

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.036

基于新型幂次趋近律的换电机械臂跟踪控制策略

杨凤坤¹, 王立辉², 甘海庆³

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要: 乘用车动力电池换电机器人机械臂作为多输入、多输出系统, 具有高非线性、强动态耦合、参数摄动等特性, 直接影响作业跟踪控制性能。针对换电机器人机械臂轨迹跟踪控制误差大的问题, 提出一种新型趋近律的机械臂跟踪控制策略, 提高机械臂的动态性能和收敛速度。提出一种新型幂次滑模趋近律, 能够在提升收敛速度的同时具有较小系统抖振并给出其收敛时间; 结合一种快速积分滑模面, 设计机械臂跟踪控制系统的有限时间跟踪控制器; 利用李雅普诺夫稳定性定理, 证明所提出滑模控制器的有限时间收敛性质; 对设计的控制器性能进行仿真验证。实验结果表明: 所提出的幂次趋近律跟踪误差从 0.738 mm 减小到了 0.571 mm, 跟踪控制性能提升了 22.6%, 能够有效提高控制精度和收敛速度。

关键词: 乘用车; 动力电池; 换电机器人; 新型趋近律; 轨迹跟踪控制; 滑模控制

中图分类号: TP241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0186-06

Tracking Control Strategy of Electric Robotic Manipulator Based on New Reaching Law

YANG Fengkun¹, WANG Lihui², GAN Haiqing³

(1. NARI Technology Company Ltd., Nanjing 211106, China;

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: As a multi-input multi-output system, the robotic arm of the passenger car power battery electric exchange robot has characteristics of high nonlinearity, strong dynamic coupling and parameter perturbation, directly affecting the performance of job tracking control. Regarding the low execution efficiency of electric robotic manipulator, a new power reaching law manipulator tracking control strategy is proposed to improve the dynamic performance and convergence speed of the manipulator. A new sliding mode reaching law is put forward to accelerate the convergence speed and reduce the chattering problem of the system, and its convergence time is given. Combined with the fast-integral sliding mode surface, a finite time tracking controller for the manipulator tracking control system is designed. The finite-time convergence property of the proposed sliding mode controller is proved by using Lyapunov stability theorem. And the performance of the designed controller is verified. The experimental results show that the tracking error of the proposed power reaching law is reduced from 0.738 mm to 0.571 mm, and its tracking control performance is increased by 22.6%, which effectively improves control accuracy and convergence speed.

Keywords: passenger car; power battery; electric exchange robot; new reaching law; trajectory tracking control; sliding mode control

0 引言

当前乘用车换电车型和换电电池包种类繁多, 换电时间长, 换电站无法对多车型和多型号电池包实现一站式快换。如何实现多品牌/多车型/多型号电池包的共享换电是一个共性难题。文

献[1]设计了一种通用型电动汽车换电机械臂的结构。该机械臂的端部设有电池包加解锁装置, 通过视觉传感器的图像信息, 快速定位电池包锁扣的坐标, 可实现精准定位^[2]、快速规划、路径跟踪控制、自动加解锁, 可以有效解决电池包尺寸不一导致多型号兼容性换电的难题。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501603)

第一作者简介: 杨凤坤(1988—), 女, 山东临沂人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为充换电设施关键技术、关键设备, 64831838@qq.com。

通用型换电机械臂是一个多输入、多输出系统,具有高非线性、强动态耦合、参数摄动和未知干扰等不良特性^[3]。机械臂的跟踪控制是近年来的研究重点和难点。目前有关机械臂的轨迹跟踪控制仍存在着复杂的问题,滑模控制是解决这类问题的主要方法之一。文献[4]针对不确定性机械臂,设计了一种非奇异快速终端滑模控制器,并利用 Lyapunov 稳定性定理证明了该方法的指数趋近性能。文献[5]提出了改进型趋近律的滑模控制方法,可以有效解决振动基机械臂在振动影响下的快速轨迹跟踪问题。文献[6]考虑驱动器饱和和非线性现象,提出了多自由度机械臂输出反馈有限时间 PD 同步控制策略,并证明其闭环稳定性。文献[7]设计了可变增益的滑模控制方案,并利用径向基神经网络动态适应未建模动态和未知扰动,有效地抑制了外部扰动。文献[8]同时考虑了外部干扰、模型不确定性和执行器饱和问题,提出了一种自适应非奇异固定时间滑模控制器,有效避免了滑模面的奇异性问题,并保证了固定时间收敛到零域附近。文献[9]基于扩展观测器估计未建模动态、负载变化和滤波参数摄动等不确定项,实现了负载变化下滑模控制策略。文献[10]考虑挠性附件产生振动对系统的影响,设计了基于模态观测器的自适应滑模控制器,解决了外部干扰和惯性矩阵未知问题。文献[11]—文献[13]分别设计了自适应滑模控制器、分数阶非奇异滑模控制器、自适应反步容错控制器以实现机械臂轨迹跟踪问题。文献[14]—文献[16]结合扰动观测器和有限时间控制技术,实现了对集总干扰的精准估计。但以上这些方法均未设计合适的滑模趋近律来减小抖振,缩短系统的响应时间。

本文设计了一种新型滑模趋近律,提出基于新型趋近律的换电机器人机械臂跟踪控制策略,证明了该控制器的有限时间收敛性质。通过将该趋近律应用于机械臂的轨迹跟踪仿真分析,验证了该新型趋近律在加快系统收敛和控制抖振中的可行性与有效性。

1 换电机器人动力学模型

根据已有设计的电动汽车换电机械臂的结构,将换电机器人简化为二自由度机械臂。采用固定基座的二自由度机械臂,可对电动汽车进行自动化换电操作。采用拉格朗日方法等动力学方法建立二关节机械臂的动力学模型^[17]:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$ 分别为机械臂的位置、角速度、角加速度($\mathbf{q} = [q_1, q_2]^T$); $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为机械臂的惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为离心力矩阵和哥氏力矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为机械臂的重力矢量; $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$ 为摩擦力构成的矩阵; $\boldsymbol{\tau}_d$ 为外加扰动构成的矩阵,一般假设该外加扰动具有上界,即 $|\boldsymbol{\tau}_d| \leq d$; $\boldsymbol{\tau}$ 为设计的控制律。

针对二自由度机械臂,忽略其关节质量,两个连杆的质量分别为 m_1 、 m_2 ,连杆的长度分别为 l_1 、 l_2 , q_1 、 q_2 分别为两个关节当前的角度。二自由度机械臂的参数矩阵为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_2 (q_1 + q_2) \\ m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos(q_2) + m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 g l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \xi_1 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \xi_2 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $M_{11} = (m_1 + m_2) l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_1 m_2 \cos(q_2)$; $M_{12} = M_{21} = l_1 l_2 m_2 \cos(q_2)$; $M_{22} = l_2^2 m_2$ 。

2 控制策略设计

2.1 趋近律设计

滑模趋近律可以使系统从初始状态收敛到滑模面,并确保系统状态在滑模面上。通过设计合理的趋近律,可改善趋近运动的动态品质,以实现系统的收敛和稳定。控制器设计的优劣可通过系统收敛时间和系统抖振评价。选取合适的趋近率可以实现相同的控制抖振下更快地趋于0或在相同收敛速度的同时削减抖振。常用的趋近律有:

幂次趋近律^[18](power rate reaching, PRL):

$$\dot{\sigma} = -k \sigma^{-\beta} \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (6)$$

指数趋近律^[19](exponential reaching law, ERL):

$$\dot{\sigma} = -\frac{k}{D(\sigma)} \operatorname{sgn}(\sigma); D(\sigma) = \alpha_2 + (1 - \alpha_2) e^{-\beta |\sigma|} \quad (7)$$

为了进一步加快趋近滑模面的速度和减小抖振幅度,提出一种新颖的幂次滑模趋近律:

$$\dot{\sigma} = -\frac{k}{\eta + \gamma(1 + |\sigma|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}} |\sigma|^\alpha \text{sign}(\sigma) \quad (8)$$

式中: $0 < \alpha < 1$; $\eta + \gamma < 1$; $\mu = \nu |\sigma(0)|^{1-\alpha}$; $\sigma(0)$ 为切换函数的初始值; k, ν 为正数。

$$t_r = -\frac{1}{k} \int_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} [\eta + \gamma(1 + |\sigma|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}] |\sigma|^{-\alpha} \text{sign}(\sigma) d\sigma = -\frac{1}{k} \int_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} \eta \sigma^{-\alpha} d\sigma - \frac{1}{k} \int_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} \gamma(1 + \sigma^{1-\alpha}/\mu)^{-1} \sigma^{-\alpha} d\sigma \quad (10)$$

其中第 2 个定积分求解为

$$\int_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} \gamma(1 + \sigma^{1-\alpha}/\mu)^{-1} \sigma^{-\alpha} d\sigma = (1 - \alpha) \int_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} \frac{\gamma\mu}{\mu + \sigma^{1-\alpha}} d(\sigma^{1-\alpha}) = \gamma\mu(1 - \alpha) \ln(\mu + \sigma^{1-\alpha}) \Big|_{\sigma(0)}^{\sigma(t_r)} \quad (11)$$

可以得到趋近时间为

$$t_r = \frac{1}{k} \left[\frac{\eta}{1-\alpha} |\sigma(0)|^{1-\alpha} + \gamma\mu(1-\alpha) \ln \left(1 + \frac{|\sigma(0)|^{1-\alpha}}{\mu} \right) \right] \quad (12)$$

为说明本文新型趋近律在趋近运动阶段和滑动运动阶段的优势,在相同的条件下,将新型趋近律与幂次趋近律、指数趋近律进行比较,结果如图 1 所示。

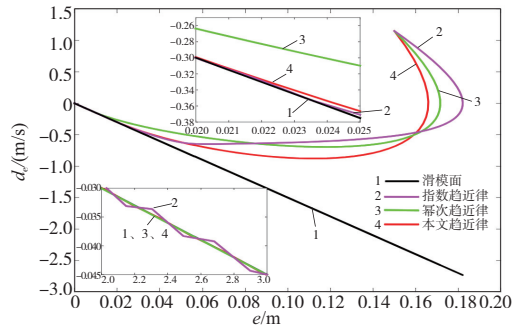


图 1 3 种趋近律的滑模运动相轨迹

由图 1 可以看出,在趋近运动阶段,新型趋近律表现出快速性。靠近滑模面时,对系统抖振进行了有效控制,同时弥补了幂次趋近律收敛速度慢的问题。当跟踪误差较大时($e \geq 0.02$),3 种趋近律都可以快速地趋近于滑模面。但是,本文趋近律和指数趋近律几乎具有相同的收敛速度,而幂次趋近律收敛相对较慢一些。本文提出的趋近律可以提高滑模面对系统轨迹吸引力,加快系统收敛。当跟踪误差较小时($e < 0.02$),3 种趋近律均可以在滑模面附近运动。通过局部放大图可以看到,指数趋近律在接近平衡点时,出现了明显的抖振现象,其他两种趋近律几乎未出现抖振现象。通过指数趋近律设计的控制器不能收敛到 0,本

$$\ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) [\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) - \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) - \boldsymbol{\tau}_d] = -\frac{k}{\eta + \gamma(1 + |\mathbf{S}|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}} |\mathbf{S}|^\alpha \text{sign}(\mathbf{S}) - \kappa_1 \text{diag}\{|\dot{\mathbf{e}}|^{p/q}\} - \kappa_2 \text{diag}\{|\mathbf{e}|^{p/(2q-p)}\} \quad (19)$$

对式(8)进行积分,可以得到:

$$-k dt = [\eta + \gamma(1 + |\sigma|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}] |\sigma|^{-\alpha} \text{sign}(\sigma) \quad (9)$$

切换函数 σ 到达滑模面的时间为 t_r , 对式(9)从 $0 \sim t_r$ 积分可得:

文趋近律和幂次趋近律可以收敛到 0, 可以消除抖振现象, 可以保障系统在有干扰和模型不确定时的不灵敏性时, 维持滑模控制器抗干扰能力强的优势。因此, 本文提出的新型趋近律在误差取极小值或极大值的情况下均有良好的表现。

2.2 滑模控制器设计

为提高机械臂跟踪期望轨迹的动态性能, 提出一种新颖的滑模函数:

$$\sigma_1 = \dot{e}_1 + F(e_1) \quad (13)$$

式中: σ 为设计的滑模函数, $F(e_1) = \int_0^t (\kappa_1 \dot{e}_1^{p/q} + \kappa_2 e_1^{p/(2q-p)}) dt$, $p > q > 0$ 为正奇数, $\kappa_1 > 0$, $\kappa_2 > 0$ 为常数; e_1 为机械臂关节 1 的跟踪误差。下面证明所提出滑模函数的稳定性。

假设机械臂的期望轨迹为 $\mathbf{q}_d$, 其 1 阶导数 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 和 2 阶导数 $\ddot{\mathbf{q}}_d$ 有界, 定义跟踪误差为:

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} = [e_1, e_2]^T \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}} \quad (15)$$

式中 e_2 为机械臂关节 2 的跟踪误差。根据滑模函数式(13), 设计如下滑模面:

$$\mathbf{S} = \mathbf{e} + \mathbf{F}(\mathbf{e}) = [\sigma_1, \sigma_2]^T \quad (16)$$

式中: $\sigma_1 = e_1 + F(e_1)$; $\sigma_2 = e_2 + F(e_2)$; $\mathbf{S}$ 的导数为

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{e}} + \kappa_1 \text{diag}\{|\dot{\mathbf{e}}|^{p/q}\} + \kappa_2 \text{diag}\{|\mathbf{e}|^{p/(2q-p)}\} \quad (17)$$

式中 $\text{diag}\{\cdot\}$ 表示对角矩阵。另一方面, 设计向量形式的趋近律为

$$\dot{\mathbf{S}} = -\frac{k}{\eta + \gamma(1 + |\mathbf{S}|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}} |\mathbf{S}|^\alpha \text{sign}(\mathbf{S}) \quad (18)$$

将式(17)代入式(1)中, 可以得到:

使用鲁棒项 $\tau_r = D \text{sign}(S)$ 代替 τ_d , 其中 $D > d$ 。可得到换电机器人机械臂轨迹跟踪控制律为

$$\tau = M(q) \{ \ddot{q}_d + \kappa_1 \text{diag} \{ |\dot{e}|^{p/q} \} + \kappa_2 \text{diag} \{ |e|^{p/(2q-p)} \} \} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + D \text{sign}(S) + \frac{k}{\eta + \gamma (1 + |S|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}} M(q) |S|^\alpha \text{sign}(S) \quad (20)$$

2.3 稳定性分析

引理 1^[20]: 针对非线性系统, 若存在定义在包含原点领域 $U \in R^n$ 内的连续可微的正定函数 $V(x)$, 满足

$$\dot{V}(x) + cV^\alpha(x) \leq 0 \quad (21)$$

式中: $c > 0; 0 < \alpha < 1$ 。则系统是有限时间稳定, 即在有限时间内到达平衡点的领域内, 所用时间可表示为

$$T \leq \frac{1}{c(1-\alpha)} V^{1-\alpha}(x(t_0)) \quad (22)$$

引理 2^[21]: 下面系统的原点是一个全局有限时间稳定的平衡点:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\kappa_2 \text{sign}(x_2) |x_2|^\gamma - \kappa_1 \text{sign}(x_1) |x_1|^{\gamma/(2-\gamma)} \end{cases} \quad (23)$$

式中: κ_1, κ_2 为正数; $0 < \gamma < 1$; 多项式 $\gamma^2 + \kappa_2\gamma + \kappa_1$ 是 Hurwitz。

定理 1: 本文设计的滑模函数式(13)将在有限时间内收敛至平衡点领域内, 有限时间的上界为

$$T_1 \leq \frac{2}{\nu(1-\alpha)} V^{(1-\alpha)/2}(0) \quad (24)$$

式中 ν 在后续证明中给出。

证明: 选择 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} S^T M(q) S \quad (25)$$

对其求导, 可得

$$\dot{V} = S^T M(q) \dot{S} \quad (26)$$

由式(17)可以计算:

$$\begin{aligned} M(q) \dot{S} &= M(q) \{ \ddot{e} + \kappa_1 \text{diag} \{ |\dot{e}|^{p/q} \} + \\ &\kappa_2 \text{diag} \{ |e|^{p/(2q-p)} \} \} = M(q) \ddot{q}_d - M(q) \ddot{q} + \\ &\kappa_1 M(q) \text{diag} \{ |\dot{e}|^{p/q} \} + \kappa_2 M(q) \text{diag} \{ |e|^{p/(2q-p)} \} \end{aligned} \quad (27)$$

将式(20)代入上式, 可以得到

$$\dot{V} = - \frac{k}{\eta + \gamma (1 + |S|^{1-\alpha}/\mu)^{-1}} M(q) |S|^{\alpha+1} - D \text{sign}(S) + \tau_d \quad (28)$$

由于外部干扰有上界值 $|\tau_d| \leq d$, 而且 $D \geq d$ 。因此, $-D \text{sign}(S) + \tau_d \leq 0$ 。由此可得

$$\dot{V} \leq -\nu V^{(\alpha+1)/2} \quad (29)$$

式中: $\nu = \frac{k}{(2\eta + \gamma) \{ \lambda_{\max} M(q) \}^{(\alpha+1)/2}}$, 其中 $\lambda_{\max} M(q)$ 表示 $M(q)$ 最大的特征值。明显地, 所设计的控制律式(20)可以在有限时间 T_1 内收敛到 0。

当系统在滑模运动的情况下, $\sigma_1 = 0$ 。此时

$$\dot{e}_1 = - \int_0^t (\kappa_1 \text{sign}^{p/q}(e_1) + \kappa_2 \text{sign}^{p/(2q-p)}(e_1)) dt \quad (30)$$

对式(30)求导, 可以得到

$$\ddot{e}_1 = -\kappa_1 \text{sign}^{p/q}(e_1) - \kappa_2 \text{sign}^{p/(2q-p)}(e_1) \quad (31)$$

根据引理 2 可知, 式(31)是全局有限时间收敛到平衡点 $(\dot{e}_1, e_1) = (0, 0)$ 。

3 仿真实验

为验证换电机器人机械臂基于改进型趋近律控制算法的有效性, 搭建了二关节串联机械臂控制系统, 对本文提出的新型趋近律的滑模控制策略进行性能验证。

在实验中, 机械臂模型具体的参数值为: $m_1 = 50, m_2 = 125, l_1 = 1.2, l_2 = 2.0, \xi_1 = \xi_2 = 12, g = 9.81$ 。滑模控制器各参数为: $\alpha = 0.6, \gamma = 0.4, \eta = 0.4, \nu = 1, p = 9, q = 7, \kappa_1 = 3, \kappa_2 = 1$ 。根据 2.1 节的幂次趋近律、指数趋近律和本文新型趋近律, 分别设计二自由度机械臂的滑模控制器。其中, 施加的外部干扰设置为 $\tau_d = [2 \sin(2\pi t); 3 \cos(2\pi t)]$ 。仿真结果如图 2—图 4 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

从图 2 和图 3 中可以看出, 即使存在外部干扰的情况下, 基于 3 种趋近律设计的滑模控制器均可以很好地跟踪二自由度机械臂的关节位置和速度。3 种控制器对外部干扰具有较强的抗干扰性能。但是, 在收敛速度方面, 本文趋近律和指数趋近律可以更快地跟踪期望位置, 而幂次趋近律跟踪速度最慢。在跟踪精度方面及关节 1 和关节 2 的跟踪控制精度方面, 本文趋近律的位置跟踪方均根误差分别为 0.571 0 mm、1.432 8 mm, 而指数趋近律和幂次趋近律的方均根误差分别为 0.738 0 mm、1.420 8 mm 和 0.635 0 mm、1.428 8 mm。可以得出, 与指数趋近律和幂次趋近律相比, 所提出的趋近律的跟踪误差从 0.738 0 mm 减小到了

0.571 0 mm,跟踪控制性能提升了 22.6%。本文所提出新型趋近律的滑模跟踪控制策略具有更高的跟踪精度。

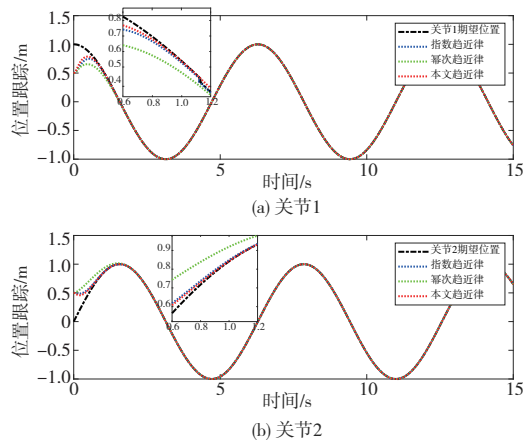


图2 3种趋近律的关节位置跟踪控制

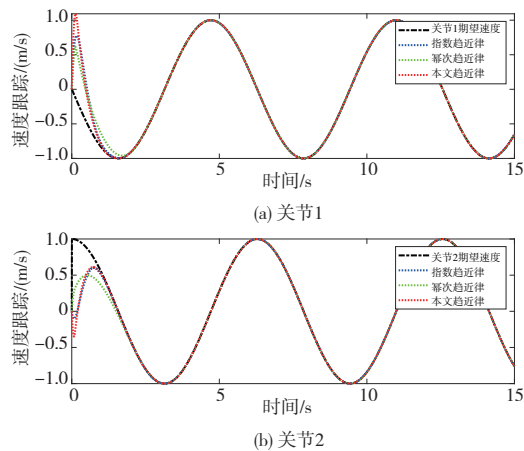


图3 3种趋近律的关节速度跟踪控制

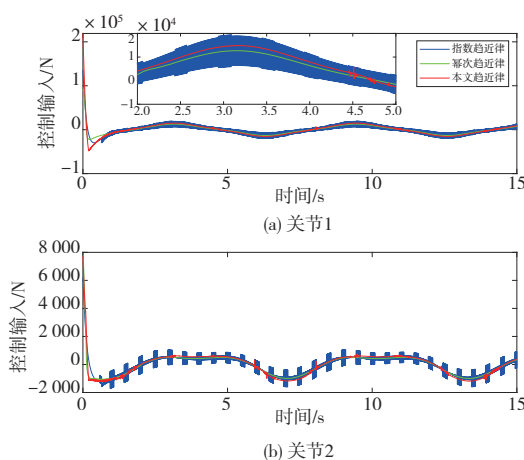


图4 机械臂控制输入

从图4中可以看出,3种控制器的控制输入具有相似的控制趋势。但是,指数趋近律的控制

输入具有较大的抖振,不利于执行机构的长期稳定运行。本文所提出的趋近律和幂次趋近律均能明显抑制抖振现象。

4 结语

本文提出一种新型趋近律的机械臂跟踪控制策略,进一步提高了机械臂的动态性能和收敛速度。提出一种新型滑模趋近律,并与幂次趋近律和指数趋近律在收敛性能上进行了分析比较,本文趋近律在提升收敛速度的同时系统抖振较小,并给出其收敛时间。结合一种快速积分滑模面,设计了机械臂跟踪控制系统的有限时间跟踪控制器,并证明了所提出控制器的有限时间收敛性质。实验结果表明,与指数趋近律和幂次趋近律相比,所提出的趋近律的跟踪误差从 0.738 0 mm 减小到了 0.571 0 mm,跟踪控制性能提升了 22.6%。本文所提出的新型趋近律滑模跟踪控制策略能够提高跟踪精度、加快收敛速度,并削弱抖振现象。

参考文献:

- [1] 刘兴伟. 一种电动汽车换电机械臂结构: CN202781175U[P]. 2013-03-13.
- [2] 谭荣凯,杨浩秦,王尧尧. 基于双目视觉的绳驱动飞行机械臂目标识别与抓取[J]. 机械制造与自动化, 2024,53(1):191-195.
- [3] 朱敏,李文安. 基于力矩负反馈的柔性关节机器人自适应分层滑模控制方法[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6): 257-261.
- [4] ZHANG L Y, SU Y X, WANG H H. A nonsingular fast terminal sliding mode control with an exponential reaching law for robot manipulators[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(5): 1575-1587.
- [5] 郭宇飞,许盛悦,李慧子,等. 基于改进滑模趋近律的振动基机械臂的有限时间轨迹跟踪控制[J]. 振动与冲击, 2022, 41(20): 86-92, 194.
- [6] 王海红,季祥,翟天嵩. 多自由度机械臂的饱和输出反馈有限时间同步位置控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1079-1088.
- [7] 赵兴强,刘振,高存臣. 机械臂系统自适应神经网络滑模控制器设计[J]. 控制工程, 2023, 30(9): 1624-1629.
- [8] SAI H Y, XU Z B, HE S, et al. Adaptive nonsingular fixed-time sliding mode control for uncertain robotic manipulators under actuator saturation[J]. ISA Transactions, 2022, 123: 46-60.
- [9] 董锋斌,刘昌建,赵永玮,等. 基于扩张状态观测器的DFIG网侧变换器滑模控制[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 206-214.

- [10] 宋欣,王娜,李广有. 基于模态观测器的挠性航天器自适应滑模控制[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):161-165.
- [11] BAEK J, JIN M L, HAN S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6):3628-3637.
- [12] WANG Y, GU L Y, XU Y H, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10):6194-6204.
- [13] VAN M, MAVROVOUNIOTIS M, GE S S. An adaptive backstepping nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(7):1448-1458.
- [14] GONG W Q, LI B, YANG Y S, et al. Fixed-time integral-type sliding mode control for the quadrotor UAV attitude stabilization under actuator failures[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 95:105444.
- [15] LIU J J, SUN M W, CHEN Z Q, et al. Super-twisting sliding mode control for aircraft at high angle of attack based on finite-time extended state observer [J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 99(4):2785-2799.
- [16] 梁天添,王润泽,李科信,等. 基于扰动观测器的卫星姿态控制系统自适应有限时间容错控制[J]. 中国惯性技术学报,2022,30(3):403-411.
- [17] 赵凯旋,王树波,李冬伍. 基于改进型趋近律的机械臂滑模控制[J]. 控制工程,2022,29(12):2221-2226.
- [18] GAOW B, HUNG J C. Variable structure control of nonlinear systems: a new approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1):45-55.
- [19] FALLAHAC J, SAAD M, KANAAN H Y, et al. Sliding-mode robot control with exponential reaching law [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2):600-610.
- [20] BHATS P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3):751-766.
- [21] BHATS P, BERNSTEIN D S. Geometric homogeneity with applications to finite-time stability [J]. Mathematics of Control, Signals and Systems, 2005, 17(2):101-127.

收稿日期:2023-07-26

(上接第179页)

1) 本文研究的方法中气动模型能够跟随结构位移不断修正,同时在结构静力分析时可进行随动加载,可对民用大型飞机在大变形构型下的配平特性作出较为准确的预测,为载荷设计提供重要依据;

2) 对比线性与非线性计算结果可以看出,载荷严重工况线性配平分析与非线性配平分析的结果差异较大,所得全机攻角、结构变形以及载荷分布均存在一定程度的不同,说明在结构发生较大变形后,线性方法无法对载荷设计正确指导;

3) 对比机翼不同主梁刚度计算结果可以看出,弹性载荷计算结果和机翼主梁刚度直接相关,主梁刚度越小,线性和非线性配平结果差异则越大。

参考文献:

- [1] XIE C C. Static/dynamic coupling theory and test study

of aircraft aeroelastic stability [D]. Beijing: Beihang University, 2009.

- [2] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册(第9册 载荷、强度和刚度)[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [3] 杨超,吴志刚,万志强,等. 飞行器气动弹性原理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [4] RODDEN W P, JOHNSON E H. MSC/Nastran aeroelastic analysis user's guide V68 [M]. Los Angeles: MSC Software Corporation, 1994.
- [5] 刘耘臻,万志强,杨超. 飞行载荷外部气动力的二次规划等效映射方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3):541-547.
- [6] 李旭阳,万志强,王晓喆,等. 考虑多巡航工况的大型飞机气动弹性优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8):1628-1637.
- [7] 刘焱,杨澜,谢长川. 基于曲面网格法的柔性飞机静气动弹性分析[J]. 工程力学, 2018, 35(2):249-256.

收稿日期:2023-08-16