

人形机器人驱动控制关键技术研究现状与展望

李新宇, 高艺平, 罗世林, 王佳钰, 张婷婷, 高亮[†]

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

摘要: 人形机器人是机器人领域的研究热点, 其类人结构展现出了优异的人类环境适应性, 能够实现复杂场景的高效作业, 可以在工业、服务、救援、医疗等场景中辅助或替代人工作业, 是能够对产业发展产生颠覆性影响的技术。然而, 人形机器人高集成度系统设计和高动态性运动的需求, 对驱动控制技术带来了全新的挑战。本文首先结合具体案例分别介绍了电机与液压两种驱动形式的人形机器人的发展历程, 总结了各自的特点; 其次, 从驱动器和驱动控制算法上梳理了驱动技术的研究现状, 着重介绍了电机驱动器、液压驱动器及其对应的控制算法; 然后, 阐述了人形机器人主流的运动控制方法, 详细介绍了基于简化模型、基于稳定判据和基于学习策略的三种运动控制方法; 最后, 从人形机器人的电机驱动高功率化、“骨骼血管”一体化、电动静液作动器模块化等三个方面总结了人形机器人发展面临的挑战及发展展望。

关键词: 人形机器人; 电动静液作动器; 驱动控制算法; 运动控制

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0935

引用格式: 李新宇, 高艺平, 罗世林, 等. 人形机器人驱动控制关键技术研究现状与展望 [J]. 控制与决策

Research on status and prospect of humanoid robot and its driving key technologies

LI Xinyu, GAO Yiping, LUO Shilin, WANG Jiayu, ZHANG Tingting, GAO Liang[†]

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430072, China)

Abstract: Humanoid robots represent a prominent area of robotics research. Their human-like structure grants them excellent adaptability to human-centric environments, and their high flexibility enables operation in complex scenarios where traditional robots cannot function. These capabilities position them to replace human labor in medical, industrial, and heavy-load applications, potentially having a transformative impact on industrial supply chains. However, the requirements for highly integrated systems and dynamic motion control pose significant challenges to the development of humanoid robots and their driving technologies. This paper begins by reviewing the current development of motor-driven and hydraulic-driven humanoid robots, summarizing their respective characteristics. Secondly, it examines the state-of-the-art in driving technology, focusing on both hardware drivers (motor and hydraulic) and control algorithms. Furthermore, the paper outlines mainstream motion control methods, detailing three primary approaches based on simplified models, stability criteria, and learning strategies. Finally, it discusses future challenges and prospects, concentrating on three key areas: high-power-density motor drives, the integration of structural and hydraulic systems (analogous to "bones and blood vessels"), and the modularization of electro-hydrostatic actuator.

Keywords: humanoid robot; electro hydrostatic servo actuator; drive control algorithm; motion control

0 引言

人形机器人具有高度的拟人化特性, 相较于其他类型机器人, 在人类环境中拥有更好的适应性、灵活性和社会接受度^[1]. 因此, 在“密集、高强度作业”行业, 如工业、服务、救援、医疗等形成人工替代, 是能够对产业链发展产生颠覆性影响的技术^[2]. 近年

来, 波士顿动力、特斯拉等国外企业相继推出了多款人形机器人产品, 我国人形机器人虽然起步稍晚, 但也同样有悟空、贡嘎、NAVIAI 等产品。然而, 人形机器人发展仍处于起步阶段, 仍面临成熟度低、功能性不足、生产成本高等挑战^{[3][4]}.

驱动技术是人形机器人动作完成质量的关键。

按驱动方式,人形机器人可分为电机驱动和液压驱动两类^[5]。电机驱动维护简单、响应快、成本低,适合家庭服务、医疗手术等精细操作的场景。液压驱动具备高力量输出、大能量密度和抗冲击性,在重载、抢险、救灾等有高负载要求的领域有较大需求^[6]。

如图1所示,人形机器人的核心驱动系统包括驱动器、动力源和驱动控制算法。驱动器控制机器人姿态^[7]。动力源直接影响机器人的持续作业能力,驱动控制算法则优化驱动性能,实现灵活且智能的运动控制^[1]。在运动控制技术中,三种主要方法提供了多样化解决方案:基于模型的运动控制通过精确建模,实现稳定且精确的运动^[8];基于稳定性判据的控制技术在复杂环境中保持稳定,适应性强;基于复杂任务的自主适应与优化,提升智能化水平^[9]。

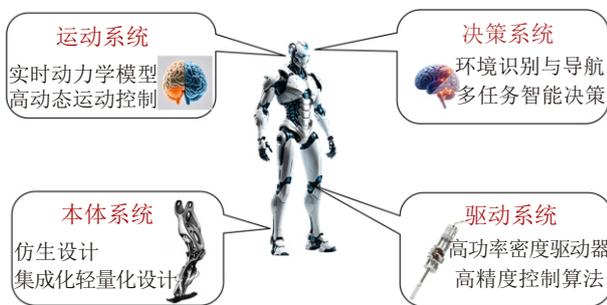


图1 人形机器人多层次架构

本文综合国内外当前研究现状,对人形机器人驱动控制技术进行了简要回顾,第一部分介绍了人形机器人的两大类型并探讨了它们各自的优势和应用场景,第二部分深入分析了人形机器人的核心驱动技术,第三部分详细阐述了三种主要的运动控制方法,最后展望了人形机器人未来的发展方向。

1 人形机器人及其发展现状

电机驱动与液压驱动机器人在功率密度、控制精度和动态响应等方面存在显著差异,从而形成了不同的技术发展路线和应用场景。本节将围绕这一分类,分别综述两类人形机器人的国内外研究现状与代表性平台,并对比分析其关键性能特点。

1.1 电机驱动人形机器人

电机驱动的人形机器人控制技术较为成熟^[5],其研究思路为先实现类人外形和基础运动(如步行、深蹲),再进一步智能化和轻量化,使其具备交互、自主决策等能力。

ASIMO 和 HUBO 等早期电机驱动机器人实现了基本运动和稳定性提升,逐步应用于信息服务等领域^[6]。Aldebaran Robotics 的 NAO 机器人通过模块化设计降低成本,适用于轻型作业任务;东京大学开

发肌肉骨骼机器人^[10],探索康复领域应用;特斯拉打造的 Optimus 人形机器人,采用自动驾驶视觉与 AI 架构,在工厂及劳务替代场景实现了量产应用^[11]; Figure AI 推出的 Figure 03 通过从头硬件与软件重构、专为量产制造设计、并集成适于家庭环境的无线充电、安全电池和高级触觉手部系统; Agility Robotics 的 Digit 机器人专注于物流场景、强调实用性与人形结构在人类空间中的适配,具备搬运、抓取、导航等实用功能,已在物流、仓储环境中试点部署^[12]; Sanctuary AI 最新推出的 Phoenix 机器人通过集成其自主开发的 Carbon AI 控制系统、具备细致触觉传感与人手级自由度的机械手,以及面向真实工业环境的通用任务执行能力,实现了虚拟平台向可用于数十种工作场景的技术跃迁。

国内电机驱动人形机器人研究起步相对较晚,哈尔滨工业大学的 HIT 机器人实现了基本步态运动^[13];浙江大学的悟空机器人可与人类乒乓对打^[14];北京理工大学的 BHR 机器人具备多模态运动,能无外接电缆行走^[15];华中科技大学研发的“劳动者”系列人形机器人可实现平地上直膝稳定行走、横移与倒退,“荆楚”机器人可实现长续航稳定行走、站立及通过表情进行人机交互,“神农”机器人可完成基于环境的实时姿态调整。小米公司推出的 CyberOne 机器人能实现手足协调的架子鼓表演;优必选公司推出的 Walker S1 机器人已进入汽车工厂开展实训;最新款 Walker S2 可实现自主热插拔换电池、24 小时不间断作业;清华大学与宇树科技联合研发的 G1 人形机器人通过引入分层规划与强化学习相结合的控制框架,实现了在快速动态环境下的高灵敏双足协调控制,可自主完成高频交互任务,展现出卓越的敏捷性与仿人运动能力^[16];逐际动力公司也推出了具有模块化硬件/软件平台、31 自由度、面向研究与集成应用的全尺寸人形机器人 LimX Oli。

电机驱动人形机器人以高控制精度、动态响应和较低成本为优势,适用于家庭服务、工业装配、教育和研究等应用。其发展拓展了人工智能技术在环境感知、运动规划及精细操作中的应用,为人机协作在日常和工作中的应用带来可能性。

1.2 液压驱动人形机器人

液压驱动相比电机驱动,具有较高的带宽和功率密度,从而更易实现高功率、高响应作业^[6],具备抗冲击的能力^[17]。

日本立命馆大学研发的 TaeMu 机器人,高 1.377 米、重 72.3 公斤^[7],具备扭矩控制、外推平衡、

平衡下蹲及顺应性平衡能力^[18];美国波士顿动力的PETMAN机器人高1.5米,量40公斤,行走速度可达4.8公里/小时,能够在环境控制的测试舱内穿着化学防护服模拟士兵进行与人类活动相似的复杂作业^[19];Atlas-DRC高1.83米,重152公斤,能够驾驶车辆、打开各种车门、转动阀门^[20]. Atlas Unplugged是首个无人值守双足机器人,采用了较低的压力设定点,在低压操作时几乎无声^[21].

国内液压驱动技术主要用于多足机器人,如山东大学的SCalf、哈尔滨工业大学的MBBOT、上海交通大学的小象等.液压驱动的人形机器人研究较少,主要集中于基本运动能力.山东大学研制的双腿8自由度人形机器人,已实现步行功能,前进速度为0.23米/秒,后退速度为0.34米/秒^[22];哈尔滨工业大学的双腿12自由度机器人,负载25公斤时可以以0.6米/秒稳定行走^[23];中科院沈阳自动化研究所研发的小型化液压驱动人形机器人,双腿14自由度、重23.5kg,关节最大输出扭矩为1030Nm;华中科技大学的双腿12自由度机器人,采用一体化散热设计,已实现稳定行走、单腿站立等动作,并能完成负载100kg的稳定下蹲.

总的来说,如表1所示,电机驱动人形机器人具有控制精度高、响应速度快、维护简单、成本低等优势,但在力量输出方面具有一定的局限^[5],因此,在精细场景,如家庭服务、医疗手术等,具有极大的潜力.相比而言,液压驱动人形机器人具备高承载力、高动态性能、高功率密度、平稳性等特点,使其适合国防军工、抢险救灾、危险作业等重载场景.

2 人形机器人驱动技术研究现状

驱动技术是驱动器、驱动算法等的总称,是人形机器人运动的基础,直接决定了人形机器人的灵活

表1 各类人形机器人参数及特点

特性	电机驱动人形机器人	液压驱动人形机器人
优势	控制精度高、响应速度快、维护简单、成本低	高承载力、高动态性能、高功率密度、平稳性
不足	功率密度有限	能耗高
应用场景	复杂精细的服务、医疗等场景	重载需求的军事、救援等特种场景
发展现状	发展较为成熟,智能化、商业化程度较高	具备基本运动能力,任务泛化能力不足
典型代表	Optimus、宇树G1	PETMAN、Atlas

性以及精准性.驱动器是用于传递和转换能量、控制运动并实现特定功能的部件,为人形机器人的关节提供动力,使机器人能够做到行走、跳跃、搬运等动作.驱动器所使用的控制算法则决定驱动器工作的精确性与稳定性,进而影响人形机器人的运动性能.

2.1 驱动器

人形机器人所用驱动器通常可分为电机驱动器与液压驱动器,分别适用于不同的场景.其结构经历了从简单粗放到精密复杂的迭代,同时其柔顺性与可靠性逐步增强.驱动器的详细分类及各类别驱动器的特点如表2所示.

2.1.1 电机驱动器

电机驱动器以电机为核心动力单元,其技术成熟、控制精度高、响应速度快,且结构相对紧凑,易于维护^[24].早期的电机驱动器多为刚性驱动器(Traditional Stiffness Actuator, TSA),虽能实现基本动作,但其功率密度较低,且在动态性、抗冲击性与人机交互安全性方面存在局限.为突破该局限,在TSA的基础上发展出了串联弹性驱动器(Series Elastic Actuator, SEA)、准直驱驱动器(Quasi-Direct Drive Actuator, QDD)等方案,可提高电机驱动的柔顺性与控制精度,使关节的运动更加自然^[25].

早期人形机器人几乎全部采用“电机+高减速比

表2 人形机器人驱动器方案比较

驱动器方案	优点	缺点与挑战	典型适用场景	代表机器人
电机+高减速比减速器	扭矩大,刚性高,成本较低,定位精度高	反向传动效率低,背驱性差,带宽有限,抗冲击能力弱	肩肘等需要大扭矩但非高动态碰撞的关节	LOLA、天链、Optimus
SEA	通过内置弹簧储存和释放能量,实现高保真力感知、低阻抗、被动柔顺	引入了谐振点,控制设计复杂,力控制带宽受弹簧刚度限制,功率密度相对较低	机械臂抓取、人机交互、足端触地缓冲	M2V2、iCub
QDD	低减速比,高背驱性,高带宽,力控响应快,能量回收效率高,抗冲击	电机扭矩密度要求极高,需大电流驱动,本体重量和成本较高,存在扭绞纹波影响低速平稳性	奔跑、跳跃、快速步态切换等需要高动态力控和安全的场景	Unitree H1、远征A1、CyberOne
传统阀控式液压驱动器	功率密度最高,抗过载和冲击能力极强,刚性高	依赖中央泵站和外置油管,系统非线性强,能效低,存在泄漏和噪声问题	重载、高爆发力需求场景	Jinpoog、Atlas、TaeMu
EHA	高度集成化,解决了外部泄漏,噪声显著降低	非线性问题依旧存在,对集成部件的精度和效率要求高,热管理挑战大	对集成度、噪声、清洁度有更高要求的高动态机器人平台	HYDROiD、Hydra
人工肌肉	模仿生物肌肉,功率密度潜力大,天然柔顺性,结构紧凑	技术不成熟,控制模型复杂,循环寿命短,能效和响应速度通常较低	面部微表情、外骨骼助力等低负载、高交互场景	Kengoro、DEA膝关节

谐波/行星减速器”的刚性链路方案, LOLA 机器人^[26], 天链机器人、Hermes 机器人^[27]、特斯拉 Optimus 以及优必选 WalkerX 等均采用这种刚性链路方案。刚性驱动器 TSA 技术成熟度相对较高, 其系统刚度大, 弹性变形、间隙等非线性因素的影响较小, 因而控制精度较高。但刚性链路使 TSA 在动态运动与抗冲击方面的表现并不理想, 柔顺性较差, 只能通过传感器配合控制算法实现一定程度的“主动柔顺”。TSA 的高减速比也带来了反驱性能差的问题, 不利于机器人在某些顺应外力场景下的应用。虽然可以通过优化设计来提升性能, 但 TSA 的固有局限依旧是人形机器人向高动态、高能量密度等方向发展的瓶颈。

面对传统刚性电机驱动器在高动态性能、抗冲击性等方面的瓶颈, 研究者们提出了 SEA 这一柔顺化方案。MIT 的 M2V2、IIT 的 iCub、浙江大学的仿生腿足式跳跃机器人^[28]等机器人中均有 SEA 的应用。SEA 的核心思想是在电机-减速器与负载之间串联一弹性元件(线弹簧、扭簧、片弹簧等)。该弹性元件具有能量存储和缓冲的作用, 使 SEA 具有一定被动柔顺性, 在动态性、抗冲击性等方面具有独特优势。但弹性元件的引入使 SEA 的力控带宽受到限制, 结构与控制更加复杂, 能量密度相对较低。

QDD 是另一条为突破传统刚性驱动器局限性而发展起来的重要技术路径, 在宇树科技的 Unitree H1、智元的远征 A1、小米的 CyberOne 等机器人中均有应用。QDD 通常由电机与低减速比行星减速器或其他形式的传动机构组成^[29], 具有高力控带宽、更直接的力反馈能力, 以及优异的反向驱动性。因而, QDD 在跑步、跳跃等高动态行为及与环境交互方面更具有优势。但低减速比的设计意味着需要更大扭矩的电机以驱动负载, 对电机的扭矩密度与驱动器的热管理能力具有较高要求, 且电机的转矩脉动会更明显地传递到负载端, 影响其低速平稳性。如何在大电流热管理、结构紧凑度与成本控制之间取得平衡, 是 QDD 发展必须跨越的一道门槛。

2.1.2 液压驱动器

液压驱动器以高压油液为核心传动介质, 其功率密度高、输出力/扭矩大, 且具备天然的过载保护能力与优异的抗冲击性能。传统的阀控式液压驱动器暴发性强, 但在能效、噪声、内漏与控制精度等方面问题突出。此外, 液压驱动系统多采用外置油管供油, 这增大了系统的不确定性, 影响了系统的控制精度。

为突破这些局限, 研究者在传统阀控式液压驱动链路上衍生出了电动静液作动器 (Electro-

Hydrostatic Actuator, EHA) 等集成化方案, 以提升液压驱动的能效、降低噪声, 并增强其控制的精确性与易用性, 为液压驱动器在人形机器人的应用中焕发新生提供了技术路径。

传统的阀控式液压驱动器多采用“伺服阀+液压缸/摆线马达”的刚性直连结构, 以集中式的泵站提供动力。Jinpoog 机器人^[30]、Atlas 液压机器人、TaeMu 机器人^[7]等均应用了这一方案。该方案构建了输出力量大、功率密度高、且具备过载保护能力的驱动系统, 响应速度快, 可轻松满足人形机器人髋、膝等大载荷关节的瞬时爆发力需求, 有利于机器人的动态平衡控制。但该方案依赖于油管与中央油源, 系统体积较大, 整体效率较低且存在泄漏风险, 液压油的温度敏感性也会影响系统的动态响应性。

为突破阀控式液压驱动器的局限, 研究者们提出了 EHA 方案, HYDROiD 机器人、Hydra 机器人^[31]等机器人中均有 EHA 的应用。EHA 的核心在于以“伺服电机+定量泵”替代传统液压系统中的节流阀, 并集成在执行器内部, 形成容积调速的“电-泵-缸”闭式链, 取消了复杂的中央泵站和外部分布式管路, 整体集成度更高, 可消除外部泄漏的隐患, 降低系统噪声与能量在管路传输中的损失。但高度集成的设计也对系统的热管理、微型液压泵等关键部件的精度与效率提出了较高要求, 这也是 EHA 技术走向成熟与大范围应用所必须攻克的核心挑战。

2.1.3 人工肌肉

人工肌肉是一大类材料的统称, 其核心特点是能够在外界刺激(如电、热、光、气压)下产生可逆的形变或收缩, 从而模仿生物肌肉的功能。依据驱动机理可大致将人工肌肉分为气动人工肌肉、介电弹性体驱动器、形状记忆合金以及电化学聚合物驱动器这四类。Kengoro 机器人^[32]、DEA 膝关节^[33]等证明了人工肌肉方案的可行性。人工肌肉在实现本质柔顺性、安全人机交互、以及构建高度仿生形态方面拥有无可比拟的潜力。但人工肌肉技术并不成熟, 面临响应速度较慢、驱动系统(如气泵、高压电源)笨重、材料耐久性不足以及动力学模型复杂、控制困难等瓶颈, 尚未成为人形机器人的主流驱动方案。

综上, 人形机器人驱动器的设计需要在功率密度、能量效率、动态性、柔顺性等方面权衡。TSA、SEA、QDD、阀控式驱动器、EHA 等驱动器具有不同的侧重点, 各有优劣, 为人形机器人不同部位关节提供了解决方案。人工肌肉技术虽不成熟, 但潜力巨大。驱动器从刚性到柔顺性、高动态性的发展为人形机器人迈出实验室走进人类生活提供了硬件基础, 也

拓展了驱动控制算法及上层的运动控制算法的发展空间。

2.2 驱动控制算法

驱动控制算法是驱动器的核心,直接决定人形机器人关节运动的精度,但同时,算法的性能始终受限于硬件载体。由于物理原理的迥异,电机驱动与液压驱动的技术发展路径也各有侧重。对于电机驱动,从传统的“控制器+驱动器”分立方案,到以高性能主控芯片、集成化驱动芯片为基础的紧凑化设计,再到追求更高带宽、更低延迟的“驱控一体化”趋势,底层硬件平台的变革为上层算法的不断创新提供了坚实基础。相对而言,液压驱动依赖高动态伺服阀与为小型液压缸的制造精度,其控制算法的研究更多聚焦于系统的非线性与对外部干扰的处理。

2.2.1 电机驱动控制算法

电机驱动的人形机器人通过精确控制多个电机来实现复杂的运动和姿态调整。人形机器人的电机驱动控制算法已形成相对成熟的技术体系,逐渐从传统的模型驱动控制向应对不确定性的智能控制演进。

传统的模型驱动控制方法建立在电机的精确数学模型之上,是实现高精度控制的基础,通常基于独立的控制单元与驱动单元来实现。其中控制单元负责执行复杂的坐标变换、PI调节器等控制算法,驱动单元则负责接收控制信号并驱动电机。模型驱动控制方法可进一步分为矢量控制、直接转矩控制、电流成型技术等。

其中矢量控制通过解耦控制转矩与磁场分量,在永磁同步电机和无刷直流电机上实现了平滑的宽范围调速与低转矩波动,控制精度较高^{[34][35]}。直接转矩控制则直接调控定子磁链与电磁转矩,结构简单,动态响应迅速,但其转矩脉动相对较大^[36]。为进一步提升性能,电流成型技术等方案被提出,通过优化相电流波形来抑制转矩脉动。如Wei等^[37]的电流限制策略与Jiang等^[38]的多模式滞环控制,均致力于在实际非理想条件下实现更精确的电流跟踪。

但总体而言,传统的模型驱动控制方法严重依赖电机参数的准确性,在面临人形机器人运动中常见的参数时变、非线性摩擦以及柔性元件引入的谐振等未建模动态时,其控制性能会出现显著下降。

为克服模型依赖的局限性,研究者们将神经网络、强化学习等数据驱动方法应用于电机驱动。同时,在硬件层面,“驱控一体化”成为核心发展趋势,控制单元与驱动单元被集成到单一模块,并能在芯

片中集成多核处理单元,这在极大缩小驱动器体积和重量的同时,为这些数据驱动算法提供了强大的硬件平台。

神经网络具有较高的非线性拟合能力,可用于构建无模型控制器或状态观测器。Ahmed等^[39]提出的基于递归神经网络的无模型预测电流控制方法与Theocharis等^[40]提出的用于感应电机控制的神经网络观测器均展示了神经网络在处理不确定性问题上的潜力。强化学习则通过与环境持续交互以自主学习优化策略,如Pajchrowski等^[41]提出的基于神经拟合Q学习的自适应控制器,适用于变负载等复杂场景。

这些基于学习的数据驱动方法为电机驱动控制提供了一种新的范式,有望解决传统方法难以应对的复杂控制问题。但同时,如何保证学习过程的稳定性、提高样本效率等,是其所面临的新挑战。

2.2.2 液压驱动控制算法

液压驱动人形机器人具备高功率重量比和动态响应高的特点。但液压伺服机构是复杂的耦合系统,包括外置油管、液压泵站、阀门和执行器等众多部件,其驱动控制算法需要考虑系统的非线性,包括伺服阀的流量非线性、执行器的摩擦非线性、模型和参数的不确定等。

经典的PID控制方法在工程中有着广泛应用,它将液压执行器进行线性化建模,易于实现。然而,PID控制的线性化假设使其难以准确捕捉液压系统在全工况范围内的复杂动态特性,尤其是在大范围运动、高速响应或负载剧烈变化时,其控制精度和动态性能往往会显著下降,难以满足高性能人形机器人对严苛的运动要求。

为了克服经典PID控制在处理液压系统非线性和不确定性方面的局限性,并提升液压驱动人形机器人的运动性能,研究者们提出了多种先进的控制策略,其中自适应控制和鲁棒控制是应对参数不确定性的主要方向。Li等^[42]在经典PID控制中引入自适应模糊控制方法,通过模糊逻辑系统在线调整PID参数,以补偿系统参数的不确定性,在一定程度上提升了控制器的适应性和跟踪性能。然而,当不确定的非线性发展成为影响控制性能的主要因素时,液压系统的跟踪精度可能无法得到保证。Zhou等人^[43]提出了自适应鲁棒控制,将鲁棒控制和自适应控制结合起来处理不确定性,增加了自适应控制的鲁棒性并提高跟踪性能。

滑模控制是另一种处理系统参数不确定性和外部扰动的鲁棒控制方法。其核心思想是迫使系统状

态轨迹沿着预先设计的滑模面运动,一旦到达滑模面,系统就对参数变化和外部扰动表现出不变性.但基础的滑模控制由于开关不理想性导致系统状态在滑模面附近高频切换,存在“抖振”问题.为解决这一问题,Back等人^[44]在滑模控制中引入新的自适应律以消除或减弱抖振现象,从而改善系统的跟踪性能和稳定性.

伺服控制的精度同样受到外部扰动的控制,因而除了直接针对系统不确定性的控制策略,扰动观测器与前馈补偿的结合也是提升液压伺服系统抗扰性能的重要途径.Daehee等人^[45]将未建模模型动态、参数不确定性和外部扰动视为总扰动,通过扰动观测器进行估计,并使用前馈控制器对其进行补偿,从而在不使用高增益反馈的情况下消除不确定性对系统的影响.

这些控制策略显著提升了液压驱动系统在复杂工况下的控制性能,为高性能液压驱动人形机器人的实现奠定了理论基础.然而,液压伺服系统的复杂性和不确定性依然存在,如何设计出更为高效、智能且易于工程实现的控制算法,以实现更高精度的位置跟踪、更强的抗扰鲁棒性以及更优的动态响应,仍然是液压驱动人形机器人领域值得持续深入研究的核心课题.

综上,电机驱动控制算法基于已有的相对成熟的技术体系,逐渐从模型依赖的矢量/直矩控制向“学习+观测”的数据驱动方法演进.液压驱动控制算法的重点在于处理系统的非线性与外部干扰,逐步向自适应控制、鲁棒控制等方向演进.两类驱动控制算法演进的最终目标都是控制的高效性、精准性,以提高机器人的运动性能,高效准确地执行运动控制层下发的指令,驱动各个关节运动到指定位置,更好地配合运动控制层的指令来完成机器人的运动.

3 人形机器人运动控制技术研究现状

与人类运动相同,人形机器人通过周期性改变身体构型与环境进行交互.在精确的底层驱动控制基础上,人形机器人需要高层的运动控制技术实现运动过程中的姿态平衡,进而实现稳定、高效和高鲁棒的运动行为.该层次不再关注如何实现关节的力或位置控制,而是解决机器人以怎样的运动轨迹实现既定任务.现有的人形机器人运动控制方法可以按照简化模型、稳定性判据和学习策略三类进行划分,以下将对各类方法进行介绍和分析.

3.1 基于模型的运动控制

由于人形机器人具有多自由度、强耦合性等特

点,复杂的非线性动力学给人形机器人运动控制带来了挑战.因此聚焦人形机器人多体动力学的基本特征,采用简化模型进行人形机器人运动控制可以有效降低实时计算负担,提升运动规划效率.目前被广泛研究的人形机器人简化模型有线性倒立摆模型,弹簧负载倒立摆模型和多连杆模型.

线性倒立摆模型是双足步行领域经典的步行模板之一.由于机器人的步行过程是一个伴随着动能与势能的相互转换的过程,可以将机器人抽象成一个集中了全部质量的质心及一个无质量可伸缩的腿的线性倒立摆模型,在运动过程中将质心保持在同一高度上,通过研究机器人的动力学方程描述其运动过程,如图2a)所示.Kajita等人^[46]首次提出了一种基于倒立摆模型的步态规划方法,该方法由线性动力学方程推导出轨迹能量表达式,并成功应用于真实机器人样机.Li等人^[47]将线性倒立摆模型拓展至双足支撑阶段,提高了机器人运动的稳定性,实现了在不同情况下的行走.线性倒立摆模型的优点是模型简单直观,动力学方程线性可解析,便于进行实时运动规划和控制.Ding等人^[48]考虑线性倒立摆模型的非线性三维运动学,提出二次约束的二次规划适时调整步态参数,在高度变化地形下的运动鲁棒性获得显著提高.

弹簧负载倒立摆模型是在倒立摆模型的单摆上增加了具有一定刚度属性,将机器人腿部结构等效成无质量并且可伸缩的线性弹簧,如图2b)所示.基于弹簧负载倒立摆模型,Liu等人^[49]提出了一种基于三维弹性倒立摆的双足机器人动态步行方法,根据模型的对称性条件对机器人步态的四分之一周期进行优化,并论证了步态方法的有效性.Pelit等人^[50]将摆动腿质量加以考虑,提出了一种含有摆动腿的弹簧负载倒立摆模型,并实现了稳定的行走.Li等人^[51]基于弹簧负载倒立摆模型设计了气动人工肌肉驱动的人形机器人运动控制器,通过机器人的足底作用力实时调节踝关节出力,并在机器人上实现了验证.Gao等人^[52]结合轮足人形机器人特性将弹簧负载倒立摆模型拓展为非线性飞轮弹簧负载倒立摆模型,引入腿部的静力学模型增强条约过程中的双腿一致性.弹簧负载倒立摆模型直观地反映了人类行走过程中表现出的弹簧特性,能够实现能量的再次利用以及足地碰撞的缓冲,目前在非结构化环境步行中得到了较多的关注.

多连杆模型是将机器人四肢及躯干等部位简化成质量均匀的连杆所得到的机器人模,如图2c)所示.通过规划出连杆连接的各关节运动轨迹并进行

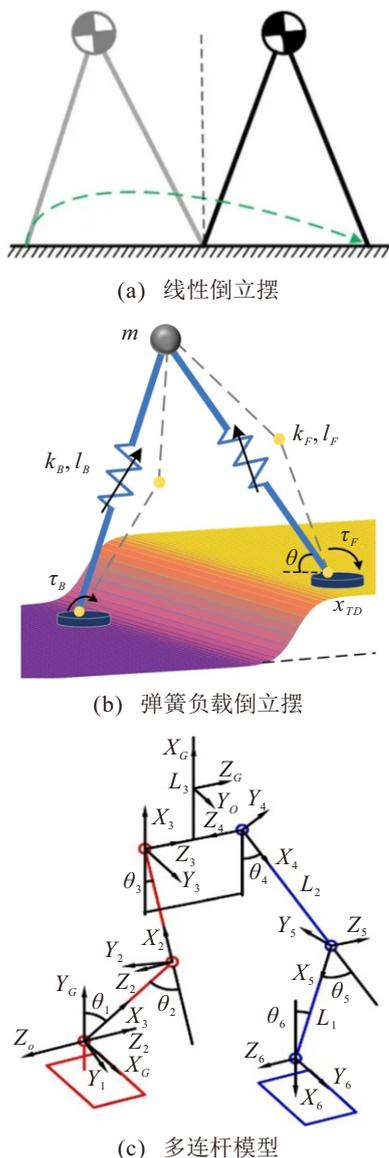


图2 人形机器人简化模型

运动参数的优化,最终生成满足期望的步态. Ames等人^[53]提出了一种受人类步行机理启发的控制方法,该方法将人类行走数据拟合到多连杆模型中,实现了较为自然的行走.此外,基于多连杆模型的全身控制逐渐成为了近年来的研究热点.由于多连杆模型仍然具备较多的自由度,因此采用更简化的机器人模型(如上述两种模型)进行步态规划,同时将其映射到多连杆模型进行关节控制是一种高效的方式.基于上述方法, Apgar等人^[54]提出了一种快速的在线轨迹优化方法,该方法利用降阶模型进行在线规划,利用全阶模型进行轨迹跟踪.多连杆模型反映了人形机器人完整的结构参数配置,提升了步态控制实时性,成为目前使用较为广泛的基于模型步行控制策略.

综上,基于模型的运动控制依赖机器人的动力学建模和优化控制,适用于机器人模型已知、环境结

构化程度较高、需要精确运动控制的场景,在线优化的计算复杂度较高,实时性不佳.

3.2 基于稳定性判据的运动控制

人形机器人必须在执行预定位姿的同时保持动态平衡稳定.为了便于描述机器人运动的稳定性水平,机器人领域的学者们提出了许多稳定性参考点,这些参考点与地面之间的相对位置为机器人提供了重要的局部或全局运动特征.目前使用较为广泛的主要有:零力矩点(Zero Moment Point, ZMP)、足翻转指示器(Foot-Rotation Indicator, FRI)、捕获点(Capture Point, CP).

零力矩点^[55]由Vukobratovic于1969年首次提出,ZMP是指位于支撑足内作用在机器人身上水平方向合力矩为零的点.在人形机器人行走过程中,随着单足支撑期和双足支撑期的交替,机器人机构不断形成开环运动链和闭环运动链,机器人机构的整体稳定性可以用ZMP来衡量,如果ZMP处于机器人支撑平面之内则表示人形机器人处于稳定状态,否则表示机器人处于不稳定状态.Koyanagi等人^[56]在ZMP稳定判据的基础上提出了接触面集合(Contact wrench Sum)的概念,将应用范围从平坦路面扩展到不平坦路面的情况.为减少模型误差提高ZMP轨迹跟踪性能,Luo等人^[57]提出了一种基于三质点模型的步态规划方法,该方法将模型预测方法由单质点模型推广到了三质点模型,实验结果表明该方法有效降低了模型误差提高了ZMP轨迹跟踪的准确性.针对双足机器人对复杂环境适应性差的问题,Liu等人^[58]将ZMP作为实时反馈,结合中枢模式发生器实时生成和调节步态参数以适应倾角变化的斜坡地形,取得了较好的控制效果.ZMP概念自提出之后,在人形机器人领域已经成为一个广泛应用的稳定性判定准则.

足翻转指示器^[59]由Goswami等人提出,为了能够进一步的描述人形机器人的稳定状态,FRI定义为地面上一点,能够位于支撑多边形之内/外,FRI可用于判定支撑脚与地面接触是静止或以一定角加速度在旋转,同时FRI相对支撑边缘的距离也能够描述机器人不稳定的程度.基于FRI稳定判据,Manni等人^[60]提出了一种适用于小型机器人的稳定步态控制架构,该架构采用了调整上半身的姿势以调节FRI位置的策略.受到人类步行机理的启发,Choi等人^[61]提出了一种基于足部旋转的双足行走模式,并提供了一种新的思路来考虑行走过程中的完全驱动和欠驱动阶段.FRI相较于ZMP拓展到机器人的支

撑域范围之外,可以被应用于采用足部旋转的步态控制方法之中。

捕获点理论 (N-step capturability)^[62] 由美国学者 Koolen 等人于 2012 年提出,描述的是一种腿部系统采取运动 N 步或更少的步数来达到捕获状态避免摔倒的理论。这个理论着重考虑的是在系统各种复杂路况行走和避免摔倒的能力,以及在行走过程中遇到扰动之后进行调节重新获得平衡的能力。捕获点理论在具有点状脚的三维线性倒立摆模型的基础上建立运动学方程,从能量分析的角度选取合适的落脚点,当落脚点落入捕获域(达到稳定状态的区域)时,机器人能够恢复到稳定状态。Caron 等人^[63] 提出了一种人形机器人在不平坦地形中行走的基于可捕获性的步态模式,并将先前关于平衡的研究扩展到基于虚拟高度线性倒立摆模型的行走。Kojio 等人^[64] 引入了一个通用的人形机器人平衡控制框架,并应用捕获点和角动量来实现跌倒恢复。CP 作为一个衡量机器人平衡恢复性的指标,被广泛应用在人形机器人姿态平衡运动控制中。

综上,基于稳定性判据的运动控制依赖简化模型的稳定性判据,通常与基于模型的运动控制协同应用,适用于未知地形或未知扰动的场景,计算复杂度相对较小,可以满足高频实时控制。

3.3 基于学习策略的运动控制

采用学习策略赋予机器人感知和决策能力已成为提高人形机器人环境适应能力的可行途径。目前具有代表性的方法有:中枢模式发生器 (Central Pattern Generation, CPG) 策略和强化学习 (Reinforcement Learning, RL) 策略。

在生物学研究中,已经发现 CPG 模式存在于脊椎动物和无脊椎动物有节奏的呼吸、心跳、行走、跑步、游泳和其他活动中^[65]。使用 CPG 来模拟人形机器人的固有模式或反射行为,并生成关节空间的周期性控制信号,可以大大降低控制的复杂性。Huang 等人^[66] 提出了一种力矩-刚度控制的动态步行方法,该方法将 CPG 与自适应刚度关节控制相结合,实现了高能效的步行模式。Liu 等人^[58] 提出了一种基于 CPG 和多连杆模型的节律反射混合自适应步行方法。他们应用 ZMP 和身体姿态角作为反馈来调节 CPG 网络,使人形机器人能够适应不断变化的地形。

作为机器学习的一个重要分支,数据驱动的强化学习可以针对不同的任务需求进行自主学习,而不是针对特定任务设计单个控制器,在双足运动控

制领域具有良好的适用性。此外,通过与环境的反复交互,RL 可以收敛到在线步态的最优控制策略,显示出 RL 在实时适应和自我调节方面的特点。Xie 等人^[67] 提出了一种基于深度强化学习的反馈控制模式,在 Cassie 机器人上部署了这种基于 RL 的控制器,并通过行走测试证明了其性能。Castillo 等人^[68] 受混合零动态的启发设计了一种反馈控制策略,并构建了一个整体的 RL 双足步态控制框架,该框架具有较少依赖先验知识和轻量级网络架构的优点。清华大学研究团队^[16] 提出了一套分层式的强化学习框架,第一层预测乒乓球轨迹和击球状态,第二层强化学习生成与人类相似的击球动作,在宇树机器人上实现了亚秒级的乒乓球连续对打。上海交通大学等研发团队^[69] 基于宇树人形机器人,提出了一套强化学习架构,通过落足点奖励机制,实现了稀疏落脚点环境下的稳定移动。

综上,基于学习策略的运动控制从数据中学习控制策略,适用于机器人建模复杂、需要环境自适应的场景,在训练阶段计算量巨大,在部署应用阶段计算复杂度小,可以满足高频实时控制。

总结而言,线性倒立摆、弹簧负载倒立摆和多连杆等简化物理模型为人形机器人的步态规划和运动控制奠定了理论基础,结合零力矩点、足翻转指示器和捕获等人形机器人稳定性分析方法,基于模型的人形机器人的运动控制技术已经趋于成熟。但显式的数学建模难以考虑真机系统中的关节阻尼、驱动延迟等因素,因此基于模型的运动控制方法难以在高动态场景中维持高鲁棒性。基于学习策略的运动控制在近几年已得到广泛应用,赋予了人形机器人更强的地形适应性和自主决策性,与基于模型的运动控制形成了良好的互补,使得目前的人形机器人在草地、工厂和楼道阶梯等复杂环境中,具备高自主、高鲁棒性稳定运动的发展潜力。然而基于学习策略的运动控制高度依赖仿真环境中的数据样本,而仿真模型与实机之间难以做到高保真性,导致较大的仿真-实机迁移差异。

4 人形机器人发展挑战与展望

经过六十余年的不断探索与技术积累,人形机器人的技术水平已取得长足进步。从人形机器人发展早期仅能对人类动作和形态的简单模仿,到现今已能够初步实现环境感知,完成简单的动作以及多任务协作,人形机器人正逐渐达到正常人类的能力标准。但现阶段人形机器人依然面临着驱动系统功率密度低、液压系统管路冗杂、能耗高、运动模式单

一、人-机-环境交互能力欠缺等诸多挑战。随着先进智能制造、人工智能、大模型和机器学习等技术的发展,可以从以下几方面进一步探索人形机器人:

4.1 电机驱动高功率密度化

提升电机功率密度是增强电机驱动人形机器人带负载能力的重要途径。电机作为电机驱动人形机器人的“肌肉”,负责机器人的动力输出,由于电机驱动人形机器人在关节电机的体积和重量方面存在限制,在相同的体积下更高功率密度的电机意味着更大的关节转矩,从而赋予机器人更强的负载能力。

现有的电机驱动人形机器人受限于电机的低功率密度,普遍存在带负载能力弱的问题。因此,优化电机设计、提升材料性能和引入先进制造技术,提高机器人电机的功率密度,研发小体积大出力的轻量化电机,使人形机器人兼具高度的灵活性能与出力性能,是电机人形机器人的一大发展趋势。

4.2 人形机器人的“骨骼血管”一体化

传统的液压驱动人形机器人为兼顾结构强度和灵活性,在四肢和躯干的设计上既需要保证结构件强度的可靠性,又需要尽可能缩小结构件的设计尺寸,减轻结构件重量。在有限的空间内安装复杂的液压元件时,由于结构空隙的限制,液压人形机器人的液压油管通常采用外置方案。除去对机器人美观程度造成的影响,外置油管还会还在机器人加载油压运行过程中受压胀硬,产生较大的弯曲扭力影响着机器人的关节控制精度,同时增大机器人能量损耗。

为实现人形机器人液压驱动“骨骼-血管”的一体化发展,需突破两项核心技术。首先,攻克液压旋转密封技术,以实现液压油在流经铰链结构时,能在固定油路间实现无泄漏传输并维持压力稳定。其次,攻克热力耦合的结构拓扑优化技术,保证结构件承载强度的同时显著减轻其重量,并实现类似人体血液循环的高效散热能力。液压驱动人形机器人“血管”融入四肢和躯干的“骨骼”之中,将使人形机器人具备更加贴近真实人体的仿生特征,同时在运动控制上达到更高的精准度和流畅度。

4.3 电动静液作动器模块化

作动器作为液压驱动人形机器人的“肌肉”,其性能直接影响着机器人的运动能力。目前人形机器人驱动技术面临的一大挑战在于如何有效融合电机驱动与液压驱动,并克服传统电动静液作动器体积相对较大的问题。

为此,亟需探索适用于人形机器人、具备小体积、大功率特性的模块化电动静液作动器设计方案。

通过采用分布式供能架构,实现各关节出力按实际需求独立控制,不仅有助于降低系统能量损耗,还能提升整体运行可靠性。该融合方案使人形机器人兼具电机驱动的高控制精度、快速响应能力,以及液压驱动的高功重比、良好抗冲击性和运动柔顺性,从而显著增强机器人的综合运动性能与负载能力。

4.4 人形机器人智能学习架构

运动模式单一、人-机-环境交互能力欠缺是现阶段人形机器人面临的一大挑战,阻碍着人形机器人在实际应用场景中的应用落地。

端到端的深度强化学习为人形机器人运动控制提供了新的思路。得益于端到端的特性,避免了复杂建模过程和数据预处理过程,在泛化性能与高效性等方面具备显著优势。尽管基于学习策略的运动控制方法目前有一些应用,但人工智能在运动控制中的应用仍存在一些局限性,包括样本效率低、多任务学习能力弱、多模态控制实时性瓶颈以及从仿真到实机的迁移差异较大等。在此背景下,如何运用端到端的深度强化学习进行人形机器人的运动控制,实现多任务多模态的实时运动控制,缩小仿真模型与实机之间的迁移差异,都是值得深入研究的方向。

人形机器人具备类人的生物学结构,是具身大模型的理想载体。借助具身大模型技术,人形机器人有望实现对复杂环境的高精度感知与理解、通过与环境交互积累经验进行自主学习与行为优化、自然的人机交互和灵活智能的行为模式。因此,如何利用具身大模型的认知优势实现机器人稳定、高效自主的具身行为,是将人形机器人应用到人类生活场景之前必须攻克的难题。

5 结 论

通过对人形机器人整体技术脉络的系统梳理,本文揭示了其发展过程中的核心驱动力与内在规律。人形机器人的演进并非单一技术的线性叠加,而是硬件本体设计、驱动控制、运动控制等多领域的技术在“高性能”、“高适应性”、“智能化”等目标的牵引下,相互耦合并迭代升级的复杂过程。

当前形成了以电机驱动为主导的“高动态、高柔顺、可交互”技术路线,与以液压驱动为特色的“高功率、高爆发、抗冲击”技术路线并存。这两种技术路线深刻影响了人形机器人的本体构型与应用场景:电机驱动侧重于实现持续、稳定、可控的复杂运动;液压驱动则在极端动态性能上展现了不可替代的优势。这同时说明,在现有技术条件下,驱动系统的物理本质决定着其性能上限,设计过程中需要在

功率密度、能量效率、动态性、柔顺性之间进行权衡。

在运动控制层面,人形机器人运动控制范式从“模型依赖”走向“环境交互”。从基于模型的运动控制、基于稳定性判据的运动控制,到基于学习策略的运动控制,步态控制方法的演进充分表明,面对真实世界的复杂性与不确定性,能通过交互在线学习与适应的“灰箱”甚至“黑箱”方法会是人形机器人应对未知环境、实现真正通用的关键。

随着先进智能制造、人工智能、大模型和机器学习等技术的发展,人形机器人的先进性不仅体现在单项技术的突破,更体现在“本体-驱动-运动-决策”的协同设计,且系统集成能力成为衡量人形机器人技术水平的关键指标。高度的模块化、能源管理优化以及“骨骼-血管”一体化设计等理念,是提升整机性能、可靠性和环境适应性的必然路径。

整体而言,人形机器人正处在一个从“功能实现”到“性能卓越”并最终迈向“通用智能”的历史性跨越关口。未来的发展将是一场涉及硬件、算法与系统集成的全面竞赛。唯有通过跨学科的深度协作与跨技术路线的融合创新,才能克服当前面临的根本性挑战,最终缔造出能在人类环境中自主、可靠、灵巧地工作的下一代人形机器人。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Engelsberger J, Werner A, Ott C, et al. Overview of the torque-controlled humanoid robot TORO[C]. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Madrid, 2015: 916-923.
- [3] Metta G, Natale L, Nori F, et al. The iCub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development[J]. *Neural Networks*, 2010, 23(8/9): 1125-1134.
- [4] Darvish K, Penco L, Ramos J, et al. Teleoperation of humanoid robots: A survey[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3): 1706-1727.
- [5] 翟硕, 虞拯, 金波. 多足步行机器人液压控制系统研究现状与发展趋势[J]. *机器人*, 2018, 40(6): 958-968. (Zhai S, Yu Z, Jin B. Research status and development trend of hydraulic control system for multi-legged walking robot[J]. *Robot*, 2018, 40(6): 958-968.)
- [6] Jung T, Lim J, Bae H, et al. Development of the humanoid disaster response platform DRC-HUBO[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(1): 1-17.
- [7] Hyon S H, Suewaka D, Torii Y, et al. Design and experimental evaluation of a fast torque-controlled hydraulic humanoid robot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(2): 623-634.
- [8] Cho B, Kim S W, Shin S, et al. Energy-efficient hydraulic pump control for legged robots using model predictive control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(1): 3-14.
- [9] Jin R, Huang H H, Li L, et al. Artificial intelligence enabled energy-saving drive unit with speed and displacement variable pumps for electro-hydraulic systems[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(3): 3193-3204.
- [10] Asano Y, Kozuki T, Ookubo S, et al. Human mimetic musculoskeletal humanoid Kengoro toward real world physically interactive actions[C]. *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots*. Cancun, 2017: 876-883.
- [11] Banks J. Optimus primed: Media cultivation of robot mental models and social judgments[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020, 7: 62.
- [12] Dao J, Duan H L, Fern A. Sim-to-real learning for humanoid box loco-manipulation[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Yokohama, 2024: 16930-16936.
- [13] 纪军红. HIT-III 双足步行机器人步态规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [14] 朱秋国. 仿人机器人结构设计与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (Zhu Q G. Humanoid robot mechanical design and analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.)
- [15] Huang Q, Dong C C, Yu Z G, et al. Resistant compliance control for biped robot inspired by humanlike behavior[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3463-3473.
- [16] Su Z, Zhang B K, Rahmanian N, et al. Hitter: A humanoid table tennis robot via hierarchical planning and learning[J/OL]. 2025, arXiv: 2508.21043.
- [17] Ficht G, Behnke S. Bipedal humanoid hardware design: A technology review[J]. *Current Robotics Reports*, 2021, 2(2): 201-210.
- [18] Kaminaga H, Ko T, Masumura R, et al. Mechanism and control of whole-body electro-hydrostatic actuator driven humanoid robot hydra[C]. *International Symposium on Experimental Robotics*. Cham: Springer, 2017: 656-665.
- [19] Nelson G, Saunders A, Neville N, et al. Petman: A humanoid robot for testing chemical protective clothing[J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2012, 30(4): 372-377.
- [20] 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.
- [21] Nelson G, Saunders A, Playter R. The Petman and atlas

- robots at boston dynamics[C]. *Humanoid Robotics: A Reference*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2018: 169-186.
- [22] 王海燕. 液压驱动双足机器人运动系统设计与控制[D]. 济南: 山东大学, 2014.
(Wang H Y. Design and control of the hydraulic actuated biped robot motion system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.)
- [23] 罗健文. 双足机器人建模分析及其运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
(Luo J W. Model analysis and motion control research of biped robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [24] Meng F, Huang Q, Yu Z G, et al. Explosive electric actuator and control for legged robots[J]. *Engineering*, 2022, 12: 39-47.
- [25] 丁宏钰, 石照耀, 岳会军, 等. 国内外双足人形机器人驱动器研究综述[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(7): 936-945.
(Ding H Y, Shi Z Y, Yue H J, et al. A review on biped humanoid robot actuator in China and overseas[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(7): 936-945.)
- [26] Lohmeier S, Buschmann T, Ulbrich H. Humanoid robot LOLA[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, 2009: 775-780.
- [27] Ramos J, Katz B, Chuah M Y M, et al. Facilitating model-based control through software-hardware co-design[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, 2018: 566-572.
- [28] 毛翊超. 采用串联弹性驱动器的仿生腿式机器人跳跃与自适应平衡控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
(Mao Y C. Research on jumping and adaptive balance control of bionic legged robot with series elastic actuator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.)
- [29] Xiang H, Xiang K, Fang Y, et al. Torque estimation base on quasi-direct drive actuators[C]. *IEEE 5th International Electrical and Energy Conference*. Nangjing, 2022: 1637-1642.
- [30] Cho J, Kim J T, Kim J, et al. Simple walking strategies for hydraulically driven quadruped robot over uneven terrain[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2016, 11(5): 1433-1440.
- [31] Ko T, Murotani K, Yamamoto K, et al. Whole-body compliant motion by sensor integration of an EHA-driven humanoid Hydra[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2021, 18(1): 2150002.
- [32] Kawaharazuka K, Nishiura M, Koga Y, et al. Automatic grouping of redundant sensors and actuators using functional and spatial connections: Application to muscle grouping for musculoskeletal humanoids[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1981-1988.
- [33] Fu H B, Jiang Y, Lv J, et al. Multilayer dielectric elastomer with reconfigurable electrodes for artificial muscle[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(9): 2206094.
- [34] Trivedi M B, Patel J J. A DSC-based field oriented control of SPMSM to mitigate practical difficulties with low resolution sxIncremental encoder[C]. *International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication*. Chennai, 2014: 455-461.
- [35] Wu B Y, Xu D Z, Ji J H, et al. Field-oriented control and direct torque control for a five-phase fault-tolerant flux-switching permanent-magnet motor[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2018, 4(4): 48-56.
- [36] Singh T S, Jain A K. Improved direct torque controlled ipm synchronous motor using variable band 12 sector control in two level inverter[C]. *IEEE 6th International Conference on Power Systems*. New Delhi, 2016: 1-6.
- [37] Wei Y Y, Xu Y X, Zou J B, et al. Current limit strategy for BLDC motor drive with minimized DC-link capacitor[C]. *The 17th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Hangzhou, 2015: 1082-1086.
- [38] Jiang W D, Wang P X, Ni Y Y, et al. Multimode current hysteresis control for brushless DC motor in motor and generator state with commutation torque ripple reduction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 2975-2985.
- [39] Mesai A H, Jlassi I, Marques C A J, et al. Model-free predictive current control of synchronous reluctance motors based on a recurrent neural network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 10984-10992.
- [40] Theocharis J, Petridis V. Neural network observer for induction motor control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1994, 14(2): 26-37.
- [41] Pajchrowski T, Siwek P, Wójcik A. Adaptive controller design for electric drive with variable parameters by Reinforcement Learning method[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2020: 1019-1030.
- [42] Li H Y, Sun H B, Hou L L. Adaptive fuzzy PI output feedback control for a class of switched nonlinear systems with unmodeled dynamics and dead-zone output[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2022, 24(1): 728-751.
- [43] Zhou S Z, Shen C, Xia Y X, et al. Adaptive robust control design for underwater multi-DoF hydraulic manipulator[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110822.
- [44] Baek J, Jin M L, Han S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3628-3637.
- [45] Won D, Kim W. Disturbance observer based

- backstepping for position control of electro-hydraulic systems[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, 13(2): 488-493.
- [46] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. The 3D linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation[C]. Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui, 2002: 239-246.
- [47] Li L, Xie Z Q, Luo X, et al. Trajectory planning of flexible walking for biped robots using linear inverted pendulum model and linear pendulum model[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1082.
- [48] Ding J T, Della Santina C, Lam T L, et al. Robust humanoid locomotion via sequential stepping and angular momentum optimization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(3): 2779-2789.
- [49] Liu Y P, Wensing P M, Schmiedeler J P, et al. Terrain-blind humanoid walking based on a 3-D actuated dual-SLIP model[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 1073-1080.
- [50] Pelit M M, Chang J, Takano R, et al. Bipedal walking based on improved spring loaded inverted pendulum model with swing leg (SLIP-SL)[C]. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Boston, 2020: 72-77.
- [51] Li Y Q, Jiang Y L, Hosoda K. Controller design and experimental validation of walking for a musculoskeletal bipedal lower limb robot based on the spring-loaded inverted pendulum model[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2024, 11: 1449721.
- [52] Gao J S, Jin H Z, Gao L, et al. Jump control based on nonlinear wheel-spring-loaded inverted pendulum model: Validation of a wheeled-bipedal robot with single-degree-of-freedom legs[J]. *Biomimetics*, 2025, 10(4): 246.
- [53] Ames A D. Human-inspired control of bipedal walking robots[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(5): 1115-1130.
- [54] Apgar T, Clary P, Green K, et al. Fast online trajectory optimization for the bipedal robot cassie[C]. Robotics: Science and Systems. Piscataway: IEEE, 2018, 101: 14.
- [55] Vukobratovic M, Juricic D. Contribution to the synthesis of biped gait[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1969, BME-16(1): 1-6.
- [56] Hirukawa H, Hattori S, Kajita S, et al. A pattern generator of humanoid robots walking on a rough terrain[C]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, 2007: 2181-2187.
- [57] Luo R C, Chen C C. Biped walking trajectory generator based on three-mass with angular momentum model using model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(1): 268-276.
- [58] Liu C J, Yang J, An K, et al. Rhythmic-reflex hybrid adaptive walking control of biped robot[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 94(3): 603-619.
- [59] Goswami A. Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1999, 18(6): 523-533.
- [60] Manni A, di Noi A, Indiveri G. A control architecture for dynamically stable gaits of small size humanoid robots[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2006, 39(15): 683-688.
- [61] Choi J H, Grizzle J W. Planar bipedal walking with foot rotation[C]. Proceedings of the American Control Conference. Portland, 2005: 4909-4916.
- [62] Koolen T, De Boer T, Rebula J, et al. Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 1: Theory and application to three simple gait models[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(9): 1094-1113.
- [63] Caron S, Escande A, Lanari L, et al. Capturability-based pattern generation for walking with variable height[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(2): 517-536.
- [64] Kojio Y, Ishiguro Y, Nguyen K N K, et al. Unified balance control for biped robots including modification of footsteps with angular momentum and falling detection based on capturability[C]. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Macau, 2020: 497-504.
- [65] Delcomyn F. Neural basis of rhythmic behavior in animals[J]. *Science*, 1980, 210(4469): 492-498.
- [66] Huang Y, Vanderborght B, Van Ham R, et al. Torque-stiffness-controlled dynamic walking with central pattern generators[J]. *Biological Cybernetics*, 2014, 108(6): 803-823.
- [67] Xie Z M, Berseth G, Clary P, et al. Feedback control for cassie with deep reinforcement learning[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Madrid, 2019: 1241-1246.
- [68] Castillo G A, Weng B W, Zhang W, et al. Hybrid zero dynamics inspired feedback control policy design for 3D bipedal locomotion using reinforcement learning[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paris, 2020: 8746-8752.
- [69] Wang H Y, Wang Z R, Ren J L, et al. BeamDojo: Learning agile humanoid locomotion on sparse footholds[J/OL]. 2025, arXiv: 2502.10363.

作者简介

李新宇 (1985-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为人工智能、智能制造, E-mail: lixinyu@mail.hust.edu.cn;

高艺平 (1991-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为人形机器人, E-mail: gaoyiping@hust.edu.cn;

罗世林 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人形机器人, E-mail: 1565748003@qq.com;

王佳钰 (2002-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人形

机器人, E-mail: m202470792@hust.edu.cn;

张婷婷 (2001-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人形机器人, E-mail: zhang2tg@163.com;

高亮 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能制造, E-mail: gaoliang@mail.hust.edu.cn.

科研团队简介

高亮、李新宇教授科研团队依托华中科技大学机械科学与工程学院, 以及智能制造装备与技术全国重点、国家智能设计与数控技术创新中心等国家级平台, 长期从事智能机器人、智能制造、人工智能等领域研究, 在液压机器人设计、运动控制、具身智能、深度学习、智能优化等方面取得了突破, 形成了一系列理论成果与工程应用, 服务航空、航天、航海等行业的多家骨干企业.

团队负责人高亮教授是国家杰出青年基金获得者, 华

中科技大学副校长, 入选首届“科学探索奖”, 担任国家智能设计与数控技术创新中心主任, 中国机械工程学会工业大数据与智能系统分会主任委员. 长期致力于智能优化与机器学习方法在设计制造中的应用等研究, 连续多年入选科睿唯安“全球高被引科学家”和爱思唯尔“中国高被引学者”. 李新宇教授, 华中科技大学机械科学与工程学院副院长, 国家级青年人才, 长期致力于人型机器人、工业大数据分析、大模型等领域研究.

目前课题组正承担国家重点研发计划项目、课题, 国家自然科学基金重点类项目等重大科研项目, 曾获国家科技进步二等奖 1 项, 教育部自然科学家 2 项, 湖北省自然科学一等 22 项, 以及 PHM2025、IEEE CSCWD 2025 等国际会议最佳论文\最佳应用论文. 授权国家发明专利 60 余项, 发表 SCI 论文 30 余篇, 受邀国际、国内会议特邀报告 50 余次. 入选 ESI 高被引论文 30 余篇, 热点论文 10 余篇.