18-20]。同时，大模型技术的发展还赋予了人形机器人高级情感能力，使机器人能够准确识别和响应人类的情感状态，提供更加人性化的交互体验^[21]。出色的情感交互能力使人形机器人不仅能够根据当前叙事内容生成引导情节发展的新短语，还能深入探讨模糊内容、生成哲学文本，并为特殊群体如自闭症儿童开发定制化的聊天机器人^[22-24]。

（二）人形机器人“小脑”

人形机器人的“小脑”承担着将决策转化为具体动作指令的关键任务，确保机器人动作的精确性和协调性。当前，人形机器人的控制技术主要包括模型控制、强化学习和模仿学习3类。模型控制基于精确的运动学和动力学模型，实现对机器人动作的精准控制，适用于特定任务的自动化执行^[25]，是实现传统人形机器人控制的主要方法。模型预测控制（MPC）是模型控制领域中的一种典型算法，广泛应用在处理复杂动态行为和约束优化问题。

在机器人的上肢控制中，MPC实现了对复杂手臂运动的精确控制和实时响应，有效应对了关节运动范围、力学约束以及动态环境中的安全性挑战。通过优化控制策略，MPC可以显著提升机械臂的操作精度、稳定性和适应性，确保高效、安全地执行任务^[26,27]。在机器人的下肢控制中，MPC能够通过对未来运动的预测和优化调节步态，保证精确且稳定的腿部控制。MPC不仅提高了人形机器人运动的稳定性和响应速度，还增强了实时控制的精度和效率，使其可以在多种环境中执行复杂动态动作，如高速奔跑和体操式滚动^[28,29]。然而，基于精确物理建模的模型控制方法不足以应对多变的复杂环境，也因此通常仅应用在特定环境的简单任务上。具备更高的适应性和通用性的新兴控制方法，如强化学习、模仿学习正逐步成为人形机器人控制的主要方法。强化学习是通过在复杂环境中的自主探索，学习最优控制策略，克服模型控制对精确模型的依

赖，但面临现实探索成本高和学习效率低的挑战^[30]。此外，模仿学习通过模仿人类行为，减少对环境探索的依赖，利用人类行为数据训练智能体，实现对特定任务的快速学习和执行^[31]。模仿学习避免了强化学习探索成本高的问题，但存在训练数据获取困难的问题。

基于强化学习的机器人操作通过与环境互动和奖励机制优化动作策略，显著提升了上肢和下肢在复杂任务中的效率、精度和适应性。对于上肢操作，强化学习已经逐步实现了从模拟到真实的转移，部分克服了模型误差和延迟问题，拥有了在复杂环境中的运动控制能力^[32,33]；而对于下肢操作，强化学习使机器人能够优化步态和运动策略，提高在复杂地形或不确定环境中的稳定性和适应性，成功实现了双足和六足机器人的高效步态学习与转换^[34,35]。这些进展共同推动了人形机器人在多样化任务和环境中具备更加智能和灵活的操作能力，为实际应用提供了强大的技术支持。

基于模仿学习的上肢操作使机器人能够通过观察和示范迅速掌握精确的运动技能，显著提升任务执行能力。这种方法使机器人在处理各种数据集时表现出了强大的性能，超越了传统模型的局限性，还实现了语言、视觉和控制的深度融合，使机械臂能够在复杂任务中根据自然语言指令进行精确操控^[36,37]。基于模仿学习的下肢操作通过让机器人观察人类或其他机器人的示范，学习到自然、协调的步态和运动规律，显著提升了其在复杂、未知环境中的适应性和稳定性。这种方法不仅优化了步态控制，还实现了不同风格步态的学习，无须依赖专家知识，展示了强大的灵活性和自主学习能力^[38,39]。

（三）人形机器人肢体

如图3所示，在人形机器人的设计和制造领域，电机、减速器、传感器构成了机器人的核心系统，分别负责动力输出、动力传输与扭矩放大、环境感知和状态监测。电机在人形机器人中扮演着将电能转换为机械能的角色，是实现机器人运动的基础。根据不同的应用需求，电机的类型多样，包括直流无刷电机、无框力矩电机、空心杯有刷电机和空心杯无刷电机等。无框力矩电机因其高效率、结构紧凑和易维护的特点^[40]，在人形机器人的线性关节和旋转关节中得到广泛应用。例如，特斯拉

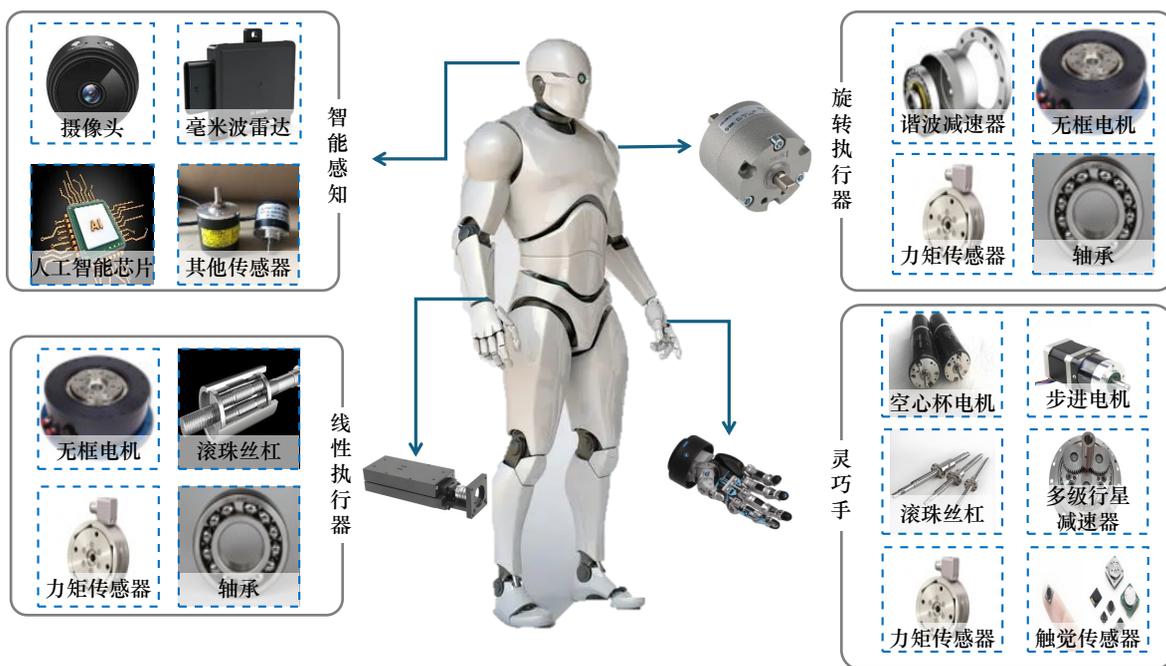


图3 人形机器人核心零部件

Optimus 机器人的关节设计中就采用了无框力矩电机，以实现其灵活且精确的动作控制。空心杯电机则因其轻巧和高效的特点，成为灵巧手中的理想选择^[41]，尤其是在需要精细控制的场合，如模拟人类手部的精细动作。

减速器在人形机器人中的作用是将电机的高速旋转转换为低速且具有高扭矩的输出，以适应关节的转动需求^[42]。主要的减速器类型包括谐波减速器、行星减速器和旋转矢量（RV）减速器等。

① 谐波减速器因其体积小、重量轻和传动比大的特点，在旋转关节中被广泛使用^[43]。例如，特斯拉 Optimus 机器人中 14 个旋转自由度均搭载谐波减速器。

② 行星减速器具有高刚性、高精度、高传动效率和结构紧凑的特点，常用于需要高稳定性和高效率的应用场景，如在人形机器人的关节传动、手臂运动和步态控制等方面，确保机器人动作的平稳和精确。行星减速器具有较长的使用寿命和较高的可靠性，适用于长时间连续工作的环境。

③ RV 减速器因其大传动比范围、高承载能力和高运行精度，适用于重负载位置，如机座、大臂、肩部等。

传感器系统是人形机器人感知环境的关键，包括力矩传感器、触觉传感器、视觉传感器、角度传感器和惯性测量单元（IMU）等。力矩传感器用于监测和调整关节的扭矩，确保动作的精确性和稳定性^[44]；

触觉传感器和视觉传感器帮助机器人理解其与环境的交互^[45]；角度传感器在机器人中广泛应用，用于精确测量关节旋转角度，确保机械臂等部件准确定位与运动控制，提升机器人的操作精度和稳定性^[46]；IMU 通常包含加速度计、陀螺仪和磁力计等多种传感器，可以测量机器人的线性加速度、角速度和方向，用于对机器人的姿态估计和动态控制^[47]。

三、国际人形机器人产业发展现状与趋势

随着科技的飞速进步，全球人形机器人产业正逐渐崭露头角，展现出巨大的发展潜力。人形机器人作为人工智能、高端制造、新材料等多领域技术的集大成者，正逐步从理论研究走向实际应用，预示着未来产业格局的深刻变革。近年来，全球面临人口老龄化、劳动力成本上升、消费升级等多重挑战，这为人形机器人市场提供了广阔的发展空间；与此同时，关键技术的不断突破为人形机器人的性能提升和智能化发展奠定了坚实基础。

（一）世界主要国家人形机器人的政策布局

人形机器人技术正以前所未有的速度加速演进，有望成为全球科技创新的制高点和经济增长的新引擎。随着关键技术的突破，人形机器人已经具

备出色的感知、交互和决策能力，在工厂作业、医疗健康、家庭服务等领域展现出巨大的应用潜力。面对这一广阔前景，世界各国纷纷制定相关战略规划，意图抢占新兴领域的高地。通用人工智能的快速发展为人形机器人带来了机遇，但同时也伴随着隐私保护、数据安全等风险，以及可能对就业市场、社会伦理产生的影响。当前，全球人形机器人研究仍处于技术研发阶段，产业发展尚未全面启动，但其未来前景却极为广阔，有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车之后的又一颠覆性产品，深刻变革人类的生产生活方式。

2023年1月12日，国际机器人联合会发布了最新版的《世界机器人研发计划》^[48]，揭示了各国在机器人研发方面的资助战略。①在亚洲地区，日本通过“机器人新战略”在2022年投入超过9.305亿美元，重点发展集成技术，旨在成为下一代人工智能和机器人的核心国家。韩国推出了“第三版智能机器人发展计划”，为2022年的“智能机器人行动计划”拨款1.722亿美元，力图使机器人成为第四次工业革命的核心产业。②在欧洲地区，欧盟通过“地平线欧洲计划”^[49]在2021—2022年为机器人相关工作提供了总计1.985亿美元的资金，旨在推动科技创新和跨国合作。德国通过“高科技战略2025”，每年提供6900万美元的资金，至2026年总预算达到3.45亿美元，重点研究数字辅助系统。③在政府大力支持和企业积极创新的推动下，美国人形机器人产业发展势头强劲。美国通过“国家机器人计划”^[49]等一系列政策文件，为机器人技术研发提供了稳定的资金支持和战略指导，特别关注机器人集成系统的开发和应用。同时，美国企业在人形机器人技术研发方面也取得了显著成果，如特斯拉公司的Optimus机器人，其运动能力、感知能力和交互能力不断得到提升，展现出在工业生产、家庭服务等多个领域的巨大应用潜力。

(二) 世界主要国家人形机器人的技术布局

如表1所示，日本企业和美国企业在机器人领域均拥有大量核心专利，技术布局全面覆盖了从核心零部件到整机系统的各个环节，形成了完整的产业链优势^[49]。这些企业在本体结构、核心零部件、智能感知、驱动控制等方面均有广泛的专利布局，展现出显著的技术综合性能和良好的创新能力。

表1 人形机器人相关专利分布情况

单位：件

企业名称	本体结构	核心部件	智能感知	驱动控制	支撑环境
本田技研工业株式会社	1075	29	444	819	47
索尼公司	373	33	593	266	18
深圳市优必选科技有限公司	481	95	432	266	33
丰田汽车公司	412	23	384	264	17
精工爱普生株式会社	229	203	455	121	1
三星集团	202	16	351	231	8
软件银行集团	168	12	148	89	43
波士顿动力公司	115	17	124	115	19

注：专利统计时间截至2023年5月31日。

1. 人形机器人核心零部件与整机制造

人形机器人作为技术尖端产物，核心构造有线性执行器、旋转执行器和灵巧手。这三大执行器约占人形机器人零部件的73%，是构建人形机器人的重要基石。这些执行器的精密运作依赖于一系列高精度零件，包括丝杠、电机、减速器、传感器、轴承等。

丝杠在人形机器人中发挥着关键作用，可以实现回转与直线运动的转换，其中滚珠丝杠因其高精度、高效性备受青睐。目前，这一领域的知名企业有我国台湾地区的上银科技股份有限公司、银泰科技股份有限公司、全球传动科技股份有限公司，以及日本、德国的企业，已在高精度滚珠丝杠制造上取得显著成就。无框力矩电机因其体积小、结构紧凑、质量轻等特点，成为打造轻量化机器人关节的理想选择，美国科尔摩根集团、日本电产株式会社等在这一领域拥有深厚的技术积累和广泛的应用经验。空心杯电机作为灵巧手的核心部件，在节能、动力和控制性能方面表现出色，我国的市场份额主要被瑞士麦克松电机股份公司、德国福尔哈贝集团、瑞士Portescap公司等占据。

减速器、力传感器和轴承在人形机器人中也扮演着重要角色。日本新宝股份有限公司、纳博特斯克株式会社和哈默纳克公司等企业在减速器领域占据较高市场份额；国外产品在力传感器方面仍保持着行业领先地位，如美国的ATI工业自动化有限公司、瑞士博塔系统公司等。在六维传感器制造领域具有显著的优势。在高端轴承方面，斯凯孚集团、舍

弗勒集团、铁姆肯公司、恩斯克株式会社等企业占据主导地位。

近年来，全球人形机器人整机制造领域蓬勃发展，众多企业纷纷展现出了巨大的发展潜力与技术创新能力。例如，特斯拉公司推出的首款人形机器人Optimus，结合电动驱动与人工智能技术，能够执行基础搬运与装配任务；第二代Optimus则提升了关节灵活度和动作协调性，融合了更高级别的神经网络学习模型，增强了任务处理效率和人机交互的自然流畅度。波士顿动力公司推出Atlas系列人形机器人，从液压驱动转为电动化驱动，显著改善了行走稳定性和能效表现；最新版本的Atlas机器人可以实现360°翻滚、快速跑步和精准搬运等高难度动作。Figure AI公司发布的Figure 02机器人拥有较高的动作灵活性，每个手指拥有16个自由度，适合精细操作和重型物件搬运。Figure 02机器人搭载了特制的人工智能模型，支持语音对话功能，并配备了视觉语言模型，实现了快速视觉分析和复杂任务执行，现已在宝马工厂中得到应用和验证。

整体来看，早期人形机器人多采用液压驱动，具备强大的负载能力和动态平衡，但存在体积大、质量大和能耗高等缺点。随着技术进步，电动驱动逐渐普及，减小了质量，提高了灵活性和能源效率，并使机器人适应更多场景，如狭小空间和长时间工作环境。同时，人形机器人的设计和功能不断进化，外形更逼真，肢体灵活性和动作细腻度显著提升，有些还能完成高难度动作。智能化程度的提升是人形机器人发展的另一个重要趋势。早期机器人依赖预编程控制来执行固定任务，适应性和灵活性有限。随着人工智能和机器学习的进步，现代人形机器人集成了先进的学习模型，能够通过自我学习和环境互动优化行为，更好地应对未知情况和复杂任务。特别是大型语言模型的应用，增强了机器人的自然语言处理能力，使其能与人类进行更自然的交流。可以看到，国外企业在人形机器人领域的发展优势显著，拥有先进的技术和丰富的研发经验，具备较强的市场竞争力。

2. 人形机器人具身智能技术

在人形机器人技术的探索与实践，感知、控制、决策三大核心技术领域成为推动其向更高层次智能化与自主化迈进的关键驱动力。

在感知技术方面，人形机器人已经实现了视

觉、触觉等多模态信息的深度融合与高效处理。高清摄像头与先进的深度学习算法相结合，使机器人能够迅速且准确地识别、定位环境中的各种目标。同时，分布式触觉传感器和柔性电子皮肤等创新技术的引入，不仅大幅提升了机器人的交互能力，还为其在复杂、多变的环境中执行精细操作提供了可靠保障。此外，语音、文本等其他模态信息的融合，使机器人能够全面、深入地理解人类指令和周围环境，从而做出更为精准、合理的反应。

在控制技术方面，人形机器人正逐步迈向高精度、高鲁棒性的运动控制。MPC等先进算法的应用，使机器人能够在复杂环境中实现精准的动作规划和执行力。力位混合控制等策略的实施，进一步提升了机器人在面对不同任务需求时的适应性和灵活性。此外，端到端控制策略的兴起，更是简化了传统控制系统中的复杂环节，提高了控制系统的整体性能和响应速度。值得一提的是，人形机器人还具备了自适应学习与优化能力，能够根据环境数据和任务反馈，自主调整控制策略，以更好地适应不同场景和满足任务需求。

在决策技术方面，人形机器人正逐步实现从简单规则遵循到自主决策与智能行为的转变。深度学习与大模型、强化学习等先进技术的应用，使机器人能够学习到复杂的决策逻辑和策略，从而在未知或动态变化的环境中做出合理、有效的决策。同时，情境感知与决策能力的不断提升，也使机器人能够根据周围环境和任务需求的变化，动态调整决策策略，更好地完成任务。人形机器人自主决策与智能行为能力的提升，提高了人形机器人的实用性，也为其在更多领域的应用提供了可能。

在人形机器人感知领域，波士顿动力公司、特斯拉公司和麻省理工学院等是主要的推动者。波士顿动力公司的Atlas机器人集成了高分辨率摄像头和激光雷达，通过视觉感知技术实时构建周围环境的三维地图，实现了精准定位和避障。而特斯拉公司的Optimus人形机器人则采用了纯视觉深度学习神经网络，通过摄像头捕捉图像进行深度学习处理，实现了高效的物体识别和姿态估计。此外，麻省理工学院在触觉感知技术方面也取得了重要突破，开发的分布式触觉传感器网络和灵巧手触觉传感器，为人形机器人提供了丰富的交互反馈，显著提高了人形机器人的精细操作和人机交互能力。

在人形机器人控制领域，多个研究机构和企业取得了显著成果。在卡内基梅隆大学等科研机构的推动下，高精度运动控制算法（如MPC）的应用使人形机器人能够更精确地规划和执行动作。同时，在斯坦福大学等科研团队的努力下，力位混合控制技术的优化为人形机器人提供了更好的位置和力的解耦控制，提高了其在复杂环境中的适应性和鲁棒性。这些控制技术的突破，为人形机器人在各种应用场景下的稳定运行提供了有力保障。

在人形机器人决策领域，加利福尼亚大学伯克利分校的人工智能研究实验室、谷歌公司的DeepMind团队以及其他众多前沿科技机构，正引领着这一领域的快速发展，在基于深度学习和大型神经网络模型的决策系统方面取得了显著成果，不断深化了对强化学习技术的研究与应用。这些决策系统通过深度神经网络对海量数据的学习，能够提取出复杂的特征并理解环境，从而在未知或动态变化的环境中做出合理且高效的决策。这些技术的融合与应用为人形机器人赋予了更加智能的决策能力，使其不再依赖预设的规则和程序，而是可以根据实时感知到的信息和环境变化，自主进行决策和调整。

（三）世界主要国家人形机器人的产业布局

1. 产业布局分析

如表2所示，国外人形机器人产业链展现出多元化与高度专业化的特点，涵盖从上游核心零部件供应商到中游人形机器人本体制造商，再到下游应用领域的广泛分布。在产业链上游，科尔摩根集团、松下电器产业株式会社等公司提供了精密的电机，哈默纳克公司、纳博特斯克株式会社等企业提供了减速器技术，欧姆龙株式会社、西门子股份公司等在传感器与控制器方面占据重要地位，为人形机器人提供了精准的感知与控制能力。在产业链中游，特斯拉公司、波士顿动力公司、Figure AI公司等企业，已经开发出了具备出色感知、交互和决策能力的先进机器人，展现出在工业生产、医疗健康、家庭服务等领域的巨大应用潜力。

整体来看，人形机器人产业作为智能机器人领域的尖端分支，其全球产业布局呈现出“三极分布、技术集中、分工明确”的显著特点。从区域来看，这一产业主要集中于技术研发和市场应用两个层面，依托发达国家的技术创新能力及新兴市场的

应用需求驱动，形成了以北美、东亚和欧洲为核心的“三极分布”格局。在北美地区，尤其是美国的硅谷和波士顿，凭借世界领先的人工智能、计算机视觉和材料技术，在技术创新与商业化方面处于领先地位；硅谷专注于人工智能技术创新，而波士顿则强调硬件和控制技术的发展。在东亚地区，日本关东地区与我国粤港澳大湾区成为高端制造和规模化发展的核心地带。日本在精密电机和减速器领域表现出色，我国则在机器人整机制造和应用推广上取得了重要进展，形成了较为完善的产业链。在欧洲方面，德国巴伐利亚州和意大利都灵市引领着高端工业机器人与特种领域应用的发展，特别是在机械制造、动力学仿真和智能传感方面有着深厚的技术积累。

2. 面临的挑战

尽管国际上的人形机器人在智能化水平方面取得了显著进展，但仍面临诸多技术挑战。数据采集与标注是一个复杂、耗时且成本高昂的过程，尤其是在人类动作数据的收集方面，需要高精度的传感器和专业的数据标注团队来确保数据的准确性。多模态信息融合也是一个重要挑战。人形机器人需要处理视觉、听觉、触觉等多种信息，再进一步将这些信息有效融合并形成统一的环境认知，现有方法在鲁棒性和实时性方面仍有不足，特别是在复杂多变的环境中，机器人可能无法准确地理解和应对环境变化。

在自主学习与适应性方面，尽管当前的人形机器人已经能够通过机器学习算法进行一定程度的自主学习，但在处理未知或复杂任务时，其适应性和泛化能力仍显不足，亟需设计更有效的学习算法，使机器人能够从少量样本中快速学习，在新环境中迅速适应。此外，确保机器人在学习过程中不会产生偏差或做出有害行为，也是一个亟待解决的安全性问题。实时性和响应速度也是人形机器人发展面临的重要挑战，特别是在紧急救援或医疗手术等应用场景中，机器人需要在极短时间内做出反应，这要求其具备强大的计算能力和高效的决策机制，而现有计算平台和算法在实时性和响应速度方面仍有较大提升空间。能源效率与续航能力同样关键，尽管电动驱动系统在能效上有所改进，但如何进一步降低能耗、延长工作时间，仍然是一个亟待解决的问题。

表2 世界主要国家人形机器人产业分布

国家	产品类型	供应商名称
英国	滚珠丝杠	台湾精密机械工业股份有限公司
	人形机器人本体	Engineered Arts 公司
西班牙	滚珠丝杠	SHUTON 公司
瑞典	滚珠丝杠	斯凯孚集团、伊维莱公司
	滚珠丝杠	伊维公司
	轴承	斯凯孚集团
	人形机器人本体	1X Technologies 公司
日本	滚珠丝杠	日本精工株式会社、THK 株式会社、黑田精机株式会社
	精密行星减速机	新宝股份有限公司、纽卡特公司、斯德博公司、威腾斯坦公司
	无框力矩电机	日本电产株式会社
	RV 减速机	纳博特斯克株式会社、住友电气工业株式会社
	谐波减速器	新宝股份有限公司
	轴承	恩斯克株式会社
	滚珠丝杠	Rollvis 公司
瑞士	空心杯电机	麦克松电机股份公司、Portescan 公司
	滚珠丝杠	瑞士精密机械有限公司
	滚珠丝杠	全球丝杠装配公司
德国	滚珠丝杠	力士乐公司
	空心杯电机	福尔哈贝公司
	减速机	纽卡特公司、斯德博公司、威腾斯坦公司
	谐波减速器	哈默纳克公司
	轴承	舍弗勒集团
美国	无框力矩电机	科尔摩根集团
	六轴力传感器	ATI 工业自动化公司
	轴承	铁姆肯公司
	人形机器人本体	特斯拉
	人形机器人本体	波士顿动力公司
	人形机器人本体	Agility Robotics 公司
	人形机器人本体	Apptronik 公司
	人形机器人本体	Sanctuary AI 公司
人形机器人本体	Figure AI 公司	

在市场方面，成本和应用场景是人形机器人发展过程中最为关键的两个因素。高昂的研发和生产成本是阻碍人形机器人普及的主要瓶颈之一。尽管随着技术的进步，部分组件的成本有所下降，但高性能传感器、精密电机等关键部件的价格依然不菲。这不仅增加了机器人的初期投资成本，也影响了后续的维护和升级成本，使人形机器人难以进入消费级市场。此外，人形机器人在应用场景方面也面临诸多挑战。尽管人形机器人在理论上具有广泛的应用潜力，但目前具体应用场景仍不够明确。例

如，虽然人形机器人可以在工业制造、医疗健康和家庭服务等领域发挥重要作用，但这些领域的实际需求和适用场景尚需进一步探索与验证。此外，有关人形机器人的相关法规政策和社会接受度也成为阻碍其应用的重要因素。

四、我国人形机器人的发展态势

我国作为全球科技创新的重要参与者，对人形机器人的研发给予了高度重视，并将其作为推动产

业升级、经济转型和社会进步的关键一环。在国家政策的大力扶持下,科研院所、高校和企业纷纷加大投入,力求在人形机器人核心技术、关键部件、系统集成以及应用场景等方面取得突破性进展。为此,本文将全面梳理我国人形机器人的发展现状,分析其发展态势,总结成功经验,同时指出面临的挑战和问题。

(一) 我国人形机器人的政策布局

人形机器人作为人工智能和机器人技术融合的产物,正逐渐成为推动未来科技创新和产业变革的重要力量。我国高度重视人形机器人产业的发展,从国家到地方层面均出台了一系列政策文件,旨在促进该产业的健康快速发展。2018年,安徽省发布了《机器人产业发展规划》^[50],标志着地方政府开始关注人形机器人产业的发展。2020年,广州市、湖北省分别发布了《推进新一代人工智能产业发展行动计划》^[51]、《新一代人工智能发展总体规划》^[52],均提出重点发展人形机器人关键核心技术。2021年,我国发布了《“十四五”机器人产业发展规划》^[1]和《智慧健康养老产业发展行动计划》^[53],旨在推动机器人产业高质量发展,并加快技术创新。2021年,广东省和苏州市也分别出台了旨在培育智能机器人产业集群和提升机器人与智能制造产业的行动计划。2022年,工业和信息化部等部门发布了《推动轻工业高质量发展的指导意见》^[54]并提出推广机器人技术的应用。2023年,工业和信息化部发布了《人形机器人创新发展指导意见》^[5],强调加强人形

机器人技术创新,突破人形机器人核心技术。这些政策的出台,体现了我国对人形机器人产业的高度重视和对未来科技发展的深远规划,不仅促进了人形机器人技术的研发和应用,也为我国在全球智能制造和人工智能领域提高竞争力提供了强有力的支持。随着这些政策的实施,可以预见,我国的人形机器人产业将迎来更加广阔的发展前景。

(二) 我国人形机器人的技术布局

我国的人形机器人产业正处于蓬勃发展的黄金时期,众多企业在上游零部件和中游整机制造两大领域持续发力,共同推动人形机器人技术的不断进步。

1. 人形机器人核心零部件与整机制造

近年来,我国在人形机器人上、下游产业链相关技术的发展上取得了显著进展(见图4),尤其在关键零部件的制造技术上逐渐缩小了与世界领先国家的差距。我国凭借强大的制造能力、庞大的市场需求以及相关政策的支持,在人形机器人核心零部件的研发与生产中展现出一定的优势。需要特别指出的是,我国在自动化生产、工业机器人领域的长期积累,为人形机器人核心零部件的制造打下了坚实基础。当前,我国发展人形机器人的主要优势体现在:拥有全球最完善的电子和机械制造供应链,供应链完备,能够快速集成所需的各种零部件,并且生产成本相对较低。这使我国机器人产业能够以更低价格生产高质量的核心零部件,尤其是在电机、减速器等领域,已逐步具备了全球竞争力。

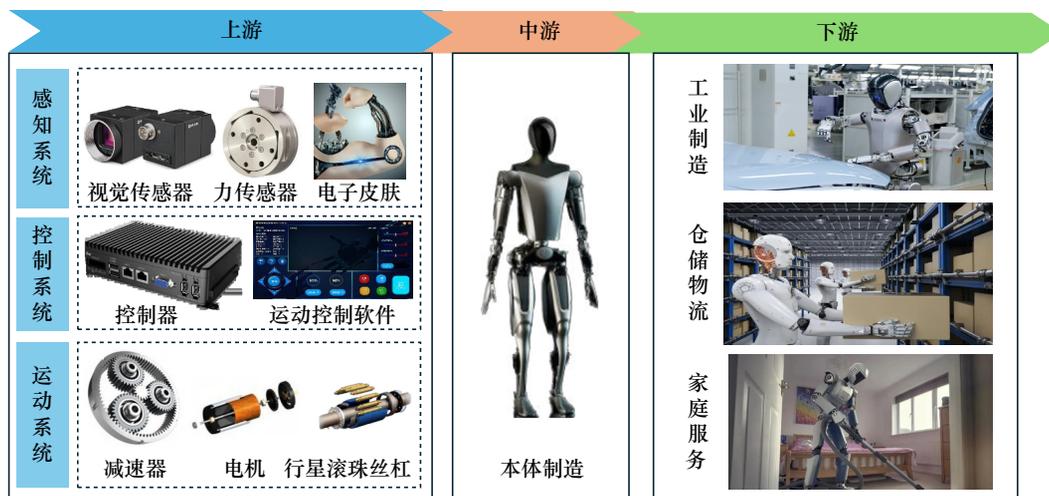


图4 人形机器人上、下游产业链

人形机器人的核心零部件包括电机、减速器、传感器、控制器、智能芯片等，共同决定了机器人的运动精度、反应速度以及智能化水平。在这些核心部件的研发和制造中，我国已经涌现出了一些具有竞争力的企业。①在精密电机制造领域，深圳市汇川技术股份有限公司近年来已生产出多款适用于工业机器人和服务机器人的高性能精密电机，具备较高的响应速度和定位精度；埃斯顿自动化集团不断创新，生产的产品已广泛应用于各类智能机器人。②减速器是机器人实现平稳和精准运动的关键部件之一。人形机器人动作的灵活性和稳定性极为依赖减速器的性能。苏州绿的谐波传动科技股份有限公司和浙江双环传动机械股份有限公司是减速器制造的领先企业，尤其是在谐波减速器领域，苏州绿的谐波传动科技股份有限公司的产品已经进入全球供应链，广泛应用于各类机器人。虽然与日本哈默纳克公司相比仍有差距，但我国企业的产品已逐渐具备了国际竞争力。③高精度传感器是人形机器人感知外界环境、判断自身状态的关键部件之一。固高科技股份有限公司、杭州中科微电子有限公司等企业在惯性传感器和力反馈传感器等领域表现突出，能够为人形机器人提供精确的位移、速度、加速度等信息检测，奠定了人形机器人智能化控制的基础。此外，部分企业在视觉传感器方面也取得了进展，如浙江大华技术股份有限公司、杭州海康机器人股份有限公司等企业的视觉传感技术已经在多领域得到应用。

近年来，我国人形机器人整机制造领域的相关企业发展迅速，涌现出一批具备技术实力和市场竞争力的企业。深圳市优必选科技股份有限公司作为行业领军者，其Alpha和Walker系列机器人在教育、娱乐、服务场景中广泛应用；北京小米科技有限责任公司推出的CyberOne等人形机器人，推动了消费级机器人市场的发展；杭州宇树科技有限公司注重发展创新能力和成本控制，推出的Unitree H1、Unitree G1人形机器人在性能和价格上具有优势，适用于从工业生产到家庭服务的多种场景；星尘智能（深圳）有限公司专注于服务消费类人形机器人，发布的Astribot S1具备执行复杂家务任务的能力，并且能够自主学习和优化。这些企业通过技术融合与市场化应用，逐步提升了我国在全球人形机器人市场的地位，随着人工智能和核心零部

件制造产业的发展，有望在未来占据更加重要的位置。

整体来看，我国在人形机器人领域的研究与发展已达到国际先进水平。然而，在人形机器人核心零部件制造方面，尽管我国已逐步追赶国际先进水平，但仍存在明显短板，一些高精度、高复杂度的核心零部件（如高精度传感器、控制芯片等）依赖国外技术，限制了机器人行业在核心技术上的自主性。在人形机器人整机制造方面，与国际发达水平相比，我国表现较为突出，技术差距并不明显。尤其是如杭州宇树科技有限公司等企业走在了世界前沿。然而，现阶段大多数国内的人形机器人功能依然较为基础，主要集中在行走、抓取等简单的操作任务上，对更加复杂的任务处理能力还有待提升。

2. 人形机器人具身智能技术

我国在人形机器人的感知技术方面取得了显著进展，尤其是在视觉、听觉感知上。视觉感知技术借助于摄像头、激光雷达、深度传感器等设备，结合计算机视觉和深度学习算法，使机器人能够实现物体识别、环境建模和运动捕捉。北京旷视科技有限公司、商汤集团有限公司等企业在视觉感知技术上处于领先地位，推动了机器人在复杂环境中的自主导航和人机交互。听觉感知依托于语音识别和自然语言处理技术，目前科大讯飞股份有限公司通过语音交互和指令识别增强了机器人与人类的互动能力。

我国人形机器人的控制技术近年来取得了重要突破，尤其是在自主运动控制和稳定性方面。运动控制技术通过高精度的伺服系统和多自由度关节结构，使机器人能够完成灵活的步态控制、抓取动作及复杂的任务操作。基于深圳市优必选科技股份有限公司、国家地方共建具身智能机器人创新中心等的自主研发，人形机器人能够在各种环境中实现平衡行走、躯体协调与各类复杂动作。同时，机器人控制技术结合了先进的力控与视觉反馈算法，使其具备了自适应能力，在工业、服务等领域中展现出较强的操作精度与稳定性。当前，控制技术还在向更高精度和更高响应速度的方向不断优化。

我国在机器人决策技术领域的进展主要体现在智能化和自主性提升方面。基于大模型和强化学习的决策算法，机器人能够在复杂和不确定的环境中做出自主判断。杭州深度求索人工智能基础技术研究有限公司、百度在线网络技术（北京）有限公

司、深圳市腾讯计算机系统有限公司等企业在大语言模型领域的研究与应用，推动了机器人基于大数据的自我学习和优化能力，增强了其对外部环境的适应性与实时性。决策系统通过结合环境感知和行为规划，使机器人能够在实时决策中优化路径选择、任务分配和行为策略。未来，随着人工智能技术的进一步发展，决策技术将更具智能性和灵活性，推动人形机器人向更高层次的自主行为发展。

（三）我国人形机器人的产业布局

在政策支持、技术发展和广阔内需市场的推动下，我国人形机器人的产业布局呈现出多元化、智能化特点，并保持强劲的增长态势。根据预测，到2030年，我国人形机器人的市场规模将达380亿元，年均增速超过61%，销量从2024年的4000台增加至 2.712×10^5 台^[55]。此外，我国人形机器人市场的巨大发展潜力吸引了诸多资本投入，为相关企业的技术突破和市场扩张提供了支持，促进了行业的发展。

在地域分布方面，我国人形机器人产业主要集中在经济发达的东部沿海地区。尤其是北京、广东、江苏和浙江等省份，具有较强的科技研发能力、完善的产业基础和政策支持，为人形机器人产业的发展提供了良好的环境。地区的引领企业有深圳市优必选科技股份有限公司、上海智元新创技术有限公司、达闼机器人股份有限公司、上海傅利叶智能科技有限公司等。在产业链方面，人形机器人企业集中在产业链的上、中游。人形机器人产业链上游主要包括谐波减速器、无框力矩电机、空心杯电机、滚珠丝杠、编码器、传感器、轴承等，代表性企业有宁波中大力德智能传动股份有限公司、浙江环动机器人关节科技股份有限公司、广州市昊志机电股份有限公司、苏州绿的谐波传动科技股份有限公司、台邦电机工业集团有限公司、山东博特精工股份有限公司、深圳市大族电机科技有限公司、万至达电机制造有限公司等上百家核心零部件企业；产业链中游主要是人形机器人的本体研发制造，代表性企业有深圳市优必选科技股份有限公司、乐聚（深圳）机器人技术有限公司、达闼机器人股份有限公司、北京小米科技有限责任公司、追觅科技（苏州）有限公司、陕西伟景机器人科技有限公司等。上游企业的技术创新直接影响到整个产业链的技术水平和产品质量，而中游企业则是将这

些技术转化为实际产品的关键环节。人形机器人领域核心零部件国产化空间较大，零部件的国产化将为人形机器人在性能、成本、可靠性、安全性和技术创新等方面提供更多的可能性，加速人形机器人产业化进程。

（四）我国人形机器人发展面临的主要问题

1. 技术瓶颈与成熟度不足

在核心关键技术方面，智能感知和运动控制与国际先进水平相比仍有较大差距，限制了人形机器人在性能、稳定性和智能化程度上的进一步提升。在核心零部件方面，人形机器人所需的核心零部件如精密减速机、高算力芯片、高精度传感器等，国内尚不能完全自主生产，严重依赖进口，如我国国产减速器的市场份额不足30%，大部分市场被日本厂商主导，这不仅增加了制造成本，也制约了人形机器人产业的发展速度和市场竞争力。

2. 制造成本高昂

我国在制造人形机器人方面面临显著的成本挑战。数据显示，国内生产一台人形机器人的成本约为40万至50万元人民币，而高端人形机器人的成本会更高。这主要是因为其核心零部件高度依赖进口，尤其是高性能电机、减速器、传感器等，占整机成本的近50%。此外，控制算法的研发、精密加工的要求、规模化生产能力的缺乏，进一步推高了制造成本。与此相比，特斯拉公司等国外企业凭借强大的产业链整合能力和规模效应，正在快速降低制造成本，其人形机器人的生产成本目标为低于2万美元/台。这种显著的成本差异对我国企业的市场竞争力构成了严峻挑战。

3. 应用场景不明确

人形机器人产业面临的另一核心挑战在于应用场景的模糊性，这严重制约了商业化进程。在技术层面，尽管双足行走、环境感知等能力持续突破，但尚未形成不可替代的价值锚点。具体来说，在工业场景中，传统工业机器人在精度和成本方面占据绝对优势，人形机器人的效率竞争力不足；在养老、教育等服务领域虽存在潜在需求，但安全标准与情感交互等核心技术成熟度不足，难以满足实际场景要求；消费市场则陷入功能与成本的错配困境，售价与清洁、陪伴等基础功能形成巨大落差。应用方向的不明确导致产业链上下游投资趋于保

守，技术研发与场景验证难以形成正向循环。

4. 法律法规与标准体系不完善

目前，针对人形机器人研发、生产和应用的法律法规尚不完善，这在一定程度上限制了其发展，特别是在数据共享、隐私保护和安全监管等方面，缺乏明确的法律依据和规范。人形机器人产业作为新兴领域，尚未建立起完整的标准体系，导致不同企业的人形机器人在性能、质量和安全等方面缺乏统一的衡量标准。这不仅影响了行业的健康发展，也限制了市场的公平竞争，使行业难以形成统一规范，阻碍了技术创新和市场推广。

5. 人才短缺与创新不足

人形机器人涉及机械、电子、计算机、人工智能等多个领域的技术，所需人才层次高、范围广。然而，我国在这一领域的专业人才相对匮乏，导致创新能力不足，难以满足快速发展的产业需求，影响了产业的整体发展和国际竞争力。数据显示，我国人工智能机器人行业的人才缺口高达500万人，复合型人才和高层级人才更为稀缺。尽管我国相关企业在部分技术领域取得了进展，但由于技术瓶颈和缺乏高端人才，在与国际先进水平的竞争中处于不利地位。

五、我国人形机器人的发展路径

(一) 技术创新引领产业发展

技术创新是人形机器人产业发展的核心动力。加强人工智能、传感技术、材料科学等多学科的交叉研究，可以大幅提升人形机器人的感知能力、决策能力和运动控制水平。例如，计算机视觉技

术的进步使机器人能够更准确地识别物体、理解环境，并做出相应的反应；而先进的传感器技术和高精度的定位系统则使人形机器人能够在复杂环境中实现自主导航和避障。此外，轻质高强度材料的研发不仅减轻了机器人的重量，还提高了其结构强度和耐用性，从而延长了使用寿命；高效能电池技术的发展解决了机器人续航时间短的问题，使其能够长时间连续工作；柔性关节设计则赋予了机器人更高的灵活性和适应性，使其能够完成更加复杂的动作。这些关键技术的突破不仅为人形机器人的广泛应用奠定了坚实的基础，也为未来的发展提供了无限可能。

(二) 定点示范拓展应用场景

在探索人形机器人创新与发展的道路上，可以采用“应用牵引-整机带动”的发展框架（见图5），运用定点试验、供需对接和成果转化等举措，促进人形机器人在实际应用场景中的落地。人形机器人在研发过程中需要在特定场景中进行验证与评估，以确保其性能和可靠性。例如，在特定工厂的岗位上进行试验，不仅可以为研究人员提供宝贵的数据和反馈，还可以帮助他们不断优化设计和功能；定期评估和评价能够确立行业应用标准和研发目标，形成一批具有代表性的示范项目和企业，并成为行业发展标杆。同时，这些标杆项目展示了人形机器人在实际应用中的潜力，为其他企业和研究机构提供了学习和借鉴的机会，以此形成良性循环，推动整个行业的持续进步。通过这种方式，人形机器人不仅能够在特定环境中展示其价值，还能逐步扩大应用范围，提升整体产业水平。



图5 “应用牵引-整机带动”发展框架

为了进一步深化应用场景并带动产业升级，建议积极建立人形机器人供需对接平台，引导传统工厂和企业提高对人形机器人的接受度，推动人形机器人“进厂打工”，为传统产业带来新的活力，并为建立完整的人形机器人产业链打下坚实的市场基础。具体来说，政府管理部门可以通过组织供需对接会、发布相关政策和信息、提供资金和技术支持等方式，促进生产企业与需求方之间的沟通与合作；鼓励企业开展试点项目，逐步扩大人形机器人的应用范围。

（三）法律法规完善保障健康发展

随着人形机器人的广泛应用，建立健全的法律法规和伦理框架显得尤为重要。这不仅是为了保障公众安全和社会秩序，也是为了促进人形机器人产业的健康发展。建议及时更新和完善相关法律法规，明确机器人使用的边界条件、责任归属等问题。例如，针对无人驾驶汽车、医疗辅助机器人，应制定专门的法律条款，规定机器人的权利和义务关系，界定责任主体，处理好因机器人引起的纠纷。特别是对于涉及人身安全和隐私保护的事项，必须严格立法，确保公众利益不受侵害。同时，数据隐私保护是人形机器人发展中必须重视的问题。随着机器人智能化水平的提高，收集到的语音、图像、行为习惯等用户数据，不仅包含了用户的个人信息，还可能涉及到敏感内容。因此，必须采取有效的技术手段和管理措施，确保数据的安全性和私密性。例如，可以采用加密技术对数据进行保护，限制数据的访问权限，防止未经授权的人员获取敏感信息；建立透明的数据使用政策，告知用户数据的用途和流向，获得用户的同意和信任。

（四）政策引导带动市场投资

政策的支持和引导对推动人形机器人产业发展具有至关重要的作用。国家相关管理部门可以通过减免税收、提供财政补助等方式，降低企业的研发成本，激发创新活力。例如，对于从事人形机器人研发的企业，可以给予研发费用加计扣除、增值税减免等优惠政策，减轻企业的财务负担；对于初创企业和中小企业，可以提供启动资金和贷款贴息，帮助其迅速成长。此外，相关管理部门还可以设立风险投资基金，吸引社会资本参与，共同扶持有潜

力的项目和企业。这些政策措施不仅有助于提高企业的创新能力，还能增强市场信心，吸引更多投资者进入人形机器人领域。

基础设施建设是人形机器人产业发展的必要条件。推动基础设施建设，可以为机器人的研发、生产和应用提供有力保障，促进产业的快速发展。为支持机器人技术的研发和应用，国家相关管理部门应加大对物理和数字基础设施的投入，建设必要的设施和平台。例如，第五代移动通信（5G）网络的建设可以为机器人的实时通信和数据传输提供了高速稳定的通道，数据中心的建立则为大规模数据分析和处理提供了强大的计算能力。此外，还应当建设专门的测试场地和实验基地，为机器人的性能测试和功能验证提供良好的环境。

产业政策的引导对人形机器人市场的健康发展至关重要。国家相关管理部门可以通过制定产业政策，明确产业发展方向，引导社会资本流向人形机器人领域。例如，出台产业规划，设定发展目标和任务，为企业提供明确的指引；通过设立产业园区、举办创新创业大赛等方式，搭建交流合作平台，促进产业链上、下游企业的协同发展；加强市场监管，规范市场竞争秩序，打击不正当竞争行为，营造公平公正的市场环境，进而形成良好的产业生态，提升整个行业的竞争力。

六、推动我国人形机器人技术与产业发展的对策建议

（一）鼓励核心技术突破

在人形机器人产业蓬勃发展的背景下，核心技术的突破是推动其持续进步与产业升级的关键。建议设立专项基金，支持包括视觉、听觉、触觉等在内的多模态传感器的研发；推动传感器融合技术的发展，提升机器人对环境的综合感知能力；支持高校、科研院所等开展先进智能感知与运动控制算法的研究，鼓励开发高精度、快速响应的伺服系统和智能控制器以增强机器人的感知能力和运动能力；加快突破情感计算和自然语言处理技术，使机器人能够更好地识别和理解人类情感，进行更自然和流畅的对话。重点支持具身智能大模型材料和能源技术的研究与应用，开发轻质高强的碳纤维复合材料和智能材料，研发高能量密度、长寿命的电池和智

能能源管理系统，提高机器人的续航能力和能源利用效率，为人形机器人产业的长期繁荣与发展奠定坚实基础。

（二）强化产业布局

强化人形机器人产业布局，可以优化资源配置，提升产业效率，促进产业链上、下游的协同发展，形成强大的产业生态。建议加快产业链协同发展，加强人形机器人产业链上、下游企业的合作，推动核心零部件、系统集成、应用服务等环节的协调发展；设立产业联盟，共同研究和解决产业发展中的共性问题，支持关键零部件的国产化，提高产业链自主可控能力。加强供应链保障，建立和健全产业供应链保障机制，确保关键零部件和材料的稳定供应，鼓励企业加强供应链管理，提高效率和可靠性。支持建设人形机器人产业集群，设立国家级产业示范区，吸引企业和机构聚集，形成产业集聚效应。提供产业链金融支持，设立产业链金融基金，帮助企业解决资金问题，提升产业链整体抗风险能力，并鼓励其他金融机构加强对人形机器人产业链的支持，提供多样化金融服务。

（三）建设人形机器人基础设施

随着人形机器人技术的迅猛发展，该领域吸引了大量初创企业投身其中，然而，高昂的研发成本和技术门槛等问题，成为这些企业健康成长的主要障碍。建议政府主导进行开源基础设施建设，为初创企业提供坚实的支持，减轻其创业压力，加速技术进步和市场拓展。① 联合行业内领先企业、高校和科研院所，构建公共具身智能数据库，降低研发成本、提高技术共享效率。该数据库应广泛收集并

整理来自不同场景的人类动作数据，采用先进的数据处理技术和严格的隐私保护措施，确保数据的质量和安全性。② 积极开展多模态大模型基础设施建设，为初创企业提供开源的技术支持，包括但不限于语音识别、自然语言处理、图像识别等多模态数据处理技术。鼓励“产学研”合作，搭建开放平台，推进多模态大模型的开放与共享，促进技术的快速迭代和应用。③ 积极与领先的云计算服务企业合作，提供低成本或免费的算力支持，特别是在模型训练和测试阶段。在人形机器人“云边端”架构（见图6）的基础上，通过购买服务的形式，为符合条件的企业提供算力补贴，减轻企业的财务负担。同时，加强对算力资源使用的管理和优化，降低企业的研发成本，促进资源的高效利用，推动可持续发展。

（四）实施示范性工程

针对当前人形机器人应用场景尚不明确的问题，建议在农业、服务业、军事、物流分拣及医疗健康等领域开展示范应用工程，引导企业探索并拓展人形机器人的实际应用范围。具体来看，建设农业人形机器人试验基地，支持企业和科研院所联合开发适用于农作物种植、收割及病虫害防治等环节的机器人解决方案，以提高农业生产效率；在服务行业中，推广人形机器人在酒店、餐饮、零售等行业的应用，提供顾客服务、物品递送等功能，改善服务质量和用户体验；加大安全用途人形机器人的研发投入，特别是在环境适应性和自主决策能力方面进行技术攻关，探索其在军事训练、安全巡逻和灾害救援等领域的应用可能性；鼓励物流行业引入人形机器人技术，优化货物分类、搬运和配送流程，提升物流效率和服务水平；在医疗健康领域，推动



图6 人形机器人“云边端”架构

人形机器人在手术辅助、病人护理、康复训练等方面的创新应用, 为患者提供更加安全高效的医疗服务。通过先行先试, 可以有效促进人形机器人技术的研发与应用, 为经济社会发展注入新的动力, 为相关企业发展提供方向和实践经验。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 9, 2024; **Revised date:** December 20, 2024

Corresponding author: Wang Yaonan is a professor from College of Electrical and Information Engineering, Hunan University. His major research fields include robotics & intelligent control. E-mail: yaonan@hnu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Research on Global Future Trends in Information Industry Development and China’s Strategy to Pioneer New Fields and New Tracks” (2023-XBZD-21), “Research on the Innovation and Development Strategy of Artificial Intelligence Industry in Hunan Province” (2023-DFZD-61)

参考文献

- 中华人民共和国工业和信息化部. 关于印发《“十四五”机器人产业发展规划》的通知 [EB/OL]. (2021-12-28)[2024-09-06]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_14c785d5a1124f75900363a0f45d9bbe.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People’s Republic of China. Notice on Issuing the “14th Five-Year Plan” for the development of the robotics industry [EB/OL]. (2021-12-28) [2024-09-06]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_14c785d5a1124f75900363a0f45d9bbe.html.
- 新华社. 多地老龄化程度加深 如何面对人口发展新常态? [EB/OL]. (2023-07-04)[2024-09-06]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891222.htm.
Xinhua News Agency. The degree of aging is deepening in many places, how to face the new normal of population development? [EB/OL]. (2023-07-04)[2024-09-06]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891222.htm.
- Horizon Europe. Horizon 2020 [EB/OL]. [2024-09-07]. https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/horizon-europe_en.
- U.S. National Science Foundation. National robotics initiative 3.0 [EB/OL]. [2024-09-07]. <https://new.nsf.gov/funding/opportunities/nri-30-national-robotics-initiative-30-innovations-integration/503641/nsf21-559>.
- 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《人形机器人创新发展指导意见》的通知 [EB/OL]. (2023-11-02) [2024-09-06]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People’s Republic of China. Ministry of Industry and Information Technology of the People’s Republic of China issued the *guiding opinions on the innovative development of humanoid robots* [EB/OL]. (2023-11-02) [2024-09-06]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html.
- Rombach R, Blattmann A, Lorenz D, et al. High-resolution image synthesis with latent diffusion models [R]. New Orleans: 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022.
- Dosovitskiy A, Beyer L, Kolesnikov A, et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale [EB/OL]. (2022-06-03)[2024-09-02]. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- Zhang A, Lipton Z C, Li M, et al. Dive into deep learning [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- Han K, Wang Y H, Chen H T, et al. A survey on vision transformer [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(1): 87–110.
- Saavedra-Ruiz M, Morin S, Paull L. Monocular robot navigation with self-supervised pretrained vision transformers [R]. Toronto: 2022 19th Conference on Robots and Vision (CRV), 2022.
- Han Y H, Yu K L, Batra R, et al. Learning generalizable vision-tactile robotic grasping strategy for deformable objects *via* transformer [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024 (99): 1–13.
- Huang W H, Zhou Y X, He X K, et al. Goal-guided transformer-enabled reinforcement learning for efficient autonomous navigation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(2): 1832–1845.
- Cao H Q, Tan C, Gao Z Y, et al. A survey on generative diffusion models [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2024, 36(7): 2814–2830.
- Ho J, Jain A, Abbeel P, et al. Denoising diffusion probabilistic models [R]. Vancouver: The 34th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2020.
- Goodfellow I J, Pouget-Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets [R]. Montreal: The 28th International Conference on Neural Information, 2014.
- Liu J W, Stamatopoulou M, Kanoulas D. DiPPER: Diffusion-based 2D path planner applied on legged robots [R]. Yokohama: 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2024.
- Zhao W X, Zhou K, Li J Y, et al. A survey of large language models [EB/OL]. (2023-03-31)[2024-09-20]. <https://arxiv.org/abs/2303.18223>.
- Zhang R, Isola P, Efros A A, et al. The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric [R]. Salt Lake City: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.
- Hermann K M, Kočiský T, Grefenstette E, et al. Teaching machines to read and comprehend [R]. Montreal: The 29th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2015.
- Daniel N, Subhro R, Rohan P, et al. Grounding robot plans from natural language instructions with incomplete world knowledge [R]. Zürich: The 2nd Annual Conference on Robot Learning 2018, 2018.
- Zhang C, Chen J X, Li J T, et al. Large language models for human-robot interaction: A review [J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2023, 3(4): 100131.

- [22] Nichols E, Gao L, Gomez R, et al. Collaborative storytelling with large-scale neural language models [R]. Virtual Event: The 13th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction and Games, 2020.
- [23] Schwitzgebel E, Schwitzgebel D, Strasser A. Creating a large language model of a philosopher [J]. *Mind & Language*, 2024, 39(2): 237–259.
- [24] Li X, Zhong H X, Zhang B, et al. A general Chinese chatbot based on deep learning and its' application for children with ASD [J]. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2020, 10(4): 519–526.
- [25] Satya Durga Manohar Sahu V, Samal P, Kumar Panigrahi C. Modelling, and control techniques of robotic manipulators: A review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 2758–2766.
- [26] Rupert L, Hyatt P, Killpack M D. Comparing model predictive control and input shaping for improved response of low-impedance robots [R]. Seoul: 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2015.
- [27] Haffemayer A, Jordana A, Fourmy M, et al. Model predictive control under hard collision avoidance constraints for a robotic arm [R]. New York: 2024 21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR), 2024.
- [28] Kim D, Di Carlo J, Katz B, et al. Highly dynamic quadruped locomotion *via* whole-body impulse control and model predictive control [EB/OL]. (2019-09-14)[2024-09-12]. <https://arxiv.org/abs/1909.06586v1>.
- [29] Li H, Wensing P M. Cafe-mpc: A cascaded-fidelity model predictive control framework with tuning-free whole-body control [EB/OL]. (2024-03-06)[2024-09-15]. <https://arxiv.org/abs/2403.03995v3>.
- [30] Singh B, Kumar R, Singh V P. Reinforcement learning in robotic applications: A comprehensive survey [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2022, 55(2): 945–990.
- [31] Hua J, Zeng L C, Li G F, et al. Learning for a robot: Deep reinforcement learning, imitation learning, transfer learning [J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1278.
- [32] Zhu X J, Zheng X D, Zhang Q Y, et al. Sim-to-real transfer with action mapping and state prediction for robot motion control [R]. Tokyo: 2021 6th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), 2021.
- [33] Portela T, Cramariuc A, Mittal M, et al. Whole-body end-effector pose tracking [EB/OL]. (2024-09-24)[2024-09-29]. <https://arxiv.org/abs/2409.16048>.
- [34] Siekmann J, Godse Y, Fern A, et al. Sim-to-real learning of all common bipedal gaits via periodic reward composition [R]. Xi'an: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021.
- [35] Qin B Y, Gao Y, Bai Y. Sim-to-real: Six-legged robot control with deep reinforcement learning and curriculum learning [R]. Singapore: 2019 4th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 2019.
- [36] Kobayashi M, Buamanee T, Uranishi Y, et al. ILBiT: Imitation learning for robot using position and torque information based on bilateral control with transformer [EB/OL]. (2024-01-30)[2024-09-20]. <https://arxiv.org/abs/2401.16653v2>.
- [37] Stepputtis S, Campbell J, Phielipp M, et al. Language-conditioned imitation learning for robot manipulation tasks [R]. Vancouver: The 34th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2020.
- [38] Wu F Y, Gu Z Y, Wu H R, et al. Infer and adapt: Bipedal locomotion reward learning from demonstrations *via* inverse reinforcement learning [R]. Yokohama: 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2024.
- [39] Wu Q, Zhang C, Liu Y C. Custom sine waves are enough for imitation learning of bipedal gaits with different styles [R]. Guilin: 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2022.
- [40] Zhang W, Yu Z G, Chen X C, et al. The magneto-thermal analysis of a high torque density joint motor for humanoid robots [R]. Beijing: 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2018.
- [41] Urata J, Hirose T, Namiki Y, et al. Thermal control of electrical motors for high-power humanoid robots [R]. Nice: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.
- [42] Vassileva D, Kiyosawa Y, Suzuki M. Sensorless torque control for a robot with harmonic drive reducers [J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2011, 39(2): 253–267.
- [43] Uemura M, Mitabe Y, Kawamura S. Simultaneous gravity and gripping force compensation mechanism for lightweight hand-arm robot with low-reduction reducer [J]. *Robotica*, 2019, 37(6): 1090–1103.
- [44] Ogawa Y, Venture G, Ott C. Dynamic parameters identification of a humanoid robot using joint torque sensors and/or contact forces [R]. Madrid: 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2014.
- [45] Almassri A M, Wan Hasan W Z, Ahmad S A, et al. Pressure sensor: State of the art, design, and application for robotic hand [J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015(1): 846487.
- [46] Wang Z M, An J, Nie J H, et al. A self-powered angle sensor at nanoradian-resolution for robotic arms and personalized medicare [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(32): 2001466.
- [47] Samatas G G, Pachidis T P. Inertial measurement units (IMUs) in mobile robots over the last five years: A review [J]. *Designs*, 2022, 6(1): 17.
- [48] International Federation of Robotics. Robotics research: How Asia, Europe and America invest [EB/OL]. [2024-09-20]. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robotics-research-how-asia-europe-and-america-invest>.
- [49] 人民网研究院. 人形机器人技术专利分析报告. [R]. 北京: 人民网研究院, 2023.
People's Daily Online Institute. Analysis report on humanoid robot technology patents [R]. Beijing: People's Daily Online Institute, 2023.
- [50] 安徽省人民政府办公厅. 安徽省人民政府办公厅关于印发《安徽省机器人产业发展规划(2018—2027年)》的通知 [EB/OL]. (2018-07-12) [2024-09-06]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/8265651.html>.
Office of the People's Government of Anhui Province. Notice of the Office of the People's Government of Anhui Province on printing and distributing *the development plan for the robot industry in*

- Anhui Province (2018—2027)* [EB/OL]. (2018-07-12)[2024-09-06]. <https://www.ah.gov.cn/public/1681/8265651.html>.
- [51] 广州市工业和信息化局. 关于印发《广州市关于推进新一代人工智能产业发展的行动计划(2020—2022年)》的通知 [EB/OL]. (2020-03-03)[2025-01-17]. <https://www.zhinengxiehui.com/ai/24864.html>.
Guangzhou Bureau of Industry and Information Technology. Notice on printing and distributing *the action plan for promoting the development of the new generation of artificial intelligence industry in Guangzhou (2020—2022)* [EB/OL]. (2020-03-03)[2025-01-17]. <https://www.zhinengxiehui.com/ai/24864.html>.
- [52] 湖北省人民政府. 省人民政府关于印发《湖北省新一代人工智能发展总体规划(2020—2030年)》的通知 [EB/OL]. (2020-09-04)[2024-09-06]. https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202009/t20200904_2887689.shtml.
People's Government of Hubei Province. Notice of the Provincial People's Government on printing and distributing *the overall plan for the development of new-generation artificial intelligence in Hubei Province (2020—2030)* [EB/OL]. (2020-03-03)[2024-09-06]. https://www.hubei.gov.cn/zfwj/ezf/202009/t20200904_2887689.shtml.
- [53] 中华人民共和国民政部. 关于印发《智慧健康养老产业发展行动计划(2021—2025年)》的通知 [EB/OL]. (2021-10-27)[2024-09-06]. <https://www.mca.gov.cn/n152/n165/c39347/content.html>.
Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. Notice on issuing *the action plan for the development of the smart health and elderly care industry (2021—2025)* [EB/OL]. (2021-10-27)[2024-09-06]. <https://www.mca.gov.cn/n152/n165/c39347/content.html>.
- [54] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于推动轻工业高质量发展的指导意见 [EB/OL]. (2022-06-08)[2024-09-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/19/content_5696665.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Guiding opinions on promoting high-quality development of the light industry [EB/OL]. (2022-06-08)[2024-09-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/19/content_5696665.htm.
- [55] 高工咨询. 中国人形机器人产业发展蓝皮书2024 [R]. 深圳: 高工咨询, 2024.
Gaogong Consulting. Blue book on the development of China's humanoid robot industry 2024 [R]. Shenzhen: Gaogong Consulting, 2024.