

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.03.006

基于时延估计的滚珠丝杠简化模型滑模控制

王尧尧^{1,2}, 单文源¹, 梁校^{1,3}, 张文良⁴,
方俊博⁴, 冯宇⁵, 丁翔⁵, 周颖柯⁶

(1.南京航空航天大学机电学院,南京 210016; 2.航空航天结构力学及控制全国重点实验室,南京 210016;
3.哈尔滨工业大学郑州高等研究院,郑州 450000; 4.中国机械总院集团北京机电研究所有限公司,北京 100083;
5.南京工艺装备制造有限公司,南京 211178; 6.中国航发贵州黎阳航空发动机有限公司,贵阳 550014)

摘要: 感应淬火工艺对高精度相对运动控制要求严格,作为控制该过程的主要运动执行机构,滚珠丝杠进给系统的伺服控制精度直接决定了热处理质量。针对滑模控制在轨迹跟踪中稳态误差大且存在高频抖振的问题,提出一种基于时延估计并结合比例-积分-微分的非奇异快速终端滑模滚珠丝杠简化模型控制策略。仿真结果表明,在相同期望轨迹下,所提策略实现了高精度位置跟踪,最大跟踪误差由传统滑模控制的 68.2 μm 和变幂次趋近律滑模控制的 28.4 μm 显著降至 13.8 μm 。同时,该方法有效抑制了控制输入的高频抖振,输出了更为平滑连续的控制信号。有效提升了滚珠丝杠进给系统的伺服精度与运行平稳性,为高精度感应淬火加工提供了可靠的控制理论参考。

关键词: 感应淬火;滚珠丝杠;时延估计;比例-积分-微分的非奇异快速终端滑模;简化模型控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2026)03-0529-08

Simplified Model Sliding Mode Control for Ball Screw Drives Based on Time-Delay Estimation

WANG Yaoyao^{1,2}, SHAN Wenyuan¹, LIANG Xiao^{1,3}, ZHANG Wenliang⁴,
FANG Junbo⁴, FENG Yu⁵, DING Xiang⁵, ZHOU Yingke⁶

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing 210016, China; 3. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China; 4. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 5. Nanjing Technical Equipment Manufacture Co., Ltd., Nanjing 211178, China; 6. AECC Guizhou Li Yang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: The induction hardening process imposes strict requirements on high-precision relative motion control. As the primary motion actuator for this process, the servo control precision of the ball screw drives directly determines the quality of the heat treatment. To address the issues of large steady-state error and high-frequency chattering in the trajectory tracking of sliding mode control (SMC), this paper proposes a simplified-model control strategy for ball screw drives, combining time-delay estimation with a PID-nonsingular fast terminal sliding mode (PID-NFTSM) control method. Simulation results demonstrate that under the same desired trajectory, the proposed strategy achieves high-precision position tracking, with the maximum tracking error significantly reduced from 68.2 μm in traditional SMC and 28.4 μm in variable power

收稿日期: 2026-03-18; 修订日期: 2026-05-09

通信作者: 王尧尧, 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: yywang_cmee@nuaa.edu.cn.

引用格式: 王尧尧, 单文源, 梁校, 等. 基于时延估计的滚珠丝杠简化模型滑模控制[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(3): 529-536. WANG Yaoyao, SHAN Wenyuan, LIANG Xiao, et al. Simplified model sliding mode control for ball screw drives based on time-delay estimation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(3): 529-536.

reaching law control, down to $13.8 \mu\text{m}$. Simultaneously, this method effectively suppresses high-frequency chattering in the control input, yielding a smoother and more continuous control signal. This study effectively enhances the servo precision and operational smoothness of the ball screw feed system, providing a reliable control-theoretic reference for high-precision induction hardening processes.

Key words: induction hardening; ball screw; time-delay estimation; PID-nonsingular fast terminal sliding mode (PID-NFTSM); simplified model control

感应淬火工艺在现代机械制造领域应用非常广泛^[1],是提升金属零部件表面硬度与疲劳强度的重要热处理手段^[2-4]。该工艺通常依托专用的感应淬火机床来完成^[5],滚珠丝杠进给系统作为感应淬火机床内部的主要运动执行机构,承担着实现高精度进给运动的关键任务。因此,提升淬火机床内部滚珠丝杠进给系统的控制精度^[6-7],是保障感应淬火工艺质量的必要途径。

滚珠丝杠进给系统具有多变量、强耦合及高度非线性的动态特征^[8]。在感应淬火机床的复杂工况下,系统常受非线性摩擦、传动间隙及外部负载等多重扰动的综合影响^[9-10]。而在面对复杂系统的模型时,时延估计(Time-delay estimation, TDE)是一种有效的解决方式。时延估计仅需获取前一个时延的系统信息即可获得系统参数^[11-14],从而避免参数辨识这一复杂过程,基于这一特性便可实现基于时延估计的简化模型控制。但当系统状态发生剧烈变化时,时延估计将不可避免地产生较大的误差。针对这一现象,为保证控制的可靠性,通常会利用时延估计来省略掉参数辨识过程,建立一种基于时延估计的简化模型控制框架,再结合其他高鲁棒性的控制算法来提升控制性能^[15]。

在非线性控制中,滑模控制因其响应速度快,并且对系统参数摄动及外部干扰具有极强的鲁棒性,在运动控制领域得到了广泛应用。然而,传统滑模控制在实际应用中存在固有的抖振现象^[16]。高频抖振不仅会激发滚珠丝杠机械结构的轴向与扭转谐振,还会降低系统的控制精度。针对滑模控制问题,国内外许多研究者对此展开研究,Kamal-zadeh等^[17]提出了一种滚珠丝杠自适应滑模控制方法,有效抑制了滑模控制的抖振问题,提高了控制品质。韩硕等^[18]研究出一种基于变幂次趋近律(Variable power reaching law, VPRL)的滚珠丝杠进给系统滑模控制方法,其能够有效消除抖振及匀速段的稳态误差,提高跟踪精度。李剑等^[19]设计了满足 H_∞ 性能积分滑模控制器,消除了参数不确定的影响。传统滑模控制函数采用线性滑模函数,仅能保证渐近收敛,相比之下,有限时间收敛可能有更好的控制性能^[20]。针对这一需求,国内外研究者提出了如终端滑模(Terminal sliding mode, TSM)^[21-22]、非奇异终端滑模(Nonsingular terminal

sliding mode, NTSM)^[23-24]和非奇异快速终端滑模(Nonsingular fast terminal sliding mode, NFTSM)^[25-26]等滑模控制算法,且为了提升NFTSM的控制性能,Van^[27]还提出了一种结合比例-积分-微分控制(Proportional-integral-derivative, PID)与NFTSM的PID-NFTSM混合控制策略,整体控制分内外环,内环为采用有限时间收敛的NFTSM滑模函数,外环则为基于NFTSM滑模函数的PID型控制面,这种混合控制策略的控制效果可同时兼备两种算法的优势^[28-30]。

针对高速滚珠丝杠进给系统,提出了一种基于TDE、新型PID-NFTSM滑模面及自适应趋近律的鲁棒控制方法。该方法不依赖系统精确物理参数,利用TDE技术实时观测并补偿由非线性摩擦、参数摄动等构成的集总扰动,构建了新的动力学简化控制框架。为克服TDE固有的延迟估计误差,通过设计含有积分项的PID-NFTSM滑模面,利用其有效吸收TDE残差,再结合设计的新的自适应趋近律实现了高精度跟踪,同时该控制策略还有效避免了文献[27]的奇异性问题。

1 滚珠丝杠动力学模型

滚珠丝杠进给系统是现代机电一体化装备与精密加工设备中实现直线运动的核心传动机构,如图1所示。该系统主要由伺服驱动电机、联轴器、滚珠丝杠副、两端支撑轴承与直线导向机构等关键部件构成。基本工作原理为:伺服电机输出旋转动力,经联轴器传递至丝杠轴;依靠滚珠在丝杠与螺母螺旋滚道间的往复循环滚动,将电机的旋转运动转化为螺母及相连承载平台的直线平移。

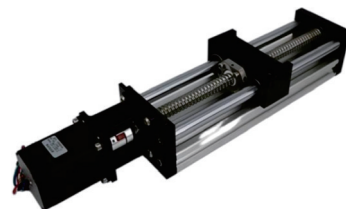


图1 滚珠丝杠进给系统
Fig.1 Ball screw drives

为体现滚珠丝杠进给系统的轴向振动模态特性,将系统简化成一个二自由度柔性体模型,如图2所示。

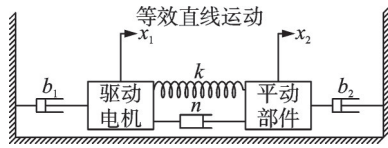


图 2 二自由度柔性体模型

Fig.2 Two degrees of freedom model

系统动力学方程如下

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1+n & -n \\ -n & b_2+n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: m_1 与 m_2 分别为系统旋转驱动部件与直线平动部件的等效质量; x_1 和 x_2 分别为滚珠丝杠的等效角位移与工作台的实际直线位移; b_1 与 b_2 分别为旋转端与平动端的等效黏滞阻尼系数; k 为传动系统整体的等效轴向刚度; n 为滚珠丝杠螺母副间的等效耦合阻尼;系统控制输入 u 为调节电机输出转矩的电压信号; d_1 和 d_2 分别为旋转侧与直线侧所承受的等效集总干扰。

进一步整理可以得到

$$m_2 \ddot{x}_2 + m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 - d_1 - d_2 = u \quad (2)$$

针对本文使用的时延估计算法,对该系统的动力学模型进行处理,可将式(2)改写成如下形式

$$\tilde{m} \ddot{x}_2 + h = u \quad (3)$$

$$h = (m_2 - \tilde{m}) \ddot{x}_2 + m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 - d_1 - d_2 \quad (4)$$

式中 \tilde{m} 为对进给系统整体移动质量的一个人为设定的常数估计值或基准值。

动力学模型经过以上处理的好处是,可以通过结合时延估计对 h 进行参数估计,使得问题得以简化成一种单输入单输出的控制问题。这种方式可以将 x_1 与 x_2 之间的非线性关系封装成黑盒,只考虑对系统的输入,以及执行末端的 x_2 的控制情况,将控制问题大幅简化。

针对本文的控制方案设计与稳定性分析,需要对系统的动力学模型提出如下假设:

假设 1 系统动力学参数 h 随时间连续可微,且不会在短时间内发生显著变化。

假设 2 系统中 x_1 与 x_2 运动过程中的速度和加速度均有界。

2 滑模控制设计

2.1 滑模面设计

传统的滑模面函数为

$$s = ce + \dot{e} \quad (5)$$

式中: $e = x_d - x$ 用于表示跟踪误差, c 为正常数。通过控制律的作用,迫使状态轨迹在有限时间内向

$s = 0$ 靠拢,一旦状态到达滑模面,控制作用将状态约束在面上。

本文所使用的滑模函数如下

$$s_1 = \dot{e} + \lambda_1 e + \lambda_2 \vartheta(e) \quad (6)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为正数, $\vartheta(e)$ 被设计成如下形式

$$\vartheta(e) = \begin{cases} \text{sig}(e)^\beta & \hat{s}_1 = 0 \vee \hat{s}_1 \neq 0, |e| \geq \phi \\ \gamma_1 e + \gamma_2 \text{sgn}(e) e^2 & \hat{s}_1 \neq 0, |e| \leq \phi \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\hat{s}_1 = \dot{e} + \lambda_1 e + \lambda_2 \text{sig}(e)^\beta$, $0.5 < \beta < 1$, $\phi > 0$, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,且 γ_1 与 γ_2 定义如下

$$\gamma_1 = (2 - \beta) \phi^{\beta-1} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = (\beta - 1) \phi^{\beta-2} \quad (9)$$

对 $\vartheta(e)$ 求一阶导数得

$$\dot{\vartheta}(e) = \begin{cases} \beta |e|^{\beta-1} \dot{e} & \hat{s}_1 = 0 \vee \hat{s}_1 \neq 0, |e| \geq \phi \\ \gamma_1 \dot{e} + 2\gamma_2 |e| \dot{e} & \hat{s}_1 \neq 0, |e| \leq \phi \end{cases} \quad (10)$$

如式(6~10)所示,采用的NFTSM表面通过设计参数 γ_1 和 γ_2 保持连续性,同时还避免了奇异性问题。

针对采用的滑模函数式(6),进一步采用一种PID-NFTSM的混合控制策略,对滑模函数施加一个PID的外环控制,即

$$s_2 = K_p s_1 + K_i \int s_1 + K_d \dot{s}_1 \quad (11)$$

式中 K_p 、 K_i 、 K_d 均为正数。

相较于传统的滑模函数,本文所采用的滑模函数拥有更好的收敛效果,同时PID的引入使得其能够更进一步实现误差调节,提高控制效果。

2.2 趋近律设计

滑模运动包括趋近运动和滑模运动两个过程,采用趋近律的方法可以改善趋近运动的动态品质。传统的指数趋近律如下

$$\dot{s} = -\epsilon_1 s - \epsilon_2 \text{sgn}(s) \quad (12)$$

式中 ϵ_1 和 ϵ_2 均为正数。

在传统的指数趋近律中,当系统接近滑模面时, s 的值变得很小接近于0,左项的作用几乎失效,因此会导致收敛的速度变慢。在该指数趋近律中,无论外界环境如何变化,其参数始终不变。面对突发的强干扰或未建模动态,无法通过自身调整来维持性能,必须依赖过大的安全裕度。

针对滚珠丝杠滑模控制研究,文献[18]提出了一种双幂次趋近律

$$\dot{s} = \Theta(s) = \begin{cases} -\alpha_1 |s|^{r_1} \text{sgn}(s) - \alpha_2 \text{arsinh}(s) & |s| \geq 1 \\ -\alpha_1 |s|^{r_2} \text{sgn}(s) - \alpha_2 \text{arsinh}(s) & |s| < 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\alpha_2 > 0$, $\text{arsinh}(\cdot)$ 为反双曲正弦函数。

而本文针对滚珠丝杠的滑模控制问题,选择如下结合了自适应增益的趋近律

$$\dot{s}_2 = -\rho_1 s_2 - \rho_2 \text{sig}(s_2)^\mu - (\hat{k}_1 + a_1) \text{sgn}(s_2) \quad (14)$$

式中: $\rho_1 > 0, \rho_2 > 0, a_1 > 0, 0 < \mu < 1$, 自适应增益 \hat{k}_1 定义为

$$\dot{\hat{k}}_1 = \begin{cases} \eta |\bar{s}_2|^{\varpi_1(s_2)} \varpi_1(s_2) & 0 < \hat{k}_1 < \hat{k}_{1\max} \\ \eta |s_2| \varpi_2(\hat{k}_1) & \hat{k}_1 \leq 0 \text{ 或 } \hat{k}_1 \geq \hat{k}_{1\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中 η 为常数。同时有如下定义

$$\bar{\omega}_1(s_2) = \text{sgn}(|s_2| - \Delta) \quad (16)$$

$$\bar{\omega}_2(\hat{k}_1) = \text{sgn}(\hat{k}_{1\max}/2 - \hat{k}_1) \quad (17)$$

式中: Δ 为一正常数, $\hat{k}_{1\max}$ 为 \hat{k}_1 的最大值。同时, 当 $\bar{\omega}_1(s_2)$ 满足条件 $\bar{\omega}_1(s_2) > 0$ 时, $|\bar{s}_2| = |s_2|$, 否则令 $|\bar{s}_2| = |s_2| + \delta$, 利用参数 δ 来避免 $\bar{\omega}_1(s_2) < 0$ 时可能存在的奇异性问题。

3 基于时延估计的控制律设计

3.1 控制律推导

时延估计的核心思想是利用系统前一段时刻的运动状态量来估算当前时刻的系统集总动态模型, 以达到对系统动态进行补偿的目的。如式(4)所示, h 的形式十分复杂, 用传统方式获取与其相关的参数十分困难, 且可能存在准确性不够的缺陷。本文针对滚珠丝杠的控制思想即是用时延估计来估算式(4)中 h , 使得控制模型简化, 再结合滑模算法实现对系统的控制调节。

基于简化后的系统动力学模型, 提出如下的控制律

$$u = \tilde{m}u_c + \hat{h} \quad (18)$$

$$\hat{h} \cong h(t - \Delta t) = u(t - \Delta t) - \tilde{m}\ddot{x}_2(t - \Delta t) \quad (19)$$

联立式(6, 11, 13)可求得

$$u_c = \ddot{x}_{2d} + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 \vartheta(e) + K_d^{-1} (K_p s_2 + K_i \int s_2) + K_d^{-1} \int (\rho_1 s_2 + \rho_2 \text{sig}(s_2)^\mu + (\hat{k}_1 + a_1) \text{sgn}(s_2)) \quad (20)$$

式中: Δt 为设定的延迟时间, $u(t - \Delta t)$ 可以通过 u 轻松获得, 而 $\ddot{x}_2(t - \Delta t)$ 则需要通过数值微分获得。

具体如下

$$\begin{cases} \ddot{u}(t - \Delta t) = \frac{u(t) - 2u(t - \Delta t) + u(t - 2\Delta t)}{(\Delta t)^2} & t > T \\ \ddot{u}(t - L) = 0 & t \leq T \end{cases} \quad (21)$$

式中: $T \geq 2\Delta t$, 此处分段函数的主要作用是为了缓解初始阶段 $\ddot{u}(t - \Delta t)$ 的剧烈扰动。除以上问题之外, 还应注意的是上述计算将不可避免地放大噪声

效应并降低整体控制性能。为抑制噪声效应, 采用较小的 \tilde{m} 或额外的低通滤波器将有助于实现这一目标。

联立式(18~21), 得出完整的控制律如下

$$u = \tilde{m}u_c + u(t - \Delta t) - \tilde{m}\ddot{x}_2(t - \Delta t) \quad (22)$$

观察推导得出的完整控制律式(22), 可知其未使用系统动力学模型中的任何参数, 避免了参数获取的繁琐过程, 通过时延估计与滑模算法的结合, 成功实现了一种简化模型控制。

3.2 稳定性分析

针对稳定性引入如下必要定理和引理。

定理 1^[31] 考虑非线性系统 $\dot{x} = f(x, y)$, 其中 x 为系统状态, y 为系统的控制输入。若对于所有的 $x(t_0) = x_0$, 存在 $a > 0$ 和 $T(a, x_0) < \infty$, 使得当 $t \geq t_0 + T$ 时, $\|x(t)\| < a$ 成立, 则该解为有限时间稳定(FPS)。

引理 1^[31] 对于系统 $\dot{x} = f(x, y)$, 假设存在连续函数 $V(x)$, 其系数 $a > 0, 0 < b < 1$ 且 $0 < c < \infty$, 使得

$$\dot{V}(x) \leq -aV^b(x) + c \quad (23)$$

则称系统 $\dot{x} = f(x, y)$ 为有限时间稳定, 且系统在有限时间内有界, 具体如下

$$\lim_{d \rightarrow d_0} x \in \left(V^b(x) \leq \frac{c}{(1-d)a} \right) \quad (24)$$

式中 $0 < d_0 < 1$ 。到达该区间所需时间计算如下

$$T \leq \frac{V^{1-b}(x_0)}{ad_0(1-b)} \quad (25)$$

式中 $V(x_0)$ 为函数 $V(x)$ 的初始值。

证明 定义李雅普诺夫函数为

$$V = s_2^2/2 + \hat{k}_1^2/2 \quad (26)$$

先将式(20)代入式(12)可得

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 &= K_p s_1 + K_i \int s_1 + K_d (\ddot{e} + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 \dot{\vartheta}) = \\ &K_p s_1 + K_i \int s_1 + K_d (\ddot{q}_d - \tilde{m}^{-1}(\tilde{m}u + \hat{h} - h) + \\ &\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 \dot{\vartheta}) = -K_d \tilde{m}^{-1}(\hat{h} - h) - \\ &\int (\rho_1 s_2 + \rho_2 \text{sig}(s_2)^\mu + (\hat{k}_1 + a_1) \text{sgn}(s_2)) \end{aligned} \quad (27)$$

定义时延估计误差为 $\epsilon = -\tilde{m}^{-1}(\hat{h} - h)$, 通过使用假设 1 和 2, 可以轻松证明 $\dot{\epsilon}$ 的有界性, 即 $|\dot{\epsilon}| \leq \Phi$, 详细证明见文献[32]。

对式(26)关于时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_2 \dot{s}_2 + \hat{k}_1 \dot{\hat{k}}_1 = -s_2 (\rho_1 s_2 + \rho_2 \text{sig}(s_2)^\mu) - \\ &s_2 ((\hat{k}_1 + a_1) \text{sgn}(s_2) - k_{1d} \dot{\epsilon}) + \hat{k}_1 \dot{\hat{k}}_1 = -\rho_1 s_2^2 - \\ &\rho_2 |s_2|^{\mu+1} - (\hat{k}_1 + a_1) |s_2| + K_d \dot{\epsilon} s_2 + \hat{k}_1 \dot{\hat{k}}_1 \end{aligned} \quad (28)$$

由于 $|\dot{\epsilon}| \leq \Phi$ 成立,因此可轻松选取 a_1 的大小,从而能够满足条件 $a_1 \geq K_d \Phi$,使得式(28)变为

$$\dot{V} \leq -\rho_1 s_2^2 - \rho_2 |s_2|^{\mu+1} + \hat{k}_1 \dot{\hat{k}}_1 \quad (29)$$

针对 \hat{k}_1 的两种定义域进行分类讨论。

定义域 1 $0 < \hat{k}_1 < \hat{k}_{1\max}$

在该条件下,考虑两种情况,分别是 $|s_2| > \Delta$ 和 $|s_2| \leq \Delta$ 。当 $|s_2| \leq \Delta$ 时,系统已经被限定在有界范围内,因此只需考虑 $|s_2| > \Delta$ 的情况。当 $|s_2| > \Delta$ 时,由式(14)可知, $\dot{\hat{k}}_1 = \eta |s_2|$,如此便可进一步得到如下结果

$$\dot{V} \leq -\rho_1 s_2^2 - \rho_2 |s_2|^{\mu+1} + \hat{k}_1 \eta |s_2| \leq -|s_2| \left(\rho_1 |s_2| + \rho_2 |s_2|^\mu - \hat{k}_{1\max} \eta \right) \quad (30)$$

观察式(30)可知,通过选择合适参数,如使参数满足条件 $\rho_1 \Delta \geq \hat{k}_{1\max} \eta$,则可进一步推导出如下结果

$$\dot{V} \leq -\rho_2 |s_2|^{\mu+1} \leq -\rho_2 \Delta^{\mu+1} \quad (31)$$

从中可以看出,当 $|s_2| > \Delta$ 时,系统将收敛至平衡点。

定义域 2 $\hat{k}_1 \leq 0$ 或 $\hat{k}_1 \geq \hat{k}_{1\max}$

在该定义域下,当 $\hat{k}_1 \leq 0$ 时,可知 $\dot{\hat{k}}_1 = \eta |s_2|$,当 $\hat{k}_1 \geq \hat{k}_{1\max}$ 时, $\dot{\hat{k}}_1 = -\eta |s_2|$ 。显然,在定义域 2 的条件下, $\hat{k}_1 \dot{\hat{k}}_1 \leq 0$ 恒成立,同时进一步推导出如下结果

$$\dot{V} \leq -\rho_1 s_2^2 - \rho_2 |s_2|^{\mu+1} \quad (32)$$

由式(32)可进一步得出

$$\dot{V} \leq -\rho_2 |s_2|^{\mu+1} \quad (33)$$

$$\dot{V} \leq -\rho_2 |s_2|^2 \quad (34)$$

分析式(33),基于不等式 $(|x_1| + |x_2|)^b \leq |x_1|^b + |x_2|^b$,其中 $0 < b < 1$,可以得出

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\rho_2 |s_2|^{\mu+1} - \rho_2 |\hat{k}_1|^{\mu+1} + \rho_2 |\hat{k}_1|^{\mu+1} \leq \\ &-2^{\frac{\mu+1}{2}} \rho_2 \left((0.5 s_2^2)^{\frac{\mu+1}{2}} + (0.5 \hat{k}_1^2)^{\frac{\mu+1}{2}} \right) + \\ &\rho_2 |\hat{k}_1|^{\mu+1} \leq -2^{\frac{\mu+1}{2}} \rho_2 V^{\frac{\mu+1}{2}} + \rho_2 |\hat{k}_1|^{\mu+1} \end{aligned} \quad (35)$$

再根据引理 1,可知系统将在有限时间内收敛至

$$|s_2| \leq (1-d)^{-\frac{1}{\mu+1}} |\hat{k}_1| \quad (36)$$

式中 $0 < d < 1$ 。

分析式(34),同理可得

$$|s_2| \leq (1-d)^{-\frac{1}{2}} |\hat{k}_1| \quad (37)$$

联系式(36)和式(37)可知, s_2 会在有限时间收敛,并且通过选择恰当选择参数 K_p, K_i, K_d ,滑模变量 s_1 同样可在有限时间收敛。随后,根据NFTSM面式(6~9)的理论结果,控制误差 e 在有限时间内保持有界,稳定性得证。

4 算法仿真

4.1 仿真系统建立

针对本文基于滚珠丝杠进给系统设计的控制算法,搭建的控制系统结构框图如图 3 所示。

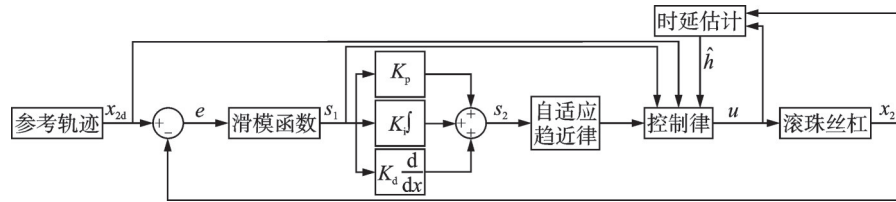


图 3 算法控制流程

Fig.3 Algorithm control flowchart

针对仿真过程动力学模型设定,本文参数选择使用文献[33]中滚珠丝杠进给系统的二自由度柔性体模型的已辨识参数,各参数标称值如表 1 所示,并且取干扰为 $d_1 = d_2 = 0.1 \sin(\pi t)$ 。需要指出的是,受限于实际物理系统中的测量噪声、未建模高频动态以及复杂的非线性摩擦特性,文献给出的辨识参数与系统真实的物理参数之间不可避免地存在一定的辨识误差与参数摄动。然而,所提的控制架构有效弱化了对高精度参数辨识的依赖。系统实际参数与名义辨识参数之间的偏差连同外部摩擦等非线性扰动,在本文的动力学重构中已被严

密地整合为系统的集总扰动项 h 中。借助时延估计技术,该误差项可通过系统的历史输入与状态数据被实时观测并予以补偿。

表 1 系统动力学参数^[18]

Table 1 System dynamic parameters^[18]

参数	数值
$m_1 / (\text{V} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	1.301 6
$m_2 / (\text{V} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	0.148 4
$k / (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})$	$4.181 4 \times 10^4$
$n / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	5.355 0
$b_1 / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$8.095 4 \times 10^{-4}$
$b_2 / (\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1.610 3

为防止运行过程中电机驱动力突变造成结构振动,进给加速度信号应连续且平稳,不会导致无穷大的跃度,本文参考轨迹最大跃度为 40 m/s^3 ,最大加速度为 1 m/s^2 ,最大速度为 0.1 m/s ,最大进给距离为 65 mm ,整体运动时间 2.5 s ,参考轨迹如图 4 所示。

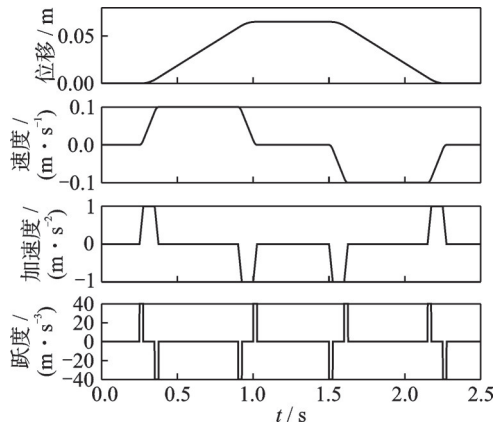


图 4 参考轨迹

Fig.4 Reference trajectories

本文采用线性滑模函数+指数趋近律的传统滑模控制器以及文献[18]中的线性滑模面+变幂次趋近律来与PID-NFTSM控制器对给定的轨迹进行跟踪仿真对比,其中指数趋近律控制器中,取 $c=15, \epsilon_1=120, \epsilon_2=1$ 。变幂次趋近律中,取 $\alpha_1=120, \alpha_2=60, r_1=2, r_2=0.7$ 。NFTSM滑模函数中,取 $\lambda_1=\lambda_2=1, \beta=0.8, \phi=0.001$ 。PID中 $K_p=500, K_i=20, K_d=6$ 。趋近律中,取 $\rho_1=120, \rho_2=80, \mu=0.8, a_1=3$ 。自适应增益中,取 $\eta=1, \Delta=2, \delta=0.05, \hat{k}_{1\max}=5$ 。对比用的两种控制器同样基于时延估计进行设计,在相同的时延条件下,使用两种控制器进行轨迹跟踪,其中时延 $\Delta t=0.001$ 。

需要说明的是,本文各控制器趋近律参数中,增益项参数相同为 120 来保证对比公平,时间延迟 Δt 则是根据实际采样频率进行选取。NFTSM 参数则是基于非奇异性,按照参数定义条件整定选取。其余参数则是基于自身算法特性,在保证系统稳定的条件下进行调整得来。

4.2 仿真结果

为了验证所提出的PID-NFTSM控制算法的有效性,将其与传统滑模控制进行了轨迹跟踪仿真对比,结果如图 5 所示。整体来看,3种控制方式均能实现对给定参考位置信号 x_d 的有效跟踪。由于宏观轨迹图难以直观反映微小的稳态误差,3条实际轨迹曲线在视觉上均与理想轨迹高度重合。为了进一步体现PID-NFTSM控制器在提高稳态精度、加快收敛速度以及削弱系统抖振方面的优越性能,如图 6~8 所示,结合具体的轨迹跟踪误差曲线进行详细的定量分析。

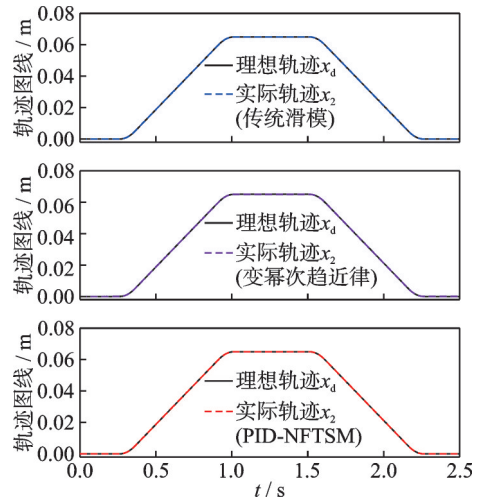


图 5 轨迹跟踪结果

Fig.5 Trajectory tracking results

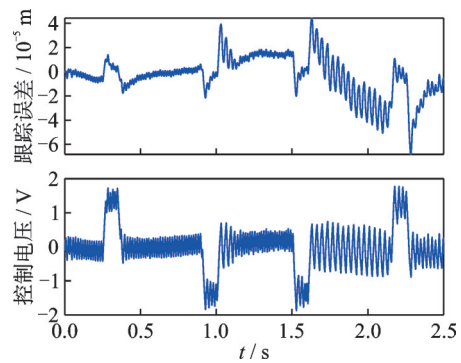


图 6 传统滑模控制仿真结果

Fig.6 Simulation results of traditional SMC

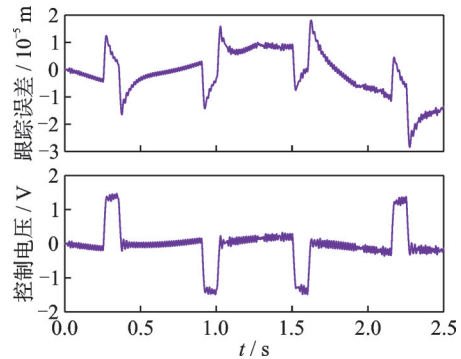


图 7 变幂次趋近律仿真结果

Fig.7 Simulation results of variable power reaching law

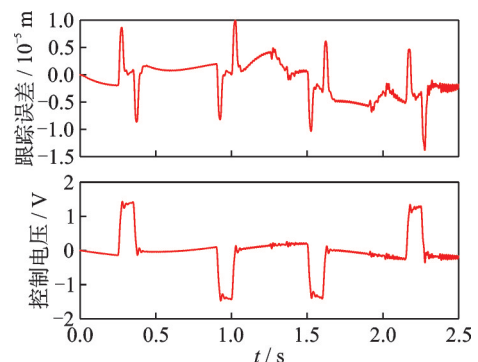


图 8 PID-NFTSM 仿真结果

Fig.8 Simulation results of PID-NFTSM

从顶部的跟踪误差曲线可知,传统滑模控制器在运行过程中误差波动较大,且伴随有明显的高频振荡,其最大跟踪误差达到了 $68.2\ \mu\text{m}$ 。变幂次滑模趋近律误差降低至 $28.4\ \mu\text{m}$,但其振荡仍然存在。相比之下,采用本文设计的PID-NFTSM控制器后,系统的跟踪精度得到了大幅提升,其误差曲线整体相对更加平滑,最大跟踪误差显著降低至 $13.8\ \mu\text{m}$ 。这表明PID-NFTSM控制能够更快地收敛并有效减小系统的稳态误差。

底部的控制电压曲线直观地反映了两种控制器的抖振情况。传统滑模控制和变幂次趋近律滑模控制的输入信号存在极其严重的高频抖振现象,表现为控制电压在正负区间内的剧烈切换。这种高频振荡在实际工程中极易导致物理执行机构的过度磨损甚至损坏。反观PID-NFTSM控制器的输出,其控制电压曲线相对连续且平滑,在保证快速动态响应的同时,有效抑制了高频抖振现象。这充分证明了PID-NFTSM控制算法不仅有效提升了系统的跟踪性能,还从根本上改善了控制信号的质量,具备更强的工程应用价值。

5 结 论

所提出的基于时延估计的PID-NFTSM简化模型控制策略能够实现对设定轨迹的高精度跟踪。与传统滑模控制和文献[18]提出的变幂次趋近律相比,该策略将系统的最大跟踪误差由 $68.2\ \mu\text{m}$ 和 $28.4\ \mu\text{m}$ 显著降低至 $13.8\ \mu\text{m}$,大幅减小了稳态误差。通过引入TDE与NFTSM,该方法在保证快速收敛的同时,有效削弱了传统滑模控制输入端的高频抖振效应,输出了平滑、连续的控制电压信号。验证了该策略在提升伺服控制精度与运行平稳性方面的有效性,能够更好满足感应淬火过程对高精度运动控制的严格要求,为实际工业应用提供了可靠的控制理论参考。

参考文献:

- [1] 李明哲,陈宝凤,孙立壮,等.滚珠丝杠感应淬火技术研究进展[J].金属热处理,2025,50(2):172-180.
LI Mingzhe, CHEN Baofeng, SUN Lizhuang, et al. Research progress of induction hardening technology for ball screw[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(2): 172-180.
- [2] 吴元徽.滚珠丝杠表面感应淬火的质量控制[J].金属热处理,2011,36(1):120-121.
WU Yuanhui. Quality control of surface inductive quenching for ball screw[J]. Metal Heat Treatment, 2011, 36(1): 120-121.
- [3] LUO J, SHIH A J. Inverse heat transfer solution of the heat flux due to induction heating[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2005, 127(3): 555-563.
- [4] 孙颖,贺连芳,李志超,等.滚珠丝杠仿形感应淬火工艺设计及数值模拟[J].材料热处理学报,2022,43(2):161-169.
SUN Ying, HE Lianfang, LI Zhichao, et al. Process design and numerical simulation of profiling induction hardening of ball screw[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(2): 161-169.
- [5] 丑幸荣,周国华.数控曲轴旋转感应淬火机床的控制系統[J].制造技术与机床,1998(8):16-18.
CHOU Xingrong, ZHOU Guohua. Control system for CNC crankshaft rotary induction hardening machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool Tools, 1998(8): 16-18.
- [6] 叶佩青,张勇,张辉.数控技术发展状况及策略综述[J].机械工程学报,2015,51(21):113-120.
YE Peiqing, ZHANG Yong, ZHANG Hui. Review on the development and strategies of CNC technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 113-120.
- [7] LI Z, ZHAO C, LU Z. Thermal error modeling method for ball screw feed system of CNC machine tools in x -axis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11): 5383-5392.
- [8] 曲星宇,张爽,彭成坤.滚珠丝杠进给系统改进预设性能无模型自适应滑模控制[J].电机与控制学报,2025,29(9):169-182.
QU Xingyu, ZHANG Shuang, PENG Chengkun. Improved prescribed performance model-free adaptive sliding mode control for ball screw feed system[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(9): 169-182.
- [9] ZHANG C, CHEN Y. Tracking control of ball screw drives using ADRC and equivalent-error-model-based feedforward control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7682-7692.
- [10] LI C, XU M, SONG W, et al. A review of static and dynamic analysis of ball screw feed drives, recirculating linear guideway, and ball screw[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 188: 104021.
- [11] ZHAO S, MENG Q, LAI X, et al. An adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control method with time-delay estimation for pneumatic soft actuator without specific model[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(5): 4061-4071.
- [12] WANG Y, GU L, XU Y, 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] VO A T, TRUONG T N, KANG H J, et al. Prescribed performance model-free sliding mode control using time-delay estimation and adaptive technique applied to industrial robot arms[J]. Information Sciences, 2025, 702: 121911.
- [14] LI G, MA X, LI Y. Adaptive sliding mode control based on time-delay estimation for underactuated 7-DOF tower crane[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2025, 55(3): 2277-2288.
- [15] WANG Y, MENG S, JU F, et al. A novel model-free robust control of cable-driven manipulators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 125532-125541.
- [16] ZHENG M, CHEN Q, SU Y, et al. Sustainable trajectory tracking control for underactuated ships using non-singular fast terminal sliding mode control[J]. Sustainability, 2025, 17(13): 5866.
- [17] KAMALZADEH A, ERKORKMAZ K. Compensation of axial vibrations in ball screw drives[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 373-378.
- [18] 韩硕, 汤文成, 包达飞. 基于变幂次趋近律的滚珠丝杠进给系统滑模控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 237-244.
HAN Shuo, TANG Wencheng, BAO Dafei. Sliding mode control for ball screw drives based on variable power reaching law[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 237-244.
- [19] 李剑, 汤文成. 基于 H_∞ 理论的滚珠丝杠进给系统滑模控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(8): 1497-1504, 1524.
LI Jian, TANG Wencheng. Sliding mode control for ball screw drives based on H_∞ theory[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(8): 1497-1504, 1524.
- [20] YU S, YU X, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. Automatica, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [21] NCHOR R A, HUANG L, YANG J. Comparative analysis of sliding mode and terminal sliding mode current control for direct-drive wave energy converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 172: 111176.
- [22] ZHU Y, LIU S, WANG H, et al. Fractional-order terminal sliding mode control of single-phase nine-level rectifier with coupled inductance[J]. Electrical Engineering, 2025, 107(10): 13185-13198.
- [23] YIN S, SHI Z, LIU Y, et al. Adaptive non-singular terminal sliding mode trajectory tracking control of robotic manipulators based on disturbance observer under unknown time-varying disturbance[J]. Processes, 2025, 13(1): 266.
- [24] ZUN W W, WANG Y Y, HAO F. Nonsingular terminal sliding mode compliance control of aerial manipulator based on disturbance observer[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 40(S2): 69-76.
- [25] WANG Y, YAN F, CHEN J, et al. Continuous non-singular fast terminal sliding mode control of cable-driven manipulators with super-twisting algorithm[J]. IEEE Access, 2018, 6: 49626-49636.
- [26] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2753-2762.
- [27] VAN M. An enhanced robust fault tolerant control based on an adaptive fuzzy PID-nonsingular fast terminal sliding mode control for uncertain nonlinear systems[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1362-1371.
- [28] QIN G, WANG M, CAO G, et al. PID sliding mode control of PMSM based on improved terminal sliding mode reaching law[J]. Energies, 2025, 18(10): 2661.
- [29] ANJUM Z, ZHOU H, GUO Y. Self-tuning fuzzy nonsingular proportional-integral-derivative type fast terminal sliding mode control for robotic manipulator in the presence of backlash hysteresis[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(4): 809-819.
- [30] MINH TRIEU N, TAN No N, NGUYEN VU T, et al. Chattering-free PID-nested nonsingular terminal sliding mode controller design for electrical servo drives[J]. Mathematics, 2025, 13(7): 1197.
- [31] WANG Y, GU L, GAO M, et al. Multivariable output feedback adaptive terminal sliding mode control for underwater vehicles[J]. Asian Journal of Control, 2016, 18(1): 247-265.
- [32] KALI Y, SAAD M, BENJELLOUN K, et al. Super-twisting algorithm with time delay estimation for uncertain robot manipulators[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(2): 557-569.
- [33] 董亮. 高速滚珠丝杠进给系统动态特性与控制技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
DONG Liang. System dynamics and precision control of highspeed ball screw drives[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.