

## 多足步行机器人液压控制系统研究现状与发展趋势

翟 硕<sup>1</sup>, 虞 拯<sup>2</sup>, 金 波<sup>1</sup>

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 宁波华液机器制造有限公司, 浙江 宁波 315131)

**摘要:** 针对多足步行机器人液压系统能量损失较大、结构相对单一及控制策略相对复杂等问题, 从机器人液压系统和控制策略 2 个方面分析了多足步行机器人液压控制系统现状. 将液压系统从泵源、液压执行器和液压控制结构 3 个方面分别阐述. 从动力来源和油路结构介绍了泵源, 从结构分类、一体化集成和特殊功能简述了不同液压执行器的应用, 从阀控液压系统和泵控液压系统介绍了液压控制结构. 从自由空间和约束空间两方面介绍了系统控制策略. 多足步行机器人液压系统的发展方向包括小型化、轻量化、节能降耗、降低噪声和泄漏以及对控制策略的改进.

**关键词:** 多足步行机器人; 液压系统; 控制策略

中图分类号: TP242, TH137

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2018)-06-0958-11

### Research Status and Development Trend of Hydraulic Control System for Multi-legged Walking Robot

ZHAI Shuo<sup>1</sup>, YU Zheng<sup>2</sup>, JIN Bo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. Ningbo HOYEA Machinery Manufacturer CO. LTD, Ningbo 315131, China)

**Abstract:** Problems of the hydraulic system of multi-legged walking robot are focused, such as large energy loss, relatively single structure, and complex control strategy. Status of the hydraulic control system of multi-legged walking robot is analyzed in two aspects, i.e. hydraulic system and control strategy. Firstly, the hydraulic system is separately elaborated from pump unit, hydraulic manipulator and hydraulic control structure. The pump unit is introduced from the power source and the structure of oil circuit. The applications of different hydraulic manipulators are briefly described according to the structure classification, the integration and the special functions. The hydraulic control structure is classified into the valve control system and the pump control system. Secondly, the system control strategies for the free space and the constrained space are introduced. The development directions of the hydraulic system of multi-legged walking robot include miniaturization, weight reduction, energy saving, noise suppression, leakage reduction, and improvement of the control strategy.

**Keywords:** multi-legged walking robot; hydraulic system; control strategy

## 1 引言 (Introduction)

移动机器人是目前应用最为广泛的一种机器人, 它可以代替人类完成危险的、复杂的或是高强度的工作. 当前, 移动机器人在地面上的移动方式主要有轮式、履带式、足式、蠕动式和混合式等, 其中轮式机器人有速度快、效率高和易于控制等特点, 应用最为广泛. 但轮式机器人对地面的平整度要求高, 无法在崎岖不平的、未经修整的自然地形上行走. 而足式机器人仅需要一些离散的落足点, 便可以像足式动物一样行走于具有障碍物的崎岖地面. 相较于轮式机器人, 足式机器人有其独特

的高机动性和对复杂地面的适应性, 具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>.

动力驱动系统是机器人运动和执行任务的基础, 合理的驱动方式能够有效地提升机器人的动态性能和负重能力. 目前, 多足步行机器人主要驱动方式有电驱动和液压驱动. 电驱动结构简单、控制技术成熟、动态响应快, 具有良好的控制性能和动力性能. 但由于电驱动机器人的功率密度相对较低, 其动态特性和负载能力受到限制. 与电驱动相比, 液压驱动方式具有功率密度大、输出力大、高带宽、响应快和抗扰能力强等特性, 更适合用于构建具有较强环境适应性的多足步行机器人<sup>[2]</sup>.

近几十年来,国内外学者设计了多台液压多足步行机器人,取得了一定的成果.美国通用电气公司设计的四足步行卡车 Walking Truck<sup>[3]</sup>是最早的液压多足步行机器人,其将汽车的4个轮子用4条腿代替,使其可以跨越障碍并可以行走于崎岖地形环境,具有里程碑式的意义.Waldron等研制的ASV<sup>[4]</sup>六足步行车辆质量2720 kg、长5.6 m,由内置内燃机带动液压执行器进行驱动,是第1台由计算机协调控制,并能成功适应复杂地表的行走机械.Plustech公司研制的Walking Harvester<sup>[5]</sup>是一款在森林中工作的液压六足机械,可以适应复杂的森林地形,完成木材的采伐与搬运工作,减少对地表植被的破坏.Boston Dynamic公司研制的Big-Dog<sup>[6]</sup>液压四足步行机器人长约1 m、宽0.3 m、高1 m、质量90 kg,具有出众的运动能力,适应山地、丛林、海滩、冰面、雪地等复杂危险的地形,是当今世界上在野外应用的四足机器人的代表作之一.此后,Boston Dynamic公司研发的液压步行机器人如LS3<sup>[7]</sup>、Cheetah、WildCat<sup>[8]</sup>、Spot<sup>[9]</sup>等也成为机器人领域研究的焦点.意大利技术研究院开发了HyQ<sup>[10]</sup>电液混合驱动机器人,实现了四足机器人稳定控制.另外其研发的miniHyQ<sup>[11]</sup>,长0.85 m、宽0.35 m、高0.77 m、质量35 kg,是目前最轻、最小的液压多足步行机器人.日本千叶大学研制的COMET-IV<sup>[12]</sup>和日本中京大学研制的TITAN XI<sup>[13]</sup>是重型仿昆虫腿多足步行机器人,能适应崎岖地面、沙地,并能在20°斜坡上工作.韩国工业技术研究院研制的液压步行机器人KITECH p-2<sup>[14]</sup>和JinPoong<sup>[15]</sup>,实现了小跑步态前进、倒退及匍匐卧倒等基本动作.目前国内研制的液压多足步行机器人也有很多,如山东大学SCalf<sup>[16]</sup>、哈尔滨工业大学MBBOT<sup>[17]</sup>、上海交通大学“小象”<sup>[18]</sup>、北京理工大学四足机器人<sup>[19]</sup>、国防科技大学四足机器人<sup>[20]</sup>、西南科技大学六足机器人<sup>[21]</sup>等,同样具有较高的环境适应能力和负载能力.

本文从泵源、液压执行器以及液压控制系统3个方面综述国内外多足步行机器人液压系统的研究现状,总结各自的优点和不足,展望其发展趋势.

## 2 泵源(Pump unit)

### 2.1 动力来源

按照动力来源,多足步行机器人液压系统泵源的能量供给方式可以分为蓄电池和内燃机2种.蓄电池通过驱动电机带动泵旋转为机器人液压系统供能,其具有方案简单、噪声小、发热量低

和无环境污染等优点.然而蓄电池的能量密度较低,目前最高性能的锂离子电池能量密度大约只有0.96 MJ/kg<sup>[22]</sup>,无法支持机器人长时间野外工作,主要应用于小型液压机器人如miniHyQ等.内燃机是多足步行机器人更常用的动力源.与蓄电池相比,燃油具有更高的能量密度,例如汽油能量密度48.6 MJ/kg<sup>[23]</sup>,即便结合燃油能量利用率和内燃机质量等因素,内燃机依然拥有更高的能量密度.另外,内燃机具有更大的功率密度,例如SCalf所采用的内燃机功率密度达到了大约1 kW/kg<sup>[24]</sup>.但内燃机同样存在很多缺陷:(1)燃油能量转化效率低,产生大量的热,需要相应的冷却设施;(2)转速难以精确控制,无法直接驱动需要变转速的机器人变量液压系统;(3)工作时会产生大分贝噪声并排放有毒气体,限制了其在室内工作机器人上的应用.

### 2.2 泵源结构

按照油路结构,多足步行机器人液压系统泵源可以分为开式系统和闭式系统<sup>[25]</sup>.在开式液压系统中,油液回路经过油箱,可以发挥油箱散热、沉淀杂质的作用.弊端是行走机械中油箱的有效容积是平均流量的1~2倍<sup>[26]</sup>,增加了机器人的自重.在闭式液压系统中,油液回路不直接经过油箱,在系统的管路中进行封闭循环.闭式系统结构较为紧凑,与空气接触机会较少,空气不易渗入系统,传动的平稳性好.另外,闭式系统中通常会设置补油装置向低压管道补油,例如正压油箱或补油回路,平衡差动液压缸不对称流量和补偿系统泄漏,并保证低压管道有一个恒定的压力值,以防止气穴现象的产生和空气渗入<sup>[27]</sup>.

## 3 液压执行器(Hydraulic manipulator)

多足步行机器人每条腿一般有3~4个主动关节,均由执行器驱动,因而执行器的性能对机器人的负载能力和动态性能起着至关重要的作用.

### 3.1 结构分类

液压执行器从元件种类上可以分为液压缸和液压马达.其中,液压马达结构相对复杂、质量较大、应用较少,通常适用于重型机器人的根部关节,如COMET-IV.液压缸是最常用的液压执行器,具有结构简单、质量轻、性能稳定的特点.根据每个关节结构的不同,液压缸也有直线和旋转2种结构.Jin等对KITECH p-2(所有的液压执行器都是旋转液压缸)和经过改良后的JinPoong(只有髋部横摆关节为旋转液压缸,其余都是直线液压缸)进行了对比<sup>[28]</sup>.相比而言,直线液压缸质量小

于旋转液压缸，而且直线液压缸可以使所有液压执行器都放在腿的上部分，使腿的下部分更轻，因而使机器人更加稳定且易于控制，较少受摆动腿的动力学影响。

### 3.2 一体集成式执行器

为了节省空间，大多数多足步行机器人在设计过程中将液压执行器进行一体式集成。根据运动控制系统对多足步行机器人进行力控制和位置控制的要求，液压执行器的组成除了液压缸和电液阀外还应包括力传感器以及位移传感器，如图 1 所示<sup>[6]</sup>。集成后缩短了电液伺服阀与液压执行器之间的距离，减少了液压管道容积油液膨胀的影响，有利于提高液压执行器的控制精度，而且同侧的进出油口更利于油管的布放。上海交通大学四足机器人“小象”用到了自主研发的液压执行器“Hy-Mo”，将 2D（2 维）阀与液压缸高度集成在一起，由伺服电机控制，具有较小的体积和质量、较强的抗污染能力和较少的能量消耗，可以通过最简单的液压系统驱动，如图 2 所示<sup>[29]</sup>。

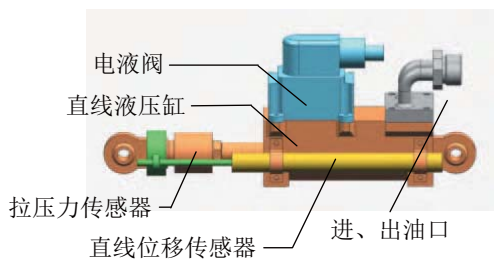


图 1 一体化液压驱动单元结构图

Fig.1 The structure of the integrated hydraulic actuator

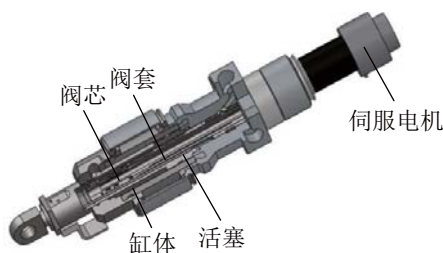


图 2 “Hy-Mo” 结构图

Fig.2 “Hy-Mo” structure

### 3.3 特殊执行器

串联弹性执行器（series elastic actuator, SEA）通过将执行器末端与弹簧等弹性元件串联，可以有效地吸收冲击，储存能量，保证与地面接触的柔顺性<sup>[30]</sup>，在单腿跳跃机器人中有着广泛应用，如 Monopod<sup>[31]</sup>。Chu 等设计了一种 SEA 用于驱动足式机器人腿部运动，可以通过控制算法从 5 kN/m 到 20 kN/m 任意调节刚度，如图 3 所示<sup>[30]</sup>。与刚性

连接相比，SEA 闭环控制的带宽显著下降，只适用于某些特定的工作条件，例如快速运动状态，其在低速静态范围效果不好。为克服这一问题，研究人员在原有 SEA 基础上提出了多种可变刚度执行器<sup>[32]</sup>，用小型驱动器来调节弹簧刚度，然而由于结构复杂，体积和质量较大，弹簧大小有限，其负载能力受到限制。

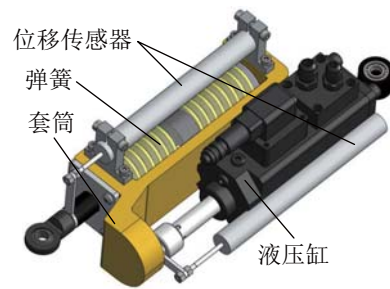


图 3 液压串联弹性执行器结构图

Fig.3 Configuration of the hydraulic SEA

Dominguez 等提出了一种磁流变活塞液压缸（magnetorheological hydraulic piston cylinder）用于机器人与环境接触时的力控制<sup>[33-34]</sup>。将环形电磁阵列集成到活塞头，利用电磁驱动控制活塞输出力。该执行器可靠性高、体积小，便于力的平稳控制。

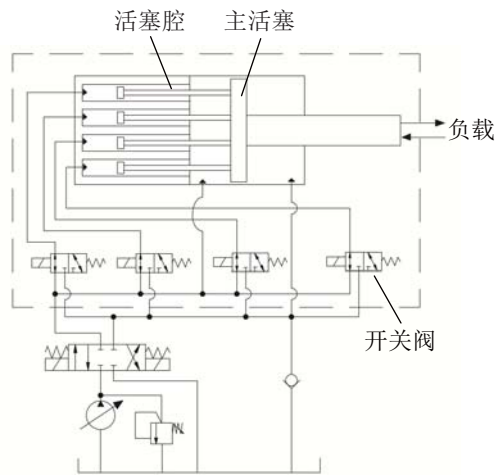


图 4 有效面积可变液压缸原理图

Fig.4 The hydraulic cylinder with varying effective area

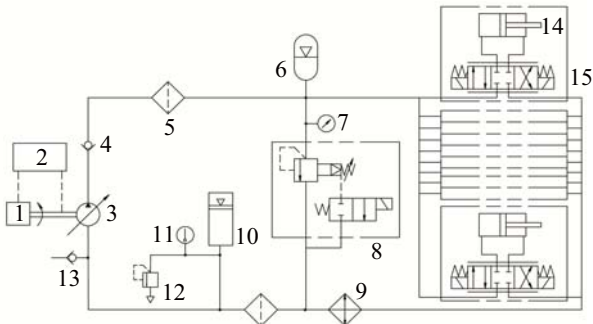
Shang 等设计了一种有效工作面积可变的新型液压缸，可以提高液压系统的效率，如图 4 所示<sup>[35]</sup>。该液压缸具有多个柱塞腔，可以通过开关阀控制其与液压主系统的通断。液压缸通过改变有效面积使机器人所有执行器的负载压力几乎相等，而且实现了两腔之间的回流。在液压系统效率方面，该液压缸能够有效减少整体的能源消耗，减少节流损失，实现能量回收。



### 4 液压控制结构 (Hydraulic control structure)

#### 4.1 阀控液压系统

阀控液压系统通过改变电液阀的开口大小, 控制形成的节流孔阻尼, 使出口流量适应负载需要. 阀控液压系统适用于快速、高精度的中、小功率伺服系统. 在液压多足步行机器人中, 最常用的阀控系统如图 5 所示.



1. 发动机 2. 转速控制器 3. 恒压变量泵 4. 单向阀 5. 过滤器 6. 蓄能器 7. 压力传感器 8. 安全阀 9. 冷却器 10. 加压油箱 11. 温度计 12. 低压安全阀 13. 加油口 14. 液压缸 15. 伺服阀

图 5 多足步行机器人常用液压系统

Fig.5 Hydraulic system used in the multi-legged walking robot

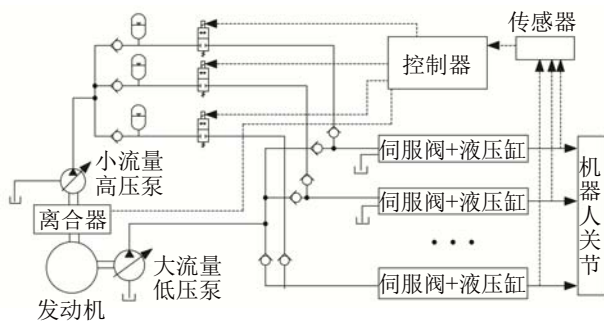


图 6 两阶能源供给液压系统原理图

Fig.6 Schematic of the double-stage energy-supplying hydraulic system

Xue 等提出了两阶能源供给液压系统, 可以降低阀口压降, 提高阀控系统效率, 如图 6 所示<sup>[36]</sup>. 多足步行机器人每个关节都并联 1 个小容量蓄能器, 作为短时间的高压能源, 并由 1 个小流量高压泵储能; 大流量变量泵用于长时间为系统提供低压能源. 两阶供油系统减少了当负载压低、流量大时阀口产生的热量, 将液压系统的能量利用率提高了 50%, 但系统的弊端在于压力切换时会产生流量突变, 造成速度突变, 很难实现平稳控制.

单边节流液压系统相比于双边节流系统具有更高的效率, 国内外学者提出用高速开关阀和数字阀来代替传统伺服阀或比例阀. Guglielmino 等提出用高速开关阀组成降压式液压变换器 (hydraulic buck

converter, HBC) 控制多足步行机器人, 如图 7 所示<sup>[37]</sup>. 经过试验发现, HBC 系统相比于常规的阀控系统可以节能 75%, 在油液污染上有更好的鲁棒性, 并且价格更低, 但是其结构复杂, 体积和质量大, 难以应用于多执行器机器人<sup>[38]</sup>. 同样, Zhang 等也提出用高速开关阀代替比例阀, 用开关阀 PWM (脉冲宽度调制) 信号占空比对油缸进油口和出油孔进行流量控制, 从而实现进油口和出油口单向节流, 减少不必要的节流损失<sup>[39]</sup>. Peng 等对几种数字阀液压系统在多足机器人模型上进行了仿真分析, 如图 8 所示<sup>[40]</sup>. 通过研究发现, 机器人运行在行走步态和小跑状态时液压系统 (图 8(c)) 的效率相比于伺服阀系统分别提高了 34% 和 49%. 4 种数字阀系统对比: (1) 并联的数字阀系统 (图 8(b)、(d)) 具有更高的控制精度; (2) 具有回流的数字阀系统 (图 8(a)、(b)) 收腿过程具有更高的效率; (3) 在伸腿过程中, 由于输入流量接近所要求的流量, 液压系统 (图 8(c)、(d)) 效率更高.

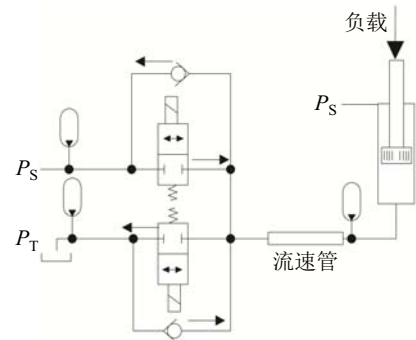


图 7 降压式液压变换器原理图

Fig.7 Schematic of the hydraulic buck converter

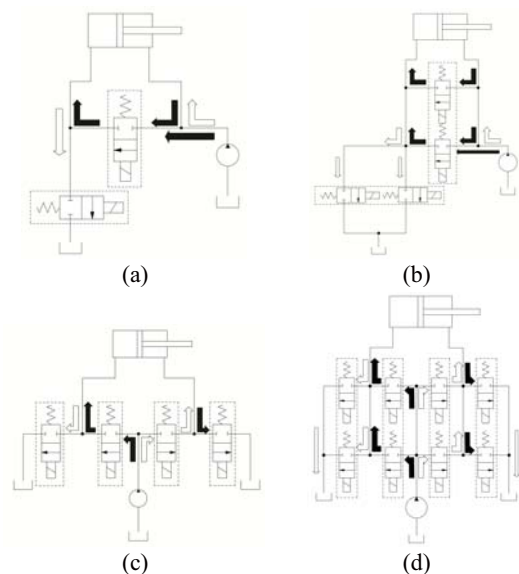


图 8 不同的数字阀液压系统

Fig.8 Different digital valve hydraulic systems

阀控系统的优点是响应速度快、控制精度高、结构简单，缺点是阀口能量损失大、系统效率低<sup>[36]</sup>。能源分级供给和单边节流的改进方法都能提高阀控系统效率，但都过于复杂，距离在多足步行机器人上应用还有一段距离。

### 4.2 泵控液压系统

虽然阀控系统具有较强的负载适应性和可控性，但与之相比，泵控系统的节能优势明显，液压系统效率显著提升。泵控系统可通过变排量或变转速使泵出口流量适应负载需要，避免了节流阀产生的能量损失，从而提高液压系统的效率。Al-Kharusi 等提出一种泵马达驱动的多足步行机器人，可以通过控制策略进一步提升效率，并通过改变排量大小控制关节运动速度和方向<sup>[41]</sup>；当关节做正功时，作为马达工作，将液压能转化为动能；当关节做负功时，作为泵工作，将动能转化为液压能。

六足步行车辆 ASV，其采用的泵控系统如图 9 所示<sup>[42]</sup>。该系统的液压动力元件由变量泵和对称液压缸组成，变量泵既是液压能源又是液压控制元件。由于操纵变量机构所需的力较大，故采用小功率的阀控式电液位置伺服机构作为泵的变量控制机构，通过伺服阀高响应地改变变量泵的排量，控制变量泵的出口流量，以完成机器人的精准落足或按指定速度前进。缺点是泵控系统需采用多个变量泵，致使机器人质量达 3200 kg，而最大负荷只有 220 kg。

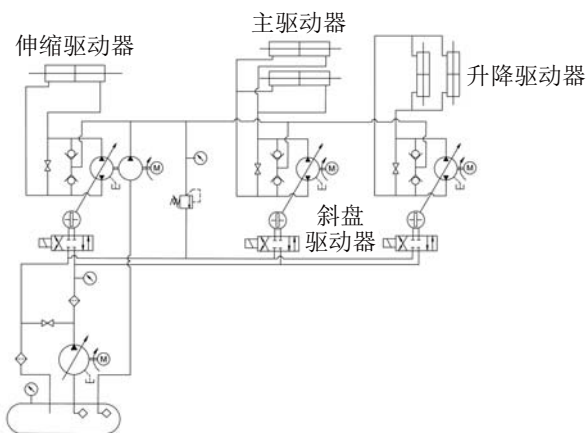


图 9 六足步行车辆 ASV 的泵控液压系统  
Fig.9 Pump-controlled hydraulic system of the six-legged walking vehicle ASV

反向驱动性能是机器人与外界环境柔顺接触的一项重要指标。为了提高机器人与外界接触时关节的反向驱动性能，Kaminaga 等用泵控系统代替谐波齿轮减速器，该系统由伺服电机、螺杆泵以及叶片马达组成，如图 10 所示<sup>[43]</sup>。其中，伺服电机通

过泵控系统减速，精确控制关节角度；螺杆泵具有较小的静摩擦力，提高执行器反向驱动性能<sup>[44]</sup>。经过实验证明，新的执行器反向驱动时的摩擦力是谐波齿轮减速器的 64%，具有很好的控制性。

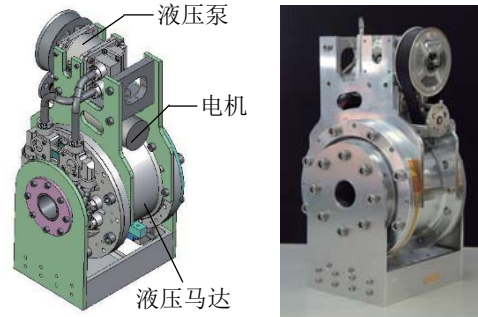


图 10 泵控液压系统关节结构图  
Fig.10 Joint structure of the pump-controlled hydraulic system

非对称液压缸是多足步行机器人最常用的液压执行器，而当泵控系统控制非对称液压缸时需要进行补油，导致控制效果不理想，且会增加液压系统质量与能耗。Huang 等提出了非对称泵控制非对称液压缸的控制策略，其液压系统如图 11 所示<sup>[45]</sup>。其通过改变配油盘的形状，使 A 口与 B 口的比例和非对称液压缸无杆腔与有杆腔的比例相同。当活塞移动时，多余的流量将储存到蓄能器，而通过单向阀的流量非常少，可以进一步提高系统效率和控制精度。

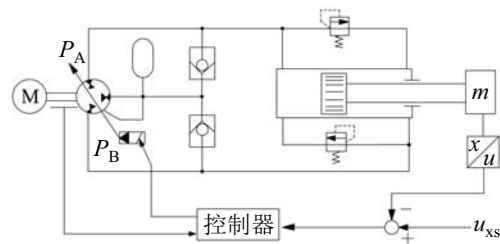


图 11 非对称泵控液压系统原理图  
Fig.11 Schematic of the asymmetric pump-controlled hydraulic system

泵控系统可通过改变泵排量或转速，使泵出口流量适应负载需要，降低液压能耗。变排量的泵控系统主要应用于重型多足步行机器人，通过流量控制负载速度，当关节做负功时，实现能量回收。变转速的泵控系统通常由能精确控制的伺服电机驱动，其摩擦力小，传动平稳，具有较好的可控性，发展前景广泛。

## 5 控制策略 (Control strategy)

液压执行器具有响应速度快、输出功率大、抗干扰能力强等优点，但存在系统非线性、模型不准

确和参数不确定等缺点, 限制了其在多足步行机器人中的应用. 因此, 各种控制策略被广泛地研究, 以得到更好的控制性能. 本文将从自由空间运动控制和约束空间运动控制 2 方面进行阐述.

### 5.1 自由空间运动控制

液压多足步行机器人的自由空间运动控制主要是位置控制, 即在不与环境接触时控制每个关节按照预定轨迹运动. 目前应用最广泛的控制策略是 PID (比例-积分-微分) 控制, 优点是结构简单、易于实现. 但其快速性和稳定性难以同时实现, 并且液压系统非线性特性会对 PID 控制性能产生较大影响. Cunha 等提出用分段 PID 的方法控制关节运动, 但实验证明该方法对于控制性能没有较大改善<sup>[46]</sup>.

Ke 等<sup>[47]</sup>采用了自抗扰控制器<sup>[48]</sup> (active disturbance rejection controller, ADRC) 对机器人关节进行位置控制, 通过安排过渡过程、跟踪微分器和扩张状态观测器, 有效地抑制了内外干扰, 提高了系统控制精度. ADRC 同样不需要参照系统模型, 而且相比于 PID 控制具有更好的鲁棒性, 可有效解决足端触地时力冲击引起的不稳定问题<sup>[47]</sup>.

Boaventura 等将反馈线性化在 HyQ 关节控制上进行了应用<sup>[49]</sup>: 通过参照液压系统非线性模型对控制器进行补偿, 使得液压执行器成为线性可控可观系统, 减小了反馈值, 提高了位置控制精度. Focchi 等通过对 PID 控制器、线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 以及反馈线性化控制器 (feedback linearization controller, FLC) 三种控制器的对比<sup>[50]</sup>, 证明了 FLC 具有最快的响应速度和最高的跟踪精度.

Bech 等基于液压系统非线性模型设计了几种控制器, 并证明了其李亚普诺夫稳定性<sup>[51]</sup>. 分别为: (1) 滑模控制器 (sliding mode controller, SMC), 通过不连续的控制信号使系统误差收敛; (2) 自适应逆动力学控制器 (adaptive inverse dynamics controller, AIDC), 通过逆动力学控制弥补系统非线性部分, 结合自适应环节减小因参数时变和不确定引起的误差. (3) AIDC 结合 PI (比例-积分) 控制器, 减小稳态误差; (4) 基于速度传感器的模型参考自适应控制 (model-reference adaptive controller with velocity measurement, MRACV), 通过活塞位移和速度估计系统动力学方程, 减小模型参考误差. 通过对比, MRACV 具有最小的跟踪误差.

Yao 等基于反步设计法 (backstepping design) 提出了自适应鲁棒控制器 (adaptive robust con-

troller, ARC), 可以有效地控制液压执行器, 保证良好的瞬态性能和稳定的跟踪性能<sup>[52]</sup>. Yao 等在此基础上进行了改进: (1) 期望补偿自适应鲁棒控制器 (desired compensation adaptive robust controller, DCARC), 用期望跟踪位移、速度等变量代替测量值代入控制器, 减少反馈信号的测量噪声, 增强系统鲁棒性<sup>[53]</sup>. (2) 间接自适应鲁棒控制器 (indirect adaptive robust controller, IARC), 将参数估计从鲁棒控制器设计中分离, 采用指数趋近律, 与 ARC 相比具有更小的跟踪误差<sup>[54]</sup>.

在多足步行机器人液压执行器的自由空间运动控制中, 常用的控制器性能指标包括位置阶跃的上升时间、最大跟踪误差以及误差速度比<sup>[55]</sup> (最大误差/最大速度) 等. 但在不同的机器人中, 系统参数完全不同, 很难通过某一指标去评估控制器的优劣. 从同一机器人的控制实验<sup>[47,50-51]</sup>中可以看出, 基于参考模型的非线性控制策略相比于线性控制策略具有更好的控制性能. 例如, 通过速度反馈实现液压力内环零极点的消除, 来提高响应速度, 或者通过逆动力学前馈力补偿消除外界负载干扰影响, 以提高位置控制精度. 非线性控制器更加复杂, 需要准确的模型和参数, 通常会结合自适应环节和鲁棒环节同时进行控制. 自适应环节通过对系统参数的估计, 可以使非线性控制器进一步减小误差, 而鲁棒环节可以在模型和参数不准确的情况下保持系统稳定. 同时, 对传感器数据采用合理的方法处理, 同样可以提高控制性能.

### 5.2 约束空间运动控制

多足步行机器人的约束空间运动控制主要是机器人与环境接触过程的力与位置的控制, 以确保接触过程的柔顺性, 避免剧烈碰撞导致的控制器不稳定, 并防止对机器人造成损伤. 目前主要的控制方法包括阻抗控制和力/位置混合控制. 阻抗控制采用力与位置的串联控制结构, 由具有较高跟踪精度的内环和具有柔顺性的外环构成, 通过外环改变接触特性; 力/位置混合控制采用力与位置的并联控制结构, 通过控制位置环和力闭环的增益大小改变接触特性.

Boaventura 等通过虚拟弹簧阻尼 (virtual spring damper, VSD) 设计力内环的阻抗控制器, 并将其与被动弹簧阻尼关节对比, 证明其具有阻抗可变能力, 并可在机器人高速运动过程中产生与被动柔顺元件相同的功能<sup>[56]</sup>. 在此基础上, 提出了使机器人接触过程保持被动性的阻抗范围 (Z-width) 这一概念<sup>[57]</sup>, 保持机器人在运动过程中的稳定.



Irawan 等提出了一种位置内环的阻抗控制方法. 根据机器人 COMET-IV 质心等躯体姿态参数自适应调节阻抗参数, 使得机器人运动过程中姿态保持稳定, 对崎岖和松软地面具有高度适应性<sup>[58-59]</sup>.

Montes 等分别用阻抗控制方法和力/位置混合控制方法对四足攀爬机器人 Roboclimber 进行环境接触的控制实验<sup>[60]</sup>. 实验表明, 阻抗控制可以有效地减小足端触地时的冲击力, 而力/位置混合控制具有更高的位置控制精度. Montes 等在此基础上结合零力矩点 (zero moment point, ZMP) 控制改变关节运动指令, 确保机器人运动过程的稳定性.

Koivumaki 等提出用虚拟分解控制 (virtual decomposition control, VDC) 的方法, 将复杂的机器人系统分解为一系列的子系统, 通过分析子系统的运动学、动力学和稳定性, 并对各个子系统分别进行力/位置混合控制<sup>[61]</sup>和阻抗控制<sup>[62]</sup>, 两种方法都能准确地调节接触时的动态性能, 同时保证系统稳定性.

在多足步行机器人的约束空间运动过程中, 无法同时满足力与位置的伺服控制, 其中, 阻抗控制确保内环跟踪精度, 放弃外环跟踪特性, 触地时抗冲击性强; 力/位置混合控制通过增益调节力和位置的跟踪精度, 可以得到更好的接触特性. 在阻抗控制中, 力内环的阻抗控制响应速度大于位置内环的阻抗控制, 而后的阻抗模拟精度要优于前者<sup>[63]</sup>. 通常大型、低速机器人采用位置内环的阻抗控制, 如 COMET-IV, 小型、高速机器人采用力内环的阻抗控制, 如 HyQ.

## 6 发展方向 (Future trends)

目前, 液压驱动多足步行机器人还处于研究阶段, 液压系统存在能量利用效率低、噪声大、质量大等问题, 距离其广泛应用还有一段距离. 随着理论和技术的发展, 以下几方面性能的进步将会进一步提升液压系统在足式机器人领域的应用<sup>[64]</sup>.

### 6.1 轻量化和小型化

液压驱动系统的质量和体积是影响其在足式机器人领域应用的重要因素, 液压系统的小型化和轻量化可以有效地提高机器人的负重, 改善动力性能.

#### 6.1.1 液压元件小型化

最小型的液压驱动多足步行机器人 miniHyQ 质量仅有 35 kg, 选用了质量仅 92 g 的伺服阀、10 kW 大功率高转速无刷直流电机和小排量齿轮泵, 有效地减轻了机器人质量<sup>[65]</sup>.

### 6.1.2 一体化

紧凑的结构可以有效地减轻液压系统质量, 并且便于安装. Raade 等设计了内燃机驱动的液压系统 HEPU, 质量 27 kg, 可以同时输出功率 2.3 kW、压力 6.9 MPa 的液压能和功率 220 W、电压 15 V 的电能, 如图 12 所示<sup>[66]</sup>. Alfayad 等设计一种高度集成的泵阀一体的液压单元, 可以对输出流量的大小和方向进行控制, 尺寸 80 mm×40 mm×40 mm, 并且通过试验证明该装置能够以 20 mm/s 的速度驱动 35 kg 的负载<sup>[67-68]</sup>.

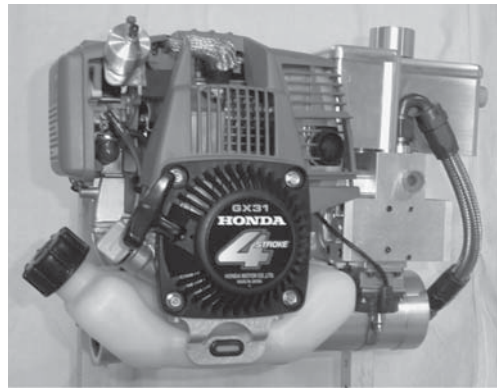


图 12 HEPU 高度集成液压力源

Fig.12 HEPU highly integrated hydraulic power source

### 6.1.3 新工艺或新材料的应用

Semini 等使用 AlSiMg 合金制作液压歧管, 具有价格低、散热性能好、易于再加工的特点; 并且采用增材制造技术, 具有更轻、更复杂的优点, 如图 13 所示<sup>[69]</sup>. El Asswad 等使用新型材料碳纤维制作液压缸体和活塞杆, 并通过遗传算法优化结构参数, 成功研制了具有位移传感器和压力传感器的新型液压执行器, 使机器人整体质量减小 28 kg<sup>[70]</sup>.



图 13 增材制造液压歧管

Fig.13 Hydraulic manifold with additive manufacturing

### 6.2 节能降耗

多足步行机器人液压驱动系统高能耗问题突出, 导致机器人单次补充能量后的工作时间减少,

并且高能耗产生的热量传递至液压油中,对系统的散热能力也提出了更高的要求。目前,提高效率的方法主要有以下几种方式:(1)优化液压系统结构,如6.1节所述。(2)在液压系统中安装储能装置。常用的储能装置有蓄能器和电池:蓄能器通过周期性的储油和放油来平衡液压系统流量的周期性变化,减小通过溢流阀的流量,提高效率,在大部分液压多足机器人均有应用;电池与发电机一起使用,当发动机输出功率大于液压系统所需功率时,会带动发电机转动,将产生的电能储存在电池中,可以为机器人控制系统供电,在COMET-IV中具有应用<sup>[12]</sup>。(3)选用更优的控制策略,通过优化液压系统参数来提高系统效率,例如,Du等提出一种负载预测方法,通过调节比例溢流阀和伺服电机转速改变系统供应压力,节省70%液压能,而且具有更好的控制精度<sup>[71]</sup>。

### 6.3 降低噪声和泄漏

噪声是液压驱动机器人的一个显著缺点。较大的噪声限制了其在室内应用,并且振动会影响传感器精度,对机器人控制效果产生影响。为了减小机械振动,Guglielmino等通过机器人大部分仿真合理设置橡胶安装位置,减小泵引起的机体的振动<sup>[72]</sup>。Amundson等设置固定频率的消声器,吸收特定频率的发动机噪声,成功将动力源噪声从87 dBA降低到78 dBA<sup>[73]</sup>。

泄漏是液压系统另外的一个重大缺陷。泄漏出的油液具有可燃性,并且污染环境,限制了液压系统的安全性和实用性。为了减小液压油泄漏产生的危害,Yang等对水液压在机器人上的应用进行仿真研究,并与液压油进行了对比,得到较好的结论<sup>[74]</sup>。

### 6.4 新型智能算法的应用

近年来,越来越多的研究人员将新型智能算法应用于液压多足步行机器人的运动控制领域。新型智能算法不依赖于系统模型,通过计算机的大量辅助计算,对现有控制方法进行改进,得到了更好的控制精度。目前新型智能算法主要有2种应用方式:(1)控制器(如PID)参数优化。例如,Stojanovic等采用多种仿生智能算法实时调节PID控制器参数,提高液压执行器位置控制精度<sup>[75]</sup>。其中,蝙蝠算法(bat algorithm, BA)相比于遗传算法(genetic algorithm, GA)、布谷鸟搜索算法(cuckoo search algorithm, CS)和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)具有更好的控制性能。(2)系统模型和外界负载的估计与补偿。越来越多的机器

学习方法被用做自适应环节引入控制器,使控制器更具有智能学习性<sup>[76]</sup>。例如,Lu等通过径向基函数神经网络(radical basis function neural network, RBFNN)估计液压执行器的建模误差和外界干扰,通过自适应控制算法调节非线性控制器参数,并用基于障碍的李亚普诺夫函数(barrier Lyapunov function, BLF)证明其鲁棒性<sup>[77]</sup>。

## 7 结论(Conclusion)

本文从泵源、液压执行器和液压控制结构角度对多足步行机器人液压系统的发展现状进行阐述,分析了多足步行机器人液压系统常用的控制策略,进而提出了其发展方向。

(1)多足步行机器人液压系统在泵源上可以选择电池和内燃机作为能量来源,分别主要应用在室内和野外。在液压执行器上,直线执行器安装更加灵活,而且通常会将液压缸、电液阀、力传感器和位移传感器做一体式集成。为了改善接触、控制或效率等特性,一些特种液压执行器也会被使用。在液压控制结构上,阀控系统具有更高的响应速度和控制精度,泵控系统具有更高的效率,改善液压系统结构可以有效提高液压系统的性能。

(2)多足步行机器人控制策略可以分为自由空间运动控制和约束空间运动控制。自由空间运动控制中,采用多种非线性控制方法代替线性控制方法,能够取得更好的性能。约束空间运动控制主要包括阻抗控制和力/位置混合控制,结合参数自适应和虚拟分解等方法,可以确保接触地面时的动态性能。

(3)多足步行机器人液压系统的发展方向包括小型轻量化、节能降耗、降低噪声、泄漏以及对现有控制策略的改进。通过克服上述问题,液压系统的可接受性将显著提高,并以其高动态特性和大负载能力在多足步行机器人领域产生更广泛的应用。

## 参考文献(References)

- [1] Zhuang H C, Gao H B, Deng Z Q, et al. A review of heavy-duty legged robots[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(2): 298-314.
- [2] 丁良宏,王润孝,冯华山,等.浅析BigDog四足机器人[J].中国机械工程,2012,23(5):505-514.  
Ding L H, Wang R X, Feng H S, et al. Brief analysis of a Big-Dog quadruped robot[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5): 505-514.
- [3] Mosher R S. Test and evaluation of a versatile walking truck [C]//Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium. 1968: 359-379.
- [4] Waldron K, McGhee R. The adaptive suspension vehicle[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1986, 6(6): 7-12.



- [5] Billingsley J, Visala A, Dunn M. Robotics in agriculture and forestry[M]//Springer Handbook of Robotics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008: 1065-1077.
- [6] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [7] Boston Dynamics. LS3 – Legged squad support systems[EB/OL]. [2017-10-17]. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_ls3.html](http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html).
- [8] Boston Dynamics. WildCat – The world’s fastest quadruped robot[EB/OL]. [2017-10-17]. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_cheetah.html](http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html).
- [9] Boston Dynamics. Spot – Takes a kicking and keeps on ticking[EB/OL]. [2017-10-17]. <https://www.bostondynamics.com/spot>.
- [10] Semini C. HyQ – Design and development of a hydraulically actuated quadruped robot[D]. Genoa, Italy: University of Genoa, 2010.
- [11] Khan H, Kitano S, Frigerio M, et al. Development of the lightweight hydraulic quadruped robot – MiniHyQ[C]//IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [12] Nonami K, Barai R K, Irawan A, et al. Hydraulically actuated hexapod robots: Design, implementation and control[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2014.
- [13] Doi T, Hodoshima R, Hirose S, et al. Development of a quadruped walking robot to work on steep slopes, TITAN XI (walking motion with compensation for compliance)[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 3413-3418.
- [14] Kim T J, So B, Kwon O, et al. The energy minimization algorithm using foot rotation for hydraulic actuated quadruped walking robot with redundancy[C]//41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [15] Cho J, Jin T K, Park S, et al. JINPOONG, posture control for the external force[C]//International Symposium on Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1-2.
- [16] 柴汇, 孟健, 荣学文, 等. 高性能液压驱动四足机器人 SCalf 的设计与实现 [J]. 机器人, 2014, 36(4): 385-391.  
Chai H, Meng J, Rong X W, et al. Design and implementation of SCalf, an advanced hydraulic quadruped robot[J]. Robot, 2014, 36(4): 385-391.
- [17] Li M T, Jiang Z Y, Wang P F, et al. Control of a quadruped robot with bionic springy legs in trotting gait[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 188-198.
- [18] 胡楠, 李少远, 黄丹, 等. 高负载四足机器人的步态规划与控制 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 529-533.  
Hu N, Li S Y, Huang D, et al. Gait planning and control of quadruped robot with high payload[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 529-533.
- [19] Gao J, Duan X, Huang Q, et al. The research of hydraulic quadruped bionic robot design[C]//ICME International Conference on Complex Medical Engineering. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 620-625.
- [20] Cai R, Chen Y, Hou W, 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): 148.
- [21] 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 X X, Liu C H, Liu J S, et al. Experimental study on the prototype of a large heavy-duty hydraulic hexapod robot[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(6): 28-31.
- [22] 吴娇杨, 刘品, 胡勇胜, 等. 锂离子电池和金属锂离子电池的能量密度计算 [J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 443-453.  
Wu J Y, Liu P, Hu Y S, et al. Calculation on energy densities of lithium ion batteries and metallic lithium ion batteries[J]. Energy Storage Science & Technology, 2016, 5(4): 443-453.
- [23] Kumar S. Role of hydrogen in the energy sector[M]. Clean Hydrogen Production Methods. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2015: 1-9.
- [24] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
Rong X W. Mechanism design and kinematics analysis of a hydraulically actuated quadruped robot SCalf[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [25] Quan Z Y, Quan L, Zhang J M. Review of energy efficient direct pump controlled cylinder electro-hydraulic technology[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 35(1): 336-346.
- [26] 孟延军, 陈敏. 液压传动 [M]. 1 版. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 102.  
Meng Y J, Chen M. Hydraulic transmission[M]. 1st ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 102.
- [27] 蒋云峰, 许威, 姚其昌. 四足仿生移动平台车载液动力系统设计 [J]. 兵工学报, 2014, 35(1): 80-85.  
Jiang Y F, Xu W, Yao Q C. Design of vehicle-mounted hydraulic power system of bionic quadruped mobile platform[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(1): 80-85.
- [28] Jin T K, Cho J S, Park B Y, et al. Experimental investigation on the design of leg for a hydraulic actuated quadruped robot[C]//International Symposium on Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1-5.
- [29] Wang J, Gao F, Zhang Y. High power density drive system of a novel hydraulic quadruped robot[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferences. New York, USA: ASME, 2014: 1-7.
- [30] Krupp B T, Pratt J E. A power autonomous monopodal robot[C]//Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence Technologies for Homeland Security and Homeland Defense V. 2006. DOI: 10.1117/12.666253.
- [31] Chu Z, Luo J W, Fu Y L. Variable stiffness control and implementation of hydraulic SEA based on virtual spring leg[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 677-682.
- [32] Vanderborght B, Albu-Schaffer A, Bicchi A, et al. Variable impedance actuators: A review[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1601-1614.
- [33] Dominguez G A, Kamezaki M, French M, et al. Development of a backdrivable magnetorheological hydraulic piston for passive and active linear actuation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 6551-6556.
- [34] Dominguez G A, Kamezaki M, French M, et al. Modelling and simulation of a new magnetorheological linear device[C]//IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 235-240.

- [35] Xue Y, Yang J H, Shang J Z, et al. Design and optimization of a new kind of hydraulic cylinder for mobile robots[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(18): 3459-3472.
- [36] Xue Y, Yang J H, Shang J Z, et al. Energy efficient fluid power in autonomous legged robotics based on bionic multi-stage energy supply[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(21): 1445-1457.
- [37] Guglielmino E, Semini C, Yang Y, et al. Energy efficient fluid power in autonomous legged robotics[C]//ASME Dynamic Systems and Control Conference. New York, USA: ASME, 2009: 847-854.
- [38] Guglielmino E, Semini C, Kogler H, et al. Power hydraulics-switched mode control of hydraulic actuation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 3031-3036.
- [39] Zhang J, Xue Y, Yang J H, et al. Mobile robot hydraulic drive energy-saving circuit simulation based on the high-frequency switching valve[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 278(1): 568-575.
- [40] Peng S, Branson D, Guglielmino E, et al. Simulated performance assessment of different digital hydraulic configurations for use on the HyQ leg[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 36-41.
- [41] Al-Kharusi S, Howard D. The design and simulated performance of an energy efficient hydraulic legged robot[M]//Climbing and Walking Robots. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005: 495-501.
- [42] Waldron K J, Vohnout V J, Pery A, et al. Configuration design of the adaptive suspension vehicle[J]. International Journal of Robotics Research, 1984, 3(2): 37-48.
- [43] Kaminaga H, Ono J, Nakashima Y, et al. Development of backdrivable hydraulic joint mechanism for knee joint of humanoid robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1577-1582.
- [44] Kaminaga H, Tanaka H, Yasuda K, et al. Screw pump for electro-hydrostatic actuator that enhances backdrivability[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 434-439.
- [45] Huang J H, Quan L, Zhang X G. Development of a dual-acting axial piston pump for displacement-controlled system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(4): 606-616.
- [46] Cunha T B, Semini C, Guglielmino E, et al. Gain scheduling control for the hydraulic actuation of the HyQ robot leg[C]//ABCMSymposium Series in Mechatronics. [S.l.]: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2010: 673-682.
- [47] Ke X, Lin L, Qing W, et al. Design of single leg foot force controller for hydraulic actuated quadruped robot based on ADRC [C]//Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1228-1233.
- [48] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.  
Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [49] Boaventura T, Buchli J, Semini C, et al. Model-based hydraulic impedance control for dynamic robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1324-1336.
- [50] Focchi M, Guglielmino E, Semini C, et al. Control of a hydraulically-actuated quadruped robot leg[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 4182-4188.
- [51] Bech M M, Andersen T O, Pedersen H C, et al. Experimental evaluation of control strategies for hydraulic servo robot[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 342-347.
- [52] Bu F P, Yao B. Observer based coordinated adaptive robust control of robot manipulators driven by single-rod hydraulic actuators[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 3034-3039.
- [53] Bu F P, Yao B. Desired compensation adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator[C]//American Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2001: 3926-3931.
- [54] Mohanty A, Yao B. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 567-575.
- [55] Mattila J, Koivumaki J, Caldwell D G, et al. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 669-680.
- [56] Semini C, Barasuol V, Boaventura T, et al. Towards versatile legged robots through active impedance control[J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34(7): 1003-1020.
- [57] Boaventura T, Medrano-Cerda G A, Semini C, et al. Stability and performance of the compliance controller of the quadruped robot HyQ[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1458-1464.
- [58] 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.
- [59] Irawan A, Nonami K, Ohroku H, et al. Adaptive impedance control with compliant body balance for hydraulically driven hexapod robot[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2011, 5(5): 893-908.
- [60] Montes H, Armada M. Force control strategies in hydraulically actuated legged robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(2): 50.
- [61] Koivumaki J, Mattila J. Stability-guaranteed force-sensorless contact force/motion control of heavy-duty hydraulic manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(4): 918-935.
- [62] Koivumaki J, Mattila J. Stability-guaranteed impedance control of hydraulic robotic manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 601-612.
- [63] 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 K X, Kong X D, Zhu Q X, 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.
- [64] Yang H Y, Pan M. Engineering research in fluid power: A review[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16(6): 427-442.

- [65] Khan H, Kitano S, Gao Y, et al. Development of a lightweight on-board hydraulic system for a quadruped robot[C]//The Fourteenth Scandinavian International Conference on Fluid Power. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2015: 1-11.
- [66] Raade J M, Amundson K R, Kazerooni H. Development of hydraulic-electric power units for mobile robots[C]//Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2005: 27-34.
- [67] 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.
- [68] Alfayad S, Ouezdou F B, Namoun F, et al. High performance integrated electro-hydraulic actuator for robotics – Part II: Theoretical modelling, simulation, control & comparison with real measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 169(1): 124-132.
- [69] Semini C, Goldsmith J, Manfredi D, et al. Additive manufacturing for agile legged robots with hydraulic actuation[C]//International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 123-129.
- [70] El Asswad M, Tayba A, Abdellatif A, et al. Development of lightweight hydraulic cylinder for humanoid robots applications [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017. DOI: 10.1177/0954406217731794.
- [71] Du C, Plummer A R, Johnston D N. Performance analysis of a new energy-efficient variable supply pressure electro-hydraulic motion control method[J]. Control Engineering Practice, 2017, 60(1): 87-98.
- [72] Guglielmino E, Cannella F, Semini C, et al. A vibration study of a hydraulically-actuated legged machine[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2010: 1077-1083.
- [73] Amundson K, Raade J, Harding N, et al. Development of hybrid hydraulic-electric power units for field and service robots [J]. Advanced Robotics, 2006, 20(9): 1015-1034.
- [74] Yang Y S, Semini C, Guglielmino E, et al. Water vs. oil hydraulic actuation for a robot leg[C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1940-1946.
- [75] Stojanovic V, Nedic N. A nature inspired parameter tuning approach to cascade control for hydraulically driven parallel robot platform[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2016, 168(1): 332-347.
- [76] Wang D, He H B, Liu D R. Adaptive critic nonlinear robust control: A survey[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(10): 3429-3451.
- [77] Lu S M, Li D J. Adaptive neural network control for nonlinear hydraulic servo-system with time-varying state constraints[J]. Complexity, 2017, 2017(8): 1-11.

#### 作者简介:

- 翟 硕 (1994 –), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 电液控制.
- 虞 拯 (1971 –), 男, 学士, 助理工程师. 研究领域: 电液控制, 液压元件.
- 金 波 (1971 –), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机电控制, 智能机器人, 深海机电装备.