

DOI: 10.7652/xjtuxb201903023

采用跃度模型和干扰估计的 并联式加注机器人分散鲁棒控制

赵纯, 于存贵, 徐强, 姚建勇

(南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 针对液压驱动型并联式加注机器人的空间轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于机器人跃度模型和关节扰动估计的分散鲁棒控制策略。通过并联机器人的跃度反解模型将系统基于笛卡尔空间的理想期望轨迹映射为各独立关节的期望轨迹,同时将关节间的耦合交联项处理为各驱动单元的时变外部干扰,进而将并联机器人分解成一组受有界外部扰动关节子系统的集合。针对各独立关节,算法通过反步方法融合了扩张状态观测器和鲁棒控制器,其中扩张状态观测器主要用来实现对关节中匹配不确定性与不匹配不确定性(包括外部扰动和非线性建模误差)的精确估计和补偿,鲁棒控制器用于抑制扰动中超出观测器带宽的快速时变项和其他误差项。通过构造 Lyapunov 函数从理论上验证了整个闭环系统的稳定性。实验结果表明,提出的控制器能准确估计和补偿各关节子系统中存在的匹配与不匹配不确定性,同时系统具有良好的轨迹跟踪性能和较强的抗干扰能力。
关键词: 并联式加注机器人;电液伺服系统;跃度反解建模;扩张状态扰动观测器;分散鲁棒控制
中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0164-11

Decentralized Robust Control of a Parallel Filling Robot Using Jerk Model and Disturbance Estimation

ZHAO Chun, YU Cungui, XU Qiang, YAO Jianyong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A decentralized robust control method based on the jerk model and an extended state observer is presented for trajectory tracking control in Cartesian space of a hydraulic-driven parallel filling robot. The desired trajectory in Cartesian space is transformed into desired trajectory of each independent joint by using the jerk inverse model of parallel manipulator. Treating the coupled interconnection terms between the joints as time-varying external disturbances of the driving unit, and the parallel manipulator can be decomposed into a set of joint subsystems with bounded external disturbances. For each independent joint, the proposed controller is derived by effectively integrating robust controller with extended state observer via backstepping method. Two extended state observers (ESOs) are synthesized to realize the accurate estimation of both matched and unmatched uncertainties (e.g., external disturbances and nonlinear modeling errors) and compensate them in a feed-forward way. The robust terms are employed to handle the fast-changing components of the uncertainties beyond the pass-band of the ESOs and other error terms. Furthermore, the stability of the system is verified by constructing

收稿日期: 2018-06-06。 作者简介: 赵纯(1988—),男,博士生;于存贵(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675279)。

网络出版时间: 2018-11-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181114.1203.004.html>

the Lyapunov function. Experimental results show that the proposed controller can accurately estimate both matched and unmatched uncertainties of the driving unit, and the system possesses high trajectory tracking performance and strong anti-disturbance ability.

Keywords: parallel filling robot; electro-hydraulic servo system; jerk inverse model; extended state observer; decentralized robust control

液压驱动型并联机器人因具有刚度大、精度高、自重载荷比小和响应速度快等优点,在运动模拟器、空间对接模拟装置和虚拟现实设备中得到了较广泛的应用^[1]。然而,由于并联机器人本质上是一个时变、多变量和强耦合的非线性系统,其高性能控制器设计是一个难点^[2-4]。目前针对并联机器人的控制方法主要分为两类:一类是基于动力学模型多输入多输出形式的集中控制策略;另一类是基于独立关节的分散控制策略^[5]。理论上,集中控制策略在进行算法设计时通过系统状态的集中反馈,能充分利用系统的动力学模型信息来获得更好的控制性能,但由于存在模型解算复杂、暂态性能描述困难、系统空间位姿难以直接检测等问题,因此直接影响了该方法在实际中的应用。

不同于集中控制策略,分散控制策略将系统关节间的交联耦合项处理为各驱动器受到的外部干扰,从而把集成的动力学系统分解为一组受有界扰动的互联关节子系统,进而针对各独立关节设计高性能控制器^[6-7]。该控制策略由于仅依赖于独立关节各自状态参数的反馈,因而算法结构简单,但是其也引入了一个新的问题,即如何有效处理强外部扰动(耦合交联项)对关节控制带来的影响。

为了克服强外部干扰和不确定非线性对控制性能的影响,干扰观测器(DOB)被引入强扰动场合的控制研究中^[2,8-15]。该方法的主要思想是通过在控制器中引入干扰观测器来实现对扰动的精确估计和补偿,进而减小其对关节控制性能的影响^[2],其中最具代表性的是由文献[8]提出的一种基于非线性扩张状态观测器的自抗扰控制策略(ADRC),其核心理论是使用一种扩张状态观测器(ESO)来估计广义扰动并对其进行前馈补偿。进一步地,基于ADRC的思想,文献[11]提出了一种基于线性扩张状态观测器(LESO)的自抗扰控制策略(LADRC),文献[12]证明了其稳定性。研究表明,通过调节观测器的带宽可使ESO对扰动的观测误差趋于任意小^[12]。由于良好的观测性能,目前ESO在机器人的分散控制领域中已得到了广泛的应用^[6-7,16-18]。

虽然针对并联机器人的分散控制取得了较多成

果,但是有两个问题仍值得考虑:①在实际应用中,系统的轨迹规划一般是针对末端执行器基于笛卡尔空间展开的,而分散控制器则基于各关节的理想期望轨迹进行设计,故产生了高阶连续期望轨迹在笛卡尔空间和关节空间的轨迹映射问题。文献[16-18]针对并联机器人的分散控制,采用位置反解结合跟踪微分器的方法用以生成关节参考轨迹及其各阶导数。文献[19-20]则采用位置轨迹结合高阶滤波器的方法来生成高阶期望轨迹。但是,由于微分滤波器的时延和衰减特性,将造成理想期望轨迹在一定程度上的失真。②目前机器人的分散控制中,扰动观测器只能针对关节的不匹配不确定性(外干扰)进行估计^[6-7,16-18],然而当关节的匹配不确定性存在较大扰动时,现有的关节分散控制器并不能实现对其精确观测和补偿。

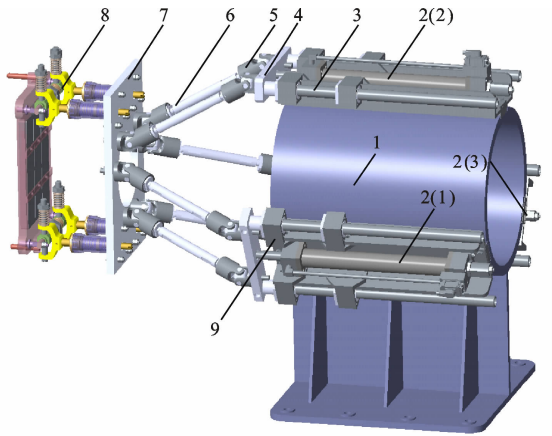
基于以上分析,本文以应用于某运载火箭的液压驱动型并联式加注机器人为研究对象,针对其高精度空间轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于并联机器人跃度反解模型和关节干扰估计的分散鲁棒控制策略。通过建立并联机器人的跃度反解模型,将并联机器人基于笛卡尔空间高阶连续的理想期望轨迹映射为各独立关节的期望轨迹,同时在各独立关节,通过设计两个线性扩张状态观测器(LESO)实现对关节中匹配和不匹配不确定性的同步估计和补偿,进而提升了系统的控制精度和抗干扰能力,并通过实验验证了控制器的有效性。

1 系统建模与问题描述

1.1 系统总体布局

应用于某运载火箭的并联式自动燃料加注机器人的总体结构如图1所示,其主要由液压驱动型三平动3-PSS并联机器人^[21]和弹簧支链型六自由度柔顺对接机构^[22]组成。3-PSS并联机器人的结构主要包括定平台(基座)、动平台、3组呈空间120°对称分布的滑杆-连杆支链以及3个液压驱动器。每组支链中,两根滑杆通过连接块实现固连,进而组成滑杆组件,并通过直线轴承安装在定平台上;两根连杆呈平行等长状态,各杆两端分别通过自制高精度

球铰链与动平台和连接块相连,构成平行四边形结构。滑杆组件在液压驱动器的作用下进行前后向移动(两者构成P副),进而实现动平台在笛卡尔空间的三维平动。六自由度柔顺对接机构在3-PSS并联机器人的驱动下实现与箭体的对接和随动。关于3-PSS并联平台的具体运动特性分析可参考文献[21,23]。



1:定平台(基座);2:液压缸(1,2,3);3:滑杆;4:连接块;5:球铰链;
6:连杆;7:动平台;8:负载(柔顺对接机构);9:直线轴承

图1 并联式加注机器人结构示意图

1.2 3-PSS 机构跃度反解建模

由于每组支链中两根连杆的运动规律相同,参考文献[23]可知,在对3-PSS并联机构进行运动学分析时,可将系统简化成如图2所示的单连杆等效模型。连杆两端通过T副(虎克铰)与P副(滑动副)和动平台相连,其与原机构具有相同的自由度。

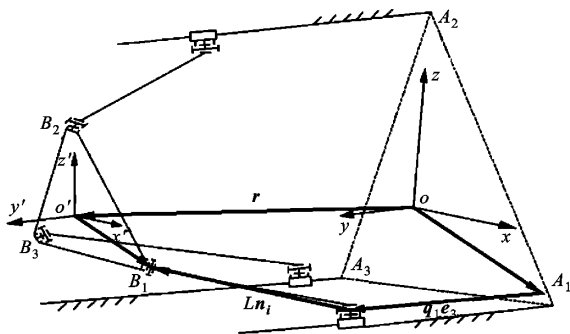


图2 3-PSS平台等效机构示意图

如图2所示,在动平台和基座中心点分别建立固定参考坐标系 $o-xyz$ 和动平台连体参考坐标系 $o'-x'y'z'$ 。

假设1 并联机器人在笛卡尔空间的期望轨迹满足 $x_d(t) \in C^3$, $y_d(t) \in C^3$, $z_d(t) \in C^3$ 且有界。

1.2.1 位置反解建模 定义动平台中心点 o' 在固定坐标系中的位矢为 $\mathbf{r}$, 则有

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i + q_i \cdot \mathbf{e}_3 + L \cdot \mathbf{n}_i \quad (1)$$

式中: q_i 和 $\mathbf{e}_3 = [0, 0, 1]^T$ 分别为液压杆的伸缩量和伸缩方向单位矢量; L 和 $\mathbf{n}_i$ 分别为等效连杆长度及其单位方向矢量。由式(1)整理可得

$$q_i = \mathbf{r}^T \cdot \mathbf{e}_3 - \sqrt{(\mathbf{r}^T \cdot \mathbf{e}_3)^2 - [\mathbf{r} - (\mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i)]^2 + L^2} \quad (2)$$

1.2.2 速度反解建模 由式(1)可得

$$\mathbf{n}_i = 1/L \cdot [\mathbf{r} - (\mathbf{A}_i - \mathbf{B}_i) - q_i \cdot \mathbf{e}_3] \quad (3)$$

将式(1)两端关于时间求导,得 o' 的速度为

$$\mathbf{v} = \dot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3 + L \cdot \mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i \quad (4)$$

式中 $\mathbf{w}_i$ 为支链 i 的角速度。

对式(4)两端左点乘 $\mathbf{n}_i$, 有

$$\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{v} = \dot{q}_i \cdot \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{e}_3 + L \cdot \mathbf{n}_i^T \cdot (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i) \quad (5)$$

整理可得驱动器 i 的速度为

$$\dot{q}_i = [\mathbf{n}_i^T / (\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{e}_3)] \cdot \mathbf{v} = \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{v} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{J}_i = \mathbf{n}_i / (\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{e}_3)$

对式(4)两端左叉乘 $\mathbf{n}_i$, 有

$$\mathbf{n}_i \times \mathbf{v} = \dot{q}_i \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{e}_3) + L \cdot \mathbf{n}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i) \quad (7)$$

忽略支链绕自身轴线的旋转,即假设 $\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{w}_i = 0$, 则由式(7)整理可得支链 i 的转动角速度为

$$\mathbf{w}_i = 1/L \cdot [\tilde{\mathbf{n}}_i \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{J}_i^T)] \cdot \mathbf{v} = \mathbf{J}_{w_i} \cdot \mathbf{v} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{J}_{w_i} = 1/L \cdot [\tilde{\mathbf{n}}_i \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{J}_i^T)]$ 为等效连杆 i 的偏角速度矩阵; $\mathbf{E}$ 为3阶单位矩阵; $\tilde{\mathbf{n}}_i$ 表示与向量 $\mathbf{n}_i$ 相关的斜对称矩阵,其定义为

$$\tilde{\mathbf{n}}_i = \begin{bmatrix} 0 & -n_{i3} & n_{i2} \\ n_{i3} & 0 & -n_{i1} \\ -n_{i2} & n_{i3} & 0 \end{bmatrix}$$

等效连杆 i 的质心速度可以表示为

$$\mathbf{v}_i = \dot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3 + \mathbf{w}_i \times (L/2 \cdot \mathbf{n}_i) \quad (9)$$

将式(16)代入式(9)整理得

$$\mathbf{v}_i = (\mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{J}_i^T - L/2 \cdot \tilde{\mathbf{n}}_i \cdot \mathbf{J}_{w_i}) \cdot \mathbf{v} = \mathbf{J}_{v_i} \cdot \mathbf{v} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{J}_{v_i} = \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{J}_i^T - L/2 \cdot \tilde{\mathbf{n}}_i \cdot \mathbf{J}_{w_i}$ 为等效连杆 i 的偏速度矩阵。

1.2.3 加速度反解建模 将式(4)两端关于时间求导,得 o' 的加速度为

$$\mathbf{a} = \ddot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3 + L \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_i \times \mathbf{n}_i) + L \cdot \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i) \quad (11)$$

对式(11)两端左点乘 $\mathbf{n}_i$, 有

$$\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{a} = \mathbf{n}_i^T \cdot (\ddot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3) + \mathbf{n}_i^T \cdot [L \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_i \times \mathbf{n}_i)] + \mathbf{n}_i^T \cdot [L \cdot \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)] \quad (12)$$

整理可得驱动器 i 的加速度为

$$\ddot{q}_i = \mathbf{J}_i^T \cdot \mathbf{a} + \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{v} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{H}_i = \mathbf{L} \cdot (\mathbf{J}_{w_i}^T \cdot \mathbf{J}_{w_i}) / (\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{e}_3)$

对式(11)两端左叉乘 $\mathbf{n}_i$,有

$$\mathbf{n}_i \times \mathbf{a} = \mathbf{n}_i \times (\ddot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3) + \mathbf{n}_i \times [\mathbf{L} \cdot (\mathbf{e}_i \times \mathbf{n}_i)] + \mathbf{n}_i \times [\mathbf{L} \cdot \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)] \quad (14)$$

忽略支链绕自身轴线的转动加速度,即假设 $\mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{e}_i = 0$,则由式(14)可得支链 i 的转动角加速度为

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{J}_{w_i} \cdot \mathbf{a} - 1/L \cdot \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{v} \cdot (\tilde{\mathbf{n}}_i \cdot \mathbf{e}_3) \quad (15)$$

1.2.4 跃度反解建模 将式(11)两端关于时间求导,得

$$\dot{\mathbf{a}} = \ddot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3 + \mathbf{L} \cdot [\dot{\mathbf{e}}_i \times \mathbf{n}_i + \mathbf{e}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)] + \mathbf{L} \cdot \{\dot{\mathbf{w}}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i) + \mathbf{w}_i \times [\dot{\mathbf{w}}_i \times \mathbf{n}_i + \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)]\} \quad (16)$$

对式(16)两端左点乘 $\mathbf{n}_i$,有

$$\mathbf{n}_i^T \cdot \dot{\mathbf{a}} = \mathbf{n}_i^T \cdot \ddot{q}_i \cdot \mathbf{e}_3 + \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{L} \cdot [\dot{\mathbf{e}}_i \times \mathbf{n}_i + \mathbf{e}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)] + \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{L} \cdot \{\dot{\mathbf{w}}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i) + \mathbf{w}_i \times [\dot{\mathbf{w}}_i \times \mathbf{n}_i + \mathbf{w}_i \times (\mathbf{w}_i \times \mathbf{n}_i)]\} \quad (17)$$

整理可得驱动器 i 的跃度为

$$\ddot{q}_i = \mathbf{J}_i^T \cdot \dot{\mathbf{a}} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{e}_i \times \mathbf{w}_i \quad (18)$$

式中 $\mathbf{w}_i = 1/L \cdot [\mathbf{n}_i \times (\mathbf{E} - \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{J}_i^T)] \cdot \mathbf{v}$

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{J}_{w_i} \cdot \mathbf{a} - 1/L \cdot \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{v} \cdot (\tilde{\mathbf{n}}_i \cdot \mathbf{e}_3)$$

基于式(2)(6)(13)和(18),可实现系统在笛卡尔空间和关节空间的期望轨迹映射。

1.3 液压驱动器建模

关节液压驱动器示意图如图3所示。根据文献[23],3-PSS并联机构基于笛卡尔空间的动力学方程可以描述为下述形式

$$\mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\chi}) \ddot{\boldsymbol{\chi}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\chi}, \dot{\boldsymbol{\chi}}) \dot{\boldsymbol{\chi}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\chi}) + \mathbf{D}(\boldsymbol{\chi}, \dot{\boldsymbol{\chi}}, \ddot{\boldsymbol{\chi}}) \quad (19)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为液压缸的驱动力向量; $\mathbf{J}$ 为系统的雅克比矩阵; $\boldsymbol{\chi}$ 为动平台中心点的空间位置矢量; $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{D}$ 分别为系统在笛卡尔坐标系下的惯性矩阵、离心和哥氏力矩阵、重力项和系统干扰与建模误差项。

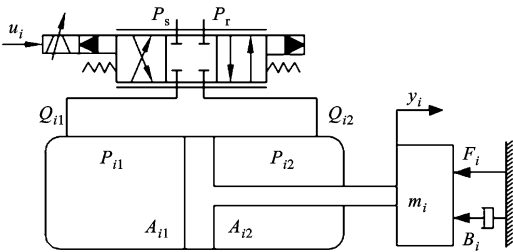


图3 关节液压驱动器示意图

参考文献[24],可以将动力学方程(19)改写成基于关节空间坐标系下的形式

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}'(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}'(\mathbf{q}) + \mathbf{D}'(\mathbf{q}) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T$ 为3个液压缸输出位移矢量; $\mathbf{M}'(\mathbf{q}) = (\mathbf{J}^{-1})^T \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1}$ 、 $\mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{M} \dot{\mathbf{J}}^{-1} + (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{C} \mathbf{J}^{-1}$ 、 $\mathbf{G}'(\mathbf{q}) = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{G}$ 、 $\mathbf{D}'(\mathbf{q}) = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{D}$ 分别为系统在关节空间坐标系下的惯性矩阵、离心和哥氏力矩阵、重力项和系统干扰与建模误差项。

动力学模型(20)有如下性质^[2,25]。

性质1 矩阵 $\mathbf{M}'(\mathbf{q})$ 为对称正定矩阵,同时存在常数 $\mu_{\max} > \mu_{\min} > 0$ 、 $c_H > 0$ 和 $c_G > 0$,使得下面各式成立

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\min} \mathbf{I} &\leq \mathbf{M}'(\mathbf{q}) \leq \mu_{\max} \mathbf{I} \\ \|\mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\|_2 &\leq c_H \|\dot{\mathbf{q}}\|_2, \|\mathbf{G}'(\mathbf{q})\|_2 \leq c_G \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为3阶单位矩阵。

假设2 建模误差项 $\mathbf{D}'(\mathbf{q})$ 有界,同时其一阶导数存在且有界。

结合性质1和假设2,可知存在非负常数 β_1 、 β_2 和 β_3 ,使得下述不等式成立^[2,25]

$$\|\boldsymbol{\tau}\| \leq \beta_1 \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_3 \quad (22)$$

将式(20)分解为一组受有界扰动关节子系统的集合,可得各驱动器输出力的动力学平衡方程为^[26]

$$\tau_i = m_i \ddot{q}_i + \tau_{im} \quad (23)$$

式中: $m_i = M'_{ii}(\cdot)$ 为液压活塞杆的质量; $\tau_{im} =$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^3 M'_{ij}(\cdot) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^3 C'_{ij}(\cdot) \dot{q}_j + G'_i(\cdot) + D'_i(\cdot)。$$

结合式(22)和(23),可知存在非负常数 β_{i1} 、 β_{i2} 和 β_{i3} ,使得下式成立

$$|\tau_{im}| \leq \beta_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i3} \quad (24)$$

注1 考虑到液压驱动器的输出 $\mathbf{q}$ 是有界的,同时结合假设2可知,关节输出驱动力 τ_{im} 有界,同时其一阶导数存在且有界。

考虑到液压驱动器的动态特性,同时结合式(23),各驱动器的动力学方程可以建模为^[27]

$$m_i \ddot{q}_i = A_1 P_{i1} - A_2 P_{i2} - B_i \dot{q}_i - \tau_{im} - d_{fi} \quad (25)$$

式中: P_{i1} 和 P_{i2} 是液压缸两腔压力; A_1 和 A_2 为两腔的有效作用面积; B_i 为液压缸的理想摩擦系数; d_{fi} 为液压缸的建模误差项。

忽略液压缸的外泄漏,则液压缸两腔的压力动态方程为^[27]

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{i1} &= \frac{\beta_e}{V_{i1}} [-A_1 \dot{q}_i - C_{it} P_{i1} + Q_{i1} + p_{id1}] \\ \dot{P}_{i2} &= \frac{\beta_e}{V_{i2}} [A_2 \dot{q}_i + C_{it} P_{i1} - Q_{i2} + p_{id2}] \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中: $V_{i1} = V_{i01} + A_1 q_i$ 、 $V_{i2} = V_{i02} - A_2 q_i$ 分别表示液

压缸两腔的有效容积,其中 V_{i01} 和 V_{i02} 分别为两腔的初始容积; β_e 为油液弹性模量; C_{it} 为内泄漏系数; Q_{i1} 和 Q_{i2} 分别为液压缸的两腔流量; $P_{iL} = P_{i1} - P_{i2}$ 为液压缸两腔压差; p_{id1} 和 p_{id2} 分别为液压缸两腔的压力动态建模误差。 Q_{i1} 和 Q_{i2} 可分别定义为^[27]

$$\left. \begin{aligned} Q_{i1} &= k_u u_i [s(u_i) \sqrt{P_s - P_{i1}} + s(-u_i) \sqrt{P_{i1} - P_r}] \\ Q_{i2} &= k_u u_i [s(u_i) \sqrt{P_{i2} - P_r} + s(-u_i) \sqrt{P_s - P_{i1}}] \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中: k_u 为伺服阀总的流量增益; P_s 为油源压力; P_r 为回油压力; $s(u_i)$ 定义为

$$s(u_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } u_i \geq 0 \\ 0, & \text{if } u_i < 0 \end{cases} \quad (28)$$

定义 $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}]^T = [q_i, \dot{q}_i, A_1 P_{i1} - A_2 P_{i2}]^T$ 为系统的状态变量,则关节液压驱动器的系统状态方程可写成如下形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} &= \frac{x_{i3}}{m_i} - b_i x_{i2} + d_{i2}(x_i, t) \\ \dot{x}_{i3} &= f_{i1} u_i + f_{i2} + d_{i3}(x_i, t) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中

$$\begin{aligned} f_{i1} &= k_u \beta_e (A_{i1} R_{i1} / V_{i1} + A_{i2} R_{i2} / V_{i2}); b_i = B_i / m_i \\ f_{i2} &= -\beta_e \left(\frac{A_{i1}^2}{V_{i1}} + \frac{A_{i2}^2}{V_{i2}} \right) x_{i2} - \beta_e C_{it} \left(\frac{A_{i1}}{V_{i1}} + \frac{A_{i2}}{V_{i2}} \right) P_{iL} \\ R_{i1} &= s(u_i) \sqrt{P_s - P_{i1}} + s(-u_i) \sqrt{P_{i1} - P_r} \\ R_{i2} &= s(u_i) \sqrt{P_{i2} - P_r} + s(-u_i) \sqrt{P_s - P_{i2}} \\ d_{i2}(x_i, t) &= -(\tau_{im} + d_{fi}) / m_i \\ d_{i3}(x_i, t) &= \beta_e A_{i1} p_{id1} / V_{i1} - \beta_e A_{i2} p_{id2} / V_{i2} \end{aligned}$$

为便于控制器设计,做如下假设。

假设 3 液压系统在一般工况下工作,即各液压缸的两腔压力满足 $0 < P_r < P_{i1} < P_s, 0 < P_r < P_{i2} < P_s$ 。

假设 4 关节不匹配不确定性 $d_{fi}(t)$ 与关节匹配不确定性 $d_{i3}(t)$ 有界,同时其一阶导数存在且有界,即有

$$|d_{fi}(t)| \leq \delta_{im}; |d_{i3}(t)| \leq \beta_{i5} \quad (30)$$

式中 δ_{im} 和 β_{i5} 均为已知有界非负常数。

结合式(24)(29)和(30),可以得到

$$|d_{i2}(t)| \leq \beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta_{i4} \quad (31)$$

式中 $\beta'_{ij} = \beta_{ij} / m_i (j=1, 2), \beta_{i4} = (\beta_{i3} + \delta_{im}) / m_i$ 均为已知有界非负常数。

控制器设计目标:对于给定的笛卡尔空间理想期望轨迹 $\mathbf{r}_d$,通过跃度模型得到各关节的期望轨迹 q_{id} ,进而设计有界的控制输入 u_i ,使得各驱动器的

输出 q_i 尽可能地跟踪 q_{id} ,从而实现系统在笛卡尔空间的轨迹输出 $\mathbf{r}$ 对 $\mathbf{r}_d$ 的高精度跟踪。

2 控制器设计

2.1 关节扩张状态观测器设计

为了估计液压驱动器中存在的匹配和不匹配不确定性,可参考文献[11]的思想,为各关节子系统设计扩张状态扰动观测器。将 $d_{i2}(t)$ 和 $d_{i3}(t)$ 分别扩张为传统形式的状态变量 x_{ie_1} 和 x_{ie_2} ,即有 $x_{ie_1} = d_{i2}(t), x_{ie_2} = d_{i3}(t)$ 。根据假设4和注1, $\dot{x}_{ie_1}$ 和 $\dot{x}_{ie_2}$ 存在且有界,因此可定义 $\dot{x}_{ie_1} = s_{i1}(t), \dot{x}_{ie_2} = s_{i2}(t)$ 。故而,扩张状态后的系统方程可写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} &= \frac{x_{i3}}{m_i} - b_i x_{i2} + x_{ie_1} \\ \dot{x}_{ie_1} &= s_{i1}(t) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i3} &= f_{i1} u_i + f_{i2} + x_{ie_2} \\ \dot{x}_{ie_2} &= s_{i2}(t) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

基于式(32)和(33),针对扰动 x_{ie_1} 和 x_{ie_2} 可分别设计如下扩张状态观测器

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{i1} &= \hat{x}_{i2} + 3\omega_{ie_1}(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \\ \dot{\hat{x}}_{i2} &= \frac{x_{i3}}{m_i} - b_i x_{i2} + x_{ie_1} + 3\omega_{ie_1}^2(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \\ \dot{\hat{x}}_{ie_1} &= \omega_{ie_1}^3(x_{i1} - \hat{x}_{i1}) \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{i3} &= f_{i1} u_i + f_{i2} + x_{ie_2} + 2\omega_{ie_2}(x_{i3} - \hat{x}_{i3}) \\ \dot{\hat{x}}_{ie_2} &= \omega_{ie_2}^2(x_{i3} - \hat{x}_{i3}) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

式中: $\hat{x}_{ij} (j=1, 2, 3, e_1, e_2)$ 为系统状态的估计值; $\omega_{ie_1} > 0$ 和 $\omega_{ie_2} > 0$ 分别为观测器的调节参数。

定义 $\tilde{x}_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij}$ 为观测器的状态观测误差,则观测误差的状态方程可写成如下形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}}_i &= \omega_{ie_1} \mathbf{A}_1 \boldsymbol{\eta}_i + \mathbf{B} \frac{s_{i1}(t)}{\omega_{ie_1}^2} \\ \dot{\boldsymbol{\chi}}_i &= \omega_{ie_2} \mathbf{A}_2 \boldsymbol{\chi}_i + \mathbf{D} \frac{s_{i2}(t)}{\omega_{ie_2}} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

式中 $\boldsymbol{\eta}_i = [\eta_{i1}, \eta_{i2}, \eta_{i3}]^T = [\tilde{x}_{i1}, \tilde{x}_{i2} / \omega_{ie_1}, \tilde{x}_{ie_1} / \omega_{ie_1}^2]^T$

$\boldsymbol{\chi}_i = [\chi_{i1}, \chi_{i2}]^T = [\tilde{x}_{i3}, \tilde{x}_{ie_2} / \omega_{ie_2}]^T; \mathbf{B} = [0, 0, 1]^T$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = [0, 1]^T$$

引理 1^[12] 由于 $s_{i1}(t)$ 和 $s_{i2}(t)$ 均有界,因此所有的状态估计均有界,同时存在常数 $\sigma_{ij} > 0$ 和有限时间 $T_1 > 0$,使得

$$\left. \begin{aligned} |\tilde{x}_{ij}| &\leq \sigma_{ij}, \sigma_{ij} = O\left(\frac{1}{\omega_o^c}\right), \forall t \geq T_1 \\ i &= 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, e_1, e_2 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

式中 c 为正常数。

注2 通过调节观测器参数 ω_{ie_1} 和 ω_{ie_2} , 可以使观测误差在有限时间内趋于足够小的值。

分别针对扰动估计 $\hat{x}_{ie_1}$ 和 $\hat{x}_{ie_2}$ 定义如下饱和函数

$$\text{Sat}(\hat{x}_{ie_1}) = \begin{cases} \beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4} & \text{if } |\hat{x}_{ie_1}(t)| > \beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4} \\ \hat{x}_{ie_1} & \text{if } |\hat{x}_{ie_1}(t)| \leq \beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4} \end{cases}$$

$$\text{Sat}(\hat{x}_{ie_2}) = \begin{cases} \beta_{i5}, & \text{if } |\hat{x}_{ie_2}| > \beta_{i5} \\ \hat{x}_{ie_2}, & \text{if } |\hat{x}_{ie_2}| \leq \beta_{i5} \end{cases} \quad (38)$$

由式(38)和引理1,可得关节扰动观测误差具有如下特性

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_{ie_1} &\leq \beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4}; \tilde{x}_{ie_2} \leq \beta_{i5} \\ &\exists T_1, \forall t < T_1 \\ \tilde{x}_{ie_1} &\leq \sigma_{ie_1}; \tilde{x}_{ie_2} \leq \sigma_{ie_2} \\ &\exists T_1, \forall t \geq T_1 \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

至此,基于关节扰动估计(34)和(35),原关节系统状态方程(29)可以改写为如下动力学解耦形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} &= \frac{x_{i3}}{m_i} - b_i x_{i2} + \hat{x}_{ie_1} + \tilde{x}_{ie_1} \\ \dot{x}_{i3} &= f_{i1} u_i + f_{i2} + \hat{x}_{ie_2} + \tilde{x}_{ie_2} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

2.2 基于ESO的关节分散鲁棒控制器设计

步骤1 定义误差变量

$$z_{i1} = x_{i1} - x_{i1d}; z_{i2} = \dot{x}_{i1} + k_{i1} z_{i1} = x_{i2} - \alpha_{i1} \quad (41)$$

式中: z_{i1} 为输出跟踪误差; $\alpha_{i1} = \dot{x}_{i1d} - k_{i1} z_{i1}$ 为 x_{i2} 的虚拟控制量; $k_{i1} > 0$ 为反馈控制常数。

将 z_{i2} 进行微分,同时结合式(40),可得

$$m_i \dot{z}_{i2} = x_{i3} - m_i b_i x_{i2} + m_i (\hat{x}_{ie_1} + \tilde{x}_{ie_1}) - m_i \alpha_{i1} \quad (42)$$

设计 α_{i2} 为 x_{i3} 的虚拟控制量,其结构形式如下

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{i2} &= \alpha_{i2a} + \alpha_{i2s}, \alpha_{i2a} = m_i (\dot{\alpha}_{i1} + b_i x_{i2} - \hat{x}_{ie_1}) \\ \alpha_{i2s} &= \alpha_{i2s1} + \alpha_{i2s2}, \alpha_{i2s1} = -k_{i2s1} z_{i2} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

式中: α_{i2a} 为基于模型的前馈补偿项; α_{i2s} 为鲁棒控制项; $k_{i2s1} > 0$ 为设计常数。

定义虚拟控制输入 α_{i2} 与 x_{i3} 之间的偏差为 $z_{i3} = x_{i3} - \alpha_{i2}$, 同时将式(43)代入式(42),可得

$$m_i \dot{z}_{i2} = z_{i3} - k_{i2} z_{i2} + \alpha_{i2s2} + m_i \tilde{x}_{ie_1} \quad (44)$$

设计 α_{i2s2} 满足如下条件

$$\left. \begin{aligned} z_{i2} (\alpha_{i2s2} + m_i \tilde{x}_{ie_1}) &\leq \epsilon_{i2} \\ z_{i2} \alpha_{i2s2} &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

式中 $\epsilon_{i2} > 0$ 为可任意小的设计参数。

令 $h_{i2} \geq m_i (\beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4})$, 则满足条件式(45)的 α_{i2s2} 可设计为

$$\alpha_{i2s2} = -k_{i2s2} z_{i2} \triangleq -h_{i2}^2 z_{i2} / (4\epsilon_{i3}) \quad (46)$$

式中 $k_{i2s2} > 0$ 为非线性控制增益。

步骤2 对 z_{i3} 关于时间微分,同时结合式(40)和(43),有

$$\dot{z}_{i3} = \dot{x}_{i3} - \dot{\alpha}_{i2} = f_{i1} u_i + f_{i2} + \hat{x}_{ie_2} + \tilde{x}_{ie_2} - \dot{\alpha}_{i2c} - \dot{\alpha}_{i2u} \quad (47)$$

式中: $\dot{\alpha}_{i2c}$ 为 $\dot{\alpha}_{i2}$ 中可计算偏导部分; $\dot{\alpha}_{i2u}$ 为 $\dot{\alpha}_{i2}$ 中不可计算偏导部分。

$\dot{\alpha}_{i2c}$ 和 $\dot{\alpha}_{i2u}$ 可以分别计算如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{i2c} &= \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial x_{i1}} \dot{x}_{i1} + \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial x_{i2}} \dot{x}_{i2} + \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial \hat{x}_{ie_1}} \dot{\hat{x}}_{ie_1} \\ \dot{\alpha}_{i2u} &= \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial x_{i2}} \tilde{x}_{ie_2} \\ \dot{x}_{i2} &= x_{i3} / m_i - b_i x_{i2} + \hat{x}_{ie_1} \\ \tilde{x}_{ie_2} &= \dot{x}_{i2} - \hat{x}_{i2} = \tilde{x}_{ie_1} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

式中 $\hat{x}_{i2}$ 和 $\tilde{x}_{ie_2}$ 分别为 x_{i2} 的估计值和估计误差。因此,驱动器 i 的分散鲁棒控制器可以设计为

$$\left. \begin{aligned} u_i &= u_{ia} + u_{is}, u_{ia} = \frac{1}{f_{i1}} [-f_{i2} - \hat{x}_{ie_2} + \dot{\alpha}_{i2c}] \\ u_{is} &= \frac{1}{f_{i1}} (u_{is1} + u_{is2}), u_{is2} = -k_{i3s1} z_{i3} \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

式中: u_{ia} 为基于模型的前馈补偿律; u_{is} 为鲁棒控制律; $k_{i3s1} > 0$ 为设计常数。

将控制器式(49)代入式(47),可得

$$\dot{z}_{i3} = -k_{i3} z_{i3} + u_{is2} + \tilde{x}_{ie_2} - \dot{\alpha}_{i2u} \quad (50)$$

设计 u_{is2} 满足如下条件

$$\left. \begin{aligned} z_{i3} \left(u_{is2} + \tilde{x}_{ie_2} - \frac{\partial \alpha_{i2}}{\partial x_{i2}} \tilde{x}_{ie_1} \right) &\leq \epsilon_{i3} \\ z_{i3} u_{is2} &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

式中 $\epsilon_{i3} > 0$ 为可任意小的设计参数。

令 h_{i3} 为满足 $h_{i3} \geq |(\partial \alpha_{i2} / \partial x_{i2}) (\beta'_{i1} \|\ddot{\mathbf{q}}\|_2 + \beta'_{i2} \|\dot{\mathbf{q}}\|_2^2 + \beta_{i4})| + \beta_{i5}$ 的任意曲线,那么满足条件式(51)的 u_{is2} 可设计为

$$u_{is2} = -k_{i3s2} z_{i3} \triangleq -h_{i3}^2 z_{i3} / (4\epsilon_{i3}) \quad (52)$$

式中 $k_{i3s2} > 0$ 为非线性控制增益。

2.3 主要结果

定理1 选择合适的参数 k_{i1} 、 k_{i2} 和 k_{i3} , 使得如下矩阵 $\mathbf{A}_i$ 为正定阵

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} k_{i1} & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & k_{i2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & k_{i3} \end{bmatrix} \quad (53)$$

则控制器式(49)满足闭环系统中所有信号均有界,且定义如下的 Lyapunov 函数

$$V_i = \frac{1}{2} (z_{i1}^2 + m_i z_{i2}^2 + z_{i3}^2) \quad (54)$$

满足如下的不等式

$$\dot{V}_i \leq e^{-\mu_i t} V_i(0) + \frac{\xi_i}{\mu_i} [1 - e^{-\mu_i t}] \quad (55)$$

式中: $\xi_i = \epsilon_{i2} + \epsilon_{i3}$; $\mu_i = 2\lambda_{\min}(\mathbf{A}_i) \min\{1, 1/m_i, 1\}$, $\lambda_{\min}(\mathbf{A}_i)$ 表示矩阵 $\mathbf{A}_i$ 的最小特征值。

证明 对式(54)两端求导,可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= z_{i1}(\dot{z}_{i2} - k_{i1}z_{i1}) + z_{i2}(\dot{z}_{i3} - k_{i2}z_{i2} + \alpha_{i2s2} + \\ &\quad m_i \tilde{x}_{ie_1}) + z_{i3}(-k_{i3}z_{i3} + u_{i2s2} + \tilde{x}_{ie_2} - \dot{\alpha}_{i2u}) \leq \\ &\quad z_{i1}\dot{z}_{i2} - k_{i1}z_{i1}^2 + z_{i2}\dot{z}_{i3} - k_{i2}z_{i2}^2 - k_{i3}z_{i3}^2 + \epsilon_{i2} + \epsilon_{i3} \leq \\ &\quad -\lambda_{\min}(\mathbf{A}_i)(z_{i1}^2 + z_{i2}^2 + z_{i3}^2) + \xi_i \leq -\mu_i V_i + \xi_i \end{aligned} \quad (56)$$

则由对比原理^[28]可以得出

$$V_i \leq e^{-\mu_i t} V_i(0) + \frac{\xi_i}{\mu_i} [1 - e^{-\mu_i t}] \quad (57)$$

由式(57)可知, Lyapunov 函数 V_i 全局有界,因此 z_{i1} 、 z_{i2} 和 z_{i3} 均有界。根据假设 1,可以得到状态 x_{ij} 均有界。结合注 1、假设 4 和引理 1,可知状态估计值 $\hat{x}_{ij}$ 均有界。同时,注意到式(49),可得控制输入 u_i 有界。因此,定理 1 得证。

3 实验分析

3.1 实验建立

为了验证本文所提出的控制策略的有效性,建立如图 4 所示的实验平台,其中液压驱动器主要包括以下几个部分:行程为 400 mm 的单出杆液压缸;型号为 Atos DLHZO-TEB-SN-NP-040-L71 的比例伺服阀,其在 7 MPa 压差下的额定流量为 40 L/min;型号为 MTS R 系列高精度磁致伸缩位移传感器,精度为 $\pm 25 \mu\text{m}$;型号为 MEAS M5200-C00002-250BG 的压力传感器,精度为 0.1 MPa。控制系统硬件采用基于 Matlab/xPC 技术的方案,其中 AD 采集和 DA 输出均采用 16 位 NI PCI-6229 板卡(32 路输入 4 路输出)。控制系统采样时间为 1 ms。

3-PSS 并联机器人主要结构参数的名义值为: $oA_i = 0.32 \text{ m}$, $o'B_i = 0.112 \text{ m}$, $L = 0.45 \text{ m}$, 动平台及负载的质量 $m_p = 35 \text{ kg}$, 连杆质量 $m_s = 9.8 \text{ kg}$, 转

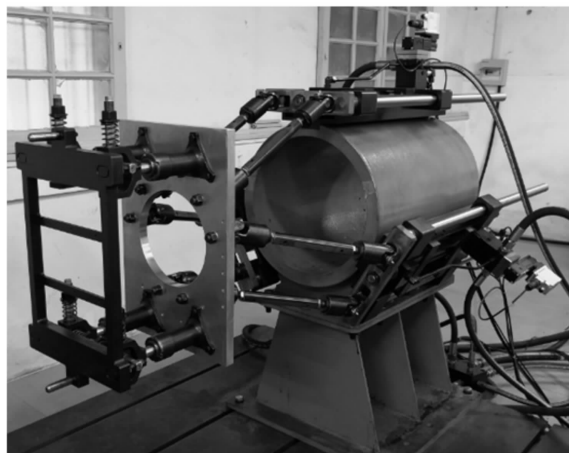


图 4 液压驱动型并联式加注机器人实验平台

动惯量 $I_x = I_y = I_z = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 滑杆组件的质量 $m_d = 22 \text{ kg}$ 。

关节液压驱动器主要系统参数的名义值为: $m_i = 3 \text{ kg}$, $A_{i1} = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_{i2} = 6.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $V_{i01} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $V_{i02} = 2.96 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $P_s = 10 \text{ MPa}$, $P_r = 0.08 \text{ MPa}$, $B_i = 45 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $\beta_c = 2 \times 10^8 \text{ Pa}$, $C_{it} = 9 \times 10^{-12} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$, $k_u = 3.6 \times 10^{-8} \text{ m}^4/(\text{s} \cdot \text{V} \cdot \text{N}^{1/2})$ 。

为了验证本文所设计控制器的有效性,选取以下 3 种控制策略进行试验对比。

(1) 基于干扰估计的分散鲁棒控制器(DRCE-SO)。控制器参数设计为 $k_{i1} = 800$, $k_{i2} = 500$, $k_{i3} = 300$; 扰动观测器参数选为 $\omega_{ie_1} = 45$, $\omega_{ie_2} = 35$ 。

(2) 关节直接鲁棒控制器(DRC)。相比 DRCE-SO, DRC 控制器中不包含关节扰动补偿项。控制器参数为 $k_{i1} = 800$, $k_{i2} = 500$, $k_{i3} = 300$, $\omega_{ie_1} = 0$, $\omega_{ie_2} = 0$ 。

(3) 速度前馈 PID 控制器(VFPID)。控制器参数设计为 $k_{ip} = 1\,200$, $k_{ii} = 600$, $k_{id} = 2$, 速度前馈增益为 $k_w = 10 \text{ V} \cdot \text{s/m}$ 。

此外,为了更好地衡量不同控制器的性能,定义如下两个关于跟踪误差的指标来评价各控制器的有效性。

(1) 为了评价控制器跟踪精度性能,定义跟踪误差最大绝对值指标

$$M_e = \max_{i=1, \dots, N} \{|e(i)|\} \quad (58)$$

式中 N 是所记录的采样信号数。

(2) 为了度量跟踪误差的平均水平,定义平均跟踪误差指标

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e(i)| \quad (59)$$

3.2 实验结果对比

假设动平台中心点在笛卡尔空间的期望轨迹为

$$\left. \begin{aligned} x_d &= 0.065 \sin(\pi t) (1 - \exp(-0.001 t^3)) \\ y_d &= 0; \quad z_d = 0 \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

分别针对上述 3 种控制策略展开实验。图 5、图 6 分别是系统在笛卡尔空间和关节空间中的理想期望轨迹曲线。图 7~图 12 分别显示了 3 种控制算法在笛卡尔空间 and 关节空间对给定曲线的轨迹跟踪误差。在最后两个运动跟踪周期(46~50 s)中,各控制器在各轴向上的轨迹跟踪性能如表 1 所示。

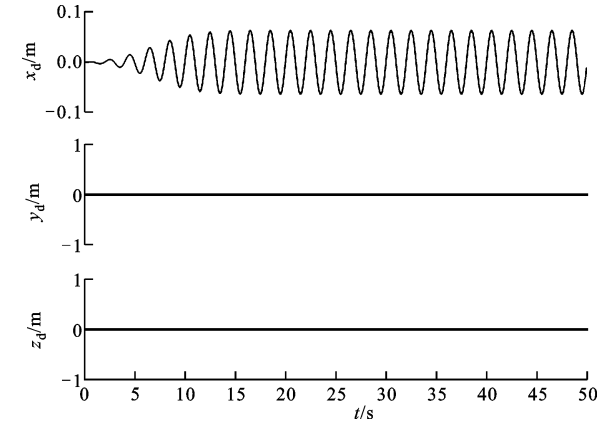


图 5 笛卡尔空间期望轨迹

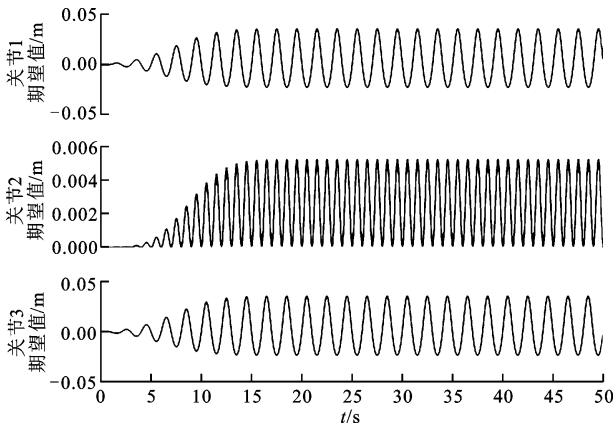


图 6 关节空间期望轨迹

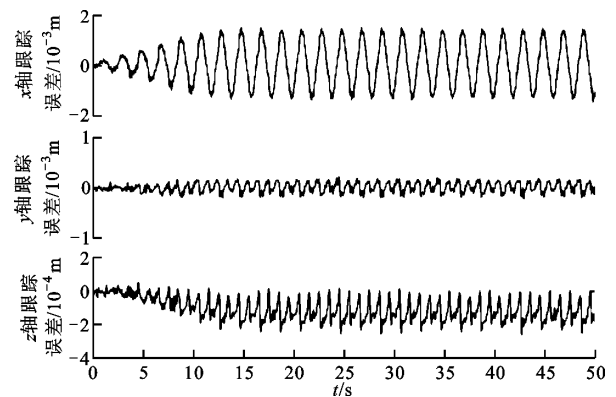


图 7 DRCEO 工作空间跟踪误差

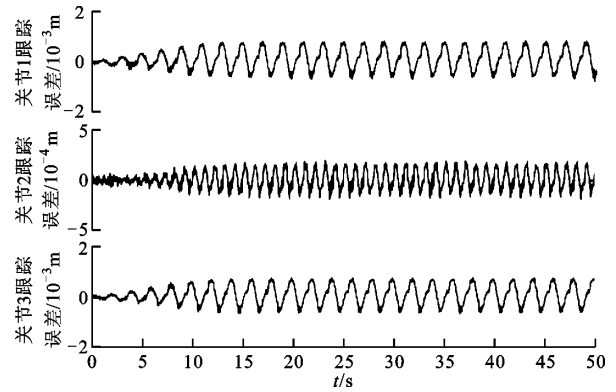


图 8 DRCEO 关节空间跟踪误差

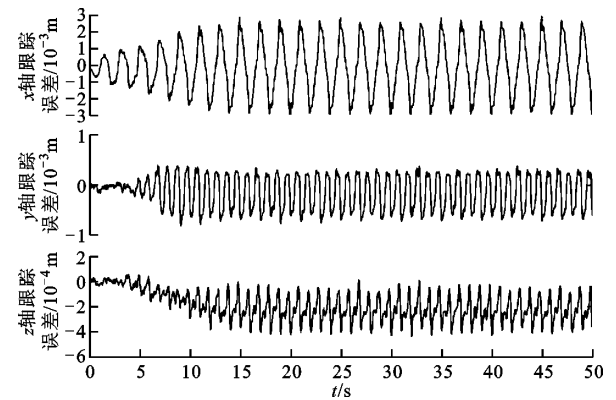


图 9 DRC 工作空间跟踪误差

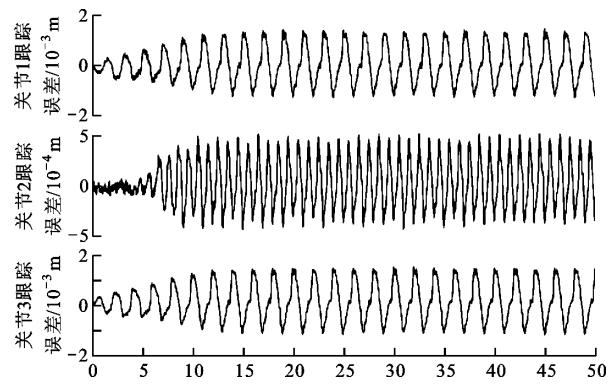


图 10 DRC 关节空间跟踪误差

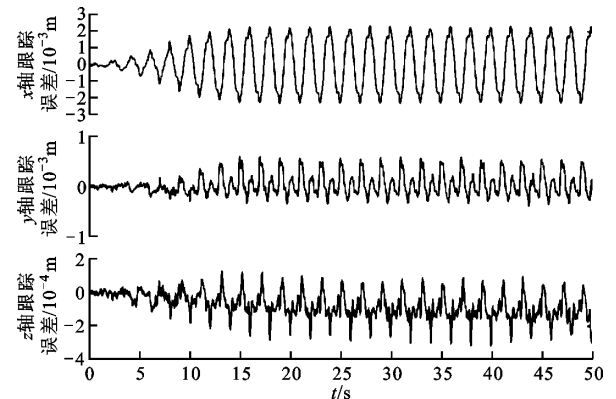


图 11 VFPIID 工作空间跟踪误差

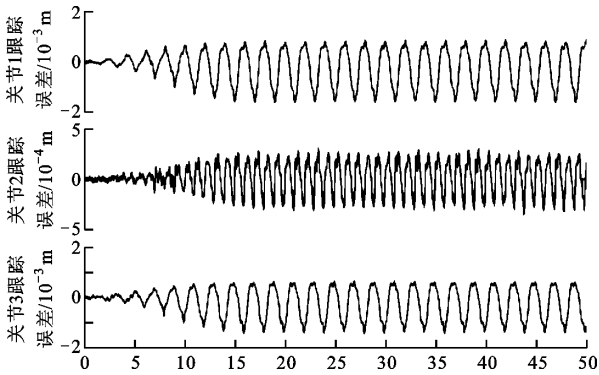


图 12 VFPID 关节空间跟踪误差

表 1 不同控制器在各轴向轨迹跟踪性能 mm

评估对象	指标	控制器		
		DRCESO	DRC	VFPID
x 轴	M_e	1.441	2.945	2.263
	μ	0.793	1.466	1.102
y 轴	M_e	0.421	0.727	0.496
	μ	0.231	0.298	0.247
z 轴	M_e	0.308	0.478	0.313
	μ	0.145	0.228	0.158
驱动器 1	M_e	0.865	1.412	1.373
	μ	0.401	0.685	0.654
驱动器 2	M_e	0.194	0.406	0.298
	μ	0.091	0.172	0.146
驱动器 3	M_e	0.823	1.468	1.255
	μ	0.371	0.678	0.619

由实验结果可知,DRCESO 控制器无论在关节空间还是笛卡尔空间都取得了最优的轨迹跟踪控制精度。这是由于 DRCESO 控制器引入了干扰观测器,实现了对关节中存在的扰动进行精确的估计和补偿,从而有效地减小了外部时变扰动对关节控制的影响。值得注意的是,VFPID 控制器的性能优于 DRC 控制器,这是因为 VFPID 控制器采用了较高的反馈增益,同时速度前馈的引入也使得控制器中包含了一部分模型信息。同时,从关节空间和笛卡尔空间的轨迹跟踪误差对比可以发现,并联机器人在关节空间和笛卡尔空间存在非线性的控制误差放大作用。另外, y 轴和 z 轴的跟踪误差表明,并联机器人在空间各自由度之间存在强耦合关系。

为了更好地验证观测器的性能,本文通过 ADAMS 软件计算各液压驱动器所受外干扰(不匹配不确定性)的名义值,并将其与 ESO 的观测结果进行对比,结果如图 13 所示。很明显,ESO 扰动观测结

果与名义值趋势大体一致,但是观测值与名义值之间有一定差值。这是由于关节不匹配不确定性中不仅包含外干扰,同时还存在系统建模误差与其他未建模扰动,这从一个侧面验证了本文 ESO 观测器的有效性。图 14 显示了 ESO 对系统匹配不确定性的干扰估计情况。

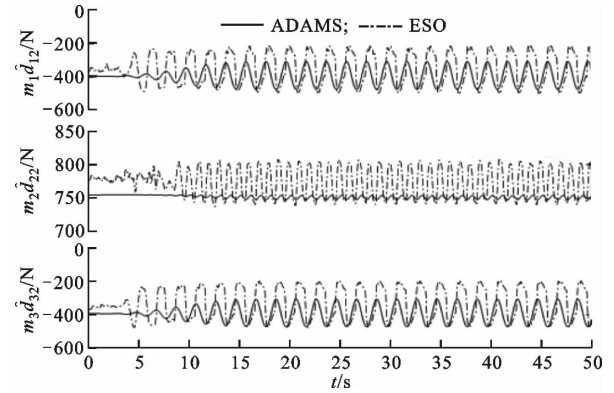


图 13 三液压缸不匹配不确定性估计

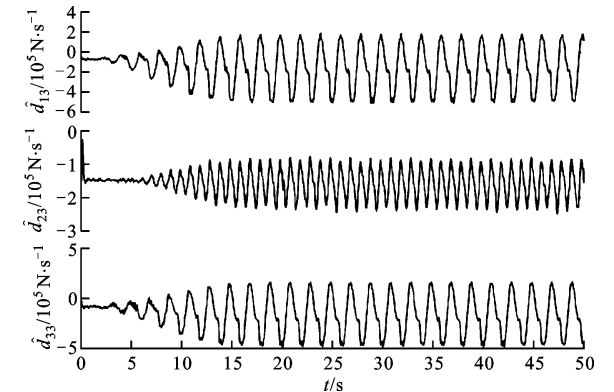


图 14 三液压缸匹配不确定性估计

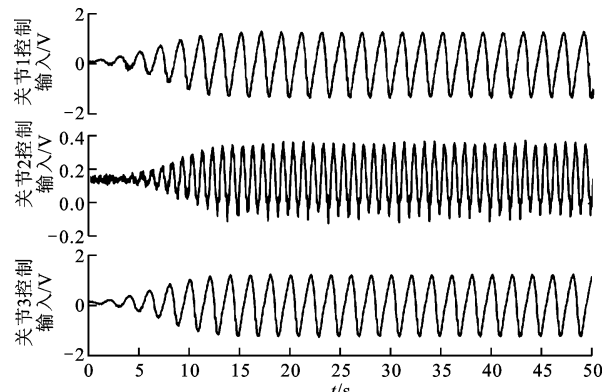


图 15 DRCESO 控制器控制输入电压

当采用 DRCESO 控制器时,3 个液压驱动器的控制输入电压和油缸的两腔油压情况分别如图 15 和 16 所示。易见,无论是控制输入电压还是油缸的两腔油压都处于有界且合理的范围之内。

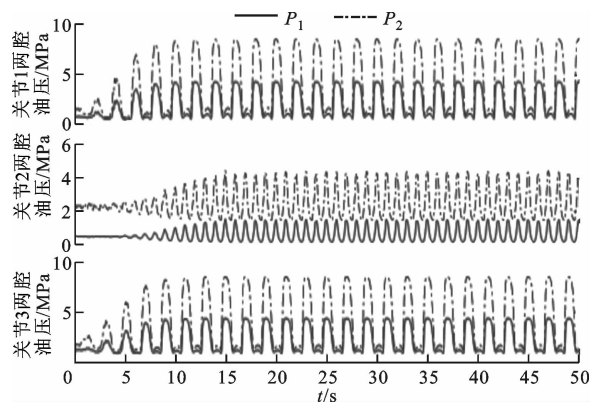


图16 DRCESO控制器三缸两腔油压

4 结 论

本文针对一种液压驱动型并联式加注机器人的空间轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于并联机器人跃度模型和关节扰动估计的分散鲁棒控制策略。通过跃度反解模型实现了并联机器人基于笛卡尔空间和关节空间的高阶连续期望轨迹映射,可有效避免传统方法在期望轨迹生成过程中可能产生的失真现象。同时,将各关节间的耦合交联项处理为各驱动器的外部干扰,并将其与关节建模误差统一视为不匹配不确定性,进而将系统分解为一组受有界扰动的关节子系统的集合。通过在关节设计两个线性扩张状态观测器,实现了对关节匹配与不匹配不确定性的同步精确估计和补偿,可使控制器不通过高增益反馈而达到处理关节强干扰的目的。实验研究表明,本文所设计的扰动观测器能准确估计出系统中存在的匹配与不匹配不确定性,同时控制器拥有良好的轨迹跟踪性能和较强的抗干扰能力。另外,该方案无需系统完整的动力学模型,控制器结构简单可靠,具有很好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 徐东光,董彦良,吴盛林,等. 液压驱动 Stewart 平台非线性自适应控制器设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 223-227, 234.
XU Dongguang, DONG Yanliang, WU Shenglin, et al. Nonlinear adaptive controller design for the Stewart platform by hydraulic driven [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 223-227, 234.
- [2] YANG Zijiang, FUKUSHIMA Y, QIN Pan. Decentralized adaptive robust control of robot manipulators using disturbance observers [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1357-1365.

- [3] PI Yangjun, WANG Xuanyin. Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances [J]. Control Engineering Practice, 2010, 20(6): 648-655.
- [4] WANG Jianqi. Robust decentralized control of robot manipulators [J]. International Journal of Systems Science, 1999, 30(3): 323-330.
- [5] 傅绍文,姚郁. 一种新的六自由度并联机器人分散控制方法[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 320-324.
FU Shaowen, YAO Yu. A new decentralized control for six degrees of freedom parallel robot [J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 320-324.
- [6] 杜艳丽,唐志国,李元春. 基于扩张状态观测器与动态面控制的可重构模块机器人反演分散控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(2): 467-471.
DU Yanli, TANG Zhiguo, LI Yuanchun. Decentralized backstepping control for reconfigurable modular robots based on ESO and DSC [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(2): 467-471.
- [7] 吴勇,杜艳丽,张炜. 基于扩张状态观测器的机械臂分散自适应模糊控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(S1): 192-195.
WU Yong, DU Yanli, ZHANG Wei. Decentralized adaptive fuzzy control for manipulator based on extended state observer [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(S1): 192-195.
- [8] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Mechatronics, 2009, 55(3): 900-906.
- [9] JAIN S, MACHII N, HORI T. Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 413-420.
- [10] SHE Jinhua, FANG Mingxing, OHYAMA Y, et al. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 380-389.
- [11] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based control tuning [C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [12] ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17: 1432-1438.
- [13] GAO Zhiqiang, HUANG Yi, HAN Jingqing. An alternative paradigm for control system design [C] //

- Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 4578-4585.
- [14] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, MA Dawei. Adaptive robust control of DC motors with extended state observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3630-3637.
- [15] LIU Huixian, LI Shihua. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [16] 赵杰, 杨永刚, 刘玉斌. 高精度轨迹跟踪的 6-PRRS 并联机器人自抗扰控制研究 [J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 791-794, 799.
ZHAO Jie, YANG Yonggang, LIU Yubin. 6-PRRS parallel robot of auto-disturbance rejection controller on high-precision trajectory tracking [J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 791-794, 799.
- [17] SU Y X, DUAN B Y, ZHENG C H, et al. Disturbance-rejection high-precision motion control of a Stewart platform [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 364-374.
- [18] YE Y, YUE Z, GU B. ADRC control of a 6-DOF parallel manipulator for telescope secondary mirror [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 12: T03006.
- [19] ZHU Xiaocong, TAO Guoliang, YAO Bin, et al. Adaptive robust posture control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles [J]. Automatica, 2008, 44(9): 2248-2257.
- [20] XU Li, YAO Bin. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(4): 444-452.
- [21] 郭卫东, 韩先国, 陈五一. 3PSS 并联机构的运动特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(1): 23-26.
GUO Weidong, HAN Xianguo, CHEN Wuyi. Kinematics analysis of parallel mechanisms 3PSS [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(1): 23-26.
- [22] 李保平, 徐华, 何庆. 某加注连接器位姿补偿机构设计及优化 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017(5): 80-83.
LI Baoping, XU Hua, HE Qing. Design and optimization of a position and pose compensation mechanism of fuel loading connector [J]. Missiles & Space Vehicles, 2017(5): 80-83.
- [23] 杨志永, 黄田, 倪艳红. 3-HSS 并联机床动力学建模及鲁棒轨迹跟踪控制 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 75-81.
YANG Zhiyong, HUANG Tian, NI Yanhong. Dynamic modeling and trail tracking robust control of 3-HSS parallel kinematic machine [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 75-81.
- [24] 何景峰, 叶正茂, 姜洪洲, 等. 基于关节空间模型的并联机器人耦合性分析 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 161-165.
HE Jingfeng, YE Zhengmao, JIANG Hongzhou, et al. Coupling analysis based on joint-space model of parallel robot [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 161-165.
- [25] LIU Ming. Decentralized PD and robust nonlinear control of robot arms [C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 1800-1805.
- [26] SERAJI H. Decentralized adaptive control of manipulators: theory, simulation, and experimentation [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 5(2): 183-201.
- [27] MERRITT H E. Hydraulic control systems [M]. New York, USA: Wiley, 1967: 45-82.
- [28] KHALIL H. Nonlinear systems [M]. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2002: 102.

[本刊相关文献链接]

- 闫宏伟, 汪洋, 马建强, 等. 轮式管道机器人过弯动态特性分析. 2018, 52(8): 87-94. [doi:10.7652/xjtuxb201808014]
- 钟德星, 杨元, 刘瑞玲, 等. 基于单目视觉的装配机器人研究及应用. 2018, 52(5): 81-87. [doi:10.7652/xjtuxb201805012]
- 成旭华, 姚建勇, 乐贵高. 电液伺服系统多模型鲁棒自适应控制. 2018, 52(11): 156-162. [doi:10.7652/xjtuxb201811023]
- 熊志林, 陶建峰, 张峰榕, 等. 采用状态估计的泵控非对称液压缸模型预测控制. 2017, 51(4): 109-115. [doi:10.7652/xjtuxb201704017]
- 徐张宝, 朱忠领, 马大为, 等. 考虑状态约束的液压系统自适应控制. 2017, 51(1): 97-102. [doi:10.7652/xjtuxb201701015]
- 徐张宝, 马大为, 姚建勇, 等. 采用干扰估计的液压系统自适应鲁棒控制. 2016, 50(8): 123-129. [doi:10.7652/xjtuxb201608020]

(编辑 荆树蓉 陶晴)