

doi: 10.7690/bgzdh.2025.02.021

基于改进趋近律的带电作业机器人机械臂自适应滑模控制

花国祥¹, 夏阳², 符门科², 许婧²

(1. 无锡学院自动化学院, 江苏 无锡 214105; 2. 无锡广盈集团有限公司安全监察质量部, 江苏 无锡 214125)

摘要: 为提高带电作业机器人机械臂的轨迹跟踪精度, 提出一种改进趋近律的机械臂自适应滑模控制方法。通过建立 2 自由度机械臂动力学模型, 利用观测器估计外界干扰并加以补偿, 对未观测到的干扰通过设计自适应率来估计补偿。根据传统滑模存在的高频抖振问题, 引入非线性函数来改进趋近律, 减小抖振的影响。样机验证结果表明: 该控制策略可以有效提高带电作业机器人的作业精度和响应速度, 从而提升带电作业的稳定性。

关键词: 带电作业机器人; 机械臂; 滑模控制; 干扰观测器

中图分类号: TP242; TP273 **文献标志码:** A

Adaptive Sliding Mode Control of A Robotic Arm of a Power-carrying Robot Based on an Improved Convergence Law

Hua Guoxiang¹, Xia Yang², Fu Menke², Xu Jing²

(1. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China;

2. Safety Supervision and Quality Department, Wuxi Guangying Group Co., Ltd., Wuxi 214125, China)

Abstract: In order to improve the trajectory tracking accuracy of the manipulator of a hot-line working robot, an adaptive sliding mode control method based on an improved reaching law is proposed. The dynamic model of 2-Dof manipulator is established, and the observer is used to estimate and compensate the external disturbance, and the adaptive law is designed to estimate and compensate the unobserved disturbance. According to the high frequency buffeting problem of traditional sliding mode, the nonlinear function is introduced to improve the reaching law and reduce the influence of buffeting. The prototype verification results show that the control strategy can effectively improve the working accuracy and response speed of the hot-line working robot, thereby enhancing the stability of hot-line working.

Keywords: live working robot; manipulator; sliding mode control; disturbance observer

0 引言

滑模控制能够提高带电作业机器人机械臂系统的控制精度, 且算法实现较为简单^[1]; 但在工程应用中, 存在的抖振问题会加剧机械臂的磨损、劣化系统性、使稳定性变差^[2]。

针对滑模控制中的抖振问题, 张俊辉等^[3]使用饱和函数代替符号函数, 对趋近律进行改进, 从而削弱抖振影响; 鲁彩丽等^[4]在鲁棒控制中引入模糊控制和滑模控制, 可有效降低滑模控制中抖振的影响; 徐宝珍等^[5]针对机械臂控制的鲁棒性问题, 使用非奇异终端滑模面加快了轨迹误差的收敛速度; 潘润超等^[6]设计自适应律适应对象变化, 具有较好的跟踪性能; 李艳等^[7]提出新型趋近律, 加快了误差收敛速度, 增强了系统的抗干扰性; 刘鹤松等^[8]将时延估计与极点配置相结合, 可以提高控制精度。

针对带电作业机器人中的机械臂系统, 笔者提出了一种改进趋近律的自适应滑模控制策略, 以提

高系统的轨迹跟踪精度与误差收敛速度。

1 带电作业机器人机械臂模型

图 1 为 2 自由度机械臂系统结构简图。其中, l_1 和 l_2 分别为机械臂 2 个连杆的长度, m_1 和 m_2 分别为 2 个连杆的质量, q_1 和 q_2 为连杆相对于水平轴转动的角度。

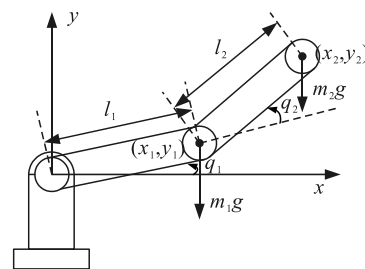


图 1 二自由度机械臂系统结构

构造拉格朗日函数 L 来反映机械臂系统的动能与势能的相互关系^[9]。

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q). \quad (1)$$

收稿日期: 2024-07-22; 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20230173); 南方电网有限公司科技项目(031400KK52220012);

无锡市“太湖之光”科技攻关项目(K20231019)

第一作者: 花国祥(1985—), 男, 江苏人, 博士。

式中： $L(q, \dot{q})$ 为拉格朗日函数； $K(q, \dot{q})$ 为机械臂系统的全部动能； $P(q)$ 为系统的总势能； $q=[q_1, q_2, \dots, q_n]$ 为机械臂系统关节的位置； $\dot{q}=[\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]$ 为机械臂关节的速度； n 为机械臂的自由度个数^[10]。

机械臂的动力学方程为：

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + d. \quad (2)$$

式中： $M(q)$ 为惯性矩阵； $C(q, \dot{q})$ 为离心力矩阵； $G(q)$

为重力项矩阵； q 为旋转关节旋转角 θ ； τ 为旋转关节力矩，移动关节力^[11]； d 为总扰动。

2 控制器设计

本文中控制系统结构如图 2 所示， q_d 为关节期望位置， \dot{q}_d 为关节期望角速度， d 为外界干扰总和， \hat{d} 为观测器对扰动的估计值， \hat{E} 为自适应律的估计值， q 为关节实际位置， \dot{q} 为关节实际角速度。

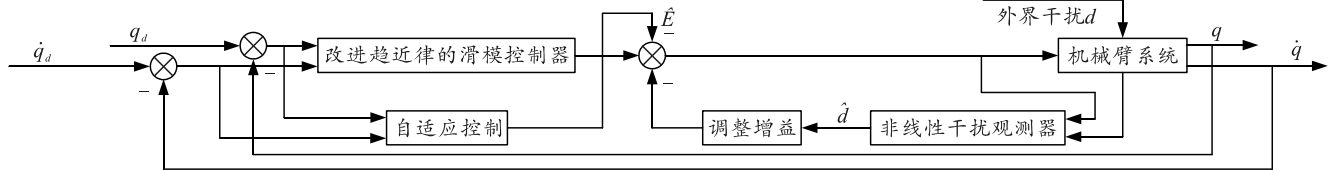


图 2 机械臂控制系统结构

采用线性滑模面，定义 q_d 为机械臂关节的期望轨迹， q 关节为行进轨迹，轨迹跟踪误差为 $e=q(t)-q_d(t)$ 。滑模切换面的公式表述如下：

$$s = \dot{e} + \Lambda e. \quad (3)$$

式中 $\Lambda = \text{diag}\{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n\} (\Lambda_n > 0)$ 。

传统趋近律基于非线性函数 $\text{fal}(s)$ ：

$$\text{fal}(s) = \begin{cases} |s|^\alpha \text{sign}(s), & |s| \geq \delta \\ s/\delta^{1-\alpha}, & |s| < \delta \end{cases}. \quad (4)$$

式中 $0 < \delta < 1, \alpha > 0$ 。为改进趋近律结合双曲正切函数，得到新型趋近律：

$$\dot{s} = -k_1 \text{fal}(s) - k_2 |s|^\alpha \tanh(s) - k_3 s. \quad (5)$$

式中： $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0, \alpha > 0$ ； $\tanh(s)$ 为双曲面正切函数。

定义辅助向量 z ：

$$z = \hat{d} - p(q, \dot{q}). \quad (6)$$

笔者设计干扰观测器为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= -L(q, \dot{q})z + L(q, \dot{q})[C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - \tau - p(q, \dot{q})] \\ \hat{d} &= z + p(q, \dot{q}) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

将无法观测到的部分估计值标记为 $\hat{E} = d - \hat{d}$ ，估计误差定义为 $\tilde{E} = E - \hat{E}$ 。定义自适应滑模控制的 Lyapunov 函数：

$$V_1 = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2\beta} \tilde{E}^T \tilde{E}. \quad (8)$$

可得自适应律为：

$$\hat{E} = \beta (M^{-1})^T s. \quad (9)$$

取 Lyapunov 函数 V 为：

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2\beta} \tilde{E}^T \tilde{E} + \frac{1}{2} E^T E. \quad (10)$$

对时间求微分得：

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + E^T \dot{E}. \quad (11)$$

得：

$$\dot{V} = s^T (F - \hat{F} - k_1 \text{fal}(s) - k_2 |s|^\alpha \tanh(s) - k_3 s) - \sum_{i=1}^n F_i L_i F_i. \quad (12)$$

选择合适的增益矩阵就能使 $\dot{V} \leq 0$ ；因此，所设计的控制器符合李雅普诺夫稳定性准则。

3 样机实验验证

为了验证文中提出的基于干扰观测器的自适应滑模控制方法的应用性能，对带电作业机器人的机械臂进行了测试，测试平台如图 3 所示。样机的主控制器采用 STM32F407IGT6，机械臂的关节末端装有位置传感器，可将实时坐标上传到上位机控制端，通过控制端观察设备运动状态并操控机械臂。

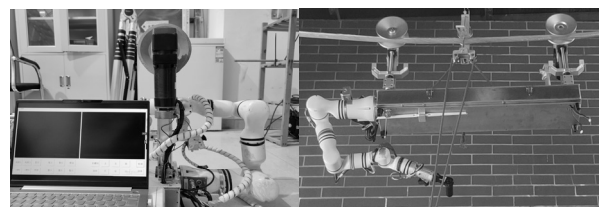


图 3 机械臂测试平台

实验设定了正弦信号，使用千分表测试机械臂的输出位移效果，通过控制器发送指令，使机械臂关节到达设定位置，并将位置传感器的实时数据上传上位机，待坐标稳定后，记录收敛时间与输出位移误差。轨迹跟踪实验结果如表 1 所示。