

## 人形机器人一体化伺服关节新发展及关键技术

王腾飞 马尚君 付晓军 许金星

(西北工业大学 陕西省机电传动与控制工程试验室, 西安 710072)

**摘要:**【目的】为支撑人形机器人一体化伺服关节的技术创新与应用拓展, 综述旋转关节与直线关节的结构特性及国内外典型人形机器人中的应用场景, 总结一体化直线伺服关节的驱动方式, 探究一体化电驱直线伺服关节的关键技术与未来发展方向。【意义】一体化伺服关节作为机器人高精度运动与动态力位响应的核心驱动部件, 其性能直接决定机器人复杂环境下的作业能力与可靠性, 相关研究可为高性能关节研发及智能机器人产业升级提供关键技术支撑。通过文献梳理、典型案例分析及技术归纳, 明确构型设计、核心传动部件制造、高频响控制为核心技术要点, 指出高集成度、轻量化等为主要发展趋势。

**关键词:** 一体化直线伺服关节; 高集成度; 电动驱动; 高频响控制

**中图分类号:** TP242.6 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

## 0 引言

随着工业4.0来临和智能制造技术的发展, 机器人技术逐渐兴起。智能机器人及其核心部件的设计与制造水平, 是衡量一个国家科技创新能力、制造业水平和信息化进程的重要标志<sup>[1]</sup>。习近平总书记指出:“机器人革命将对全球制造业格局产生重大影响, 中国将成为全球最大的机器人市场。我们不仅要提高机器人技术水平, 还要尽可能多地占领市场”。2023年11月2日, 工业和信息化部发布了《人形机器人创新发展指导意见》<sup>[2]</sup>, 提出到2025年初步建立人形机器人创新体系, 整机产品达到国际先进水平, 实现批量生产, 并在特种、制造、民生服务等多场景完成示范应用。国家重点研发计划“智能机器人”重点专项2024年度指南<sup>[3]</sup>中指出, 面向人形机器人、机械臂等领域对高集成度、大力重比直线伺服关节的迫切需求, 研制不同输出等级的伺服关节。

机器人关节作为机器人运动控制的核心部件, 其性能直接影响其运动精度与动态响应。传统的机器人关节方案采用分体设计, 电动机、减速器、传感器等部件独立安装<sup>[4]</sup>, 存在结构复杂、体积大、效

率低等缺陷, 难以适配高动态、轻量化设计需求。一体化设计集成驱动、传动、传感等模块, 可以将关节体积缩减40%~60%, 转矩密度提升2~3倍, 显著优化了功率密度和响应速度。在一体化伺服关节的两种构型中, 旋转关节已成熟应用于各类机器人, 直线关节的研制与应用仍处于初期阶段。

本文围绕人形机器人关节展开研究: 首先, 介绍了国内外典型人形机器人, 重点分析机器人旋转关节和直线关节的发展与应用; 其次, 从液压、电动和气动3种驱动形式探讨直线关节的技术特点; 随后, 阐述一体化伺服关节的多种构型方案, 聚焦一体化电驱直线伺服关节的关键技术; 最后, 展望未来发展方向, 为智能机器人关节领域的技术创新与应用拓展提供支撑。

## 1 机器人分类及关节类型

### 1.1 机器人分类

一体化伺服关节由于其出色的性能, 可应用于多种类型的机器人。依据机器人的形态, 机器人可分为仿人机器人(人形机器人)<sup>[5]</sup>、仿动物机器人; 按照运动方式, 可分为双足机器人、多足机器人(四足机器人)<sup>[6]</sup>、轮式机器人; 按应用场景, 可分为工业机器人

收稿日期: 2025-07-28 修回日期: 2025-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB4708700); (2023YFB3406401)。

作者简介: 王腾飞, 男, 2001年生, 河南开封人, 硕士; 主要研究方向为一体化直线伺服关节热力磁多场耦合及动态特性研究; 861741420@qq.com。

马尚君(通信作者), 男, 1981年生, 甘肃庆阳人, 博士, 正高级; 主要研究方向为机电伺服传动系统和行星滚柱丝杠传动; mashangjun@nwpu.edu.cn。

引用格式: 王腾飞, 马尚君, 付晓军, 等. 人形机器人一体化伺服关节新发展及关键技术[J]. 机械传动, XXXX, XX(XX): 1-22.

WANG Tengfei, MA Shangjun, FU Xiaojun, et al. New development and key technologies of integrated servo joints for humanoid robots[J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX(XX): 1-22.

(机械臂)<sup>[7]</sup>、服务机器人。其中,人形机器人、四足机器人、机械臂应用最为广泛。

人形机器人通常被设计成具有与人类相似的身体结构,包括头部、躯干、双臂和双腿<sup>[8]</sup>。配备传感器、摄像头与语音识别系统后,可感知环境并与人交互,灵活性与多功能性突出,广泛应用于服务、医疗、教育、娱乐等领域。目前,较为先进的人形机器人有美国特斯拉 Optimus<sup>[9]1-2</sup>、波士顿 Atlas、Fig-

ure AI的 Figure 01、日本本田的 ASIMO,国内的开普勒先行者 K1、智元机器人远征 A1、优必选 Walker X<sup>[10]</sup>等。一体化伺服旋转关节适用于肩关节、腕关节、髌关节等部位,提供精准旋转控制;直线伺服关节适用于肘关节、膝关节、踝关节等部位,直接输出直线运动,支撑人形机器人实现多样化动作。目前国内外典型人形机器人类型及性能参数如表1所示。

表1 国内外典型人形机器人

Tab.1 Typical humanoid robots at home and abroad

国家	机器人型号	身高/ m	体重/ kg	整机性能	感知系统	控制算法	自由度	应用场景	产业化水平
美国	特斯拉 Optimus	1.72	57	行动速度最高可达8 km/h,整机稳定负载20 kg,单臂最大负载5 kg	多目摄像头、触觉传感器、IMU	基于IMU的实时平衡控制	Gen1(40) Gen1(42)	制造、物流、生活服务	规模化量产
美国	波士顿 Atlas <sup>[12]</sup>	1.5	75	行走速度1.5 m/s,奔跑速度可达2.5 m/s,可负载20 kg	LiDAR、RGB-D摄像头、关节力传感器	动态平衡算法、抗扰动控制	28	救援、物流、运输	早期工业应用
美国	Figure AI Figure 02 <sup>[13]</sup>	1.68	70	可以负重20 kg移动,步行速度1.2 m/s,单臂负载11kg	双目视觉、触觉传感器、激光雷达	全身协调控制、快慢思考架构	39	服务、迎宾、搬运	小规模试点
美国	Agility Robot Digit	1.75	65	行走速度2.5 m/s,可承载16 kg,四足支撑40 kg	激光雷达、4个 Intel RealSense深度摄像头	Actor-Critic PPO算法、动平衡	腿部12,手臂4	仓储物流、汽车制造	实现商业化
中国	优必选 Walker X <sup>[14]2-3</sup>	1.45	77	行走速度3 km/h,全身负载10 kg,双手负载3 kg	四目立体视觉、U-SLAM导航、多维力觉传感器	力位混合控制、自平衡算法	41	教育、物流、医疗	规模化量产
中国	宇树 Unitree HI <sup>[15]3-4</sup>	1.8	47	行走速度3.3 m/s,单臂最大负载21 kg	3D激光SLAM、360°全景深度感知	动态平衡控制、力矩补偿算法	19	焊接、搬运	量产待突破
中国	开普勒先行者 K1 <sup>[16]5-13</sup>	1.78	85	行走速度约2 m/s,双臂最大负载30 kg,灵巧手抓持力达5 kg	视觉SLAM、多模态传感器	力位混合控制、阻抗控制	40	工业、医疗等	小批量量产
中国	智元远征 A1 <sup>[17]4-6</sup>	1.75	55	最高速度7 km/h,整机承重80 kg,单臂最大负载5 kg	双目立体视觉、触觉传感器、激光雷达	全身柔顺控制、力矩反馈调整	49	工业、家庭等	小规模试点
中国	小米 CyberOne <sup>[18]</sup>	1.77	52	步行速度3.6 km/h,最大负载1.5 kg	Mi-Sense深度视觉模组、ToF传感器	自研“MiAI”算法	21	家庭服务、科研	工程验证
挪威	1X Technologies NEO <sup>[19]</sup>	1.65	25	步行速度4 km/h、跑步12 km/h,承载20 kg	双目RGB摄像头、手掌触觉传感器阵列	强化学习、分层控制、多模态融合	16	家庭服务、教育	批量制造
日本	本田 ASIMO <sup>[20]</sup>	1.3	50	行走速度0~9 km/h,单手抓力0.5 kg,双手可推10kg小车	双目摄像头、脚底六轴力传感器、44通道触觉传感器	仿生运动控制	57	服务业、外交、交互	工程样机(成本高)

四足机器人是一种模仿动物四足行走方式的机器人,通常具备4条腿和相应的关节结构,能够在各种地形上进行稳定的移动,被广泛应用于探测、救援、军事、农业和科研等领域。现有的四足机器人有波士顿动力的 Big dog、苏黎世联邦理工学院的 ANYmal 机器人、上海大学研制的 XDog、宇树科技的 Go2<sup>[11]</sup>等。

机械臂又称为工业机器人,是一种由多个关节和连接部件组成的自动化设备,能够模拟人类手臂功能,在三维空间中灵活移动。它通常由基座、关节、手腕和末端执行器组成,可以由电动机、气动或液压系统驱动。

由表1可知,全球人形机器人发展呈现多元化特征:运动性能方面,美国特斯拉 Optimus 以 1.72 m

身高和 57 kg 轻量化设计实现了 8 km/h 的移动速度及 20 kg 负载能力; 波士顿动力 Atlas 则以 75kg 的体重量达到 2.5 m/s 的奔跑速度, 其抗扰动算法在复杂地形中表现出色, 但面临高功耗的挑战。中国宇树 H1 凭借 47 kg 的超轻机身实现了 3.3 m/s 的行走速度, 运动性能位居世界前列; 而挪威 NEO 虽然步行速度仅为 4 km/h, 但 57 个高自由度的设计使其关节灵活性表现突出。负载能力方面, 工业型和服务型机器人呈现两极分化: 美国 Digit 通过四足结构实现 40 kg 负载, 中国开普勒 K1 双臂负载达 30 kg; 相比之下, 服务型机器人如小米 CyberOne 更注重交互安全性, 最大负载仅 1.5 kg。

全球人形机器人的技术路线呈现明显的地域差异, 感知系统正朝着多模态融合的方向发展: 美国企业采用差异化方案, 特斯拉 Optimus 选择低成本多目摄像头与 IMU 组合, 波士顿动力 Atlas 采用高精度激光雷达配合关节力传感器。中国企业则展现出多样化发展态势: 优必选 Walker X 配备 360° 全景深度感知系统; 智元远征 A1 融合触觉与激光雷达技术; 挪威 NEO 凭借 44 通道触觉传感器阵列在精细操作领域具备优势。

在控制算法方面, 技术创新主要集中在 3 个方向: 平衡控制领域, Optimus 的 IMU 实时平衡算法适用于规模化应用, Atlas 的动态抗扰动算法则专注于极限场景; 力控技术方面, 中国开普勒 K1 的阻抗控制与智元 A1 的全身柔顺控制取得了重要突破; 智能决策领域, 美国 Figure 02 的“快慢思考架构”实现了任务分层处理, 小米 CyberOne 则通过 MiAI 算法结合强化学习提升了自主决策能力。

从产业化进程来看, 美国特斯拉 Optimus 已进入规模化量产阶段, 但复杂场景适应性仍需提升; Digit 则凭借 2.5 m/s 的移动速度及四足稳定性在物流领域实现商业化落地; 中国的优必选 Walker X 人形机器人虽实现量产, 但其 77 kg 体重会导致较高的功耗; 宇树 H1 受限于 19 个自由度, 影响动作表现, 量产技术尚待突破; 开普勒 K1 在工业重载场景展现独特价值; 挪威 NEO 作为工程样机虽具有 25 kg 超轻设计优势, 但结构强度与高昂成本制约产业化推进。

人形机器人发展面临两大核心挑战: 能效比失衡与环境适应性不足。以 75 kg 级机器人为例, 其典型功耗超过 4 kW·h, 而轻量化机型又存在结构强度不足的问题。同时, 感知系统在多变光照条件和复杂地形中仍存在识别盲区。未来突破方向主要集中在关节创新设计、材料革新与算法升级。宇树 Unitree H1 机器人关节使得其有 21 kg 的单臂负载能力;

挪威 NEO 采用碳纤维骨架实现轻量化; 宇树 H1 的直驱电动机技术显著提升能效; 美国 Figure 02 通过大模型增强场景理解能力; 中国智元 A1 则凭借全身柔顺控制算法提高了操作精度。

当前全球人形机器人呈现梯度化发展态势: 美国在动态控制和商业化应用方面保持领先, 中国在轻量化设计和传感器融合领域快速追赶。如何突破“高动态表现、低能耗运行与可控成本”这一技术难题, 将成为产业发展的关键所在。

## 1.2 人形机器人关节类型

在不同类型的机器人中, 由于运动的复杂性, 人形机器人具有多种类型的关节, 包括上肢关节(腕、肘、肩)、腰部关节、下肢关节(踝、膝、髋)以及手部关节等。

根据机器人中不同关节运动的输出形式, 可将其分为旋转关节和直线关节。有些机器人关节只能通过特定类型的驱动器来驱动, 如腰部关节只能由旋转驱动器驱动; 而其他关节则可以通过不同类型的驱动器或多种驱动器协同工作来实现运动, 如肘部关节既可以由旋转驱动器驱动, 也可以由旋转驱动器与直线驱动器组合驱动。

机器人关节的发展始终围绕核心目标: 在有限空间内提升集成度, 满足轻量化设计需求, 降低系统整体质量; 在体积与质量约束下提升载荷输出能力、降低制造成本、优化能耗效率<sup>[21]</sup>。

### 1.2.1 旋转关节

旋转关节是机械结构中最常见的一种关节类型, 用于连接两个部件并使它们相对旋转, 由驱动器、回转轴和轴承等组成。旋转关节可由电动机直接驱动产生旋转运动, 但常需连接减速装置来获取较大的转矩, 如谐波减速器、RV 减速器。它们通常由轴承支撑, 以减少摩擦并实现平稳旋转。旋转关节通常通过连杆机构、齿轮机构、万向节、带、链或绳传动等传递动力<sup>[22]</sup>。

旋转关节最初以 3 自由度旋转机构形式出现。2002 年, 法国学者 SELLAOUTI 等<sup>[23]</sup>设计了一种并联机构, 采用 3 自由度旋转关节, 该机构的末端执行器能够绕圆锥轴线实现无限旋转, 还可在圆锥空间内自由移动, 但工作范围受机械限制, 承载能力较弱。

2006 年, 英国学者 HINOJOSA 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于差动机构的 3 自由度仿人机器人腰部旋转关节, 采用双电动机协同驱动实现俯仰和偏航运动, 相比传统串并联机构, 刚度与转矩输出能力更高, 体积更小, 运动稳定性与灵活性更强。

为解决机器人旋转关节运行中会出现过大摩擦的

问题, HILD等<sup>[25]</sup>设计了一种新型的旋转驱动离合器作为人形机器人的旋转关节, 该设计具备缓冲和减震功能, 可有效降低摩擦力并提高系统的耐用性。

燕山大学团队在球面并联旋转机构应用方面陆续取得众多成果。金振林等<sup>[26]</sup>优化3-RRR机构支链分布, 显著提升了机器人腰部旋转关节活动范围。周玉林<sup>[27]</sup>在此基础上增加中心支撑支链, 开发出3-RRR/S髌关节, 兼具高刚性和静力卸载功能。

2016年, GU等<sup>[28]</sup>提出结合滚珠丝杠原理与三连杆机构特性的创新型旋转驱动关节, 以末端执行器驱动转矩为目标函数分析关节模块驱动性能, 设计并制作关节模块, 搭建电气控制试验平台, 该关节旋转范围更大, 适用性更广, 更适用于人形机器人。

同等规格下, 液压驱动器虽然精度较低, 但具有更强的负载能力。东南大学的谢中取等<sup>[29]</sup>设计了一种旋转式液压关节驱动器, 采用阀缸一体化结构和多重动密封方案, 实现了10 MPa工作压力下3.524 N·m的空载摩擦力矩, 机械效率达95.3%, 为足式机器人高速行走提供了方案。该驱动具有多重密封机制, 结构紧凑, 集成了电液伺服阀和传感器, 显著提升了动态性能和集成度。虽然该驱动关节着地工况下跟踪误差较明显, 需进一步优化比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)参数或添加冲击补偿, 但已具有一体化关节的雏形。

经过国内外学者的持续研究, 旋转关节的结构设计已突破传统转动机构的局限。通过新型构型创新和先进驱动器的应用, 现代旋转关节在结构紧凑性、体积控制、传动效率等方面均取得显著突破, 不仅实现了更小的体积和更高的效率, 同时大幅提升了负载能力。液压驱动的一体化关节虽然具有较大的负载能力, 但在机器人应用中往往难以同时满足精度和轻量化的需求, 这一痛点问题一直是国内外学者的重点研究方向。

RYOYA等<sup>[30]</sup>研发了一款所有关节均由电静液作动器(Electro-hydrostatic actuator, EHA)驱动的机械臂。该机械臂基于一种小型化、轻量化的高压驱动叶片式旋转EHA技术, 并在此基础上设计了一个机器人手腕机构。通过这种创新设计, 机器人腕关节能够在提供高效驱动的同时, 保持较小的体积和质量, 进一步提升了其运动灵活性和应用范围。

为解决精度问题, 2023年, YANG等<sup>[31]</sup>设计了一种用弧形液压执行器直接驱动的液压旋转关节, 其活塞杆沿弧形轨道滑动, 省去了传统连杆机构, 使结构更加紧凑。关节采用双金属缸体, 通过螺栓固定并内置复合密封圈, 确保高可靠性; 同时集成角

度传感器, 实现精准控制。该设计可在 $-25^{\circ}$ 至 $100^{\circ}$ 的旋转范围内运行, 兼具轻量化与高转矩输出特性, 为一体化关节的精确运动控制提供了基础。

同年, LI等<sup>[32]</sup>提出了一种结构紧凑的轻量化新型液压关节执行器, 通过仿生蜗牛壳的螺旋结构设计, 采用弧形外壳和可动杆直接输出旋转运动, 避免了传统液压执行器所需的连杆转换机构, 从而解决了机械间隙、质量增加和非线性摩擦等问题。该旋转关节峰值扭矩为742.2 N·m, 具有265.5 N·m/kg的超高转矩重质量比, 远超传统产品(KNR执行器的83 N·m/kg); 其安装尺寸为70 mm × 92.5 mm × 145 mm, 质量只有1.93 kg, 可以满足机器人中空间较小的条件, 在减轻机器人关节质量的同时提升了负载能力。

近年来, 随着人形机器人研究热潮的兴起和政策支持的持续加码, 电驱动式旋转关节及新型结构关节的技术要求显著提升。这一发展趋势不仅对关节的控制精度提出了更高标准, 同时也对关节的轻量化设计带来了新的挑战, 促使关节结构设计呈现出从独立机械构件向多功能一体化集成的演进趋势。这种一体化关节通过将驱动、传动、传感等核心功能模块有机整合, 可实现结构紧凑化与功能集成化的统一。

2019年, TANG等<sup>[33]</sup>设计了一种高精度一体化关节, 通过集成谐波减速器、永磁转矩电动机、双编码器、制动器及伺服驱动器等组件, 实现了结构的紧凑化。该设计采用空心轴布线方案和优化的轴向布局, 有效实现了不同部件的集成, 同时, 双编码器配置可实现 $<0.05$  mm的绝对定位精度。

莫帅等<sup>[34]</sup>基于一体化关节设计方法, 研制了一款应用于纺织机器人的一体化腰部旋转关节。该关节集成了有刷电动机、驱控系统和编码器等核心功能单元, 实现了结构紧凑化与功能优化的协同设计, 不仅实现了关节的微型化, 同时将系统响应时间缩短了30%。这一创新设计为纺织机器人工作空间的优化及运动控制性能的提升提供了有效的技术解决方案, 而且为机器人关节一体化设计提供了有效参考。

在2023年, LIU等<sup>[35]</sup>基于人臂仿生理理论以及并联机器人领域的最新研究成果, 进行了新型线驱动拟人臂机器人的分析与设计。该设计采用一种四线驱动的3自由度球面并联结构来替代拟人臂的肩部和腕部关节, 同时使用二线驱动的旋转关节来代替肘关节, 从而构建了一种串、并联结构的旋转驱动关节。该关节充分融合了并联结构和绳索驱动的优势。

2025年, BIAN等<sup>[36]</sup>提出了一种专为小型轻量机

机器人关节设计的新型一体化多自由度三环形压电驱动器, 通过三环嵌套结构激发径向和弯曲振动模态, 在驱动足处形成椭圆运动轨迹, 可实现平面内双向平移及旋转运动。该驱动器采用单定子设计, 直径尺寸为 $40 \times 3$  mm, 质量为23.5 g, 结构紧凑, 空间利用率与质量控制达行业领先水平。试验表明, 其最大旋转速度达5.03 rad/s, 线性速度为9.17 mm/s, 负载能力50 g, 最小旋转运动分辨率 $18 \mu\text{rad}$ 、直线运动分辨率 $2 \mu\text{m}$ , 在满足小型机器人关节承载要求的同时具有极高的精度和分辨率。该关节结构简单, 性能显著优于传统多定子或球形转子驱动器。

在有限的空间约束下, 人形机器人关节需实现高功率密度, 从而优化整体性能表现。如今, 大部分机器人关节都以旋转关节为主。特斯拉最初发布的人形机器人擎天柱Optimus<sup>[37]2-4</sup>, 其肩部、腕部、腰部使用旋转关节, 采用无框力矩电动机+双编码器+力矩传感器+谐波减速器的方式作为整体驱动关节。将无框电动机、谐波减速器、传感器等多种部件集成到机器人关节中, 能够最大程度地节省电动机和部件所占空间, 提高整体设计的紧凑性和效率。此外, 波士顿动力的人形机器人Atlas<sup>[38]</sup>、本田公司的Asimo<sup>[39]</sup>、索尼公司的SDR<sup>[40]</sup>系列机器人、Agility Robotics的Digit等均采用包含谐波减速器的旋转关节, 其手臂的肘关节由电动机经同步齿形带和谐波减速器减速后带动关节进行回转运动。

在机器人中, 旋转关节应用广泛, 拥有成熟的设计体系和应用方案, 几乎在所有机器人中都有使用。但在部分场景存在冗余度大、运动范围有限、负载承受能力较低等不足, 此时采用直线关节可实现更优性能。

### 1.2.2 直线关节

直线关节是一种常用于工程和机械设计中的机械关节, 可沿着一个直线方向运动。液压缸、气压缸、直线电动机、电动缸(一体化机电作动器)等装置可通过齿轮、行星滚柱(滚珠)丝杠等传动部件输出直线运动。

相较于旋转关节, 直线关节的紧凑直线运动结构可显著节省安装空间, 简化机器人整体设计, 在人形机器人部分部位应用更具优势。这种结构直接减轻了末端执行器的质量负担, 同时将重心上移靠近躯干, 大幅提升了运动稳定性和响应速度。相较于旋转关节的摆动运动方式, 直线关节的运动轨迹更加直接高效, 不仅降低了系统整体能耗, 还特别适合需要精密直线定位的作业场景。在空间受限且

追求高能效的应用场景中, 直线关节的这些特性使其成为比旋转关节更优越的选择。

传统直线输出机构主要采用两种实现方式: 其一是通过气缸、液压缸和活塞等执行元件直接产生直线运动; 其二是借助齿轮齿条、丝杠与螺母等传动元件将旋转运动转换为直线位移。然而, 这些传统方案多依赖外部传感器检测位置, 普遍存在精度不足的缺陷, 难以满足现代机器人关节对高精度定位和快速响应的严苛要求。相比之下, 一体化直线伺服关节通过高度集成化设计, 不仅实现了机械结构的大幅简化, 更在系统响应速度和控制精度方面取得了显著提升。

2014年, 美国学者KNABE等<sup>[41]</sup>在提出的THOR人形机器人上采用的完全可反向驱动、力可控的旋转执行器套件设计中采用了行星滚珠丝杠。该组件将滚珠丝杠驱动的直线系列弹性执行器(Linear series elastic actuator, LSEA)与平面直线机构配对, 使用滚珠丝杠作为直线输入来驱动旋转接头, 通过选择合适的连杆长度比, 优化恒定角速度, 从而在 $150^\circ$ 的运动范围内实现几乎恒定的机械优势和 $115 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的峰值转矩, 解决直线执行器驱动机器人关节在运动范围极限时的转矩损失问题, 该机构是Hoeken四连杆的新颖反转形式, 亦可反转输出直线运动。

本节详细阐述了不同类型机器人关节的特性及其应用优势, 机器人关节主要采用3种驱动方式: 电驱动、液压驱动和气动。下文将详细介绍液压驱动、电驱动和气动驱动在直线关节中的应用。

## 2 直线关节的驱动形式

### 2.1 液压驱动

液压驱动通过液体压力实现机械运动, 其核心组件包括液压泵、液压缸、控制阀组、油箱和管路。液压泵提供高压油液, 控制阀组精确调节油液方向、压力和流量。该系统先将液体加压, 再输送至液压缸或液压马达, 推动活塞或叶片产生直线或旋转运动, 尤其适合高负载、大功率场景, 在工业应用中具有重要价值。

液压驱动直线关节在机器人领域具有广泛的应用, 2013年, LEE等<sup>[42]</sup>设计了一款由微型液压压缩机转换器组成的微型EHA, 并构建了一种由新型液压直线执行器驱动的仿生机械臂, 机械臂如图1所示。该机械臂有6个自由度, 包括手腕上的2个自由度、肩膀上的3个自由度和肘部的1个自由度。整个机械臂的质量仅为2.2 kg, 能够举起5 kg以上的物

体。该系统通过液压缸的线性伸缩运动直接驱动关节，采用直流电动机驱动圆柱凸轮机构，将旋转运动转换为活塞的直线运动，从而压缩工作流体，产生推力。

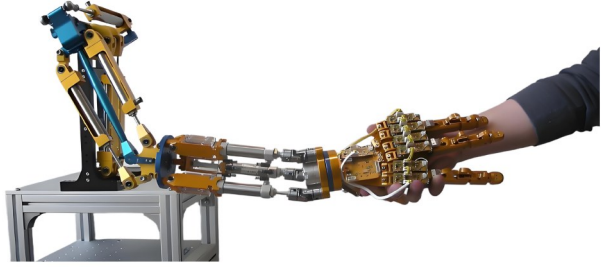


图1 液压驱动仿生机械臂

Fig. 1 Hydraulic driven biomimetic robotic arm

直线执行器内径为 16 mm，在 3MPa 工作压力下可输出 600 N 的驱动力，具有高功率密度特性。直线执行器被对称布置在并联连杆机构中，通过协同伸缩实现关节的多自由度运动，避免了传统旋转电动机所需的减速机构。这种直接驱动方式使关节结构更加紧凑，同时，通过双向推力放大效应，显著提升了输出转矩。试验表明，该直线执行器系统在仅 2.5 MPa 压力下即可支撑机械臂完成 5 kg 运动任务，验证了其优异的力学性能。

液压驱动的直线关节还可通过 EHA 来实现，KAMINAGA 等<sup>[43]</sup>研发的一种新型直线 EHA 驱动系统具有更高的输出力，最大输出力可达 1 500 N。在承载 35 kg 负载的情况下，执行器最大速度 270 mm/s，并具有高功率、低质量和低摩擦特性。这一创新设计被成功应用于全尺寸人形机器人的上、下肢部分，使得机器人具备了攀爬和使用梯子等复杂动作的能力。

日本川崎公司开发的人形机器人 Kaleido<sup>[44]</sup>配备了 EHA 系统来驱动其腿部关节，将伺服电机、液压缸与液压泵集成形成一体化驱动单元，具备功率密度及抗冲击、耐磨损性能，可提供高达 6000 N 的最大输出负荷与 200 mm/s 的运动速度，确保机器人在复杂环境下的高效运动。

以上关节虽然已在机器人中应用并且具有较高的承载能力和较大的直线速度，但缺乏位置和速度检测等功能，难以满足机器人的轻量化、高集成度等需求。国内学者在液压驱动的一体化直线关节领域也开展了一些研究。葛磊等<sup>[45]</sup>提出的新型液压直线执行器系统主要由动力单元、液压回路和回转-机械直线转换单元组成。工作时，液压马达将液压能转换为机械能，驱动丝杠旋转，将旋转运动转化为直线运动，实现推杆的伸缩；系统通过调整泵的斜盘倾角，可灵活

控制推杆的运动速度和方向。该系统还可以在液压马达和同步带轮位置安装旋转编码器和转矩传感器等<sup>[46]</sup>，实现执行器的位置和输出力的检测。

在机器人驱动技术发展过程中，相较于液压驱动的直线关节，电驱动系统具有能量转换效率更高、维护需求更低、能源使用更清洁以及结构设计更简洁等特点。

## 2.2 电动驱动

电动驱动以电力为动力源，在直线关节的电驱动系统中，电动机通过输出机械力矩驱动负载旋转，并借助丝杠、齿轮齿条或线性模组等传动机构，将旋转运动精确转换为直线运动。根据控制能力，电动机可分为 3 类：仅提供动力控制的普通电动机；具备动力、速度、位置和力矩控制功能的控制电动机；采用电动机与负载直接连接结构的直驱电动机。

最初的直线关节是通过电动机驱动滚珠丝杠来实现的。2015 年，马什哈德法尔道西大学的 MOUSAVI 等<sup>[47]</sup>设计了一种用于 SCARA 机器人的新型线性-旋转关节，采用滚珠丝杠和滚珠花键的复合结构实现线性与旋转运动的解耦。线性运动由电动机直接驱动滚珠丝杠完成，采用固定-支撑安装方式以避免轴弯曲；旋转运动则由另一电动机通过行星齿轮箱驱动空心滚珠花键实现，花键同时作为丝杠螺母的导向机构。关节采用空心花键设计，以集成真空管路，满足拾取操作需求，并通过优化滚珠丝杠参数(导程、直径)和采用标准轴承支撑来保证结构刚度和运动精度。整体采用模块化装配设计，使用定制耦合件连接各部件，最终实现了  $\pm 0.03$  mm 的线性重复精度和  $\pm 0.02^\circ$  的旋转重复精度，在满足 SCARA 机器人高速高精度运动需求的同时，兼顾了经济性和实用性。

与之相比，孙阳阳等<sup>[48]</sup>开发了一种结构较为简单的新型电动直线驱动装置及人形机器人关节驱动机制，该机制由电动机、推杆组件、磁性元件和霍尔装置组成。推杆组件包含推杆与传动机构，通过精确控制调节杆的位置、速度和加速度，能够有效应用于大型人形机器人直线驱动关节。

随着技术的发展，行星滚柱丝杠(Planetary roller screw mechanism, PRSM)凭借其高负载、高精度等独特优势在工业领域得到广泛应用。特别是可与无框电动机集成设计的反向式行星滚柱丝杠(Inverted planetary roller screw mechanism, IPRSM)，可满足机器人关节对小型化和轻量化的需求。

徐志根等<sup>[49]</sup>基于 PRSM 设计了一种用于人形机器人的一体化直线关节，该关节包括丝杠轴、滚柱、

螺母、拉压力传感器、编码器、电动机等。在该关节中, 使用拉压力传感器直接作为端盖, 减少了零件数量; 在丝杠左、右侧分别使用端盖和密封件密封; 将编码器转子通过编码器螺钉直接固定在螺母上, 大大减小了传动间隙。该设计方法不仅降低了整机的质量, 而且提高了机构的紧凑度和检测精度。

为了提高人形机器人的安全性、柔顺性及力感知能力, 杜兴等<sup>[50]</sup>以 IPRSM 为主要传动部件, 设计了一种柔性直线机器人关节。该关节以空心臂力矩电动机为动力源, 电动机带动螺母转动, 进而带动滚柱转动和滚柱及丝杠的直线运动。丝杠顶端与关节输出端盘相连, 在两者之间加装线性异型弹簧及红外位置传感器, 通过测量弹簧的变形量实现直线机器人关节的精准力控。该设计不仅降低了机器人关节的成本, 而且在一定程度上提高了关节的安全性。

李汉平等<sup>[51]</sup>设计了一种机器人直线关节, 该关节以无框电动机为驱动件, 以 IPRSM 为直线移动组件, 配合磁致位移传感器检测移动件位移。驱动件驱动螺母旋转时, 螺纹滚柱在自转的同时相对螺母公转, 并带动移动杆轴向移动, 从而实现直线输出运动。该机器人直线关节位移检测精度较高, 且不受油液等液体的影响, 更有利于实现对关节的精确控制。

直线关节模组的散热方式为自然冷却, 该散热方式不仅效率较低, 而且造成整体关节的结构复杂且体积较大。为了解决该问题, 牛铭奎等<sup>[52]</sup>设计了一种新型的机器人直线关节模组。该模组将无框电动机与 IPRSM 螺母集成, 轴承内圈与螺母管一体化设计, 减小了安装空间, 提高了装配效率。在控制电路板附近的端盖中加入冷却装置, 并把冷却板布置到发热量大的功率板附近以提高散热效率。该设计填补了机器人一体化直线关节散热设计的空缺。

李雪皑等<sup>[53]</sup>设计集成式直线驱动电动缸, 专为人形机器人直线驱动关节开发, 采用电缸传动模块与直流无刷电动机, 所有部件按从内到外顺序布置在电动缸外壳内; 壳内设置断电制动模块、拉压应力传感器和电磁编码器(旋转磁极); 电缸传动模块一端与断电制动模块制动端连接, 另一端连接功率输出模块; 驱动控制集成电路板安装在电动缸外壳侧壁, 丝杠轴功率输出端与功率输出模块连接; 该设计有效解决现有技术中机器人在输出功率、集成度、轻量化、结构强度、功耗及移动速度方面的不足。

如今, 部分机器人厂商也采用 PRSM 作为直线关

节的传动部件来设计人形机器人中的一体化直线关节。

在特斯拉人形机器人擎天柱 Optimus 中<sup>[37]2-4</sup>, PRSM 作为直线关节的核心驱动部件被多处用在机器人的关节处, 每个大臂 1 个直线驱动关节, 每个小臂两个直线驱动关节, 每个大腿和每个小腿分别两个直线驱动关节。

波士顿动力作为世界上研发高度先进机器人的翘楚, 其人形机器人 Atlas 在机器人圈内被广为采用<sup>[54]</sup>。Atlas 机器人电动机位于机器人的髌关节附近, 即机器人大腿的上腿部分, 保证了电动机的质量远离膝关节, 从而减少膝关节处的远端质量, 降低髌关节的转动惯量。机器人的大腿部件内部带有 PRSM, PRSM 是一个机械线性执行器, 通过丝杠与电动机相连。当电动机旋转的时候, 丝杠也随之旋转, 使得螺母沿轴向或纵向移动, 进而将旋转运动转换为直线运动。为了将螺母的直线运动转化为机器人小腿部件相对于大腿部件绕膝关节的旋转运动, 螺母与一个连杆机构相连(图 2)。电动机顺时针旋转和逆时针旋转分别带动小腿部件伸直和弯曲, 使得机器人以特定的步伐行走或跑步。

PRSM 与无框电动机的集成应用使得机器人关节在有限的体积和质量内能够承受更大的负载, 同时具有更高的定位精度和更优的抗冲击能力。连杆机构的应用允许关节大角度屈伸, 使机器人可以适应更复杂的地形。

先行者 K1 是开普勒机器人公司研发的最先进的人形机器人<sup>[55]6-8</sup>, 其腿部关节采用五连杆设计, 并多处采用直线电动机驱动。其在大腿部件上有两个直线电动机, 即第一直线电动机和第二直线电动机。第一直线电动机输出轴向的直线运动来带动髌部连杆转动, 进而带动机器人大腿组件绕着髌部关节的中心轴作俯仰运动, 即机器人大腿的前后摆动。第二直线电动机与机器人膝部关节的连杆相连, 其输出的直线运动驱动小腿部件相对大腿部件作俯仰运动。在机器人的小腿两侧对称布置有两个第三直线电动机, 通过两个直线电动机耦合, 控制脚踝关节的俯仰和侧摆运动。控制机器人脚部动作的直线关节如图 3 所示。先行者 K1 凭借多自由度髌关节的创新设计, 实现了腿部运动的高度灵活性和精确控制。

优必选的人形机器人 Walker S<sup>[56]</sup>的腿部关节采用了多驱动件的设计, 如图 4 所示。驱动装置包括第一至第四驱动件, 分别与骨盆部、大腿部、小腿部和脚部铰接, 可实现各个部位相对转动的精确控制。驱动件与各部位的连接为直线关节, 采用推杆直线

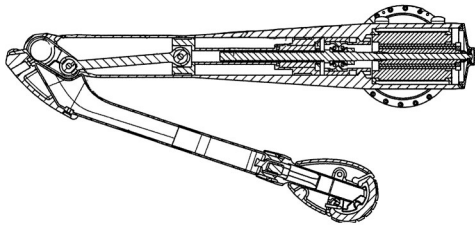


图2 Atlas腿部关节构型

Fig. 2 Atlas leg joint configuration

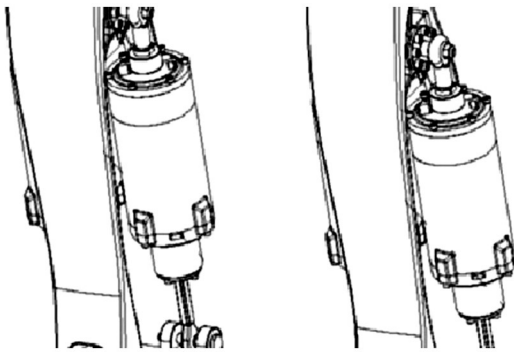


图3 先行者K1直线关节

Fig. 3 Pioneer K1 linear joint

电动机来提供高效稳定的动力输出。

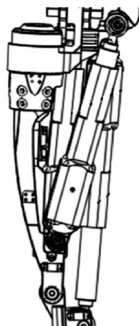


图4 Walker S腿部直线关节

Fig. 4 Walker S leg linear joint

目前,人形机器人直线关节技术正经历从液压驱动向电动化的重大转型,行星滚柱丝杠由于具有低质量高承载、高精度、长寿命的特性,将在未来一体化直线伺服关节中占据重要地位。

气动驱动凭借其高爆发力、快速响应和低成本等优势,在人形机器人领域有着广泛的应用,下文将详细介绍气动驱动在该领域的相关研究。

### 2.3 气动驱动

气动驱动利用压缩气体作为动力源,通过气缸或气动肌肉等元件将气压能转化为机械运动,从而驱动设备运动或做功。其核心组件包括空气压缩机、控制阀以及管路系统等。其核心优势在于高功率质量比、柔顺性和安全性,适合需要爆发力或人机交互的场景,例如,人形机器人的动态动作或康复外骨骼的辅助运动<sup>[57]</sup>。相较于电动或液压驱动,气动

系统具有结构简单、响应快、清洁无污染及过载保护等优势,但受限于空气可压缩性,其定位精度和输出稳定性较低。

1998年,LEE等<sup>[58]</sup>开展气动关节研究,设计基于气动执行器的力反馈主臂和主手系统,采用平行安装的气动执行器直接产生直线运动输出,通过连杆机构将线性力转换为关节转矩,实现人形机器人各关节功能。

2005年,TONDU等<sup>[59]</sup>设计了一种由对抗性气动McKibben人工肌肉驱动的7自由度机械臂,并将其成功应用于人形机器人。McKibben型气动人工肌肉作为当时最先进的气动驱动器,在国内也有广泛的研究和应用。毛勇等<sup>[60]</sup>基于McKibben驱动器构建的人形机器人关节,有效缓解了机器人在行走或奔跑时受到的冲击力。赵怀林等<sup>[61]</sup>则利用两条McKibben人工肌肉开发出一种新型机器人肘关节,并与人类关节特性进行了对比研究<sup>[62]</sup>,为后续人形机器人气动关节的研发提供了重要参考方向。傅晓云等<sup>[63]</sup>将气动人工肌肉视为可变刚度的弹性元件,针对气动人工肌肉驱动的直线关节建立了两种不同的驱动动力学模型,为开发新型直线气动驱动系统奠定了重要的理论基础。

如今的气动驱动大都是通过气动人工肌肉(Pneumatic artificial muscle, PMA)来实现的。PMA是一种仿生驱动装置,通过压缩空气驱动,实现类似生物肌肉的收缩运动,如图5所示。其典型结构由内部橡胶气囊和外部高强度编织网套组成。当气压增加时,网套径向膨胀导致轴向缩短,产生高功率密度、柔顺的直线拉力。PMA具有质量轻、响应快、抗冲击性强等优势,被广泛应用于机器人柔性关节、康复外骨骼、仿生机械等领域。2015年,LIN等<sup>[64]</sup>在人形机器人单腿设计中采用Shadow气动人工肌肉作为驱动元件,成功实现了髋关节、膝关节和踝关节的类人运动。该研究通过试验模拟了人类肌肉的协同工作模式,并采用PWM算法结合PID控制策略,显著降低了系统的响应时间。ZANG等<sup>[65]</sup>则采用仿生学设计,利用PMA的直线协同收缩实现关节间的能量传递和运动耦合,从而驱动髋关节、膝关节和踝关节运动,使气动肌肉骨骼双足机器人实现了平面内行走。这一关节构型设计为类人行走运动的实现提供了有效的技术参考。

国内外对于PMA均开展了大量研究。ANDRIKOPOULOS等<sup>[66]</sup>通过钢缆肌腱将PMA的直线收缩转换为关节旋转的方式设计人形机器人腿及其踝关节,实现了2自由度的运动,可完美模拟人类踝关节的基本功



图5 气动人工肌肉

Fig. 5 Pneumatic artificial muscle

能。在此基础上, 该团队采用4个PMA以交叉形式布置<sup>[67]</sup>, 实现了真正独立的双自由度控制, 为人形机器人单关节到完整下肢系统研发提供了方法。该团队还采用对抗式PMA对和肌腱传动机制设计了一种14自由度的上半身气动人形机器人<sup>[68]</sup>, 实现了手腕桡/尺偏、肘部屈/伸、肩部屈/伸/旋转/外展/内收、颈部旋转/屈伸/侧弯以及下背部屈/伸等生物动作。

近年来, 由于人形机器人对于机构性能要求的提高, 传统PMA低收缩率、输出力调节困难、适应性低等问题逐渐暴露。为了解决以上问题, ZHANG等<sup>[69]</sup>提出了一种创新型的多连接气动人工肌肉结构。该结构模仿人体肌纤维束结构, 由6根直径仅7mm的自制McKibben肌肉纤维平行排列组成。这种紧凑布局增加了固定端接触面积, 减小了整体体积。当内部气压增加时, 各肌肉纤维协同收缩, 产生直线收缩力和位移, 从而驱动关节运动。该结构比传统的McKibben收缩率高8%, 并且可以根据不同的应用场景增加或减少肌肉纤维的数量。同时, 由于其具有可拆卸性, 可以应用于更广泛的领域。

PMA能模拟生物肌肉的收缩特性, 提供轻量化且强力的驱动, 但气体可压缩性也带来控制复杂、响应延迟和能效较低等挑战。相比之下, 电动机驱动精度更高, 而液压驱动负载能力更强。因此, 气动驱动常与其他技术结合使用(如气电混合系统), 以平衡性能与效率。

MORI等<sup>[70]</sup>采用气动-电动混合驱动方案开发了一款用于羽毛球运动的高速人形机器人手臂, 其将每个气电混合执行器中的气动执行器和电动机集成在一个紧凑结构中, 并将驱动器作为机器人手臂的结构部件以减轻整体质量。执行器集成了温度传感器、空气冷却机制和紧凑型张力传感器单元, 形成一体化混合驱动伺服关节, 质量仅有391 g。该关节通过气-电混合驱动器输出直线运动, 再经线缆-滑轮系统转换为旋转运动, 可实现机械臂的7自由度配置。在驱动方式上, 气动驱动提供主要动力, 电动驱动进行精确修正。试验测得最大球拍速度可达19 m/s。这一创新的混合驱动方案有效解决了速度与精

度难以兼顾的问题, 为高速人形机器人的研究设计提供了有价值的参考。

随着机器人应用领域不断向家用和大众市场扩展, 机器人关节设计正朝着轻量化、绿色环保和高度集成化方向快速发展。基于这一趋势, 下文将重点介绍一体化伺服关节的构型设计及其技术特点。

### 3 一体化伺服关节构型

一体化伺服关节作为机器人领域的核心模块化组件, 实现了控制器、编码器、伺服驱动器、无框力矩电动机、减速机构(包括谐波减速器和行星减速器)、传感器以及传动部件(如PRSM)等关键功能单元的高度集成<sup>[71]</sup>。该组件在人形机器人中占比超过70%, 在机械臂中更是达到90%的占比, 不仅是机器人核心价值所在, 也是决定机器人整体成本的关键要素。

一体化直线关节采用电动机与PRSM的螺母的一体化设计, 即螺母为电动机转子, 螺母旋转驱动滚柱和丝杠运动, 实现推杆输出直线运动。一体化直线关节及其构型如图6所示。

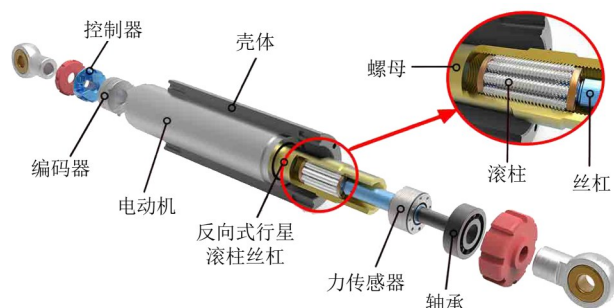


图6 一体化电驱直线伺服关节构型

Fig. 6 Integrated electric drive linear servo joint configuration

较而言, 一体化旋转关节在当前机器人中应用更广, 其构型如图7所示。

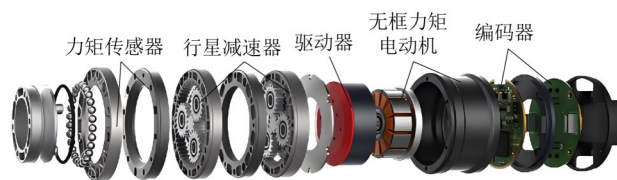


图7 一体化旋转关节构型

Fig. 7 Integrated rotating joint configuration

一体化旋转关节构型包括“T形关节”和“I形关节”<sup>[72]</sup>。如图8所示, T形关节安装面与输出面垂直, 具有一定的防护能力, 并且通过配置连杆, 可以方便地直接组装成多轴机械臂。

如图9所示, I形结构的安装面与输出面平行, 具有更紧凑的设计, 通常被嵌入安装在机器人壳体

内部。吕石磊等<sup>[73]</sup>基于现有技术设计的一款一体化机器人关节就是典型的I型关节，其集成了电动机驱动、谐波传动、高精度位置反馈、温度监测及运动感知功能。该关节峰值扭矩达74.4 N·m，质量1.6 kg，并支持多种连接方式以适应不同构型，具有较高的通用性，有助于推动机器人技术的规模化应用。



图8 T形关节

Fig. 8 T-shaped joint

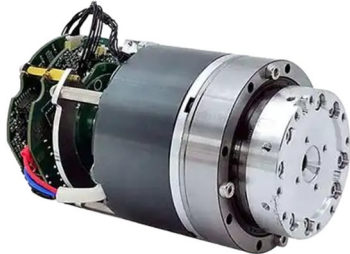


图9 I形关节

Fig. 9 I-shaped joint

洪健等<sup>[74]</sup>研发的高性能移动机器人一体化旋转关节模组采用创新设计，将外转子电动机与中空内置行星减速器集成，同时融合驱动单元和磁编码器。该关节运用高强铝合金行星架并经过有限元优化设计，直径尺寸100×36.8 mm，质量仅有636.8 g，实现了93.1 N·m/kg的高转矩密度，为轻量化高性能关节技术发展提供了新方案。

受机器人内部空间限制，各驱动部件需在最小体积下输出更大力矩。一体化关节的发展将持续追求更高转矩密度、更小体积、更轻质量等目标，以满足高性能机器人的需求。

在机器人的应用中，一体化直线伺服关节采用纵向布置方式，可最大化利用手臂或腿部的内部空间。这种布置方式在静止状态下可维持下半身稳定，无需额外能量用于姿态锁定；同时，通过提升机器人腿部重心位置，可有效降低运动惯量，进一步优化整体性能表现。目前，在机器人中采用直线关节的有特斯拉机器人和开普勒机器人。

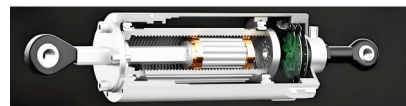
特斯拉机器人Optimus的旋转关节<sup>[91-2]</sup>由定制的永磁电动机+角接触球轴承+谐波减速器+交叉滚子轴承+力矩传感器+位置传感器(双边)+驱动器+机械离合器+关节CNC件组成，采取了非中空走线方式，主要分为20/0.55、110/1.62、180 N·m/2.26 kg等3种规格；直线关节由永磁电动机+球轴承+四点角接触轴承+IPRSM+力传感器+位置传感器(单编)+驱动器+关节CNC件组成，包括500/0.36、3 900/0.93、8 000 N/2.2 kg等3种规格。不同样式的关节采用了多零部

件耦合的设计方式。如图10(a)所示，特斯拉机器人关节有多重规格，可以满足机器人不同身体部位的关节需求，为机器人模拟人类各种运动的协调性和多自由度灵活性奠定了基础。

Actuator portfolio-six unique designs

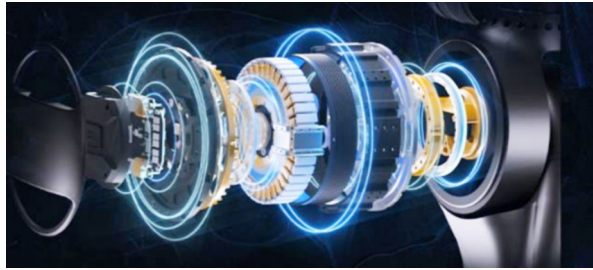
(a) 特斯拉人形机器人Optimus关节<sup>[75]</sup>

KEPLERGEAR 自研行星滚柱丝杠执行器



KEPLERGEAR 自研旋转型执行器

(b) 开普勒自研一体化关节<sup>[76]</sup>(c) 宇树机器人M107关节电动机<sup>[77]</sup>(d) 智元机器人一体化关节模组<sup>[78]</sup>(e) 优必选机器人一体化关节<sup>[79]</sup>



(f) 傅里叶机器人一体化关节<sup>[80]</sup>

图10 机器人关节构型

Fig. 10 Robot joint configuration

开普勒人形机器人包括先行者K1、先行者S1和先行者D1等3个型号<sup>[16]5-13</sup>, 其内部搭配有开普勒自研KeplerGear精旋动力执行器和自研KeplerForce行星动力滚柱丝杠执行器, 如图10(b)所示。旋转关节用于腰部及关节处, 峰值扭矩可达220 N·m, 重复定位精度为0.01°, 控制四肢的一体化直线关节推力可达8 200 N, 比普通电动机定位更精准、爆发力更强、响应更迅速。

宇树机器人Unitree G1采用自研G1关节模组, 其带双编码器的行星减速器关节模组最大瞬时转矩120 N·m; 其Unitree H1机器人搭配有自研M107关节电动机<sup>[15]3-4</sup>, 质量1.9kg, 峰值扭矩密度189 N·m/kg, 最大关节转矩360 N·m, 如图10(c)所示。

智元机器人A1采用高可靠、轻量化、超高槽满率绕线工艺的量产自研一体化关节<sup>[17]4-6</sup>, 如图10(d)所示。该一体化关节中的自研电动机PowerFlow使用准直驱技术实现低齿槽转矩, 整个关节质量仅有1.6 kg, 最高峰转矩可达430 N·m, 转矩密度50 N·m/kg, 具有

极好的动态性能, 可支持机器人长时间的稳定行走。

优必选Walker机器人中的一体化关节集成了高密度无框力矩电动机、双位置编码器、行星/谐波减速器和高性能处理控制器<sup>[14]2-3</sup>, 如图10(e)所示。Walker X和Walker S系列机器人关节性能分别能够达到最大转矩200、300 N·m, 最大转速90、130 r/min。

傅里叶机器人GR-1采用集成了电动机、驱动器、减速器及编码器的自研FSA一体化关节, 如图10(f)所示, 其最大峰值扭矩达230 N·m; GR-2采用全新版本的FSA 2.0执行器, 关节峰值扭矩可达380 N·m, 采用双编码器系统, 具有更高的精度。

表2为典型机器人一体化关节性能参数。综合分析可知, 特斯拉Optimus的一体化旋转关节转矩覆盖20、110、180 N·m, 转矩密度达到45 N·m/kg以上, 而直线关节的推力范围较广, 包括500、3 900、8 000 N。开普勒先行者的旋转关节采用KeplerGear精旋动力执行器, 转矩达到220 N·m, 直线方案则使用KeplerForce行星动力滚柱丝杠执行器, 推力可高达8 200 N, 其转矩密度较高, 可达200 N·m/kg, 显著高于特斯拉Optimus。其他机器人关节如宇树Unitree采用M107关节电动机模组, 转矩为360 N·m, 转矩密度为189 N·m/kg; 智元远征的Power Flow关节模组转矩为350 N·m, 转矩密度为219 N·m/kg; 优必选Walker伺服关节搭配谐波减速器, 转矩为300 N·m, 转矩密度为200 N·m/kg; 傅里叶GR的高性能FSA一体化关节转矩最高, 达到380 N·m; 小米CyberOne采用双电动机加减速器方案, 转矩为300 N·m, 转矩密度为96 N·m/kg, 相对较低。

表2 机器人一体化关节性能参数<sup>[81]</sup>

Tab.2 Integrated joint performance parameters of robots

机器人	特斯拉Optimus		开普勒先行者		宇树Unitree	智元远征	优必选Walker	傅里叶GR <sup>[82]</sup>	小米CyberOne
一体化伺服关节方案	旋转:电动机+减速器+关节CNC件	直线:电动机+IPRSM+关节CNC件	旋转:Kepler-Gear精旋动力执行器	直线:KeplerForce行星动力滚柱丝杠执行器	M107关节电动机模组	Power Flow关节模组	伺服关节+谐波减速器	高性能FSA一体化关节	双电动机+减速器
转矩/N·m	20、110、180	—	220	—	360	350	300	380	300
推力/N	—	500、3 900、8 000	—	8 200	—	—	—	—	—
转矩密度N·m/kg	≥45 <sup>[83]</sup>		200		189	219	200	—	96

整体来看, 开普勒先行者在转矩密度和推力方面表现突出, 而特斯拉Optimus的直线关节推力范围更广。其他机器人的一体化关节在转矩和转矩密度上各有优势, 反映出不同技术路线的特点。未来机器人关节将以提升转矩密度、实现轻量化、高效能、扩展推力范围为目标, 向适应多样化任务方向发展。

如今机器人中的关节大都是电驱动, 一体化电驱直线伺服关节作为新一代智能机器人关键核心部件, 相比液压驱动关节“跑冒滴漏”造成的低可靠性、高成本、低能效、可控性不足的技术局限, 具有结构紧凑、高负载、低自重、耐冲击、效率高、易维护等优点。不仅可应用于机器人, 而且对航空、

航天、无人机、军用等国防重要装备的效能提升具有重要战略意义。下面将介绍一体化电驱直线伺服关节的关键技术。

#### 4 一体化电驱直线伺服关节关键技术

一体化电驱直线伺服关节作为智能机器人核心部件，其关键技术研究 and 规模化应用已成为全球关注的焦点。国内外领先的机器人企业和科研机构纷纷将其列为重点研发方向，使之成为该领域新的技术竞争制高点。纵观国内外在一体化直线伺服关节领域的研究与发展现状，在一体化电驱直线伺服关节的设计与制造领域还面临以下几个主要问题：

(1) 关节构型设计方面。现有直线伺服关节普遍存在集成度低、尺寸大、自重大、构型单一等问题，导致整体系统在体积和质量上过于庞大，难以在机器人和机械臂中实现应用。特别是在需要高精度和高负载能力的场合，现有机器人关节的构型设计往往不足以满足高力重比、高精度、长寿命和低成本的多目标需求。

(2) 核心传动部件的设计与制造方面。PRSM 作为机器人一体化直线关节中高精度、高负载传动系统的关键部件，亟须优化 PRSM 的参数设计、材料选择和形状控制；同时，应加强摩擦副的热处理、喷丸强化、离子注入等典型强化改性技术，提高传动部件表面的接触疲劳寿命，实现传动摩擦副的耐磨、抗疲劳、自润滑可靠制造。

(3) 关节驱动控制方面。现有技术在控制精度和重复定位精度上仍存在较大提升空间。尤其在人形机器人的机械臂和大腿等高精度、高负载的应用场景中，随着运动速度和负载的增加，细微的误差会在多次循环中逐渐放大，导致肘部或腿部关节的定位精度下降，影响机器人执行复杂任务时的稳定性和精度；提升直线关节伺服驱动技术，开发满足高寿命、高精度、高可靠性、高负载要求的先进控制方案，研究复杂运动控制下的高频响力位混合控制方法及控制系统，是提升一体化直线伺服关节性能的关键。

(4) 国内无框电动机的最高功率密度可达 8.1 W/kg，虽然接近国际水平，但难以满足机器人关节对高功率密度、小型化及大力重比的严苛需求。要突破这一困局，需通过分数槽拓扑设计、碳纤维转子缠绕等先进技术，重构磁场分布，优化磁路系统，提升磁场利用效率，进而提升转矩输出；围绕绕组成型、定转子间隙控制等环节的微米级装配难题，升级高精度制造工艺；同时，亟须开发兼具高磁能

积与成本优势的永磁体、耐高温绝缘材料等关键材料，摆脱对进口材料的依赖。只有实现磁-热-力多物理场的协同优化，构建高性价比的磁路系统与热管理系统，才能推动无框电动机向更小体积、更高功率密度方向跨越式发展。

##### 4.1 构型设计及拓扑优化技术

###### 4.2.1 一体化关节构型设计

一体化直线伺服关节的构型设计直接决定了其结构形式与运动特性，需要从集成化布局、传动方式选择、轻量化实现 3 个维度展开系统性设计<sup>[84]</sup>。

首先，通过优化驱动器、传感器和散热结构的空间布局，实现功能模块的高度集成；其次，根据应用场景匹配高效的传动与驱动组合方案，确保运动性能与能耗的平衡；最后，针对轻量化需求，结合拓扑优化方法构建多材料复合模型，通过物理参数驱动的材料插值表征技术，在增材制造约束下实现结构-材料的协同优化。

当前，构型设计方案采用集成式无框电动机直线驱动架构，其核心设计理念是将无框电动机、驱动单元和传动部件(如行星滚柱丝杠 PRSM)集成于单一模块<sup>[55]6-8</sup>。该设计是由电动机转子直接驱动传动机构，将旋转运动转换为末端执行器的直线位移，并通过闭环控制实现精确的关节运动控制。这种集成化设计方案显著提升了机器人关节的紧凑性，使其能够在有限的空间和质量约束条件下实现更大的载荷输出。

然而现有研究表明，虽然无框电动机直线驱动构型设计已实现基础模块的集成，但在高功率密度应用场景中仍存在明显不足。以 PRSM 传动系统为例，其工作过程中因螺纹间摩擦产生的热量会导致一系列问题<sup>[85]</sup>，PRSM 与电动机转子的热膨胀系数匹配问题、热传递效应以及热-力-磁多场耦合效应尚未得到有效解决。当温升超过临界阈值时，不仅会导致螺纹结构发生热变形，还会引起电动机转子永磁体的退磁现象，从而显著降低系统的工作效率和运动精度。

因此，在一体化关节的构型设计中，需建立多目标优化模型：以结构柔顺性、散热效率、疲劳损伤和关键位移偏差为优化目标，通过多材料拓扑优化策略平衡性能指标。同时，需综合考虑伺服关节运行中力场、热场、电场与磁场的多物理场耦合效应，从结构-功能一体化角度实现轻量化与高性能的创新性融合。此外，采用纵向串联+横向并联的新型空间布局方案，可在缩短传动链长度的同时提升空间利用率，使关节模块体积缩小，并显著增强机器人整机的紧凑性和运动灵活性。

#### 4.2.2 关节拓扑优化技术

拓扑优化技术是一种基于数学和计算方法的工程优化技术,旨在在给定的设计空间、载荷条件和约束下,寻找材料的最优分布方案。以实现性能目标的拓扑优化数学模型通常由3个基本要素构成:目标函数、设计变量和约束条件<sup>[86]</sup>。

目标函数是优化问题的性能指标,通常表示为需要最大化或最小化的物理量,其具体形式取决于工程应用场景。在航空航天领域,结构优化常以质量最小化为目标以提高飞行性能;在机械工程领域,则常以应力集中系数最小化为目标来提升结构的疲劳寿命。设计变量是指在优化过程中可独立调整的结构参数,其选取直接影响优化效果。约束条件则包括结构性能要求和设计变量的取值范围,通常以不等式或等式约束的形式表达。在工程实践中,约束条件的合理设定对保证优化结果的可行性至关重要。机器人一体化关节的优化设计更为复杂,需要同时考虑轻量化、高功率密度、运动精度等多重目标,属于典型的多目标优化问题。

拓扑优化技术在机器人构型设计中具有诸多案例。SUN等<sup>[87]</sup>在对机器人关节优化过程中考虑了关节结构不同轴的扭转刚度和旋转灵活性,在设计问题时引入人工弹簧元件,以实现应力分布的平衡;通过多目标算法,在保持弯曲柔性的同时实现了连续型机器人高扭转刚度。ZONG等<sup>[88]</sup>结合增材制造拓扑优化技术,有效减少了四足机器人肢体腿单元的冗余材料,使其质量降低24.5%并显著提高了响应能力。拓扑优化技术在工业机器人中也有很多应用。SRINIVAS等<sup>[89]</sup>通过把体积分数控制在0.3~0.9范围内,将目标函数选择为最大化刚度或最小化柔度,使KUKA KR16机器人体积减小了30%~50%,并获得了更好的性能。在此基础上,ABDULRAHMAN等<sup>[90]</sup>在不降低性能的前提下,采用拓扑优化技术对KUKA KR16机器人上臂进行减重设计,成功将上臂质量减轻40%,使得机械臂总质量减少超过9.745%。

拓扑优化技术主要基于静态分析或多体动力学分析,并常与其他创新方法结合,以进一步提升优化效果。ZHANG等<sup>[91]</sup>提出了一种融合刚柔耦合动力学分析与惯性释放法的拓扑优化框架,突破了传统静态分析与多体动力学优化的局限性。通过融合刚柔耦合动力学分析精准提取双足机器人动态行走中的关节载荷,结合惯性释放法构建无约束平衡方程,实现了运动部件在真实加速度条件下的应力仿真,误差控制在3.78%以内。该方法首次将动态载荷直

接映射至静态优化流程,形成动态仿真-载荷提取-无约束优化的闭环,使双足机器人的大腿和小腿质量分别减少了15.69%和9.09%。LIU等<sup>[92]</sup>提出了一种创新的协作机器人轻量化设计方法,通过正交试验驱动拓扑优化,能够更准确地捕捉真实工作状态下的极限载荷,突破了传统经验方法的局限性。该方法的核心创新在于采用系统化的试验设计来识别极端工况,而非依赖设计者的主观经验判断。研究通过有限元分析和极差分析相结合的方式,使用拓扑优化技术,成功降低了6.87%的机器人末端位移,同时实现了23.69%的减重。WANG等<sup>[93]</sup>则采用尺寸参数与结构拓扑集成设计方法,使平面5旋转关节机器人的刚度提升了一倍。此外,拓扑优化还可与参数系统优化<sup>[94]</sup>、模态分析<sup>[95]</sup>等方法相结合,在保证机器人性能的同时,进一步优化其质量和体积。

未来机器人一体化关节的拓扑优化应围绕多目标协同优化、高精度优化模型建模和创新方法结合等关键技术展开。核心在于通过动态载荷与静态优化结合,将真实工况下的多物理场载荷精准映射至优化模型;结合增材制造约束和智能算法实现材料高效分布;性能驱动的优化方法不再局限于传统几何约束,而是直接以关节实际性能指标作为优化目标;结合跨尺度协同设计,同时考虑宏观结构布局和微观材料分布,在显著减轻质量的同时,确保关节具备优异综合性能。

将技术核心聚焦于“结构-材料-工艺”一体化设计,通过刚柔耦合动力学分析、多目标函数优化等,可实现从宏观性能目标到微观材料布局的传递,满足高功率密度、高动态精度及可扩展性需求,推动机器人关节向更轻、更强、更智能的方向演进。

#### 4.2 核心传动部件制造技术

近年来,随着国内外对机器人相关热度的不断提升以及对人形机器人整机设计技术的深入研究,PRSM作为机器人一体化直线伺服关节中的核心传动部件正在受到越来越多的关注。PRSM是一种将旋转运动转化为直线输出运动的传动机构,主要由螺母、丝杠、滚柱、内齿圈和保持架5部分组成<sup>[96]</sup>,其组成如图11所示。

相比于传统的滚珠丝杠,PRSM有更多的接触点和更大的接触半径。相同规格下,PRSM承载能力提高6倍,空间节省1/3,寿命提升14倍,具有明显的大力重比优势,尤其是在有限安装空间下能够实现小尺寸、大推力和快响应。此外,PRSM还具有较高的耐振动和抗冲击性,运行时噪声较低<sup>[97]</sup>,是高负载、高精度、快响应要求下,机器人一体化直线伺

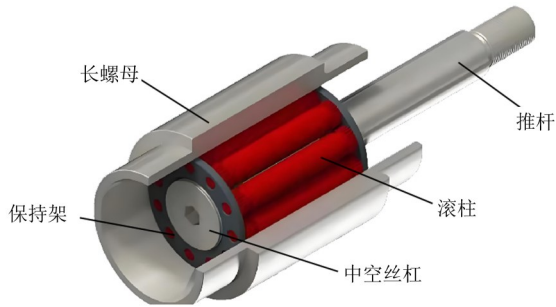


图 11 PRSM 构型

Fig. 11 PRSM configuration

服关节传动部件的最佳选择之一。

随着有关 PRSM 参数匹配设计<sup>[98]</sup>、弹塑性接触及精度损失<sup>[99]</sup>、螺纹动态啮合特性<sup>[100]</sup>、高刚性耐磨材料表面改性<sup>[101]</sup>等相关技术的不断突破，为一体化直线伺服关节的研制和产业化提供了有力的技术支撑，并在国内外基于“直线关节驱动+旋转关节驱动”新构型的人形机器人研制方面取得了初步成效。

我国众多学者也对 PRSM 进行了较为深入的研究。LIU 等<sup>[102]</sup>研究了 PRSM 的啮合性能，通过采用多种类型的螺纹线滚柱提升工作寿命并实现更高的传动速度。NIU 等<sup>[103]</sup>结合集成信号处理技术和轻量化模型，对 PRSM 进行高精度诊断，为提升 PRSM 工作寿命提出新思路。MA 等<sup>[104-105]</sup>深入研究了 PRSM 载荷分布特性、螺纹牙摩擦转矩对运动及自身效率产生的影响<sup>[106-107]</sup>、运动和承载特性<sup>[108]</sup>等，并对 PRSM 机构进行了动力学分析和疲劳寿命预测分析<sup>[109]</sup>，为 PRSM 在一体化伺服关节中的应用提供了理论基础。

关于 PRSM 的制造工艺及方法，受其结构特点和螺纹啮合一致性要求，目前的主流方法是采用螺纹磨削，也有采用硬车、旋风铣、滚压等方式。其中，螺纹磨削工艺精度高（可达  $\mu\text{m}$  级）、表面质量好，适用于高精度场合，但设备成本高、效率较低；硬车技术加工效率较高、柔性好，适合中小批量生产，但刀具磨损快，精度和表面粗糙度略逊于磨削；旋风铣效率极高、成本低，适合大批量粗加工或中等精度需求，但动态精度稳定性较差，需后续精加工；滚压工艺通过冷成形加工，能提升表面硬度和疲劳寿命，材料利用率高且效率快，但对毛坯尺寸一致性要求严苛，且不适用于高硬度材料。

在 PRSM 制造工艺的研究中，董超<sup>[110]</sup>对 PRSM 的小螺距螺纹进行数控磨削工艺优化，实现了小螺距螺距的高精度加工。徐洪伟<sup>[111]</sup>和康新泓<sup>[112]</sup>分别分析了砂轮廓形和安装误差对螺纹精度的影响以及安装误差和机床运动误差的影响，并通过试验研究了

PRSM 内外螺纹的磨削工艺。XU 等<sup>[113]</sup>系统分析了 PRSM 微螺距内螺纹磨削工艺，通过试验和数值建模探究了砂轮修整、安装误差及磨削参数对螺母轮廓精度的影响规律，为工程实践中微螺距 PRSM 螺母的高效精密加工提供了支持。李承胜等<sup>[114]</sup>采用二次滚压工艺校直弯曲滚柱，有效消除齿顶兔耳缺陷，为滚压校直工艺提供了技术支撑。DUAN 等<sup>[115]</sup>分析了 PRSM 螺纹车削过程中切削参数对切削力、温度及刀具磨损的影响规律，建立切削力预测模型，为优化加工工艺提供了依据。

对于一体化电驱直线伺服关节而言，低成本和规模化生产的难点在于含多头螺纹的长螺母，需要探索一种新工艺新方法，实现大长径比螺母的精密高效加工。基于目前采用较多的精密磨削工艺，还需构建摩擦副的接触疲劳模型和精确几何模型，综合考虑宏观微观形貌、表面完整性以及多元误差耦合效应，从而形成抗疲劳耐磨特性的主动优化设计方法。同时，应建立融合温度场、相变场、应力场与渗碳场的多物理场耦合热处理仿真模型，结合喷丸强化工艺的离散元-有限元联合分析方法，提升摩擦副耐磨性与使用寿命。

针对高速重载工况下的长使用寿命需求，需深入探究螺纹表面涂层的制备工艺与磨损机制。通过研究不同工艺参数对涂层结构的影响规律，揭示涂层在极端工况下的失效机制，进而开发具有高承载能力、优异膜基结合强度和低摩擦因数的表面处理技术，最终实现传动部件在耐磨、抗损和长效运行方面的性能突破。

### 4.3 关节高频响控制策略

#### 4.3.1 高精度混合控制

在一体化电驱直线伺服关节的机器人应用中，满足高控制精度、高响应速度、高稳定性和高可靠性的需求是核心目标。为达成这一目标，不仅需要提升系统的动态响应能力，还需有效抑制高频振动，减少瞬时冲击，并优化伺服驱动电动机的闭环控制<sup>[116]</sup>。此外，通过深入研究典型机器人载荷特性，构建适用于直线伺服关节的高精度、高频响力位混合控制策略，是实现这一目标的关键路径。

PID 控制是传统控制算法中最常用的控制算法之一，包括经典的电流、速度、位置三环 PID 控制<sup>[117]</sup>，可实现补偿关节柔性非线性影响的单回路 PID 控制<sup>[118]</sup>等。将传统控制算法应用于机器人关节的控制系统时，出现了一些如调参困难、响应速度有限、抗干扰能力弱等问题，特别是对精度、功率密度等

有特殊要求的一体化直线伺服关节, 传统控制算法不能够实现对直线伺服关节精确稳定的控制。

随着现代控制策略的发展, 现代控制算法凭借控制精度高、参数可调、抗干扰能力强等优势逐渐被应用到一体化直线伺服关节的控制中, 并实现了较好的控制效果。现代控制算法较为丰富, 在典型的控制算法中, 滑模控制算法由于自身的模型依赖性 & 参数敏感性, 其被应用于伺服关节(强耦合系统)时控制精度有待提高, 但通过与集成学习相结合, 可使控制器能够以-3个数量级的精度跟踪底座和关节的预期轨迹, 同时还能抑制关节的多重柔性振动<sup>[119]</sup>, 保证闭环系统在不确定性存在下的全局渐近稳定性<sup>[120]</sup>; 神经网络自适应控制(图 12)与PID控制算法相比, 基于动态曲面优化的RBF神经网络自适应控制算法的轨迹跟踪误差峰值可降低到 $\pm 0.05 \text{ rad}$ <sup>[121]</sup>, 实现了机器人关节模型参数的精确逼近; 模糊控制与传统的PID控制和非线性滑模控制相比, 模糊控制在处理非线性和干扰方面更有效, 同时还线性化了受控系统的滞后<sup>[122]</sup>; 模型预测控制相对于经典控制策略, 则具有更好的大范围定位能力<sup>[123]</sup>; 自抗扰控制算法能明显抑制关节模块的扰动, 提高了关节模块的控制精度<sup>[124]</sup>。

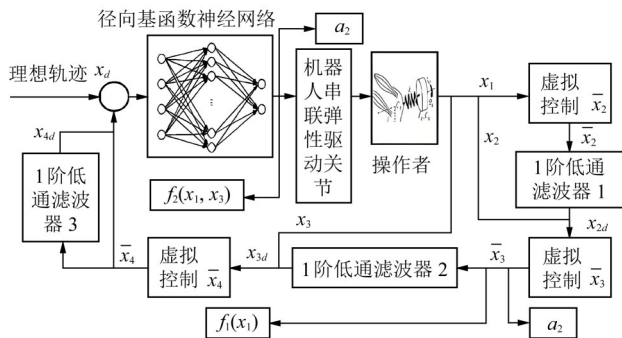


图 12 RBF神经网络自适应控制算法

Fig. 12 RBF neural network adaptive control algorithm

为进一步提升直线伺服关节的性能, 需对多种机器人在不同场景下的伺服特性进行系统性研究, 建立关节负载特性谱, 以揭示其在复杂工况下的负载分布及功率特性。基于此, 应提出一种适应不同工况的力位混合控制方法, 实现力控与位置控制之间的动态切换, 以显著提高机器人在多样化场景下的运动精度和响应速度。

针对多工况下控制参数频繁调整的问题, 可引入深度神经网络技术, 实现伺服关节参数的动态优化。通过实时监测关节的运动状态, 结合不同的工作环境和负载条件, 自动调整伺服电动机的惯量比、速度增益、前馈增益等关键控制参数, 确保重复定

位精度达到丝级甚至微米级。这种方法不仅能够提升关节在多场景下的控制精度和伺服效果, 还能确保其在复杂应用中稳定、高效地执行任务, 为直线伺服关节在人形机器人等典型场景中的应用提供坚实的技术保障。

#### 4.3.2 传动部件对控制策略的影响

通过一体化机电协同设计, 可以显著降低控制系统的复杂度。具体而言, 采用滚柱对称布局、螺旋纹牙载荷均匀分布以及等应力分布等设计手段, 能够使传动系统的刚度曲线趋于线性化, 从而有效减少非线性迟延效应<sup>[125]</sup>。优化机电作动系统中铰链位置及输出速度的最佳匹配关系, 可使得布局最优, 简化控制关系<sup>[126]</sup>。此外, 通过合理的建模方法, 可解决耦合电磁机械系统的非线性控制难题, 避免传统机制建模的复杂性, 优化控制参数。

在 PRSM 内部集成力/力矩传感器、编码器等嵌入式传感装置, 能够直接获取负载端的力学状态, 减少对外部测量设备的依赖, 简化整体结构设计。同时, 将伺服电动机、PRSM 和轴承集成为模块化单元, 采用电动机直接驱动丝杠的方式, 通过结构刚性耦合可有效减少多体动力学耦合效应<sup>[127]</sup>, 消除联轴器带来的扭转谐振问题, 使系统动力学特性更接近单自由度模型。这种一体化设计不仅可提升系统的整体性能, 还降低了控制算法对机械缺陷的补偿需求, 从而减少对高算力或复杂算法的依赖, 可实现机电系统的高效协同。

如今, ChatGPT、DeepSeek 等<sup>[128]</sup>AI 大模型层出不穷, 智能控制具有极强的自主学习能力<sup>[129]</sup>, 深度强化学习和学习与优化方法的融合将增强一体化关节在现实场景中的适应性和性能<sup>[130]</sup>。人工智能算法可通过在线辨识摩擦模型、间隙参数, 实时调整前馈补偿项, 但其无法完全消除传动部件的物理影响。动态补偿受限于机械磨损的不可逆性, 高频振动可能超出传感器与算法的感知范围, 而材料强度与热稳定性等硬约束更是无法通过算法突破。因此, 智能控制需与机械设计协同, 而非完全消除传动本身设计的影响。

## 5 未来发展方向

人形机器人作为未来适用于家庭、教育、服务和科研等多元化应用场景的重要载体, 其核心性能很大程度上取决于驱动系统的设计。一体化伺服关节作为机器人的关键驱动部件, 直接决定了系统在高集成度、运动精度和动态性能等方面的表现。一体化电驱直线伺服关节因其清洁能源特性、低转动

惯量、高集成度和优越的力重比等优势，正逐渐成为人形机器人肢体部位关节驱动的最佳方案。随着相关技术的持续发展和创新构型的不断涌现，机器人一体化电驱直线伺服关节的性能提升将主要围绕以下几个关键方向展开。

**高集成度关节构型。**关节构型集成度决定其在机器人中占用的体积和质量。电动机作为驱动部件，其定子和转子应分别作为外部壳体和内部传动部件的主体结构设计；同时，电动机与传动机构、驱动器、传感器、散热元件等深度集成，通过控制系统直接驱动整个关节输出直线运动，形成紧凑的机电一体化功能模块；这种集成化设计可减少零件数量，进一步压缩占用空间，提升输出能力。设计方法上，应采用先进模块化设计理念、多物理场耦合优化方法等，解决当前关节部件分散、布线复杂、体积和质量过大、内部空间紧张等问题；未来将重点攻关新型关节构型设计，开发高效散热结构，优化电气与机械接口标准，应用创新工艺实现复杂结构尺寸最小化、功能最大化、便于装配的一体化关节。

**轻量化关节设计。**合理拓扑优化与高强度轻量化材料的应用，是实现一体化关节轻量化的关键。对关节外壳、关键支撑结构和传动部件进行材料选择和拓扑优化，可提升人形机器人运动性能、延长续航时间、提高系统效率、降低惯性冲击；受益于各类高强度、高刚度材料的出现，结合创新晶格填充优化设计，利用先进仿真驱动设计移除冗余材料，在保证功能需求和刚强度的前提下，实现部件极致减重。

**高性能传动部件。**传动部件性能直接影响关节的输出速度、推力精度、刚度、效率和使用寿命，其高效率、轻量化和长寿命设计是机器人关节的核心问题。IPRSM通过将螺母与电动机转子集成，将旋转运动转化为直线运动，凭借高负载能力、高刚度和高效率的特点，成为一体化电驱直线伺服关节的关键传动部件。此外，还需探索摩擦驱动或绳索驱动等非传统方案，从传动原理、材料配对、表面处理和润滑机制等方面创新，以提升传动效率、精度和动态响应速度。未来研究应聚焦于新型高效低噪低摩擦传动构型的设计与优化，开发IPRSM的长寿命抗磨损表面处理技术和润滑方案，包括螺纹表面涂层和自润滑技术，同时，集成高效主动冷却技术，以提升功率密度和可靠性。

**高精度混合控制。**合理的控制算法对于一体化关节的最终性能有很大的影响。人形机器人的灵巧操作、柔顺人机交互和高动态平衡依赖于关节的高

精度、高响应带宽与力位混合控制能力。当前，控制算法已能满足动态特性要求不高的场景，但实现力矩输出与高精度位置控制的统一仍是难题。未来应基于AI大模型开发自主学习控制算法，并采用高精度控制器，在运动控制中通过算法自主学习优化参数或预测抑制扰动，补偿机械系统误差。同时，需设计具有前馈补偿和实时扰动观测器的先进控制算法(如自适应控制、滑模变结构控制、基于模型的控制)，以实现一体化电驱直线伺服关节的高精度控制。

## 6 结论

1) 详细分析了国内外典型人形机器人及其驱动关节的关键参数，深入探讨了不同机器人的性能特点、研究价值及未来发展方向。系统分析一体化关节在旋转和直线两种形式下的传动原理、结构组成及典型应用，并全面梳理了国内外相关技术的研究进展。分析表明，关节构型设计与直线驱动形式的创新对提升机器人运动精度和能量利用效率具有决定性作用，传动部件的优化设计不仅能显著改善机械性能，还能在一定程度上降低控制策略的复杂度。这些重要发现为机器人关节技术的进一步发展提供了坚实的支撑。

2) 提出了传动部件优化设计与控制策略的协同优化机制，全面总结了一体化电驱直线伺服关节的关键技术，包括构型设计及拓扑优化技术、核心传动部件制造技术、关节高频响控制策略等。这些研究成果对推动机器人关节技术向高性能、智能化方向发展具有重要的指导意义。随着机器人应用场景的多元化发展，对关节的环境适应性和人机交互安全性提出了更高要求，这些都将成为未来研究的重要方向。

3) 展望未来，一体化电驱直线伺服关节将朝着高集成度关节构型、轻量化设计、高性能传动部件和高精度混合控制的方向发展。这不仅会显著提升机器人的工作精度和效率，更将在灵活性、适应性和协作性方面带来革命性突破。可以预见，一体化伺服关节技术的进步将成为智能机器人发展的重要引擎，为工业制造、医疗服务、家庭服务等多个领域带来更加高效、智能和人性化的机器人解决方案，最终推动整个机器人产业的技术升级和应用拓展。

## 参 考 文 献

- [1] 龚金锭,陈紫月,蔡心远,等. 智能机器人的发展现状及前景展望[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(10): 23-25.  
GONG Jinding, CHEN Ziyue, CAI Xinyuan, et al. Development status and future outlook of intelligent robots[J]. Industrial Con-

- trol Computer, 2024, 37(10):23-25.
- [2] 商希雪. 人机交互的模式变革与治理应对——以人形机器人为例[J]. 东方法学, 2024(3):143-158.  
SHANG Xixue. Model change and governance response in human-machine interaction[J]. *Oriental Law*, 2024(3):143-158.
- [3] 央视网. 工信部发布国家重点研发计划16个重点专项2024年度项目申报指南[EB/OL]. (2024-08-09)[2025-04-08] <https://news.cctv.cn/2024/08/09/ARTIdUX4R6xEeAuWqKNGqva240809.shtml>.  
CNTV. The Ministry of Industry and Information Technology has released the application guidelines for 16 key projects of the National Key Research and Development Program for the year 2024 [EB/OL]. (2024-08-09)[2025-04-08] <https://news.cctv.cn/2024/08/09/ARTIdUX4R6xEeAuWqKNGqva240809.shtml>.
- [4] SCHWIENBACHER M, FAVOT V, BUSCHMANN T, et al. Walking humanoid robot lola [M]//Autonome Mobile Systeme 2009. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009:267-274.
- [5] 罗自荣, 洪阳, 蒋涛, 等. 微型仿生机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2024:1-19. (2024-11-01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20241031.1831.065.html>.  
LUO Zirong, HONG Yang, JIANG Tao, et al. Review of micro-bionic robots[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024:1-19. (2024-11-01). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20241031.1831.065.html>.
- [6] 孙慧超, 何林霖, 蒋雯雯, 等. 基于仿生原理的六足机器人研制[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(30):32-35.  
SUN Huichao, HE Linlin, JIANG Wenwen, et al. Development of hexapod robot based on bionic principle[J]. *Technology Innovation and Application*, 2024, 14(30):32-35.
- [7] 张成杰. 仿蜂鸟微型扑翼飞行器机器人控制器设计研究[D]. 北京:北方工业大学, 2024:2-9.  
ZHANG Chengjie. Research on the design of controllers for hummingbird-inspired flapping-wing fly [D]. Beijing: North China University of Technology, 2024:2-9.
- [8] 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 on the development and military application of humanoid robots abroad[J]. *Robot Technique and Application*, 2023(3):6-8.
- [9] 特斯拉类人机器人“Optimus”正式发布[J]. 机器人技术与应用, 2022, (06):6.  
Tesla humanoid robot 'Optimus' officially released[J]. *Robot Technique and Application*, 2022, (06):6.
- [10] 王聪聪, 钟新龙, 高旖蔚, 等. 人形机器人发展动向、趋势研判及有关建议[J]. 机器人产业, 2024, (04):16-29.  
WANG Congcong, ZHONG Xinlong, GAO Yiwei, et al. Development trends, trends analysis, and related suggestions for humanoid robots[J]. *Robot Industry*, 2024, (04):16-29.
- [11] ZIMO\_BUPT. Overview of Four Legged Robots (Part 1) Development Status of Four Legged Robots[EB/OL]. (2024-03-16)[2025-04-08]. [https://blog.csdn.net/qq\\_60513199/article/details/136743587](https://blog.csdn.net/qq_60513199/article/details/136743587).
- [12] TONG Y C, LIU H T, ZHANG Z T. Advancements in humanoid robots: a comprehensive review and future prospects [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(2):301-328.
- [13] 蔡鼎. 人形机器人独角兽 Figure AI“抛弃”OpenAI CEO宣布30天内要惊艳世界[N]. 每日经济新闻, 2025.  
CAI Ding. Figure AI, a humanoid robot unicorn, "abandons" OpenAI CEO and announces goal of stunning the world within 30 days [N]. *Economic Daily News*, 2025.
- [14] 周坤, 梅江平, 谢胜龙. 人形机器人研究进展与挑战[J]. 机器人技术与应用, 2025, (01):12-20.  
ZHOU Kun, MEI Jiangping, XIE Shenglong. Progress and Challenges in Research on Humanoid Robots[J]. *Robot Technique and Application*, 2025, (01):12-20.
- [15] YU S T. Yushu H1 breaks the world record for walking speed of humanoid robots [EB/OL]. (2024-03-15)[2025-04-08]. <https://www.unitree.com/news/h1-speed-record>.
- [16] 苟桂枝, 郭猛. 2024年国内人形机器人发展综述[J]. 机器人技术与应用, 2025(2):5-13.  
GOU Guizhi, GUO Meng. Summary of the development of humanoid robots in China in 2024[J]. *Robot Technique and Application*, 2025(2):5-13.
- [17] 孙慧莹, 杨复生, 潘潇. 布局未来产业前沿领域 加快人形机器人创新发展[J]. 产业创新研究, 2024(24):4-6.  
SUN Huiying, YANG Fusheng, PAN Xiao. Laying out the frontier fields of the future industry and accelerating the innovative development of humanoid robots[J]. *Industrial Innovation*, 2024(24):4-6.
- [18] 照. 小米发布全尺寸人形仿生机器人“CyberOne”[J]. 机器人技术与应用, 2022, (05):8.  
ZHAO. Xiaomi releases full-size humanoid bionic robot 'CyberOne'[J]. *Robotics Technology and Applications*, 2022(5):8.
- [19] 中新社. 人形机器人NEO来了[J]. 创新世界周刊, 2024(9):15.  
China News Agency. NEO the humanoid robot is here[J]. *Innovation World Weekly*, 2024(9):15.
- [20] CHESTNUTT J, LAU M, CHEUNG G, et al. Footstep planning for the honda ASIMO humanoid [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, Jan. 2006:629-634.
- [21] GUO L N. An integrated design method of robot intelligent joints based on artificial intelligence [C]//International Conference on Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2022). SPIE, 2023:126.
- [22] 王光建, 梁锡昌, 蒋建东. 机器人关节的发展现状与趋势[J]. 机械传动, 2004, 28(4):1-5.  
WANG Guangjian, LIANG Xichang, JIANG Jiandong. The present state and developing tendency of robot joint[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2004, 28(4):1-5.
- [23] SELLAOUTI R, KONNO A, OUEZDOU F B. Design of a 3 DOFs parallel actuated mechanism for a biped hip joint [C]//Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, Aug. 2002:1161-1166.
- [24] HINOJOSA W M, TSAGARAKIS N G, METTA G, et al. Performance assessment of a 3 DOF differential based waist joint for the “iCub” baby humanoid robot [C]//ROMAN 2006 - The 15th IEEE

- International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. IEEE, 2006:195-201.
- [25] HILD M, SIEDEL T, GEPPERT T. Design of a passive, bidirectional overrunning clutch for rotary joints of autonomous robots [C]//Intelligent Robotics and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011:397-405.
- [26] 金振林, 荣誉. 基于三分支非均匀分布球面并联机构的腰关节设计[J]. 中国机械工程, 2007, 18(22):2697-2699.  
JIN Zhenlin, RONG Yu. Design of a waist joint based on three branches unequal spaced distribution spherical parallel manipulator [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(22):2697-2699.
- [27] 周玉林, 杨龙, 肖超. 新型PRRR+PURU+S球面并联人形机器人踝关节机构静刚度性能分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(05):531-538.  
ZHOU Yulin, YANG Long, XIAO Chao. Static Stiffness Property Analyses of a Novel PRRR+PURU+S Spherical Parallel Humanoid Robotic Ankle Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(05):531-538.
- [28] GU L N, TIAN G J. Structural design and electrical control of a new rotary joint module [C]//Proceedings of the 2016 4th International Conference on Advanced Materials and Information Technology Processing (AMITP 2016). Atlantis Press, 2016:256-260.
- [29] 谢中取, 李龙, 罗翔, 等. 液压足式机器人关节驱动器的设计、建模与试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6):1114-1122.  
XIE Zhongqu, LI Long, LUO Xiang, et al. Design, modeling and experiment of hydraulic legged robot joint [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(6):1114-1122.
- [30] SUZUKI R, KOMAGATA M, KO T, et al. Development of 3-DOF wrist mechanism for electro-hydrostatically driven robot arm [J]. Advanced Robotics, 2020, 34(14):958-973.
- [31] YANG M X, ZHANG X, SHI Y D, et al. Mechanical design and position-tracking control of a novel robotic joint with a circular rotary electro-hydraulic actuator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(16):3680-3691.
- [32] LI J Q, CONG D C, YANG Y, et al. A hydraulic actuator for joint robots with higher torque to weight ratio [J]. Robotica, 2023, 41(2):756-774.
- [33] TANG J Z, CHENG L, LIU J Y, et al. An integrated joint for cooperative robots [C]//2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). IEEE, 2019:97-101.
- [34] 莫帅, 周长鹏, 李旭, 等. 机器人智能关节驱动结构一体化设计方法研究[J]. 纺织学报, 2022, 43(3):160-167.  
MO Shuai, ZHOU Changpeng, LI Xu, et al. Research on integrated design method of robot intelligent joint drive and control structure [J]. Journal of Textile Research, 2022, 43(3):160-167.
- [35] LIU F, SONG Z D, MA J P. Modeling and analysis of a cable-driven serial-parallel manipulator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(4):1012-1028.
- [36] BIAN Z Y, LI X N, GENG Z X, et al. A novel miniature multi-DOF three-ring-shaped piezoelectric actuator for small and light-weight robot joints [J]. Precision Engineering, 2025, 94:749-760.
- [37] 钱亚光. 特斯拉的人形机器人 [J]. 经营者(汽车商业评论), 2022, (11):107-110.  
QIAN Yaguang. Tesla's humanoid robot [J]. Operator (Automotive Business Review), 2022, (11):107-110.
- [38] KUINDERSMA S, DEITS R, FALLON M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot [J]. Autonomous Robots, 2016, 40(3):429-455.
- [39] CHESTNUTT J, LAU M, CHEUNG G, et al. Footstep planning for the honda ASIMO humanoid [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005:629-634.
- [40] FUJITA M, KUROKI Y, ISHIDA T, et al. A small humanoid robot SDR-4X for entertainment applications [C]//Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003). IEEE, 2003:938-943.
- [41] KNABE C, LEE B, HONG D. An inverted straight line mechanism for augmenting joint range of motion in a humanoid robot [C]//Volume 5B: 38th Mechanisms and Robotics Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014:V05BT08A015.
- [42] LEE Y K, LEE S J. A bio-mimetic robot arm actuated by micro EHA [C]//2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2013:39-44.
- [43] KAMINAGA H, OTSUKI S, NAKAMURA Y. Development of high-power and backdrivable linear electro-hydrostatic actuator [C]//2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2014:973-978.
- [44] 徐余恒, 薛亮. 全球人形机器人的进化之路 [J]. 上海人大月刊, 2025, (03):53-54.  
XU Yuheng, XUE Liang. The Evolution Path of Global Humanoid Robots [J]. Shanghai Renmin Monthly, 2025, (03):53-54.
- [45] 葛磊, 倪豪, 郝云晓, 等. 新型液压回转-机械直线执行器的死区补偿控制 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(8):337-347.  
GE Lei, NI Hao, HAO Yunxiao, et al. Dead zone compensation control of new hydraulic motor-mechanical linear actuator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8):337-347.
- [46] 张佳瑞, 葛磊, 郝云晓, 等. 闭式泵控液压-机械直线执行器的离散PID控制 [J]. 液压与气动, 2024, 48(9):54-60.  
ZHANG Jiarui, GE Lei, HAO Yunxiao, et al. Discrete PID control of closed pump control hydraulic-mechanical linear actuator [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(9):54-60.
- [47] MOUSAVI A, AKBARZADEH A, SHARIATEE M, et al. Design and construction of a linear-rotary joint for robotics applications [C]//2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM). IEEE, 2015:229-233.
- [48] 孙阳阳, 苏言杰. 一种电动直线驱动装置及仿人机器人关节驱动机构:CN105291131A [P]. 2019-05-31.  
SUN Yangyang, SU Yanjie. An electric linear drive device and a humanoid robot joint drive mechanism: CN105291131A [P]. 2019-05-31.
- [49] 徐志根, 廖小华, 张武. 一种用于人形机器人的直线关节:

- CN119927891A[P]. 2025-03-25.
- XU Zhigen, LIAO Xiaohua, ZHANG Wu. Linear joint for humanoid robot: CN119927891A[P]. 2025-03-25.
- [50] 杜兴, 李伟, 朱伊杰, 等. 基于行星滚柱丝杠副的柔性直线机器人关节及使用方法: CN117245687A[P]. 2024-02-27.
- DU Xing, LI Wei, ZHU Yijie, et al. Flexible linear robot joint based on planetary roller lead screw pair and using method: CN117245687A[P]. 2024-02-27.
- [51] 李汉平, 梁振楠, 杜旭超, 等. 直线关节及机器人: CN120420087A[P]. 2024-03-01.
- LI Hanping, LIANG Zhennan, DU Xuchao, et al. Linear joint and robot: CN120420087A[P]. 2024-03-01.
- [52] 牛铭奎, 高志川, 张鸿, 等. 一种机器人直线关节模组: CN120645243A[P]. 2024-09-06.
- NIU Mingkui, GAO Zhichuan, ZHANG Hong, et al. Robot linear joint module: CN120645243A[P]. 2024-09-06.
- [53] 李雪皑, 孙永军, 王君扬, 等. 一种集驱动、感知和控制的一体化直线驱动电缸: CN117578791A[P]. 2024-09-13.
- LI Xueai, SUN Yongjun, WANG Junyang, et al. Integrated linear driving electric cylinder integrating driving, sensing and control: CN117578791A[P]. 2024-09-13.
- [54] Z. J. 雅克科夫斯基, A. 杨. 具有用于有腿机器人的整合过载保护的传动装置: CN115431254A[P]. 2022-12-06.
- Z J. JACKOWSKI, A. YOUNG. Transmission with integrated overload protection for legged robots: CN115431254A[P]. 2022-12-06.
- [55] 上海开普探索机器人有限公司. 一种双足机器人: 2023116455345[P]. 2024-02-09.
- Shanghai Kepler Exploration Robot Co., Ltd. A bipedal robot: 2023116455345[P]. 2024-02-09.
- [56] 索文豪, 刘乐锋, 钱光跃, 等. 一种下肢结构及机器人: CN223479185U[P]. 2024-04-16.
- SUO Wenhao, LIU Lefeng, QIAN Guangyue, et al. A lower limb structure and robot: CN223479185U[P]. 2024-04-16.
- [57] 姜飞龙, 刘昊, 柳民, 等. 气动技术与构型组合在机器人领域的应用[J]. 机床与液压, 2022, 46(1): 50-55.
- JIANG Feilong, LIU Hao, LIU Min, et al. Application of pneumatic technology and configuration combination in robotics[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 46(1): 50-55.
- [58] LEE S, PARK S, KIM M, et al. Design of a force reflecting master arm and master hand using pneumatic actuators[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1998: 2574-2579.
- [59] TONDU B, IPPOLITO S, GUIOCHET J, et al. A seven-degrees-of-freedom robot-arm driven by pneumatic artificial muscles for humanoid robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2005, 24(4): 257-274.
- [60] 毛勇, 王家威, 庄新彦, 等. 基于气动人工肌肉的双足机器人关节设计[J]. 电子技术应用, 2006, 32(3): 78-80.
- MAO Yong, WANG Jia(qian|xin), ZHUANG Xinyan, et al. Joint design of biped robot based on pneumatic artificial muscle[J]. Application of Electronic Technique, 2006, 32(3): 78-80.
- [61] 赵怀林, 李果, 余达太. 气动人工肌肉驱动的类人关节研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(4): 81-84.
- ZHAO Huailin, LI Guo, YU Datai. A humanoid joint actuated by pneumatic artificial muscles[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2005, 26(4): 81-84.
- [62] 赵怀林, 余达太, 李果. 一个由Mckibben肌肉驱动的类人关节[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11): 1096-1100.
- ZHAO Huailin, YU Datai, LI Guo. A humanoid joint actuated by Mckibben muscles[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(11): 1096-1100.
- [63] 傅晓云, 方敏, 李宝仁. 气动人工肌肉驱动的直线关节的研究[J]. 机床与液压, 2006, 34(8): 75-76.
- FU Xiaoyun, FANG Min, LI Baoren. Research on pneumatic muscle actuators linear joint[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 34(8): 75-76.
- [64] LIN P H, SHEN T K, LIN P C, et al. Designing synergistic walking of a humanoid single leg driven by pneumatic artificial muscles: An empirical study[C]//14th International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science World Congress, IFToMM 2015. 2015.
- [65] ZANG X Z, LIU Y X, LIU X Y, et al. Design and control of a pneumatic musculoskeletal biped robot[J]. Technology and Health Care, 2016, 24(s2): S443-S454.
- [66] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G. On the design, development and motion control of a Humanoid Robotic Leg via pneumatic artificial muscles[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2016: 1637-1642.
- [67] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G. Humanoid Robotic Leg via pneumatic muscle actuators: implementation and control[J]. Meccanica, 2018, 53(1): 465-480.
- [68] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G, KOMINIAK D, et al. Towards the development of a novel upper-body pneumatic humanoid: design and implementation[C]//2016 European Control Conference (ECC). IEEE, 2016: 395-400.
- [69] ZHANG S X, GONG D X, YU J J. Design of a multi-connection pneumatic artificial muscle[C]//2022 12th International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, 2022: 301-306.
- [70] MORI S, TANAKA K, NISHIKAWA S, et al. High-speed humanoid robot arm for badminton using pneumatic-electric hybrid actuators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3601-3608.
- [71] 杨洪涛, 姜西祥, 沈梅, 等. 自驱动双关节模组同步控制系统研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(1): 190-195.
- YANG Hongtao, JIANG Xixiang, SHEN Mei, et al. Study on synchronized control system for self-driven double-jointed module[J]. Coal Mine Machinery, 2025, 46(1): 190-195.
- [72] 金力, 王成军, 夏科睿. 驱控一体化机器人关节的研制及应用[J]. 机床与液压, 2021, 49(21): 62-66.
- JIN Li, WANG Chengjun, XIA Kerui. Development and application of robot joint integrated control and drive[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(21): 62-66.
- [73] 吕石磊, 曹其新, 李想, 等. 机电一体化机器人关节及其驱控系

- 统硬件设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 111-117.
- LV Shilei, CAO Qixin, LI Xiang, et al. Design of mechatronics robot joint and its control system hardware[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 111-117.
- [74] 洪健, 蔡华祥, 王晟. 一种高性能移动机器人一体化关节模组设计[J]. 现代机械, 2022(3): 8-13.
- HONG Jian, CAI Huaxiang, WANG Sheng. Design of an integrated robot joint module for the high-performance mobile robot[J]. Modern Machinery, 2022(3): 8-13.
- [75] ROBOT L H. What reducer solutions do Tesla and 5 other humanoid machine companies use? Which of the 7 reducer companies is strong [EB/OL]. (2024-11-28) [2025-04-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1816975701791252802&wfr=spider&for=pc>.
- [76] KEPLER R. Kepler humanoid robot appears at CES exhibition, creating a new era of robots together [EB/OL]. (2024-01-05) [2025-04-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1787247603875092809&wfr=spider&for=pc>.
- [77] HEXUN N. Selling price or below \$90000! Attracted by OpenAI co-founder, Yushu releases its first humanoid machine [EB/OL]. (2023-08-17) [2025-04-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1774518463037323865&wfr=spider&for=pc>.
- [78] YUANZHAN F. In depth report on the mechanical industry: A tour of domestic humanoid robot enterprises, rapid development and transformation [EB/OL]. (2023-10-20) [2025-04-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1780211398201045090&wfr=spider&for=pc>.
- [79] UBTECH R. Ubiquitous Technology [EB/OL]. (2023-10-20) [2025-04-15]. <https://www.ubtrobot.com/cn/about/companyProfile>.
- [80] GAOGONG R. Key technology of intelligent robot "machine limb": rigid flexible coupling biomimetic transmission mechanism [EB/OL]. (2024-10-27) [2025-04-15]. [http://www.robotcz.cn/third\\_1.asp?txtid=114](http://www.robotcz.cn/third_1.asp?txtid=114).
- [81] CHEN S. Humanoid robot [EB/OL]. (2024-11-22) [2025-04-08]. <https://mp.weixin.qq.com/s/85EkzhzGKtKhY-jEV-uh6A>.
- [82] YOU D. Exploring the foundation of innovative robot technology, Fourier N1 open-source humanoid robot [EB/OL]. (2025-04-14) [2025-04-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/rkNpavYYqIRS8ER-Wn4xPeg>.
- [83] ZHANG Y. 5000 units in mass production! Optimus standalone cost drops by 70%? Tesla robots bring new shock [EB/OL]. (2025-03-26) [2025-04-08]. <https://www.elecfans.com/d/6499266.html>.
- [84] REN H X, QIANG L G, ZHANG K J, et al. Design of universal integrated robot joint and its applications in multiple fields[C]//2023 2nd International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE). IEEE, 2023: 1-5.
- [85] 乔冠. 行星滚柱丝杠副摩擦转矩及热特性的理论与试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019: 2-6.
- QIAO Guan. Theoretical and experimental research on the friction torque and ther [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019: 2-6.
- [86] 费军廷. 面向空间建造的同质模块化机器人拓扑结构动态重构方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2025: 4-8.
- FEI Junting. Research on Self-Reconfiguration Methods for Homogeneous Modular Robots in Space Construction [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025: 4-8.
- [87] SUN Y L, LUETH T C. Enhancing torsional stiffness of continuum robots using 3-D topology optimized flexure joints[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(4): 1844-1852.
- [88] ZONG H Z, ZHANG J H, JIANG L, et al. Bionic lightweight design of limb leg units for hydraulic quadruped robots by additive manufacturing and topology optimization [J]. Bio-Design and Manufacturing, 2024, 7(1): 256.
- [89] SRINIVAS G L, JAVED A. Topology optimization of KUKA KR16 industrial robot using equivalent static load method [C]//2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS). IEEE, 2021: 1-6.
- [90] ABDULRAHMAN A M, AY S. Improvement of the upper arm of KUKA KR 16 welding robot via topology optimization[J]. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 2025, 12(1): 268-276.
- [91] ZHANG L, HUANG G Y, ZHU S Q, et al. Topology optimization of biped robot based on rigid-flexible coupling dynamics [C]//2022 7th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE). IEEE, 2022: 14-19.
- [92] LIU B, SHA L S, HUANG K, et al. A topology optimization method for collaborative robot lightweight design based on orthogonal experiment and its applications [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19: 17298814211056143.
- [93] WANG M, SONG Y M, LIAN B B, et al. Dimensional parameters and structural topology integrated design method of a planar 5R parallel machining robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 175: 104964.
- [94] WANG X H, ZHANG D W, ZHAO C, et al. Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization [J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 132: 48-65.
- [95] ALSHIHABI M, OZKAHRAMAN M, KAYACAN M Y. Enhancing the reliability of a robotic arm through lightweighting and vibration control with modal analysis and topology optimization [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2025, 53(3): 1950-1974.
- [96] WU L P, MA S J, FU X J, et al. A review of planetary roller screw mechanism for development and new trends [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(21): 10822-10840.
- [97] 刘更, 马尚君, 佟瑞庭, 等. 行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术 [J]. 机械传动, 2012, 36(5): 103-108.
- LIU Geng, MA Shangjun, TONG Ruiting, et al. New development and key technology of planetary roller screw [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(5): 103-108.
- [98] 刘哲铭, 乔冠, 廖荣, 等. 反向式行星滚柱丝杠副的设计与虚拟装配 [J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2022, 41(4):

- 351-357.  
LIU Zheming, QIAO Guan, LIAO Rong, et al. Design and virtual assembly of inverted planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 41(4): 351-357.
- [99] 张育豪, 周广武, 吴贵成. 考虑径向载荷的行星滚柱丝杠副弹性接触及精度损失分析[J]. 机械传动, 2022, 46(8): 124-130.  
ZHANG Yuhao, ZHOU Guangwu, WU Guicheng. Analysis of elasto-plastic contact and accuracy loss of planetary roller screw pair considering radial load[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(8): 124-130.
- [100] 马腾龙, 马尚君, 吴林萍, 等. 行星滚柱丝杠螺旋副-齿轮副同步啮合动态接触载荷特性[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 11-21, 30.  
MA Tenglong, MA Shangjun, WU Linping, et al. Dynamic contact load characteristics of synchromesh between screw pair and gear pair in the planetary roller screw[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 11-21.
- [101] AURÉGAN G, FRIDRICI V, KAPSA P, et al. Wear behavior of martensitic stainless steel in rolling-sliding contact for planetary roller screw mechanism: study of the WC/C solution[J]. Tribology Online, 2016, 11(2): 209-217.
- [102] LIU Y Q, SHANG Y, WANG J S. Mathematical analysis of the meshing performance of planetary roller screws applying different roller thread shapes[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(5): 168781401770300.
- [103] NIU M D, MA S J, ZHU H F, et al. Fault diagnosis of rotating machinery using a signal processing technique and lightweight model based on mechanical structural characteristics[J]. Measurement, 2025, 245: 116505.
- [104] ZHANG W J, LIU G, MA S J, et al. Load distribution over threads of planetary roller screw mechanism with pitch deviation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(13): 4653-4666.
- [105] 许千斤, 马尚君, 吴林萍, 等. 行星滚柱丝杠螺旋副动载荷分布计算方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(4): 634-642.  
XU Qianjin, MA Shangjun, WU Linping, et al. Study on calculation method for dynamic load distribution of thread pair of planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(4): 634-642.
- [106] QIAO G, LIU G, SHI Z H, et al. Effect of friction torque on electro-mechanical brake system dynamics[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2017, 1(2): 471-479.
- [107] QIAO G, LIU G, MA S J, et al. Friction torque modelling and efficiency analysis of the preloaded inverted planetary roller screw mechanism [C]//Volume 10: 2017 ASME International Power Transmission and Gearing Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2017: V010T11A042.
- [108] LI X, LIU G, FU X J, et al. Review on motion and load-bearing characteristics of the planetary roller screw mechanism[J]. Machines, 2022, 10(5): 317.
- [109] 乔冠, 廖荣, 张校民, 等. 循环式行星滚柱丝杠副的疲劳分析与寿命预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 131-139.  
QIAO Guan, LIAO Rong, ZHANG Xiaomin, et al. Fatigue analysis and life prediction of recirculating planetary roller screw mechanism[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 131-139.
- [110] 董超. 行星滚柱丝杠副小螺距螺纹数控磨削工艺研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2018: 3-7.  
DONG Chao. The research on NC grinding technology for small pitch threa [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2018: 3-7.
- [111] 徐洪伟. 行星滚柱丝杠副内螺纹精密磨削方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023: 6-8.  
XU Hongwei. Study on precision grinding method of internal thread of planetary roller [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023: 6-8.
- [112] 康新泓. 行星滚柱丝杠副外螺纹精密磨削方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023: 2-6.  
KANG Xinhong. Study on precision grinding of external thread of planetary roller screw [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023: 2-6.
- [113] XU H W, WEI P T, DU X S, et al. A study of precision grinding of micro-pitch internal thread for planetary roller screw mechanism [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 106: 35-50.
- [114] 李承胜, 罗远新, 彭波, 等. 行星滚柱丝杠滚柱滚压校直成形试验研究[J]. 重型机械, 2022(3): 50-56.  
LI Chengsheng, LUO Yuanxin, PENG Bo, et al. Experimental study on roller straightening forming of the planetary roller screw [J]. Heavy Machinery, 2022(3): 50-56.
- [115] DUAN X S, ZHANG X H, HAO M H, et al. Simulation and experimental research on the thread turning of planetary roller screw mechanism [C]//2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2020: 1827-1832.
- [116] 史婷娜, 谭本慷, 徐奕扬, 等. 机器人关节伺服系统力矩控制技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-18. (2025-02-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241599>.  
SHI Tingna, TAN Benkang, XU Yiyang, et al. A review of torque control technology for robotic joint servo systems [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-18. (2025-02-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241599>.
- [117] 吕石磊, 曹其新, 李想, 等. 机电一体化机器人关节及其驱控系统硬件设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 111-117.  
LV Shilei, CAO Qixin, LI Xiang, et al. Design of mechatronics robot joint and its control system hardware[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 111-117.
- [118] IZADBAKHS A, KHORASHADIZADEH S. Single-loop PID controller design for electrical flexible-joint robots[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(2): 91.
- [119] FU X D, AI H P, CHEN L. Integrated sliding mode control with

- input restriction, output feedback and repetitive learning for space robot with flexible-base, flexible-link and flexible-joint[J]. *Robotica*, 2023, 41(1): 370-391.
- [120] ZAARE S, SOLTANPOUR M R, MOATTARI M. Voltage based sliding mode control of flexible joint robot manipulators in presence of uncertainties [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 118: 204-219.
- [121] SHAO N F, ZHOU Q Y, SHAO C Y, et al. Adaptive control of robot series elastic drive joint based on optimized radial basis function neural network [J]. *International Journal of Social Robotics*, 2021, 13(7): 1823-1832.
- [122] RANJITH PILLAI R, MURALI G. Modified PID like fuzzy servo control applied to smart actuator based miniature Parallel Robot [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41(1): 735-755.
- [123] 姚建均, 张宜坤, 柯运, 等. 基于模型预测控制的机器人姿态控制策略研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(19): 88-100.  
YAO Jianjun, ZHANG Yikun, KE Yun, et al. Research on robot attitude control strategy based on model predictive control [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(19): 88-100.
- [124] WANG G, FANG S H, WANG G, et al. The precision improvement of robot integrated joint module based on a new ADRC algorithm [J]. *Machines*, 2024, 12(10): 712.
- [125] XIE Z J, WANG Y, ZHAN H, et al. Calculation model of contact load and axial stiffness of planetary thread roller bearing based on direct stiffness method [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2023, 6(7): 2300126.
- [126] 蔡威, 马尚君, 张建新, 等. 机电起竖装置铰链位置及输出速度优化研究[J]. *机械传动*, 2021, 45(8): 1-7.
- CAI Wei, MA Shangjun, ZHANG Jianxin, et al. Optimization research of the hinge position and output speed of electromechanical erection device [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(8): 1-7.
- [127] REYES C, RAMOS-FERNÁNDEZ J C, ESPINOZA E S, et al. Fuzzy modelling algorithms and parallel distributed compensation for coupled electromechanical systems [J]. *Algorithms*, 2024, 17(9): 391.
- [128] 郑煌杰. 从 ChatGPT 到 DeepSeek: 智能体价值对齐的规范进路 [J/OL]. *科学学研究*, 2025: 1-20. (2025-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.16192/j.cnki.1003-2053.20250616.001>.  
ZHENG Huangjie. From ChatGPT to DeepSeek: a standardized approach for intelligent agent value alignment [J/OL]. *Studies in Science of Science*, 2025: 1-20. (2025-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.16192/j.cnki.1003-2053.20250616.001>.
- [129] 曾凯, 王耀南, 谭浩然, 等. AI 大模型驱动的具身智能人形机器人技术与展望 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55(5): 967-992.  
ZENG Kai, WANG Yaonan, TAN Haoran, et al. Prospects and technology of embodied intelligent humanoid robots driven by AI large models [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2025, 55(5): 967-992.
- [130] 李逃昌, 李健璋, 侯利民, 等. 多智能体深度强化学习优化的机器人导纳控制 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(05): 134-143.  
LI Taochang, LI Jianzhang, HOU Limin, et al. Robot admittance control optimized by multi-agent deep reinforcement learning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(5): 134-143.

## New development and key technologies of integrated servo joints for humanoid robots

WANG Tengfei MA Shangjun FU Xiaojun XU Jinxing

(Northwestern Polytechnical University, Shaanxi Engineering Laboratory for Transmissions and Controls, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** [Objective] To support the technological innovation and application expansion of integrated servo joints for humanoid robots, the structural characteristics of rotary joints and linear joints as well as their application scenarios in typical humanoid robots at home and abroad were reviewed, the driving methods of integrated linear servo joints were summarized, and the key technologies and future development directions of integrated electric-driven linear servo joints were explored. [Significance] As the core driving component for high-precision motion and dynamic force-position response of robots, the performance of integrated servo joints directly determines the operational capability and reliability of robots in complex environments, and relevant research provides key technical support for the development of high-performance joints and the industrial upgrading of intelligent robots. Through literature combing, typical case analysis and technical induction, the configuration design, manufacturing of core transmission components and high-frequency response control were identified as the core technical points, and high integration and lightweight were pointed out as the main development trends.

**Key words:** Integrated linear servo joint; High integration; Electric drive; High frequency response control