

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.07.015

适用于机床柔性进给驱动的 最优反馈控制技术研究^{*}

黄忠仕¹, 余光怀², 张为民³

(1. 百色职业学院 机械工程系, 广西 百色 533000; 2. 沈机集团 昆明机床股份有限公司,
云南 昆明 650203; 3. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要:针对机床柔性进给传动系统的传动控制问题,对滚珠丝杆传动的高速跟踪进行了研究,提出了一种具有较高的动态精度的最优反馈控制方法。利用进给工作台负载侧的反馈测量实现了主动减振和精确跟踪;同时,采用 2 个权重对传动控制进行了最优调节,实现了干扰抑制和主动减振的功能;在反馈中通过引入模态阻尼对工作台颤振进行了抑制,并结合结构的反谐振抑制了高频干扰。研究表明:该方法能够以较低的成本实现精确的高速进给传动控制,在高加速度时的最大误差为 $\pm 40\ \mu\text{m}$,并获得了大于 300 Hz 的跟踪带宽,在低频和高频下最优控制效果更好,干扰抑制能力强,在大约 157 Hz 时可以实现大于 5 倍的干扰衰减性能。

关键词:进给驱动;柔性控制;反馈控制;阻尼;滚珠丝杆传动

中图分类号:TH132.1;TG659

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)07-0816-05

Optimal feedback control technology for machine tools flexible feed drive

HUANG Zhong-shi¹, YU Guang-huai², ZHANG Wei-min³

(1. Department of Mechanical Engineering, Baise Vocational College, Baise 533000, China; 2. Kunming Machine Tool Co., Ltd., Shenji Group, Kunming 650203, China; 3. School of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the transmission control problem of the flexible feed drive system of the machine tool, the high-speed tracking of the ball screw driver was studied, and an optimal feedback control method with high dynamic precision was proposed. Active damping and precise tracking were achieved using feedback measurements on the load side of the feed table. At the same time, the transmission control was optimally adjusted with two weights to achieve interference suppression and active vibration reduction. In the feedback, the table flutter was suppressed by introducing modal damping, and combined with the anti-resonance of the structure to suppress high-frequency interference. The results show that the method can achieve precise high-speed feed transmission control at a lower cost. The maximum error at high acceleration is $\pm 40\ \mu\text{m}$ and a tracking bandwidth greater than 300 Hz is obtained. The optimal control effect is better at low frequency and high frequency, and the interference suppression ability is strong, and the interference attenuation performance greater than 5 times which can be achieved at about 157 Hz.

Key words: feed drive; flexible control; feedback control; damping; ball screw drive

0 引言

进给传动系统是机床设计中的关键部件,用来实现刀具与工件之间所需的进给运动,因此它们的定位精度和速度决定了机床的质量和生产率^[1-2]。

进给传动系统的动态精度受到系统中结构谐振的限制,在过程力或参考轨迹等因素的干扰下会引起谐振。平滑的轨迹生成和滤波技术有助于避免引起传动系统结构的轻微阻尼。然而,因外部干扰而产生的激发只能通过反馈控制进行主动抑制。因此,现代伺服控制系统需要实现的是机械谐振下的控制带宽扩展和提高进给驱动的抗干扰能力。

研究人员可以通过使用加速度反馈、辅助设备,或采用鲁棒滑动模式、广义预测控制器等复杂的控制方案,来实现具有主动减振特点的高带宽反馈控制^[3]。复杂的控制系统通常是难以实现的,并且可能需要提供辅助传感器,这给机器设计带来了更高的成本并且产生了更多的限制^[4-5]。主动振动控制最成功的实现是在滚珠丝杆传动系统上,并且使用双面(电机和工作台)位置和速度信号来引入“速度阻尼”。极点配置控制技术可用于调整带宽和模态阻尼。然而,在电机和工作台上使用两个反馈回路,会导致前馈补偿设计效率低下。其他解决方案旨在通过使用观察器或直接测量负载侧动力,来减少传感器数量^[6-8]。

本文为柔性机床进给传动系统提出一种新型最优控制方法。

1 进给传动控制建模

柔性滚珠丝杆进给传动器系统模型,如图1所示。

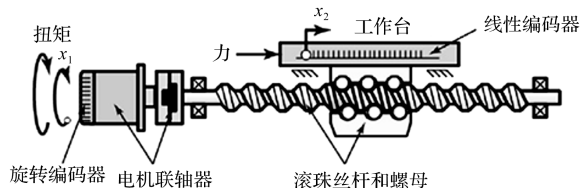


图1 柔性滚珠丝杆进给传动系统

由图1可知,进给传动系统的动态性能极大地受到因结构部件和接头的柔性而产生的机械谐振的影响。

通常,简单的2自由度(2-degree of freedom, 2-DOF)模型充分捕获了柔性进给传动系统的刚体和主要振动模式^[9],并且它可以有效地用于高带宽控制设计,2DOF模型如图2所示。

可以从图2模型中导出控制输入 u 与电机 $G_M(s)$ 和工作台 $G_T(s)$ 位置之间的开环传递函数(TF_s),如

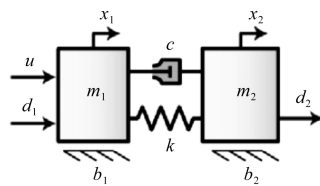


图2 2DOF模型

下所示:

$$G_M = \frac{x_1}{u} = \frac{m_2 s^2 + (c + b_2)s + k}{\underbrace{m_1 m_2 s^4 + a_3 s^3 + a_1 s + a_0}_{Q(s)}} \quad (1)$$

$$G_T = \frac{x_2}{u} = \frac{cs + k}{Q(s)} \quad (2)$$

式中: x_1 —电动机 m_1 ; x_2 —负载(例如工作台 m_2); k —传动刚度; $b_{1,2}$ —作用在移动元件上的粘性摩擦; u —控制输入; c —阻尼。

其中: $a_0 = 0$; $a_1 = (b_1 + b_2)k$; $a_2 = (b_1 b_2 + c(b_1 + b_2) + k(m_1 m_2))$ 且 $a_3 = m_1 b_2 + m_2 b_1 + c(m_1 + m_2)$ 。

从式(1,2)的分母可以看出,两个 TF_s 都具有四阶动力学,并忽略了阻尼 c 。

通过选择状态作为工作台位置工作,台侧 TF 和 $G_T(s)$ 能够以状态空间(State-Space, SS)的形式来编写。其高阶导数 $v = [x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2, \ddot{\ddot{x}}_2]$,通过测量或观察到工作台位置 x_2 、速度 $\dot{x}_2$ 、加速度 $\ddot{x}_2$ 和加加速度 $\ddot{\ddot{x}}_2$,就可以通过极点配置控制(pole placement control, PPC)技术^[10]任意分配柔性进给传动系统的动力。

2 最优控制方法设计

最优控制方法主要思路是设计极点配置控制,分别分配刚体和结构动力。然而,这使得闭环系统失去了抵御干扰、参数不确定性和非建模动态的鲁棒性。

为了解决这一局限性,对SS表示增加了一个“积分状态”,如下所示:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} v \\ \int_0^t x_2 d\tau \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} B_T \\ 0 \end{bmatrix}}_B u \quad (3)$$

并给出了极点配置跟踪控制规则,如下所示:

$$u = K_p(x_{2r} - x_2) + K_v(\dot{x}_{2r} - \dot{x}_2) + K_A(\ddot{x}_{2r} - \ddot{x}_2) + K_j(\ddot{\ddot{x}}_{2r} - \ddot{\ddot{x}}_2) + \int_0^t K_1(x_{2r} - x_2) d\tau \quad (4)$$

式中: K_p, K_v, K_A, K_j, K_1 —需要基于期望极点位置确定的控制器增益; x_{2r} —工作台参考轨迹。

通过上式可以对闭环系统的5极进行分配。请注意,现代数控系统产生的加加速度有限参考轨迹能够实现上述控制规则。

因此,上述控制规则可以用来实现位置信号 PID 控制:

$$C(s) = \left[K_p + K_v s + \frac{K_1}{s}, K_A + K_J s \right] \begin{bmatrix} x_{2r} - x_2 \\ \ddot{x}_{2r} - \ddot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,工作台加速度和加加速度可以通过数字编码器获得。通常,进给传动器系统的刚性体和的结构动力是分开分配的,而不考虑它们的相互作用。较为普遍的启发式方法是简单地将模态阻尼添加到结构模式。

这种方法改善了进给传动器系统的动态刚度,但它并没有大大提高抗扰的性能。为此,结构模式的固有频率需要通过控制器来改变。这需要电动机发出更大的力,以满足要求并且在高加速度和负载下限制实际的跟踪带宽。此外,由于与工业串联 P-PI 控制器^[11-12]相比,PPC 无法通过一组增益轻松调整,其实现需要经过培训的控制工程师进行。

因此,笔者将对用于平衡进给传动系统性能的最优控制设计框架进行分析,以实现跟踪、振动和控制,同时允许设计人员使用一组增益或直接针对频域要求进行调整。

2.1 柔性进给传动系统的线性二次型调节器(LQR)

寻求跟踪、振动抑制和控制力之间平衡的最优控制问题可以被视为 LQR 问题,以找到最小化成本函数 J 的最优极点位置,如下所示:

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}$ —状态矩阵; $\mathbf{u}$ —控制力矩阵; $\mathbf{Q}$ —状态 $\mathbf{x}$ 的权重矩阵; $\mathbf{R}$ —控制力 $\mathbf{u}$ 的权重大小。

需要对控制器进行主动减振。许多机床研究文献将参考轨迹的加加速度内容与剩余振动连接起来,这使得加速度成为目标函数的潜在候选项。

考虑到式(4)中的控制规则,由加加速度反馈组成,即 $\mathbf{u} = -K_J \ddot{x}_2$ 。当加加速度反馈控制应用于具有小阻尼特性($b_1 = b_2 = c \approx 0$)的进给传动器系统时,成本函数中的负载侧加加速度状态将向进给传动器结构添加模态阻尼。需要注意的是,最小化加加速度不会影响刚体动力,因此它无助于改善低频特性。

为了克服这个问题,负载侧误差的积分,即其积分状态,需要与式(6)中的加加速度一起进行处理。因此,最终的成本函数为:

$$\min J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T (\underbrace{\mathbf{w}^T \mathbf{w}}_{\mathbf{Q}}) \mathbf{x} + \frac{1}{\rho} \mathbf{u}^2) dt$$

subject to: $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}$ (7)

式中: $\mathbf{w}$ —调节矩阵, $\mathbf{w} = [0, 0, 0, \alpha, 1]$; α —与加速度相关的权重; ρ —与控制力相关的权重。

α 和 ρ 是使成本函数 J 最小化的客观权重。积分状态的权重是“1”,因此,可以通过调整 2 个目标权重来实现预期控制。如果结构存在轻微阻尼,设计人员可以增加 α 来加大模态阻尼。或者将其设置为较低值,以强调干扰性能。最后,通过调整控制力权重 ρ 来调整带宽。该框架简单易行,能够以真正优化的方案满足进给传动系统控制的关键要求。

最后,通过求解 LQR 的式(7)并利用代数 Riccati 方程(ARE)^[13],可以获得极点位置和控制增益 K_p , K_v , K_A , K_J 和 K_1 。虽然这种方法在计算上是有效的,但它不是封闭形式的解决方案,因此不能直接分析客观增益(α 和 ρ)的影响。以下部分为“最优”闭环极点推导出的直接闭合形式解决方案,便于进行控制分析,实现有效的动态优化调整。

2.2 控制权重分析

如果不是利用 ARE 来寻求 LQR 的解决方案和计算控制增益,而是从哈密顿动力学中解决优化问题,则可以建立最优控制问题(式(7))的哈密顿函数为:

$$H = \frac{1}{2} \left(\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \frac{1}{\rho} \mathbf{u}^T \mathbf{u} \right) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}) \quad (8)$$

对式(8)执行偏导数,以建立如下的齐次哈密顿系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\rho \mathbf{B} \mathbf{B}^T \\ -\mathbf{Q} & -\mathbf{A}^T \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}$ —哈密顿矩阵。

通过用代数方法处理 H 的特征方程,即 $|s\mathbf{I} - \mathbf{H}| = 0$,其特征值的轨迹在客观权重(α 和 ρ)方面可以通过标准的根轨迹形式表示为:

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{H}| = 0$$

$$\rightarrow 1 + \rho \frac{G_T(s) G_T(-s)}{s(-s)} (\alpha^2 s^8 + 2\alpha s^4 + 1) = 0 \quad (10)$$

闭环极点的轨迹根据式(10)计算,可以得出最优控制器的根轨迹,如图 3 所示。

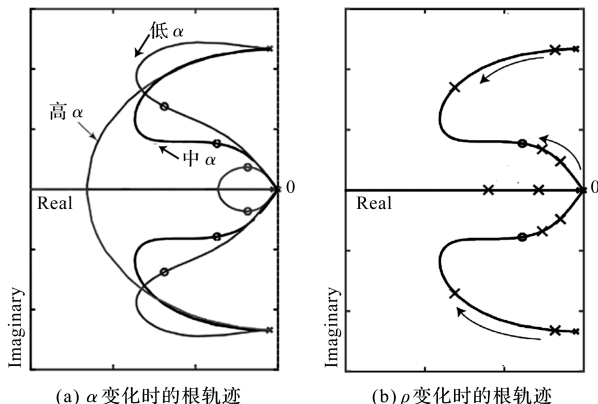


图 3 最优控制器的根轨迹

由图3可知,可以看出,设计人员可以即时分析并轻松调整 α 和 ρ ,以获得最优控制性能。

3 实验及结果分析

3.1 实验设置

将提出的最优控制方法在单轴滚珠丝杆设置上进行具体测试,滚珠丝杆实验设置如图4所示。

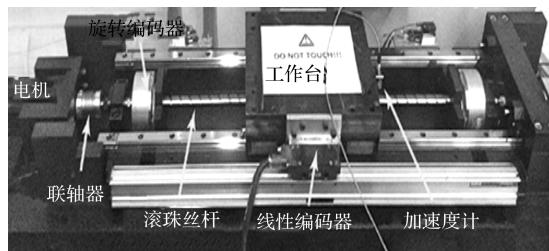


图4 滚珠丝杆实验设置

在图4中,滚珠丝杆直径为20 mm,导程为20 mm,行程为500 mm。它配备100 nm分辨率的旋转线性编码器,由dSpace系统^[14]以20 kHz控制。利用量程为10 g的DC加速度计(PCB-3711E1110G)对加速度和加加速度进行测量,其灵敏度为200 mV/g,低通滤波为1 kHz。

频率响应函数(Frequency Response Function, FRF)测量如图5所示。

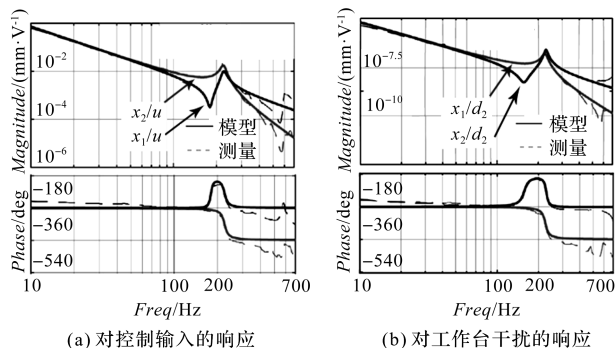


图5 开环FRF

由图5可知,2DOF模型清楚地捕获了传动系统在228 Hz处的轴向和扭转载荷。电动机和工作台侧的反谐振分别在177 Hz和157 Hz处可见。与最先进的级联P-PI控制进行比较分析。

所提出的控制具体参数为: $\rho = 2.30 \times 10^6 \text{ V}^2/\text{m}^2\text{s}^2$, $\alpha = 7.70 \times 10^{-11} \text{ s}^4$ 。P-PI控制的具体参数为: $K_p = 20.41 \text{ s}^{-1}$, $K_v = 0.042 \text{ V/m}$, $K_l = 12.68 \text{ V/m}$ 。由于行程的原因导致滚珠丝杆刚度变化小于10%,不使用增益调度,并且将控制系统的相位裕度(PM)匹配到40°以进行稳健操作。

3.2 结果分析

笔者在 $A_{\max} = 25 \text{ m/s}^2$ 和 $V_{\max} = 8 \text{ m/s}$ 高速前后轨迹上对控制方法的跟踪能力进行了测试,跟踪性能比较如图6所示。

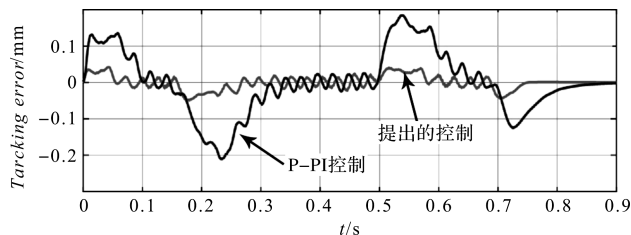


图6 跟踪性能比较

由图6可知,所提出的控制技术在高加速度时提供更好的跟踪性能,最大误差为 $\pm 40 \mu\text{m}$ 。所提出的控制方法可以控制谐振、抑制谐振,并获得 $> 300 \text{ Hz}$ 的跟踪带宽,从而实现更高的性能以满足稳定性要求。

最后,控制方法的干扰响应性能比较如图7所示。

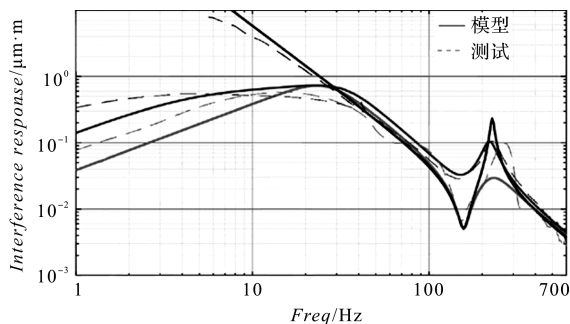


图7 干扰响应性能比较

由图7可知,与使用电机和工作台(双)反馈的传统级联P-PI和主流PPC伺服控制相比,所提出的最优控制具有更好的干扰抑制性能。特别是在高频率下,由于进给传动结构的反谐振,控制器具有更优异的性能。在低频和高频下,最优控制效果更好,干扰抑制能力强。在大约157 Hz时,它可以实现大于5倍的干扰衰减。

通过观察发现,这种现象实际上是进给传动系统 $\sqrt{k/m} \cong 157 \text{ Hz}$ 的工作台侧反谐振频率,即控制器利用进给传动器的结构反谐振来自然地抑制干扰,从而能够在柔性进给传动上提供卓越的动态刚度。

4 结束语

针对机床柔性进给传动系统的传动控制问题,本文提出了一种最优的反馈控制技术。

首先,笔者提出的最优控制仅需要负载(工作台)侧反馈信号,以实现高跟踪带宽、干扰抑制和模态阻尼,可消除对高分辨率编码器的需求,从而降低传感器

的成本并简化机械设计。值得注意的是,仅通过工作台反馈,该控制方法就可以增加滚珠丝杆传动系统的动态刚度,这是传统双面(电机和工作台)反馈无法实现的。其次,笔者提出一种调优程序,允许设计人员利用 2 个权重对控制进行调优,以有效地平衡带宽和模态阻尼。

该控制技术可用于具有柔性结构的进给传动系统,并解决现有伺服控制中存在的不足;所提出的控制方法可以进行最优调整,以实现减振、高带宽指令跟踪和受力的有效干扰抑制,同时最大限度地减少额外硬件需求。

总体而言,最优的反馈控制技术易于实现,并且传感器成本降低了一半,性能大幅得到提升。因此,对机床进给传动系统具有较大的应用价值,能够以更低的成本获得更高的动态精度。

参考文献 (References):

- [1] 王东斌. 数控机床进给传动系统刚度对机床精度稳定性的研究[J]. 机械制造与自动化, 2016(6): 60-61.
- [2] 高 荣, 罗 刚, 胥 宏, 等. 中走丝线切割机床工作台进给系统设计方案的研究[J]. 机床与液压, 2015(16): 27-30.
- [3] 张会杰, 刘 辉, 杜 超, 等. 无平衡重的竖直轴进给系统动态特性变化规律研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 176-183.
- [4] 骆 飞, 李学伟, 高 军, 等. 基于三惯量模型的柔性进给系统建模及仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 54-58.
- [5] 杜长林, 任志辉, 鲍文禄. 一种数控机床丝杠传动进给系统优化设计方法[J]. 制造技术与机床, 2018(9): 146-147.
- [6] VILLEGAS F J, HECKER R L, PEÑA M E, et al. Model-

ing of a linear motor feed drive including pre-rolling friction and aperiodic cogging and ripple[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014, 73(14): 267-277.

- [7] FERNANDEZ-GAUNA B, ANSOATEGUI I, ETXEBERRIA-AGIRIANO I. Reinforcement learning of ball screw feed drive controllers[J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2014, 30(1): 107-117.
- [8] ITAGAKI H, TSUTSUMI M. Control system design of a linear motor feed drive system using virtual friction[J]. **Precision Engineering**, 2014, 38(2): 237-248.
- [9] 刘念聪, 杨家锐, 曾浩然, 等. 特性参数对进给系统工作台扭转-纵向振动的影响分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(8): 10-13.
- [10] HAZARIKA S, CHIDAMBARAM M. Static decouplers with P-PI dual loop controllers for unstable system[J]. **Indian Chemical Engineer**, 2015, 58(2): 172-185.
- [11] HIRUMA K, NAKAMURA H, SATOH Y, et al. Settling time design and parameter tuning methods for finite-time P-PI control[J]. **Control Science and Engineering: English version**, 2016, 4(1): 1-10.
- [12] NAKAMURA H, NISHIDA N, NAKAMURA N. High precision control of robot manipulators via finite-time P-PI control[J]. **Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers**, 2016, 52(2): 550-555.
- [13] FERRANTE A, NTOGRAMATZIDIS L. The generalized continuous algebraic Riccati equation and impulse-free continuous-time LQ optimal control[J]. **Automatica**, 2014, 50(4): 1176-1180.
- [14] 朱 冰, 贾晓峰, 王 御, 等. 基于双 dSPACE 的汽车动力学集成控制快速原型试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(1): 8-14.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

黄忠仕, 余光怀, 张为民. 适用于机床柔性进给驱动的最优反馈控制技术研究[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 816-820.

HUANG Zhong-shi, YU Guang-huai, ZHANG Wei-min. Optimal feedback control technology for machine tools flexible feed drive[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(7): 816-820.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>