

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.018

## 带电作业机器人机械臂自适应滑模控制方法

尹书哲<sup>1</sup>, 花国祥<sup>2,3</sup>, 黄兴<sup>3</sup>, 钱承山<sup>1,3</sup>, 夏阳<sup>4</sup>, 符门科<sup>4</sup>, 许婧<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 南京 210044; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;  
3. 无锡学院自动化学院, 江苏 无锡 214105; 4. 无锡广盈集团有限公司安全监察质量部, 江苏 无锡 214174)

**摘要:** 为解决带电作业机器人在复杂环境下机械臂作业时易受干扰而影响控制精度的问题, 提出一种自适应超螺旋全局非奇异终端滑模(super-twisting algorithm global nonsingular terminal sliding mode control, STAGNTSMC)的带电作业机器人机械臂的控制方法。对带电作业机器人机械臂动力学模型进行建模, 设计一种全局非奇异终端滑模函数, 引导系统轨迹从一开始就到达切换面; 在切换控制中加入自适应超螺旋算法(super-twisting algorithm, STA), 采用自适应的方法估计未知扰动, 利用死区技术将自适应律收敛到稳定值。仿真结果表明, 该方法能有效提高带电作业机器人的作业精度和响应速度。

**关键词:** 带电作业机器人; STA; 轨迹跟踪控制; 滑模控制

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Adaptive Sliding Mode Control Method of Robotic Arm for Power-carrying Operation Robot

Yin Shuzhe<sup>1</sup>, Hua Guoxiang<sup>2,3</sup>, Huang Xing<sup>3</sup>, Qian Chengshan<sup>1,3</sup>, Xia Yang<sup>4</sup>, Fu Menke<sup>4</sup>, Xu Jing<sup>4</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;  
2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
3. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China;  
4. Safety Supervision and Quality Department, Wuxi Guangying Group Ltd., Wuxi 214174, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of power-carrying operation robot's robotic arm operation in complex environment is susceptible to interference and affect the control accuracy, an super-twisting algorithm global nonsingular terminal sliding mode control (STAGNTSMC) method for the robotic arm of power-carrying operation robot is proposed. The dynamics model of the robotic arm of the power-carrying operation robot is modeled, and a global nonsingular terminal sliding mode function is designed to guide the system trajectory to reach the switching surface from the beginning; the adaptive super-twisting algorithm (STA) is added to the switching control, and the unknown perturbations are estimated by the adaptive method, and the dead-zone technique is used to converge the adaptive law to a stable value. Simulation results show that the method can effectively improve the operation accuracy and response speed of the power-carrying operation robot.

**Keywords:** power-carrying operation robot; STA; trajectory tracking control; sliding mode control

### 0 引言

由于传统人工带电作业危险大、效率低下, 而带电作业机器人消除了带电作业人身隐患、提高了作业效率<sup>[1]</sup>, 应用愈加广泛。机械臂作为带电作业机器人的执行端, 用于执行上位机的命令, 对机械臂的控制精度需要较高的要求。机械臂是强非线性、强耦合的多变量系统, 且存在负载变化、建模不确定性和外部干扰<sup>[2]</sup>。传统的滑模控制方法在带电作业机器人的应用中存在抖振和扰动问题。

终端滑模<sup>[3]</sup>的提出, 解决了线性滑模的有限时间收敛问题; 文献[4]采用分数阶滑模提出了非奇异终端滑模解决了终端滑模的奇异性问题; 文献[5]提

出全局非奇异终端滑模指数函数引入线性超平面, 消除滑动运动中的到达阶段并提高整个响应的鲁棒性。为了削弱抖振, 孙国法等<sup>[6]</sup>引入了在切换控制中引入特殊幂次函数。Brahmi等<sup>[7]</sup>提出了自适应趋近律。吴爱国等<sup>[8]</sup>设计了变系数双幂次趋近律, 抑制抖振的同时提高系统响应速度, Vo等<sup>[9]</sup>采用饱和函数来抑制抖振。虽然这些使用代替符号函数的方法在一定程度上削弱了抖振, 但也会影响系统的鲁棒性和控制精度<sup>[10]</sup>。

在以上研究的基础上, 针对带电作业机器人机械臂易受干扰而影响控制精度的问题, 笔者设计一种 STAGNTSMC, 降低了抖振和收敛时间并提高控制精度。

收稿日期: 2024-11-10; 修回日期: 2024-12-20

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金(No.BK20230173); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX25\_0491); 无锡广盈集团有限公司项目(JC2024086)

第一作者: 尹书哲(2002—), 男, 湖南人, 硕士

通信作者: 黄兴(1994—), 男, 江西人, 博士。

### 1 带电作业机器人机械臂动力学模型

带电作业机器人主要面向高压输电线路的螺栓紧固带电作业，主要通过控制机械臂末端电动扳手对准螺栓，完成螺栓紧固作业。机器人整体结构如图 1 所示。

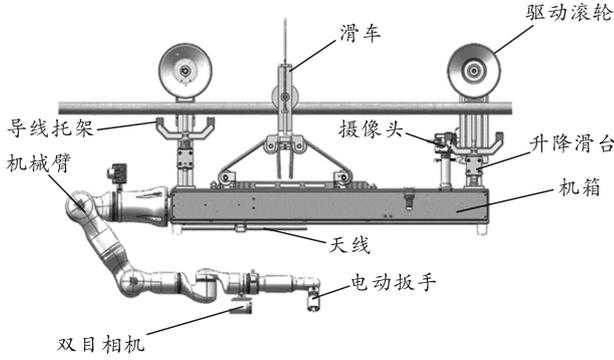


图 1 带电作业机器人整体结构

将机械臂的动能、势能等方程代入拉格朗日函数中， $n$  自由度机械臂动力学模型如下：

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + f(\dot{q}) = \tau + \tau_d \quad (1)$$

式中： $M(q)\ddot{q} \in R^{n \times n}$  为系统惯性矩阵； $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$  为向心力和哥氏力矩阵； $G(q) \in R^n$  为重力项向量； $\tau \in R^n$  为控制力矩输入； $\tau_d \in R^n$  为外部未知扰动； $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$  分别为关节角度、角速度和角加速度向量。由于建模不确定和参数摄动等，机械臂系统模型重新表示为：

$$M_0(q)\ddot{q} + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) = \tau + \rho \quad (2)$$

$$\rho = \tau_d - \Delta M(q)\ddot{q} - \Delta C(q, \dot{q})\dot{q} - \Delta G(q) - f(\dot{q}) \quad (3)$$

式中： $\Delta M(q)$ ， $\Delta C(q, \dot{q})\dot{q}$ ， $\Delta G(q)$  为不确定部分； $M_0(q)$ ， $C_0(q, \dot{q})$ ， $G_0(q)$  为系统标称模型； $\rho$  为系统集总扰动。

### 2 带电作业机器人控制器设计

轨迹跟踪过程中跟踪误差为：

$$e = q - q_d, \quad \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d, \quad \ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d \quad (4)$$

为使得带电作业机器人能够实现状态轨迹对切换曲面的有限时间收敛和轨迹误差对原点的有限时间收敛，并保证整个响应过程的鲁棒性，全局非奇异终端滑模面设计为：

$$s = e + k_1 |e|^\alpha \text{sign}(e) + k_2 |\dot{e}|^\beta \text{sign}(\dot{e}) - \Phi \quad (5)$$

$$\dot{s} = \dot{e} + k_1 \alpha |e|^{\alpha-1} \dot{e} + k_2 \beta |\dot{e}|^{\beta-1} \ddot{e} + k_2 \beta |\dot{e}|^\beta \text{sign}(\dot{e}) - \dot{\Phi} \quad (6)$$

$$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2 t - \left( \frac{3\varphi_1}{t_n^2} + \frac{2\varphi_2}{t_n} \right) t^2 + \left( \frac{2\varphi_1}{t_n^3} + \frac{\varphi_2}{t_n^2} \right) t^3 \quad (7)$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = e(0) + k_1 |e(0)|^\alpha \text{sign}(e(0)) + k_2 |\dot{e}(0)|^\beta \text{sign}(\dot{e}(0)) \\ \varphi_2 = \dot{e}(0) + k_1 \alpha |e(0)|^{\alpha-1} \dot{e}(0) + k_2 \beta |\dot{e}(0)|^{\beta-1} \ddot{e}(0) + \\ k_2 \beta |\dot{e}(0)|^\beta \text{sign}(\dot{e}(0)) \ln |\dot{e}(0)| \end{cases} \quad (8)$$

式中： $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为系数矩阵； $\Phi$  为辅助函数，它的设计思想为将初始状态轨迹驱动到滑模面  $s=0$  上，保证滑模面的全局性和连续性。

控制器的等效控制部分设计为：

$$\tau_{eq} = C_0(q, \dot{q})\dot{q} - M_0(q) [-\ddot{q}_d - \beta^{-1} k_2^{-1} |\dot{e}|^{1-\beta} \dot{\Phi} + \beta \beta^{-1} \dot{e} \ln |\dot{e}| + \beta^{-1} k_2^{-1} (I + k_1 \alpha |e|^{\alpha-1}) |\dot{e}|^{2-\beta} \text{sign}(\dot{e})] \quad (9)$$

为避免奇异点采用如下设计方法：

$$\beta_i = \begin{cases} 1, & \text{if } t \leq t_n \\ 1 + t - t_n, & \text{if } t < t_n + \xi \\ 1 + \xi, & \text{if } t \geq t_n + \xi \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\xi$  为  $0 < \xi < 1$  的常数，使得状态轨迹连续运动，避免了奇异性。

在切换控制中引入 STA 抑制系统所产生的抖振现象：

$$\begin{cases} \dot{s} = -\mu |s|^{0.5} \text{sign}(s) + v \\ \dot{v} = -\Gamma \text{sign}(s) \end{cases} \quad (11)$$

带电作业机器人控制律设计为：

$$\begin{cases} \tau = \tau_{eq} + \tau_{sw} \\ \tau_{sw} = M_0(q) \left[ \mu (|s|^{0.5}) \text{sign}(s) + v \right] \end{cases} \quad (12)$$

由于带电作业机器人在实际作业中会有测量噪声以及切换延迟，导致对于扰动上界自适应估计值  $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2$  会一直缓慢增长，将影响机械臂轨迹跟踪精度，利用死区技术将其进行改进：

$$\dot{v} = (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 \|q\| + \hat{b}_2 \|\dot{q}\|^2) \text{sign}(s) \quad (13)$$

$$\dot{\hat{b}}_0 = \begin{cases} \ell_0 \|s\|, & \|s\| \geq \omega \\ 0, & \|s\| < \omega \end{cases}; \quad \dot{\hat{b}}_1 = \begin{cases} \ell_1 \|s\| \|q\|, & \|s\| \geq \omega \\ 0, & \|s\| < \omega \end{cases};$$

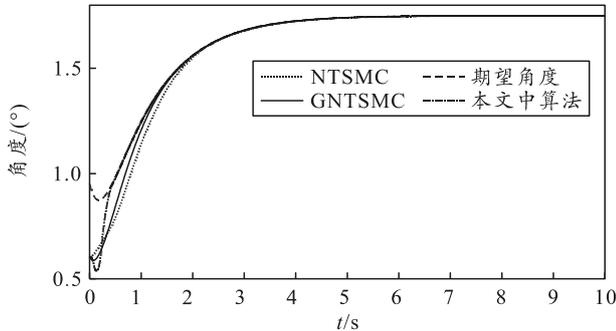
$$\dot{\hat{b}}_2 = \begin{cases} \ell_2 \|s\| \|\dot{q}\|^2, & \|s\| \geq \omega \\ 0, & \|s\| < \omega \end{cases} \quad (14)$$

此时基于自适应 STA 全局非奇异终端滑模带电作业机器人的控制率为：

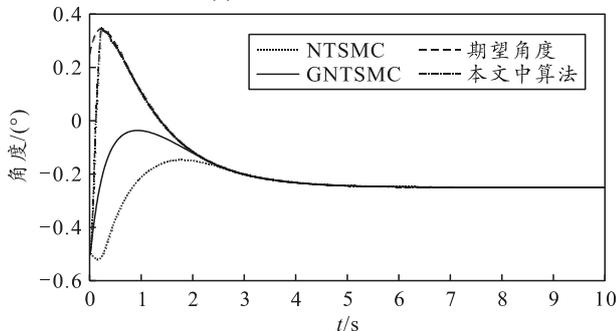
$$\begin{aligned} \tau = & C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) - M_0(q) \left[ -\beta^{-1} k_2^{-1} |\dot{e}|^{1-\beta} \dot{\Phi} - \right. \\ & \ddot{q}_d + \beta^{-1} k_2^{-1} (I + k_1 \alpha |e|^{\alpha-1}) |\dot{e}|^{2-\beta} \text{sign}(\dot{e}) + \\ & \left. \beta \beta^{-1} \dot{e} \ln |\dot{e}| + \mu (|s|^{0.5}) \text{sign}(s) + v \right] \quad (15) \end{aligned}$$

### 3 仿真分析

在 Matlab 中模拟带电作业机器人机械臂轨迹跟踪控制过程，并与其他算法进行仿真对比实验，实验结果如图 2—4 所示。



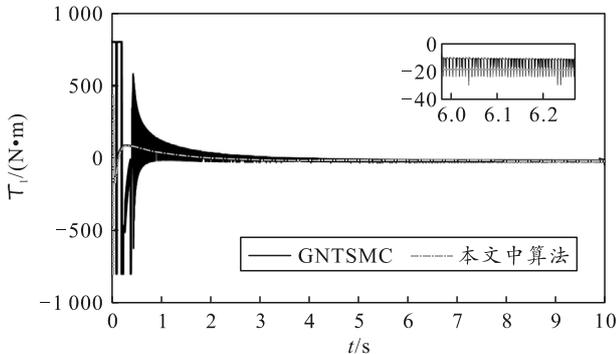
(a) 关节 1 角度跟踪



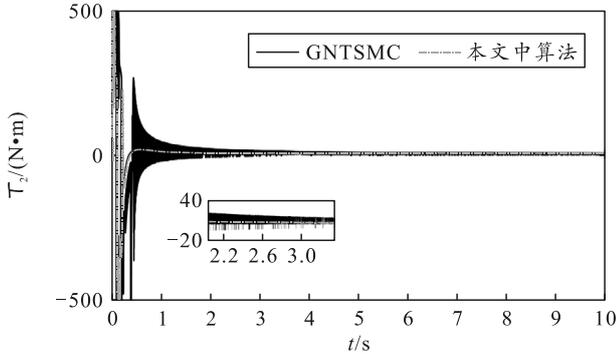
(b) 关节 2 角度跟踪

图 2 关节角度跟踪对比

图 3 为控制力矩输入抖振对比。



(a) 关节 1 控制力矩



(b) 关节 2 控制力矩

图 3 关节控制输入力矩

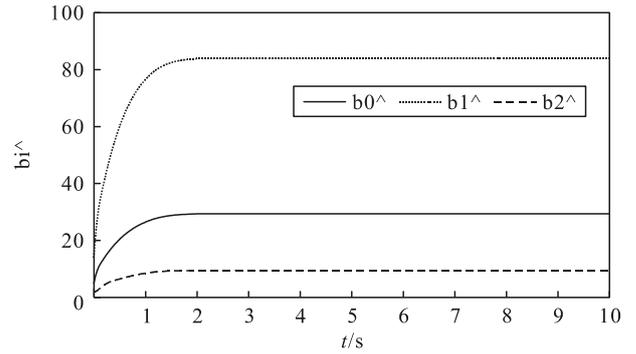


图 4 参数自适应变化曲线

从图 2 可以看出：笔者所设计的基于自适应 STAGNTSMC 算法相比 NFTSMC 拥有更快的动态响应速度和更高的跟踪精度。从图 3 的输入力矩对比图可以看出，通过加入 STA 算法明显抑制了抖振。仿真结果证明，基于自适应 STAGNTSMC 算法带电作业机器人机械臂能够在扰动下快速且稳定轨迹跟踪。

### 4 结束语

针对带电作业机器人在复杂环境下带电作业时易受干扰而影响控制精度的问题，笔者设计了 STAGNTSMC 算法，通过全局滑模将初始状态驱动到滑模面上，提高响应速度。在不影响控制精度的情况下，加入 STA 算法降低抖振。采用自适应的方法估计未知扰动，利用死区技术将自适应律收敛到稳定值避免自适应值的无限增长。通过与非奇异终端滑模仿真对比，证明了所设计控制算法的优越性。该方法为带电作业机器人机械臂实现高精度轨迹跟踪控制、精细化作业提供了解决方案。

### 参考文献：

- [1] 徐善军, 任书楠, 杜婧, 等. 协作机器人在高压带电作业中的应用研究[J]. 制造业自动化, 2021(9): 106-110.
- [2] 张岳, 刘振, 江保平, 等. 机械臂自适应超螺旋积分终端滑模控制[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(9): 1514-1521.
- [3] MAN Z H, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. Automatic Control IEEE Transactions on, 1994, 39(12): 2464-2469.
- [4] YANG L, YANG J. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [5] 王磊, 张振国, 沈素素. 基于全局非奇异快速终端滑模结构作用下的永磁同步电机的研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(3): 28-31.