

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.11.003

数控机床进给系统运动精度与能耗控制研究*

周 微¹, 朱若岭², 张 昊³

(1. 常州机电职业技术学院 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 河南交通职业技术学院 汽车学院, 河南 郑州 450000; 3. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:针对数控机床进给系统运动精度及能耗控制存在的问题,提出了一种新的自适应滑模控制方法。首先,基于进给系统机械动力学模型和滑模控制理论,提出了一种自适应滑模趋近律,根据跟踪误差平方值对控制增益值进行了自适应更新;然后,利用 Lyapunov 理论证明了所提控制方法的稳定性;最后,通过实验的方式对所提方法的运动精度和能耗控制效果进行了验证,并在相同条件下将其与 3 类已有自适应控制方法进行了对比。研究结果表明:与已有其他自适应控制方法相比,在相同控制参数条件下,采用所提方法的进给系统 X、Y 轴的平均定位误差最多可分别降低 16.4% 及 20.3%;在控制性能相近条件下,采用所提方法的进给系统 X、Y 轴控制能耗最多可分别降低 1.92% 及 0.96%;此外,所提方法能够更为有效地抑制由于非连续控制产生的抖振现象。

关键词:数控机床;运动精度;能耗控制;进给系统;自适应滑模控制

中图分类号:TH132.1;TG659

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)11-1387-08

Motion precision and energy consumption control for feed system of CNC machine tools

ZHOU Wei¹, ZHU Ruo-ling², ZHANG Hao³

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China; 2. School of Automobile, Henan College of Transportation, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at the problem of improving motion accuracy and energy consumption control for feed system of CNC machine tools, a new adaptive sliding mode control (ASMC) method was proposed. Based on the dynamics of feed system and sliding mode control (SMC) theory, an adaptive sliding mode reaching law was proposed. The control gain was updated adaptively according to square of the tracking error. Then, the stability of the proposed control method was proved by Lyapunov theory. Finally, the motion accuracy and energy consumption control effect of the proposed method were verified by experiments and comparing with three kinds of existing adaptive control methods. The results show that, comparing with other adaptive control methods, the average positioning errors of X and Y axes of the feed system can be at most reduced by 16.4% and 20.3% respectively under the same control parameters. And the energy consumption of X and Y axes of the feed system with the proposed method can be at most reduced by 1.92% and 0.96% respectively under the condition of similar control performances. In addition, the proposed method can suppress chattering caused by discontinuous control more effectively.

Key words: CNC machine tools; motion accuracy; energy consumption control; feed system; adaptive sliding-mode control (ASMC)

收稿日期:2021-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808301)

作者简介:周微(1979-),男,江苏常州人,硕士,副教授,主要从事机械制造自动化、机电工程等方面的研究。E-mail:TWE198811211@tom.com

0 引 言

由于能源短缺等原因,节能降耗成为了目前制造业领域迫切需要解决的问题^[1,2]。世界范围内,制造业领域约三分之一的能源消耗于数控机床的加工过程,而其中进给系统是其产生能耗的主要部件^[3]。因此,控制进给系统的能耗对于降低数控机床加工过程总能耗具有重要的意义^[4,5]。

目前,世界各国在数控机床加工过程中能耗控制方面的研究均取得了一定进展。在国内,曹昆仑等人^[6]提出了一种基于载荷损耗系数的能耗数学模型,分析了机床切削负载率、实载率和机床效率、能量利用率之间的关系。李聪波等人^[7-9]基于磨损机理,提出了一种考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法。何吉祥等人^[10]通过构建结构节能优化模型,提出了降低数控车床主轴单元能耗的方法。张朝阳等人^[11]基于迁移学习方法,研究了数控机床等待过程的节能控制策略。陈世平等人^[12]利用 BP-Adaboost 方法,提出了基于数据驱动的数控机床切削过程能耗预测模型。徐秀玲等人^[13]以 SIEMENS840D sl 数控系统为例,提出了一种机床待命、系统待命和关机 3 种节能控制方案,并将其应用于龙门式数控铣床中。李聪波等人^[14]基于元动作技术,提出了一种数控车削能耗预测的数据驱动方法。

目前,国内在数控机床能耗分析、预测及控制领域的研究多集中于切削过程,而对进给系统运动、控制过程中的能耗研究较为缺乏。

国外方面,SATO R 等人^[15]针对五轴加工中心,研究了工件装夹位置与进给系统能耗间的关系。WANG Y 等人^[16]研究了固定时间间隔内,进给系统的实时能耗最优化轨迹生成问题。FARRAGE A 等人^[17]提出了基于傅里叶级数的非线性摩擦补偿模型,以减少进给系统中未知摩擦力所造成的能耗。MOHAMMAD A E K 等人^[18]基于非线性滑模轮廓控制,对数控机床进给系统的降耗进行了研究。

实际上,进给系统的能耗不仅取决于各轴的运动轨迹,还取决于其控制效果。因此,在相同的运动轨迹下,由于控制器增益的影响,进给系统能耗会发生变化。然而,前述研究均利用的是固定的控制增益,因此无论其跟踪性能如何,所采用的控制方法都消耗相同的能量。一般而言,虽然使用较高的控制增益会提高其运动精度,但也会导致其能耗增加,故而必须同时考虑控制器的跟踪性能及能耗,才能满足生产效率和节

能降耗两方面的要求^[19]。FARRAGE A 等人^[20]提出了一种自适应滑模轮廓控制方法,研究了双轴进给系统的运动精度及能耗控制问题。

然而,上述方法仅能通过滑模控制的到达阶段降低能耗,对滑动阶段的能耗未加以考虑。

综上所述,本研究针对数控机床进给系统位置精度及能耗控制两方面的需求,基于 SMC 原理,提出一种具有非线性滑模面的 ASMC 方法,通过设计全新的自适应趋近律,对到达和滑动阶段的控制增益进行更新,提供控制增益的最小容许值,在保证位置跟踪精度的基础上降低能耗;最后通过实验进行对比研究,以验证该方法在位置跟踪精度及能耗控制两方面的优势。

1 进给系统动力学模型

笔者所采用的实验进给系统如图 1 所示。

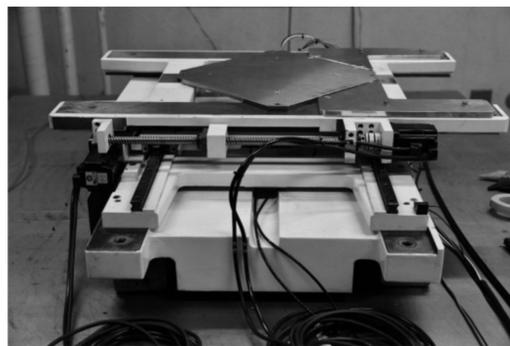


图 1 实验进给系统

该系统包含 2 台交流伺服电机、2 个分辨率为 76.29 nm(经角度-位移换算后)的旋转编码器(用于测量工作台位置),采样时间为 0.2 ms。双轴滚珠丝杠均为 C1 级高精度定位型。

为获得准确的系统模型,笔者采用扰动观测器(DOB)对控制参数进行估计;进给系统两轴采用相同的辨识方案。

进给系统的动力学模型为:

$$m_i \ddot{q}_i + g_i = f_i \dot{i} = x, y \quad (1)$$

式中: q_i, m_i — X, Y 工作台的位置和质量; g_i, f_i —摩擦力和驱动力。

PID 与 DOB 参数如表 1 所示。

表 1 PID 与 DOB 参数

参数	X 轴	Y 轴
$P_i/(N \cdot mm^{-1})$	3 000	3 000
$D_i/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	10	10
$I_i/(N \cdot mm^{-1} \cdot s^{-1})$	200	250
k_{ec}/Hz	0.1	0.1
$k_{ed}/(N \cdot mm^{-1})$	0.001	0.001

用于参数辨识的驱动力 f_i 为:

$$f_i = m_i(\ddot{r}_i - P_i \dot{e}_i - D_i \dot{e}_i - I_i \int e_i dt) + \hat{g}_i \quad (2)$$

式中: P_i, D_i, I_i —比例、微分和积分控制增益; e_i —跟踪误差, 定义为期望位置 r_i 和实际位置 q_i 之间的差值。

摩擦力 g_i 的估算值为 \hat{g}_i , 其计算公式为^[21]:

$$\begin{aligned} \hat{g}_i &= k_{edi}(\hat{v}_i - \dot{r}_i) \\ \hat{v}_i &= \frac{1}{m_i}(f_i - \hat{g}_i) + k_{evi}(\hat{v}_i - \dot{r}_i) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: k_{evi}, k_{edi} —DOB 增益; \hat{v}_i —速度估计值。基于观测数据, 可在 MATLAB 拟合工具箱中计算其相应的摩擦系数。

利用表 1 所示的 PID 和 DOB 参数, 结合观测数据得到的摩擦模型为:

$$f_{fi}(\dot{q}_i) = f_{ci} \operatorname{sgn}(\dot{q}_i) + c_i \dot{q}_i \quad (4)$$

式中: f_{ci}, c_i —库仑摩擦系数和粘性摩擦系数。

实验进给系统的关键参数如表 2 所示。

表 2 实验进给系统关键参数

参数	X 轴		Y 轴	
	正向	负向	正向	负向
$m_i / (\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	88.08		97.9	
$c_i / (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	467.2	530.6	631.0	648.6
f_{ci} / N	45.5	-47.9	54.8	-51.2

摩擦力模型参数辨识结果如图 2 所示。

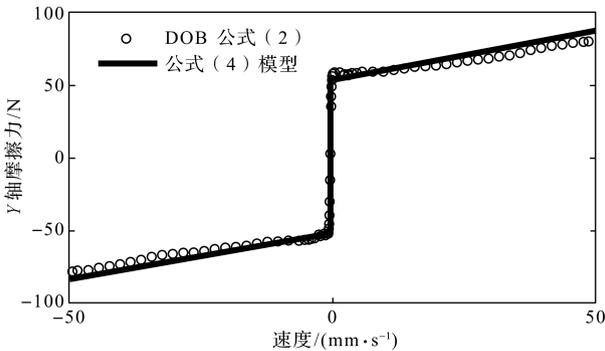


图 2 摩擦力模型参数辨识结果

由图 2 可知, 所辨识出的参数与实际系统参数较为符合。因此, 摩擦特性可只用库仑系数和黏性系数来描述。进给系统机械动力学可以用二阶解耦系统模型表示, 即:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + f_c \operatorname{sgn}(\dot{q}) = f - d$$

$$M = \operatorname{diag}\{m_i\}, C = \operatorname{diag}\{c_i\}, f_c = \operatorname{diag}\{f_{ci}\} \quad i = x, y$$

$$q = [q_x \quad q_y]^T, f = [f_x \quad f_y]^T, d = [d_x \quad d_y]^T \quad (5)$$

式中: M —名义质量矩阵; C, f_c —黏性摩擦系数矩阵和库仑摩擦系数矩阵; d, f —驱动轴的扰动(摩擦力)矢量和驱动力矢量; $\operatorname{sgn}(\dot{q})$ —二维矢量, 包含实际速度矢

量中每个元素的符号。

2 ASMC 方法及其稳定性分析

2.1 SMC 方法概述

SMC 方法所采用的非线性滑模面可表示为:

$$\begin{aligned} S &= [\gamma + \Phi\beta \quad I] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \\ e &= [e_x \quad e_y]^T = q - r \end{aligned} \quad (6)$$

式中: S —二维滑模面矢量; γ —正定矩阵, 用于提供快速响应, 并使占优极点满足 Lyapunov 方程: $\beta\gamma^T + \gamma\beta = P$ (其中: P —正定矩阵; β —用于调整阻尼比的正定对角阵; Φ —以 Φ_i 为元素的对角阵, 当输出从初始值变为期望值时, 利用该矩阵将阻尼比从较低值调整为较高值)。

由于 Φ_i 没有唯一的公式, 此处采用如下形式^[22]来表示:

$$\Phi_i = \eta_i [\exp(-e_i) + \exp(e_i)], \quad i = x, y \quad (7)$$

式中: η_i —用于调整 Φ_i 大小的正值。

对于理想滑模面, 式(6)可变为:

$$\dot{e} = -(\gamma + \Phi\beta)e \quad (8)$$

此时, 通过适当调整 $(\gamma + \Phi\beta)$ 的值, 跟踪误差将收敛到零^[23], 驱动系统状态趋于 $S = 0$ 。此处所采用的趋近律可表示为:

$$\begin{aligned} f = M \left[\ddot{r} + kS + \frac{d\Phi}{dt}\beta e + h \operatorname{sgn}(S) + (\gamma + \Phi\beta)\dot{e} \right] + \\ C\dot{q} + f_c \operatorname{sgn}(\dot{q}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: k — 2×2 增益矩阵; $\operatorname{sgn}(S)$ —滑模面符号矩阵; h —包含元素 h_i 的 2×2 矩阵。

且有:

$$h_i \geq d_i \quad (10)$$

2.2 ASMC 方法原理

虽然式(9)所示控制律具有良好的控制性能, 但由于其增益 k 是固定的, 在整个运行时间内趋近律的能耗将维持不变。此外, 虽然较高的增益值通常会降低控制误差, 但也会导致能耗增加。

为解决上述问题, 可采用自适应趋近律。典型的自适应滑模趋近律采用如下增益^[24,25]:

$$k_i = \begin{cases} \rho_i |s_i|, & k_i \leq \bar{k}_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad i = x, y \quad (11)$$

式中: k_i —增益矩阵 k 元素; \bar{k}_i —增益值上限, $\bar{k}_i > 0$; s_i , ρ_i —滑模切换函数值和自适应速率。

然而, 尽管采用式(11)所示增益的自适应趋近律可提高进给系统的运动精度, 但是在达到期望的控制

精度时,无法将增益更新至较低的数值。因此,上述自适应趋近律只能在到达阶段降低能耗,而不能在滑动阶段降低能耗。

为克服上述缺点,文献[26]提出了一种自适应滑模趋近律,其增益在到达和滑动阶段均可改变,即:

$$\bar{k}_i = \begin{cases} \rho_i |s_i| \operatorname{sgn}(|s_i| - \delta_i) & k_i > k_i^* \\ k_i^* & \text{其他} \end{cases} \quad k_i \leq \bar{k}_i \quad (12)$$

式中: δ_i —确定容许误差的边界层厚度; k_i^* —确定正增益值 k_i 的下界。

然而,式(12)中的控制增益仅依据切换函数值的大小而变化,自适应的速率较低;而且当 $s_i = \delta_i$ 时,增益会出现较大幅度跳变,抖振现象明显^{[27]733}。此外,式(12)所示控制增益的减小受到 k_i^* 的限制,而其导致能耗增加。

为提供更快的自适应速率,减少到达和滑动阶段的跟踪误差,文献[27]735 提出了基于开关增益的自适应滑模趋近律:

$$\bar{k}_i = \begin{cases} \rho_i s_i^2 & |s_i| \geq \delta_i \\ \rho_i (|s_i| - \delta_i) & \text{其他} \end{cases} \quad k_i \leq \bar{k}_i \quad (13)$$

然而,尽管采用增益(13)的自适应趋近律可降低能耗,但会因跟踪误差增加从而使控制性能降低。此外,由于期望边界层周围的误差幅度变化,控制信号将出现较大的抖振。

为了解决上述各自适应控制律的缺陷,笔者提出了一种新的 ASMC 方法,所采用的控制增益可根据跟踪误差的平方值,以更快的自适应速率自动更新,即:

$$\bar{k}_i = \begin{cases} \rho_i s_i^2, & |s_i| \geq \delta_i \\ -\rho_i s_i^2, & \text{其他} \end{cases} \quad k_i \leq \bar{k}_i \quad (14)$$

当趋近律进入到达阶段时,将激活式(14)中的第一个条件,以提供更快的适应速率,降低控制信号作用时间。当增益(14)的第 2 个条件激活时,控制增益略有下降,但仍能在降低能耗的同时保持控制方法的跟踪性能。

笔者所采用的自适应滑模趋近律表示为:

$$f = M \left[\ddot{r} + k(t)S + \frac{d\Phi}{dt} \beta e + h \operatorname{sgn}(S) + (\gamma + \Phi\beta) \dot{e} \right] + C\dot{q} + f_c \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (15)$$

2.3 稳定性分析

2.3.1 滑模面稳定性分析

Lyapunov 候选函数为:

$$V_i = e^T \beta e \quad (16)$$

根据式(8),式(16)的时间导数可表示为:

$$\dot{V}_i = e^T \beta \dot{e} + \dot{e}^T \beta e =$$

$$e^T \beta - (\gamma + \Phi\beta) e + e^T - (\gamma + \Phi\beta)^T \beta e - e^T P e - 2Z^T \Phi Z \quad (17)$$

式中: P, β —正定矩阵。

其中: $Z = \beta e$ 。由于 $V_i \leq 0$,保证了受控系统在理想滑模面上的稳定性。

2.3.2 控制系统稳定性分析

Lyapunov 候选函数为^[28]:

$$V_i = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2} (k_i - \bar{k}_i)^2 \quad i = x, y \quad (18)$$

式中:控制增益 k_i 可以从初始值 k_{in} 自适应地改变至 \bar{k}_i 。

式(18)的一阶时间导数为:

$$\dot{V}_i = s_i \dot{s}_i + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i \quad (19)$$

基于公式(6)计算 \dot{s}_i ,并考虑式(8),上述 \dot{V}_i 可进一步表示为:

$$\dot{V}_i = s_i \left\{ \ddot{e}_i + (\gamma_i + \Phi_i \beta_i) \dot{e}_i + \frac{d\Phi_i}{dt} \beta_i e_i \right\} + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i \quad (20)$$

根据式(5),系统误差动力学模型可表示为:

$$\ddot{e}_i = \ddot{r}_i - m_i^{-1} \{ f_i - d_i - f_{ci} \operatorname{sgn}(\dot{q}_i) - c_i \dot{q}_i \} \quad (21)$$

基于式(15,21),可将 \dot{V}_i 重新表示为:

$$\dot{V}_i = s_i [-k_i s_i - h_i \operatorname{sgn}(s_i) - d_i] + (k_i - \bar{k}_i) \dot{k}_i \quad (22)$$

式(14)中的两个自适应律条件为:

(1)当 $|s_i| \geq \delta_i$ 时,式(22)表示为:

$$\dot{V}_i = s_i \{ -k_i s_i - h_i \operatorname{sgn}(s_i) - d_i \} + \rho_i (k_i - \bar{k}_i) s_i^2 \quad (23)$$

式中: k_i —介于 k_{in} 和 \bar{k}_i 之间的正控制增益值。

根据式(10),此时 $\dot{V}_i \leq 0$;

(2)当式(14)中的第 2 个条件激活时,式(22)中的最后一项变为正值。令 $h_i > | -s_i d_i - \rho_i (k_i - \bar{k}_i) s_i^2 |$,此时, $\dot{V}_i \leq 0$ 。

为使滑模面收敛到零,依据 Barbalat 引理^[29]有:

(1)由于式(18)中的 $V_i > 0$,式(22)中的 $\dot{V}_i \leq 0$, \dot{V}_i 有界,可知 s_i 和 $k_i \in L_\infty$ 。

(2)根据公式(14), $\int s_i^2 dt = \frac{1}{\rho_i} \int \dot{k}_i dt = \frac{k_i}{\rho_i}$,因此, $s_i \in L_2$ 。

(3)由式(19)可知, \dot{s}_i 有界,因此 s_i 是一致连续的。

综上所述, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_i = 0$,因此有 $S \rightarrow 0$,从而保证了控制系统的稳定性和 e_i 的收敛性。另一方面,可通过使用以下饱和函数来减轻由式(15)中符号函数产生的抖振效应,即:

$$\text{sgn}(s_i) \approx \frac{s_i}{|s_i| + \Delta_i} \quad i = x, y \quad (24)$$

式中: Δ_i —平滑项。

3 实验及结果分析

为了验证该控制律的有效性,笔者利用图 1 所示的实验装置来进行验证。系统进给速度为 25 mm/s 的,其圆周运动轨迹为:

$$\begin{aligned} x &= 40 \cos\left(\frac{\pi}{5}t\right) \text{ mm} \\ y &= 40 \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) \text{ mm} \end{aligned} \quad (25)$$

通过试错法得到了其控制参数,如表 3 所示。

表 3 控制参数

参数	值	参数	值
$\gamma/(s^{-1})$	$\text{diag}\{50 \ 50\}$	ρ	$[6 \ 4]^T$
$\beta/(s^{-1})$	$[1 \ 5]^T$	$\Delta_i/(mm \cdot s^{-1})$	$[0.9 \ 1.3]^T$
$\delta_i/(mm \cdot s^{-1})$	$[0.9 \ 1.3]^T$	η/Hz	$[5 \ 5]^T$
$k_m/(kg \cdot s^{-1})$	$[50 \ 50]^T$	$\bar{k}/(kg \cdot s^{-1})$	$[100 \ 100]^T$

各自适应控制方法实施流程如图 3 所示。

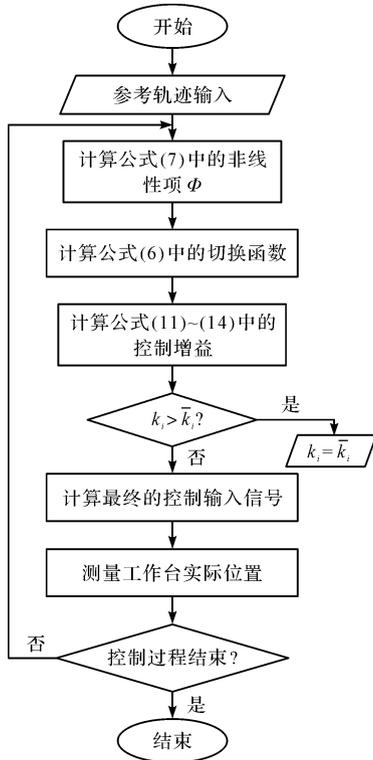


图 3 各自适应控制方法实施流程

笔者采用相同动力学模型和控制技术,利用表 3 所示的相同控制参数,对该 ASMC 方法的跟踪性能和能耗进行验证,并将其与采用式(11~13)增益的自适应趋近律进行比较。

在相同控制参数条件下,基于控制律(11~14)的控制信号如图 4 所示。

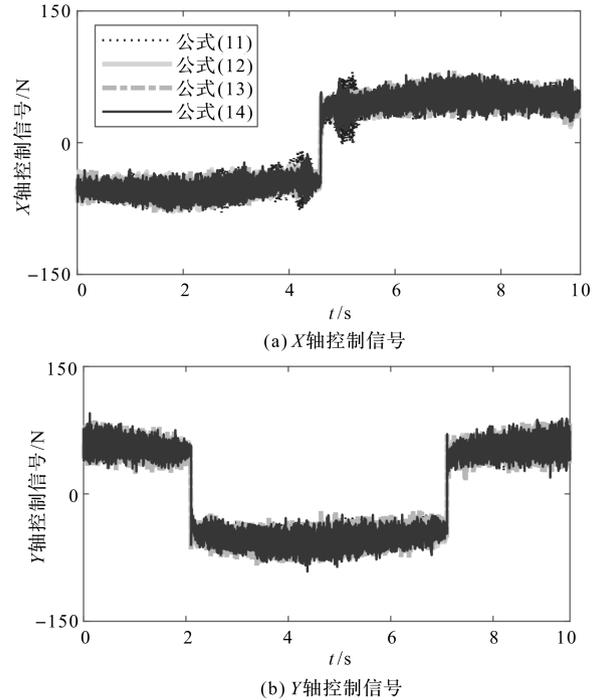


图 4 相同控制参数条件下基于控制律(11~14)的控制信号

在相同控制参数条件下,基于趋近律(11~14)的平均定位误差如图 5 所示。

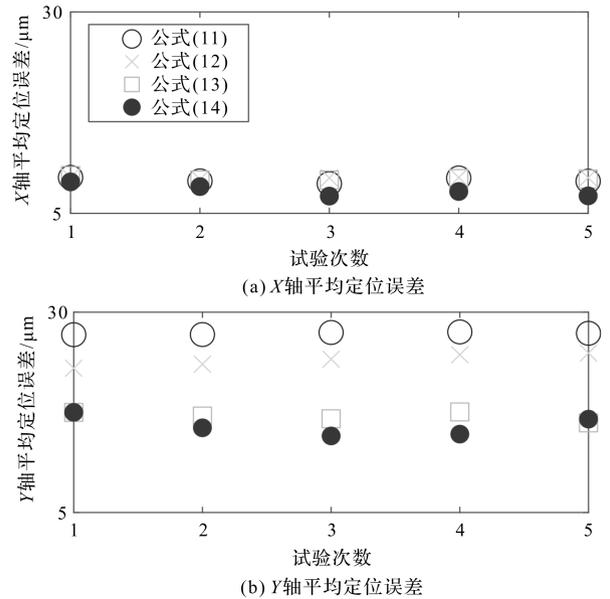
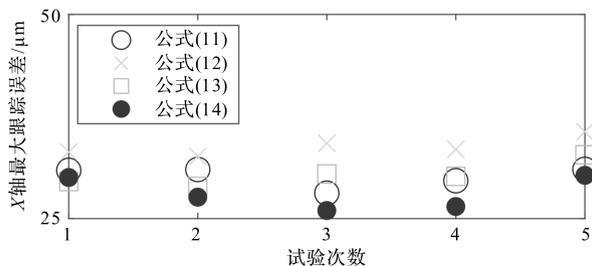


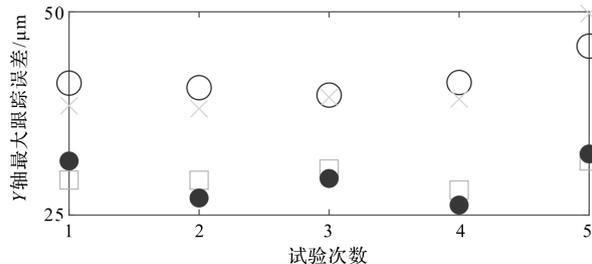
图 5 相同控制参数条件下基于趋近律(11~14)的平均定位误差

在相同控制参数条件下,基于控制律(11~14)的最大定位误差如图 6 所示。

在相同控制参数下,不同控制律的能耗如表 4 所示。



(a) X轴最大定位误差



(b) Y轴最大定位误差

图 6 相同控制参数条件下基于控制律(11~14)的最大定位误差

表 4 相同控制参数下不同控制律的能耗

自适应趋近律	能耗/mWh		控制律(14) 能耗降低百分比/(%)	
	X 轴	Y 轴	X 轴	Y 轴
公式(11)	267.68	266.30	1.46	0.55
公式(12)	266.63	264.90	1.10	0.02
公式(13)	265.00	266.00	0.46	0.44
公式(14)	263.78	264.84	—	—

在相同控制参数下,不同控制律平均及最大定位误差如表 5 所示。

表 5 相同控制参数下不同控制律平均及最大定位误差

自适应趋近律	平均定位误差/ μm		最大定位误差/ μm	
	X 轴	Y 轴	X 轴	Y 轴
公式(11)	9.11	27.36	30.14	41.75
公式(12)	9.39	24.05	33.82	41.02
公式(13)	9.31	23.99	30.39	29.80
公式(14)	7.85	21.81	25.68	24.40

实验中,控制过程的能耗采用功率计(HIOKI 3390AC/DC)进行测量。由表 5 可知:与采用增益(11~13)的自适应趋近律相比,所提出的 ASMC 方法可在提高跟踪精度的同时降低控制能耗。

同时,在跟踪性能相近的条件下,笔者比较了前述各自适应趋近律的能耗。为获得与 ASMC 方法近似的跟踪误差,增益(11~13)中的适应率值 ρ 分别设置为 $[10\ 30]^T$ 、 $[30\ 60]^T$ 和 $[7\ 5]^T$,并将式(6)中 γ 分别设置为 $[50\ 80]^T$ 、 $[50\ 70]^T$ 和 $[50\ 60]^T$,以调整控制器阻尼比。

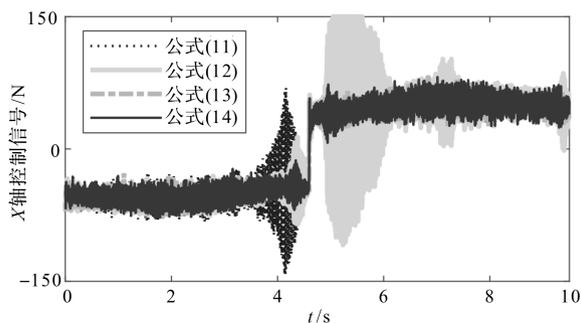
在相同定位精度下,不同控制律的平均及最大跟踪误差如表 6 所示。

表 6 相同定位精度下不同控制律平均及最大跟踪误差

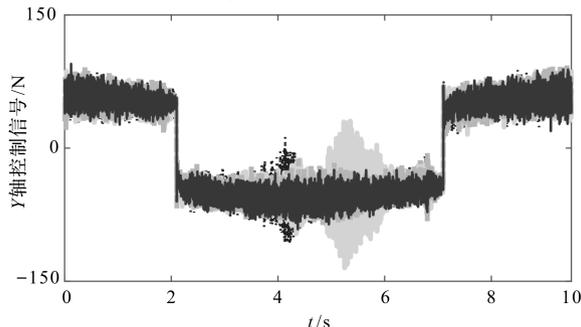
自适应控制律	平均跟踪误差/ μm		最大跟踪误差/ μm	
	X 轴	Y 轴	X 轴	Y 轴
公式(11)	7.77	17.08	26.10	27.65
公式(12)	8.28	15.90	27.18	25.76
公式(13)	9.28	16.44	28.96	25.21
公式(14)	7.85	15.81	25.68	24.40

由表 6 可以看出:各方法的控制性能相近;式(11)所示的控制增益在达到其上限值后保持常数,因此该方法的能耗与其跟踪精度无关;控制增益(12)可在其到达和滑动阶段进行变化,然而其适应速率较低;采用控制增益(13)的自适应趋近律时,由于其控制信号连续性差,所产生的跟踪误差较大。

在相同控制性能条件下,基于控制律(11~14)的控制信号输入如图 7 所示。



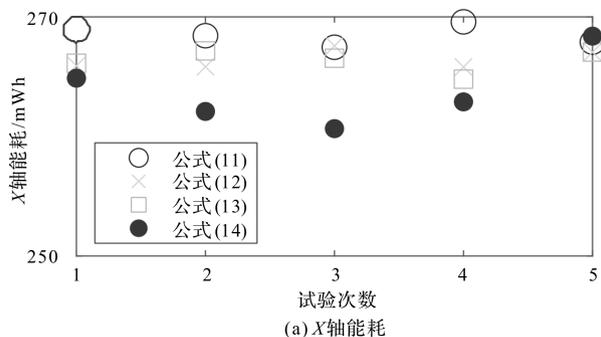
(a) X轴控制信号输入



(b) Y轴控制信号输入

图 7 相同控制性能条件下基于控制律(11~14)的控制信号输入

在相同控制性能条件下,控制律(11~14)的能耗如图 8 所示。



(a) X轴能耗

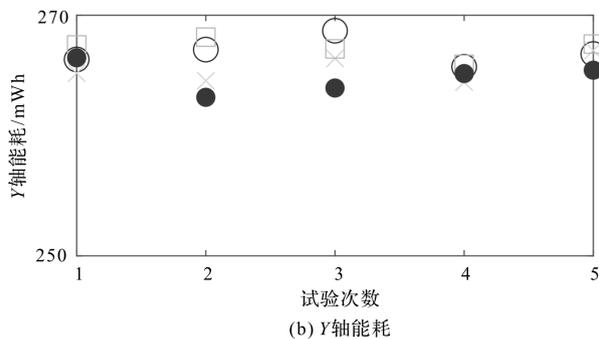


图 8 相同控制性能条件下控制律(11~14)的能耗

由图 7 及图 8 可以看出:各方法的控制信号(与能量消耗直接相关)差异较大;与采用式(11~13)所示的控制增益的自适应方法相比,采用 ASMC 方法可使 X 轴和 Y 轴能耗分别降低 1.74% 和 0.79%、0.99% 和 0.26%、0.96% 和 0.92%。

此外,控制输入信号的标准差是评价控制方法产生抖振现象强弱的指标,即:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (f_{ij} - u_i)^2}{J}}, i = x, y \quad (26)$$

式中: u_i —控制信号的平均值; f_{ij} —第 j 个采样时刻的控制信号幅值, $j = 1, 2, \dots, J$; J —采样次数。

在相同控制性能条件下,基于控制律(11~14)的输入信号标准差如图 9 所示。

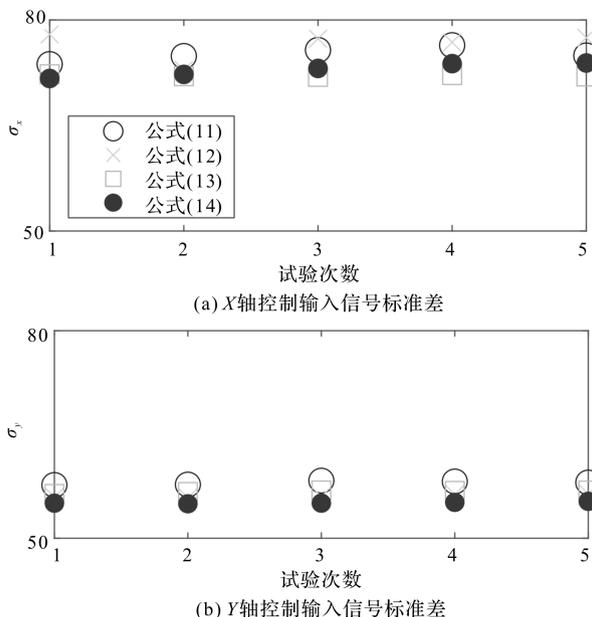


图 9 相同控制性能条件下基于控制律(11~14)的输入信号标准差

由图 9 可以看出:与采用式(11~13)所示的控制增益的自适应方法相比,ASMC 方法控制输入信号标准差(X 轴和 Y 轴)分别降低了 2.90% 和 4.97%、4.63% 和

1.76%、-1.22% 和 2.88%。

由此可见,笔者提出的控制方法在保证相同控制性能的前提下,可有效降低控制能耗及系统抖振。

4 结束语

基于进给系统动力学模型及 SMC 理论,笔者通过设计全新的自适应控制增益,提出了相应的非线性 ASMC 方法;该方法提供了更快的自适应速率,可在保证位置跟踪精度的基础上降低控制能耗;利用实验对该方法进行了验证。

研究结果表明:

(1)与其他自适应控制方案相比,所提控制方法在控制参数相同的条件下,可使进给系统定位精度更高,且 X、Y 轴的平均定位误差最多可分别降低 16.4% 及 20.3% ;

(2)与其他自适应控制方案相比,在控制性能相同的条件下,所提控制方法产生的能耗最少,X 轴和 Y 轴的控制能耗最大可分别降低 1.74% 及 0.96% ;

(3)与其他自适应控制方案相比,所提控制方法能够更为有效地抑制系统的抖振。

在后续的研究中,笔者将研究控制输入信号的幅值对上述自适应方法的影响;同时采用最优理论选取其最佳增益值,从而获得更高的位置跟踪精度,也使控制能耗可得到进一步的降低。

参考文献 (References) :

[1] 程 俊,刘 滨. 数控机床自动润滑系统节能控制方法设计[J]. 机床与液压,2020,48(11):125-127.

[2] NEWMAN S T, NASSEHI A, IMANI-ASRAI R, et al. Energy efficient process planning for CNC machining[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2012,5(2):127-136.

[3] XU K, LUO M, TANG K. Machine based energy-saving tool path generation for five-axis end milling of freeform surfaces[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139(8): 1207-1223.

[4] HENDRAWAN Y M, FARRAGE A, UCHIYAMA N. Iterative NC program modification and energy saving for a CNC machine tool feed drive system with linearmotors[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019,102(3):3543-3562.

[5] PAVANASKAR S, PANDE S, KWON Y, et al. Energy efficient vector field based toolpaths for CNC pocket machining [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20 (Oct.):314-320.

- [6] 曹昆仑,赵刚,陈君文,等.基于载荷损耗系数的数控机床效率和能量利用率的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2020(3):156-159,163.
- [7] 李聪波,余必胜,肖溱鸽,等.考虑刀具磨损的数控车削批量加工工艺参数节能优化方法[J].机械工程学报,2021,57(1):217-229.
- [8] 徐军平.四件套配合零件的数控车削加工工艺分析[J].机电工程技术,2020,49(12):73-75.
- [9] 陈建环,马康辉.基于Cs轮廓控制功能的曲轴类工件数控车削加工[J].机械制造,2021,59(7):16-19.
- [10] 何吉祥,李聪波,吕岩,等.数控车床主轴单元结构节能性优化设计[J/OL].中国机械工程:1-12[2021-04-14].<https://kns-cnki-net.e1.buaa.edu.cn/kcms/detail/42.1294.th.20201228.1501.020.html>.
- [11] 张朝阳,吉卫喜,彭威.基于迁移学习的数控机床节能控制决策方法[J].中国机械工程,2020,31(23):2855-2863.
- [12] 陈世平,谢俊,罗小,等.基于BP-Adaboost算法的数控机床材料切削能耗预测研究[J].制造技术与机床,2020(12):20-24.
- [13] 徐秀玲,王红亮,于天彪.数控机床能耗控制的优化研究与应用[J].制造技术与机床,2020(10):111-114.
- [14] 李聪波,尹誉先,肖溱鸽,等.数据驱动下基于元动作的数控车削能耗预测方法[J].中国机械工程,2020,31(21):2601-2611.
- [15] SATO R, SHIRASE K, HAYASHI A. Energy consumption of feed-drive systems that depends on the workpiece-setting position in a five-axis machining center[J]. **Journal of Manufacturing Science & Engineering**,2018,140(2):1-33.
- [16] WANG Y, ZHAO Y, 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.
- [17] FARRAGE A, UCHIYAMA N. Improvement of motion accuracy and energy consumption of a mechanical feed drive system using a Fourier series-based nonlinear friction model[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2018,99(7):1203-1214.
- [18] MOHAMMAD A E K, 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.
- [19] HELU M, BEHMANN B, MEIER H, et al. Impact of green machining strategies on achieved surface quality[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**,2012,61(1):55-58.
- [20] FARRAGE A, UCHIYAMA N. Energy saving in biaxial feed drive systems using adaptive sliding mode contouring control with a nonlinear sliding surface[J]. **Mechatronics**,2018,54(6):26-35.
- [21] LI Y, QI Z, YANG L. Design of robust sliding mode control with disturbance observer for multi-axis coordinated traveling system[J]. **Computers & Mathematics with Applications**,2012,64(5):759-765.
- [22] SU Y X, SUN D, DUAN B Y. Design of an enhanced nonlinear PID controller[J]. **Mechatronics**,2005,15(8):1005-1024.
- [23] JIANG B, KARIMI H R, KAO Y, et al. A novel robust fuzzy integral sliding mode control for nonlinear semi-Markovian jump T-S fuzzy systems[J]. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**,2018,26(6):3594-3604.
- [24] 严刚峰.超声波电动机自适应滑模控制器设计[J/OL].控制工程:1-7.[2021-04-14].<https://doi-org-443.e1.buaa.edu.cn/10.14107/j.cnki.kzgc.20200857>.
- [25] 毛北行,王东晓.分数阶不确定Rössler混沌系统的自适应滑模同步[J].浙江大学学报:理学版,2021,48(2):210-214.
- [26] PLESTAN F, SHTESSEL Y, BREGEAULT V, et al. New methodologies for adaptive sliding mode control[J]. **International Journal of Control**,2010,83(9):1907-1919.
- [27] MSUKWA M R, UCHIYAMA N, BUI BD. Adaptive Nonlinear Sliding Mode Control with a Nonlinear Sliding Surface for Feed Drive Systems[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Ontario, Canada: [s. n.],2017.
- [28] CHO H, KERSCHEN G. Simple Adaptive Methodology for Chattering-free Sliding Mode Control[C]. 14th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS 2016), Nanjing, China: [s. n.],2016.
- [29] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. 3rd edition. New Jersey:Prentice Hall,2002.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

周微,朱若岭,张昊.数控机床进给系统运动精度与能耗控制研究[J].机电工程,2021,38(11):1387-1394.

ZHOU Wei, ZHU Ruo-ling, ZHANG Hao. Motion precision and energy consumption control for feed system of CNC machine tools[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(11):1387-1394.
《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>