doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.036

电动推杆轨迹跟踪积分滑模控制

谢胜龙[1]　于金须[2,3]　张浩向[1]　袁红星[1]　卞世元[4]

(1. 宁波工程学院机器人学院, 宁波 315211; 2. 宁波工程学院机械与汽车工程学院, 宁波 315336;
3. 浙江灵元脑机科技有限公司, 宁波 315300; 4. 中国科学技术大学工程与科学学院, 合肥 230026)

摘要: 针对电动推杆在精密运动控制中面临的模型参数摄动和外部扰动等问题,本文提出一种积分滑模控制(Integral sliding mode control, ISMC)策略。首先,基于直流电机电枢方程和机械系统动力学方程,建立了电动推杆机电耦合系统动力学模型和电压-位移传递函数模型,并简化为二阶系统形式。在此基础上,设计了积分型滑模面以消除传统滑模控制稳态跟踪误差,采用指数趋近律以改善系统动态品质,并基于 Lyapunov 稳定性理论证明了闭环系统渐近稳定性。通过对正弦波、复杂波和衰减波轨迹跟踪控制试验,对比了所提方法与传统滑模控制(Sliding mode control, SMC)和比例积分微分(Proportional integral derivative, PID)控制算法的轨迹跟踪效果。结果表明,在跟踪正弦波轨迹时,ISMC 最大误差为 2.781 6 mm,平均绝对误差为 0.925 8 mm,均方根误差为 1.093 5 mm;在复杂波情形下,ISMC 最大误差为 2.820 6 mm,平均绝对误差为 0.603 0 mm,均方根误差为 0.736 9 mm;衰减波轨迹控制下 ISMC 最大误差为 4.109 7 mm,平均绝对误差为 0.609 3 mm,均方根误差为 0.780 7 mm。在控制精度方面,3 种轨迹下 ISMC 平均绝对误差与均方根误差均为最优,稳态跟踪精度显著高于 PID 与 SMC 控制,且抗干扰性能更优,为电动推杆在复杂环境下高精度轨迹跟踪控制提供了有效方案。

关键词: 电动推杆; 积分滑模控制; 轨迹跟踪; Lyapunov 稳定性理论; 二阶系统

中图分类号: TP242; TP13　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0410-09　　**OSID**:

Integral Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Electric Push Rod

Xie Shenglong[1]　Yu Jinxu[2,3]　Zhang Haoxiang[1]　Yuan Hongxing[1]　Bian Shiyuan[4]

(1. *Robotics Institute*, *Ningbo University of Technology*, *Ningbo* 315211, *China*
2. *College of Mechanical and Automotive Engineering*, *Ningbo University of Technology*, *Ningbo* 315336, *China*
3. *Zhejiang Lingyuan Neuro Tech. Co., Ltd.*, *Ningbo* 315300, *China*
4. *School of Engineering Science*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *China*)

Abstract: An integral sliding mode control (ISMC) strategy was proposed to address the issues of model parameter perturbations and external disturbances faced by electric push rods in precision motion control. Firstly, based on the armature equation of the DC motor and the dynamic equation of the mechanical system, a dynamic model of the electromechanical coupling system and a voltage displacement transfer function model of the electric push rod were established and simplified into a second-order system form. On this basis, an integral sliding surface was designed to eliminate the steady-state tracking error of traditional sliding mode control, and an exponential convergence law was adopted to improve the dynamic quality of the system. The asymptotic stability of the closed-loop system was proved based on Lyapunov stability theory. Through trajectory tracking control experiments on sine waves, complex waves, and attenuated waves, the trajectory tracking performance of the proposed method was compared with traditional sliding mode control (SMC) and proportional integral derivative (PID) control algorithms. The experimental results indicated that when tracking a sinusoidal trajectory, the ISMC achieved a maximum error of 2.781 6 mm, a mean absolute error of 0.925 8 mm, and a root mean square error of 1.093 5 mm. Under complex waveform conditions, the ISMC yielded a maximum error of 2.820 6 mm, a

收稿日期: 2026-04-24　修回日期: 2026-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52205037)和中国科学技术大学青年创新基金项目(WK2090250101)

作者简介: 谢胜龙(1988—),男,副教授,博士,主要从事机器人理论与应用和具身智能等研究,E-mail: xieshenglong68@163.com

通信作者: 袁红星(1979—),男,教授,博士,主要从事机器人理论与应用和具身智能等研究,E-mail: yuanhx@nbut.edu.cn

mean absolute error of 0.603 0 mm, and a root mean square error of 0.736 9 mm. For the damped waveform trajectory, the ISMC attained a maximum error of 4.109 7 mm, a mean absolute error of 0.609 3 mm, and a root mean square error of 0.780 7 mm. In terms of control accuracy, the ISMC consistently achieved the optimal mean absolute error and root mean square error across all three trajectory types. Its steady-state tracking precision was significantly superior to that of PID and SMC controllers, and it exhibited enhanced anti-disturbance capability. The research result can provide an effective solution for high-precision trajectory tracking control of electric push rods in complex environments.

Key words: electric push rod; integral sliding mode control; trajectory tracking; Lyapunov stability theory; second-order system

0　引言

随着“工业 4.0”智能制造战略深入推进,机电伺服系统作为实现自动化生产、精密定位和运动控制的核心执行环节,其性能直接决定了高端装备作业效率和产品质量。电动推杆作为一种将旋转运动转换为直线位移的机电执行器,凭借结构紧凑、控制灵活等优势,已广泛应用于农业[1]、工业[2]、康复[3]、外骨骼[4]和检测[5]等领域,成为实现自动化作业不可或缺的执行部件。目前,电动推杆已成为农业自动化领域重要零部件之一,展现了在农业领域的巨大应用潜力[6]。随着“双碳”目标和智慧农业战略的推进,提升电动推杆运动控制性能对于推动农机装备产业升级和智能化转型具有重要的理论价值与现实意义。

然而,随着应用场景的日益复杂化和装备性能要求的不断提高,电动推杆系统控制面临诸多严峻挑战。从系统建模角度看,电动推杆由直流伺服电机、减速机构、滚珠丝杆传动副以及负载端组成[7],其动力学行为涉及电机电磁特性、传动机构摩擦非线性、齿轮间隙、丝杆弹性变形等多个环节的强耦合作用,这些复杂因素使得精确的机理建模变得十分困难。同时,其运行过程中还面临摩擦特性时变和外部扰动等不确定性,从而对高性能轨迹跟踪构成重大挑战。经典 PID 控制因结构简单、易于实现且不依赖精确模型而被农机装备广泛采用,在一定程度上能够满足常规工况下基本控制需求[8]。通过合理调节参数,PID 控制可使电动推杆实现较快的加速和稳定的定位[9]。但面对非线性和扰动时缺乏自适应性,易引发积分饱和、超调等问题,强扰动下性能急剧下降[10]。Bian 等[11]将 RBF 神经网络与 PID 结合在线调参,试验结果表明跟踪误差显著降低,证明了先进策略的可行性,但仍存在样本依赖与在线计算负担等不足。Hu 等[12]将线性自抗扰控制用于电动推杆精密运动控制,相较 PID 显著提升了跟踪性能并缩短了调节时间,但仍面临观测器带宽受限、参数调节依赖经验等问题[13]。

滑模控制(Sliding mode control, SMC)对系统参数摄动和外部扰动具有很强的鲁棒性[14],一旦进入滑动模态,系统对满足匹配条件的参数变化和外部扰动呈完全的不敏感性[15]。这一特性使得滑模控制比较适合处理电动推杆这类存在显著不确定性的伺服系统,且在机电执行器领域已有成功应用[16-17],但存在 1 个固有缺陷:在到达阶段系统不具备鲁棒性,参数摄动和扰动仍会影响暂态品质[18]。积分滑模控制(ISMC)通过在滑模函数中引入误差积分并合理设定积分初始条件,消除了到达阶段,使系统从初始时刻即具备全局鲁棒性,且能消除稳态误差、抑制抖振[19-20]。Gopikadev 等[21]验证了 ISMC 在复杂系统中有效性。尽管积分滑模控制在上述领域已取得了丰硕的成果,但将其系统地应用于电动推杆的轨迹跟踪控制仍存在明显空白。电动推杆具有独特的动力学特征——滚珠丝杆传动带来的弹性与间隙效应、减速机构非线性摩擦特性、电机与机械负载之间的动力学耦合等,这些特征既区别于纯电机系统,又有别于液压[22]或气动执行器[23]。现有研究大多聚焦于通用理论框架下积分滑模控制设计,鲜有针对电动推杆系统建模、控制器设计与试验验证。为此,针对电动推杆位置跟踪,本文提出一种改进的带积分项的滑模控制策略。

1　电动推杆系统建模

电动推杆内部结构及其结构原理图如图 1 所示。主要包括直流电机和传动系统 2 部分,传动系统包括齿轮组、轴承、滚珠、螺母等。直流电机旋转运动经过齿轮组减速后带动与齿轮连接的丝杠转动,进而带动螺母做直线往复运动,从而推动电动推杆做往返伸缩运动。

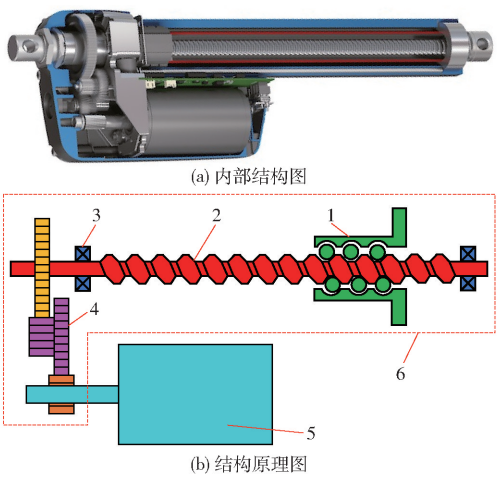
1.1　直流电机数学模型

直流电机电枢回路电压平衡方程为

$$L_a \frac{\mathrm{d}i_a(t)}{\mathrm{d}t} + R_a i_a(t) + E_a(t) = u_a(t) \tag{1}$$

式中　L_a——电枢电感,mH

i_a——电枢电流,A



(a) 内部结构图

(b) 结构原理图

图 1 电动推杆结构示意图

Fig. 1 Schematics of electric push rod structure

1. 螺母 2. 丝杠 3. 轴承 4. 齿轮 5. 直流电机 6. 传动系统

R_a——电枢电阻,Ω

E_a——反电动势,V

u_a——电枢电压,V

反电动势正比于电机角速度 $\omega(t)$,即

$$E_a(t)=K_a\omega(t) \tag{2}$$

式中 K_a——反电动势常数,V·s/rad

电磁转矩由电枢电流产生,即

$$T_m=K_m i_a \tag{3}$$

式中 T_m——直流电机电磁转矩,N·m

K_m——直流电机转矩系数,N·m/A

直流电机转矩平衡方程为

$$T_m-T_L=J\frac{d\omega(t)}{dt}+B\omega(t) \tag{4}$$

式中 T_L——电机负载转矩,N·m

J——折合到电机转轴上总转动惯量,kg·m²

B——折合到电机转轴上总黏性摩擦系数,N·m·s/rad

在实际系统中,电气时间常数通常远小于机械时间常数,可令 $L_a=0$,因此可将电枢方程由微分方程简化为代数方程

$$i_a(t)=\frac{u_a(t)-K_a\omega(t)}{R_a} \tag{5}$$

考虑空载情况($T_L=0$),联立上述方程可得直流电机电压-角速度微分方程为

$$J\frac{d\omega(t)}{dt}+\left(B+\frac{K_mK_a}{R_a}\right)\omega(t)=\frac{K_m}{R_a}u_a(t) \tag{6}$$

利用电机转速与角位移关系 $\omega(t)=\frac{d\theta_1(t)}{dt}$,可得直流电机电压-角位移传递函数为

$$G_1(s)=\frac{\Theta_1(s)}{U_a(s)}=\frac{K_m}{R_aJs^2+(R_aB+K_mK_a)s} \tag{7}$$

式中 θ_1——电机角位移,rad

1.2 传动系统数学模型

传动系统由减速器和滚珠丝杠组成。电机角位移经减速比为 i 减速器后,输出到丝杠轴角位移满足

$$\theta_2(t)=\frac{\theta_1(t)}{i} \tag{8}$$

式中 θ_2——丝杠轴角位移,rad

丝杠轴角位移经滚珠螺母可转换为电动推杆直线位移,即

$$x(t)=\frac{p_h\theta_2(t)}{2\pi} \tag{9}$$

式中 p_h——丝杠导程,mm

x——电动推杆直线位移,mm

从而可得电机角位移与推杆位移之间的关系为

$$\theta_1(t)=\frac{2\pi i}{p_h}x(t) \tag{10}$$

1.3 电动推杆系统数学模型

将上述传动关系代入直流电机微分方程后可得电动推杆电压-位移二阶微分方程为

$$J\frac{d^2x(t)}{dt^2}+\left(B+\frac{K_mK_a}{R_a}\right)\frac{dx(t)}{dt}=\frac{p_hK_m}{2\pi iR_a}u_a(t) \tag{11}$$

对应的传递函数为

$$G_1(s)=\frac{X(s)}{U_a(s)}=\frac{\frac{p_hK_m}{2\pi i}}{R_aJs^2+(R_aB+K_mK_a)s} \tag{12}$$

将上述传递函数改写为二阶系统标准形式

$$G_1(s)=\frac{K}{s(Ts+1)} \tag{13}$$

其中 $K=\frac{p_hK_m}{2\pi i(R_aB+K_mK_a)}$ $T=\frac{R_aJ}{R_aB+K_mK_a}$

式中 K——系统等效增益

T——系统等效时间常数

对应的状态空间模型可表示为

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=-\frac{1}{T}x_2+\frac{K}{T}u\end{cases} \tag{14}$$

其中 $x_1=x$ $x_2=\dot{x}$ $u=u_a$

式中 x_1——电动推杆位移,mm

x_2——电动推杆速度,mm

u——控制输入电压,V

2 积分滑模控制器设计

2.1 问题描述

设电动推杆期望轨迹为 $x_d(t)$,跟踪误差为

$$e(t)=x_d(t)-x(t) \tag{15}$$

式中 $x(t)$——电动推杆实际轨迹,mm

$e(t)$——轨迹跟踪误差,mm

控制目标为：设计控制率 $u(t)$，使得系统在参数摄动和外部扰动存在的情况下，跟踪误差渐进收敛于零，即$\lim_{t\to\infty} e(t)=0$。

控制器设计思路可分为 3 部分：①选择积分滑模面，设计积分型滑模控制器。消除到达阶段，使系统从一开始就处于滑动模态，实现全程鲁棒，同时利用积分作用消除稳态误差。②采用指数趋近律。保证系统能够以较快速度趋近滑模面，且保证系统能够穿过滑模面并维持滑动运动。③设计等效控制律和切换控制率。前者是连续部分，负责维持理想的滑动运动（使系统保持在滑模面 $s=0$ 上）。后者是不连续部分，负责抵消扰动和不确定性，将状态强行拉回滑模面。所设计的积分滑模控制器原理图如图 2 所示。

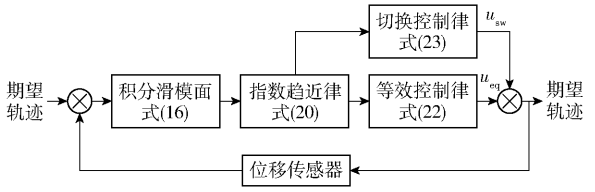


图 2　电动推杆积分滑模控制原理图

Fig. 2　Principle diagram of integral sliding mode control for electric push rod

2.2　积分滑模面设计

传统线性滑模面定义为 $s=ce+\dot{e}$。然而，在滑动模态建立后，系统跟踪误差仅以指数规律衰减，无法完全消除常值扰动引起的稳态误差。为此，在传统滑模面基础上引入跟踪误差积分项，设计积分滑模面[24]，即

$$s(t)=c_1e(t)+c_2\dot{e}(t)+c_3\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau \quad (16)$$

式中　s——积分滑模面

c_1、c_2、c_3——待设计滑模面参数，$c_i>0$

积分项的引入不仅消除趋近阶段，使系统从一开始就处于滑动模态，从而保证系统全过程鲁棒性；同时也能有效消除常值扰动下稳态跟踪误差。

对滑模面求导可得

$$\dot{s}(t)=c_1\dot{e}(t)+c_2\ddot{e}(t)+c_3e(t) \quad (17)$$

由跟踪误差定义，有 $\ddot{e}(t)=\ddot{x}_{\mathrm{d}}(t)-\ddot{x}(t)$。代入系统状态方程可得

$$\ddot{e}=\ddot{x}_{\mathrm{d}}+\frac{1}{T}x_2-\frac{K}{T}u \quad (18)$$

将 $\ddot{e}$ 代入 $\dot{s}$ 表达式可得

$$\dot{s}=c_1\dot{e}+c_2\left(\ddot{x}_{\mathrm{d}}+\frac{1}{T}x_2-\frac{K}{T}u\right)+c_3e \quad (19)$$

2.3　控制律设计

采用指数趋近律，即

$$\dot{s}=-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks \quad (20)$$

式中　ε——切换增益，$\varepsilon>0$

k——指数趋近项系数，$k>0$

指数趋近项 $-ks$ 保证了系统状态能以较快速度趋近滑模面，而等速项 $-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)$ 则保证系统能够穿过滑模面并维持滑动运动。

联立式(19)、(20)，可得滑模控制律为

$$u=\frac{T}{c_2K}\left(c_1\dot{e}+c_2\ddot{x}_{\mathrm{d}}+\frac{c_2}{T}x_2+c_3e+\varepsilon\mathrm{sgn}(s)+ks\right) \quad (21)$$

令等效控制律 u_{eq} 为

$$u_{\mathrm{eq}}=\frac{T}{c_2K}\left(c_1\dot{e}+c_2\ddot{x}_{\mathrm{d}}+\frac{c_2}{T}x_2+c_3e+ks\right) \quad (22)$$

令切换控制律 u_{sw} 为

$$u_{\mathrm{sw}}=\frac{T\varepsilon}{c_2K}\mathrm{sgn}(s) \quad (23)$$

则控制律又可简写为

$$u=u_{\mathrm{eq}}+u_{\mathrm{sw}} \quad (24)$$

2.4　稳定性分析

定理 1：对于电动推杆二阶系统（式(13)），若采用积分滑模控制律（式(21)），且切换增益满足 $\varepsilon>0$，则闭环系统渐近稳定。

证明：选取 Lyapunov 函数[25]为

$$V=\frac{1}{2}s^2 \quad (25)$$

显然 $V\geqslant 0$，当且仅当 $s=0$ 时 $V=0$。对 V 求导可得

$$\dot{V}=s\dot{s} \quad (26)$$

将趋近律 $\dot{s}=-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks$ 代入式(26)可得

$$\dot{V}=s(-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)-ks)=-\varepsilon|s|-ks^2 \quad (27)$$

由于 $\varepsilon>0$，$k>0$。故 $\dot{V}=-\varepsilon|s|-ks^2\leqslant 0$。当 $s\neq 0$ 时，$\dot{V}<0$；当 $s=0$ 时，$\dot{V}=0$。

由 Lyapunov 稳定性定理可知，系统状态将在有限时间内到达滑模面 $s=0$ 并维持滑动运动。在滑动模态（$s=0$）上，跟踪误差满足

$$c_1e+c_2\dot{e}+c_3\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau=0 \quad (28)$$

由于 $c_1>0$，$c_2>0$，$c_3>0$，该动力学方程特征根均具有负实部，从而 $e(t)\to 0$，$\dot{e}(t)\to 0$。

值得指出的是，Lyapunov 函数导数 $\dot{V}=-\varepsilon|s|-ks^2$ 中，指数趋近项 $-ks$ 保证了系统以指数速度趋近滑模面，而等速项 $-\varepsilon\mathrm{sgn}(s)$ 则确保系统在滑模面附近的穿越运动，从而实现了有限时间到达与渐近稳定的统一。

3　试验与结果分析

3.1　试验平台

图 3 为电动推杆轨迹跟踪控制试验装置。图 4

为电动推杆控制原理图。该装置主要由机械主体与测控单元 2 部分构成:机械主体以铝型材框架为支撑,底部安装基座,内置电动推杆作为驱动核心,推杆上方连接连接板,连接板通过直线轴承实现平稳的垂直直线导向运动,顶部安装位移传感器实时采集电动推杆的位移信号;测控单元则由数据采集卡与计算机组成,位移传感器采集的动态数据经数据采集卡传输至计算机,可实现对电动推杆运动轨迹实时监测、控制算法运算与闭环轨迹跟踪控制,为电动推杆控制性能验证提供完整的试验平台。



图 3 试验装置

Fig. 3 Experimental platform of electric push rod

1. 位移传感器 2. 直线轴承 3. 连接板 4. 电动推杆 5. 基座 6. 数据采集卡 7. 计算机

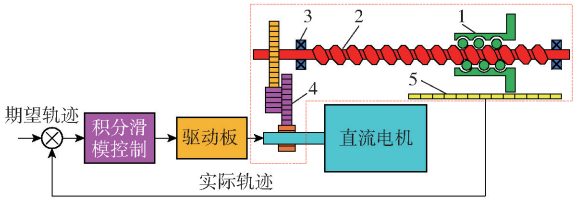


图 4 电动推杆控制原理图

Fig. 4 Schematic of electric push rod control

1. 螺母 2. 丝杠 3. 轴承 4. 齿轮 5. 位移传感器

电动推杆采用基于积分滑模控制的闭环伺服控制方案,系统以期望运动轨迹(即推杆需要实现的运动曲线)为输入,通过位移传感器实时采集电动推杆的实际运动轨迹并反馈至输入端,对比期望轨迹和传感器采集的实际轨迹生成误差信号,作为控制器的输入。误差信号经 ISMC 控制器计算后输出控制指令,输入驱动板后将控制器输出的控制信号转换为直流电机可识别的功率信号驱动直流电机转动,再经齿轮组减速增扭后带动滚珠丝杠副旋转,将电机旋转运动转换为丝杠螺母(推杆)直线运动,同时位移传感器持续采集实际位移形成闭环反馈,从而实现对电动推杆运动轨迹的高精度跟踪与控制。由于采用反馈控制方案,控制系统具备较强的抗干扰能力与位置控制精度。PID 控制器参数为 $K_p=0.02$,$K_i=0.01$,$K_d=0.01$。ISMC 控制器参数为 $\varepsilon=0.5$,$k=10$,$c_1=15$,$c_2=1$,$c_3=5$。

3.2 试验结果分析

为验证所提积分滑模控制在电动推杆轨迹跟踪控制性能,分别设计正弦波、复杂波、衰减波 3 种典型参考轨迹,与传统 PID 控制、经典滑模控制开展对比试验。以最大误差、平均绝对误差、均方根误差为指标,结合轨迹跟踪曲线与误差曲线,对控制效果进行分析。

(1)正弦波

正弦波为连续周期性轨迹,可有效检验控制器动态跟踪能力与稳态精度。由图 5a 可见,3 种控制策略均能跟踪参考正弦轨迹,但 ISMC 跟踪曲线与期望轨迹重合度最高,SMC 存在小幅滞后,PID 控制出现明显抖振。由图 5b 可知,SMC 误差波动幅度最大,PID 误差波动居中,ISMC 误差始终保持在最小范围。

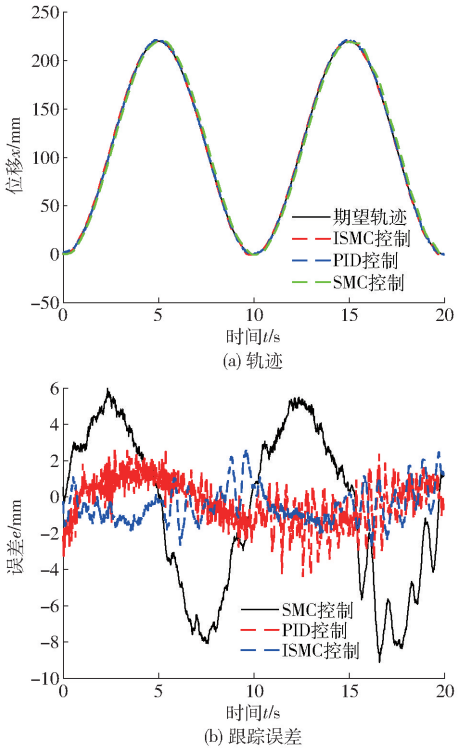


图 5 正弦波跟踪控制结果

Fig. 5 Sine wave tracking control results

表 1 为 3 种控制方法在正弦波轨迹跟踪控制中误差。从表 1 可以看出,积分滑模控制在所有 3 项指标中均表现最优,尤其最大误差(2.781 6 mm)显著低于其他 2 种方法。PID 控制表现居中,稳态精度尚可,但最大超调/滞后误差(4.383 2 mm)是积分滑模的 1.5 倍以上。可见当 PID 控制参数整定适当时可获较好的控制效果,但对电动推杆非线性摩擦的适应能力有限,导致动态峰值误差偏大。滑模控制表现最差,无论是瞬态最大误差(9.111 0 mm)还是整体波动(均方根误差 4.453 3 mm)均远高于其

他方法，说明在该试验中标准滑模控制未有效抑制抖振或滞后。标准滑模控制在正弦波跟踪中出现较大的最大误差(9.111 0 mm)很可能由于切换增益过高引发的剧烈抖振，或由于未补偿的相位滞后导致在波峰波谷处出现瞬时大幅偏离。电动推杆机械系统惯性加上滑模不连续控制量，容易在方向换向点产生冲击。

表 1　正弦波轨迹跟踪误差

Tab. 1　Trajectory tracking errors of sine wave　mm

控制方法	最大误差	平均绝对误差	均方根误差
PID 控制	4.383 2	1.037 3	1.267 2
滑模控制	9.111 0	1.941 0	4.453 3
积分滑模控制	2.781 6	0.925 8	1.093 5

(2)复杂波

复杂波为多频段、非平稳轨迹，用于验证控制器对变动态、非线性轨迹的自适应能力。由图 6a 可得，ISMC 对复杂波形的跟随性最佳，轨迹平滑且紧贴期望曲线；PID 控制在波形拐点处存在超调与滞后；SMC 在高频段出现明显抖振。由图 6b 可得，ISMC 误差波动最小且平稳，PID 与 SMC 误差波动幅度更大。

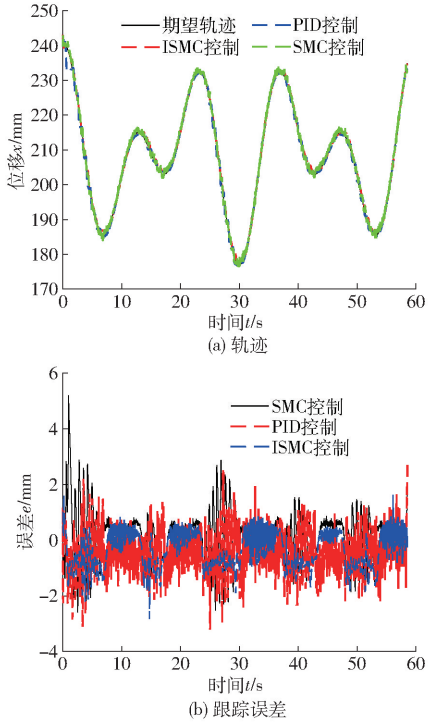


图 6　复杂波跟踪控制结果

Fig. 6　Complex wave tracking control results

表 2 为 3 种控制方法下复杂波轨迹跟踪误差。试验结果表明，在复杂波场景下，ISMC 在 3 项指标中均最优，体现出对非线性、变动态轨迹的强鲁棒性与高精度跟踪能力，而 SMC 抖振问题则较为突出。

表 2　复杂波轨迹跟踪误差

Tab. 2　Trajectory tracking errors of complex wave

mm

控制方法	最大误差	平均绝对误差	均方根误差
PID 控制	3.204 9	0.670 3	0.843 8
滑模控制	5.197 1	0.657 3	0.894 4
积分滑模控制	2.820 6	0.603 0	0.736 9

(3)衰减波

衰减波为非周期、渐近收敛轨迹，重点考核控制器的收敛速度与稳态收敛精度。图 7 和表 3 给出了衰减波时 3 种控制方法轨迹跟踪控制结果和误差。由表 3 可见，积分滑模控制在平均绝对误差(0.609 3 mm)和均方根误差(0.780 7 mm)上大幅领先，但值得注意的是，最大误差(4.109 7 mm)略高于 PID(3.745 4 mm)，两者非常接近。滑模控制最大误差较正弦波工况有所改善(从 9.111 0 mm 降至 4.209 5 mm)，但平均误差极大(平均绝对误差 4.184 7 mm)，意味着全程几乎都保持较高的跟踪误差，这也与图 7a 中 SMC 存在持续稳态偏差的现象相吻合。PID 控制在衰减波中最大误差表现甚至略优于积分滑模，说明在幅值递减的瞬态过程中，参数调整适当的 PID 控制快速响应有一定优势。PID 控制在衰减波中表现出较好的瞬态抑制能力，最大误

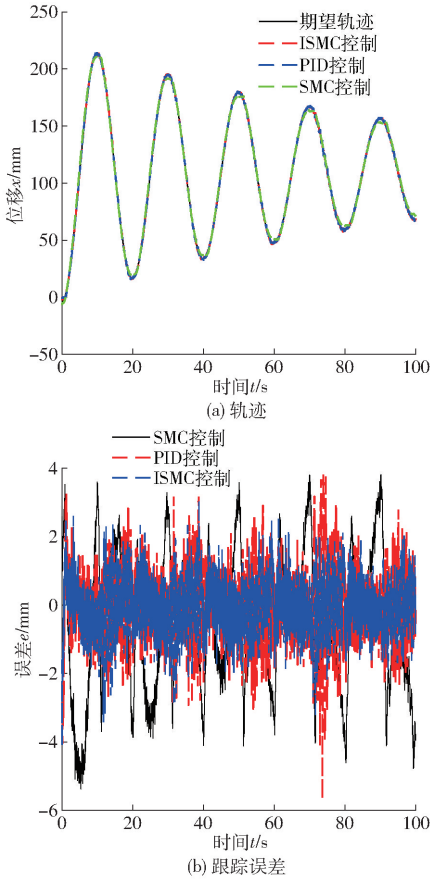


图 7　衰减波跟踪控制结果

Fig. 7　Attenuation wave tracking control results

差最小,但整体波动略大于积分滑模。这里,积分滑模控制在衰减波末段(幅值极小时)积分项可能导致微小的超调累积,使得最大误差发生在波形的某一局部瞬态,因此最大误差并非绝对最优,但全程平均精度最高。滑模控制在衰减波中平均绝对误差与最大误差几乎相等(4.184 7 mm 和 4.209 5 mm),通常表明系统存在较大的稳态死区或持续的滞后偏差,即推杆未能紧密跟随指令变化,可能是由于滑模面设计未针对衰减频率特性进行优化,导致控制力不足以克服启动静摩擦。

表 3 衰减波轨迹跟踪误差

Tab. 3 Trajectory tracking errors of attenuation wave

mm

控制方法	最大误差	平均绝对误差	均方根误差
PID 控制	3.745 4	1.101 4	1.310 5
滑模控制	4.209 5	4.184 7	2.045 6
积分滑模控制	4.109 7	0.609 3	0.780 7

(4)响应时滞性

以正弦波轨迹为例,对 3 种控制方法响应时滞特性进行对比。图 8 为正弦波轨迹跟踪控制在波峰附近的局部放大曲线。

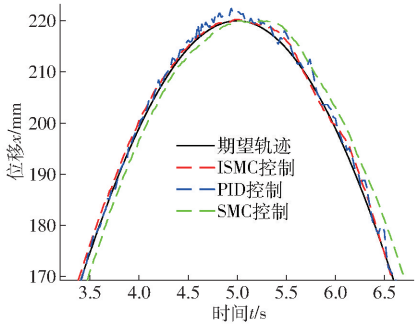


图 8 正弦波跟踪控制局部放大图

Fig. 8 Local amplification diagram of sine wave tracking control

由图 8 可见,在轨迹上升阶段,传统 SMC 控制存在明显响应滞后;而 ISMC 控制跟踪响应则超前于 PID 控制。在轨迹下降阶段,传统 SMC 仍表现出较大的时滞性;PID 控制滞后特性虽优于 SMC,但响应过程伴随明显抖振现象;相比之下,ISMC 在时滞抑制与波动抑制 2 方面均显著优于前 2 种方法。上述结果表明,ISMC 响应时滞特性整体显著优于 SMC 与 PID 控制。

3.3 试验结果讨论

在控制精度方面,3 种轨迹下,ISMC 平均绝对误差与均方根误差均为最优,稳态跟踪精度显著高于 PID 与 SMC。积分环节有效消除系统稳态误差,解决传统 SMC 静差大的缺陷。在鲁棒性与抗扰性方面,在复杂波、衰减波等非线性与变动态轨迹下,ISMC 误差波动最小、跟踪平滑,表现出更强的鲁棒性;SMC 抖振严重,易激发系统未建模动态;PID 对非线性工况适应性差。在动态响应方面,ISMC 兼顾快速响应与平稳性,在轨迹拐点与收敛段无明显超调与滞后;PID 响应滞后,SMC 存在抖振与超调,综合动态性能劣于 ISMC。在工程适用性方面,电动推杆存在摩擦、间隙等非线性扰动,传统 PID 精度不足、SMC 抖振明显,而 ISMC 在精度、鲁棒性、平稳性上实现均衡提升,更适合高精度电动推杆轨迹跟踪场景。电动推杆是一种典型的机电伺服系统,包含丝杠间隙、摩擦力突变、惯性负载。标准滑模控制表现不佳,表明单纯的符号函数切换在低刚度、高摩擦的推杆系统中容易引起极限环振荡或死区爬行。而积分滑模控制通过连续控制律(积分作用)平滑了滑模切换带来的抖振,同时利用滑模项抑制参数摄动和外部扰动,完美契合了推杆非线性特性。

3 种典型轨迹对比试验结果表明,所提积分滑模控制在最大误差、平均绝对误差、均方根误差等关键指标上全面优于传统 PID 控制与滑模控制。试验结果证明了所提出的积分滑模控制策略优于传统的 SMC 和 PID 控制。ISMC 能有效抑制滑模抖振、消除稳态误差,对周期性、非线性、收敛性轨迹均具备高精度、强鲁棒、快响应的跟踪性能,可显著提升电动推杆系统的轨迹跟踪控制品质。滑动面中的积分项不仅消除了稳态误差,而且在正确初始化时,能够从初始时刻起实现完全的相位鲁棒性。指数趋近律与饱和函数相结合,在不损害滑模控制鲁棒性情况下缓解了抖振现象。

4 结束语

针对电动推杆精密轨迹跟踪控制问题,建立了电动推杆电压-位移二阶传递函数模型,提出了一种积分滑模控制策略。通过引入跟踪误差积分项设计滑模面,消除了传统滑模控制的趋近阶段,实现了全过程鲁棒性,并从根本上消除了常值扰动下的稳态跟踪误差。基于 Lyapunov 理论的稳定性分析严格证明了闭环系统的渐近稳定性。试验结果表明,所提积分滑模控制在最大误差、平均绝对误差、均方根误差等关键指标上优于传统 PID 控制与滑模控制,且控制信号平滑、抖振抑制效果良好:在跟踪正弦波轨迹时,最大误差为 2.781 6 mm,平均绝对误差为 0.925 8 mm,均方根误差为 1.093 5 mm;在复杂波情形下,最大误差为 2.820 6 mm,平均绝对误差为 0.603 0 mm,均方根误差为 0.736 9 mm;衰减波轨迹

控制的最大误差为 4.109 7 mm，平均绝对误差为 0.609 3 mm，均方根误差为 0.780 7 mm。所提控制策略为提高电动推杆在农业自动化中的精密运动控制性能提供了有效方案。

参 考 文 献

[1] 佟文玉，苑严伟，白圣贺，等. 可调式大白菜收获机根部切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2026，57(5)：282－293，302.
Tong Wenyu，Yuan Yanwei，Bai Shenghe，et al. Design and experiment of adjustable root cutting device for Chinese cabbage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2026，57(5)：282－293，302.（in Chinese）

[2] 赵嘉浩，訾斌，王威，等. 刚柔复合驱动并联喷涂机器人机构设计与工作空间分析[J]. 机械工程学报，2023，59(15)：28－39.
Zhao Jiahao，Zi Bin，Wang Wei，et al. Mechanical design and workspace analysis of a rigid-flexible hybrid driven parallel spray-painting robot[J]. Journal of Mechanical Engineering，2023，59(15)：28－39.（in Chinese）

[3] 张延恒，莫春晖，张莹，等. 移动式康复训练机器人及下肢康复运动分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2021，49(3)：6－11.
Zhang Yanheng，Mo Chunhui，Zhang Ying，et al. Design and motion analysis of mobile rehabilitation training robot[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Natural Science Edition)，2021，49(3)：6－11.（in Chinese）

[4] 宋纪元，朱爱斌，屠尧，等. 单兵救援助力外骨骼机器人的设计与特性分析[J]. 兵工学报，2022，43(9)：2037－2047.
Song Jiyuan，Zhu Aibin，Tu Yao，et al. Design and features of exoskeleton assisting individual-soldier rescue[J]. Acta Armamentarii，2022，43(9)：2037－2047.（in Chinese）

[5] 焦然，陈亮，朱珩，等. 面向内外直角过渡的轮式磁吸附爬壁机器人设计与分析[J]. 机械工程学报，2025，61(17)：50－65.
Jiao Ran，Chen Liang，Zhu Heng，et al. Design and analysis of wheeled magnetic adsorption wall-climbing robot for internal and external right-angle transition[J]. Journal of Mechanical Engineering，2025，61(17)：50－65.（in Chinese）

[6] 徐琪蒙，李洪文，何进，等. 小麦播种自走式农用移动平台设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：1－11.
Xu Qimeng，Li Hongwen，He Jin，et al. Design and experiment of the self-propelled agricultural mobile platform for wheat seeding[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(14)：1－11.（in Chinese）

[7] Ren Yaxiong，Hecht Matthias，Adams Christian，et al. Validation of noise reduction using low-tone gearing on a push-rod system[J]. Journal of Tongji University(Natural Science)，2021，49(S1)：108－113.

[8] Xie S L，Duan H R，Liu T，et al. Vision-based trajectory tracking control of a pneumatic muscle actuator using a modified asymmetric generalized Prandtl-Ishlinskii model[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering，2024，46(2)：77.

[9] 谢永良，尹建军，贺坤，等. 轮式 AGV 纯滚动转向系统设计与无侧滑转向控制研究[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：27－35.
Xie Yongliang，Yin Jianjun，He Kun，et al. Pure rolling steering system design and research on non-sideslip steering control for wheeled AGV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：27－35.（in Chinese）

[10] 况福明，姬傲，何菁，等. 田间水稻育秧机取泥装置控制系统研究[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：290－304.
Kuang Fuming，Ji Ao，He Jing，et al. Control system of mud collection device for rice seedling cultivation machines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：290－304.（in Chinese）

[11] Bian D，Zeng Z，Wei X，et al. Motion control of linear push rods based on the RBF－PID control approach[J]. Industrial Robot：the International Journal of Robotics Research and Application，2026，53(3)：621－629.

[12] Hu K K，Xie S L，Zhong H M. The precise motion control of electric push rod based on linear active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part C：Journal of Mechanical Engineering Science，2025，239(20)：8131－8145.

[13] 夏明海，朱群为，殷谦，等. 模块化仿生波动推进器设计与控制研究[J]. 农业机械学报，2024，55(11)：513－522.
Xia Minghai，Zhu Qunwei，Yin Qian，et al. Design and control of modular bionic undulating fin propeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(11)：513－522.（in Chinese）

[14] Lan R X. Sliding mode control and its applications in robot trajectory tracking control：review[J]. Applied and Computational Engineering，2024，111：152－158.

[15] Wu L，Liu J，Vazquez S，et al. Sliding mode control in power converters and drives：a review[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica，2021，9(3)：392－406.

[16] Sharma A，Janardhanan S. Position control of single link flexible manipulator：a functional observer-based output feedback sliding mode approach[J]. International Journal of Systems Science，2025，56(6)：1320－1331.

[17] 李月婵，马锃宏，杜小强. 基于 RPU－RPR－UPR 并联腕关节草莓断柄采摘柔顺控制研究[J]. 农业机械学报，2026，57(4)：128－137.
Li Yuechan，Ma Zenghong，Du Xiaoqiang. Compliance control for strawberry stem-breaking harvesting based on RPU－RPR－UPR parallel wrist join[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2026，57(4)：128－137.（in Chinese）

[18] 张玉泉，任玲，杨苗，等. 基于非奇异快速终端滑模的移栽机取送苗机构运动控制[J]. 农业工程学报，2025，41(3)：

22 – 31.
Zhang Yuquan, Ren Ling, Yang Miao, et al. Motion control of transplanter seedling pickup and delivery mechanism using non-singular fast terminal sliding mode[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(3): 22 – 31. (in Chinese)
[19] 冀杰, 贺庆, 赵立军, 等. 除草机器人自适应快速积分终端滑模跟踪控制技术[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 55 – 64.
Ji Jie, He Qing, Zhao Lijun, et al. Adaptive fast integrating terminal sliding mode tracking control technique for weeding robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 55 – 64. (in Chinese)
[20] 陈涛, 刘建璇, 王立忠, 等. 六轴机械臂非奇异快速积分终端滑模轨迹跟踪控制研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(8): 2115 – 2123.
Chen Tao, Liu Jianxuan, Wang Lizhong, et al. Research on non-singular fast integral terminal sliding mode trajectory tracking control of six-axis robotic arm[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(8): 2115 – 2123. (in Chinese)
[21] Gopikadev Y, Amal A. Integral sliding mode control: a review of applications[J]. International Journal of Advanced Control and System Engineering, 2024, 2(1):25 – 35.
[22] Meena K, Dhavalikar M, Thorat S. A review on the position control of hydraulic cylinder for accuracy and response time[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 72: 995 – 999.
[23] 孟德远, 张猛, 刘送永, 等. 气动肌肉驱动六自由度并联平台的高精度位姿控制[J]. 中国机械工程, 2026, 37(1): 73 – 82.
Meng Deyuan, Zhang Meng, Liu Songyong, et al. High precision position and posture control of 6-DOF parallel platforms driven by pneumatic muscles[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 73 – 82. (in Chinese)
[24] 黄俊杰,皇甫晨豪,张家齐,等.3-PRS 并联机构动力学解耦与控制研究[J].农业机械学报,2025,56(6):735 – 744.
Huang Junjie, Huangfu Chenhao, Zhang Jiaqi, et al. Dynamic decoupling and control of 3-PRS parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(6):735 – 744. (in Chinese)
[25] 赵世龙,王生海,何云鹏,等.船用绳驱动并联打磨机器人二阶积分终端自适应滑模控制策略研究[J].振动与冲击,2025,44(14):207 – 219,236.
Zhao Shilong, Wang Shenghai, He Yunpeng, et al. Research on second-order integral terminal adaptive sliding mode control strategyfor marine cable-driven parallel grinding robot[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(14):207 – 219,236. (in Chinese)

(上接第 409 页)

[12] Liu Mengnan, Li Yanying, Xu Liyou, et al. General modeling and energy management optimization for the fuel cell electric tractor with mechanical shunt type[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108178.
[13] Li Xianzhe, Zhang Mingzhu, Yan Xianghai, et al. Power allocation strategy for fuel cell distributed drive electric tractor based on adaptive multi-resolution analysis theory[J]. Energy, 2023, 284: 129350.
[14] Min Dehao, Song Zhen, Chen Huicui, et al. Genetic algorithm optimized neural network based fuel cell hybrid electric vehicle energy management strategy under start-stop condition[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118036.
[15] Lin Xinyou, Zeng Songrong, Li Xuefan. Online correction predictive energy management strategy using the Q-learning based swarm optimization with fuzzy neural network[J]. Energy, 2021, 223: 120071.
[16] Zhang Qi, Fu Xiaoling. A neural network fuzzy energy management strategy for hybrid electric vehicles based on driving cycle recognition[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 696.
[17] Gupta R, Kolmanovsky I V, Wang Y, et al. Onboard learning-based fuel consumption optimization in series hybrid electric vehicles[C]//2012 American Control Conference (ACC). IEEE, 2012: 1308 – 1313.
[18] Wang Jie, Zhou Jianhao, Zhao Wanzhong. Deep reinforcement learning based energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor powered electric vehicle[J]. Green Energy Intelligent Transportation, 2022, 1(2): 100028.
[19] Xie Shaobo, Hu Xiaosong, Qi Shanwei, et al. An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Energy, 2018, 163: 837 – 848.
[20] Wu Yiwei, Zhao Yifan, Wen Changkai, et al. Research on energy management strategies for high-power diesel-electric hybrid tractors based on double deep Q-network[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 17130.
[21] Li Liqiao, Chen Jiangchun, Nie Jing, et al. Reinforcement learning energy management control strategy of electric tractor based on condition identification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 170: 110846.
[22] Li Yanying, Liu Mengnan, Wang Yiting, et al. Energy management optimization and validation of a hydrogen fuel cell-powered agricultural tractor based on hierarchical dynamic programming[J]. IEEE Access, 2024, 12: 21382 – 21401.
[23] 周志立, 方在华. 拖拉机机组牵引动力学[M]. 北京:科学出版社,2010.
[24] Mohri M, Rostamizadeh A, Talwalkar A. Foundations of machine learning[M]. Cambridge:MIT Press, 2018.
[25] Li Yanying, Wu Yueze, Liu Mengnan, et al. Energy management strategy for hydrogen fuel cell tractors integrating online dynamic response capability[J]. World Electric Vehicle Journal, 2026, 17(3): 115.