

DOI: 10.3901/JME.2025.15.121

构建具身智能新范式：人形机器人技术现状及发展趋势综述*

陶永¹ 万嘉昊¹ 王田苗¹ 熊友军² 王柏村³ 张文博⁴ 邓昌义⁵
陶雨¹ 杨赓³ 魏洪兴¹

- (1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;
2. 国家地方共建具身智能机器人创新中心 北京 100176;
3. 浙江大学机械工程学院 杭州 310058;
4. 中国国际工程咨询有限公司 北京 100006;
5. 国家工业信息安全发展研究中心 北京 100040)

摘要: 当前人形机器人技术正在加速演进，已成为全球科技创新与产业升级的新高地。在“人本智造”理念下，人形机器人作为具身智能的重要代表，具有广阔的发展前景。针对人形机器人技术多学科交叉、体系复杂与高度集成的特点，结合该领域的最新研究成果与发展动态，综述人形机器人的技术现状及发展趋势。首先，介绍人形机器人的定义与发展历程，从技术水平、产业格局、政策支持等方面描述国内外现状，对比总结典型技术发展特征与产品特色。重点剖析了核心零部件、环境感知与场景理解、步态控制与灵巧操作、具身智能与大模型、人机共融与交互、操作系统与工具链等关键核心技术，讨论其实现途径与当前研究进展。进而，介绍人形机器人在特殊服役环境、智能制造、家庭及社会服务等领域的典型应用，并探讨其在新兴应用领域的拓展潜力。进一步，围绕技术瓶颈和应用难题，分析当前人形机器人发展面临的主要挑战。最后，针对以人形机器人为代表的具身智能在多模态垂直大模型、高算力仿真训练平台以及安全与伦理等方面的发展趋势进行了展望。希望在总结把握人形机器人前沿技术发展动态的同时，为相关研究人士提供参考与启发，助力推动我国人形机器人技术进步与产业化发展。

关键词: 人形机器人；关键技术；灵巧操作；具身智能；大模型；人机共融；仿真训练平台

中图分类号: TP242

Establishing a New Paradigm of Embodied Intelligence: A Review of the Current Status and Development Trends in Humanoid Robot Technology

TAO Yong¹ WAN Jiahao¹ WANG Tianmiao¹ XIONG Youjun² WANG Baicun³
ZHANG Wenbo⁴ DENG Changyi⁵ TAO Yu¹ YANG Geng³ WEI Hongxing¹

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;
2. Beijing Embodied Intelligent Robot Innovation Center Co., Ltd., Beijing 100176;
3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058;
4. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100006;
5. National Industrial Information Security Development Research Center, Beijing 100040)

Abstract: The technology of humanoid robots is currently evolving rapidly, becoming a new focal point for global technological innovation and industrial upgrading. As an important representative of embodied intelligence, humanoid robots possess vast development potential and application prospects. Based on the multidisciplinary intersections, complex systems, and high levels of integration inherent in humanoid robot technology, this review synthesizes the latest research achievements and industry

* 国家自然科学基金资助项目(52375005)。20241031 收到初稿，20241226
收到修改稿

developments in this field, focusing on the current technological status and development trends of humanoid robots. First, the definition and developmental history of humanoid robots are introduced, describing the current status of development in both foreign and domestic contexts from the perspectives of technological level, industrial landscape, and policy support. A comparison and summary of the typical technological development characteristics and product features between domestic and international advancements are provided. Key core technologies are analyzed in detail, including critical components, environmental perception and scene understanding, gait control and dexterous manipulation, embodied intelligence and large models, human-robot collaboration and interaction, as well as operating systems and toolchains. The implementation pathways and current research progress of these technologies are discussed. Furthermore, typical applications of humanoid robots in specialized service environments, intelligent manufacturing, and household and social services are presented, exploring their expansion potential in emerging application areas. The main challenges faced by humanoid robot development are analyzed, focusing on technological bottlenecks and application difficulties. Finally, based on the development status of technologies and applications, an outlook on the trends in embodied intelligence represented by humanoid robots is provided, particularly in areas such as multimodal vertical large models, high-performance simulation training platforms, and safety and ethics. This review aims to summarize and grasp the dynamics of cutting-edge technological developments in humanoid robots domestically and internationally, while offering insights and references for those engaged in the research and development of humanoid robot technologies and products, thus contributing to the advancement and industrialization of humanoid robot technology in China.

Key words: humanoid robot; key technologies; dexterous manipulation; embodied intelligence; large model; human-robot collaboration; simulation training platform

0 前言

人形机器人是一类具有人类外形、模仿人类功能和智能的仿生通用机器人^[1]。工业和信息化部发布的《人形机器人创新发展指导意见》中，将人形机器人定义为“集成人工智能、高端制造、新材料等先进技术，有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品，将深刻改变人类生产生活方式”^[2]。与其他传统机器人相比，它拥有更贴近人类的外形，并逐步具备了与人类相近的自主思维与运动控制能力，包括由双足、双臂、头部及其连接件组成的“躯干”，以及拥有认知智能的“大脑”和控制灵巧平稳运动的“小脑”^[3-4]。这种外形和技能使得它在人类的工作和生活环境巾具有更强的通用性和适应性，能够适应人类环境的不连续性，并且可像人类一样灵活使用工具，实现人与机器人的无缝衔接和替换。此外，人形机器人的类人外形也可在人机交互过程中发挥更为舒适自然的功用^[5-6]，更加遵循智能机器人以人为本、协作智融的“人本智造”新范式^[7]。因此，人形机器人已逐渐成为“人本智造”理念下的具身智能理想载体。

人形机器人涉及机械、电气、材料、传感、控制、人工智能等多个学科的交叉与融合，被国际公认是机器人技术的集大成者和技术竞争的制高点^[8-10]。从系统角度看，人形机器人是一个高自由

度的复杂系统，其制造、设计、建模和规划都涉及到许多问题，如驱动和传动的实现、感知与决策的融合，以及软硬件的有效协同等。从运动的角度看，人形机器人是以双足为支撑点与地面进行间断性接触的，与地面接触空间小、时间短，导致稳定控制的时空域非常有限^[11]；同时，人形机器人面临建模的不准确性、地面的不平整性以及作业过程中各种位置干扰等问题，由于其动态不稳定性，在应用中面临着许多难点和挑战^[12-14]。



图 1 人形机器人技术概览图

人形机器人的发展给机器人技术的各个方面都带来了发展机遇，既推动了机器人自身相关零部件

和核心技术的发展与突破^[15-18], 又促进了具身智能、大模型、多模态融合等快速发展的新兴技术在机器人层面的融合发展^[19-21]。从电机、传动到高精度执行器, 从驱动、控制到自主任务规划, 它对机器人领域和产业的发展, 均发挥了重要的推动和支持作用^[22], 并已然成为具身智能应用部署的最佳形态^[23]。

目前, 人形机器人的全球市场规模据测算

已达32.8亿美元^[24], 预估国内未来三年在政府引导和投资驱动下产业规模也将突破200亿元^[25], 人形机器人在所有进入应用环节的机器人形态中占比预估将达20%以上^[26]。近年来, 我国相关部委和省市纷纷出台了一系列政策, 持续鼓励人形机器人的技术和产业发展, 如表1所示。这些支持政策的发布, 进一步说明我国政府层面对人形机器人的高度重视, 以及社会层面对人形机器人的需求不断增强。

表1 国内各地人形机器人产业发展支持方案

地区	发布时间	方案名称	发布机构
全国	2024.01	关于推动未来产业创新发展的实施意见	工业和信息化部、教育部、科学技术部、交通运输部、文化和旅游部、国务院国有资产监督管理委员会、中国科学院等7部门
上海市	2023.10	上海市促进智能机器人产业高质量创新发展行动方案(2023—2025年)	上海市经济信息化委、市发展和改革委、市科委、市财政局、市统计局
北京市	2024.04	中关村世界领先科技园区建设方案(2024—2027年)	工业和信息化部、科学技术部、北京市人民政府
江苏省	2024.04	江苏省机器人产业创新发展行动方案	江苏省工业和信息化厅、省发展和改革委、省科技厅、省财政厅、省市场监管局
山东省	2024.04	山东省促进人形机器人产业创新发展实施方案(2024—2027年)	山东省工业和信息化厅
浙江省	2024.09	浙江省人形机器人产业创新发展实施方案(2024—2027年)	浙江省制造业高质量发展领导小组办公室

随着技术的不断突破和政策的持续支持, 人形机器人在多个领域的应用日益广泛, 面临的挑战也愈加复杂。为梳理这一领域的发展脉络与未来趋势, 接下来第一章将回顾国内外人形机器人的发展历程和现状, 指出国内外的优势和不足; 第二章梳理相关核心技术, 从系统层面探讨人形机器人软硬件的机、驱、控、算技术集成融合特性; 第三章展示人形机器人目前的典型应用案例, 探索应用新领域新模式; 第四章聚焦人形机器人面临的挑战与难点, 厘清人形机器人亟需突破的关键问题; 第五章对人形机器人未来发展趋势进行分析, 围绕技术更新与规范体系展开讨论, 思考人形机器人进一步迭代升级的方向与保障措施。

1 人形机器人发展历程与现状

1.1 人形机器人的发展历程

人形机器人从最初模仿人体肌骨结构与动作的机械系统, 逐步发展为具备高级认知能力的自主智能系统, 每一次技术飞跃都推动着机器人向更接近人类的行为智能与认知智能迈进^[27]。人形机器人从其他形态的机器人发展而来, 其发展主要经历了四个主要阶段, 如图2所示^[28-37]。

(1) 1969年至2000年, 人形机器人开始早期发展阶段, 其研究主要集中在基础机械结构设计和基本运动能力的实现上。人形机器人的技术栈主要包

括刚性结构的驱动传动系统和简单的运动控制系统, 功能相对单一^[11, 38]。由于计算能力和传感技术的局限, 机器人只能执行机械性的重复任务或预编程操作, 难以自主适应环境变化。

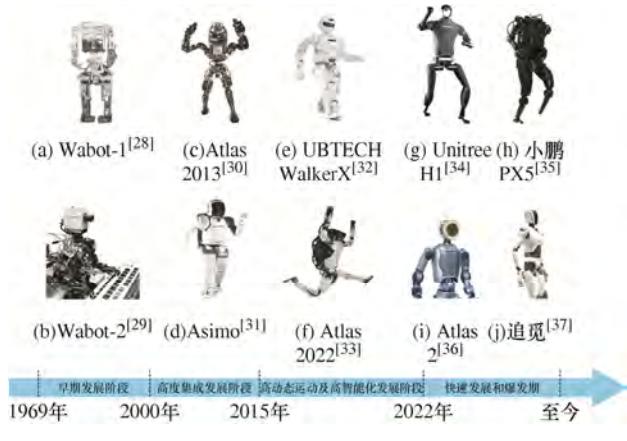


图2 人形机器人发展阶段

(2) 2000年至2015年, 人形机器人进入高度集成的发展阶段, 技术朝着更高集成度的方向演进。人形机器人逐渐配备了更丰富的传感器, 如视觉、力觉和听觉等, 使其具备了基础的环境感知能力^[39]。同时, 控制算法显著提升, 机器人能够执行更复杂的任务, 并在一定程度上实现自主决策。然而, 这一阶段的人形机器人仍然受到算法复杂度和计算能力的限制, 难以实现真正的智能化。

(3) 2015年至2022年, 人形机器人进入高动态

运动与智能化的发展阶段，技术取得了显著进步。以波士顿动力 Atlas 为代表的机器人能够完成复杂的运动任务^[40]，如跑步、跳跃和导航等，并通过先进的控制算法实现灵活的动作执行。尽管在运动能力上取得了显著进步，但其自主环境感知和实时决策能力仍有待进一步提升。这一阶段的标志性突破是深度学习和强化学习的初步应用，使机器人在动态环境中能够更好地适应新任务。然而，尽管技术不断进步，高昂的数据处理与训练成本，以及安全性和可靠性问题，仍是制约人形机器人智能化技术落地的重要瓶颈。

(4) 2022 年至今，随着大规模人工智能模型的发展以及高性能计算平台的迭代，人形机器人进入了快速发展的爆发期。借助先进的人工智能模型和硬件平台，新一代人形机器人在自然语言处理、情感识别和复杂任务执行方面取得了突破性进展^[41-42]。软硬件深度融合使得人形机器人具备了更强的实时学习能力和自适应性，使其能够在更加多样化的场景中自主高效执行任务。此时人形机器人逐渐从硬件为主的系统，演变为通过软件赋能的具身智能体。

近年来，软硬件的深度融合创新加速了人形机

器人在多领域的技术突破与产品研发。随着技术的不断迭代，人形机器人将进一步提升其智能化水平与自适应能力，成为多个行业的重要推动力，开启更加广阔的科技变革。

1.2 国际人形机器人发展现状

国际人形机器人技术起步较早，特别是在肢体机械结构领域基础扎实。目前，国外人形机器人技术的研发热点主要集中在美国、日本和欧洲，表 2 列出了几种典型的国外人形机器人型号。全新的电动设计使得人形机器人具备了更加灵活的关节结构和强大的执行器性能^[43]。同时，针对家庭应用场景，安全性逐渐成为设计的核心理念，部分人形机器人开始采用柔软的外观材料，以提升交互安全性。随着人工智能技术的发展，人形机器人正成为具身智能、端到端大模型等新技术的试验与集成验证平台。例如，OpenAI 的算法与硬件结合，显著增强了人形机器人的智能，加速了技术迭代，拓宽了其应用范围^[44]。同时，NVIDIA 通过与国际企业的合作，依托其强大的 GPU 算力平台，开发了针对人形机器人的模型和工具，不仅推动了机器人技术的创新，还吸引了更多机构的参与，进一步促进了相关行业蓬勃发展的^[44-45]。

表 2 国外人形机器人代表性公司与产品

公司	发布时间	产品	特性
Tesla	2024.10	新一代 Optimus	Optimus 身高 173 cm，体重 57 kg，采用了先进的深度学习算法，能够通过不断的学习和优化，逐渐掌握各种技能和行为模式；具有强大的交互能力，可与人自由交流；能够根据不同的环境和任务需求，自动调整行为和策略
Figure AI	2024.08	Figure2	Figure 02 身高 168 cm，体重 70 kg，专为在人类环境中工作而设计。机器人内置了由 OpenAI 定制的语音到语音推理模型，可以与人进行更高效的对话，并执行动作以有效回应语音指令
IX	2024.08	Neo Beta	NEO Beta 身高 167 cm，体重 30 kg，具备卓越的移动性能，能够在复杂地形中自如行动；其灵巧手具有 20 自由度并搭载触觉传感器，既适合精密操作，又可承载 20 kg 的物体；基于 OpenAI 技术栈具备自然语言处理和视觉识别能力
Boston Dynamic	2024.04	Atlas 2(电动)	Atlas 2 是一款全电动人形机器人，采用超越人类关节运动能力的设计，多处关节设计了定制的、高功率且极其灵活的执行器，能够流畅地完成站立、旋转等复杂动作，并具备执行人们无法完成的一系列动作的能力
Agility Robotics	2023.03	Digit V4	Digit V4 身高 175 cm，体重 65 kg，最大负载为 16 公斤。具有感知和手臂的腿部活动能力；其设计理念为以人为中心的面向实用工作的多用途机器人

国外顶尖高校和科研机构也积极推动人形机器人技术的研发。麻省理工学院(MIT)、东京大学(UT)和苏黎世联邦理工学院(ETH Zurich)等知名学府，依托各自的研究项目，在人形机器人领域取得了突破性进展。MIT 在动作控制、智能感知与自主决策技术方面的创新尤为突出^[46-47]，UT 和 ETH Zurich 则在机器人感知与交互、运动规划与人机协作技术方面有所建树^[48-49]，为该领域的进一步发展提供了理论与技术支撑。

尽管国外人形机器人技术取得了显著进展，技术转化与应用落地依然面临多重挑战。例如，波士顿动力的 Atlas 机器人在动态运动和环境适应性方面表现出色，但其商业化进程受到技术成本和实际应用场景不确定性的制约。Atlas 机器人从早期的液压驱动技术转向电驱动，标志着其技术栈的深度调整，反映了机器人系统在复杂技术与实际应用需求之间的平衡问题。当前，国外人形机器人研发的核心技术挑战在于：如何在保障灵活性与稳定性的同

时, 优化能耗与控制算法, 以满足多样化应用场景的需求。

此外, 随着国外更多人工智能公司进入人形机器人领域, 相关技术的研发热度正在逐步提升。尽管如此, 典型应用场景, 如工业协作、服务机器人等, 仍处于早期探索阶段。核心技术如传感器融合、

实时环境感知与自适应控制算法的性能优化, 仍然是限制其在实际环境中广泛应用的主要障碍。多国政府也通过出台相关政策, 大力推动机器人与人工智能技术的融合与创新。表3列出了部分政策支持, 旨在加速技术迭代, 促进人形机器人在复杂任务中的落地应用。

表3 国外人形机器人产业发展主要政策

经济体	发布时间	主要规划政策	相关内容
美国	2023.12	2024财年国防授权法案	鼓励国防部和各军种加强人工智能在自动化和机器人领域的应用, 特别是在人形机器人技术中的任务执行能力提升, 包括自主行动和复杂环境下的决策支持
	2023.05	国家人工智能研发战略计划	强调人工智能在机器人领域的核心地位, 推动人形机器人建立复杂动态环境中的自主决策和环境感知能力, 通过人工智能与机器人的深度融合来提升智能化水平
日本	2024.06	2024科技创新白皮书	提出通过人工智能技术提升人形机器人的应用潜力, 尤其是在医疗、养老和自动化服务领域, 推动人工智能结合机器人在复杂任务中的协作
	2022.04	人工智能战略2022	强调人工智能在机器人研发中的核心地位, 尤其在人形机器人智能化领域, 推动人机协作技术进步。重点发展自主决策和环境感知能力, 促进产业应用
欧盟	2024.03	“地平线欧洲”2025—2027年战略规划	强调通过数字技术与人工智能的结合, 支持智能机器人发展, 包括人形机器人在内的智能自主系统将在自动化制造、医疗健康和服务等领域发挥作用

1.3 国内人形机器人发展现状

近年来国内人形机器人技术的发展取得了显著进展, 技术路线日益多样, 展现出强大的创新活力。与国际上相比, 国内虽然起步较晚, 但由于创新型企业众多, 应用需求导向明显, 更加注重产品与市场应用的结合。企业和高校的研发并行发展, 形成了一种独特的“双轨制”模式。同时, 我国对人形机器人的相关政策支持及时且精准, 以强强联合的方式布局了国家地方共建具身智能机器人创新中心、上海人形机器人创新中心等协同研发平台, 加速了人形机器人技术的创新和产业化进程。

国内企业在人形机器人腿部动作稳定性等技术领域已逐步实现与国际领先水平的“并跑”。例如, 2024年宇树发布G1通用人形机器人量产版本, 并展现了其强大的腿部运动能力和稳定性; 此外, 傅利叶最新发布的新一代人形机器人GR-2在硬件配置、设计理念和开发框架等多个关键领域实现了显著提升, 并通过与AI技术的更紧密融合, 加速了具身智能的应用落地进程。与此同时, 国内的人形机器人运动控制算法、驱动系统、具身大模型、模块化软硬件等关键技术的开源程度较高, 这种开放性促进了与高校及其他用户单位的合作研发, 更加贴近实际应用需求, 创新方向更加多元。

国内高校和科研机构在技术研发中发挥了重要作用, 具有扎实的研究基础。例如, 北京理工大学黄强团队的“汇童”系列机器人在多种复杂环境中展示了优秀的运动能力^[50-51], 浙江大学熊蓉团队的

“悟空”机器人在不平整地面上的稳定行走和动态避障方面表现出色^[52]等。相比于企业, 科研机构在技术研究上更加前沿和超前布局, 虽然存在技术体系相对独立的现象, 但这种独立性也为未来的深度合作和联合研发提供了更多的可能性。

国内人形机器人市场发展迅猛, 在产业上呈现出百花齐放的态势。高科技公司和跨界企业如宇树科技、傅利叶智能、优必选、银河通用、云深处、星动纪元、达闼等机器人企业纷纷入局, 推出了一系列性能达标且成本优势明显的产品, 如表4所示, 在国内外市场拓展和行业曝光度方面表现出色。

人形机器人作为一个跨学科、跨领域的高技术集成产业, 创新联合体或平台的存在对于推动技术攻关和产业应用至关重要。自2023年以来, 国内逐渐形成了以联合创新为导向的发展趋势, 国家在北京、上海等地相继成立了人形机器人创新中心, 并在浙江、广东、四川、湖北等地推动平台建设。这些中心和平台的建立, 旨在通过数据收集、模型训练、深耕应用场景、降低硬件成本等多种方式, 打造一个完善的产业生态系统。国内人形机器人技术发展迅速, 呈现出技术多样化、市场应用广泛的特点。在政策支持和科研创新的双重推动下, 企业与高校的深度合作将进一步加速技术进步和市场拓展。得益于技术的不断成熟、应用场景的丰富与多元化的合作模式, 使得国内人形机器人产业在全球竞争中形成了不可替代的地位。

表 4 国内人形机器人代表性公司与产品

公司	发布时间	产品	特性
优必选	2024.10	Walker S1	身高 172 cm、重量 76 kg，拥有 41 个自由度，开发了面向通用任务的多模态规划大模型、语义 VSLAM、学习型运动控制等具身智能关键技术，打造面向多任务工业场景的人形机器人应用范式
傅利叶	2024.09	GR-2	身高 175 cm，重量 63 kg，拥有 53 个自由度，单臂运动负载达 3 kg，能够完成更复杂的操作。其灵巧手单手具备 12 个主动自由度，使其能够执行更加复杂和人性化的操作
智元	2024.08	远征 A2	身高 169 cm，重量 69 kg，拥有 40 余个主动自由度，续航 2 h，稳定行走时速可达 7 km。基于多模态大模型，多通道的信息处理能力让无人机交互更轻松舒适
云深处	2024.08	Dr.01	身高 173 cm，重量 85 kg，行走速度大于 1.6 m/s，Dr.01 配备了轻量级的 J60 关节和大功率的 J100 关节，使其具备高度灵活的运动与操作能力，同时该机器人还具备在复杂环境中的适应力和融合感知能力
星动纪元	2024.08	小星 Max	身高 165 cm，重量 55 kg，拥有 54 个自由度。小星 Max 配备了 5 个阵列式传感器和 12 个主动自由度，最大抓握力可达 80 N，单指最大负载 5 公斤，具备高自由度、高性能、高智能性等优势，能够做出精确且迅速的动作，如夹取、捏、握持、拧转等
天链机器人	2024.08	T1 pro	身高 160 cm，重量 43 kg，拥有 71 个自由度。该机器人全身有 71 个自由度，关节最大扭矩达到 450 N·m，手臂单臂负载能力为 8 公斤，最大负载能力为 16 公斤，负重深蹲能力可以达到 145 公斤。T1 Pro 高度模拟人体骨骼结构，具备高度还原人类手指灵活性的设计。此外，T1 Pro 在机械本体、传感系统、伺服系统和控制系统等方面进行了研究创新
银河通用	2024.06	Galbot G1	身高 173 cm，重量 85 kg，拥有 43 个自由度，臂展为 190 cm，采用独特的移动双臂和轮式腿设计，实现了全方位的 360° 移动能力，这样的设计使得它能够应对不同任务需求
宇树	2024.05	G1	身高 127 cm，重量 35 kg，拥有≤43 个自由度，23 至 43 个关节电机，最大关节扭矩达到 120 N·m。G1 机器人运动能力出色，此外，G1 还配备了视觉感知传感器，支持模仿和强化学习驱动技术

近年来，虽然国内人形机器人技术取得了长足进步，但在高精度传感器、全身控制算法等某些关键领域与国际顶尖水平相比仍存在差距，部分国外企业和科研机构依然处于领先地位。但目前国内的企业和科研团队凭借政策支持、市场导向和灵活的创新机制，正逐步缩小这些差距。随着驱动系统、人工智能算法等核心技术的持续突破，国内人形机器人技术不仅具备了与国际同行“并跑”的能力，未来在多个领域有望实现超越。

2 人形机器人关键核心技术

人形机器人技术作为多学科交叉领域的集大成者，融合了机械设计、传感技术、控制算法、人工智能等核心要素，推动了机器人具备高度复杂的感知、运动与交互能力。根据功能与应用需求，人形机器人技术可划分为本体结构与核心零部件、高精度环境感知与理解、平稳步态控制与灵巧操作、具身智能与垂直大模型、人机协同与共融交互、操作系统与工具链等几大模块。这些模块相互协同，支撑了人形机器人在多样化场景中的广泛应用，并促使机器人从机械执行工具迈向智能自主体。人形机器人核心技术线如图 3 所示，下面将对人形机器人

涉及的各项核心技术进行探讨，分析其基本概念及在推动机器人技术发展的过程中所起到的关键作用。



图 3 人形机器人核心技术线

2.1 人形机器人本体与核心零部件

人形机器人本体的设计面临多重技术挑战，既需要高强度、紧凑的机械结构，也要实现灵活性和轻量化。人形机器人通过高强度轻量化材料(如铝合金和碳纤维复合材料)与仿生学设计，实现重量与耐久性的平衡。优化的骨架拓扑结构和多自由度关节设计，使得机器人能够模仿人类的自然动作，特别

是在完成复杂的运动任务时表现出色。例如, Tesla Optimus 机器人采用碳纤维复合材料, 将总重量控制在 57 kg 以内, 同时耐久性提升 20%。此外, 能源系统和多模态传感系统的集成设计, 使机器人能够在有限的体积中有效整合电池、传感器和控制模块, 以应对多样化的任务需求, 有效权衡运动平稳性、灵活性与系统续航能力。随着机器人应用场景的多样化, 其本体设计正趋向更高的环境适应性和安全性, 尤其是在家庭服务和医疗等领域。采用柔

性材料和智能反馈控制的仿生设计, 能有效减少机器人与环境之间的物理碰撞, 提升机器人在复杂环境中的安全性。

人形机器人技术的本质是三维空间中高维度的感知与运动, 高性能的本体核心零部件是实现其感知、运动与交互的基础。主要包括控制部件、驱动部件和执行部件以及认知决策软件算法; 其核心零部件包括: 减速器、伺服电机、高性能控制器、灵巧手与仿生软体夹爪等通用末端执行器等, 如表 5、图 4^[53-60]所示。

表 5 人形机器人核心零部件

核心零部件	国内厂家代表	国外厂家代表	发展趋势
谐波减速器	苏州绿的谐波传动科技股份有限公司、浙江来福谐波传动股份有限公司等	Hamnako、Shimpo 等	高精度与高负载能力需要进一步提升; 更长的使用寿命与可靠性; 轻量化与小型化
伺服电机	上海步科自动化股份有限公司、广州市昊志机电股份有限公司等	Kollmorgen、Yaskawa 等	提高电机的制造精度、机械结构设计的优化; 稳定的散热性能; 精确的力矩和位置反馈
高性能控制器	海光信息技术股份有限公司、深圳市紫光同创电子股份有限公司、华为技术有限公司等	Intel、NVIDIA、AMD 等	人形机器人控制器将向高效计算、低功耗设计、智能集成和自主化发展, 提升实时响应与灵活性
仿人灵巧手	北京因时机器人科技有限公司、上海智元新创技术有限公司等	DLR-HIT、Schunk 公司等	人形机器人灵巧手将朝深度仿生、柔性驱动和成本优化方向发展

人形机器人广泛采用谐波减速器作为其核心传动部件, 主要用做人形机器人关节电机的减速装置。谐波减速器的高传动比和高精度特性, 非常适合作为人形机器人关节的核心传动部件, 但其在高频工作下易发生疲劳损伤。当前的研究集中在提高材料耐久性及减速器设计的优化, 以提高其在长期运行中的效率和精度, 目前领先产品的定位精度基本可达到 $\pm 0.05^\circ$ 以内, 较好保证了人形机器人的操作精度。此外, 柔性元件的使用在重载条件下可能导致效率下降和精度损失, 目前的研究正在探索更加耐用和高效的材料组合。另外, 在大功率输出时, 热管理成为了无框力矩电机的主要技术挑战, 散热不良会导致性能下降和部件寿命缩短。研究人员正在开发新型散热系统, 如液冷技术以应对这一问题。同时, 制造精度对电机的稳定运行至关重要, 特别是在确保定子和转子间的电磁场均匀性方面, 任何微小的误差都可能影响运动精度和控制稳定性。近年来, Tesla Optimus 等机器人采用无框力矩电机, 展示了其在高精度控制中的潜力。国内企业如步科股份和昊志机电, 在制造精度提升和散热技术研发方面存在优势, 有效助力人形机器人电机的国产化进程。

人形机器人的高性能控制器被视为其系统的“大脑”, 是智能感知与决策的核心。其技术特点体现在强大的计算能力和低功耗设计。控制器通常采

用中央处理器(CPU)、图形处理器(GPU)和现场可编程门阵列(FPGA)结合的架构。其中, GPU 在大规模并行计算和深度学习任务(如视觉数据处理)中表现尤为优越。例如, 基于英伟达 Jetson AGX Orin 的控制器可实现每秒 275 万亿次浮点运算(TOPS), 支持复杂环境下的实时决策与多任务并发操作。在功耗优化方面, 新型控制器通过智能任务分配与资源管理, 能够将整体功耗降低至 10~15 W, 同时保持高效算力输出。然而, 在多模态数据融合和实时任务处理方面, 控制器仍需在计算性能与能效之间寻求平衡。例如, 高复杂度任务中确保低于人形机器人实时控制所需的 10 ms 的响应延迟仍是技术难题。目前, 英特尔(Intel)和英伟达(NVIDIA)在 CPU 与 GPU 领域处于领先地位, 而国内在高性能计算架构方面仍存在差距, 需要进一步推进自主研发, 特别是结合人形机器人的新算力需求, 开展面向应用的前沿产品自主研发。

人形机器人执行精密操作还离不开灵巧手、仿生软体夹爪等通用末端执行器。灵巧手融合了仿生学设计与多自由度控制技术, 具备与人类手指相似的灵活性, 能够执行多种复杂操作任务, 如抓握、捏合、旋转等。基于多自由度设计, 灵巧手能够在狭小的操作空间中实现高精度运动控制, 特别适用于生活服务、非标工业操作等对操作精度有较高要求的场景。近年来, 柔性材料和多模态传感器的应

用,使灵巧手在复杂环境中的适应性显著提升。柔性材料使得灵巧手在与物体或环境接触时能提供更精确的反馈,而多模态传感器则进一步增强了力觉、触觉的感知能力。要实现复杂感知系统与精密运动控制的完美配合,仍需进一步优化软硬件架构,当前的挑战主要集中在多模态信息的高效融合以及操作稳定性的进一步提升。随着技术的不断进步,灵巧手有望在未来承担更多精密操作任务,进一步拓展其应用场景。



图 4 人形机器人部分核心零部件

2.2 高精度环境感知与场景理解

人形机器人完成多样化、通用化的任务求解依赖于高精度的环境感知与场景理解(图 5),通过对多维多模的场景信息如声、光、力、电的感知,并理解多模态数据中蕴含的信息,从而构建对于工作环境与任务内容的深度理解^[61]。该流程需要高精度的各类传感器与相应的信息处理、理解学习、模态融合的算法^[62]。

相对于传统类型机器人,人形机器人具有更多类型的传统传感器,通常包括视觉系统^[63]、运动反馈系统、语音交互系统^[64]等板块。视觉系统包括单目、双目相机,单线/多线激光雷达等,视觉系统对于确认机器人本体所处环境与任务对象信息至关重要,是支撑人形机器人在非结构化环境内移动并完成未见过对象柔性操作的核心部分;同时,视觉是机器人认知本体的重要渠道,相较于通过 URDF 模型结合视觉系统标定,通过视觉观察机器人本体的标定方法允许机器人观察自身的几何结构与运动状态,实现更自然灵活的标定,且减少了标定过程对于高精度本体硬件的依赖,提升了系统对不同环境的适应能力。运动反馈系统主要包括六维力传感器、惯性测量单元(IMU)、高精度编码器等等,主要用于测量各关节运动带来的位速度反馈信息,现代高精度编码器的分辨率可达 0.001° , IMU 的姿

态角度误差小于 0.1° 。人形机器人可从高精度运动反馈系统中获得运动执行情况相关信息,通过负反馈回路实时调节运动输出,保障人形机器人完成高精度、柔顺的复杂动作。

近年来,随着微纳制造、新型软体材料等领域的突破,越来越多的新型传感器逐步运用在人形机器人当中,如视触觉传感器^[65-66],电子皮肤^[67],嗅觉传感器^[68]等。视触觉传感器、电子皮肤等主要将触觉引入人形机器人的感知框架,充分的研究表明触觉的引入对于提高人形机器人操作能力至关重要^[69]。触觉、嗅觉的引入有助于人形机器人更好的理解人类,从而达到更深层次的人机共融水平。目前对于感知信息的运用通常局限于一类信息解决一个问题,缺乏对于多模态信息的有效融合与综合运用,这限制了人形机器人在人类生活环境中的灵活处理各类复杂问题的能力。例如,当前多模态信息融合算法的实时性尚不足,决策延迟一般在 200~300 ms 之间,而复杂场景中低于 100 ms 的延迟是达到人类操作水平的关键。目前在人形机器人领域运用较多的包括决策论方法^[70],主要用于多模数据在决策级的融合,以及人工智能方法,如模糊逻辑、神经网络、遗传算法、基于规则的推理以及专家系统^[71]、逻辑模板法^[72]、品质因数法等方面融合创新发展。

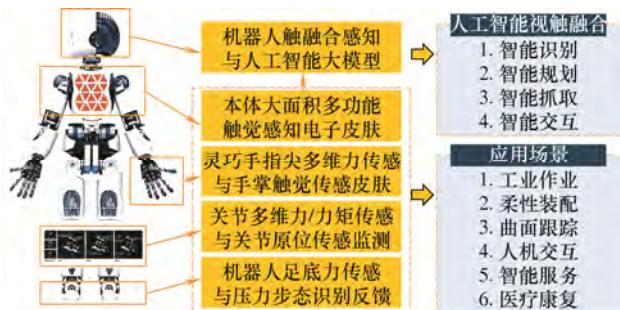


图 5 人形机器人用于环境感知与场景理解的多种传感器

2.3 平稳步态控制与灵巧操作

人形机器人作为类人运动能力的研究范式,其全身运动主要包括双足直立行走、上肢灵巧操作及全身协调运动。人形机器人在步态控制与灵巧操作方面展现出与传统机器人显著的技术差异。双足步态控制因与地面接触时间短、支撑面小,要求具备更加精密的动态平衡与能量管理能力,这与传统轮式或履带式机器人依赖稳定接触面的特性形成鲜明对比。在智能制造背景下,人形机器人进一步结合具身智能的理念,通过拟人化的数学建模、柔性控制算法以及实时动态优化,实现了从传统刚性控制到柔性、智能控制的转变^[73-75]。常用数学模型包括

降阶模型^[76]、全阶连续动力学模型、离散足部撞击动力学模型及混合动力系统模型^[77], 这些模型共同为非线性优化步态控制奠定了理论基础^[78-80]。例如, 北京理工大学基于拟人肌肉粘弹性模型设计了足部柔顺控制器^[81], 通过精准缓冲跳跃落地的冲击力, 可在跳跃落地时将冲击力减少 30%以上, 动态平衡误差小于 5 mm, 提升了人形机器人在动态运动过程中的稳定性。此外, 深度学习与强化学习的引入^[82-83], 使步态控制模型能够预测可能的姿态失稳情况, 并通过自主学习优化步态模式, 逐步提升机器人在非结构化环境中的适应性。硬件方面, 高精度传感器与伺服电机的发展进一步支持了实时姿态监测与步态调整^[84-85]。为了提高能效, 研究者还引入了基于能量管理的优化方法^[86-87], 使机器人在保证稳定性的同时显著降低能耗。

随着这些技术的逐步成熟, 步态控制的研究重

点正从纯粹的稳定性逐步转向全身协调运动及其与上肢操作的交互优化。全身控制的目标是实现双足步态、上肢灵巧操作和全身动态平衡的深度协同。通过多模态感知技术, 人形机器人能够实时整合步态与操作信息, 例如在复杂环境中, 机器人可以在维持双足稳定的同时进行抓取或搬运任务。此外, 基于全身运动规划的动态优化算法, 可在不同任务阶段动态调整力量分配和姿态控制, 进一步提升机器人在动态任务中的适应性。近年来, 研究者还结合深度学习与强化学习技术, 使机器人能够在全身控制中实现自主学习, 并通过模拟环境进行任务优化训练, 这显著增强了其在复杂场景中的决策能力。为清晰展示人形机器人技术的模块化分布及其协同关系, 图 6 中归纳了双足步态控制、上肢灵巧操作和全身协调运动三大核心模块的技术细节与交互逻辑。



图 6 平稳步态控制与灵巧操作技术栈

另外, 上肢作为人形机器人执行复杂任务的重要部件, 不仅在精细操作中发挥关键作用, 其仿人设计也更贴近人类操作需求。当前人形机器人的研究重心正逐渐聚焦于仿人机械臂和灵巧手的技术突破。在上肢灵巧操作方面, 现有人形机器人通常采用高自由度机械臂构型与仿人五指灵巧手^[88]。高自由度机械臂具有较大的运动范围和灵活性, 能够胜任多样化的操作任务, 特别是在复杂环境中完成精细操作。例如, 波士顿动力的 Atlas 机器人配备了高自由度机械臂, 其上肢能够完成工具抓取、部件

组装等任务, 展现了卓越的操作灵活性。Tesla Optimus 则进一步优化了机械臂的紧凑性和能耗效率, 使其在工业场景中能够长期稳定工作。此外, 双臂协同操作技术的发展使得人形机器人能够通过任务分解和灵活调度, 在动态环境中高效完成长时序、多步骤的复杂任务。例如, 优必选的 Walker S1 机器人在双臂操作中采用柔顺力控算法, 使其能够在不确定的任务环境下保持较高的鲁棒性, 成功执行高负载的协同操作任务。

仿人灵巧手作为人形机器人关键末端执行器,

其多自由度设计与多模态传感能力充分模拟了人类手部的灵活性和感知能力。其通过集成力觉、触觉传感器和高自由度设计，实现了复杂环境中的精细操作能力。例如，德国 Schunk 公司开发的 SVH 灵巧手内置多模态传感器，能够通过实时感知物体特性，动态调整抓取策略，在精密操作中表现优异。傅利叶智能的 GR-2 灵巧手进一步提升了主动自由度和触觉反馈能力，显著增强了装配与精细抓取的适应性。在柔性驱动领域，新型柔性仿生手通过软体材料和触觉反馈实现抓取力的自适应调节，能够有效提高操作的安全性与稳定性。此外，结合深度学习与强化学习的控制算法，灵巧手能够根据多模态感知数据生成优化的操作策略，展现出高效的任务学习与执行能力。这些技术进展不仅推动了灵巧手的多场景适应性，也为进一步研究其复杂交互机制提供了理论支持。

2.4 具身智能与大模型

具身智能(Embodied intelligence, EI)指的是机器人等智能体通过其物理形态与外部环境之间的紧密互动和反馈，来感知周围世界、做出决策并执行相应动作的能力^[89-90]。其关键在于让智能体不仅能感知外部环境^[91]，还能通过与环境的实时互动，利用深度学习与强化学习等模型^[92]，基于物理经验不断学习和适应^[93]。与传统人工智能主要依赖符号处理和静态输入不同，具身智能强调物理行为的影响，并通过智能体的身体和环境间的互动来推动学习和决策^[94-95]。例如，基于 DeepMind 开发的 RT-2 模型，人形机器人能够从多模态数据中实时处理 100 万张场景图像，并以延迟低于 10 ms 的速度完成决策

推理。

具身智能在人形机器人中的应用尤为突出，因为人形机器人能够通过与物理环境的交互实现更加自然的运动和任务执行^[96]。例如，具身智能模型通过集成同步定位与地图构建(SLAM)技术用于环境感知和导航，多模态感知(如触觉和力觉)用于与物体的交互反馈，以及运动规划算法进行路径和动作规划，从而使人形机器人实时感知、交互并动态调整其行为。这种集成方式使系统可在复杂动态环境中具备更高的自主性和灵活性，特别是在应对不确定任务时具有明显优势。人形机器人作为具身智能的理想载体，能够通过深度融合物理交互和智能算法，表现出更高的任务执行效率。全球多个科研机构正在加速具身智能的应用推广，DeepMind 联合 34 个机构共同启动 RT-X 项目^[97]，其 Open X-Embodiment 数据库目前已包含超过 1 亿条多模态训练样本，支持 200 种不同类型的机器人任务协同，致力于推动具身智能在多样化任务中的广泛应用。NVIDIA 发布人形机器人基础模型 ProjectGR0OT^[98]，通过集成先进的多模态感知技术和自适应学习算法，提升人形机器人在环境感知和任务执行中的智能化水平。我国的国家地方共建具身智能机器人创新中心发布的具身智能机器人“天工”^[99]，进一步推动了具身智能技术的落地应用。这些技术的发展不仅提升了机器人的环境感知和人机交互能力，还增强了其自主规划和智能化的决策能力，使机器人在多种需要高度智能化的场景中展现出强大的潜力(图 7)^[100-101]。

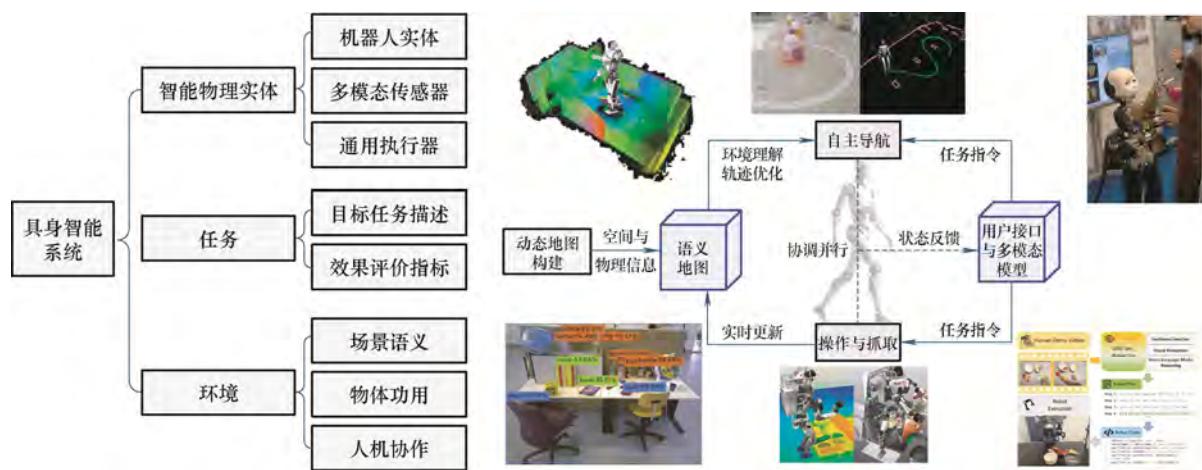


图 7 具身智能系统基本概念示意图^[100-101]

在此基础上，人形机器人具身智能的大模型可分为面向广泛场景的通用大模型与面向专用具身技

能的垂直大模型^[102]。通用大模型作为一种覆盖多场景、多任务的大型预训练模型，具有广泛的适应性

和可迁移性, 能够为人形机器人提供基础性的智能能力。通用大模型通常经过大规模、多模态数据的训练, 能够处理多样化的任务场景, 并具备一定的自主学习能力, 适用于人形机器人在不同应用场景中应对复杂的环境需求。例如, Google 的 PaLM-E 模型^[103]通过 10 亿参数的训练, 在多任务推理中实现了 80% 的平均准确率, 而 Meta 的 OPT 模型^[104]以 1 750 亿参数支持跨语言任务学习, 显著增强了多模态数据融合能力。

与通用大模型不同, 垂直大模型作为人形机器人的具身技能的专才模型, 通过对特定领域的定制化训练和深度优化, 以应对不同应用场景中的复杂需求, 进一步提升人形机器人在专业技能任务执行中的效率和精准度。垂直大模型不仅帮助机器人快速适应专业技能所处的复杂环境, 还可通过特定领域多模态数据的积累, 实现智能化的迭代优化, 使机器人具备更强的自主学习和适应能力(图 8)。例如, 字节跳动的 GR-2 模型^[105]通过优化工业任务学习, 将机器人装配精度提升至 0.1 mm, 显著提升了机器人在工业自动化中的效率; 腾讯的混元模型^[106]和科大讯飞的机器人超脑平台^[107]在基于语音的任务控制中实现了最高 95% 的交互准确率, 增强了机器人在人机交互方面的效果; ResNet^[108]、VGG^[109]等模型则通过深度卷积神经网络的优化, 大幅提升了机器人对视觉信息的处理能力。当前大模型与具身智能的结合, 使得人形机器人在环境感知、任务规划、运动控制及自主决策等方面取得了显著进展, 推动了其在工业自动化、智能医疗和服务机器人等多个领域的广泛应用。



图 8 具身智能技术体系

2.5 人机协同与共融交互

人形机器人由于自身具备与人高度相似的形态

和行动方式, 因此人机协同与共融交互技术成为了人形机器人必须解决的核心问题之一。在人机协同中, 人形机器人通过为人类提供支持, 可显著提升工作效率, 尤其是在复杂的生产和服务场景中(图 9)。人形机器人依托其无框动力系统和先进的控制算法, 结合大模型与具身智能技术, 能够实现类人的柔顺控制, 从而在非结构化环境中执行高度协调的运动和灵活操作。这些技术创新使机器人具备了在复杂动态环境中进行多自由度运动控制的能力, 特别是在高维协同操作中表现突出^[110]。人形机器人的上肢与手部的动作解析复杂, 操作维度高, 这给交互控制带来了显著的挑战。机器人不仅要实时解析人类的动作意图, 还需通过智能算法进行精准的运动规划和调整, 进而通过优化控制策略, 与人类一起完成复杂的操作任务^[111]。

为进一步增强人机协作中的安全性和有效性, 研究者正在深入探索动作与意图交互操作, 通过改进感知系统和决策算法并结合数字孪生系统, 使机器人与人类之间能够更好地感知与理解对方的动作和意图^[112]。这种交互系统不仅可以提升协作任务的执行效率, 还能够确保机器人在复杂环境中的安全性。同时, 机器人在动态环境中的感知与控制能力也正在进一步提升, 特别是在处理不断变化的场景时, 机器人必须遵循严格的安全运动约束, 并通过优化非线性问题求解, 实现稳定而高效的任务执行。这些优化措施将增强机器人与人类在复杂任务中的协同能力, 为实现更高水平的人机共融打下基础。

与此同时, 情感理解正成为人形机器人与人类互动的关键要素, 也是“人本智造”真正实现以人为本的核心需求。人形机器人通过结合多模态信息, 不仅能感知用户的情绪状态, 还能够根据情感反馈做出相应的反应^[113-115]。例如, 傅利叶 GR2 机器人利用情感能识别系统, 能够根据用户情绪做出动态调整, 从而增强人机交互的自然性和情感共融。这种多模态情感计算技术的引入, 进一步推动了人形机器人在情感计算和信息融合方面的发展。未来, 随着任务导向型视触共享控制系统的构建, 结合语音、图像和自然语言处理等技术, 机器人将在动态任务场景中展现出更高的适应性和智能性。随着这些技术的不断发展, 人形机器人在人机协同中的表现将更加智能化和柔顺化。通过进一步提升无框动力系统、高保真建模、大模型与具身智能等核心技术, 机器人将能够更好地适应工业、医疗、服务等复杂场景的任务需求。这些技术进步不仅推动了机器人

在更多实际应用场景中的落地，还为未来智能化工

作方式的进一步变革提供了新的可能性。



图 9 人形机器人在共融交互空间中开展人机协同操作

2.6 人形机器人的操作系统与工具链

人形机器人的操作系统承担着协调各类软硬件模块，以保证机器人运行、实现各种复杂功能和支持各类传感器、执行器、算法、与其他设备无缝集成的重要作用^[21, 116-117]。人形机器人软硬件类型与通信架构复杂，操作系统需要具有内外部传感设备数据互联、多设备多终端连接与分布式协同、模块化解耦、分布式软总线、安全可信等特征^[118]。人形机器人操作系统需要更加智能化、模块化、可定制化，以支持复杂的感知、决策和执行任务^[23, 119]。随着人形机器人硬件系统控制复杂度的增加以及软件系统彼此间强耦合、紧密集成的发展趋势，人形机器人相应的操作系统生态繁荣度将成为未来发展的重要核心竞争力之一(图 10^[120-121])。操作系统不仅需要高效协调软硬件的复杂交互，还必须具备支持多任务实时处理、模块化升级和多设备协同的能力，以适应日益复杂的机器人应用场景和任务需求。

作为人形机器人工具链的重要一环，虚拟仿真平台是利用计算机技术模拟真实机器人工作环境和行为的系统。其设计目的在于提供一个安全、可控、可重复的实验环境，用于机器人的设计验证、算法测试、操作培训以及故障排查等^[122]。该系统以物理系统为对象，根据物理规律建立数学模型，通过模拟、仿真等方法得到系统行为的预测、分析等结果，其关键在于实现物理空间与虚拟空间的仿真映射和训练交互。

近期，NVIDIA 公司推出的通用人形机器人仿真训练平台，结合了多种先进的人工智能技术和硬件支持^[98]。平台实现对机器人操作系统 ROS 的兼容，以提供标准化的机器人开发工具，开发者可以在虚拟环境中测试和训练机器人。同时，利用仿真环境中强大的算力来处理复杂的算法和实时数据分析，优化机器人的学习和决策能力，旨在为人形机器人开发者提供一个强大的基础框架，以便更快地创建灵活、智能且能与现实世界有效交互的人形机器人^[123]。目前，已有波士顿动力、字节跳动、Field AI 等企业基于该仿真训练平台对自己的人形机器人模型进行了训练(图 11^[124-126])，不仅验证了平台的强大潜力，也为未来人工智能驱动的人形机器人技术发展奠定了坚实的基础。通过仿真训练平台等工具链，人工智能与人形机器人技术的融合将得到进一步深化，有望开启智能人形机器人的新时代。

最近，虚实融合仿真平台也正在成为一个重要的发展方向。通过结合实际场景的实测数据，该平台可以不断修正人形机器人的数字孪生虚拟仿真模型，有效提升仿真精度，缩短研发周期，并大幅降低研发成本。该平台可以在模拟环境中进行反复训练与优化，再通过与实际机器人的反馈进行对接，逐步完善训练过程。通过这种方式，进一步减少了从仿真到实际测试之间的差距，技术迁移成本得到



图 10 搭载国产操作系统的机器人^[120-121]

控制, 大大提升研发效率。



图 11 大规模仿真并行训练平台^[124-126]

遥控操作技术作为人形机器人的另一项重要功能, 能够实现远程操控与实时反馈, 使得人形机器人在复杂或危险环境中执行任务时, 可以通过远程人员的操作来保证安全性与任务完成度。通过增强操作系统与遥控操作系统的集成, 人形机器人能够更加灵活地响应远程指令, 并进行实时调整与反馈, 进一步提升机器人在特定环境下的适应能力与可靠性。

人形机器人训练数据集的构建直接影响到机器人模型的学习效果和性能表现。人形机器人训练数据集的构建需要明确目标和需求、采集多样化数据、进行预处理和标注、构建高质量数据集, 并注意数据质量、隐私保护和合规性等问题^[122]。通过严谨的数据集构建流程, 机器人能够更好地适应复杂的现实环境, 从而在学习过程中获得更强的自主能力和性能提升。

此外, 人形机器人结合自身功能而开发出的功能性应用软件, 也是人形机器人工具链不可或缺的部分, 如产品设计、编程与可视化、运行状态交互显示软件等与机器人设计迭代相关的开发型应用软件, 人机对话、表情模拟等^[127]与应用场景结合的服务型应用软件。随着人工智能技术的不断发展, 人形机器人应用软件开发也将不断演进和创新, 以适应更加复杂和多样化的应用场景。

3 人形机器人的典型应用

基于人形机器人的结构特点, 人形机器人有望率先在特种领域实现对人类的替代, 在工业领域实现示范应用, 并将于成熟度较高后融入家庭与医疗等服务行业, 在民生领域实现大规模应用^[25]。

3.1 人形机器人在特殊服役环境领域的典型应用

人形机器人在国防军工、应急救援、危险场景巡检等特殊服役环境中的典型应用(图 12^[128-130]), 展

现了其在高风险、恶劣或复杂环境中的重要价值。相较于传统轮式或履带式机器人, 人形机器人凭借类人的结构设计、高自由度的运动能力以及灵活的末端操作功能, 能够执行其他机器人难以完成的任务, 在高度动态化和非结构化场景中具备明显优势。

在国防军工领域, 人形机器人可执行如拆弹、战场勘察和装备维修等高度危险的任务。由于其双足行走能力, 机器人可以在复杂地形中移动, 进入人类难以到达的危险区域, 降低了士兵暴露于高风险环境的。例如, 配备机械臂和精密工具的机器人能够在狭小空间内进行爆炸物拆解, 并处理高风险设备, 显著提高了任务的安全性和成功率。在边防巡逻和安全执勤等任务中, 人形机器人通过集成多模态传感器和实时环境感知系统, 可实现复杂地形下的自主移动和威胁检测。例如, 配备热成像和激光雷达的某型人形机器人能够在昼夜条件下实现 100 m 范围内的入侵目标探测, 检测精度高达 95%。借助其双足步态控制技术, 机器人可以在崎岖地形中保持稳定移动, 并通过实时路径规划系统, 减少 30% 的能源消耗。

在灾害救援场景中, 人形机器人因其灵活的类人运动能力和高度适应性的末端执行器, 能够进入狭窄或不稳定的空间完成探测和救援任务。机器人通过搭载热成像传感器和气体检测模块, 能够以 0.1 米的探测精度定位地震废墟中的幸存者, 并对环境中有毒气体的泄漏浓度进行实时分析。在负载能力方面, 人形机器人具备携带 30~50 kg 救援物资的能力, 能够深入灾区递送医疗设备或紧急物资。此外, 其多自由度机械臂可以完成医疗器械的精准操作, 如精确到 $\pm 1 \text{ mm}$ 的注射设备安装或复杂医疗仪器的调试, 有效提升救援效率。

在危险场景巡检任务中, 人形机器人能够模仿人类的行动方式进行自主巡逻。凭借其类人体形态, 这些机器人能够通过门、楼梯、废墟等复杂地形进行移动, 在狭窄或动态物体密集的环境中保持灵活性。同时, 人形机器人装备的高清摄像头、热成像仪和多种传感器可以实时采集数据, 识别异常活动并立刻反馈给云端指挥中心。尤其是在核电站、化工厂等高风险场所中, 人形机器人不仅可以替代人类进行连续工作, 还能够通过其类人感知系统, 实时监测周围环境的变化, 并对异常情况做出反应。例如, 机器人可以通过检测空气质量、温度变化等信息, 提前预警潜在危险, 确保工作场所的安全。同时, 其灵活的上肢设计支持简单的危险品排查和

现场障碍物清理，有效减少人员暴露在危险中的风险。



图 12 特殊环境服役的人形机器人^[128-130]

随着人工智能、大模型与多模态融合技术的不断发展，人形机器人在特殊服役环境中的应用场景将进一步扩展。例如，未来的智能边防机器人可集成更多传感器，用于复杂地形的全自主巡逻；应急救援机器人将进一步优化其自主决策和多机协作能力，从而在重大灾害中快速完成任务分配与行动。此外，随着材料科学的进步，未来人形机器人在高温、高压、强辐射等极端环境中的性能将得到进一步提升，成为特殊服役任务的不可或缺力量。

3.2 人形机器人在智能制造领域的典型应用

人形机器人在智能制造领域的应用展现出独特的优势^[131-133]，尤其是在高度自动化和复杂操作任务中发挥了关键作用。相比传统的工业机器人，人形机器人由于其双足行走能力和灵活的关节设计，能够在以人为中心设计的生产车间内自由穿梭，适应各种狭小空间、复杂地形和动态变化的生产环境。这使得其可以在人类难以长期操作的环境中接替繁重或危险的任务，真正实现智能制造中“人机协作”的理念。

人形机器人还具备通过模仿和学习人类技能来提升操作效率的潜力。通过深度学习算法和传感器融合技术，其能够观察和模仿人类操作员的动作，逐步掌握专业技能，如在焊接中，传统机器人虽然可以胜任，但人形机器人通过仿真模拟和实时调整，不仅能提升操作的精准度，还可以在面对复杂工件或环境变化时保持高效稳定的工作状态。此外，人形机器人能够应对高温、高压等恶劣的工作环境，在保障生产效率的同时，显著提高了操作的安全性，减少了因人为操作错误带来的风险。在人形机器人执行装配任务时，人形机器人通过其灵活的移动能力，能够有效地适应生产线上不断变化的作业需求，

不仅能处理细小部件，还能在车间内快速移动到不同的工作站，进行高效的自动化操作。

在汽车制造领域，人形机器人凭借其出色的灵活移动性，以及对产线灵活变化的卓越适应能力，在这一领域的应用尤为引人注目。无论是在狭窄的装配线之间移动，还是在动态变化的生产线上适应不同的工件与操作流程，人形机器人都表现出极强的适应性和自主性(图 13)。例如，优必选的人形机器人被设计用于完成基础但对灵活操作要求极高的任务，如螺栓拧紧、零件安装和零件转运等，并与东风柳汽、吉利汽车等汽车企业签署合作协议，共同推动人形机器人落地应用^[134]；宇树科技的人形机器人也在 2024 年进入了工厂^[135]，在蔚来汽车工厂进行自动拣料配送工作。人形机器人不仅能够提高生产线的灵活性，还能够通过其类人的结构特点，快速适应不同的工作场景，尤其是在多任务处理和动态变化的环境中，展现出独特的优势。



(a) 优必选人形机器人^[134] (b) 宇树人形机器人^[135]

图 13 人形机器人用于汽车装配生产线

人形机器人在智能制造领域的应用优势显著，特别是在复杂操作与高度自动化任务中，其双足行走能力、灵活关节设计及模仿学习能力使“人机协作”理念得以真正实现。随着人工智能与机器人技术的不断进步，人形机器人将在智能制造中扮演越来越重要的角色，进一步推动生产线向更高的自动化、智能化水平迈进。然而，人形机器人在某些特定任务上的精度与效率仍有提升空间，且成本控制与大规模应用仍需进一步探索。

3.3 人形机器人在家庭及社会服务领域的应用

在家庭生活中，人形机器人的应用同样令人期待，它们有望提升日常生活的便利性和品质(图 14^[136])。人形机器人未来不仅能帮助家庭成员完成清洁卫生、烹饪食物等家务，还可 在生活服务领域发挥重要作用，如引导、送餐、清理等。在面对独居老人或儿童时，人形机器人还提供了情感上的陪伴和交流，帮助缓解孤独感，增强家庭成员间的情感联系。特别是在老龄化和少子化加剧的社会背景下，越来越多的家庭开始依赖人形机器人来满足日常生活需求，通过与老人的互动，为他们的生活带来了新的体验和便

利。例如,腾讯最新推出的助老机器人,结合了轮腿复合式设计,兼具轮式机器人的快速移动与人形机器人的灵活性。这种创新设计使机器人能够轻松应对家庭环境中的多样挑战,显著提升了机器人在家庭场景中的适应性与功能性。通过这些技术创新,家庭机器人将进一步融入日常生活,满足用户多层次的需求,尤其是在老人照护、日常活动辅助等方面带来更多便利。



图 14 用于家庭服务的人形机器人^[136]

在人形机器人应用的进一步扩展中,服务业因需求多样化、环境复杂多变、高度交互性等特点,有望成为其另一个重要的示范应用领域^[137]。在零售和酒店行业,人形机器人通过提供信息咨询、导览服务,甚至处理简单的交易,能够显著提升顾客的体验和服务效率。此外,通过自然语言处理和机器学习技术的支持,人形机器人有望与人类进行个性化和富有情感的交流,使服务更贴近顾客需求。在餐厅、咖啡馆等场所,人形机器人未来有望执行点到点送餐和不间断保洁等工作,进一步提高了服务的自动化程度和标准化水平。多家科技公司正在推动这一领域的创新发展,推出的新型人形机器人凭借其高灵活性和智能化设计,为服务行业的自动化注入了新的动力,标志着服务行业机器人应用的广阔前景。图 15 展示的是 Tesla 于近期发布会中最新展示的人形机器人融入社会服务的场景^[138]。通过持续技术创新,服务业正逐步成为人形机器人技术展示的重要平台。



图 15 人形机器人用于社会服务^[138]

在医疗健康和教育培训领域,人形机器人也展现出巨大潜力(图 16)。在医疗健康方面,人形机器人可以通过模仿人类的动作,帮助患者进行康复训练,如肢体功能的恢复训练和步态矫正等^[139]。它们能够根据患者的康复进度实时调整训练方案,提高康复的效率。在教育培训方面,人形机器人能够作为智能教学助手,参与实验操作的演示,或者作为互动式学习平台,提供更加生动有趣的学习体验^[140]。例如,机器人可以模拟实际操作,帮助学生掌握复杂的实验技能,同时根据学习者的进度调整教学节奏,提升学习效果。总体而言,人形机器人在家庭及社会服务中的应用,不仅在提升人类生活质量和生活水平上发挥了重要作用,还顺应了社会服务升级的趋势。在应对当前老龄化、少子化挑战的过程中,人形机器人未来有望成为不可或缺的新质生产力,推动整个社会向更加智能化和人性化的方向发展。



(a) 人形机器人辅助康复训练^[139] (b) 人形机器人教育实训平台^[140]

图 16 人形机器人用于医疗健康和教育培训领域

人形机器人在特殊服役环境、智能制造以及家庭与社会服务领域展现了显著的应用特征和优势前景。诚然,当前人形机器人在应用领域发布的场景实践大多为示范性验证,暂未实现大规模的应用推广。当前应用仍面临技术上的挑战,如续航能力、复杂环境下的操作精度、高成本等问题需要进一步攻克。随着技术的不断进步和成本的降低,人形机器人有望在这些领域中发挥更为广泛和深入的作用,推动社会服务的智能化进程。

综合而言,人形机器人由于更多的关节自由度和更为复杂的整体结构,通常导致其运行效率和精度相对较低。因此,人形机器人更适合处理复杂或多样的工作任务,而对于需要高效完成的简单重复工作,使用人形机器人未必是最佳选择。另外,人形机器人的设计总体基于人类身体特征,运动特性与人类相似,外观特性也让用户更感亲近。因此,人形机器人更擅长在人类工作生活的环境中辅助或替代人类工作,特别是在需要与人类互动的任务中表现出色^[25]。

4 挑战与难点

4.1 人形机器人整机软硬件需加强协同化创新设计

整机软硬件协同化创新设计是人形机器人研发过程中从设计之初就必须重点考虑的问题。它不仅涉及到系统性能的全面优化,还决定了后续各项功能的协调实现。首先,硬件与软件之间的高度耦合性要求在设计初期即考虑系统的整体性能,然而这一过程往往需要跨领域的知识整合,涉及机械工程、电子工程、计算机科学等多个学科,使得设计复杂性大幅增加。其次,实时性与计算资源的限制也是难点之一。人形机器人系统在复杂任务中的表现,往往取决于软硬件在执行任务时的紧密协作,以及如何在设计阶段优化各模块之间的通信与资源分配。实现这一目标的难度在于系统需要实时处理大量传感器数据并及时反馈,尤其在面对复杂的操作环境时,如何在有限的硬件条件下实现高效的计算和控制是一个关键挑战。

此外,软硬件的模块化、标准化设计与接口的兼容性、规范性也是设计中的一大难点。模块化、标准化的设计有助于提高系统的可扩展性和灵活性,但这也会增加接口的复杂度或限制接口的扩展功能,从而影响系统的整体性能与响应速度。如何在保证模块化的灵活性同时简化接口设计,是未来需要重点突破的领域。

随着人工智能技术的引入,软硬件协同设计也正在面临新的需求。如何在设计中有效利用人工智能技术,特别是在实时计算、感知与控制中的应用,将是未来提升机器人智能化水平的重要方向。从设计阶段结合人工智能技术的应用需求优化软硬件架构,能够大幅提升人形机器人在动态任务中的自主适应性和灵活性。赋予系统更大的冗余设计不仅有助于机器人在复杂场景中的应对能力,也为后续的迭代升级提供了更多的灵活空间。

4.2 复杂任务尚需高精度环境感知与多模态融合

人形机器人所处的工作环境充满未知性和复杂性,感知与理解能力的提升是其面临的关键挑战之一。目前,机器人多采用有限角度的二自由度云台进行主动视觉感知,这种设计限制了其观察范围和对动态环境的适应能力。为解决这一问题,新的视觉感知系统正在朝着多模态方向发展。通过更灵活的头部设计,结合广角摄像头和激光雷达等传感器,机器人能够在非结构化环境中更高效地进行移动和

导航,精准感知环境变化,从而应对复杂任务。

人形机器人需要具备综合的感知能力,但现有的传感器技术仅限于单一物理量的检测,难以提供全面的环境信息。为此,新型仿生高集成度传感器的研发逐渐成为研究重点。这类传感器不仅能感知接触,还能感知温度、压力和纹理等多个物理量的信息,类似于人类皮肤的多重感知能力。这些创新使得机器人在执行任务时能够更好地应对不确定的环境变量,并在有限的硬件条件下拓展其多模态感知能力。

人形机器人在具身智能背景下的环境感知需解决感知-决策-执行闭环的实时性与精确性问题。在复杂动态环境中,机器人必须能够实时处理视觉、力觉和触觉等多模态数据,并结合环境变化动态调整决策。例如,通过视觉系统与力觉传感器的数据融合,机器人可以在非结构化环境中识别障碍物并快速调整路径。然而,多模态数据融合的实时性仍是研究难点,目前主流方法的决策延迟通常在200~300 ms,低于100 ms的延迟要求尚未全面实现。未来的研究需进一步提升算法优化与算力支持,以满足实时感知与高鲁棒性的需求。

在具备丰富感知信息的基础上,如何有效融合这些信息并进行智能化处理成为技术瓶颈。智能算法的发展对于多模态信息融合至关重要。当前,基于深度学习和强化学习的算法正在提升机器人对多种感知信息的处理能力,特别是在复杂环境下的决策能力。但实现感知与决策的同步性、实时性以及节省计算资源仍是重大挑战。因此,未来需要更高效的多模态融合算法来应对高动态、复杂的环境,确保机器人能够快速理解并做出合理的响应,提升其在复杂任务中的表现。

4.3 强思维链高泛化性具身智能仍处在起步阶段

人形机器人在具身智能的实现过程中,面临诸多技术挑战,尤其在强思维链和高泛化性方面。多模态感知与融合被认为是提升机器人感知能力的关键,但当前的技术在处理视觉、听觉、触觉等多感官信息时,往往受限于实时性和融合精度^[141]。这导致机器人在复杂和动态环境下,难以同步处理多种感知数据,直接影响决策速度和准确性。此外,传感器数据的复杂性和硬件计算能力的限制,使得多模态融合的效率难以满足实时处理的需求。

环境理解与建模同样是具身智能中的核心难题。尽管现有技术在静态环境中的建模表现较好,但在高度动态和不确定性环境下,机器人仍然难以

进行实时准确的环境建模。对于复杂环境中的数据, 机器人通常无法及时更新物理模型, 导致其对环境的响应迟滞和适应性差^[142]。这种建模滞后在复杂的交互场景中尤为明显, 限制了机器人的灵活性和执行力。另外, 在环境理解与建模过程中, 如何形成高质量的人形机器人感知与操作数据集, 并根据真实环境的物理规律对数据集进行泛化, 也是目前环境理解与建模方面衍生出的关键问题。

在实现环境感知、理解并建模后, 机器人需要及时、准确地根据环境交互信息做出决策和行为规划, 尤其是将机器人置于未知环境中如何进行高效的探索任务, 这是目前具身智能研究领域的热点与难点。具身智能背景下的灵巧操作需要机器人结合多模态信息完成高精度任务, 如抓取、组装等操作, 这对实时性与鲁棒性提出了更高要求。研究显示, 现有灵巧手的操作稳定性在非标任务中仍不及预期, 这需要进一步发展柔性控制技术与任务优化算法。在未知环境中, 机器人需要高效的处理复杂高动态环境数据信息, 并及时针对感知到的环境信息进行准确分析与快速决策, 力求最快完成探索任务^[143], 高泛化性能能够保证机器人在各种环境下均能做出正确的决策, 强大的思维链为机器人大幅提高决策速度。因此, 提升人形机器人在多模态融合、动态环境建模以及泛化决策能力方面的技术水平, 是当前具身智能领域亟需解决的核心难题之一。

4.4 动力系统的驱动高效性与续航持久性未达需求

根据人形机器人在不同应用场景下的需求, 其对动力系统和续航能力提出了更高要求。为了满足这些要求, 当前主要通过采用高效率低能耗的电机以及轻量化设计来提升动力系统的驱动效率和续航能力。然而, 现有电池技术的进展较慢, 尤其在能量密度和充电效率方面仍有明显限制, 难以完全满足人形机器人更高效驱动和更长续航的需求^[144]。平稳步态控制需要同时兼顾动态平衡与能效优化, 特别是在复杂任务中如何实现实时稳定控制仍是关键科学问题。近年来, 基于深度学习的步态控制模型能够预测潜在失稳风险并优化步态模式, 但在自适应能力和计算效率上仍有提升空间。因此, 进一步提升动力系统性能, 关键在于合理选择先进的智能控制算法和建立有效的能源管理系统。例如, 通过先进算法实现能耗的动态调节、能量回收机制和智能能耗模式的切换。这些改进将显著提升机器人动力系统的驱动效率, 实现精准控制和高效运动, 同时减少不必要的能耗, 确保在复杂任务场景中有充

足的能量支持^[145-147]。

电池材料的革新也是人形机器人动力系统升级的关键挑战之一。基于新型材料的电池可有效提高能量密度, 延长电池寿命, 降低温度影响, 从而增强电池集成到人形机器人系统后在高负荷环境中的表现。此外, 电池管理技术的进一步优化、智能能耗控制模式切换、能量回收机制设计及外部能源补充方案等, 也是当前人形机器人续航能力进一步提升的难点。通过这些技术的结合, 人形机器人将能够在更长时间内高效执行任务, 拓展其应用场景。随着这些技术的不断创新与进步, 人形机器人将展现出更加优异的性能和广泛的应用潜力, 助力其在未来场景中实现更加智能化的应用。

4.5 人形机器人的标准规范与安全保障体系亟需加强

人形机器人的标准规范与安全保障是确保人形机器人技术健康、可持续发展的关键, 也是提升跨领域技术研发效率的重要基础。通过完善标准规范体系、建立合规合理的监管机制和评估体系, 可不断提升人形机器人的安全性和可靠性, 以确保人形机器人在相关应用领域中发挥积极的作用。相关技术标准包括外观设计、运动系统、感知系统、控制系统以及能源系统的设计, 确保机器人能够准确稳定地执行目标任务^[148-149]。性能测试标准包括对人形机器人的运动性能、感知性能、运算性能、续航能力等进行测试以满足标准要求, 确保人形机器人能够准确感知和理解周围环境, 在各种环境下均能高效完成任务。安全标准包括对物理安全、数据安全、操作安全、电磁兼容性等方面进行测试, 确保人形机器人在操作过程中的安全性, 防止人形机器人对人员或环境可能造成的伤害^[150-151]。

此外, 人形机器人的技术标准、性能测试标准与安全标准, 因其具体应用领域和设计目标的不同而有所差异。因此, 在具体应用中需要根据实际情况制定相应的标准和测试方法。同时, 随着具身智能、新材料、微电子、新型传感器等新兴技术的不断进步和应用场景的不断拓展, 人形机器人的技术标准与性能测试标准也将不断更新和完善。滞后性的标准规范可能会抑制技术的灵活性和创新性, 限制了人形机器人技术的发展空间。为了确保创新技术能够持续突破, 标准体系需要在保障安全有序的前提下, 给予技术研发和实验足够的灵活性和适应性, 为未来技术的创新留出充足的空间。

5 未来发展趋势

5.1 具身智能赋能通用人工智能与人形机器人的深度融合

具身智能强调智能实体与其物理身体和环境之间的互动关系，是实现通用人工智能的关键之一。融入了通用人工智能的人形机器人，将被赋予强大的环境交互能力、适应性与灵活性^[152]，有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品。现阶段人形机器人的具身智能处于大语言模型为主，推动机器人算法开发范式的升级。但目前大语言模型尚无法完全参与机器人的运动规划与控制，因此搭载该技术的人形机器人依旧处于初级阶段^[153]。大语言模型改变了原有机器人与人类之间的交互方式，推动了人形机器人的智能化转型。未来，基于大语言模型的机器人智能交互将逐渐向以视觉-语言-动作模型为主的多模态交互方式过渡^[154]，让人形机器人具备高度泛化能力和思维链能力，通过视觉、语音决策以实现人形机器人的运动控制和交互，逐步迭代达到具身智能的高级形态。

具身智能通过强调物理实体与环境的紧密交互，为通用人工智能在机器人中的应用提供了坚实的基础。随着人工智能和硬件技术的不断发展，人形机器人正在实现更高层次的感知与决策能力。英伟达和英特尔等硬件厂商提供的高性能计算平台，使大规模人工智能模型能够更有效地支持机器人感知、规划与自主决策。而以 OpenAI、Google 为代表的算法研发公司通过多模态大模型的应用，推动了具身智能与人形机器人之间的深度融合。这一融合赋予机器人更强的环境交互能力和泛化性，使其能够在复杂动态场景中自适应地完成任务。例如，基于具身智能的人形机器人可以通过多模态大模型集成视觉、触觉等多种感知信息，提升机器人在真实环境中的灵活性与适应性。

未来具身智能将根据通用性任务与专用性技能进行细分，以助力人形机器人在更广泛场景和更专业技能方面的技术升级。通过具身智能与大模型技术的进一步发展，人形机器人将在智能决策、自主操作与人机交互等方面实现深层次的突破，技术的快速迭代也将助力其更广泛的场景应用，推动人形机器人从实验室走向日常生活和工作场所。

5.2 端到端多模态大模型提升人形机器人的自主操作技能

人形机器人自主操作是学界与产业界共同的愿

景。目前的人形机器人自主操作能力仍处于起步阶段，对于原始数据的处理、多模信息的融合、信息的推断决策能力、长程运动调度与事件处理能力等方面仍存在较大欠缺，相关关键核心技术还在加快攻克之中。目前逐步兴起的端到端模型可主动进行表示学习，减少了对人工的依赖。未来的端到端大模型将以通用大模型和垂直大模型两种发展路线并行迭代。通用大模型更加专注于全场景处理能力，通过扩大模型规模和增强跨场景迁移能力，使人形机器人在多任务、多场景中具备更广泛的适应性，更加适合于教育、服务等非结构化场景；垂直大模型则专注于定制化训练与优化，具备更深层的推理决策能力，提升机器人在特定专业技能中的精度和效率，并依赖多模态数据融合实现更智能的任务执行，在工业制造、特种应用方面效果更佳。

此外，目前人工智能模型逐步向多模态、大型化方向发展，近年推出的大语言模型如 ChatGPT、讯飞星火等产生了推理能力、理解能力的涌现^[155]，多模态大语言模型更能综合处理视觉、语义等多类型信息。未来的人形机器人将不再依赖单一的感知或控制模式，而是能够通过大模型实现全流程的智能决策，从感知到运动控制的所有环节实现高度智能化。

5.3 大规模仿真训练平台助力人形机器人高效迭代

近年来，随着人形机器人技术的不断发展，其产品结构与功能模块也更加复杂，其设计制造的开发链条也进一步延长，为实现机器人的高效开发与快速迭代，仿真平台的重要性日益凸显，尤其是支持物理模拟与大规模数据并行训练的系统，能够大幅加速人形机器人的研发进程并提升其性能表现。仿真训练平台不仅能支持开发人员验证人形机器人结构与控制算法，也能支持强化学习等智能算法模型在仿真环境中进行大规模训练。较早的机器人仿真训练平台包括 Gazebo、PyBullet、MuJoCo 等，但其核心物理保真度、渲染真实度均处于较低水平。瑞士 ETHZ 开发的 RaiSim，美国 NVIDIA 开发的 Isaac Sim^[123]等推出了更强大的功能，支持人形机器人开发者从物理模拟正确的仿真传感器中生成大规模训练数据集，从而更好训练基于深度学习、强化学习等现代人工智能技术的感知模型。仿真中生成的数据已经可以近似现实数据，最大优势是可提供在现实世界中通常难以收集的数据^[126]。虚实融合仿真平台也正在成为新趋势，通过结合实际场地数据，不断修正仿真模型，提升仿真精度并缩短研发周期。这种平台能够模拟现实中难以收集的数据，帮助机

器人更好地适应复杂环境。与传统仿真平台相比, 虚实融合的优势在于其提供的高保真度数据, 使得机器人在实际环境中的表现更加可靠。随着仿真训练平台的进一步发展, 人形机器人的开发迭代将更加迅速, 并有望突破性能极限。

5.4 算力算法升级推动人形机器人技术快速融合创新发展

随着人工智能算法模型不断发展, 其在机器人控制中占据了越来越重要的地位, 但人形机器人面临的非结构环境下的复杂任务问题却对人工智能模型提出了高算力挑战。尤其随着大模型的到来, 十亿乃至百亿级参数量的模型不断推出, 在大规模参数与预训练的作用下, 大模型表现出了令人震撼的智能涌现能力, 但目前, 大模型的能力仍局限于文本生成、图片生成、对话交流等领域, 如何将大模型的能力迁移到人形机器人以完成现实世界的复杂任务与交互操作是亟需深入研究的关键科学问题。此外, 各类模型算法的表现性能依赖高水平的算力平台, 这限制了其在机器人上的应用。但随着更多高性能的算力平台不断涌现, 如 NVIDIA 推出的 A 系列与 H 系列高性能显卡, 以及定制化的人形机器人算力平台, 使得计算机能够在真实物理条件下同时对数千个人形机器人模型进行三维环境模拟^[126], 进一步加快大模型与人形机器人结合落地。

此外, 更多的融合创新也因算力算法升级而不断涌现, 如新一代通信技术、云-边计算、新能源、新材料、人因工程、脑机接口、数字孪生等技术在人形机器人上部署应用, 极大提高了人形机器人的性能边界。

5.5 人机环共融与安全伦理逐步规范, 构建人机智新范式

人形机器人未来有望在社会各个领域开展日益广泛的应用, 确保人类、机器人和环境之间的和谐共存成为了关键问题之一。为了实现这一目标, 人形机器人安全性和伦理规范的设计正逐步在技术层面、制度层面以及社会层面进行全面提升, 探索建立面向“人本智造”的人机智融新范式。在安全性方面, 机器人制造商和研究机构正持续优化关键技术, 确保人形机器人在与人类进行复杂交互时具备高度的安全性。传感器技术和人工智能算法的快速发展, 使得机器人能够更加精准地感知和预测周围环境中的潜在风险, 并实时调整其行为以防止对人类和环境造成任何伤害。例如, 力控算法的进步结合柔性执行器的应用, 使得机器人在与人类的物理交互中具备更加柔顺的运动表现, 避免了因误动作

而导致的冲击和摩擦。这种技术的发展不仅提升了机器人的安全性, 还推动了人机共融的进一步实现。在伦理方面, 随着人形机器人逐步承担更多社会角色, 关于决策权的分配、责任划分以及隐私保护等问题正在引发更为广泛的讨论。各国政府、国际组织以及学术界已经意识到这些问题的重要性, 并在积极制定和推广相关的标准、伦理规范和法律框架, 确保人形机器人在各个应用场景中的行为符合伦理道德标准。在社会层面, 人机智融意味着不仅要在技术上实现机器人与人类的协同工作, 还要在伦理和制度上确保机器人行为的可控性和透明性。

通过安全与伦理体系的不断完善, 人形机器人将在未来更加顺利地融入人类社会, 实现与人类的安全共处和协同工作。随着技术的不断发展与社会对机器人的认知进一步提升, “人本智造”与“人机智融”的理念将为人形机器人提供坚实的发展基础, 推动社会的可持续创新与进步。

6 结论

人形机器人作为一种具有广泛应用前景的智能体, 其发展历程展现了技术进步与应用需求的相互推动。尽管在核心零部件、环境感知与场景理解、灵巧操作、步态控制、人机协同与共融等方面已得显著进展, 但仍面临软硬件协同设计、高精度感知与多模态融合、高泛化性具身智能、高效动力系统等难点和挑战。未来, 人形机器人的发展将依赖于具身智能与通用人工智能的深度融合、大规模仿真训练平台的支持, 推动自主操作技能的提升。此外, 标准规范与安全保障仍需进一步加强, 以确保人形机器人在社会的广泛应用中实现安全与伦理的平衡。

目前恰逢我国工业转型期, 诸多高端应用场景不断涌现, 如能以场景和任务为核心, 以研用结合为动力, 以跨领域技术融合为手段, 开展人形机器人的高效应用迭代与前瞻性开发, 将能够有效提升我国人形机器人相关领域的技术水平和产业化能力, 并成为新质生产力的典型代表, 为各行业进步与经济高质量发展做出实质性贡献。

参考文献

- [1] ADAMS B, BREAZEAL C, BROOKS R A, et al. Humanoid robots: A new kind of tool[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2000, 15(4): 25-31.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 人形机器人创新发

- 展指导意见[A/OL]. (2023-11-02)[2024-09-20]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwk/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html. Ministry of Industry and Information Technology of China.
- Guidance for innovative development of humanoid robots[A/OL]. (2023-11-02)[2024-09-20]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwk/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html.
- [3] CAPOLEI M C, ANDERSEN N A, LUND H H, et al. A cerebellar internal models control architecture for online sensorimotor adaptation of a humanoid robot acting in a dynamic environment[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 5(1): 80-87.
- [4] STASSE O, FLAYOLS T. An overview of humanoid robots technologies[J]. Biomechanics of Anthropomorphic Systems, 2019: 281-310.
- [5] WANG D, SHARMA A. Research on target recognition and mobile job control of humanoid robot based on km34z256 for industrial applications[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2021, 14(2): 303-319.
- [6] YAM K C, BIGMAN Y, GRAY K. Reducing the uncanny valley by dehumanizing humanoid robots[J]. Computers in Human Behavior, 2021, 125: 106945.
- [7] ZHANG H, LI Y, ZHANG S, et al. Artificial intelligence-enhanced digital twin systems engineering towards the industrial metaverse in the era of industry 5.0[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 40.
- [8] MASUYA K, AYUSAWA K. A review of state estimation of humanoid robot targeting the center of mass, base kinematics, and external wrench[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(21-22): 1380-1389.
- [9] AJOUDANI A, ZANCHETTIN A M, IVALDI S, et al. Progress and prospects of the human–robot collaboration[J]. Autonomous robots, 2018, 42: 957-975.
- [10] BEER J M, FISK A D, ROGERS W A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2014, 3(2): 74.
- [11] HASHIMOTO K. Mechanics of humanoid robot[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(21-22): 1390-1397.
- [12] LIU C, ZHANG T, ZHANG C, et al. Foot placement compensator design for humanoid walking based on discrete control lyapunov function[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 51(4): 2332-2341.
- [13] ALMEIDA L, SANTOS V, FERREIRA J. Enhancement of humanoid robot locomotion on slippery floors using an adaptive controller[J]. Robotica, 2024, 42(4): 1055-1073.
- [14] YU J, ZHANG S, WANG A, et al. Humanoid control of lower limb exoskeleton robot based on human gait data with sliding mode neural network[J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2022, 7(4): 606-616.
- [15] JÁNOŠ R, SUKOP M, SEMJON J, et al. Stability and dynamic walk control of humanoid robot for robot soccer player[J]. Machines, 2022, 10(6): 463.
- [16] ZHONG Q, LI Y, ZHENG C, et al. Humanoid robot cooperative motion control based on optimal parameterization[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2021, 15: 699820.
- [17] ZHOU L, LI T, LIU Z, et al. An efficient gait-generating method for electrical quadruped robot based on humanoid power planning approach[J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18: 1463-1474.
- [18] ISHIGURO Y, MAKABE T, NAGAMATSU Y, et al. Bilateral humanoid teleoperation system using whole-body exoskeleton cockpit tablis[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6419-6426.
- [19] ZHANG H, LIU L Z, XIE H, et al. Deep learning-based robot vision: High-end tools for smart manufacturing[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2022, 25(2): 27-35.
- [20] OBAIGBENAA A, LOTTU O A, UGWUANYI E D, et al. AI and human-robot interaction: A review of recent advances and challenges[J]. GSC Advanced Research and Reviews, 2024, 18(2): 321-330.
- [21] DARVISH K, PENCO L, RAMOS J, et al. Teleoperation of humanoid robots: A survey[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023, 39(3): 1706-1727.
- [22] KAHRAMAN C, DEVECI M, BOLTÜRK E, et al. Fuzzy controlled humanoid robots: A literature review[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 134: 103643.
- [23] SAEEDVAND S, JAFARI M, AGHDASI H S, et al. A comprehensive survey on humanoid robot development[J]. The Knowledge Engineering Review, 2019, 34: e20.
- [24] INSIGHTS F B. Humanoid robot market size, share and industry analysis[R/OL]. Beijing : Fortune Business Insights. (2024-10-07). <https://www.fortunebusinessinsights.com/zh/humanoid-robots-market-110188>.
- [25] 赛迪研究院. 2024 年中国人形机器人产业生态发展研究 [R/OL]. 北京 : 赛迪研究院 . (2024-04-26).

- [https://www.ccidgroup.com/info/1155/39693.htm.](https://www.ccidgroup.com/info/1155/39693.htm)
- Saidi Research Institute. 2024 Research on the ecological development of Chinese humanoid robot industry[R/OL]. Beijing : Saidi Research. (2024-04-26). [https://www.ccidgroup.com/info/1155/39693.htm.](https://www.ccidgroup.com/info/1155/39693.htm)
- [26] 深企投. 2024 年人形机器人行业研究报告[R/OL]. 深圳: 深企投产业研究院. (2024-05-06). <https://reportify-1252068037.cos.ap-beijing.myqcloud.com/media/producton/>.
- ShenZhen Investment. 2024 humanoid robot industry research report[R/OL]. Shenzhen: Shenzhen Investment Industry Research Institute. (2024-05-06). <https://reportify-1252068037.cos.ap-beijing.myqcloud.com/media/producton/>.
- [27] 吴伟国. 面向作业与人工智能的仿人机器人研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 1-19.
- WU Weiguo. Research progress of humanoid robots for mobile operation and artificial intelligence[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 1-19.
- [28] KATO I, OHTERU S, KOBAYASHI H, et al. Information-power machine with senses and limbs: Theory and practice of robots and manipulators[M]. Vienna: Springer Vienna, 1974: 11-24.
- [29] FERLAND F, LéTOURNEAU D, AUMONT A, et al. Natural interaction design of a humanoid robot[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2013, 1(2): 118-34.
- [30] MARKOFF J. Modest debut of atlas may foreshadow age of ‘robo sapiens’[EB/OL]. <https://www.nytimes.com/2013/07/12/science/modest-debut-of-atlas-may-foreshadow-age-of-robo-sapiens.html>.
- [31] HAUSER K, NG-THOW-HING V. Randomized multi-modal motion planning for a humanoid robot manipulation task[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(6): 678-98.
- [32] UBTECH. Humanoid service robot: Walk into the future[EB/OL]. <https://www.ubtrobot.com/en/humanoid/products/Walker>.
- [33] DYNAMICS B. Atlas gets an upgrade[EB/OL]. <https://youtu.be/27HkxMo6qK0>.
- [34] 杭州宇树科技有限公司. 宇树 h1 通用人形机器人 [EB/OL]. <https://www.unitree.com/operate/h1/>. Hangzhou Unitree Technology Co., Ltd. Yushu h1 universal humanoid robot[EB/OL]. (2024-09-21) [2024-09-21]. <https://www.unitree.com/operate/h1/>.
- [35] 小鹏资讯. 你好, 新鹏友[EB/OL]. <https://bbs.xiaopeng.com/article/2127779>.
- Xiaopeng Information. Hello, new friend[EB/OL]. (2024-09-20)[2024-09-20]. <https://bbs.xiaopeng.com/article/2127779>.
- [36] DYNAMICS B. An electric new era for atlas[EB/OL]. <https://bostondynamics.com/blog/electric-new-era-for-atlas/>.
- [37] 杨雪. 追觅科技发布人形机器人, 从 1.0 时代迈向 2.0 时代 [EB/OL]. (2023-03-29)[2024-09-20]. <https://new.qq.com/rain/a/20230329A01DUT00>. YANG Xue. Dreame releases humanoid robots, moving from 1.0 to 2.0[EB/OL]. (2023-03-29)[2024-09-20]. <https://new.qq.com/rain/a/20230329A01DUT00>.
- [38] KANEKO K, HARADA K, KANEHIRO F, et al. Humanoid robot HRP-3[C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2008: 2471-2478.
- [39] LOHMEIER S, BUSCHMANN T, ULRICH H. Humanoid robot LOLA[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009: 775-780.
- [40] GUIZZO E. By leaps and bounds: An exclusive look at how boston dynamics is redefining robot agility[J]. IEEE Spectrum, 2019, 56(12): 34-39.
- [41] EL HALABI M, TRENDLE O. Just name it: The act of naming humanoid service robots decreases perceived eeriness and increases repurchase intent[J]. Journal of Service Research, 2024: 10946705241248242.
- [42] SONG C S, KIM Y K. The role of the human-robot interaction in consumers’ acceptance of humanoid retail service robots[J]. Journal of Business Research, 2022, 146: 489-503.
- [43] SUN H, WEI C, YAO Y, et al. Analysis and experiment of a bioinspired multimode octopod robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 142.
- [44] MUZIO A F, MAXIMO M R, YONEYAMA T. Deep reinforcement learning for humanoid robot behaviors[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2022, 105(1): 12.
- [45] CHATTERJEE S, ZUNJANI F H, NANDI G C. Real-time object detection and recognition on low-compute humanoid robots using deep learning[C]//2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics. IEEE, 2020: 202-208.
- [46] CHIGNOLI M, KIM D, STANGER E, et al. The MIT humanoid robot: Design, motion planning, and control for acrobatic behaviors[C]//2020 IEEE-RAS 20th

- International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2021: 1-8.
- [47] EDSINGER A, WEBER J. Domo: A force sensing humanoid robot for manipulation research[C]//4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2004. IEEE, 2004, 1: 273-291.
- [48] TAKANO W, KANAYAMA H, TAKAHASHI T, et al. A data-driven approach to probabilistic impedance control for humanoid robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 124: 103353.
- [49] ARM P, WAIBEL G, PREISIG J, et al. Scientific exploration of challenging planetary analog environments with a team of legged robots[J]. Science Robotics, 2023, 8(80): eade9548.
- [50] 肖涛, 黄强, 杨洁, 等. 给定手部作业轨迹的仿人机器人推操作研究[J]. 机器人, 2008(5): 385-91. XIAO Tao, HUANG Qiang, YANG Jie, et al. Research on push operation of humanoid robot with given hand operation trajectory[J]. Robot, 2008(5): 385-91.
- [51] 张利格, 黄强, 杨洁, 等. 仿人机器人复杂动态动作设计及相似性研究[J]. 自动化学报, 2007(5): 522-528. ZHANG Lige, HUANG Qiang, YANG Jie, et al. Research on complex dynamic motion design and similarity of humanoid robot[J]. Acta Automation Sinica, 2007(5): 522-528.
- [52] 凌占一. 运动控制学机理在仿人机器人设计中的应用研究[J]. 铸造, 2022, 71(2): 248-249. LING Zhanyi. Research on the application of motion control mechanism in humanoid robot design[J]. Foundry, 2022, 71(2): 248-249.
- [53] 哈默纳科(上海)商贸有限公司. 哈默纳科谐波减速机 [EB/OL]. (2024-06-20)[2024-06-20]. <http://www.hamonake.com/?product4/>. Hamnako (Shanghai) Trading Co., Ltd. Hamnako harmonic reducer[EB/OL]. (2024-06-20)[2024-06-20]. <http://www.hamonake.com/?product4/>.
- [54] 苏州绿的谐波传动科技股份有限公司. 绿的谐波减速器_lcsg[EB/OL]. (2024-09-21)[2024-09-22]. <http://www.leaderdrive.cn/>. Suzhou Green Harmonic Drive Technology Co., Ltd. Green Harmonic Reducer_lcsg[EB/OL]. (2024-09-21)[2024-09-22]. <http://www.leaderdrive.cn/>.
- [55] KOLLMORGEN. Kollmorgen regal rexnord[EB/OL]. (2024-06-22)[2024-06-22]. <https://www.kollmorgen.cn/>.
- [56] 上海步科自动化股份有限公司. Fmc 无框力矩电机 [EB/OL]. (2024-06-30)[2024-06-30]. <https://www.kinco.cn/>. Shanghai Buke Automation Co., Ltd. Fmc frameless torque motor[EB/OL]. (2024-06-30)[2024-06-30]. <https://www.kinco.cn/>.
- [57] INTEL. 11th gen fanless industrial mini pc[EB/OL]. (2024-06-27)[2024-06-27]. https://ylipc.com/product/11thgen_fanless_industrial_mini_pc.
- [58] NVIDIA. Geforce rtx 4090[EB/OL]. (2024-06-21)[2024-06-21]. <https://www.nvidia.com/en-sg/geforce/graphics-cards/40-series/rtx-4090/>.
- [59] SCHUNK. Schunk-hand in hand for tomorrow[EB/OL]. (2024-06-29)[2024-06-29]. <https://schunk.com>.
- [60] 北京因时机器人科技有限公司. 因时机器人-更微小更精密的运动控制专家 [EB/OL]. (2024-06-29)[2024-06-29]. <https://www.inspire-robots.com>. Beijing Intime Robot Technology Co., Ltd. Intime Robot-smaller and more precise motion control expert[EB/OL]. (2024-06-29)[2024-06-29]. <https://www.inspire-robots.com>.
- [61] BRAUD R, GIAGKOS A, SHAW P, et al. Robot multimodal object perception and recognition: Synthetic maturation of sensorimotor learning in embodied systems[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2020, 13(2): 416-28.
- [62] ZHAO X, LUO Q, HAN B. Survey on robot multi-sensor information fusion technology[C]//2008 7th world congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2008: 5019-5023.
- [63] TAO Y, GAO H, WEN Y, et al. Glass recognition and map optimization method for mobile robot based on boundary guidance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 74.
- [64] BROOKS D J, LIGNOS C, FINUCANE C, et al. Make it so: Continuous, flexible natural language interaction with an autonomous robot[C]//AAAI Conference on Artificial Intelligence Workshop on Grounding Language for Physical Systems. 2012.
- [65] ABAD A C, RANASINGHE A. Visuotactile sensors with emphasis on gelsight sensor: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 7628-7638.
- [66] YUAN W, DONG S, ADELSON E H. Gelsight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2762.
- [67] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (e - skin): A brief history, design considerations, and recent

- progress[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 5997-6038.
- [68] ISHIDA H, WADA Y, MATSUKURA H. Chemical sensing in robotic applications: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(11): 3163-3173.
- [69] BAUZA M, BRONARS A, HOU Y, et al. Simple, a visuotactile method learned in simulation to precisely pick, localize, regrasp, and place objects[J]. *Science Robotics*, 2024, 9(91): eadi8808.
- [70] GOODMAN I R, MAHLER R P, NGUYEN H T. Mathematics of data fusion[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [71] PEERS S. A blackboard system approach to electromagnetic sensor data interpretation[J]. *Expert Systems*, 1998, 15(3): 197-215.
- [72] HALL D L, LINN R J. Comments on the use of templating for multisensor data fusion[C]//Proc. 1989 Tri-Service Data Fusion Symp. 1989, 1: 345-354.
- [73] REHER J, AMES A D. Dynamic walking: Toward agile and efficient bipedal robots[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2021, 4(1): 535-72.
- [74] 高海波, 王圣军, 单开正, 等. 牵拉人工肌腱式双足机器人矢状面行走控制[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(15): 18-27.
GAO Haibo, WANG Shengjun, SHAN Kaizheng, et al. Sagittal walking control of biped robot equipped with artificial tendon[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(15): 18-27.
- [75] CAO J, ZHANG J, WANG C, et al. Variable admittance control of high compatibility exoskeleton based on human-robotic interaction force[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 37(1): 119.
- [76] GRIZZLE J W, CHEVALLEREAU C, SINNET R W, et al. Models, feedback control, and open problems of 3d bipedal robotic walking[J]. *Automatica*, 2014, 50(8): 1955-88.
- [77] GONG Y, HARTLEY R, DA X, et al. Feedback control of a cassie bipedal robot: Walking, standing, and riding a segway[C]//2019 American Control Conference. IEEE, 2019: 4559-4566.
- [78] STUMPF A, KOHLBRECHER S, CONNER D C, et al. Open source integrated 3D footstep planning framework for humanoid robots[C]//2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2016: 938-945.
- [79] 杜国锋, 赵萌, 武建昫, 等. 基于视觉的闭链多足机器人自主运动控制方法[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(19): 62-70.
DU Guofeng, ZHAO Meng, WU Jianxu, et al. Vision-based autonomous motion control method for closed-chain multi-legged robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(19): 62-70.
- [80] SZABO R. Design approach for evolutionary techniques using genetic algorithms: Application for a biped robot to learn to walk and rise after a fall[J]. *Mathematics*, 2023, 11(13): 2931.
- [81] LI Q, YU Z, CHEN X, et al. Contact force/torque control based on viscoelastic model for stable bipedal walking on indefinite uneven terrain[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(4): 1627-39.
- [82] LIU X, RONG H, NERI F, et al. Deep deterministic policy gradient with constraints for gait optimisation of biped robots[J]. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2024, (Preprint): 1-18.
- [83] ZHAO F, WU Y, YANG X, et al. Multimode design and analysis of an integrated leg-arm quadruped robot with deployable characteristics[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 37(1): 59-71.
- [84] 石照耀, 丁宏钰, 汪文广, 等. 双足机器人腿部新构型设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(1): 103-112.
SHI Zhaoyao, DING Hongyu, WANG Wenguang, et al. Design and experimental research on the novel leg configuration of bipedal robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(1): 103-112.
- [85] 李慧莱, 凌振飞, 王泽正, 等. 高扭矩密度仿人机器人驱动单元研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 192-204.
LI Huilai, LING Zhenfei, WANG Zezheng, et al. Research on high torque density drive unit for humanoid robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 192-204.
- [86] HOBART C G, MAZUMDAR A, SPENCER S J, et al. Achieving versatile energy efficiency with the wanderer biped robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(3): 959-966.
- [87] TONG Y, LIU H, ZHANG Z. Advancements in humanoid robots: A comprehensive review and future prospects[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(2): 301-328.

- [88] RAMÍREZ REBOLLO D R, PONCE P, MOLINA A. From 3 fingers to 5 fingers dexterous hands[J]. *Advanced Robotics*, 2017, 31(19-20): 1051-1070.
- [89] TURING A M. Computing machinery and intelligence[M]. New York: Springer, 2009.
- [90] FAN H, LIU X, FUH J Y H, et al. Embodied intelligence in manufacturing: Leveraging large language models for autonomous industrial robotics[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024: 1-17.
- [91] BIGAZZI R, CORNIA M, CASCIANELLI S, et al. Embodied agents for efficient exploration and smart scene description[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2023: 6057-6064.
- [92] KOTAR K, WALSMAN A, MOTTAGHI R. Entl: Embodied navigation trajectory learner[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2023: 10863-10872.
- [93] KIM B, KIM J, KIM Y, et al. Context-aware planning and environment-aware memory for instruction following embodied agents[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2023: 10936-10946.
- [94] CANCELLI E, CAMPARI T, SERAFINI L, et al. Exploiting proximity-aware tasks for embodied social navigation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2023: 10957-10967.
- [95] SONG C H, WU J, WASHINGTON C, et al. Llm-planner: Few-shot grounded planning for embodied agents with large language models[C]//Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 2023: 2998-3009.
- [96] LIU Y, CHEN W, BAI Y, et al. Aligning cyber space with physical world: A comprehensive survey on embodied ai[J]. Arxiv Preprint Arxiv:240706886, 2024.
- [97] ZITKOVICH B, YU T, XU S, et al. Rt-2 : Vision-language-action models transfer web knowledge to robotic control[C]//Conference on Robot Learning. PMLR, 2023: 2165-2183.
- [98] DEVELOPER N. Project gr00t robotic foundation model[EB/OL]. (2024-6-30)[2024-6-30]. <https://developer.nvidia.com/project-gr00t>.
- [99] 曹政. 北京人形机器人“天工”升级亮相[N]. 北京日报, 2024-08-23(006). CAO Zheng. Beijing humanoid robot 'Tiangong' upgrade debut[N]. Beijing Daily, 2024-08-23(006).
- [100] 白辰甲, 许华哲, 李学龙. 大模型驱动的具身智能: 发展与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(9): 2035-2082. BAI Chenjia, XU Huazhe, LI Xuelong. Large model driven embodied intelligence : Development and challenges[J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54(9): 2035-2082.
- [101] WANG B, ZHANG J, DONG S, et al. Vlm see, robot do: Human demo video to robot action plan via vision language model[J]. Arxiv Preprint Arxiv:241008792, 2024.
- [102] 腾讯研究院. 向 AI 而行, 共筑新质生产力——行业大模型调研报告 [R/OL]. 深圳: 腾讯研究院. (2024-05-13). <http://lib.ia.ac.cn:8003/ContentDelivery/20240514/>. Tencent Research Institute. Walk towards AI and build a new quality productivity-industry model research report[R/OL]. Shenzhen: Tencent Research Institute. (2024-05-13). <http://lib.ia.ac.cn:8003/ContentDelivery/20240514/>.
- [103] DRIESS D, XIA F, SAJJADI M S, et al. Palm-e: An embodied multimodal language model[J]. Arxiv Preprint Arxiv:230303378, 2023.
- [104] ZHANG S, ROLLER S, GOYAL N, et al. Opt: Open pre-trained transformer language models[J]. Arxiv Preprint Arxiv:220501068, 2022.
- [105] CHEANG C, CHEN G, JING Y, et al. Gr-2: A generative video-language-action model with web-scale knowledge for robot manipulation[J]. Arxiv Preprint Arxiv:241006158, 2024.
- [106] LI Z, ZHANG J, LIN Q, et al. Hunyuan-dit: A powerful multi-resolution diffusion transformer with fine-grained chinese understanding[J]. Arxiv Preprint Arxiv : 240508748, 2024.
- [107] 科大讯飞股份有限公司. Aibot 机器人超脑平台 [EB/OL]. (2024-09-30)[2024-09-30]. <https://aibot.xfyun.cn/>. IFLYTEK CO. , LTD. Aibot robot super brain platform[EB/OL]. (2024-09-30)[2024-09-30]. <https://aibot.xfyun.cn/>.
- [108] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016: 770-778.
- [109] MEI Y, JIN H, YU B, et al. Visual geometry group-unet: Deep learning ultrasonic image reconstruction for curved

- parts[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2021, 149(5): 2997-3009.
- [110] 刘程果, 合烨, 陈小安, 等. 基于节律动态运动基元与机器人动力学的多空间融合周期性变阻抗技能学习[J]. 机械工程学报, 2025, 61(1): 150-161.
LIU Chengguo, HE Ye, CHEN Xiaoan, et al. Multi-space fused periodic variable impedance skill learning based on rhythmic dynamic movement primitive and robot dynamics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1): 150-161.
- [111] 喻惟刚, 文思捷, 李建军, 等. 基于可供性推理的人机协作拆卸序列规划方法[J]. 机械工程学报, 2024, 60(17): 297-309.
YU Weigang, WEN Sijie, LI Jianjun, et al. Affordance reasoning-based sequence planning manner for human-robot collaborative disassembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(17): 297-309.
- [112] 鲍劲松, 张荣, 李婕, 等. 面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 103-115.
BAO Jingsong, ZHANG Rong, LI Jie, et al. Digital-twin collaborative technology for human-robot-environment integration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 103-115.
- [113] 上海傅利叶智能科技有限公司. Fourier intelligence gr-2[EB/OL]. (2024-06-30)[2024-06-30]. <https://www.fftai.cn/products-gr2>.
Shanghai Fourier Intelligence Technology Co., Ltd. Fourier intelligence gr-2[EB/OL]. (2024-06-30)[2024-06-30]. <https://www.fftai.cn/products-gr2>.
- [114] FIGURE. Figure[EB/OL]. (2024-06-30)[2024-06-30]. <https://www.figure.ai/>.
- [115] 我爱机器人. AI、大模型、具身智能涌现, 人形机器人可能在十年内进入千家万户[EB/OL]. (2024-06-21)[2024-06-21]. <http://www.52robot.com/robot-news/3002.html>.
I love robots. AI, big models, and embodied intelligence have emerged, and humanoid robots may enter thousands of households within ten years[EB/OL]. (2024-06-21)[2024-06-21]. <http://www.52robot.com/robot-news/3002.html>.
- [116] HARA T, SATO T, OGATA T, et al. Uncertainty-aware haptic shared control with humanoid robots for flexible object manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023.
- [117] TONG Y, LIU H, ZHANG Z. Advancements in humanoid robots: A comprehensive review and future prospects[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(2): 301-328.
- [118] GAMA F, SHCHERBAN M, ROLF M, et al. Goal-directed tactile exploration for body model learning through self-touch on a humanoid robot[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2021, 15(2): 419-433.
- [119] TAGA G. Global entrainment in the brain-body-environment: Retrospective and prospective views[J]. Biological Cybernetics, 2021, 115(5): 431-438.
- [120] 杨光. 首款搭载鸿蒙操作系统的机器人夸父进厂做工[N]. 中国信息化周报, 2024-07-15(019).
YANG Guang. Kua Fu, the first humanoid robot equipped with Hongmeng operating system, enters the factory for work[N]. China Information Weekly, 2024-07-15(019).
- [121] HUAWEI. 华为开发者大会[EB/OL]. (2024-06-22)[2024-09-29]. <https://developer.huawei.com/home/hdc/hdc2024.html>.
HUAWEI. Huawei Developers Conference[EB/OL]. (2024-06-22)[2024-09-29]. <https://developer.huawei.com/home/hdc/hdc2024.html>.
- [122] MCLEAY F, OSBURG V S, YOGANATHAN V, et al. Replaced by a robot: Service implications in the age of the machine[J]. Journal of Service Research, 2021, 24(1): 104-121.
- [123] DEVELOPER N. Nvidia isaac lab[EB/OL]. (2024-09-29)[2024-09-29]. <https://developer.nvidia.com/isaac/lab>.
- [124] HEIDEN E, MILLARD D, COUMANS E, et al. Neuralsim: Augmenting differentiable simulators with neural networks[C]// Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), F, 2021. IEEE.
- [125] RUDIN N, HOELLER D, REIST P, et al. Learning to walk in minutes using massively parallel deep reinforcement learning[C]//Conference on Robot Learning. PMLR, 2022: 91-100.
- [126] HA D, TANG Y. Collective intelligence for deep learning: A survey of recent developments[J]. Collective Intelligence, 2022, 1(1): 26339137221114874.
- [127] FICHT G, FARAZI H, RODRIGUEZ D, et al. NimbRo-op2x : Affordable adult-sized 3D-printed open-source humanoid robot for research[J]. International Journal of Humanoid Robotics, 2020, 17(5): 2050021.

- [128] 王桂芝. 国外人形机器人发展及军事应用分析[J]. 机器人技术与应用, 2023(3): 6-8.
WANG Guizhi. Analysis of the development and military application of foreign humanoid robots[J]. Robot Technique and Application, 2023(3): 6-8.
- [129] R A. Boston dynamics' atlas robot grows a set of hands, attempts construction work[EB/OL]. (2023-03-14)[2024-06-23]. <https://arstechnica.com/gadgets/2023/01/>.
- [130] E A. Darpa robotics challenge trials : Tasks and scoring[EB/OL]. (2023-03-14)[2024-06-23]. <https://spectrum.ieee.org/drc-tasks-and-scoring#toggle-gdpr>.
- [131] LIU S. Research and judgment on foreign humanoid robot technology frontiers and industrial development situation[J]. Artificial Intelligence and Robotics Research, 2024, 13: 246.
- [132] 朱秋国, 熊蓉. 人形机器人技术现状及场景应用思考[J]. 机器人产业, 2023(4): 14-19.
ZHU Qiuguo , XIONG Rong. Humanoid robot technology status and scene application thinking[J]. Robot Industry, 2023(4): 14-19.
- [133] 朱妍. 人形机器人产业发展现状与启示[J]. 科技和产业, 2023, 23(22): 136-141.
ZHU Yan. The development status and enlightenment of humanoid robot industry[J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(22): 136-141.
- [134] 李轲昕. 对话优必选: 实践证明, 人形机器人不是“圆途” [J]. 机器人产业, 2024(4): 30-35.
LI Kexin. Dialogue UBTECH: Practice has proved that humanoid robots are not awkward[J]. Robot Industry, 2024(4): 30-35.
- [135] ROBOTICS U. Unitree h1-宇树首款通用人形机器人[EB/OL]. (2024-09-19)[2024-09-21]. <https://www.unitree.com/cn/h1>.
ROBOTICS U. Unitree h1 – Unitree's first universal humanoid robot[EB/OL]. (2024-09-19)[2024-09-21]. <https://www.unitree.com/cn/h1>.
- [136] Tencent Robotics X. 腾讯最新机器人“小五”亮相, 瞄准人居环境 [EB/OL]. (2024-09-24)[2024-09-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/pZUKo5OLLdARQGvG7pwM6A>.
Tencent Robotics X. Tencent's latest robot ‘The Five’ debut, aiming at the living environment[EB/OL]. (2024-09-24)[2024-09-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/pZUKo5OLLdARQGvG7pwM6A>.
- [137] 林春霞. 人形机器人在服务领域将大有作为[N]. 中国
经济时报, 2023-07-14(004).
LIN Chunxia. Humanoid robots will make a difference in the field of service[N]. China Economic Times, 2023-07-14(004).
- [138] TESLA. We, robot[EB/OL]. (2024-10-09)[2024-10-12]. <https://www.tesla.com/we-robot>.
- [139] 傅利叶智能. 傅利叶 GR-2 更灵活、更强劲、更开放 [EB/OL]. (2024-09-16)[2024-09-20]. <https://www.fftai.cn/products-gr2>.
Fourier Intelligence. Fourier GR-2 is more flexible, stronger and more open[EB/OL]. (2024-09-16)[2024-09-20]. <https://www.fftai.cn/products-gr2>.
- [140] 郑学思. 乐聚机器人: 人形机器人提速迈向产业化[J]. 机器人产业, 2024(4): 46-50.
ZHENG Xuesi. Leju robot: Humanoid robot speeding up to industrialization[J]. Robot Industry, 2024(4): 46-50.
- [141] NAGRANI A, YANG S, ARNAB A, et al. Attention bottlenecks for multimodal fusion[J]. Advances in neural information processing systems, 2021, 34: 14200-14213.
- [142] AGUILERA P A, FERNÁNDEZ A, FERNÁNDEZ R, et al. Bayesian networks in environmental modelling[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1376-1388.
- [143] SRIDHAR A, SHAH D, GLOSSOP C, et al. Nomad: Goal masked diffusion policies for navigation and exploration[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2024: 63-70.
- [144] POPESCU C A, OLTEANU S-C, IFRIM A M, et al. The influence of energy consumption and the environmental impact of electronic components on the structures of mobile robots used in logistics[J]. Sustainability, 2024, 16(19): 8396.
- [145] KE W, BAI Y, LI H, et al. Control of stepping downstairs for humanoid robot based on dynamic multi-objective optimization[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021, 33(5): e5999.
- [146] SUGIHARA T, MORISAWA M. A survey: Dynamics of humanoid robots[J]. Advanced Robotics , 2020 , 34(21-22): 1338-1352.
- [147] YANG C, JIANG Y, NA J, et al. Finite-time convergence adaptive fuzzy control for dual-arm robot with unknown kinematics and dynamics[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 27(3): 574-588.
- [148] DRAGHICI B G, DOBRE A E, MISAROS M, et al. Development of a human service robot application using

- pepper robot as a museum guide[C]//2022 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. IEEE, 2022: 1-5.
- [149] SUN Y, TANG H, TANG Y, et al. Review of recent progress in robotic knee prosthesis related techniques: Structure, actuation and control[J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(4): 764-785.
- [150] HUANG Q, DONG C, YU Z, et al. Resistant compliance control for biped robot inspired by humanlike behavior[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3463-3473.
- [151] LI G, LI Z, KAN Z. Assimilation control of a robotic exoskeleton for physical human-robot interaction[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 2977-2984.
- [152] LIN C, QI W. Integrating AI in human-robot interaction: emerging challenges and future directions[C]//2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops. IEEE, 2024: 379-382.
- [153] CHEN Y, ARKIN J, DAWSON C, et al. Autotamp: Autoregressive task and motion planning with llms as translators and checkers[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2024: 6695-6702.
- [154] BORDES F, PANG R Y, AJAY A, et al. An introduction to vision-language modeling[J]. Arxiv Preprint Arxiv: 240517247, 2024.
- [155] CASHEEKAR A, LAHIRI A, RATH K, et al. A contemporary review on chatbots, ai-powered virtual conversational agents, chatgpt: Applications, open challenges and future research directions[J]. Computer Science Review, 2024, 52: 100632.

作者简介: 陶永, 男, 1979年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能机器人控制与集成应用、嵌入式机电一体化控制、航空智能制造等。

E-mail: taoy@buaa.edu.cn

万嘉昊, 男, 1999年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人人机交互控制技术、双臂机器人控制等。

E-mail: zb2307118@buaa.edu.cn

王田苗, 男, 1960年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进机器人理论与技术, 仿生结构、医疗机器人、服务机器人等。

E-mail: itm@buaa.edu.cn

熊友军, 男, 1978年出生, 博士。主要研究方向为人形机器人核心技术开发、机器人遥操作等。

E-mail: rick@x-humanoid.com

王柏村, 男, 1990年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为人-信息-物理系统、智能制造、系统优化与管理等。

E-mail: baicunw@zju.edu.cn

张文博, 男, 1986年出生, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为机器人、智能制造、基础软件等产业政策及关键技术研究。

E-mail: zwb@ciecc.com.cn

邓昌义, 男, 1989年出生, 高级工程师。主要研究方向智能机器人、嵌入式工业软件、工业操作系统等。

E-mail: dengchangyi@sict.ac.cn

陶雨, 男, 2001年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器人自适应抓取与具身技能模型等。

E-mail: taoyuty2020@163.com

杨赓, 男, 1980年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为人-信息-物理系统、柔性电子、人机交互等。

E-mail: yanggeng@zju.edu.cn

魏洪兴(通信作者), 男, 1974年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人模块化技术、嵌入式技术、机器人操作系统等。

E-mail: weihongxing@buaa.edu.cn