

DOI: 10.3901/JME.2023.19.081

足式机器人液压驱动关键技术研究综述*

俞 滨^{1,2,3} 李化顺¹ 黄智鹏¹ 何小龙¹ 巴凯先^{1,2,3}
史亚鹏^{1,2,3} 孔祥东^{1,2,3}

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学起重机械关键技术全国重点实验室 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学先进制造成形技术及装备国家地方联合工程研究中心 秦皇岛 066004)

摘要: 足式机器人以自然界亿万年进化而成的哺乳动物、足式爬行动物或昆虫等足式生物为仿生原型,兼具足式生物肢体运动的灵活性和野外多种复杂地形的适应性,特别是与具备高功重比和快速响应能力优势的液压驱动相结合,大幅提升其运动性能和负重能力。首先,介绍足式机器人应用背景及其液压驱动基本原理,分析液压驱动在足式机器人设计与控制中的重要作用,列举现已公开的国内外多种形式液压足式机器人。其次,阐述近年来国内外研究机构针对足式机器人液压驱动单元、液压动力单元和液压控制方法三方面关键技术,取得的研究进展和研究成果。最后,从与仿生学深度融合的角度,提出了液压足式机器人腿部“肌骨”一体化仿生设计、机身“内脏”紧凑式仿生排布与控制“神经”多层次仿生融合的前沿发展趋势。

关键词: 足式机器人; 液压驱动; 液压驱动单元; 液压动力单元; 液压控制方法

中图分类号: TH137

Review of Hydraulic Driven Key Technologies for Legged Robots

YU Bin^{1,2,3} LI Huashun¹ HUANG Zhipeng¹ HE Xiaolong¹
BA Kaixian^{1,2,3} SHI Yapeng^{1,2,3} KONG Xiangdong^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. National Engineering Research Center for Local Joint of Advanced Manufacturing Technology and Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Legged robots are based on footed creatures such as mammals, reptiles or insects that have evolved over billions of years in nature, and they have both limbs motion flexibility and uneven terrain adaptability that are comparable to those of legged animals. When combined with hydraulic driven that has the advantages of high power-to-weight ratio and fast response, its motion performance and load-carrying capacity can be greatly improved. This paper firstly introduces the background and basic principles of hydraulic driven of legged robots, analyzes the important role of hydraulic driven in the design and control of legged robots, and lists various forms of hydraulic legged robots that have been publicly reported both domestically and internationally. Secondly, recent research contents and achievements on key technologies in hydraulic driven units, hydraulic power units, and hydraulic control methods for legged robots from both domestic and international research institutions have been elaborated. Finally, based the deep integration with bionics, the future development trend of hydraulic legged robots is proposed, including the integrated bionic design of the leg's "muscles and bones", the compact bionic layout of the trunk "internal organs", and the multi-level bionic integration of the control "nerves".

* 国家自然科学基金优秀青年基金 (52122503)、国家重点研发计划 (2018YFB2000700)和河北省优秀青年科学基金(E2022203095)资助项目。
20230331 收到初稿, 20230906 收到修改稿

Key words: legged robots; hydraulic driven; hydraulic driven unit; hydraulic power unit; hydraulic control method

0 前言

机器人可用以辅助甚至替代人类完成危险、繁重和复杂的工作任务,扩大或延伸人的活动及能力范围,已成为 21 世纪全球的热点研究方向。2021 年 6 月,国家为分类推动机器人技术水平,正式实施了《机器人分类》国标(GB/T 39405—2020),将足式机器人与轮式机器人、履带式机器人、蠕动机器人、潜游式机器人和飞行式机器人等^[1-4]并行列入运动方式分类新标准。

足式机器人(Legged robots)亦称足腿式机器人或腿式机器人,是以自然界亿万年进化而成的哺乳动物、足式爬行动物或昆虫等足式生物为仿生原型,与其他运动方式的机器人相比,具有与生俱来的足式生物仿生优势^[5-7],主要体现于以下两方面:足式机器人具有非连续足地支撑特点,对崎岖、松软等多种复杂地形具有优异的适应性;足式机器人具有的多支链冗余驱动的肢体结构,赋予了其运动灵活性与敏捷性,使其易于完成奔跑、爬楼梯、跳跃等多种复杂动作。以上独特优势使足式机器人作为国家聚焦“机器人”重点领域的重要分支,蕴含着广阔的军民市场应用前景。

现今国际前沿的足式机器人已衍生出液压驱动、电机驱动和气压驱动等多种各具优势的驱动方式。但对于多种高负重的应用场景,例如:火灾和地震等抢险救援时替代救援人员背负 60~100 kg 体重的伤员、在放射性等危险环境下运输 60~150 kg 重量的废弃物、单兵野外行进时负重约 60 kg 的作战物资、班组野外行进时负重约 200 kg 的补给物品、无人作战时负重 70 kg 以上的多功能相机和攻击性武器等等,若采用电机驱动,由于电机的最大有效磁通密度受磁性材料的磁饱和限制,使其在足式机器人关节有限安装空间内功重比提升和发热量散发均存在困难,因此会使足式机器人关节臃肿、缺乏爆发力、高功率输出时发热加剧;而气压驱动存在的气体可压缩性降低了系统的动态刚度,难以保证在外界冲击和干扰下足式机器人关节的高精度控制,其较小的气体体积弹性模量也会降低气压驱动的固有频率,在一定程度上限制了气压驱动的响应速度。此时,液压驱动的大功重比、高响应能力和液压油液流动辅助散热等优势凸显,因此,液压驱动仍是当今 60 kg 及以上高负重足式机器人“不可

替代”驱动方式。美国、意大利等发达国家现公布的高负重且具备卓越运动性能的足式机器人^[8-9],均采用了液压驱动。

液压驱动的足式机器人,依据其仿生足式生物原型的足腿数量不同,形成了液压双足机器人(亦称液压人形机器人)^[10]、液压四足机器人^[11-12]与其他液压足式机器人^[13]等多种典型形态。以液压四足机器人为例,依据其仿生足式生物原型的足腿膝肘朝向不同,又形成了前膝前肘、前膝后肘、后膝前肘、后膝后肘四种腿部结构形式。但无论何种形态和腿部结构形式,液压驱动的系统组成和工作原理基本相同,其能量转化的本质是将足式机器人携带的电能为燃料化学能转化为机械能,再通过液动力单元的压力/流量控制,将机械能转化为足式机器人运动所需要的液体压力能,基于帕斯卡原理在液压集成块和油管中实现液体压力能的高效传输,最后进行液压驱动单元的闭环控制,以实现足式机器人腿部各关节液体压力能的精准分配,将液体压力能转化为机械能对外做功,以驱动足式机器人完成高性能运动。总体而言,足式机器人的液压驱动关键技术主要聚焦于液压驱动单元^[14]、液动力单元^[15]和液压控制方法^[16]三个方面。

液压驱动单元(Hydraulic driven unit)亦称为液压驱动器、电液执行器或液动力机构,可形象地比作足式机器人的液压“肌肉”,用于输出足够的功率以驱动液压足式机器人腿部各关节运动。由于足式机器人腿部关节安装空间有限,若能在有限空间内进一步提升液压“肌肉”的功重比,将有助于减小足式机器人腿部关节重量,提升各关节输出功率、单腿支撑能力和摆动灵敏性、以及整机的负重极限。

液动力单元(Hydraulic power unit)亦称为液动力源或液压油源,可形象地比作足式机器人的液压“内脏”(其中,液压泵也形象地比作足式机器人的液压“心脏”),用于为液压足式机器人腿部运动提供稳定的压力和充足的流量。由于足式机器人机身需要内置电池或燃料、惯导单元、运动控制器等诸多元部件,液动力单元在机身内的安装空间同样受限,若能在原始设计过程中即实现液动力单元小型化和轻量化,将有助于足式机器人机身其他元部件安装与排布,减小机身整体体积和重量,提升整机的续航时间和运动性能。

液压控制方法(Hydraulic control method)需要依托控制器、传感器、放大器、直流稳压电源、导线

等诸多液压控制所需的电气硬件以实现快速、精准的闭环控制，液压控制方法与控制所需的电气硬件(即液压控制软硬件)可形象比作足式机器人的液压“神经”。液压控制所需的电气硬件大多为标准电气元器件，更偏重于工程应用，因此，液压控制的研究主要侧重于液压控制方法的研究。液压足式机器人的控制方法相对复杂，其包含了顶层控制、中层控制和底层控制 3 个控制层级，可类比于足式生物的高级中枢神经、低级中枢神经和躯体(含肢体与内脏)运动神经。其中，顶层控制包含整机的步态规划、轨迹规划、姿态控制、环境识别等，起到整机运动规划与全身协调控制等功能；中层控制包含腿部的主动柔顺控制、接触力控制、动力学补偿控制、节能优化控制等，以及液压动力单元的压力/流量自适应调节等，分别起到缓解足地冲击、补偿机身高度变化、减少惯性力影响、腿部低能耗运动、按需调定压力和流量等功能；底层控制包含液压驱动单元的位置闭环控制和力闭环控制，以及液压动力单元的压力闭环控制和流量闭环控制，为保障精准的底层闭环控制性能，还需要引入必要的串联校正、反馈校正、前馈校正、顺馈校正和摩擦泄漏补偿控制等诸多环节，以达到底层闭环控制的稳、快、准性能指标。以上 3 个控制层级形成了多环控制系统，相互耦合关系复杂，但最终均转化为液压驱动单元和液压动力单元的控制输入信号或输入修正信号，因此，液压控制方法并非独立存在，而是融合于中层控制和底层控制中，并受顶层控制的影响。若能将液压控制方法与足式机器人运动控制深度融合，阐明多个层级间的相互耦合关系及其多环稳定性的相互制约关系，将有助于实现足式机器人多种步态下的稳定运动，加速其从实验室走向市场化应用的进程。

本文简要介绍近年来国内外陆续公布的若干典型液压足式机器人，详细阐述足式机器人液压驱动涉及的液压驱动单元、液压动力单元和液压控制方法 3 方面研究现状及研究成果，展望未来足式机器人液压驱动与仿生学融合的发展趋势。

1 典型液压足式机器人

时至今日，国内外已涌现出多种液压足式机器人样机，涵盖以袋鼠和犬类等哺乳动物为仿生对象的液压单足机器人，以人类为仿生对象的液压双足机器人，以马、猎豹和蜥蜴等哺乳动物和爬行动物为仿生对象的液压四足机器人，以昆虫等为仿生对

象的其他液压足式机器人等。科研学者几十年的专注研究，促进了液压足式机器人运动性能的显著提升^[17]。

在液压单足机器人领域，麻省理工学院(Massachusetts institute of technology, MIT)在 1984 年，设计了三维弹跳液压单足机器人 MIThopper^[18]，该机器人由一个框架式髋关节连接弹性腿和身体，通过一对压力控制伺服阀调整髋关节角度变化；1993 年研制出了模仿袋鼠的液压单足机器人 Uniroo^[19]；2002 年，日本东北大学通过对犬类的后肢肌腱仿生研究，研制出了液压单足机器人 Kenken^[20]。

在液压双足机器人领域，美国波士顿动力(Boston dynamics, BD)公司等走在前列。早在 1989 年，BD 公司的前身即开展了液压双足机器人的稳定行走和翻转试验；2009 年，BD 公司正式公开作为试验型号的 Petman 行走视频^[21]。2013 年至今，三代 Atlas 机器人运动视频逐步公布，随着拓扑优化和增材制造技术的引入，其机械结构和液压驱动的重量大幅减轻，集成化和一体化更加显著，加之控制方法的革新升级，现已实现从行走到后空翻、跑酷等多种高难度动作的飞跃^[22-23]。国外其他机构也研制了液压双足机器人样机，例如：美国卡内基梅隆大学的 Sarcos Primus 双足机器人^[24]、美国人机认知研究所的 Nadia 机器人^[25]、日本立命馆大学的 TaeMu 机器人^[26]和采用泵控执行器驱动的 Hydra 机器人^[27]。国内山东大学^[28]、东南大学^[29]、华中科技大学^[30]等知名高校也研制了液压双足机器人样机，取得了诸多研究成果。

在液压四足机器人领域，BD 公司的前身在 1990 年便开展了液压四足机器人样机的对角小跑、踱步和跳跃等多种步态试验，但未引起各国学者重视。2005 年，BD 公司公布了 BigDog 机器人，并于 2008 年公开了其多种地形的负重行走视频，引发了研究热潮^[31-32]。此后，BD 公司又推出了具有携带 180 kg 有效载荷能力的 LS3^[33]、速度更快的仿猎豹机器人 WildCat^[34]以及新一代更小更灵活的机器人 Spot^[35]。意大利技术研究院(Italian institute of technology, IIT)也较早地开展了液压四足机器人的研制，并于 2007 年液压四足机器人 HyQ^[36-37]，随后陆续公布了 HyQ-blue^[38]、miniHyQ^[39]、Hyq2Max^[40-41]、HyQReal^[42]等，并公开了 HyQReal 机器人拖拽 3 t 重飞机的行进视频。诸如韩国工业技术研究院与现代公司等其他国家的研究机构，也研制了 p2^[43]、qRT-1/2^[44]、Jinpoong^[45]等一系列液压四

足机器人。国内液压四足机器人的研制虽起步较晚,但也取得了诸多成绩。2010 年,在国家高技术研究发展计划(863 计划)的资助下,山东大学推出了 SCalf 系列机器人^[46-49],哈尔滨工业大学陆续推出了 MBBOT^[50]、EHbot^[51]和仿猎豹机器人^[52],国防科学技术大学^[53-55]、北京理工大学^[56]等知名高校科研团队均有液压四足机器人公布,北方车辆研究所亦推出了液压四足机器人铁牛^[57],浙江大学^[58]、哈尔滨理工大学^[59]、北京理工大学^[60]、华中科技大学^[61-62]、燕山大学^[63-64]等高校也公布了近期研制液压四足机器人。

在其他液压足式机器人领域,六足、八足等液压足式机器人在稳定和承载能力方面有着更大优势。液压六足机器人的起源可以追溯到 1986 年,美

国俄亥俄州立大学研究团队设计研发出了 ASV^[65]。约翰迪尔公司也针对林业应用领域设计了足式机器人 Plustech Oy Walking Machine^[66]。2009 年,用于建造桥梁、探索危险区域的液压六足机器人 Hydraulic Landmaster 公布,相较于电驱版本 Electric Landmaster 3,其承载能力更强^[67]。2011 年,日本千叶大学也完成了六足机器人 COMET-IV 的研发^[68];在英国,模仿昆虫六足机器人 MANTIS 也于 2013 年亮相^[69]。国内的西南科技大学^[70]、吉林大学^[71]、哈尔滨工业大学^[72]、北京理工大学^[73]等高校也对其他液压足式机器人进行了广泛研究。

液压足式机器人现已成为机器人领域的研究热点之一,依据现已公开的资料,多种形式的典型液压足式机器人如图 1 所示。

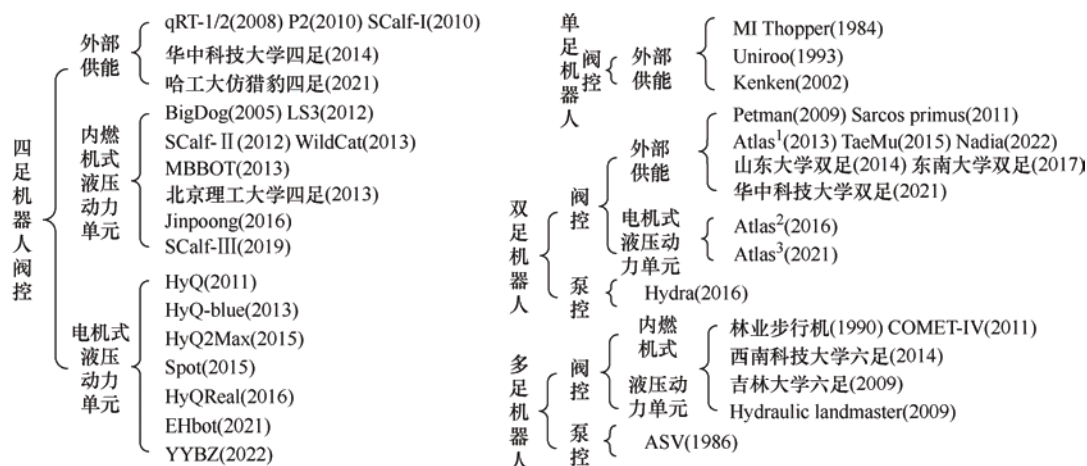


图 1 多种形式的典型液压足式机器人

2 液压驱动单元

液压足式机器人腿部一般由多个液压驱动单元串联或并联构成,不同腿部构型适用于高负重、高速、跳跃等不同的应用场景,国内外学者在腿部构型设计与排布等方面开展了研究。1986 年,俄亥俄州立大学以平行四边形缩放机构为基础,设计一种适用于大负载六足机器人的腿部构型^[65],推动了机器人在实际野外大负载运输应用的可行性。2006 年,西北工业大学以袋鼠腿部构型为仿生对象,分析了在运动时腿部肌腱、腿长等起到的作用,揭示了袋鼠在跳跃时跳跃距离远、运动过程平稳以及能量损耗较低的运动学规律^[74],设计了适用于跳跃运动的仿生腿部机构。2011 年,马德里理工大学从马腿中提取了关键原理,基于串联弹性和磁流变阻尼器的混合使用,开发了一种具备可变柔性的仿生敏捷腿构型^[75]。2014 年,韩国科学技术院以猫的骨骼

肌系统和腿部构造为仿生对象,确定了机器人腿部机构各杆件尺寸和杆件结构,设计了适用于快速运动的连杆腿部机构^[76]。2016 年,浙江大学根据大型犬后腿结构仿生和运动仿生的研究成果,设计了多足机器人单腿机械结构^[77],研究动态步态下足端与地面高速接触对机器人系统的影响及实现稳定控制。然而,对于液压足式机器人,无论选用何种腿部构型,其核心驱动部件仍为腿部关节的液压驱动单元,该液压驱动单元的设计、制造和控制水平,直接决定着整腿的运动性能和负重能力。

液压驱动单元由伺服控制元件、伺服执行元件、传感检测元件等组成。其中,伺服控制元件一般选用电液伺服阀(动态性能要求不高的场合亦可选用成本较低的电液比例阀),在对效率要求很高的场合也可选用电液比例变量泵或伺服电机定量泵,由于电液伺服阀内部运动件体积小、质量轻,其频宽可达 100~200 Hz,相对于电液比例变量泵或伺服电机定量泵的动态性能更好,更适用于液压足式机器

人腿部关节的快速运动控制。伺服执行元件一般采用直线运动的伺服缸,但对于需要大摆动角度的腿部关节也可采用伺服摆缸或液压马达,相比而言,直线运动的伺服缸在低速稳定性、液压刚度、内泄漏、重量和体积等方面更具优势。传感检测元件包括位移/角度传感器、力/力矩传感器、压力传感器等,实现对机器人关节位置、速度、力/力矩等状态参数的检测和控制,诸多液压控制方法的实施也需要上述传感检测元件。近年来,液压驱动单元的研究主要聚焦于高功重比设计、一体化制造与集成、新材料与新工艺应用等关键技术。

2006 年, BD 公司公布了应用在 BigDog 的液压驱动单元,对伺服阀、伺服缸、位移传感器和力传感器进行集成,可实现力/位置闭环控制^[74]。2008 年, BD 公司在液压驱动单元上搭配了质量更轻的 MOOG 两级电液伺服阀,同时进行了缸体结构优化设计,使液压驱动单元整体布局更为紧凑、体积更小、质量更轻,进一步提高了其功重比^[32]。2010 年, IIT 的 HyQ 使用了定制的液压驱动单元,集成了伺服阀、伺服缸、集成块、油管、关节编码器以及由传感器和伺服阀放大器组成的电子设备^[37]。

2011 年,德国慕尼黑工业大学设计了一种应用于液压双足机器人 Hydroid 的泵控液压驱动单元集成结构^[79]。2013 年,山东大学^[80]、哈尔滨工业大学^[81]、北京理工大学^[82]等设计的液压驱动单元,均采用类似 BigDog 集成化阀控液压驱动单元的结构形式,将各类元器件集成到液压驱动单元缸体上,力传感器和位移传感器提供输出力和位置的反馈信号,通过伺服阀实现高频闭环控制,驱动机器人腿部关节运动。2014 年,国防科学技术大学^[83]为了提高液压驱动的效率,提出了一种有效面积可变的伺服缸,通过减少节流损失和实现能量回收以降低能耗。同年,上海交通大学 Baby Elephant 机器人采用的液压驱动单元由伺服缸、移动滑阀电动机和压力传感器等组成,实现了液压驱动单元的多功能集成^[84]。同年,华中科技大学液压四足机器人腿部关节通过伺服缸驱动机械支架结构,为了降低腿部惯性,腿部仅布置了角度、位移和力传感器来检测信号,其他液压元件布置于机身^[85]。同年,日本东京大学研发了一种应用于机器人 Hydra 的泵控液压驱动单元,实现了高功率输出、高耐用性和反向驱动功能^[86]。2015 年,北京理工大学设计的 BITDOG 液压驱动单元,由伺服阀、伺服缸、位移传感器、压力传感器和减振器组成,并研发了与其匹配的主动柔顺控制器^[87]。同年, BD 公司的高性能四足机器人

WildCat^[34]使用旋转式液压驱动单元作为髋关节。

2016 年,韩国工业技术研究院研发的 Jinpoong,其腿部关节纵摆运动采用集成化液压驱动单元,同时其侧摆关节从传统的直线伺服缸驱动替换成了高功重比的伺服摆缸驱动^[45]。同年,日本东京工业大学分析液压驱动单元带宽和功重比之间关系,提升其反向驱动性能,在机器人腿部各关节分别采用泵控双作用直线缸和泵控双叶片摆动缸^[88]。同年,哈尔滨工业大学将液压驱动单元集成了弹性执行机构 (Series elastic actuator, SEA),使用两个位移传感器分别测量活塞杆和 SEA 输出轴的运动,通过控制弹簧的压缩长度,精确控制弹簧力,从而实现力控制和柔顺控制^[89]。2017 年,日本立命馆大学开发了一种用于 TaeMu 轻型液压腿的力控液压驱动单元^[90]。同年,燕山大学研发了一款应用于仿生双足机器人上的轻型液压驱动单元,并提出了腿部关节变阻抗主动柔顺控制方法^[91]。2019 年,山东大学研发一体化液压关节直线伺服缸,集成了位移传感器和力传感器以实现关节位移及力的测量^[92]。2020 年,山东大学公布了一款具有被动柔顺性的液压驱动单元,将蓄能器连接到液压缸的活塞室,以缓冲足端和地面之间的冲击力^[93]。

2021 年,江苏集萃智能制造技术研究所设计一款液压驱动单元,安装于其公司研制的液压四足机器人腿部关节,可实现位置和力闭环控制^[94]。2023 年,哈尔滨工业大学设计了一款具有高扭矩重量比的关节机器人的旋转型液压执行器,可以减轻关节重量,减小关节尺寸,提高关节运动的控制性能^[7]。

依据现已公开的资料,上述研究机构的典型液压驱动单元如图 2 所示。

近 5 年,随着机械制造水平、增材制造工艺与非金属材料的发展与应用,国内外多家研究机构不断尝试新方法,以进一步提升液压驱动单元的一体化程度和功重比指标。

2018 年, MOOG 与 IIT 合作开发了增材制造、高度集成的智能液压驱动单元 (Integrated smart actuators, ISA),具备以下特点:① 利用低泄漏伺服阀来减少能量损失;② 通过金属增材制造实现结构紧凑性;③ 集成多功能内置控制器实现高性能控制。其中, ISA v2 上集成了高响应伺服阀、用于位置/力控制的多种传感器、用于过载保护的泄压阀,并将微控制器、阀门放大器、惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU)、温度传感器等部件合并至同一个电子板中,传感器导线在缸体内布线,更少更短的导线有利于提升可靠性并减少信号噪声。之

后, 液压足式机器人对液压驱动单元的更高需求引发了对 ISA v2 的重新设计, 在衡量高性能和效率两大矛盾后出现了 ISA v5 版本, 采用了超低泄漏阀 (Ultra low leakage valve, ULLV) 技术, 以显著降低

节流损失并提高整个装置的效率。另外, 通过标准件与增材制造非标件组合, 形成了一种由智能阀组、定制的旋转致动器和传感器组成的集成旋转执行器, 可用于驱动机器人髋关节的外展或者内收^[95]。



图 2 上述研究机构设计的典型液压驱动单元

2019—2022 年, 燕山大学也开展液压驱动单元的轻量化研究^[96-98], 聚焦液压驱动单元设计参数的非线性耦合等问题, 提出了液压驱动单元轻量化参数匹配设计方法, 并尝试采用液压驱动单元替代单腿的部分支撑结构、将腿部液压油管内置等方法, 设计了两种腿部关节一体化液压驱动单元, 减轻了单腿整体重量^[99-100]。之后, 进一步研制了增材制造液压驱动单元^[101], 将液压管路布置于缸体表面并进行仿生优化设计, 降低了油液在管路中的压力损失, 缸体表面布置仿生加强筋, 保证缸体强度和刚度的前提下减小了缸体壁厚。

为了承受高压, 液压驱动单元的材料大多数为金属材料, 新材料和新工艺的应用为液压驱动单元

的轻量化提供了新途径。2021 年, 浙江大学利用碳纤维复合结构设计与缠绕技术, 完成了“模型设计-仿真校核-自动化加工-后处理”整套工艺探索, 以铝合金为内衬, 利用四轴自动缠绕机实现了碳纤维缸体的加工, 并开发了一种局部后处理工艺, 在不损坏碳纤维层的情况下, 实现金属的硬质处理, 质量较同规格钢制的液压缸减轻了 50%^[58, 102-103], 最终形成了碳纤维液压驱动单元。

2022 年, 美国人机认知研究所 Nadia 的关节驱动器, 使用 MOOG 公司 2018 年公布的 ISA, 其功重比大, 可提供优越的动态性能^[25]。

依据现已公开的资料, 上述研究机构设计的典型液压驱动单元如图 3 所示。

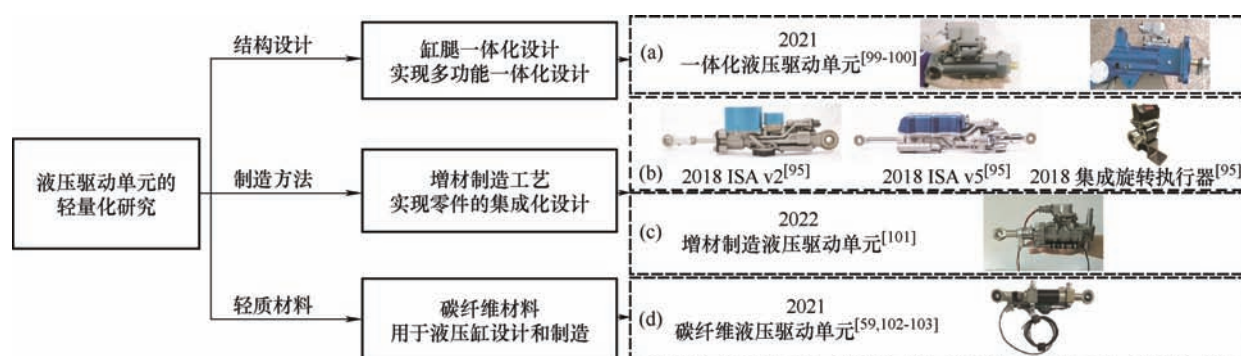


图 3 上述研究机构设计的典型液压驱动单元

3 液压动力单元

液压动力单元由原动机(内燃机或电动机)、液

压泵、液压附件、液压油、压力检测与控制元件等组成。BD 公司曾宣称, 把液压动力单元集成至足式机器人样机上是一项非常艰巨的工作, 即使是 BigDog, 2011 年时其液压动力单元依然存在噪声

大、连续运行时间短的问题^[47]。因此在液压足式机器人发展早期，多采用相对简单且便于维护的外接泵站作为供能装备，如 Petman、SCalf-I 等。但外接泵站存在着以下问题：管路较长会降低液压系统的响应速度，进而影响机器人的动作精度；与机器人之间的连接部件数量与复杂度增大，容易出现泄漏与故障；移动性差，限制了机器人的运动范围，无法进行户外活动。

随着液压驱动技术的不断发展，当前液压动力单元主要分为两大类：一类是以汽油发动机、柴油发动机等内燃机作为原动机驱动液压泵的内燃机式液压动力单元，应用于 BigDog、LS3、SCalf-II/III、铁牛等足式机器人；另一类是以电机作为原动机驱动液压泵的电机式液压动力单元，应用于 HyQ 系列、Spot、Atlas、EHbot 等足式机器人。

内燃机式液压动力单元构型相对简单，且易于维护和保养，可靠性较高，但体积质量较大，存在较大的振动，会影响机械结构与机载控制元件的性能，噪声污染与环境污染明显，并有一定的安全风险。电机式液压动力单元体积质量较小，更便于优化构型布局，振动与噪声小，同时电机的优良伺服特性使液压动力单元的压力、流量控制更加精准^[104]，但需要配备大容量的电池，也涉及电池充电问题，电机的功率密度和扭矩也需要进一步提升。

近年来，液压动力单元的研究主要聚焦于多元部件一体化集成、结构紧凑小型化、稳定压力和流量输出等关键技术。

3.1 内燃机式液压动力单元

2004 年，BD 公司以两缸发动机与变量泵为核心，设计了一种应用于第一代 BigDog 的内燃机式液压动力单元。如图 4 所示，采用了集成设计理念，高压油通过中央阀块输出至液压驱动单元^[78]。



图 4 2004 年 BigDog 的液压动力单元^[78]

2008 年，第二代 BigDog 以一台水冷式二冲程内燃机为核心，构建了一种新型液压动力单元。如图 5 所示，同时对阀块、蓄能器与冷却器等元件进行了初步的分布设计，提升机身空间利用率的同时

也降低了液压动力单元的体积^[32, 37]。

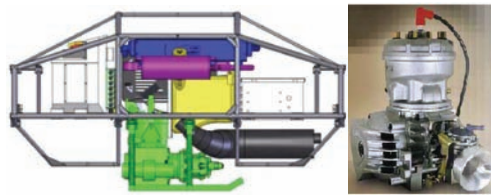


图 5 2008 年 BigDog 的液压动力单元^[32, 37]

2012 年，BD 公司在 BigDog 的基础上研发了 LS3，同样以由燃油发动机或柴油发动机为核心设计内燃机式液压动力单元，燃料充足的情况下能够支持机器人行走 32 km^[36]，静音性能也有所突破，有效降低了运行过程中的噪声^[105]。一年后，该公司新推出的 WildCat，以甲醇发动机为核心构建液压动力单元，功率方面取得了更大的突破，能支持机器人在奔跑中转向和急停，最高奔跑速度约为 25.7 km/h^[106]。

2014 年，山东大学 SCalf-II 诞生，相比 SCalf-I 外接泵站的方式，其装载了内燃机式液压动力单元，通过 ROTAX MAX125 发动机驱动液压泵，摆脱了外接油管的限制，如图 6 所示^[47]。2019 年，山东大学新研发的 SCalf-III，采用超轻型飞行器所使用的双缸水冷燃油发动机作为原动机构建液压动力单元，振动小且功率扭矩较大，在加装进气消音器与二级消音器后，可有效减小发动机的工作噪音，如图 7 所示^[91]。



图 6 SCalf-II 的液压动力单元^[47]



图 7 SCalf-III 的液压动力单元^[91]

2014 年,中国北方车辆研究所研制的铁牛,其液压动力单元的原动机为汽油发动机,总体续航能力 2 h^[57],如图 8 所示。哈尔滨工业大学 MBBOT 所搭载的液压动力单元,如图 9 所示,原动机为单缸两冲程水冷发动机,功率密度高且结构紧凑^[81]。



图 8 铁牛的液压动力单元^[57]

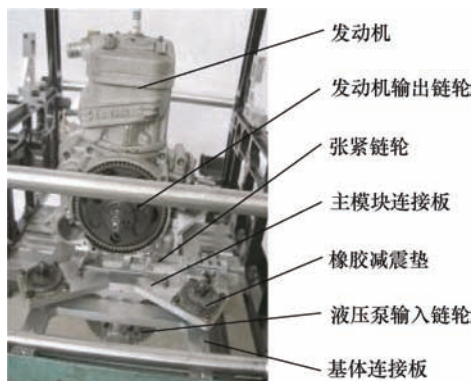


图 9 MBBOT 的液压动力单元^[81]

2015 年,北京理工大学以两冲程汽油发动机驱动变量柱塞泵,设计了一种液压动力单元,具有体积小、功率大等优势,如图 10 所示,并配备发电装置,驱动风扇对系统进行冷却^[107]。

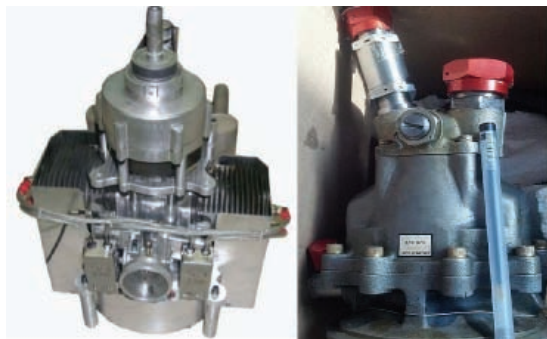


图 10 北京理工大学机器人液压动力单元^[107]

2016 年,韩国工业技术研究院的 Jinpoong 以一台二冲程发动机与斜盘液压泵为核心,设计了一种内燃机式液压动力单元,如图 11 所示^[45],优化了液

压泵、油箱与管路等液压元件的空间利用效率。

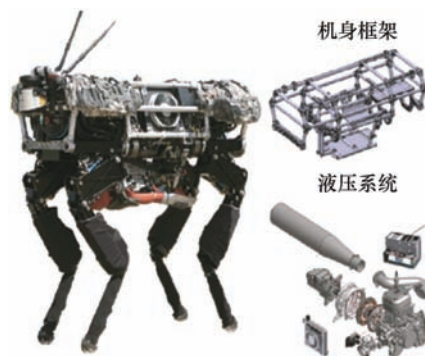


图 11 Jinpoong 的液压动力单元^[45]

2016 年,吉林大学设计的重载六足机器人,液压动力单元为柴油四缸水冷发动机驱动恒压变量泵,自身匹配散热风冷系统,如图 12 所示^[108]。

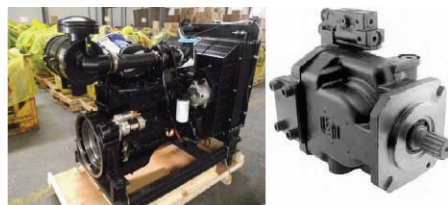


图 12 吉林大学机器人液压动力单元^[108]

2018 年,哈尔滨工业大学^[97]研发了一种液压动力单元,如图 13 所示,将内燃机、蓄能器、过滤器、低压油箱、冷却器、传感器等元件进行了集成设计。

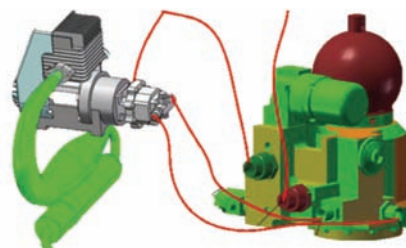


图 13 哈尔滨工业大学液压动力单元^[97]

2021 年,国防科技大学^[109]针对液压双足机器人,以发动机驱动恒压变量泵设计了液压动力单元,利用模块化、集成化设计方法,提高液压系统集成度,如图 14 所示。



图 14 国防科技大学液压动力单元^[109]

3.2 电机式液压动力单元

2009 年, IIT 以铝制两极 400 V 交流电机驱动定量泵, 为 HyQ 开发了一种电机式液压动力单元, 实现了压力在一定范围内的调节, 如图 15 所示^[37]。2015 年, IIT 为 MiniHyQ 研发了一种轻型液压动力单元, 采用直流无刷电机驱动轴向柱塞泵的方案, 如图 16 所示^[110]。同年, BD 公司开发的 Spot 也采用电机式液压动力单元^[35]。

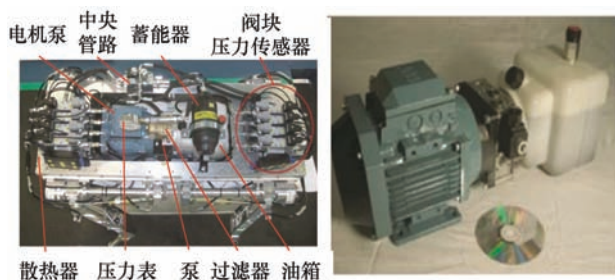


图 15 HyQ 的液压动力单元^[37]

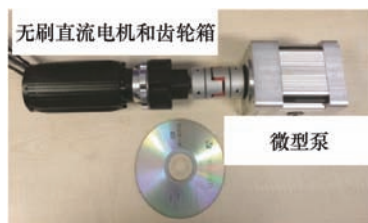


图 16 MiniHyQ 的液压动力单元^[110]

2015 年, 第二代 Atlas 搭载了电机驱动可变压泵组成的液压动力单元, 初步脱离了液压油管的束缚, 搭载的锂离子电池能支持机器人运动 1 h^[64]。2021 年, 第三代 Atlas 以永磁同步电机驱动高速泵作为液压动力单元, 如图 17 所示, 其采用金属 3D 打印一体化结构设计, 布局紧凑, 减小了轴向尺寸, 实现了轻量化, 其功重比约为 5 kW/5 kg^[111], 具有显著优势, 电机和液压泵也实现了一体化, 如图 18 所示, 且能耗也得到了进一步降低^[112-113]。

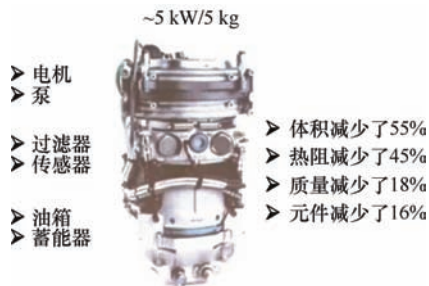


图 17 Atlas 的液压动力单元^[111]

2019 年, IIT 针对 HyQReal1, 以油冷电机驱动齿轮泵设计了一种液压动力单元, 如图 19 所示。电

机和液压泵通过油浸的方式大幅缩小了整体尺寸, 并能更好地给电机泵降温, 同时通过高速、低噪音风扇给系统降温, 通过挡板隔离对外的噪声。2022 年, IIT 推出了 HyQReal2, 其液压动力单元为单电机泵形式, 如图 20 所示, 该液压动力单元减少了组件数量, 重量和成本均有所下降, 并优化了进油口的设计, 增加最大流量且提高了效率^[42]。

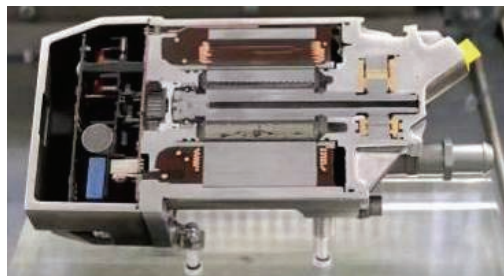


图 18 RAPA 电动泵单元^[113]

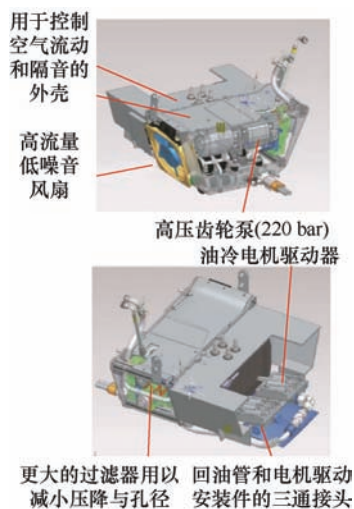


图 19 HyQReal1 的液压动力单元^[42]

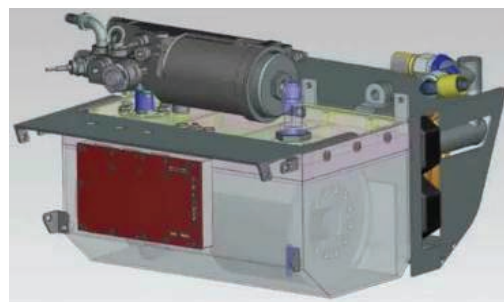


图 20 HyQReal2 的液压动力单元^[42]

2018 年, 燕山大学采用伺服电机驱动齿轮泵, 研发了双足机器人液压动力单元^[97], 如图 21 所示。该液压动力单元集成了蓄能器、低压油箱、控制阀、阀块、传感器、风冷却器等, 可根据负载压力和流量需求调节伺服电机转矩和转速, 用于减小溢流损失、提高能源利用率, 但整机体积仍较大。2021 年,

继续研究小型化液压动力单元参数匹配与多元部件排布方法^[114], 采用伺服电机驱动柱塞泵的形式, 与哈尔滨工业大学联合研发了四足机器人液压动力单元^[115](工作压力 21 MPa, 最大流量 40 L/min, 尺寸 515 mm×320 mm×325 mm), 如图 22 所示。

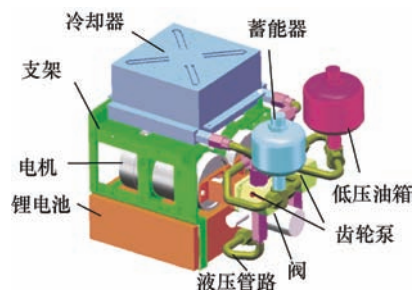


图 21 燕山大学 2018 年的液压动力单元^[97]

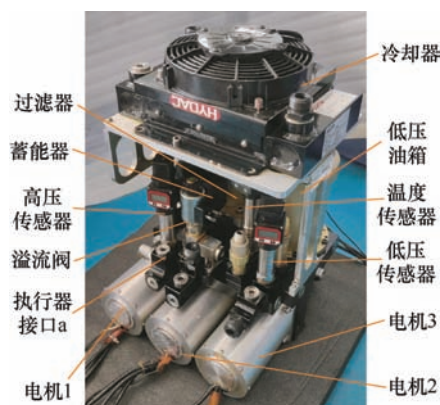


图 22 燕山大学 2022 年的轻量化液压动力单元^[115]

2019—2021 年, 哈尔滨工业大学与江苏集萃智能制造技术研究所采用电机驱动柱塞泵的设计方案, 联合研发了应用于四足机器人的液压动力单元^[94, 116], 如图 23 所示。



图 23 哈尔滨工业大学小型化液压动力单元^[94]

2020 年, 华中科技大学采用伺服电机驱动齿轮泵方案, 设计了应用于双足机器人的液压动力单元^[117], 如图 24 所示。该液压动力单元整体结构紧凑严密, 散热效率高, 将油箱设置于泵的上方, 改善齿轮泵吸油性能的同时减小振动。

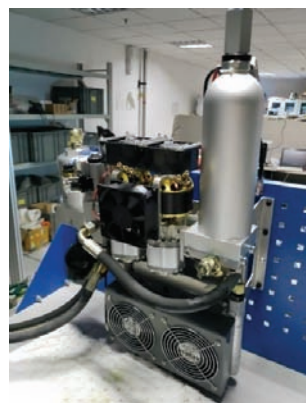


图 24 华中科技大学液压动力单元^[117]

2021 年, 哈尔滨工业大学针对 EHbot, 采用多组电机和齿轮泵的方案设计了液压动力单元^[104], 保证了高功率需求与尺寸要求, 如图 25 所示。

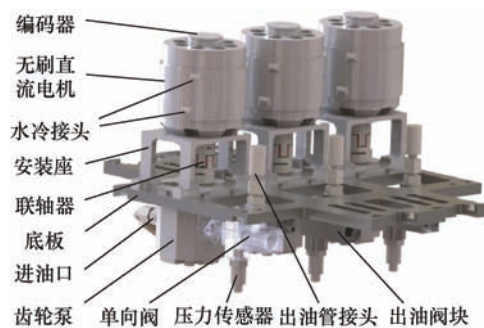


图 25 哈尔滨工业大学液压动力单元^[104]

2022 年, 山东大学为轮腿双足机器人设计了一种紧凑型液压动力单元^[118], 引入了负载敏感系统, 功耗降低了 50 % 以上, 如图 26 所示。

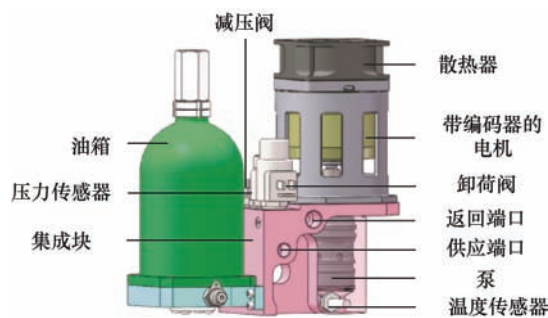
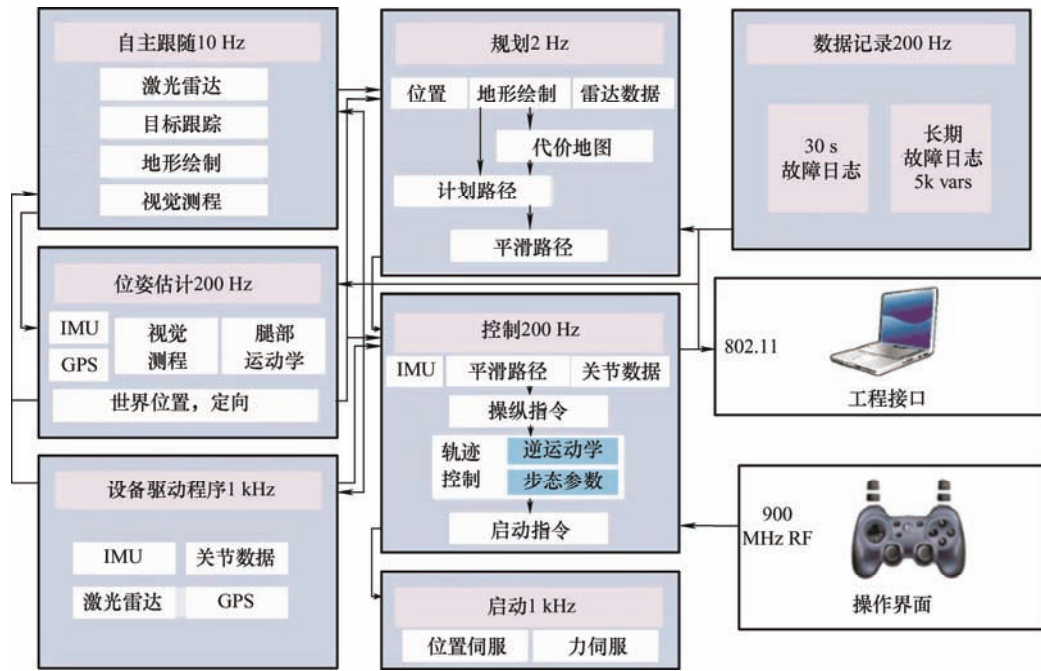


图 26 山东大学的液压动力单元^[118]

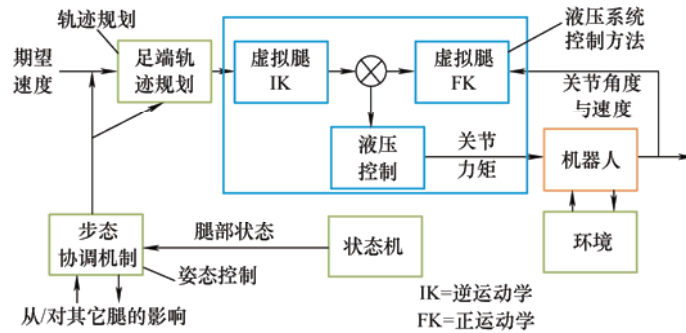
4 液压控制方法

2008 年, BD 公司提出了液压四足机器人 BigDog 整机的分层控制理念^[119], 将底层液压系统控制和整机姿态、轨迹规划控制进行了融合, 如图 27 所示, 不同控制层级的信号检测和控制速率不同, 结合控制器内路径规划、出力控制等多算法划分优先控制层级, 减少了计算处理的复杂程度。

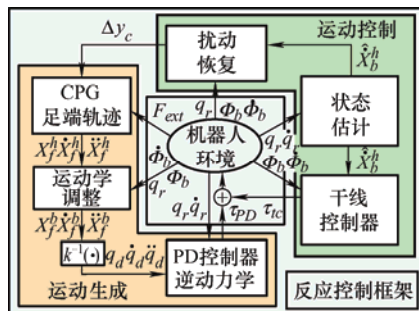
图 27 BigDog 整机分层融合控制理念^[119]

从已经公布的信息可见，截止 2022 年，BD 公司随后发布的 WildCat、LS3、Spot、Atlas 等多款液

压足式机器人，控制框架依旧遵循着 BigDog 的整机控制理念，如图 28 所示^[31, 120]。

图 28 BigDog 等机器人基本控制系统框架^[31, 120]

2013 年，IIT 在 HyQ 控制中，沿用 BigDog 控制框架，并在基础上衍生出捕获点理论、浮动基动力学等顶层控制方法，该控制框架可实现顶层规划与底层液压的控制信息交互，如图 29 所示^[121]。

图 29 HyQ 的整机控制框架^[121]

国内山东大学、北京理工大学、国防科技大学、上海交通大学、中国兵器 201 所等研究机构也依托自主研发的液压足式机器人样机，提出整机控制方法，实现了液压足式机器人的稳定行走。

2023 年，哈尔滨工业大学分析影响四足动物能效的步态参数，采用全局优化算法求解最优能效参数，提出了一种基于最优能效的液压四足机器人控制方法^[122]，保证了机器人高速运动的稳定性，如图 30 所示。

2023 年，燕山大学也尝试将液压控制方法与机器人整机控制方法相融合，提出了顶层的轨迹规划、姿态判断和环境估计与中层的腿部液压控制、底层的液压驱动单元控制和液压动力

分的线性化方案和重新构造的代价函数, MPC 控制被转换为标准的二次规划形式, 实现了机器人的三

维稳定控制^[138]。

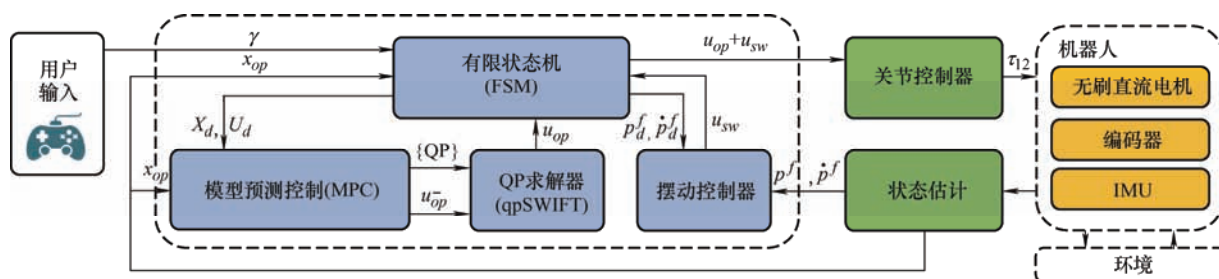


图 37 伊利诺伊大学无表征模型预测控制^[138]

2022 年, IIT 提出了同时考虑线性和角度动力学的支承点评估准则, 并与基于视觉的足底适应控制结合, 对机器人运动学、腿部碰撞和地形形态等进行研究^[139], 该方法适用于多种复杂运动工况, 如图 38 所示。

2023 年, 韩国科学技术院提出了一种基于模型预测控制(MPC)的最优控制框架, 如图 39 所示。该方法应用于液压双足机器人上, 允许机器人在不失去平衡的情况下实现预设的指令运动, 同时减小了能量消耗^[140]。

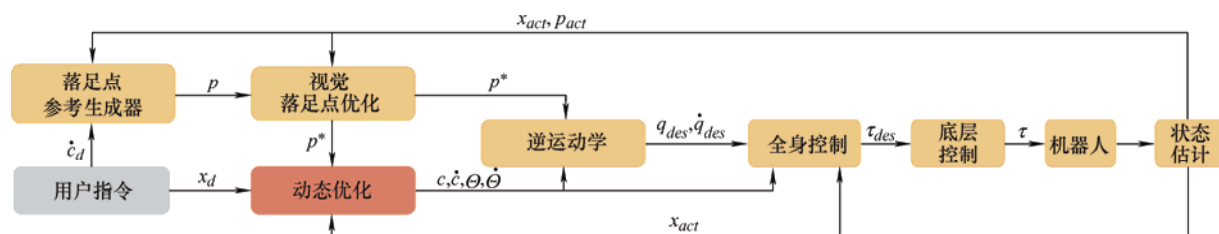


图 38 IIT 基于落足点评估的足端轨迹控制^[139]

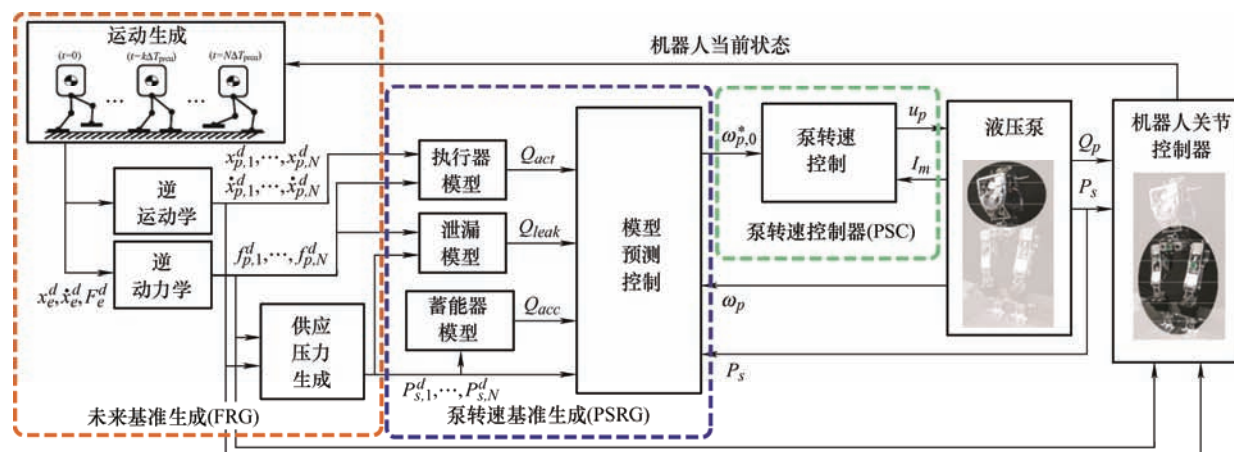


图 39 韩国科学技术院基于 MPC 的效率最优控制^[140]

4.2 中层控制

中层控制的研究主要聚焦于柔顺控制(以主动柔顺控制的阻抗控制为代表)、接触力控制和动力学补偿控制等。

柔顺控制的主要作用是缓解足式机器人运动过程中不可避免存在足地冲击, 主要有足端弹簧被动柔顺缓冲和腿部主动柔顺控制两种^[141]。前者固有频率高且柔顺缓冲快, 但弹簧刚度参数固定, 难以适用于全工况, 并增加了液压驱动的弹性负载, 使液

压驱动的建模和控制难度增大。后者利用足式机器人足端或液压驱动单元的力/位信号偏差, 主动模拟弹簧与阻尼特性, 实时调节刚度和阻尼参数^[142]。阻抗控制是一种典型的二阶动态主动柔顺控制方法, 根据内环控制变量的不同, 阻抗控制可分为基于位置的阻抗控制和基于力的阻抗控制。基于位置的阻抗控制内环采用位置闭环控制, 外环采用阻抗控制^[143]; 基于力的阻抗控制内环采用力闭环控制, 外环亦采用阻抗控制, 两者虽实现方式不同, 但工作

机理相似。主动柔顺控制的缓冲效果取决于液压驱动的响应速度和随动精度。

接触力控制可在主动柔顺控制的基础上, 以各腿的足端力为控制目标实现, 进而控制足式机器人的机身高度。动力学补偿控制在足式机器人运动过程中, 用于补偿由于机身重量、腿部重量和负重等效于各液压驱动单元的惯性力干扰, 以有利于各液压驱动单元响应速度和控制精度的提升。

2013 年, IIT 公布了 HyQ 一种基于位置的阻抗控制框架, 如图 40 所示。通过实时改变力控制外环的刚度和阻尼参数, 进而调节位置控制内环的位置输入, 使其腿部具备良好的柔顺效果^[144]。

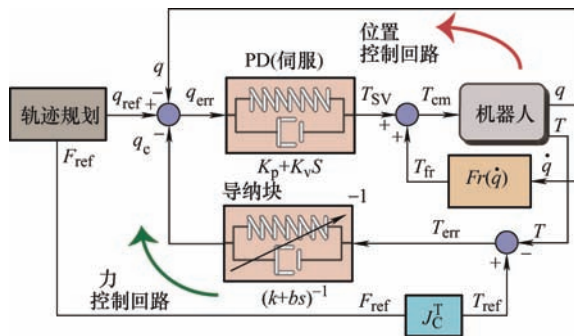


图 40 HyQ 基于位置的阻抗控制^[144]

2015 年, 哈尔滨工业大学提出了串联弹性的阻抗控制模型, 如图 41 所示。通过检测弹簧的压缩量来估计机器人驱动器末端受到的力作用, 并基于理想的阻抗特性进行合理的位置补偿, 对未知环境具有更好的适应性^[145]。

2016 年, 山东大学提出了基于位置的阻抗控制方法, 并用于液压四足机器人 SCalf 系列, 如图 42 所示。采用关节力矩反馈推算的方式代替了足端力传感器求解足底接触力, 并作为阻抗外环的力输入

用以调节内环期望位置, 具有良好的柔顺特性^[47]。

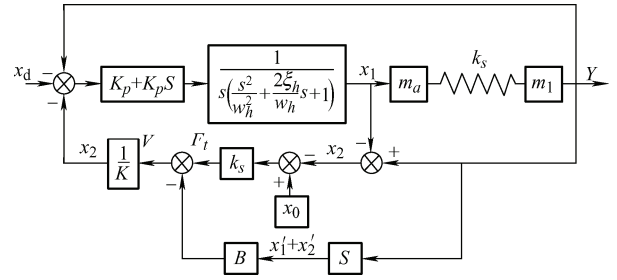


图 41 哈尔滨工业大学基于位置的阻抗控制^[145]

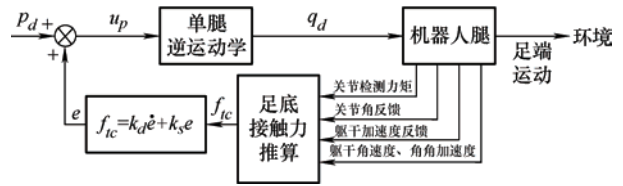


图 42 山东大学基于位置的阻抗控制^[47]

同年, 哈尔滨工业大学在液压足式机器人单腿上实现了基于力的阻抗控制, 如图 43 所示, 将液压驱动单元等效为一个弹簧阻尼系统, 将阻抗控制器等效为 PD 控制器, 刚度控制为比例环节、阻尼控制为微分环节。通过足端实际位置和速度与期望位置和速度的偏差求解期望力, 实现阻抗特性^[146]。

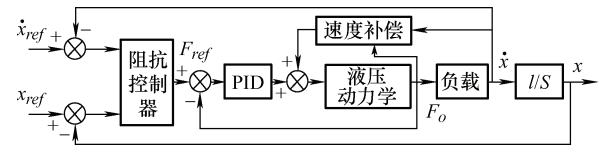


图 43 哈尔滨工业大学基于力的阻抗控制^[146]

同年, 华中科技大学同样在机器人单腿柔顺控制试验中采用了基于力的阻抗控制^[62], 并通过动力学补偿实现了较为准确的位置跟踪, 如图 44 所示。

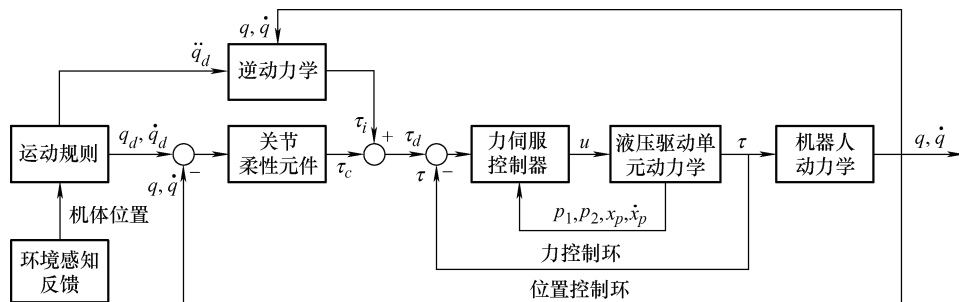
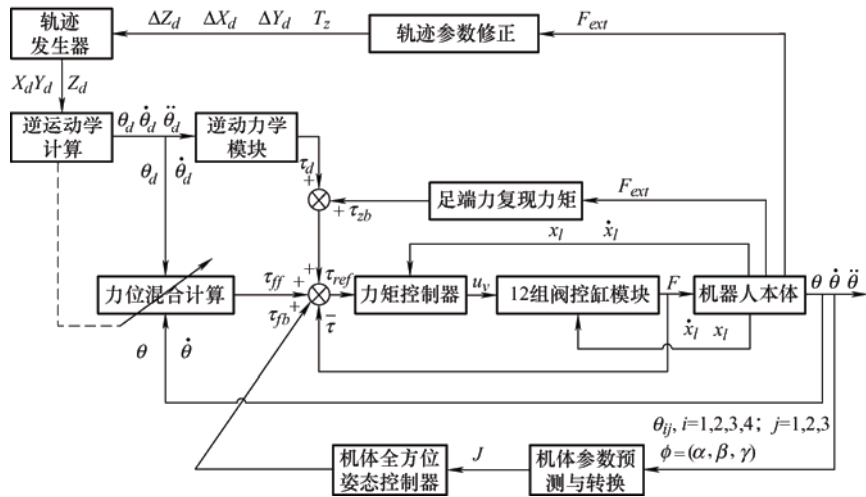
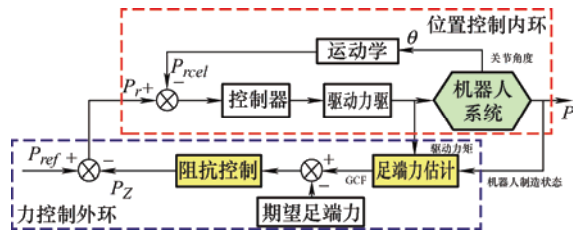


图 44 华中科技大学基于力的阻抗控制^[62]

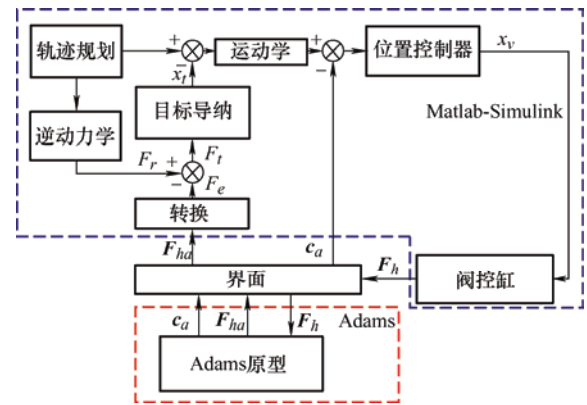
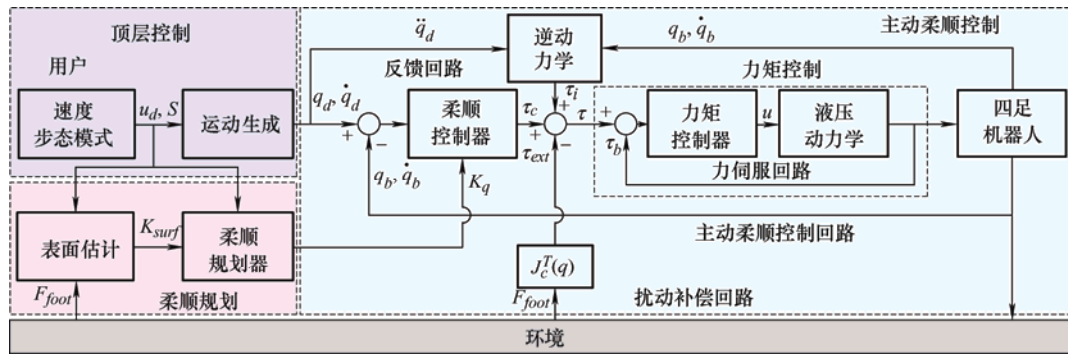
2015 年至今, 燕山大学研究了单腿各液压驱动单元等效为多刚度弹簧串并联的耦合机理, 在此基础上提出了多环补偿控制的单腿液压系统及关节液压驱动单元主动柔顺控制方法, 并与接触力控制方法和动力学补偿方法结合, 如图 45 所示, 使单腿具

备了足端柔顺、腿顶高度不变和腿部运动“失重”效果^[147-149]。

2018 年, 北京理工大学针对液压足式机器人能量调节及其单腿弹跳运动控制问题, 将单腿等效为弹簧负载倒立摆模型, 提出了一种主动变刚度的控

图 48 哈尔滨工业大学基于前馈 PD 阻抗控制补偿^[152]图 49 国防科技大学基于足端力估计的轨迹规划控制^[153]

2021 年，华中科技大学提出了一种考虑地面的仿生腿柔顺性规划与实现方法，基于频域地面反作用力分析，估计地面刚度，并在运动过程中主动调节腿部柔顺性，提升腿部适应性^[155]，如图 51 所示。

图 50 哈尔滨工业大学机器人主动柔顺控制框图^[154]图 51 华中科技大学基于地面刚度估计的主动柔顺控制^[155]

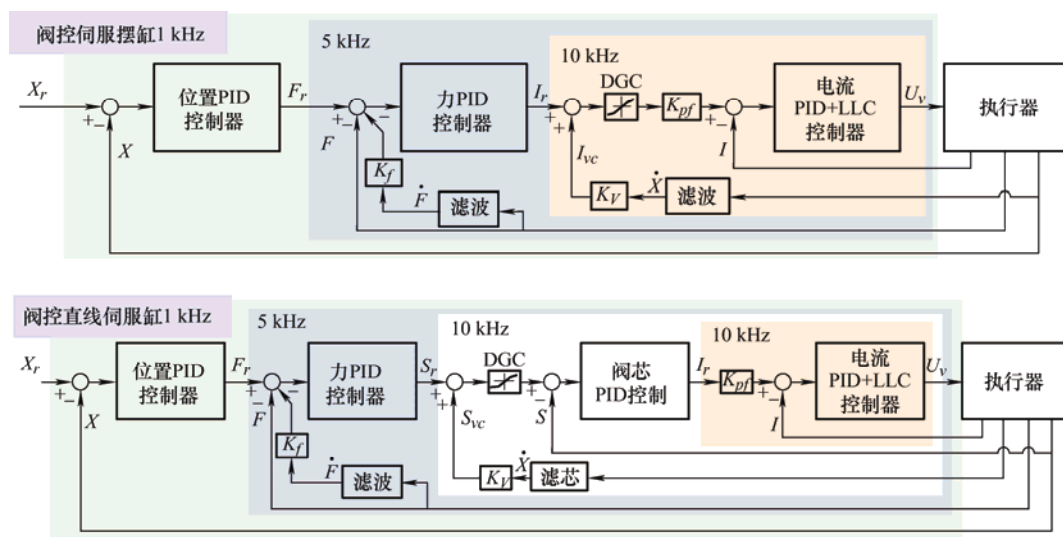
4.3 底层控制

底层控制的研究主要聚焦于液压驱动单元的位置闭环控制和力闭环控制，采用多种校正方法以提升液压驱动单元稳、快、准的控制性能。

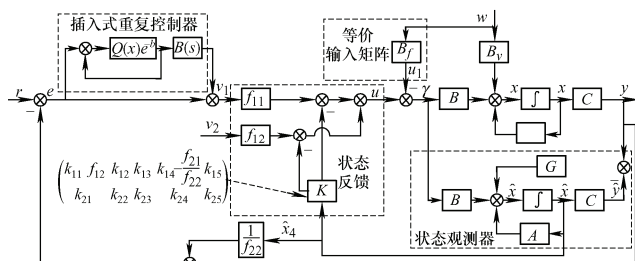
2016 年，北京航空航天大学与南京理工大学对电液伺服系统非线性控制领域所取得的成果进行了阐述^[156]。以电液伺服系统非线性模型为控制器设计的基础，重点考虑如何补偿各类模型不确定性对系统伺服性能的影响，并分别介绍了不同

工况下应采取何种控制策略以达到提升系统控制性能的目的。

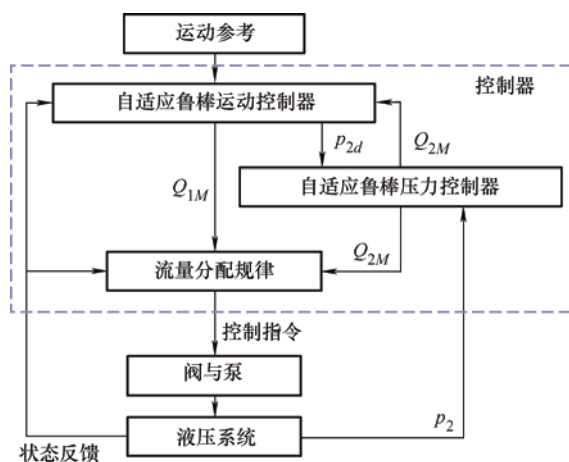
2018 年，IIT 公布了 HyQ 腿部两种增材制造的一体化液压驱动单元 (ISA) 控制方法^[157]。可以看出，液压驱动单元在位置闭环控制时，检测了阀芯和伺服缸位移、伺服缸速度、力/压力等多个状态变量，引入反馈校正和前馈校正等多种校正方法，以提升其抗干扰能力和控制性能，如图 52 所示。

图 52 IIT 的 HyQ 机器人液压驱动单元控制^[157]

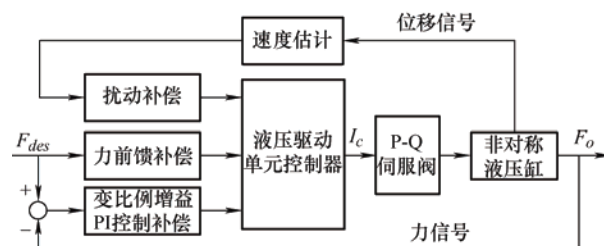
同年,燕山大学提出了状态反馈控制、前馈抗干扰控制、插入式重复控制等多算法融合的液压驱动单元位置控制方法,在单腿典型周期性步态下,其位置控制精度和响应速度等控制性能均得到了改善^[158],如图 53 所示。

图 53 燕山大学多算法融合的位置阻抗控制系统^[158]

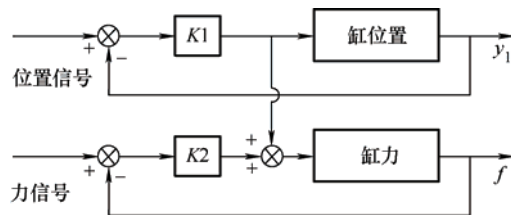
同年,美国普渡大学提出了基于阀泵一体化的液压驱动单元高精度节能运动控制方法^[159],集成了直接泵控制、独立计量和能量再利用方法,并利用各自的优势,减小能量损失的同时保证了动态响应精度,如图 54 所示。

图 54 普渡大学液压驱动单元高精度节能运动控制^[159]

2019 年,哈尔滨工业大学对比位置/力控制方法,提出在相同输入条件下,引入鲁棒控制器的液压驱动单元位置控制性能较好,引入速度反馈控制的液压驱动单元力控制性能较好^[160]。同年,哈尔滨工业大学在液压驱动单元力控制方面,提出了基于力前馈与扰动补偿的液压驱动单元力补偿算法,结合变增益 PI 控制器,提高了液压驱动单元的力控制效果^[161],如图 55 所示。

图 55 哈尔滨工业大学液压驱动单元力控制^[161]

同年,哈尔滨理工大学提出了一种针对液压四足机器人髋关节重载扭矩的并联缸传动方案,提出了并联缸的力/位置混合控制^[162],消除了内力,实现了联合控制的要求,并通过力和位置信号,实现了力/位置控制的解耦,如图 56 所示。

图 56 哈尔滨理工大学并联缸力控制^[162]

2020 年,中南大学提出快变时间尺度和慢变时间尺度的组合算法,实现了数据驱动的执行器系统

状态和参数的多尺度在线联合估计, 具有更好的稳定性、更快的收敛速度和更准确的估计结果, 并且所提算法估计的状态和参数准确反映了执行器的实际特性。此外, 该算法在不同的执行器硬件环境下具有较强的适应性和鲁棒性, 对不同的状态初值和参数初值具有较强的收敛能力^[163]。

同年, 哈尔滨工业大学为提升串联弹性液压驱动单元(SEA)的控制性能, 提出了笛卡儿空间下的关节力矩跟踪控制算法, 如图 57 所示, 即基于铰接腿的运动学参数, 采用液压驱动单元位置控制, 跟踪关节力矩, 计算期望力和期望力矩^[164]。

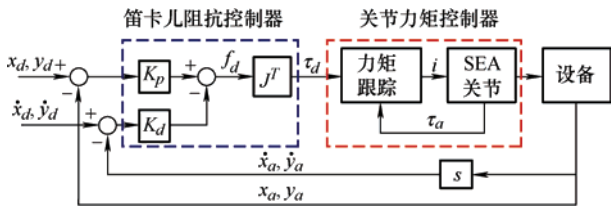


图 57 哈尔滨工业大学基于 SEA 的关节力矩控制^[164]

2021 年, 为了保证多液压关节串联耦合腿的力控制性能, 韩国科学技术院提出了一种基于逆模型的深度神经网络的液压驱动单元力控制算法, 省去液压驱动单元高维非线性建模与参数调节, 提高了液压驱动单元的力控制效果^[165-166], 如图 58 所示。

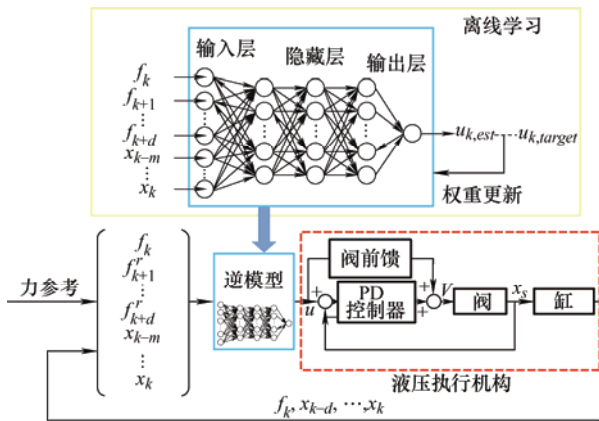


图 58 韩国科学技术院的液压驱动单元力控制^[166]

2022 年, 浙江大学对一种阀控螺旋液压驱动单元进行了系统建模及参数灵敏度分析^[167], 建立了精确的动力学模型与控制系统动态模型, 为同类系统的结构优化或控制补偿提供了准确的数学模型和分析依据。

2023 年, 哈尔滨理工大学针对液压四足机器人中关节存在的不确定干扰, 提出了一种三阶自抗扰控制策略, 将主动抗干扰控制与自生长群算法相结合, 提高液压四足机器人的关节控制性能^[168], 如图 59 所示。

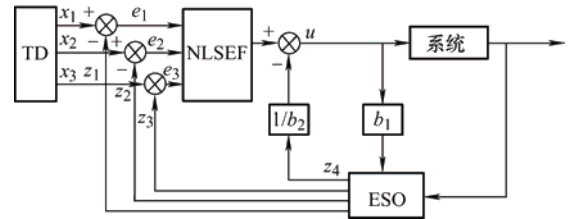


图 59 哈尔滨理工大学三阶自抗扰控制^[168]

5 发展趋势

5.1 液压足式机器人腿部“肌骨”一体化仿生设计

液压足式机器人运动性能由各条腿的运动性能决定。传统的腿部设计是依据足式机器人行走的速度、跳跃高度、负重等整机性能指标, 分配出各腿的出力、足端运动等范围及边界, 再匹配确定各关节的长度, 从而分解出各关节的转速和转矩需求参数, 通过铰接点优化出液压驱动单元的出力和速度, 给出液压驱动单元尺寸和性能要求的初始设计参数。整个腿部设计过程, 先确定机械结构(骨骼), 再确定液压驱动单元(液压“肌肉”)设计参数, 之后通过机械结构的拓扑优化和液压驱动单元的高功重比设计, 在满足性能指标的前提下进一步降低腿部重量, 以提升腿部固有性能潜力。

此种腿部设计方法存在一定的局限性: ① 腿部机械结构与液压驱动单元分离设计, 易导致机械结构与液压驱动存在不必要的重复支撑, 增加了腿部的重量; 同时也使液压油管内置困难, 为保证腿部各关节运动范围和液压油管的最小弯曲半径, 液压油管需要留有余量, 过长的液压油管悬置于腿部外侧不仅增加了腿部重量, 而且不同工作压力下弯曲油管的反向推力变化也对关节运动造成不必要的外力干扰。② 腿部各关节分别对液压驱动单元提出设计要求, 为简化设计流程和加工难度, 一般通过调整液压驱动单元与各关节的力臂大小, 匹配出力和尺寸相同或相似的液压驱动单元, 安装于各关节空间内, 导致各关节液压“肌肉”大小和长度相同或相似, 虽能够满足驱动性能要求, 但不符合足式生物腿部各关节肌肉功率和尺寸比例, 可能增大腿部足端转动惯量或限制未知工况的腿部运动性能, 也不利于各关节输出功率的高效利用。

自然界中, 足式生物腿部的骨骼用于支撑、肌肉依附于骨骼用于驱动、血管内置于肌肉用于供能^[169], 并呈现出大腿骨骼粗、肌肉大、摆动范围大而固有频率低, 小腿骨骼细、肌肉小、摆动范围小而固有频率高等特征, 不同力量和灵敏度需求下各

种足式生物的腿部结构和自由度等诸多方面也存在差别,以上均可作为液压足式机器人的腿部设计提供借鉴。若能将液压足式机器人腿部设计与仿生学深入融合,针对不同场合对机器人运动性能的差异性需求,研究腿部多关节之间的“骨骼”和液压“肌肉”功率仿生匹配、单关节“骨骼”和液压“肌肉”一体化支撑耐压结构、液压“肌肉”内置多分支仿生流道等内容,以完善液压足式机器人腿部“肌骨”一体化仿生设计方法,将有望形成具有足式生物特征的更高功重比和更高运动性能腿部结构。

5.2 液压足式机器人机身“内脏”紧凑式仿生排布

液压足式机器人机身类似于足式生物的躯干(包含骨骼和内脏),需要支撑和容纳除去腿部“骨骼”和液压“肌肉”以外的大量元部件,负重也需要背负于机身上,因此,机身的重量超过足腿重量的总和,由机身及负重的重力加速度和运动加速度产生的惯性力是足式机器人腿部运动的主要负载。传统的机身设计是依据足式机器人多工况运动所需的最高压力和流量,计算液压动力单元的功率参数,从而确定电机转速与转矩、液压泵排量与工作压力、以及液压附件等参数,进而设计液压动力单元的集成结构;依据液压驱动的发热量和初始散热量,计算热交换器参数;依据续航时间需求,确定电池或燃料容量;依据控制要求,选取运动控制器及附属电气硬件等。之后,考虑上述元部件的外形尺寸及重量,进行“插空”摆放,使摆放后的体积相对较小、重心基本居中。最后设计机身“骨骼”结构用以支撑上述元部件,并实现与腿部“骨骼”的机械连接。

此种机身设计方法亦存在一定的局限性:① 机身的“骨骼”和“内脏”分离设计,由于液压动力单元体积较大、重量较重,一般摆放于机身中间,其与各条腿的液压驱动单元连接的液压油管需要贯穿整个机身,与热交换器也需要液压油管连接,由于液压油管数量和最小弯曲半径的影响,使液压油管连接复杂并占据着一部分的机身空间,减小了机身其他元部件的摆放空间,增加了摆放难度;② 机身容纳的元部件种类与数量繁多,形状、大小和重量各异,若无高性能的排布优化算法辅助,将难以高效利用机身内部空间尺寸,也难以保证排布后的重心位置精准;③ 机身的液压动力单元包含液压泵、蓄能器、压力油箱、集成阀块、压力控制阀、液压油管等多个元部件,满足相同的输出压力和流量前提下,以上各元部件也存在小型化和轻量化参数匹配问题,若仅简单地选取标准元器件进行组合,

会产生非必要的功率、体积和重量的增加。

自然界中,足式生物躯干内的心脏用于血液供给、血管用于能量传输、肝、脾和肾等其他内脏具有储存血液和过滤血液等功能^[170-171],与足式机器人机身液压动力单元的液压泵、液压油管、蓄能器、压力油箱、过滤器等元部件功能相近。而足式生物的内脏呈现出紧凑式布局、各内脏的连通血管占据躯干内部空间小、不同足式生物的躯干重心位置也不尽相同等诸多特征,以上均可作为液压足式机器人的机身“内脏”排布提供借鉴。若能将液压足式机器人机身“内脏”排布与仿生学深入融合,针对不同仿生对象的足式机器人机身形态、重心位置、功率的差异性需求,研究具备机械支撑与油液传输双重功能的机身“骨骼”和“内脏”一体化共壁结构、考虑油液连通影响和功率损失的机身“内脏”多元部件仿生排布、以小型化和轻量化为目标的机身“内脏”多参数匹配寻优等内容,以完善液压足式机器人机身“内脏”紧凑式仿生排布方法,将有望形成更有利于提升液压足式机器人运动性能的小型轻盈机身结构。

5.3 液压足式机器人控制“神经”多层级仿生融合

液压足式机器人优异的控制方法是保障整机多工况高效稳定运动的前提。相比于电动足式机器人,液压驱动的引入,在带来高功重比等诸多优势的同时,也带来一些控制难点:① 液压足式机器人运动轨迹规划一般为顶层控制生成的规则步态曲线或足端力分配曲线,此时即使单腿控制精度很高,由于液压驱动自身存在固有非线性和参数时变性特征,也不可避免地存在液压控制偏差,导致机器人真实位移或力轨迹与给定不符,影响着机身的稳定性;② 液压足式机器人腿部包含着机械结构和液压驱动双重重量,腿部摆动时其自重不可忽略;机身和负重相比于腿部的重量更大,腿部支撑时推动着机身自重和负重双重载荷;以上重量产生的等效惯性负载随着四条腿各关节的运动角度不同而体现出“时变”特性,实时改变着液压驱动的固有频率和阻尼比等关键指标,易引起液压驱动的抖振;③ 自重和负重的增加亦会导致足地交互时的碰撞冲击加剧,在快速行走、奔跑和跳跃等工况下的冲击影响更加显著,崎岖路面还会使冲击力产生三维空间分解,致使冲击力的幅值、持续时长和作用方向均存在“不确定性”,主动柔顺控制形成的缓解足端冲击“液压虚拟弹簧”又提高了液压驱动的系统阶数,外界干扰的变化和系统阶数的改变均影响着液压控制性能;④ 液压驱动的能量利用率相对较低,应依据

足式机器人运动过程中各液压“肌肉”的出力 and 速度要求,匹配液压“心脏”的压力和流量输出,以减小不必要的溢流损失和能量浪费,保障液压足式机器人的续航能力。

自然界中,用于控制哺乳动物、爬行动物、昆虫等足式生物运动的神经均分为多个层级^[172-173],以哺乳动物为例,高级中枢神经下发躯体运动指令、维持身体平衡,低级中枢神经具有传导和反射功能,躯体运动神经控制腿部肌肉运动,同时植物神经(亦称自主神经)控制心脏的跳动频率和血液压力,以主动适应不同运动状态的机体血液需求,各个层级各司其职,使足式生物呈现出卓越的运动性能和多工况的适应能力,以上均可作为液压足式机器人的控制方法提供借鉴。若能将液压足式机器人控制方法与仿生学深入融合,针对不同场合对机器人运动性能的差异性需求,研究考虑液压驱动固有特性和传递路径的控制“神经”多层级融合控制架构、打滑或坑洼路面等工况下腿部多关节液压“肌肉”的“应急”条件反射控制、多种运动步态及其切换过程中液压“心脏”输出功率的高效“应激”自适应控制等内容,以完善液压足式机器人控制“神经”多层级仿生融合方法,将有望将液压控制方法与足式机器人控制方法深入融合,大幅提升液压足式机器人在多种复杂地面的快速稳定运动能力。同时随着足式机器人控制能力的增强与人机交互的发展,将助力其与人类进行更加自然、高效的沟通和合作,提升人类的工作效率、创新能力和生活质量,进一步推动人机共融的发展。

6 结论

自 2008 年 BD 公司正式公布液压四足机器人 BigDog 多工况稳定运动视频,掀起液压足式机器人研究热潮至今,已历时 15 年,国内外诸多研究机构研制的多种液压足式机器人样机,并开展了大量的理论与实践研究工作,取得了丰硕的研究成果,推动了液压足式机器人的发展。特别是液压驱动作为该类机器人的核心驱动方式,在液压驱动单元、液压动力单元和液压控制方法 3 方面,取得了诸多研究进展。

总结近年来液压驱动的研究成果,可以看出,液压驱动单元的研究主要聚焦于高功重比、高集成、一体化、定制化增材制造、非金属耐压轻质材料应用等方向;液压动力单元的研究主要聚焦于小型化、

轻量化、高能量利用率等方向;液压控制方法的研究主要聚焦于快响应、高精度、柔顺性、多工况适应性、并与足式机器人控制方法深入融合等方向。

足式机器人以自然界足式生物为仿生原型,其液压驱动也应从足式生物肌肉、内脏和神经等呈现的特征中有所借鉴。未来仍需要面向液压足式机器人腿部“肌骨”一体化仿生设计、机身“内脏”紧凑式仿生排布、控制“神经”多层级仿生融合等多方面开展进一步研究工作,以助力液压足式机器人运动性能和多工况适应能力更逼近于足式生物,推进其军民领域的产业化应用。

参 考 文 献

- [1] ESSAIDI A B, HADDAD M, LEHTIHET H E. Minimum-time trajectory planning under dynamic constraints for a wheeled mobile robot with a trailer[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104605.
- [2] 崔达. 履带式爬壁机器人动力学分析及导航控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CUI Da. Study on the dynamics analysis and navigation control of tracked wall-climbing robot[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [3] 战强, 李伟. 球形移动机器人的研究进展与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 1-17.
ZHAN Qiang, LI Wei. Research progress and development trend of spherical mobile robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 1-17.
- [4] 张军豪, 陈英龙, 杨双喜, 等. 蛇形机器人: 仿生机理、结构驱动和建模控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 75-92.
ZHANG Junhao, CHEN Yinglong, YANG Shuangxi, et al. Snake robotics: Bionic mechanism, structure, actuation, modeling and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 75-92.
- [5] HE Jun, GAO Feng. Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(5): 130-159.
- [6] SHI Yapeng, YU Bin, BA Kaixian, et al. A unified trajectory optimization approach for long-term and reactive motion planning of legged locomotion[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 3: 1-5.
- [7] 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.

- [8] ODA K, YASUI Y, KUROSE Y, et al. Enhancement of a leg-wheel mechanism by hydraulics toward compliantly balancing platforms for heavy duty work[J]. *Advanced Robotics*, 2021, 35(23): 1450-1467.
- [9] URBAIN G, BARASUOL V, SEMINI C, et al. Effect of compliance on morphological control of dynamic locomotion with HyQ[J]. *Autonomous Robots*, 2021, 45: 421-434.
- [10] 刘国才. 液压驱动双足机器人及其动态平衡运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LIU Guocai. Research on hydraulic actuated biped robot and its dynamic balance motion control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [11] BISWAL P, MOHANTY P K. Development of quadruped walking robots: A review[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, 12(2): 2017-2031.
- [12] 纵怀志, 张军辉, 张堃, 等. 液压四足机器人元件与液压系统研究现状与发展趋势[J]. *液压与气动*, 2021, 45(8): 1-16.
- ZONG Huaizhi, ZHANG Junhui, ZHANG Kun, et al. Research progress and development of hydraulic components and systems for hydraulic actuated quadruped robot[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2021, 45(8): 1-16.
- [13] GAO Yue, SU Bo, JIANG Lei, et al. Multi-legged robots: Progress and challenges[J]. *National Science Review*, 2022, 214: 1-2.
- [14] 巴凯先, 孔祥东, 朱琦歆, 等. 液压驱动单元基于位置/力的阻抗控制机理分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 172-185.
- BA Kaixian, KONG Xiangdong, ZHU Qixin, et al. Position/force-based impedance control and their experimental research on hydraulic drive unit[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 172-185.
- [15] 张婷婷. 足式机器人液压驱动基础理论研究——据燕山大学专家俞滨报告录音整理[J]. *液压气动与密封*, 2022, 42(8): 124-127.
- ZHANG Tingting. Research on the basic theory of hydraulic drive of foot robot: According to the report of expert Yu Bin from Yanshan University[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2022, 42(8): 124-127.
- [16] SHI Yapeng, HE Xiaolong, ZOU Wenpeng, et al. Multi-objective optimal torque control with simultaneous motion and force tracking for hydraulic quadruped robots[J]. *Machines*, 2022, 10(3): 170.
- [17] BA Kaixian, YU Bin, GAO Zhengjie, et al. An improved force-based impedance control method for the HDU of legged robots[J]. *ISA transactions*, 2019, 84, 187-205.
- [18] RAIBERT M H, BROWN H B, CHEPPONIS M. Experiments in balance with a 3d one-legged hopping machine[J]. *International Journal of Robotics*, 1984, 3(2): 75-92.
- [19] ZEGLIN G. Uniroo: A one legged dynamic hopping robot[J]. Cambridge: B. S. Thesis of Massachusetts Institute of Technology, 1991: 25-61.
- [20] HYON S H, EMURA T, MITA T. Dynamics-based control of a one-legged hopping robot[J]. *Journal of Systems & Control Engineering*, 2003, 217(2): 83-98.
- [21] GABE N, AARON S, NEIL N, et al. PETMAN: A humanoid robot for testing chemical protective clothing[J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2012, 30(4): 372-3778.
- [22] 机器人 TV. 频道: 阿特拉斯机器人 Atlas[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.robot.tv/atlas>.
- RobotTV. Channel: Atlas[EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.robot.tv/atlas>.
- [23] FARAJI S. Versatile and robust 3D walking with a simulated humanoid robot (Atlas): A model predictive control approach[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation, May 31 - June 7, 2014, City University of Hong Kong, Hong Kong. New York: IEEE, 2014: 1943-1950.
- [24] STEPHENS B. Push recovery control for force-controlled humanoid robots[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2011.
- [25] BOARDWALKROBOTICS. Meet nadia[EB/OL]. [2022-12-23]. <https://boardwalkrobotics.com/Nadia.html>.
- [26] HYON S H. Development of a fast torque-controlled hydraulic humanoid robot that can balance compliantly[C]// 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots, November 3-5, 2015, Korea Institute of Science and Technology, Seoul. New York: IEEE, 2015: 576-581.
- [27] KAMINAGA H. Mechanism and control of whole-body electro-hydrostatic actuator driven humanoid robot hydra[C]// 2016 International Symposium on Experimental Robotics, October 3-8, 2016, International House of Japan, Tokyo. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 656-665.
- [28] 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 Haiyan, Design and control of a hydraulic

- actuated biped robot motion system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [29] 马冬. 两点式液压双足步行机器人步态规划及其实验研究[D]. 长沙: 东南大学, 2017.
- MA Dong. Gait planning and experiment research of two-point-foot walking robot[D]. Changsha: Southeast University, 2017.
- [30] 董昊臻. 双足机器人步态仿真及腿部设计与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- DONG Haozhen. Research on gait simulation with design and control of leg for biped robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [31] PLAYTER R. BigDog[C]// The International Society for Optical Engineering. Unmanned systems technology VIII, April 17-20, 2006, Orlando, Florida. Washington: SPIE, 2006: 6320201-6320206.
- [32] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [33] MICHAEL K. Meet Boston dynamics' LS3 - the latest robotic war machine[J]. Tedxuwollongong Talk, 2012: 1-10.
- [34] SIMON P. Military robotics: Latest trends and spatial grasp solutions[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4): 9-18.
- [35] ELIZABETH P. Meet spot: New breed of robot dog climbs and trots[EB/OL]. [2015-02-11]. <https://www.livescience.com/49760-robot-dog-boston-dynamics.html>.
- [36] SEMINI C, TSAGARAKIS N G, GUGLIELMINO E, et al. Design of HyQ—A hydraulically and electrically actuated quadruped robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2011, 225(6): 831-849.
- [37] SEMINI C. HyQ-design and development of a hydraulically actuated quadruped robot[D]. Genoa: University of Genoa, Italy, 2010.
- [38] NEUNERT M, STÄUBLE M, GIFTTHALER M, et al. Whole-body nonlinear model predictive control through contacts for quadrupeds[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 1458-1465.
- [39] KHAN H. Development of the lightweight hydraulic quadruped robot -MiniHyQ[C]// 2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, May 11-12, 2015, Woburn, Massachusetts. New York: IEEE, 2015: 1-6.
- [40] SEMINI C, BARASUOL V, GOLDSMITH J, et al. Design of the hydraulically-actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2Max[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(2): 635-646.
- [41] RADULESCU A. Optimization for non-periodic dynamic motions of legged systems[C]// International Workshop on Human Friendly Robotics (HFR). International Workshop on Human Friendly Robotics, 2016.
- [42] Legged robots. HyQReal: Quadruped design and applications in agriculture and space exploration[EB/OL]. [2022-05-07]. <https://www.youtube.com/watch?v=cIBX9DmPhF8list=PLY45TGWcpM7yohYe33biZd1cEzwLK78dhindex=2>.
- [43] KIM T J. The energy minimization algorithm using foot rotation for hydraulic actuated quadruped walking robot with redundancy[C]// The 41st International Symposium on Robotics and the 6th German Conference on Robotics, June 7-9, 2010, Munich. Frankfurt: VDE, 2010: 1-6.
- [44] KIM H K, WON D, KWON O, et al. Foot trajectory generation of hydraulic quadruped robots on uneven terrain[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 3021-3026.
- [45] 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.
- [46] RONG Xuwen, LI Yibin, RUAN Jihong, et al. Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(4): 1171-1177.
- [47] 柴汇. 液压驱动四足机器人柔顺及力控制方法的研究与实现[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- CHAI Hui. Research and implementation on compliance and force control of hydraulically actuated quadruped robot[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [48] YANG Kun, ZHOU Lelai, RONG Xuwen, et al. Onboard hydraulic system controller design for quadruped robot driven by gasoline engine[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines, 2018, 52: 36-48.
- [49] HUA Zisen, RONG Xuwen, LI Yibin, et al. Analysis and verification on energy consumption of the quadruped robot with passive compliant hydraulic servo actuator[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 340.
- [50] LI Mantian, JIANG Zhenyu, WANG Pengfei, et al. Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 188-198.

- [51] SHI Yapeng, WANG Pengfei, WANG Xin, et al. Bio-inspired equilibrium point control scheme for quadrupedal locomotion[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2018, 11(2): 200-209.
- [52] 蔡昌荣. 平面脊柱型四足机器人高速运动控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- CAI Changrong. Reserch on high-speed locomotion control strategy of the planar spinal quadruped robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [53] ZHANG Taihui, WEI Qing, MA Hongxu. Position/force control for a single leg of a quadruped robot in an operation space[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(2): 137.
- [54] CAI Runbin, CHEN Yangzhen, HOU Wenqi, et al. Trotting gait of a quadruped robot based on the time-pose control method[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(2): 50979.
- [55] WANG Cheng, GAO Junyao, DUAN Xingguang, et al. The CPG gait generate method of the quadruped robot based on iterative learning control algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2013, 677: 296-303.
- [56] GAO Junyao, DUAN Xingguang, HUANG Qiang, et al. The research of hydraulic quadruped bionic robot design[C]// International Conference on Complex Medical Engineering, May 25-28, 2013, Beijing Institute of Technology, Beijing, New York: IEEE, 2013: 620-625.
- [57] 蒋云峰, 许威, 姚其昌. 四足仿生移动平台车载液压动力系统设计[J]. 兵工学报, 2014, 35(S1): 80-85.
- JIANG Yunfeng, XU Wei, YAO Qichang. Design of vehicle-mounted hydraulic power system of bionic quadruped mobile platform[J]. Acta armamentarii, 2014, 35(S1): 80-85.
- [58] HUANG Hsinpu, ZHANG Junhui, XU Bing, et al. Topology optimization design of a lightweight integrated manifold with low pressure loss in a hydraulic quadruped robot actuator[J]. Mechanical Sciences, 2021, 12(1): 249-257.
- [59] REN Dongyi, SHAO Junpeng, SUN Guitao, et al. The complex dynamic locomotive control and experimental research of a quadruped-robot based on the robot trunk[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3911.
- [60] 赵江波, 龚思进, 王军政. 四足机器人步态参数优化及探索性行走策略[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(4): 407-414.
- ZHAO Jiangbo, GONG Sijin, WANG Junzheng. Gait parameters optimization and exploratory walking strategy for quadruped robots[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(4): 407-414.
- [61] 钟建锋. 四足机器人液压驱动系统设计与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- ZHONG Jianfeng. Design and control of hydraulic actuators for quadruped legged robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [62] 万智. 液压驱动四足机器人伺服及柔顺控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- WAN Zhi. Servo control and compliance control of hydraulic quadruped robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [63] BA Kaixian, YU Bin, GAO Zhengjie, et al. Parameters sensitivity analysis of position-based impedance control for bionic legged robots' HDU[J]. Applied Sciences, 2017, 7(10): 1035.
- [64] 朱琦歆. 四足机器人液压驱动系统轻量化参数匹配方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- ZHU Qixin. Research on lightweight parameter matching method of quadruped robot hydraulic drive system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [65] BIHARI T E, WALLISER T M, PATTERSON M R. Controlling the adaptive suspension vehicle[J]. Computer, 1989, 22(6): 59-65.
- [66] The Old Robots Web Site. Walking tractor timberjack by John Deere[EB/OL]. [2021-9-14]. <https://www.theoldrobots.com/Walking-Robot2.html>.
- [67] TSUMAKI T, KOBAYASHI H, NAKANO E, et al. Development of a practically scaled walking robot for steep terrain of forestry ground[J]. JRSJ, 2009, 27(4): 470-480.
- [68] IRAWAN A, NONAMI K. Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(5): 690-713.
- [69] 英国推出世界最大六腿机器人[J]. 机器人技术与应用, 2013, 153(3): 48.
- UK launches world's largest six-legged robot[J]. Robot Technique and Application, 2013, 153(3): 48.
- [70] 李昔学, 留沧海, 刘佳生, 等. 大型重载液压驱动六足机器人样机实验[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(6): 28-31.
- LI Xixue, LIU Canghai, LIU Jiasheng, et al. Experimental study on the prototype of a large heavy-duty hydraulic hexapod robot[J]. Machine Design and Research, 2016,

- 32(6): 28-31.
- [71] 王洪洋. 液压六足机器人动力机构的负载匹配及联合仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- WANG Hongyang. Actuator load matching and co-simulation research of hydraulic hexapod robot[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [72] 刘逸群, 邓宗全, 刘振, 等. 液压驱动六足机器人一种低冲击运动规划方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 10-17.
- LIU Yiqun, DENG Zongquan, LIU Zhen, et al. Low-impact motion planning method of hydraulically actuated hexapod robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 10-17.
- [73] WANG Shoukun, CHEN Zhihua, LI Jiehao, et al. Flexible motion framework of the six wheel-legged robot: Experimental results[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(4): 2246-2257.
- [74] 葛文杰. 仿袋鼠跳跃机器人运动学及动力学研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- GE Wenjie. Research on the kinematics and dynamics of kangaroo hopping robot[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [75] GARCIA E, AREVALO J C, MUNOZ G, et al. On the biomimetic design of agile-robot legs[J]. Sensors, 2011, 11(12): 11305-11334.
- [76] PARK J, KIM K S, KIM S. Design of a cat-inspired robotic leg for fast running[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(23): 1587-1598.
- [77] 陈志伟, 金波, 朱世强, 等. 液压驱动仿生多足机器人单腿设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 36-42.
- CHEN Zhiwei, JIN Bo, ZHU Shiqiang, et al. Design and experiment of single leg of hydraulically actuated bionic multi-legged robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 36-42.
- [78] PLAYTER R. BigDog[C]// Unmanned Systems Technology VIII. SPIE, 2006, 6230: 896-901.
- [79] ALFAYAD S, OUEZDOU F B, NAMOUN F, et al. High performance integrated electro-hydraulic actuator for robotics-part I: Principle, prototype design and first experiments[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2011, 169(1): 115-123.
- [80] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析[D]. 山东: 山东大学, 2013.
- RONG Xuwen. Mechanism design and kinematics analysis of a hydraulically actuated quadruped robot SCalf[D]. Shandong: Shandong University, 2013.
- [81] 蒋振宇. 基于 SLIP 模型的四足机器人对角小跑步态控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- JIANG Zhenyu. Control of quadruped robot in trotting gait based on slip model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [82] 朱立松. 仿生液压四足机器人控制系统关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHU Lisong. Key technology research on control system of bionic quadruped robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [83] XUE Yong, YANG Junhong, SHANG Jianzhong, et al. Design and optimization of a new kind of hydraulic cylinder for mobile robots[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(18): 3459-3472.
- [84] WANG Jing, GAO Feng, ZHANG Yong. High power density drive system of a novel hydraulic quadruped robot[C]// American Society of Mechanical Engineers. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, August 17-20, 2014, Buffalo, New York. New York: ASME, 2014: 1-7.
- [85] 陈思宇. 四足仿生机器人结构设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- CHEN Siyu. Mechanical design and analysis of a bionic quadruped robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [86] KAMINAGA H. Development of high-power and backdrivable linear electro-hydrostatic actuator[C]// IEEE. 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, November 18-20, 2014, Madrid. New York: IEEE, 2014: 973-978.
- [87] LU Haojian, GAO Junyao, XIE Lin. Single hydraulic actuator actively-compliant research based on the hydraulic quadruped robot[C]// 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, August 8-10, 2015, Lijiang, Yunnan. New York: IEEE, 2015: 1331-1336.
- [88] KO T, KAMINAGA H, NAKAMURA Y. Key design parameters of a few types of electro-hydrostatic actuators for humanoid robots[J]. Advanced Robotics, 2018, 32(23): 1241-1252.
- [89] CHU Zhen, LUO Jianwen, FU Yili. Variable stiffness control and implementation of hydraulic SEA based on virtual spring leg[C]// 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 7-10, 2016, Harbin, Heilongjiang. New York: IEEE,

- 2016: 677-682.
- [90] 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*, 2016, 22, (2): 623-634.
- [91] 王东坤. 人形机器人步态规划及关节液压驱动单元变阻抗补偿控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- WANG Dongkun. Gait planning of humanoid robot and variable impedance compensation control of joint hydraulic driving unit[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [92] 杨琨. 液压驱动四足机器人能耗分析、优化及动力系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- YANG Kun. Energy consumption analysis, optimization and power system research for a hydraulic actuated quadruped robot[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [93] HUA Zisen, RONG Xuwen, LI Yibin, et al. Analysis and verification on energy consumption of the quadruped robot with passive compliant hydraulic servo actuator[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(1): 340.
- [94] 集萃智造. 集萃智造获 2021 年度工信部“揭榜”大会优秀方案 [EB/OL]. [2021-12-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/i5UZGk61n6eRnHIdPnmqBw>.
- Jitri Intelligent Manufacturing. Jitri intelligent manufacturing won an excellent plan for the “unveiling” conference of the Ministry of Industry and Information Technology in 2021[EB/OL]. [2021-12-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/i5UZGk61n6eRnHIdPnmqBw>.
- [95] BARASUOL V, VILLARREAL-MAGAÑA O A, SANGIAH D, et al. Highly-integrated hydraulic smart actuators and smart manifolds for high-bandwidth force control[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2018, 5: 51.
- [96] 孔祥东, 朱琦歆, 姚静, 等. “液压元件与系统轻量化设计制造新方法”基础理论与关键技术[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(24): 4-12.
- KONG Xiangdong, ZHU Qixin, YAO Jing, et al. Basic theory and key technology of “New method for lightweight design and manufacturing of hydraulic components and systems”[J]. *Journal of Mechanical engineering*, 2021, 57(24): 4-12.
- [97] 孔祥东, 朱琦歆, 姚静, 等. 高端移动装备液压元件与系统轻量化发展综述[J]. *燕山大学学报*, 2020, 44(3): 203-217.
- KONG Xiangdong, ZHU Qixin, YAO Jing, et al. Reviews of lightweight development of hydraulic components and systems for high level mobile equipment[J]. *Journal of Yanshan University*, 2020, 44(3): 203-217.
- [98] 巴凯先, 康岩, 俞滨, 等. 足式机器人轻量化液压驱动执行器质量建模及刚度分析[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(24): 39-48, 82.
- BA Kaixian, KANG Yan, YU Bin, et al. Mass modeling and sensitivity analysis of lightweight hydraulic actuator for legged robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2021, 57(24): 39-48, 82.
- [99] 康岩. 基于马腿仿生学的轻量化液压四足机器人腿部结构设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- KANG Yan. Leg structure design of lightweight hydraulic quadruped robot based on leg bionics[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [100] 付康平. 液压足式机器人髋关节驱动单元轻量化设计研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- FU Kangping. Research on lightweight design of hip drive unit for hydraulic legged robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [101] 巴凯先, 徐悦鹏, 俞滨, 等. 用于增材制造缸体的仿生流道设计方法及其液压驱动装置: 中国, CN114922880A [P]. 2022-08-19.
- BA Kaixian, XU Yuepeng, YU Bin, et al. A bionic runner design method and its hydraulic drive device for additive manufacturing cylinder block: China[P]. CN114922880A, 2022-08-19.
- [102] ZONG Huaizhi. Investigation on the combination winding technology of carbon fiber reinforced polymer hydraulic cylinder[C]// Association of Fluid Power Control Engineering of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. The 21th International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering, November 6-8, 2020, Chongqing University of Technology, Chongqing. Changsha: Journal of Central South University, 2020: 1-10.
- [103] 徐兵, 纵怀志, 张军辉, 等. 碳纤维复合材料液压缸研究现状与发展趋势[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 14.
- XU Bing, ZONG Huaizhi, ZHANG Junhui, et al. Research status and development trend of carbon fiber reinforced polymer hydraulic cylinder[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 14.
- [104] 史亚鹏. 基于运动规划与足地交互的液压四足机器人力矩控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- SHI Yapeng. Research on torque control based on motion planning and foot-ground interaction for

- hydraulic quadruped robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [105] 张帅帅. 复杂地形环境中四足机器人行走方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG Shuaishuai. Research on walking method of quadruped robot on complex terrain and environment[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [106] 刘京运. 从 Big Dog 到 Spot Mini: 波士顿动力四足机器人进化史[J]. 机器人产业, 2018, 2: 109-116.
- LIU Jingyun. From big dog to spot mini: The evolutionary history of quadruped robots at Boston Dynamics[J]. Robot Industry, 2018, 2: 109-116.
- [107] 司世才. 仿生液压四足机器人运动特性仿真和液压系统设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- SI Shicai. Kinematics simulation and hydraulic system design of bionic hydraulic quadruped robot[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [108] 张昊昱. 大型高适应性六足机器人结构及稳定性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHANG Haoyu. Analysis of the structure and stability of a large and highly adaptable hexapod robot[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [109] 黄杰. 基于模型预测及直接配点法的液压驱动双足机器人抗扰控制与轨迹优化方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- HUANG Jie. Research on anti-disturbance control and trajectory optimization for hydraulic driven biped robot based on model predictive and direct collocation method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [110] 范伯骞. 液压驱动下肢外骨骼机器人关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- FAN Boqian. Research on the key technologies of the hydraulic lower limb exoskeleton robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [111] 静液压. 波士顿动力 Atlas 机器人技术细节分析[EB/OL]. [2021-02-06]. <https://www.ihydrostatics.com/25940/>.
- iHydrostatics. Boston dynamics Atlas robot technical detail analysis [EB/OL]. [2021-02-06]. <https://www.ihydrostatics.com/25940/>.
- [112] Boston Dynamics. What's new , Atlas? [EB/OL]. [2021-10-30]. <https://m.youtube.com/watch?v=fRj34o4hN4I>.
- [113] 致知于行. 波士顿动力 Atlas 机器人技术细节分析(一) [EB/OL]. [2021-05-12]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/371564686>.
- Knowledge in Action. Technical details analysis of Boston Dynamics Atlas robot (I)[EB/OL]. [2021-12-19]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/371564686>.
- [114] 俞滨, 李化顺, 巴凯先, 等. 足式机器人轻量化液压油源匹配设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(24): 58-65.
- YU Bin, LI Huashun, BA Kaixian, et al. Research on matching design methods of lightweight hydraulic oil source for legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(24): 58-65.
- [115] 燕大液压. 国家重点研发计划“液压元件与系统轻量化设计制造新方法”项目综合绩效评价会召开[EB/OL]. [2023-01-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/opHS5LeMG1Krc75MGgJL5A>.
- Yanda Hydraulic. The comprehensive performance evaluation meeting of the national key research and development plan “New method for lightweight design and manufacturing of hydraulic components and systems” project was held[EB/OL]. [2023-01-20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/opHS5LeMG1Krc75MGgJL5A>.
- [116] 集萃智造. 大块头有大智慧——集萃智造四足仿生机器人面世[EB/OL]. [2019-04-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0zbBi0GdflucHYURng-PoQ>.
- Jitri Intelligent Manufacturing. Big block has great wisdom : Jitri intelligent manufacturing intelligent quadruped bionic robot is available[EB/OL]. [2019-04-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0zbBi0GdflucHYURng-PoQ>.
- [117] 沈丕. 双足机器人液压动力单元的设计与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- SHEN Pi. Research on design and control of hydraulic power unit of biped robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [118] CUI Zemin, RONG Xuwen, LI Yibin. Design and control method of a hydraulic power unit for a wheel-legged robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(4): 2043-2052.
- [119] Boston Dynamics. BigDog overview[EB/OL]. [2018-11-22]. <https://www.bostondynamics.com/img/BigDogOverview.pdf>.
- [120] FAHMI S, MASTALLI C, FOCCHI M, et al. Passive whole-body control for quadruped robots: Experimental validation over challenging terrain[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(3): 2553-2560.

- [121] HAVOUTIS J. Onboard perception-based trotting and crawling with the hydraulic quadruped robot(HyQ)[C]// 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 03-07, 2013, Tokyo. New York: IEEE, 2013: 6052-6057.
- [122] YANG Qingjun, ZHANG Zhenyang, ZHU Rui, et al. A high-speed flying trot control method for hydraulic quadruped robot based on optimal energy efficiency[J/OL]. SSRN, 2023: 1-12.
- [123] 闫瞳, 许威, 苏波. 基于 zmp 的四足仿生机器人反应式行为控制策略研究[J]. 车辆与动力技术, 2021, 1(1): 1-7, 19.
- YAN Tong, XU Wei, SU Bo. Research on reactive behavior control strategy of quadruped bionic robot based on zmp[J]. Vehicle and Power Technology, 2021, 1(1): 1-7, 19.
- [124] KUBER P, KULKARNI P, KOLHE S, et al. Estimation of zero moment point using centre of gravity based method[J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2016, 5(10): 100-102.
- [125] 丁良宏. BigDog 四足机器人关键技术分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 1-23.
- DING Lianghong. Key technology analysis of BigDog quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 1-23.
- [126] SEMINI C, BARASUOL V, BOAVENTURA T, et al. Towards versatile legged robots through active impedance control[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(7): 1003-1020.
- [127] 王婷婷. 基于多层 CPG 的足式机器人运动控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- WANG Tingting. Research on motion control of legged robot based on multi-layer CPG[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [128] 张国腾. 四足机器人主动柔顺及对角小跑步态运动控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG Guoteng. Research on active compliance and diagonal trot gait motion control of quadruped robot[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [129] 曾朋朋. 四足仿生机器人 Running Trot 步态运动控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
- ZENG Pengpeng. Research on gait motion control of quadruped bionic robot running trot[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [130] POWELL M J. Model predictive control of underactuated bipedal robotic walking[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 26-30, 2015, Seattle, Washington State. New York: IEEE, 2015: 5121-5126.
- [131] Boston Dynamics. ATLAS[EB/OL]. [2021-11-18]. <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [132] NEUNERT M, FARSHIDIAN F, WINKLER A W, et al. Trajectory optimization through contacts and automatic gait discovery for quadrupeds[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(3): 1502-1509.
- [133] TAN W H. A hierarchical framework for quadruped locomotion based on reinforcement learning[C]// 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 27 - October 1, 2021, Prague. New York: IEEE, 2021: 8462-8468.
- [134] MASTALLI C, HAVOUTIS I, FOCCHI M, et al. Motion planning for quadrupedal locomotion: Coupled planning, terrain mapping and whole-body control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2020, 36(6): 1635-1648.
- [135] DING Chao, ZHOU Lelai, LI Yibin, et al. A novel dynamic locomotion control method for quadruped robots running on rough terrains[J]. IEEE Access, 2020, 8: 150435-150446.
- [136] SCOTT K. Do you love mpc? Robot dancing using optimal control[EB/OL]. [2021-7-14]. <https://www.youtube.com/watch?v=mlTLxpKdHfA>.
- [137] RATHOD N, BRATTA A, FOCCHI M, et al. Model predictive control with environment adaptation for legged locomotion[J]. IEEE Access, 2021, 9: 145710-145727.
- [138] DING Yanran, PANDALA A, LI Chuazheng, et al. Representation-free model predictive control for dynamic motions in quadrupeds[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(4): 1154-1171.
- [139] CLEMENTE L. Foothold evaluation criterion for dynamic transition feasibility for quadruped robot[C]// 2022 International Conference on Robotics and Automation, May 23-27, 2022, Philadelphia, Commonwealth of Pennsylvania. New York: IEEE, 2022: 4679-4685.
- [140] 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, 2022, 28: 3-14.
- [141] 巴凯先. 机器人腿部液压驱动系统主动柔顺复合控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- BA Kaixian. Research on active compliant compound

- control of robot leg hydraulic drive system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [142] 俞滨. 四足机器人液压驱动单元位置控制性能与灵敏度分析研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- YU Bin. Analysis of position control performance and sensitivity of hydraulic drive unit for quadruped robot [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [143] BA Kaixian, YU Bin, ZHU Qixin, et al. The position-based impedance control combined with compliance-eliminated and feedforward compensation for HDU of legged robot[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(16): 9232-9253.
- [144] UGURLU B. Dynamic trot-walking with the hydraulic quadruped robot-HyQ: Analytical trajectory generation and active compliance control[C]// 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 03-07, 2013, Tokyo. New York: IEEE, 2013: 6044-6051.
- [145] 杨嘉伟. 液压机器人关节柔顺控制的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YANG Jiawei. Research and implementation of joint compliance control for hydraulic robots[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [146] 储振. 基于力伺服的液压足式机器人单腿阻抗控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- CHU Zhen. Research on single leg impedance control of hydraulic legged robot based on force servo[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [147] ZHU Qixin, YU Bin, HUANG Zhipeng, et al. State feedback-based impedance control for legged robot hydraulic drive unit via full-dimensional state observer[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3): 1-15.
- [148] BA Kaixian, YU Bin, KONG Xiangdong, et al. The dynamic compliance and its compensation control research of the highly integrated valve-controlled cylinder position control system[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(4): 1814-1825.
- [149] BA Kaixian, YU Bin, LI Wenfeng, et al. Dynamic compliance and its compensation control of hvc force control system[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(2): 1008-1020.
- [150] 赵江波, 薛塔, 王军政. 液压足式机器人单腿变刚度控制弹跳研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1051-1055.
- ZHAO Jiangbo, XUE Ta, WANG Junzheng. Research on hopping for hydraulic robot leg via the variable stiffness control[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1051-1055.
- [151] HUA Zisen, RONG Xuewen, LI Yibin, et al. Active compliance control on the hydraulic quadruped robot with passive compliant servo actuator[J]. IEEE Access, 2019, 7: 163449-163460.
- [152] 周洪旭. 四足液压机器人三自由度阻抗控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHOU Hongxu. Research on 3-dof impedance control method for hydraulic quadruped[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [153] 张聪. 四足机器人运动过程中足端力估计与单腿阻抗控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- ZHANG Cong. Research on foot force estimation and single-leg impedance control method during quadruped robot movement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [154] ZHU Rui, YANG Qingjun, SONG Jiaxing, et al. Research and improvement on active compliance control of hydraulic quadruped robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19: 1931-1943.
- [155] ZHANG Xiaoxing, YI Haoyuan, LIU Junjun, et al. A bio-inspired compliance planning and implementation method for hydraulically actuated quadruped robots with consideration of ground stiffness[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2838.
- [156] 焦宗夏, 姚建勇. 电液伺服系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- JIAO Zongxia, YAO Jianyong. Electrohydraulic servo system nonlinear control[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [157] VICTOR B, OCTAVIO A, VILLARREAL M, et al. Highly-integrated hydraulic smart actuators and smart manifolds for high-bandwidth force control[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2018, 5(51): 1-15.
- [158] 朱琦歆. 基于状态反馈和重复控制的液压驱动单元位置阻抗控制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- ZHU Qixin. Position impedance control of hydraulic drive unit based on state feedback and repetitive control[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [159] LYU L. High precision energy saving motion control of hydraulic cylinder based on integration of valves and pump[C]// American Society of Mechanical Engineers. 2018 Symposium on Fluid Power and Motion Control,

- September 12-14, 2018, Bath. New York: ASME, 2018: 1-10.
- [160] 张程博. 液压驱动足式机器人单腿关节柔顺控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG Chengbo. Research on compliance control of single leg joint of hydraulic legged robot[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2019.
- [161] SHI Yapeng, LI Mantian, ZHA Fusheng, et al. Force-controlled compensation scheme for PQ valve-controlled asymmetric cylinder used on hydraulic quadruped robots[J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17: 1139-1151.
- [162] SHAO Junpeng, JIN Chaohui, WANG Xigui, et al. Study on motion analysis and force/position hydraulic control of a parallel cylinder transmission system of heavy-duty quadruped robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(1): 1-10.
- [163] HUANG Jie, AN Honglei, LANG Lin, et al. A data-driven multi-scale online joint estimation of states and parameters for electro-hydraulic actuator in legged robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 36885-36902.
- [164] SHI Yapeng, WANG Pengfei, ZHA Fusheng, et al. Mechanical design and force control algorithm for a robot leg with hydraulic series-elastic actuators[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3): 1-12.
- [165] LIEM D T, TRUONG D Q, PARK H G, et al. A feedforward neural network fuzzy grey predictor-based controller for force control of an electro-hydraulic actuator[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17: 309-321.
- [166] KIM S W, CHO B, SHIN S, et al. Force control of a hydraulic actuator with a neural network inverse model[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 2814-2821.
- [167] ZHANG Kun, ZHANG Junhui, GAO Minyao, et al. Modeling and parameter sensitivity analysis of valve-controlled helical hydraulic rotary actuator system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(66): 1-18.
- [168] SHAO Xuan, FAN Yuqi, SHAO Junpeng, et al. Improved active disturbance rejection control with the optimization algorithm for the leg joint control of a hydraulic quadruped robot[J]. Measurement and Control, 2023: 1-18.
- [169] DONALD A N. Kinesiology of the musculoskeletal system foundations for rehabilitation[M]. Netherlands: Elsevier, 2014.
- [170] 杨师齐. 基于集总参数模型的泵——心脏系统及主动脉夹层血液动力学分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- YANG Shiqi. Hemodynamic study of pump-cardiovascular system and aortic dissection using lumped parametric models[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [171] KANDEL E, SCHWARTZ J. Principles of neural science[M]. London: McGraw-Hill Medica, 2013.
- [172] ZIPES D P. Braunwald's heart disease[M]. Netherlands: Elsevier, 2012.
- [173] RAMDYA P, IJSPEERT A J. The neuromechanics of animal locomotion: From biology to robotics and back[J]. Science Robotics, 2023, 8(78): 0279.

作者简介: 俞滨, 男, 1985 年出生, 博士, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为足式机器人液压驱动。

E-mail: yb@ysu.edu.cn

孔祥东(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服控制系统。

E-mail: xdkong@ysu.edu.cn