

驱动系统摩擦扰动的模糊平方项自适应滑模控制

林子豪¹, 方成刚^{1,2}, 杨贵超^{1,2}, 高伟峰¹, 陈昕¹

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 211816, 南京;

2. 南京工业大学江苏省工业装备数字制造及控制技术重点实验室, 210000, 南京)

摘要: 为了提高滚珠丝杠系统的运动精度同时减少能耗,提出了一种新的模糊平方项自适应滑模控制方法,可以在降低能耗的同时有效提高滚珠丝杠系统的运动精度。采用集中质量模型建立滚珠丝杠动力学模型,同时引入 LuGre 摩擦模型,估计摩擦力。所提出的自适应方法可以在非线性滑模面的趋近和滑动阶段根据误差平方项的变化来自动调节控制增益,设计了对应的边界层厚度模糊推理系统,在提高信号输出、减轻颤振和实现精确跟踪的同时减少高增益带来的能耗。实验数据显示,当使用设计的 FASMC 控制器时,最大跟踪误差为 $21.32\ \mu\text{m}$,在工作台增加 $20\ \text{kg}$ 质量块和高速负载情况下,最大跟踪误差分别为 $22.15\ \mu\text{m}$ 和 $24.97\ \mu\text{m}$ 。与一阶滑模 FOSMC 控制器和其他自适应控制器的对比结果表明,所提出的控制策略可以有效提高跟踪精度和鲁棒性。

关键词: 滑模控制;滚珠丝杠系统;自适应控制;LuGre 摩擦;跟踪误差

中图分类号: TP213 **文献标志码:**

DOI: 10.7652/jxtxb202303009 **文章编号:** 0253-987(2023)03-0097-09

Fuzzy Square Term Adaptive Sliding Mode Control for Friction Disturbance of Drive System

LIN Zihao¹, FANG Chenggang^{1,2}, YANG Guichao^{1,2}, GAO Weifeng¹, CHEN Xin¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Industrial Equipment Digital Manufacturing and Control Technology,

Nanjing University of Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the motion accuracy of ball screw system and reduce energy consumption, a new fuzzy square term adaptive sliding mode control is proposed, which can effectively improve the motion accuracy of ball screw system while reducing energy consumption. The lumped mass model is used to establish the dynamic model of ball screw. At the same time, the LuGre friction model is introduced to estimate the friction. The proposed adaptive method can automatically adjust the control gain according to the change of error square term in the approach and sliding stage of the nonlinear sliding mode surface. The corresponding boundary layer thickness fuzzy inference system is designed to improve the signal output, reduce flutter and realize accurate tracking while reducing the energy consumption caused by high gain. The experimental data show that the maximum tracking error is $21.32\ \mu\text{m}$ when the designed FASMC controller is used. On the condition of the worktable is added with a $20\ \text{kg}$ mass block and high-speed load,

the maximum tracking error is $22.15\ \mu\text{m}$ and $24.97\ \mu\text{m}$, respectively. Compared with the first-order sliding mode FOSMC controller and other adaptive controllers, the results show that the control strategy in this study can effectively improve the tracking accuracy and has high robustness.

Keywords: sliding mode control; ball screw system; adaptive control; LuGre friction; tracking error

滚珠丝杠系统可以高效地传递扭矩和力^[1],因此广泛应用在机床传动中。在高速进给情况下对驱动系统有更高的要求,随着机床加工中移动指令的频繁输入,对滚珠丝杠系统的响应速度和运动轨迹的跟踪精度要求越高。滚珠丝杠副控制系统包括伺服电机、光栅尺、工作台等,目前常用的控制算法有 PI 控制方法^[2],算法使用简单,常用在精度要求不高的情况下,然而滚珠丝杠系统的动态精度要受到内部非线性因素、结构共振等限制,即联轴器、轴承本身和存在的摩擦因素,PI 控制难以实现高精度的跟踪效果和稳定性。为解决这一问题,国内外学者提出了很多的控制策略,例如 PI 级联控制、滑模控制^[3]、自适应模糊控制^[4]等。滑模控制因具有高响应性、强鲁棒性、强可调节性等优点被广泛使用^[5-7]。

进给驱动的首要目标就是在高进给率下实现更高的运动精度。跟踪误差是影响精度的重要指标,已经有许多研究通过设计控制器来提高跟踪性能。Okwudire 等^[8]进行了运动轨迹优化,设置不同的增益范围来减小产生的误差。Yang 等^[9]结合比例积分和滑模控制方法进行控制器设计,利用滑模控制对非线性因素的抑制特性来达到对跟踪误差的抑制,对于模糊规则和自适应控制也有较好的控制性能。Varble 等^[10-12]采用神经模糊控制来改变滑模控制的边界层,以缓解控制过程不连续和抖动现象,可以有效地减少颤振现象。

除了上述存在的问题,能源的消耗问题也需要得到重视,在工业中有三分之一的总制造能源消耗存在数控机床的加工过程中,机床部件和工作台移动是能量消耗的重要部分^[13]。因此在设计控制器时不仅要保证高速负载的运动精度还要尽量减少能耗^[14]。例如,Wang 等^[15]提出了一种实时能量最优化跟踪方法,建立非线性摩擦模型,通过加速度和进给的关系设计控制器来降低能耗;Khalick 等^[16]基于摩擦模型来设计滑模控制器,利用对非线性因素的高调节性来降低驱动系统能量损耗。

滚珠丝杠系统的能耗不仅与运动轨迹有关,还会随着控制增益提供的不同控制输入发生改变,上述的控制方法采用固定的控制增益,即使运动过程跟踪误差有所减小,也还是保持相同的能量消耗。

为了同时满足环境要求和运动精度,需要引入自适应律进行增益切换。Farrage 等^[17]选取非线性滑动面结合运动轮廓参数来设计自适应滑模控制,虽然可以根据误差更新增益,但是滑模面幅度会持续增加,只能减少趋近阶段的能量损失,对滑动阶段无影响^[18]。吕盾等^[21-22]采用滤波器和综合控制策略在滚珠丝杠副的跟踪精度的提升上都得到了一定效果,李艳等^[23]采用快速双幂次趋近律并加以改进,使系统状态在不同趋近阶段中针对性地调节速度,但是这些方法都存在一些局限性,不能在减小跟踪误差的情况下减少能耗,需要进一步改进和创新。

针对以控制系统的固定增益来达到高跟踪精度又导致能耗提高的问题,提出了一种模糊平方项自适应滑模控制器(FASMC),在建立滚珠丝杠集中质量模型的基础上,考虑摩擦力和干扰矢量将其解耦为二阶系统^[24-25],选取非线性滑动面并设计新的自适应律来根据不同的误差变化更新趋近和滑动段的控制增益,以提供契合度更高的控制信号,并且根据滑动面幅度和边界层的模糊规则进行自适应调节,进一步加强稳定性和跟踪精度。本文搭建滚珠丝杠平台进行轨迹跟踪和不同工况实验,验证所设计 FASMC 控制器的控制效果。比较不同控制方法的结果得出,设计的控制器不仅能有小的跟踪误差,而且减少能量的损耗,受工况变化影响不大,有较高的鲁棒性。

1 滚珠丝杠副动力学模型

实验装置如图 1 所示,采用高精度丝杠螺母副、一个交流伺服电机、联轴器、工作台,用于对工作台位置测量的旋转编码器的最小步距为 $1\ \text{nm}$ 。丝杠螺母的作用位置默认在丝杠轴的中心点,并将滚珠丝杠进给系统的驱动力耗散视为接触面摩擦产生。

图 2 表示简化后具有驱动耗散的滚珠丝杠系统。高速运动的进给系统存在轴向和扭转振动。本文主要考虑在低阶模态下产生的轴向振动特性,采用集中质量模型可以对滚珠丝杠进给驱动系统的单一振动进行分析并设计综合控制器。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = l(x_2 - x_1) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + u + d_1 - b_1 \dot{x}_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 = l(x_1 - x_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + u + d_2 - b_2 \dot{x}_2 \end{cases} \quad (1)$$

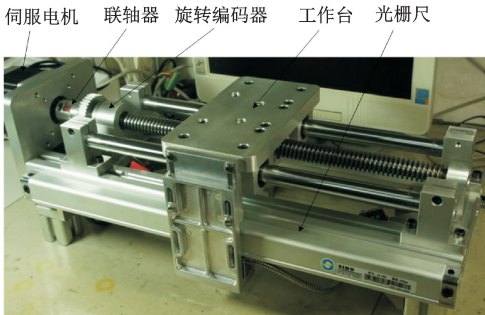


图 1 滚珠丝杠实验台
Fig. 1 Ball screw test bench

式中: m_1 为电机质量; m_2 为工作台质量; x_1 为旋转部件位移; x_2 为工作台位移; c 表示滚珠丝杠螺母界面的黏性摩擦; u 是控制转矩输入; d_1 和 d_2 分别是作用在电机和工作台上无法测量的有界扰动; l 为系统等效刚度; b_1 和 b_2 表示作用在运动元件上的黏性摩擦。

伺服驱动的滚珠丝杠系统以运动的形式传递驱动力,轴承和其他接触面产生的摩擦力是驱动力的耗散方式,由摩擦力的非线性和复杂性会导致伺服系统在低速运行阶段出现爬行现象,较大的稳态误差会加剧产生跟踪误差。

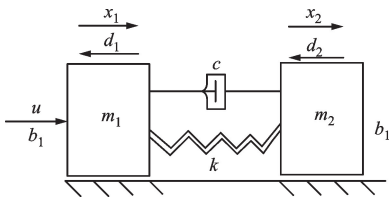


图 2 滚珠丝杠系统的集中质量模型
Fig. 2 Centralized mass model of ball screw system

为了研究进给驱动系统产生的摩擦力对跟踪误差和能量损耗的影响,在集中质量模型基础上,采用 LuGre 摩擦模型模拟接触零件的相互作用,除了由 Stribeck 效应引起的部分外,还包括库仑摩擦和黏性摩擦,以简化整个进给驱动刚体动力学模型。在稳态运动下,估计的摩擦力 T_L 为

$$T_L = [T_c + (T_s - T_c)e^{-c|v/v_s|^2}] \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c\dot{x} \tag{2}$$

式中: c 为 LuGre 摩擦模型中的黏性摩擦力; T_s 为库仑摩擦力; T_c 为最大静摩擦力; v 为直线速度; v_s 为 Stribeck 速度。

引入旋转摩擦模型耗散函数

$$G = G_a - G_b \tag{3}$$

式中: G_a 是驱动扭矩; G_b 是有效载荷扭矩。

综合系统分析可以得到系统的拉格朗日方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial G}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \tag{4}$$

式中: T 为系统动能; U 为系统势能; q_i 为系统的广义坐标; Q 为系统广义力。

为便于后续使用 SMC 的适应性和鲁棒性来补偿非线性摩擦特性和耦合效应。将进给驱动动力学解耦为二阶系统

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{T}_L = \mathbf{f} - \mathbf{d} \tag{5}$$

式中: $\mathbf{M}$ 为标准质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为黏性摩擦系数矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{f}$ 为驱动力矢量; $\mathbf{d}$ 为干扰矢量。

2 自适应平方滑模控制器设计

滚珠丝杠系统具有时变、外部干扰和参数不确定的特性,SMC 可以有效地克服这些动态特性,提出了一种自适应滑模控制策略来改进增益的选取,加快系统从初始阶段到达最终滑模面的速度,削弱系统抖振并通过自适应切换来降低系统的损耗。接下来在 n 维误差空间定义一个滑动面,测量设定值 x 和实际值 x_d 之间的控制偏差。为了更清晰地表示,滑动面写成向量表示

$$\mathbf{S}(e_x) = \mathbf{\Lambda}^T(\lambda) \begin{bmatrix} x - x_d \\ \dot{x} - \dot{x}_d \\ \vdots \\ x^{(n-1)} - x_d^{(n-1)} \end{bmatrix} = \mathbf{\Lambda}^T(\lambda) (x - x_d) \tag{6}$$

式中: λ 为正常数; n 为系统阶数。

定义 e 为跟踪误差,则误差项为

$$e = x - x_d \tag{7}$$

式中: e 为测量设定值 x 和实际值 x_d 之间的控制偏差。

根据上述二阶耗散滚珠丝杠非线性系统,设定滑动面为

$$\mathbf{S}(e_i) = (\mathbf{a} + \boldsymbol{\phi}\mathbf{b})e + \mathbf{I}\dot{e} \tag{8}$$

式中: $\mathbf{S}(e_i)$ 是一个 2×1 向量; $\mathbf{a}$ 、 $\boldsymbol{\phi}$ 、 $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{I}$ 为 2×2 的矩阵。

控制系统的稳定性由 Lyapunov 方程进行验证,考虑上述二阶摩擦滚珠丝杠系统, $\mathbf{a}$ 用于提供较低的值,并使主导极点满足正定矩阵 $\mathbf{P}$ 的 Lyapunov 方程

$$\mathbf{a}\mathbf{b} + \mathbf{b}\mathbf{a}^T = \mathbf{P} \tag{9}$$

式中: $\mathbf{b}$ 用于调整阻尼比; $\boldsymbol{\phi}$ 存在 i 个元素,以在输出从其初始值变为所需值时将阻尼比从其较低值调整

为较高值。 φ_i 的选择如下

$$\varphi_i = \eta [\exp(-e) + \exp(e)] \quad (10)$$

式中: η 为调整 φ 最小边界的正值,对于初始条件 $e(0)=0$,理想情况误差向量在 $S=0$ 处稳定。

通过式(8)得到

$$\dot{e} = -(a + \varphi b)e \quad (11)$$

在这种情况下,通过适当调整 $(a + \varphi b)$ 的值,跟踪误差会收敛到可接受的幅度值。对于滚珠丝杠系统的控制目标是设计一个合适的控制律,来使驱动系统状态可以向 $S=0$ 的表面移动。

在现有的大多控制律中为了实现良好的控制效果,增益 k_i 是固定的或者涉及的是不确定的参数界限,在实际应用时较难获取,为了提高控制效果将提高增益,但是因为 k_i 不能随着跟踪误差的不同而改变,因此滚珠丝杠系统在运动过程的损耗是相同的,有较多的研究采用自适应律(标记为①)来进行^[19],表达式如下

$$\dot{k}_i = \begin{cases} \omega |s_i| \operatorname{sgn}(|s_i| - \Delta_i), & k_i \leq \bar{k}_i \\ k_i^*, & k_i > \bar{k}_i \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δ_i 为边界层厚度系数; k_i 是增益矩阵 k 的一个元素; $\bar{k}_i$ 是上边界增益; k_i^* 是 k_i 的正增益值; s_i 是标量滑动面幅度; ω 为适应比率。

自适应控制①的控制增益需要跟随滑动面来变化,所以调节速率低,并且在 $s_i = \Delta_i$ 时控制信号输入过程存在中断现象,这会影响控制器的稳定性。

为了解决上述方法存在的问题,提出了一种改进自适应控制律,可以根据不同时刻跟踪误差的平方项以更快的适应率自动更新控制增益 k 。改进自适应律(标记为②)表达式如下

$$\dot{k}_i = \begin{cases} \omega s_i^2, & |s_i| \geq \Delta_i, & k_i \leq \bar{k}_i \\ -\omega s_i^2, & |s_i| < \Delta_i, & k_i \leq \bar{k}_i \end{cases} \quad (13)$$

定理 1 该控制律主要包括两个阶段。第一个是在趋近阶段,为了减少能量损失,采用误差平方项来提供更快的自适应律。第二个在滑动阶段,减小控制增益、降低损耗的情况下,保证运动精度和控制性能,综上所述,自适应滑模控制律表示为

$$u = \ddot{x}_d + kS + \frac{d\varphi be}{dt} + h \operatorname{sgn}(S) + a + \varphi b \quad (14)$$

$\operatorname{sgn}(S)$ 和 h 满足以下关系

$$h_i \geq \max(d_i) \quad (15)$$

$$\operatorname{sgn}(S) \simeq \frac{s_i}{|s_i| + \rho_i} \quad (16)$$

式中 ρ_i 为平滑函数。

证明:选取 Lyapunov 函数

$$V_i = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2} (k_i - \bar{k}_i)^2 \quad (17)$$

根据式(5)得到系统的动态误差为

$$\ddot{e}_i = \ddot{x}_d - M^{-1} \{f - d - K\dot{x} - T_L\} \quad (18)$$

式(18)通过边界厚度保证系统稳定性,对时间进行求导

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= s_i \dot{s}_i + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i = \\ &s_i \left\{ \ddot{e}_i + (a + \varphi b) \dot{e} + \frac{d\varphi be}{dt} \right\} + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i = \\ &s_i \{-k_i s_i - h_i \operatorname{sgn}(s_i) - d_i\} + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i \end{aligned} \quad (19)$$

为确认系统的稳定性,对式(13)考虑如下假设。

假设 1 当 $|s_i| \geq \Delta_i$ 时,自适应律提供正增益 k_i ,式(19)转变为

$$\dot{V}_i = s_i \{-k_i s_i - h \operatorname{sgn}(s_i) - d_i\} + \Delta_i (k_i - \bar{k}_i) s_i^2 \quad (20)$$

式中 k_i 为介于初始增益 k_{in} 和上限增益 $\bar{k}_i$ 之间的正值。

假设 2 当 $|s_i| < \Delta_i$ 时,自适应律进行切换,因此式(20)的 $(k_i - \bar{k}_i)$ 转变为正值, h_i 被分配大于 $|-s_i d_i - \Delta_i (k_i - \bar{k}_i) s_i^2|$ 。

综上所述, $\dot{V}_i$ 、 s_i 、 k_i 有界,且 s_i 连续,引入 Barbalat 定理,因此当 $\dot{V}_i \rightarrow 0$ 、 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$,定理得证,系统有良好的稳定性。

3 基于 FL 的自适应边界层

上述的自适应滑模趋近可以根据跟踪误差的变化调整增益,以此控制滚珠丝杠系统进给速度,但符号函数的存在将会不可避免地造成控制抖振,为了进一步缓解运动抖振现象并提高动力性能,在切换控制项中设计了一个边界层,表达式如下

$$\Delta = \check{k}(t) \operatorname{sat}\left(\frac{s}{r}\right) \quad (21)$$

式中:函数 $\operatorname{sat}(\cdot)$ 表示执行器饱和度和 r 表示饱和参数。

仅通过上述单结构边界层只能达到抑制抖振的作用,但是不合理的 r 会降低系统的动态性能。为解决边界层的自适应性,通过模糊方法进行边界层厚度调整。

将滑模控制的滑动面幅值 $|s_i|$ 作为模糊逻辑的输入语言变量,边界层厚度系数 Δ_i 作为模糊语言输出变量,不仅能在一定程度上有效地降低系统抖振,还可以提高系统的响应速度,表达式如下

$$\phi(|\Delta_i|) = \operatorname{fuzzy}(|s_i|) \quad (22)$$

采用乘积推理引擎和中心平均去模糊化的模糊系统可表示为

$$\psi(|\Delta_i|) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(|s_i|)|\Delta_i|}{\sum_{i=1}^n f_i(|s_i|)}$$

(23)

式中 $|\Delta_i|$ 的值由模糊规则确定。

模糊规则表示为如下 if-then 形式

规则 1 if $|s_i|$ is u_i then ψ is u_i^Δ , 其中 u_i 为输入模糊子集, u_i^Δ 为输出模糊子集。

模糊集和隶属函数设计中的标准和客观方法大多数都是基于经验和实验。为简单起见,使用相同的模糊集来表征输入和输出变量的行为。理论上,增加模糊集的元素和语域的细分可以提高控制精度,但计算复杂度会增加。相反,太少的模糊集不能覆盖整个域。

因此,将输入模糊子集 $|s_i|$ 与输出模糊子集 $|\Delta_i|$ 分为 10 大区域,分别为 VS(非常小)、S(小)、M(中)、L(大)、VL(非常大),VN(非常窄)、N(窄)、M(中)、W(宽)、VW(非常宽)。输入、输出系统的三角形、矩形隶属函数如图 3 所示。

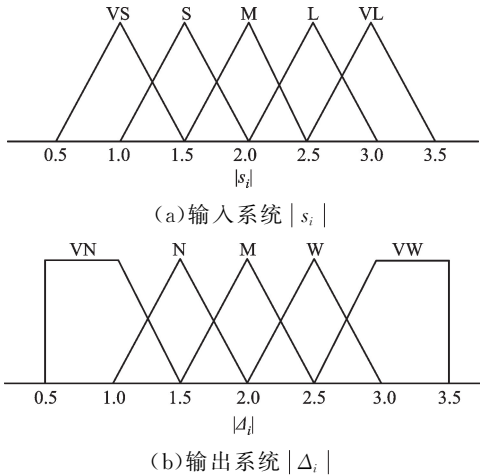


图 3 输入输出的隶属函数

Fig. 3 Membership function of input and output

制定模糊规则的思路是根据趋于稳定时边界层厚度减小的原则进行设计:如果滑动面的 $|s_i|$ 很大,模糊规则缩小了边界层的厚度,那么厚度边界层 $|\Delta_i|$ 很窄,以满足快速达到滑动面保证精度的目的;如果滑动面的 $|s_i|$ 大,则厚度边界层 $|\Delta_i|$ 窄;如果滑动面的 $|s_i|$ 为中等,则厚度边界层 $|\Delta_i|$ 中等;如果滑动面的 $|s_i|$ 小,则厚度边界层 $|\Delta_i|$ 宽;如果滑动面的 $|s_i|$ 非常小,那么厚度边界层 $|\Delta_i|$ 很宽。模糊规则增加了边界层厚度来减轻振颤现象。

综上所述,带有不确定性的滚珠丝杠系统可以在上述控制方法下稳定运行。基于非线性滑动面的控制器对增益矩阵 k 切换进行了自适应律更新,不仅可以提高运动精度还能适当减少能耗,采用模糊规则分类了滑动面绝对值和边界层厚度的对应关系从而进行自适应选取,进一步加强了趋近速度和稳定性。所设计的控制系统结构如图 4 所示。

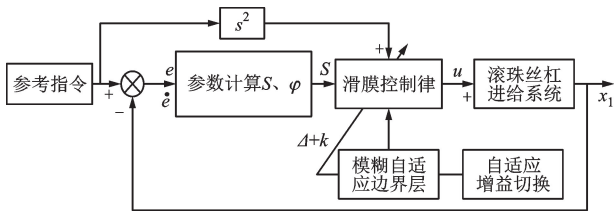


图 4 提出的自适应控制系统框图

Fig. 4 The block diagram of the proposed adaptive control system

4 实验结果与分析

实验台如图 1 所示,滚珠丝杠系统存在时变特性,为了检测设计的模糊自适应滑膜控制器(FASMC)实际应用性能,在滚珠丝杠实验台进行轨迹跟踪实验,使用了如图 5 所示的轮廓向前、后运动控制进给。显示了点对点轨迹的实验跟踪结果,运动范围为 0.2 m,最大速度为 500 mm/s,峰值加速度为 100 mm/s²。参考最大速度和加速度远高于工业生产时的工作状态,往返运动可以充分检测所设计控制器性能。检测指标为工作台轨迹跟踪误差。表 1 为滚珠丝杠模型主要参数表。

表 1 滚珠丝杠模型主要参数

Table 1 Main parameters of ball screw model

参数	数值
m_1/kg	272.48
m_2/kg	50
$c/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2.432×10^3
$b_1/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.3245
$b_2/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	647.32
$l/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	3.25×10^7

4.1 跟踪性能评估

为了进一步说明本文所设计 FASMC 的控制效果,将 FASMC 的不同自适应方案①、②进行比较,

验证提出的自适应控制律优化提升度,采用相同的滚珠丝杠模型和控制参数(如表 1 所示),只改变适应率并提高了阻尼比,不仅能确认是否有效地降低了跟踪误差,还可以合理比较能量损耗。同时将 FOSMC、FASMC①、FASMC② 这 3 种控制方法在同等输入参数下进行轨迹跟踪实验对比,实验输入轨迹如图 5 所示。

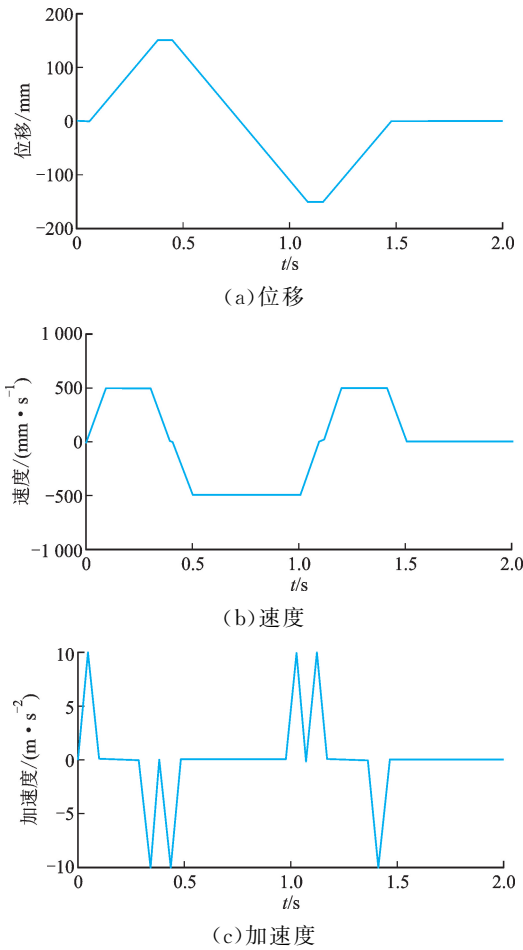


图 5 轨迹跟踪实验参考轨迹

Fig. 5 Reference trajectory of trajectory tracking experiment

通过图 6 的跟踪误差对比和表 2 的均方根 R_{MS} 值可以看出, FOSMC 出现了较大的跟踪误差,最大为 $56\text{ }\mu\text{m}$ 。所提出 FASMC②控制策略与 FOSMC 和 FASMC①相比,跟踪误差分别降低 72.6% 和 23.8%,在速度突变时有较好的跟踪效果。

为满足实际生产需要,对负载质量进行变化实验。通过图 6 质量变化的实验结果表明,在增加质量的情况下, FASMC②控制策略对跟踪误差的降低更为显著,分别降低了 73.2% 和 29.1%。质量变化对 FASMC②跟踪结果的影响不大,因为轨迹在较高频率下没有激励,可以保持好的鲁棒性。

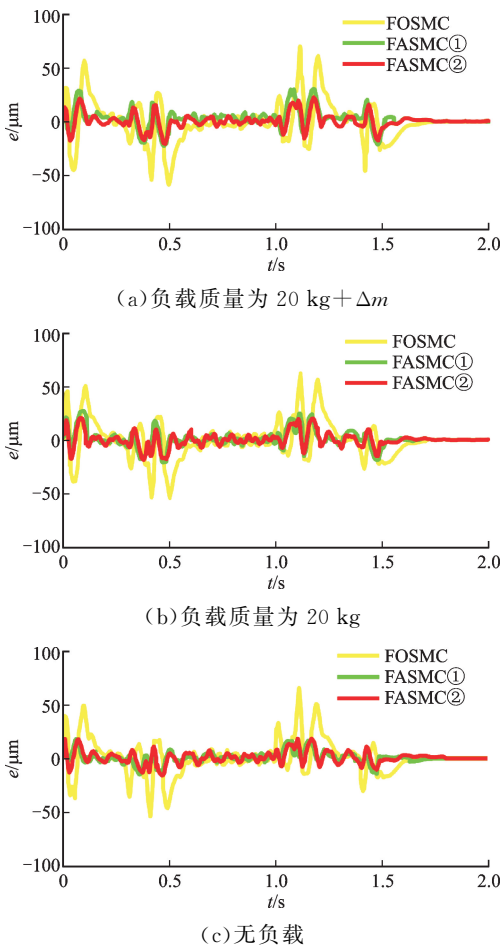


图 6 参考轨迹和实验测量的跟踪误差

Fig. 6 Tracking error of reference trajectory and experimental measurement

表 2 跟踪误差的均方根值

Table 2 RMS of error measurement

控制策略	$R_{MS}/\mu\text{m}$		
	无负载	负载质量为 m_2	负载质量为 $m_2 + \Delta m$
FOSMC	11.7	4.2	3.2
FASMC①	12.7	4.8	3.4
FASMC②	13.6	5.3	3.5

在上述比较中,只是改变适应律的情况下,采用相同的进给驱动动力学模型和控制方案可以提高跟踪性能方面的有效性。在实现相同跟踪性能的情况下,可以合理比较能耗。为了实现与方程近似的跟踪误差,3 种方法中的适应率值分别设为 $[10, 30]^T$ 、 $[30, 60]^T$ 和 $[7, 5]^T$,自适应律(13)和(14)以及一阶滑模的阻尼比已经调整为相似的性能。上限增益被分配以保证控制系统稳定性,通过功率计

(WT5000AC/DC) 测量的节能效果如表 3 所示。

表 3 相同控制参数下消耗的能量

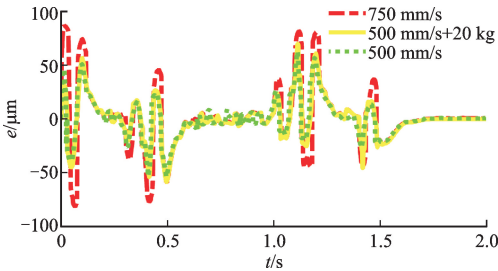
Table 3 Energy consumed under the same control parameters		
自适应律	能量损耗/(MW · h)	损耗减少量/%
FOSMC	272.68	
FASMC①	271.53	1.10
FASMC②	269.75	1.46

提出的新自适应律式(14)的一个优点是允许其快速适应并产生适当的性能。自适应增益可以根据产生的误差在趋近和滑动阶段改变。因此所提出的方法可以提供适当的信号来减少跟踪误差和提高节能效率。

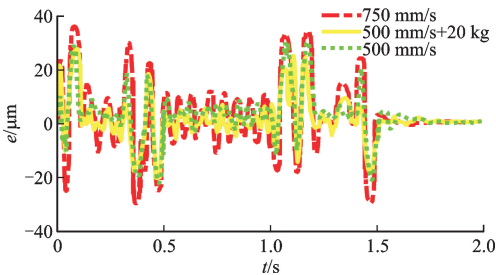
4.2 高速负载工况下跟踪性能评估

为比较更高速度下以及考虑负载情况下设计的控制策略的稳定性,在不改变目标轨迹参数的情况下进行跟踪误差检测,工况分别为最大速度 500 mm/s 时工作台无负载、最大速度 750 mm/s 时工作台无负载和最大速度 500 mm/s 时工作台增加 20 kg 配重块这 3 种工况,按照上面的 3 种控制方法分别进行跟踪控制,为了确保结果的可重复性,进行了多次测试。

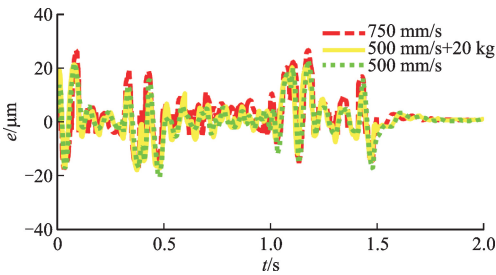
高速负载实验获得的跟踪误差曲线如图 7 所示,不同控制策略产生的最大误差和 RMS 值如表 3 所示。图 7(a)为一阶滑模 FOSMC 控制,当工作台负载相同时,增加了 20 kg 负重跟踪误差,增加了大约 18 μm,将最大速度提高到 750 mm/s,跟踪误差有明显变化,增大了将近一倍,图 7(b)为 FASMC①的控制方法,可以有效地降低跟踪误差,但是在提高速度后,跟踪误差增加了大约 13 μm。图 7(c)为本研究设计的控制策略,可以看到在添加负载后对跟踪误差的影响较小,最大跟踪误差、RMS 值变化不大,表明应用本文改进的控制方法对速度及负载的变化不敏感,在保证跟踪性能的同时具有较强的鲁棒性能。



(a)FOSMC 控制方案下的跟踪误差



(b)FASMC①控制方案下的跟踪误差



(c)FASMC②控制方案下的跟踪误差

图 7 3 种工况下不同控制方案的跟踪误差

Fig. 7 Tracking error of different control schemes under three working conditions

表 4 不同工况的跟踪误差对比

Table 4 Tracking error values under different working conditions			
控制策略	$R_{MS}/\mu m$		
	实验工况	最大误差	均方根误差
FOSMC	750 mm/s	84.3	16.2
FASMC①	750 mm/s	38.2	5.7
FASMC②	750 mm/s	25.7	4.2

对比上述跟踪误差的结果可以发现,设计的模糊平方项自适应滑模控制方法(FASMC)产生的跟踪误差明显低于典型的 FOSMC 控制和前面介绍的其他自适应律①,充分体现了改进后的模糊自适应滑模控制的有效性,可以满足高跟踪精度下减少能耗的目的。

5 结 论

本文提出了一种基于非线性滑动面的模糊自适应滑模控制策略。采用工业进给驱动进行直线轨迹实验,得到以下结论。

- (1)采用集中参数法和建立二自由度系统滚珠丝杠副的动力学模型,考虑摩擦干扰引入 LuGre 模型来估计摩擦力,为后续控制设计提供参考。
- (2)设计非线性滑模面,以 SMC 方法为核心,根据产生误差的平方项来设计自适应律,可以根据

不同误差切换控制增益,加入模糊控制原理,分析滑动面幅度和边界层厚度的模糊关系,设计了一种FASMC控制方法。在误差增大时自适应提高控制增益和降低边界层厚度来达到高的跟踪精度,在稳定阶段会在保证跟踪精度的基础上降低控制增益减少能耗,并提高边界层厚度以提升稳定性。

(3)通过对轨迹跟踪实验测量不同控制策略产生的跟踪误差的对比,本文所提的FASMC控制方法有较高的精度,并且在高速和负载变动的情况下依然有很好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] ALTINTAS Y, VERL A, BRECHER C, et al. Machine tool feed drives [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(2): 779-796.
- [2] 戴鹏, 徐楠, 谢后晴, 等. 永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制 [J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(11): 32-38.
DAI Peng, XU Nan, XIE Houqing, et al. PMSM sliding mode control based on fast power reaching law [J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(11): 32-38.
- [3] 解磊. 基于变结构控制策略的转台控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 12-15.
- [4] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2088-2095.
DENG Yongting, LI Hongwen, WANG Jianli, et al. Adaptive sliding mode control for AC servo system based on Kalman filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2088-2095.
- [5] YANG Jixiang, ASLAN D, ALTINTAS Y. Identification of workpiece location on rotary tables to minimize tracking errors in five-axis machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 125: 89-98.
- [6] SIRA-RAMIREZ H, RIOS-BOLIVAR M. Sliding mode control of DC-to-DC power converters via extended linearization [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems: I Fundamental Theory and Applications*, 1994, 41(10): 652-661.
- [7] 王丽梅, 李鑫. 直接驱动 XY 平台的零相位自适应鲁棒控制 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(2): 121-126.
WANG Limei, LI Xin. Zero phase adaptive robust control of direct drive XY table [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(2): 121-126.
- [8] OKWUDIRE C, RAMANI K, DUAN M. A trajectory optimization method for improved tracking of motion commands using CNC machines that experience unwanted vibration [J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 373-376.
- [9] OUYANG P R, ACOB J, PANO V. PD with sliding mode control for trajectory tracking of robotic system [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(2): 189-200.
- [10] 马腾龙, 马尚君, 吴林萍, 等. 行星滚柱丝杠螺纹副-齿轮副同步啮合动态接触载荷特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(10): 11-21, 30.
MA Tenglong, MA Shangjun, WU Linping, et al. Dynamic contact load characteristics of synchromesh between screw pair and gear pair in the planetary roller screw [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(10): 11-21, 30.
- [11] KHAZAEI M, MARKAZI A H D, RIZI S T, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control of input-delayed uncertain nonlinear systems through output-feedback [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(3): 1943-1956.
- [12] AMER A F, SALLAM E A, ELAWADY W M. Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators [J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(8): 4943-4953.
- [13] KARA S, LI W. Unit process energy consumption models for material removal processes [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 37-40.
- [14] MORI M, FUJISHIMA M, INAMASU Y, et al. A study on energy efficiency improvement for machine tools [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 145-148.
- [15] WANG Yebin, ZHAO Yiming, BORTOFF S A, et al. A real-time energy-optimal trajectory generation method for a servomotor system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(2): 1175-1188.
- [16] ABD EL KHALICK MOHAMMAD A M, UCHIYAMA N, SANO S. Energy saving in feed drive systems using sliding-mode-based contouring control with a nonlinear sliding surface [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(2): 572-579.
- [17] HENDRAWAN Y M, FARRAGE A, UCHIYAMA N. Iterative NC program modification and energy saving for a CNC machine tool feed drive system with linear motors [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(9): 3543-3562.

- [18] 卢秉恒, 赵万华, 张俊, 等. 高速高加速度下的进给系统机电耦合 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 2-11.
LU Bingheng, ZHAO Wanhua, ZHANG Jun, et al. Electromechanical coupling in the feed system with high speed and high acceleration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 2-11.
- [19] ROMERA E, ÁLVAREZ J M, BERGASA L M, et al. ERFNet: efficient residual factorized ConvNet for real-time semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(1): 263-272.
- [20] VRABEL R. On the approximation of the boundary layers for the controllability problem of nonlinear singularly perturbed systems [J]. Systems & Control Letters, 2012, 61(3): 422-426.
- [21] 吕盾, 刘硕, 赵艳超, 等. 具有串联轴伺服进给系统的跟随误差控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 34-44.
LÜ Dun, LIU Shuo, ZHAO Yanchao, et al. Tracking error control strategy for servo feed system connected with series axis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 34-44.
- [22] 吕盾, 李润泽, 刘辉, 等. 数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 25-31.
LÜ Dun, LI Runze, LIU Hui, et al. A control strategy of tracking errors for numerical control machine tools at high speed and acceleration feeding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 25-31.
- [23] 李艳, 孙蕊, 夏宇, 等. 采用改进快速变幂次趋近律的滑模控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 118-126.
LI Yan, SUN Rui, XIA Yu, et al. A sliding mode control method with improved rapid power approximation law [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 118-126.
- [24] 李由, 史梦芯. 卫星姿态控制的变结构滑模控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 56-66.
LI You, SHI Mengxin. Variable structure sliding mode control method for satellite attitude maneuver [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 56-66.
- [25] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 采用 RBF 神经网络辨识的柔性机械臂抑振控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 76-84.
SHANG Dongyang, LI Xiaopeng, YIN Meng, et al. Vibration suppression control strategy for flexible manipulator using RBF neural network identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 76-84.

(编辑 武红江 杜秀杰)