

文章编号: 1005-0523(2024)05-0018-11



## 液压机械臂的接触作业控制方法进展

丁孺琦<sup>1,2</sup>, 孙国华<sup>2</sup>, 朱鸿栋<sup>2</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>, 谢志聪<sup>2</sup>, 刘颖<sup>1,2</sup>, 徐聪聪<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学南昌市车辆智能装备与控制重点实验室, 江西 南昌 330013;  
2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**【目的】液压机械臂具备负载能力强、响应速度快、无极调速范围大、受辐射电磁干扰小等特点,被广泛应用于隧道掘进装备、桥梁建设装备等交通基础设施建设领域。文章旨在总结液压机械臂的接触作业控制方法,介绍力与位置精确协调控制方法,最后对其未来的研究方向提出展望。【方法】在实际工程应用中,液压机械臂常常要与外界环境进行接触,而其接触作业控制涉及与位置的精确协调控制,而力与位置的精确控制需要精准的动力学模型和末端力的精准估计。【结果】国内外学者针对力与位置精确协调控制进行深入研究,在实现液压机械臂稳定、准确、安全接触作业取得了一些重要的研究成果。【结论】针对这些成果,阐述了液压机械臂在动力学建模、动力学参数辨识、末端接触力估计方法和柔顺控制等方面的研究内容,并且对下一步的研究提出了建议和展望。

**关键词:** 液压机械臂; 动力学建模; 参数辨识; 力估计方法; 接触作业控制

**中图分类号:** TP242; [U25]

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 丁孺琦, 孙国华, 朱鸿栋, 等. 液压机械臂的接触作业控制方法进展[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 18-28.

## Research Progress on Contact Operation Control Method of the Hydraulic Manipulator

Ding Ruqi<sup>1,2</sup>, Sun Guohua<sup>2</sup>, Zhu Hongdong<sup>2</sup>, Li Gang<sup>1,2</sup>, Xie Zhicong<sup>2</sup>, Liu Ying<sup>1,2</sup>, Xu Congcong<sup>1,2</sup>

(1. Nanchang Key Laboratory of Vehicle Intelligent Equipment and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** 【Objective】The hydraulic manipulator has the characteristics of strong load capacity, fast response speed, wide range of stepless speed regulation, small radiation electromagnetic interference and so on. It is widely used in the construction of transportation infrastructure, such as tunnel boring and bridge construction equipments. This paper aims to summarize the contact operation control methods of hydraulic manipulator, and introduce the precise coordination control methods of force and position, and finally provide an outlook on future research directions. 【Method】In practical engineering applications, the hydraulic manipulator often has contact with the external environment, and its contact operation control involves the precise coordinated control of force and position. However, the precise control of force and position requires an accurate dynamic model and accurate estimation of terminal force. 【Result】Both domestic and international scholars have conducted in-depth research on the precise coordination control of force and position, achieving significant results in ensuring stable, accurate, and safe contact operations of hydraulic robotic arms. 【Conclusion】Based on these achievements, this

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175050); 江西省重大科技研发专项(20233AAE02001); 江西省研究生创新专项资金(YC2024-S421)

paper describes the hydraulic manipulator dynamics modeling, dynamics parameter identification, end contact force estimation methods, and compliance control. Furthermore, it put forward suggestions and prospects for research.

**Key words:** hydraulic manipulator; dynamics modeling; parameter identification; force estimation method; contact operation control

**Citation format:** DING R Q, SUN G H, ZHU H D, et al. Research progress on contact operation control method of the hydraulic manipulator[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 18–28.

**【研究意义】**随着经济的发展和工业化水平的提升,机械臂在工业生产中得到了广泛应用,能够替代人类在重复性生产线及危险环境中工作,从而确保工作任务的顺利完成并保障人身安全<sup>[1-2]</sup>。随着各国研究人员对机械臂技术的深入研究,越来越多高性能的机械臂逐步应用于交通基础设施建设领域,如隧道掘进<sup>[3]</sup>、桥梁建设<sup>[4]</sup>、道路维护<sup>[5]</sup>等方面。被用于上述交通基础设施领域作业的机械臂通常工作在较为复杂的接触环境下,进而机械臂需要具备高效率、高负载、高精度的作业能力,与工业机器人相比,液压机械臂负载能力高、反应速度快、无极调速范围大<sup>[6]</sup>、受辐射电磁干扰小等特点,满足交通基础设施作业的环境。研究液压机械臂的接触作业控制方法,有助于提升其在实际应用中的操作精度和安全性,推动相关技术的创新与发展。

**【研究进展】**国内外学者对液压机械臂接触作业控制方法进行了深入研究,在动力学建模、力估计、力位混合控制和柔顺控制等方面取得了一些重要的研究成果。对于液压机械臂而言,由于其工作环境复杂且接触作业的负载大,末端力传感器很容易受到破坏,不仅影响力反馈效果,甚至大多情况根本无法安装力传感器。与末端力传感器相比,执行器容腔压力传感器安装方便、价格低廉、测量范围广、耐久性高,满足了液压机械臂在复杂环境下进行施工作业的实用性要求<sup>[7]</sup>。使用执行器容腔压力传感器代替末端力传感器间接测量末端负载已成为一种高效且经济的解决方案。当前,液压机械臂如何在无末端力传感器的情况下,通过液体压力传感器的反馈实现精确的末端力估计,是液压机械臂领域的研究热点。液压机械臂末端接触力估计方法本质上是以机械臂动力学模型为基础,通过液压缸压力传感器的反馈估计末端负载<sup>[8]</sup>。机械臂动力学模型的精确性对末端接触力估计的

准确度具有直接影响<sup>[9]</sup>,而影响机械臂动力学模型准确性的最主要因素是机械臂动力学参数。

**【创新特色】**当前液压机械臂的接触作业控制呈现出智能化、精确化和高效化的发展趋势,结合先进的控制算法、传感器融合技术等手段,液压机械臂在复杂作业环境中的表现越来越优异。**【关键问题】**综上所述,为了更系统地了解液压机械臂接触作业控制方法的研究过程,基于国内外取得的科研成果,本文从液压机械臂的研究现状、液压机械臂的动力学建模方法、动力学参数辨识方法、末端接触力估计方法和柔顺控制方法5个方面进行相对完整的阐述,并对后续研究提出了相关展望。

## 1 液压机械臂的研究现状

世界上第一条液压机械臂诞生于20世纪40年代,由美国橡树岭国家实验室研制,用于对核材料的搬运<sup>[10]</sup>。在此之后,各国科研人员对机械臂进行深入研究,经众多研究学者多年创新和发展,不仅给机械臂加上移动装置如轮式机械臂和履带式机械臂等,而且通过优化机械臂结构,使其末端可以更换多种属具以适用各种工作环境。这使得液压机械臂具有更高的机动性、适用性和灵活性,为液压机械臂在各领域的广泛应用提供了条件。

### 1.1 隧矿掘进液压机械臂

在隧矿掘进领域,液压机械臂主要应用在深孔钻探、地质勘探等方面。在1970年由法国Montabert公司研制出第一台应用于隧矿掘进领域的液压机械臂;而后,挪威的Furholmen公司于1978年研发出由微机控制的全自动凿岩台车<sup>[11]</sup>。

与国外相比,国内针对凿岩台车的研究开展于20世纪70年代左右,直到80年代,我国第一台CGJ2Y型和YYG80型液压凿岩台车才研制成功<sup>[12]</sup>。2001年,国内成功研制出首台由计算机控制

的凿岩台车,其技术水平达到了当时的国际先进水平;2016年,铁建重工集团研发出了我国首台全电脑三臂凿岩台车 ZYS113;2020年,铁建重工集团又在上海宝马工程机械展上推出了国内首台全电脑四臂凿岩台车 ZYS134<sup>[13]</sup>。在性能方面,与目前市场上广泛应用的三臂凿岩台车相比,四臂凿岩台车的打孔作业宽度可达到 17.6 m,作业高度可达到 13.4 m,相当于两台三臂凿岩台车同时作业的效果。

### 1.2 桥梁建设液压机械臂

在桥梁建设领域,液压机械臂主要用于桥梁检测,高空作业,碎石挖土。2002年,徐工集团研发出 QJ12型桥梁检测车,该设备能够将检测人员和设备从桥面运送至桥梁下方的弧形区域,对桥梁结构进行健康检查和维修,标志着我国桥梁检测技术的显著提升<sup>[14]</sup>。在高空作业方面,使用液压机械臂作业平台配合可移动作业车,搭载工作人员进行高空作业时可有效提高作业效率、减少风险<sup>[15]</sup>。在碎石挖土等方面,通过改变液压机械臂前端属具,例如:抓斗、挖斗、液压破碎锤等,可以完成不同工况作业要求<sup>[16]</sup>。

### 1.3 道路维护液压机械臂

在交通领域,机械臂被应用于道路清障、标记喷涂、绿化修建等各种道路维护工作。20世纪80年代初,美国福特公司率先研发出防撞护栏清洗设备。随后,德国推出了全液压驱动的穆迪卡(Multicar)多功能养车。这款车辆的主要特点是采用液压液力传动系统,使工作装置能够方便地进出作业区域,且工作臂的变幅操作简单易行,具备良好的作业效果。目前,我国的山西太旧高速和河北京石高速部分引进了该设备<sup>[17]</sup>。

国内对道路维护液压机械臂研究起步较晚,但近些年发展迅速。2011年10月14日国内首台多功能清障救援车在北京交通部公路交通试验场顺利通过验收;2021年5月华东交通大学主导研发的国内首台“不中断交通隧道维养台车”在武吉高速九岭山隧道养护作业中落地应用,完成了该段隧道的一体维护保养;2024年5月柳工研发出全国首台多功能路面挖掘机,这台多功能养护挖掘机以柳工 W915E轮挖为主体,集铣刨、破碎、清扫、装料、卸料功能于一体<sup>[17]</sup>。

## 2 液压机械臂动力学建模方法

无末端力传感器的液压机械臂末端接触力估计方法,其核心是通过机械臂动力学模型估计末端力大小的过程。因此,建立机械臂的动力学模型是实现末端接触力估计的关键步骤。

机械臂的动力学模型主要用于描述关节驱动力矩与机械臂运动之间的相互关系,通常分为正动力学和逆动力学两类<sup>[18]</sup>。正动力学是在已知驱动力矩的情况下对机械臂的运动特性进行分析;逆动力学则是根据已知的机械臂运动特性来求解所需的驱动力矩。液压机械臂动力学模型的构建主要涉及对关节驱动力矩、惯性力矩、科氏-向心力矩、重力矩以及摩擦力矩的分析,如图1所示。

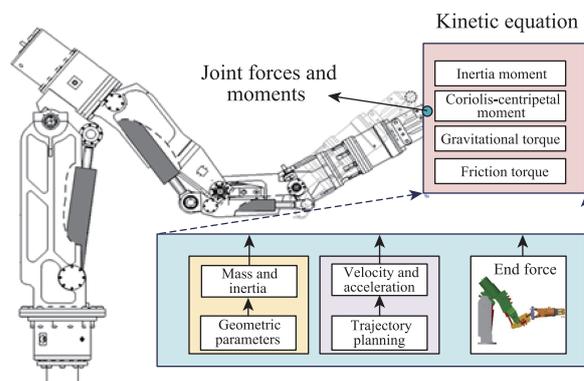


图1 机械臂的动力学研究

Fig.1 Research of dynamics of manipulator

建立机械臂动力学模型的主要方法包括 Newton-Euler法和 Lagrange法。Newton-Euler法<sup>[19]</sup>是一种基于牛顿方程和欧拉方程的迭代动力学建模方法。牛顿方程用于描述平移刚体的质量、质心加速度与外力之间的关系,而欧拉方程则用于描述旋转刚体的角度、角速度、角加速度、惯性张量与所受力矩之间的关系。虽然 Newton-Euler法物理直观性强,易于处理非保守力和力矩等优点,但在处理多体复杂系统时,由于方程数量多,导致其计算复杂。Lagrange法<sup>[20]</sup>是一种基于系统做功和能量交换的动力学建模方法,该方法需要计算机械臂在运动过程中的动能和势能,表达式为

$$L(q, \dot{q}, t) = T - U \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (2)$$

式中: $L$ 为 Lagrange函数; $q$ 为角度的广义坐标; $\dot{q}$ 为

角速度; $t$ 为取样时间; $T$ 为动能; $U$ 为势能; $q_i$ 为第*i*个关节角度; $\dot{q}_i$ 为第*i*个关节角速度。

与Newton-Euler法相比,它可以避免内部刚体之间的相互作用力,因其灵活性和统一的方程形式具有显著优势,但Lagrange法通常会生成较多的高阶非线性微分方程,这些方程往往难以解析求解,需要依赖数值方法,这增加了计算量和复杂度。

基于上述两种方法,为了进一步优化动力学模型的构建,简化多刚体和复杂系统的计算量和复杂度,国内外很多学者进行研究,提出了Roberson-Wittenburg法<sup>[21]</sup>、Kane法<sup>[22-24]</sup>等多体系统动力学研究方法。RW法在复杂多刚体系统中的适用性、递推算法的高效性、对约束条件的自然处理以及减少冗余变量方面具有显著优势。Kane法通过引入广义速度和广义力的概念,将复杂的动力学方程简化为线性形式。相比于传统的Newton-Euler法或Lagrange法,Kane法能够使最终的运动方程更加简洁,显著降低了方程的复杂性和冗余计算。

### 3 液压机械臂动力学参数辨识

#### 3.1 参数辨识方法

机械臂动力学参数包括各杆件的质量、质心位置、转动惯量和摩擦系数。通过动力学参数辨识,可以有效获取这些参数并构建机械臂的动力学模型,进而建立末端接触力估计模型,实现液压机械臂对末端接触力的精确感知。机械臂常见的动力学参数辨识方法包括解体测量法<sup>[25]</sup>、计算机辅助设计(computer aided design, CAD)法<sup>[26]</sup>、最小二乘法<sup>[27]</sup>、极大似然法<sup>[28]</sup>和神经网络辨识法<sup>[29]</sup>等。

解体测量法就是将机械臂进行拆解,分别测量各杆件的结构参数和动力学参数。结构参数可直接进行实体测量,动力学参数中各杆件的质量可以直接测量,各杆件的质心位置可以通过估计各杆件的平衡点进行确定,惯性张量可以使用专业的测量仪器通过钟摆运动进行测量。如刘正士等<sup>[30]</sup>使用解体测量法获取机械臂动力学参数,分解各连杆测量其结构参数,并根据连杆材料以及钟摆运动计算连杆的动力学参数。该方法的优点是无需设计复杂的数据采集系统以及参数辨识算法,便可以直接测量出机械臂的结构参数和动力学参数的独立值;缺点是测量过程十分繁琐,需要准备特殊的测量设备。

CAD法利用机器人的CAD模型,根据材质类型及几何形状,通过计算机软件辅助,在机械臂的三维模型中自动计算或理论推导出机械臂的动力学参数,粗略估计机器人动力学参数值。如王树新<sup>[31]</sup>等人采用CAD法测量机械臂动力学参数。与解体测量法相比,该方法的测量过程更加简便,且能够更容易获得独立的机械臂动力学参数。但是该方法同样未考虑摩擦力因素,且测量动力学参数是理论值,与真实的动力学参数有一定的误差。

采用极大似然法对动力学参数进行估计需要求解观测矩阵的出现率,计算繁琐。相比于极大似然法,最小二乘法计算量小、辨识精度高<sup>[32-33]</sup>,是目前参数辨识的常用方法。对于*n*自由度刚性液压机械臂,其动力学方程式为。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{M}(q) \ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\dot{\boldsymbol{q}}, q) \dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(q) + \boldsymbol{f}(\dot{\boldsymbol{q}}, q) \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为驱动关节的力矩,矢量; $\boldsymbol{M}$ ,  $\boldsymbol{C}$ ,  $\boldsymbol{G}$ 分别为关节的惯性矩阵,科氏力矩阵,重力矩阵; $\ddot{\boldsymbol{q}}$ 为关节角加速度; $\boldsymbol{f}$ 为摩擦力矩,矢量。

参数主要由 $\boldsymbol{M}$ 、 $\boldsymbol{C}$ 、 $\boldsymbol{G}$ 矩阵组成<sup>[34-35]</sup>,因此其辨识的动力学参数多为组合值,很难测量机械臂独立的动力学参数,如惯性矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的各个元素可能是各部分的质量 $m_i$ 、长度 $l_i$ 和质心位置 $r_i$ 的惯性参数组合。在科氏力矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中,其元素可能是 $q_i$ 和 $\dot{q}_i$ 的复杂组合。然而,这并不影响所辨识的动力学参数在提升机械臂动力学模型精度方面的效果。徐建明等<sup>[36]</sup>使用该方法辨识ZCR07S工业机器人动力学参数,首先使机械臂运行一条激励轨迹并采集实验数据,然后通过该方法估计机械臂动力学参数。严峻等<sup>[37]</sup>采用Lagrange法建立了挖掘机斗杆和铲斗的二自由度动力学模型,并通过递推最小二乘法对模型中的未知动力学参数进行了辨识。

在摩擦力辨识方面,Wu等<sup>[38]</sup>提出了一种基于力传感器的机器人动力学模型和关节摩擦力识别方法,使用不同的摩擦模型对分离出的摩擦力进行拟合,其中LuGre摩擦模型(Lund-Grenoble friction model)能够很好地捕捉迟滞效应,对低速时的摩擦力拟合效果更好。该模型的形式为不需要预先假设摩擦模型,从而提高了模型识别的精度。而Ding等<sup>[39]</sup>提出了一个能够精确解耦多自由度工业机器人各刚体动态参数的多体动力学模型,为动态参数辨识提供了坚实的理论基础。为了更好地对动态参数进行精确辨识,Fang等<sup>[40-41]</sup>利用神经网络

络模型非线性的逼近能力,引入径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络来估计控制器中涉及的模型信息部分,以提高系统对不确定性的抵抗力;以及通过双层控制结构,将期望的接触力转化为精确的位置轨迹,从而实现机械臂与目标的柔顺接触,并有效减少接触力对系统稳定性的影响。

### 3.2 激励轨迹设计方法

为了提高参数辨识的精度并获得更为真实的动力学参数,必须设计合适的激励轨迹<sup>[42-43]</sup>。激励轨迹的设计是机械臂动力学参数辨识中的关键环节,其性能好坏直接影响参数辨识的准确性,进而影响机械臂末端接触力的估计精度。

Deng等<sup>[44]</sup>在关节空间内,以五次多项式设计激励轨迹,但这种激励轨迹无周期特性,无周期性的激励轨迹无法使机械臂多次重复运动,难以充分激励其动力学特性。Van等<sup>[45]</sup>采用B样条插值算法规划激励轨迹,但低次B样条基函数容易导致加速度不平滑产生波动,而高次B样条基函数计算量大。利用有限傅里叶级数的周期性特性,机械臂可以多次重复执行激励轨迹,这不仅能够充分激发机械臂的动力学特性,还能避免加速度不平滑的现象。因此,基于有限傅里叶级数的激励轨迹生成方法常用于参数辨识。吴文祥等<sup>[46]</sup>和Neubauer等<sup>[47]</sup>总结前面研究经验,以有限傅里叶级数为模型,以回归矩阵条件<sup>[48]</sup>数最小为目标,关节角度、角速度和角加速的安全值为约束条件,可设计一条平滑、有效的激励轨迹。

## 4 液压机械臂末端接触力估计方法

液压机械臂良好的力控制能力,需要精确的力反馈<sup>[49]</sup>。因此,建立精确的力反馈系统是液压机械臂在各个领域精细化作业的必备条件<sup>[50-51]</sup>。目前无论是工业机器人还是液压机械臂领域,研究人员对其末端接触力估计方法的研究正处于初始阶段,尤其在国内这方面的研究更少。本文依次阐述现有的工业机器人和液压机械臂的末端接触力估计方法,为今后机械臂末端接触力估计的研究提供理论参考。

关于工业机器人的末端接触力估计,Tran等<sup>[52]</sup>提出了一种基于机械臂动力学模型的末端力估计方法,通过CAD法在机械臂三维模型中测量其动力学参数,并使用此参数建立动力学模型。用雅

可比矩阵将机械臂末端受力转换至各关节,通过各关节驱动力矩的变化计算末端力。Li等<sup>[53]</sup>基于Newton-Euler法,建立了机器人动力学模型,通过该模型计算机器人的反作用力和扭矩。利用比较测得的反作用力与估算的动态力,计算出外部施加在机器人的碰撞力,由于所提出的碰撞检测方法无需额外传感器,既能确保碰撞安全,又能准确估计末端执行器的接触力,因此具有实用性和经济性。针对建模中的不确定性和外部扰动,Sebastian等<sup>[54]</sup>通过设计扩张状态观测器实现了对外部作用力的精准估计。杜艳丽等<sup>[55]</sup>则采用神经网络黑箱建模的方法,构建了力估计模型,虽然该方法不依赖于机械臂的具体动力学模型,然而,所建立的模型具有针对性,仅适用于特定的机械臂设计,因而缺乏通用性。

关于液压机械臂末端接触力的估计方法,江来<sup>[56]</sup>研究了平面三自由度重载机械臂的末端接触力估计问题,通过Lagrange法建立了机械臂的动力学模型,并采用CAD法对机械臂的动力学参数进行了辨识,由于CAD法无法测量液压机械臂的摩擦特性,因此本方法并未考虑摩擦力的影响。其通过吊重物和压弹簧的形式实现了末端恒力和变力负载的施加,最大力估计误差为8.6%。Sun等<sup>[57]</sup>提出了一个创新的控制框架,结合了自适应质量估计、压力传感器的接触力估算以及虚拟分解控制,以实现液压双臂机械手在复杂任务中的精确运动和力控制。这种方法适用于操作不确定质量的物体,能够有效应对液压系统的非线性和动态变化,与传统位置控制对比,最大位置误差在 $x$ 轴和 $z$ 轴分别减少了28%和59%,力误差在 $x$ 轴和 $z$ 轴分别减少了61%和70%。

传统的液压机械臂通常是闭链结构来产生旋转运动,这种结构的复杂性和耦合特性使得建立精确的动态模型和实现高精度控制变得极为困难,Koivumki等<sup>[7]</sup>提出的控制方法基于虚拟分解控制理论,解决了多自由度液压操纵器的动态非线性问题。通过使用液压缸的压力数据估算末端执行器的接触力,其压力传感器控制策略不仅降低了硬件成本,还在重载作业环境中表现出高度的稳定性和精度。在此基础上,Shen等<sup>[58]</sup>引入虚拟等效旋转关节的概念,进行“液-固”解耦分离,如图2所示。并进行分层解耦控制器的设计,基于分离模型和解耦控制策略,提出的控制方法能够在没有力传感器的情况下,实现对接触力的估计和精确控制。在实际

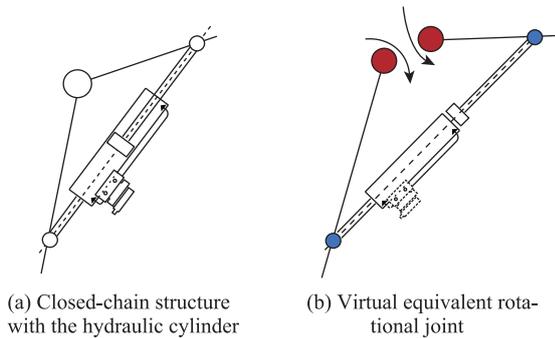


图2 液压关节与分离缸虚拟分解方案

Fig.2 Decoupling scheme of the hydraulic joint with the separated cylinder

工况中,液压机械臂的工作环境复杂,通常要进行多臂协同操作,传统的控制方法难以实现多臂协同操作的末端接触力精确估计。Tahamipour等<sup>[59-60]</sup>提出了一种结合虚拟分解控制和自适应阻抗控制的分布式控制框架,并集成了鲁棒模型预测控制。这种方法能够通过分布式控制方式,使多个不同的机械臂在执行共同任务时实现精确的协调控制,尤其是在遇到不确定性和外界干扰的复杂环境下,保证系统的稳定性和高效性。

Kamezaki等<sup>[61]</sup>以三自由液压机械臂为研究对象,在上述力估计方法的基础上,结合数据滤波技术对机械臂末端接触力进行处理。通过融合多个传感器的数据,有效消除了液压缸腔压力测量中的不确定性,提出了一种适用于液压机械臂抓取作业的精准抓取过程控制和物体质量动态估计的方法。然而,由于CAD法无法获取精确的动力学参数,仍在一定程度上影响了末端接触力的估计性能。在825 N的最大负载下,力估计误差为4.4%。Renner等<sup>[62]</sup>以三自由度挖掘机为研究对象,将其动力学模型线性化处理,表示成回归矩阵和动力学参数集的线性形式,同时,将末端负载合并到动力学参数集中,采用递推最小二乘法在线辨识挖掘机的动力学参数及末端铲斗内物体的质量。该方法显著提升了力估计的精度,力估计误差可控制在3%左右。由于参数辨识方法仅能识别恒定负载,因此本方法仅适用于对末端物体质量的估计,对动态多变化的末端接触力估计并不适用。

## 5 液压机械臂柔顺控制方法

主动柔顺控制是在不借助柔顺元件的情况下对交互力控制的方法,该方法可通过实际接触力与

期望力之间的误差实时调整末端位置,为了满足环境约束或力约束条件,现有的液压机械臂主动柔顺控制策略主要包括力位混合控制和阻抗控制两种方式。

液压机械臂的力位混合控制方法是在工业机械臂控制方法的基础上逐步发展而来的,1981年,麻省理工学院的Matthew等<sup>[63]</sup>提出了一种将机械臂末端的在各个关节上分别施加期望位置和期望力的柔顺控制方法,这就是最初的力/位置控制模型。基于此,Raibert等<sup>[64]</sup>对模型进行了改进,进一步完善了该理论。他们提出了一种任务导向的策略,将关节分成两大部分,将一部分关节施加位置控制,另一部分关节施加力控制,从而使机械臂末端的接触力和位置达到了分离控制的效果,形成了力位混合控制。Navvabi等<sup>[65]</sup>提出了一种针对并联液压机械臂的力位混合控制方法,有效克服了系统不确定性,提升了力控制的精度。Li等<sup>[66]</sup>提出了一种用于液压重载机械臂的柔顺控制/力位混合控制算法。

阻抗控制是一种二阶柔顺控制算法,通过建立合适的阻抗函数来调整机械臂末端的位置或接触力。其原理是将实际与期望的力偏差或位置偏差作为输入量,通过调节阻抗参数并输出位置或力的修正量,以满足环境的力约束或位置约束。目前关于液压机械臂的阻抗控制方法研究较少,Ding等<sup>[67]</sup>在外环阻抗控制回路基础上设计了自适应力误差补偿回路,通过额外的位置修正,以适应不确定的接触环境。在不确定的柔性环境下接触刚度为3 400,8 000 N/m的弹簧时,该方法在稳定阶段的力跟踪误差减小了约40 N,显著提高了稳定性。在不确定的刚性环境下,该方法在接触瞬间的冲击更小,力控制平均误差由110 N降低至55 N,力跟踪精度提高了50%。Boaventura等<sup>[68]</sup>和Ba等<sup>[69]</sup>基于液压足式机器人提出了基于模型的阻抗控制方法,前者研究了执行器带宽对闭环力控制器稳定性的影响,后者设计了一种考虑负载特性和液压系统非线性的可变阻抗参数控制器。为了解决液压系统引入的复杂非线性动力学问题,Lee等<sup>[70-71]</sup>利用压力控制阀或电动静液压执行器来操纵两自由度机器人。陈光荣等<sup>[72-73]</sup>研究了位置型阻抗控制的液压足式机器人主动柔顺控制方法。为了应对环境位置的突变,Truong等<sup>[74]</sup>研究了一种基于虚拟能量罐的阻抗控制方法,以避免与环境失去接触,保证液压机械

臂安全的交互控制。

上述学者研究的柔顺控制策略将内环控制系统作为相对理想的系统,其采用的控制策略及相应的优化方法大都针对外环力控制器,而忽略了内环控制系统的柔性。为此,巴凯先等<sup>[75-77]</sup>面向足式机器人的液压驱动单元,深入地研究了其阻抗控制机理,并提出了液压驱动单元基于内环刚度补偿阻抗控制策略。

## 6 结语

1) 目前关于机械臂动力参数辨识的研究比较成熟,可将更多优秀的参数辨识算法应用到机械臂末端接触力估计中,提升末端力估计精度。

2) 液压机械臂末端接触力的估计方法仅在二自由度和三自由度的液压机械臂中得以实现,作业能力较为有限。未来的研究可以在此基础上,针对更多自由度的液压机械臂展开研究,从而提升液压机械臂的作业能力。

3) 高精度的末端接触力估计能力是液压机械臂研究的基础,为实现液压机械臂在复杂环境下的精细化作业的能力,要求其在大负载作业时仍具有较好的柔顺性。因此,需要在精确力估计的基础上,设计其力/位控制、阻抗控制算法,实现其高精度控制能力,这将需要一个长期的研究过程。

4) 机械臂的柔顺控制方法是指通过控制机械臂的刚性和柔性来实现对物体的精准操作,提高机械臂与环境的适应性和安全性。柔顺控制需要准确感知机械臂和环境的力、力矩等信息,但目前传感器的测量精度和响应速度仍然有限,影响着柔顺控制的精度和稳定性。此外,建模误差和环境的变化,也可能无法准确描述实际情况,从而影响柔顺控制的效果。尽管存在一些局限性,但随着传感器技术和控制算法的不断进步,机械臂的柔顺控制方法有望在未来得到进一步改进和应用。

### 参考文献:

- [1] 李颖奇. 基于ROS的六轴机械臂避障路径规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.  
LI Y Q. Research on obstacle avoidance path planning of six-axis robotic arm based on ROS[J]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [2] 徐尤南, 刘志强, 陈洁. 基于粒子群算法的码垛机器人时间轨迹优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 75-81.
- [3] 何禹帆, 罗红波, 林智秋, 等. 凿岩台车多关节机械臂的液压系统设计与仿真分析[J]. 机械, 2022, 49(5): 14-21.  
HE Y F, LUO H B, LIN Z Q, et al. Design and simulation analysis of multi-joint mechanical arm hydraulic system of rock drilling trolley[J]. Machinery, 2022, 49(5): 14-21.
- [4] 杜文龙. 桥梁检测轻质长臂机器人设计与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.  
DU W L. Design and analysis of lightweight long arm robot for bridge detection[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [5] 罗天洪, 唐果, 马翔宇, 等. 高速公路绿篱修剪机器人手臂避障路径规划[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 134-142.  
LUO T H, TANG G, MA X Y, et al. Obstacle avoidance path planning for expressway hedgerow pruning robot manipulator[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(1): 134-142.
- [6] 程贤福. 机械设备液压系统的污染分析与控制[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(4): 85-87.  
CHENG X F. Analysis and control of hydraulic system pollution for machinery[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2003, 20(4): 85-87.
- [7] KOIVUMKI 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.
- [8] KAMEZAKI M, IWATA H, SUGANO S. Condition-based less-error data selection for robust and accurate mass measurement in large-scale hydraulic manipulators [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1820-1830.
- [9] 詹伟杰. 基于虚拟分解控制的混联重载液压臂高精度运动控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
ZHAN W J. Research on high-precision motion control method of hybrid heavy-duty hydraulic manipulator based on virtual decomposition control[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [10] 王琪, 闵华松. 双臂机器人的协调控制算法综述[J]. 计

- 计算机工程与应用, 2021, 57(1): 1-16.
- WANG Q, MIN H S. Review of coordinated control algorithms for dual-arm robots[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(1): 1-16.
- [11] 魏秀. 液压凿岩台车钻孔定位系统技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- WEI X. Research on drilling and positioning system technology of hydraulic rock drilling trolley[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [12] 毛马杰. 液压凿岩台车钻臂动力学及有限元仿真分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- MAO M J. Dynamics and finite element simulation analysis of hydraulic drilling jumbo arm[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [13] 顾孟豪. 凿岩台车钻孔系统设计与钻臂运动控制仿真研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
- GU M H. Research on design of drilling system for rock drilling jumbo and simulation of drill arm motion control [D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- [14] 吴启. 车载式桥梁自动检测机械臂的结构仿真与优化研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- WU Q. The structural simulation and optimization research on automatic detection arm of vehicle-mounted bridge structure[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [15] 杨鹏. 伸缩臂式高空作业车工作装置结构有限元分析及优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- YANG P. Finite element analysis and optimization of working device structure of telescopic aerial vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [16] 覃艳明. 液压凿岩机器人机械臂轨迹规划及跟踪控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- QIN Y M. Research on trajectory planning and tracking control of hydraulic rock drilling robot manipulator[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [17] 白旺旺. 高速公路波形防撞护栏清洗装置的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2013.
- BAI W W. Research of highway wavy and crash guard-rail cleaning device[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2013.
- [18] 宋少华. 七自由度机械臂动力学建模与轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- SONG S H. Research on dynamic modeling and trajectory planning of 7-DOF redundant manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [19] HU M, YANG X, DONG H. Constrained fixed-time terminal sliding-mode control with prescribed performance for space manipulator system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(1): 1074-1090.
- [20] LEE T S, ALANDOLI E A. A critical review of modeling methods for flexible and rigid link manipulators[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42: 1-14.
- [21] 李端玲, 刘瑞雪. 基于Roberson-Wittenburg方法的变胞机构动力学研究[J]. *新型工业化*, 2013, 3(12): 1-8.
- LI R L, LIU R X. Dynamic research of metamorphic mechanism based on Roberson-Wittenburg method[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2013, 3(12): 1-8.
- [22] ENFERADI J, JAFARI K. A Kane's based algorithm for closed-form dynamic analysis of a new design of a 3RSS-S spherical parallel manipulator[J]. *Multibody System Dynamics*, 2020, 49(4): 377-394.
- [23] SCUTARU M L, VLASE S. Two-dimensional equivalent models in the analysis of a multibody elastic system using the finite element analysis[J]. *Mathematics*, 2023, 11(19): 4149.
- [24] VLASE S, MARIN M, ÖCHSNER A, et al. Equivalent analytical formulation-based multibody elastic system analysis using one-dimensional finite elements[J]. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2024, 36(1): 197-215.
- [25] 庄未, 刘晓平, 孙汉旭. 基于惯性测量单元的欠驱动球形机器人惯性参数辨识[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(4): 1119-1125.
- ZHUANG W, LIU X P, SUN H X. Method for identifying inertial parameters of underactuated spherical robot based on inertial measurement unit[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(4): 1119-1125.
- [26] 崔闯闯. 并联机器人的动力学参数辨识及前馈控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- CUI C C. Research on dynamic parameter identification and feedforward control of parallel manipulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [27] ZHANG J, ZHANG F, CHENG M, et al. Parameter identification of hydraulic manipulators considering physical feasibility and control stability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 71(1): 718-728.
- [28] FU Z, PAN J, SPYRAKOS P E, et al. A lie-theory-based

- dynamic parameter identification methodology for serial manipulators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 26(5): 2688-2699.
- [29] 庞爱民, 王振, 马双宝. 柔性机械臂自适应神经网络反演控制[J]. *机械设计与制造*, 2024(6): 309-314.  
PANG A M, WANG Z, MA S B. Adaptive control of flexible manipulators based on neural network and backstepping[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024 (6): 309-314.
- [30] 刘正士, 陈恩伟, 干方建. 机器人惯性参数辨识的若干方法及进展[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(9): 998-1003.  
LIU Z S, CHEN E W, GAN F J. Review of some methods for identifying inertial parameters of robots and their development[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2005, 28(9): 998-1003.
- [31] 王树新, 张海根, 黄铁球. 机器人动力学参数辨识方法的研究[J]. *机械工程学报*, 1999(1): 23-26.  
WANG S X, ZHANG H G, HANG T Q. Study on dynamic parameter identification method of robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1999(1): 23-26.
- [32] 袁伟明. 机械臂运动学参数标定研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.  
YUAN J M. Research on calibration of kinematic parameters of manipulators[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2003.
- [33] 张明明. 基于最小二乘法优化的柔性机械臂自抗扰控制方法[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(9): 66-68.  
ZHANG M M. Active disturbance rejection optimization control of flexible manipulator based on least square method[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(9): 66-68.
- [34] JIA Y, JIA Y, SUN Q, et al. Adaptive coordinated control for space manipulators with input saturation[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2023, 360(16): 12247-12279.
- [35] WANG Y, DEHIO N, KHEDDAR A. On inverse inertia matrix and contact-force model for robotic manipulators at normal impacts[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 3648-3655.
- [36] 徐建明, 赵帅. 工业机器人动力学参数辨识与自适应控制方法研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(4): 375-383.  
XU J M, ZHAO S. Research on dynamic parameter identification and adaptive control method of industrial robot [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(4): 375-383.
- [37] 严骏, 黎波, 郭刚, 等. 液压挖掘臂二自由度动力学参数辨识[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 17-21.  
YAN J, LI B, GUO G, et al. 2-DOF dynamic parameters identification for hydraulic excavator arm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural*, 2013, 44 (2): 17-21.
- [38] WU J H, LI W, XIONG Z H. Identification of robot dynamic model and joint frictions using a baseplate force sensor[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(1): 30-40.
- [39] DING Y D, BAI C, WU H T. An identification method of industrial robot's dynamic parameters[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2015, 43(3): 49-56.
- [40] FANG Q, MAO P. Compliant contact force control for aerial manipulator of adaptive neural network-based robust control[J]. *Sensors*, 2024, 24(8): 2556.
- [41] LI S, NGUYEN A T, GUERRA T M, et al. Reduced-order model based dynamic tracking for soft manipulators: Data-driven LPV modeling, control design and experimental results[J]. *Control Engineering Practice*, 2023, 138: 105618.
- [42] ARTEAGA M A. On the exact parameter estimation for robot manipulators without persistence of excitation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 69(1): 410-417.
- [43] ZHU B, LI C, WU Z, et al. A double-beam piezoelectric robot based on the principle of two-mode excitation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 369: 115154.
- [44] DENG Q, LUO Z, ZHANG L, et al. Study on energy consumption model and its optimization algorithm for spot welding robot trajectory[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(1):14-20.
- [45] VAN L W, PIPELEERS G, SWEVERERS J. B-spline parameterized optimal motion trajectories for robotic systems with guaranteed constraint satisfaction[J]. *Mechanical Sciences*, 2015, 6(2): 163-171.
- [46] 吴文祥, 朱世强, 靳兴来. 基于改进傅里叶级数的机器人动力学参数辨识[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47 (2): 231-237.  
WU W X, ZHU S Q, JIN X L. Dynamic identification for robot manipulators based on modified Fourier Series [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(2): 231-237.

- [47] NEUBAUER M, GATTRINGER H, BREMER H. A persistent method for parameter identification of a seven-axes manipulator[J]. *Robotica*, 2015, 33(5): 1099-1112.
- [48] GAO Z, LI Y, LUO Y, et al. Tool center point calibration via posture-sequence particle swarm optimization[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(3): 3513-3522.
- [49] 陈行喜. 重载液压机械臂高精度轨迹跟踪与力反馈遥操作控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
CHEN X X. Research on high precision trajectory tracking and force feedback teleoperation control of heavy-duty hydraulic manipulator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [50] ROVEDA L, PIGA D. Sensorless environment stiffness and interaction force estimation for impedance control tuning in robotized interaction tasks[J]. *Autonomous Robots*, 2021, 45(4): 1-18.
- [51] SUN B L, CHENG M, DING R Q, et al. Compliance motion control of the hydraulic dual-arm manipulator with adaptive mass estimation of unknown object[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2024, 19(1): 7.
- [52] TRAN C, TRIVEDI M M. 3-D posture and gesture recognition for interactivity in smart spaces[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 178-187.
- [53] LI W, HAN Y, WU J, et al. Collision detection of robots based on a force/torque sensor at the bedplate[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(5): 2565-2573.
- [54] SEBASTIAN G, LI Z, CROCHER V, et al. Interaction force estimation using extended state observers: An application to impedance-based assistive and rehabilitation robotics[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1156-1161.
- [55] 杜艳丽, 贾雁飞, 赵莹, 等. 基于软测量的可重构模块机器人分散力/位置控制[J]. *机床与液压*, 2019, 47(15): 6-10.  
DU Y L, JIA Y F, ZHAO Y, et al. Decentralized force/position control for reconfigurable modular robot based on soft sensor[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(15): 6-10.
- [56] 江来. 液压重载机械臂接触作业的主动柔顺控制研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.  
JIANG L. Research on active compliant control of hydraulic heavy-duty manipulator contact operation[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [57] SUN B L, CHENG M, DING R Q, et al. Compliance motion control of the hydraulic dual-arm manipulator with adaptive mass estimation of unknown object[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2024, 19(1): 7.
- [58] SHEN J, ZHANG J, ZONG H, et al. Hierarchical decoupling controller with cylinder separated model of hydraulic manipulators for contact force/motion control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 28(2): 1081-1092.
- [59] TAHAMIPOUR Z S M, MATTILA J. Distributed impedance control of coordinated dissimilar upper-limb exoskeleton arms[J]. *Control Engineering Practice*, 2024, 142: 105753.
- [60] HEJRATI M, MATTILA J. Physical human-robot interaction control of an upper limb exoskeleton with a decentralized neuroadaptive control scheme[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024, 32(2): 905-918.
- [61] KAMEZAKI M, IWATA H, SUGANOS S. Condition-based less-error data selection for robust and accurate mass measurement in large-scale hydraulic manipulators [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2017(7): 1-11.
- [62] RENNER A, WIND H, SAWODNY O. Online payload estimation for hydraulically actuated manipulators[J]. *Mechatronics*, 2020, 66: 102322.
- [63] MATTHEW T, MASON. Compliance and force control for computer controlled manipulators[J]. *Systems, Man and Cybernetics*, 1981, 11(6): 418-432.
- [64] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. *Asme J of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1981, 102(2): 126-133.
- [65] NAVVABI H, MARKAZI A H D. Hybrid position/force control of stewart manipulator using extended adaptive fuzzy sliding mode controller (E-AFSMC)[J]. *ISA Transactions*, 2019, 88: 280-295.
- [66] LI L P, XIE L, LUO X, et al. Compliance control using hydraulic heavy-duty manipulator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 1193-1201.
- [67] DING R Q, WANG J H, CHENG M, et al. Adaptive impedance control for the hydraulic manipulator under the uncertain environment[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, 45(8): 437.
- [68] BOAVENTURA T, BUCHLI J, SEMINI C, et al. Model-based hydraulic impedance control for dynamic robots

- [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 31(6): 1324-1336.
- [69] BA K X, MA G L, YU B, et al. A nonlinear model-based variable impedance parameters control for position-based impedance control system of hydraulic drive unit[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(7): 1806-1817.
- [70] LEE W, YOO S, NAM S, et al. Passivity-based robust compliance control of electro-hydraulic robot manipulators with joint angle limit[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 3190-3197.
- [71] LEE W, MIN J K, WAN K C. Asymptotically stable disturbance observer-based compliance control of electrohydraulic actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(1): 195-206.
- [72] 陈光荣, 王军政, 赵江波, 等. 基于虚拟分解控制的液压足式机器人单腿稳定阻抗控制[J]. 机器人, 2017, 39(5): 704-714.  
CHEN G R, WANG J Z, ZHAO J B, et al. Stable impedance control of a single leg of hydraulic legged robot based on virtual decomposition control[J]. Robot, 2017, 39(5): 704-714.
- [73] 柯贤锋, 王军政, 何玉东, 等. 基于力反馈的液压足式机器人主/被动柔顺性控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 13-20.  
KE X F, WANG J Z, HE Y D, et al. Active/Passive compliance control for a hydraulic quadruped robot based on force feedback[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 13-20.
- [74] TRUONG H V A, TRINH H A, AHN K K. Safety operation of n-DOF serial hydraulic manipulator in constrained motion with consideration of contact-loss fault [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 2076-3417.
- [75] 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]. 燕山: 燕山大学, 2018.  
BA K X. Research on active compliance compound control of leg drive system of robot[D]. Yanshan: Yanshan University, 2018.
- [76] 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.
- [77] 俞滨, 巴凯先, 王东坤, 等. 液压驱动单元位置控制系统前馈补偿控制研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 159-169.  
YU B, BA K X, WANG D K, et al. Feedforward compensation control for hydraulic drive unit position control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 159-169.



第一作者: 丁孺琦(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者, 研究方向为机电液智能控制。E-mail: dingruqi@ecjtu.edu.cn。



通信作者: 李刚(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电液磁一体化及系统集成应用。E-mail: ligang0794@163.com。

(责任编辑:姜红贵)