

DOI: 10.7652/xjtuxb201812004

# 数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制策略

吕盾, 李润泽, 刘辉, 赵万华, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安)

**摘要:** 针对数控机床在高速加工中,各进给轴的进给速度和进给加速度高、跟随误差难以控制、零件加工精度无法保证的问题,提出一种模态滤波器与零相差跟踪控制器的综合控制策略。首先通过零极点对消的原理,得到设置在速度环内的模态滤波器,对滚珠丝杠进给系统的一阶和二阶扭转振动模态进行抵消,消除这两阶模态对伺服带宽的限制以继续提高伺服带宽;然后通过对整个伺服进给系统的传递函数近似取逆,得到设置在位置环之前的零相差跟踪控制器,改善伺服进给系统的相位滞后,最终实现数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制。仿真结果表明,当进给速度为 30 m/min、加速度为 10 m/s<sup>2</sup> 时,与传统的 PID 控制策略相比,所提出的综合控制策略将跟随误差降低到原来的 0.1% 以下。

**关键词:** 数控机床;高速加工;跟随误差;模态滤波器;零相差跟踪控制器

**中图分类号:** TH16;TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)12-0025-07

## A Control Strategy of Tracking Errors for Numerical Control Machine Tools at High Speed and Acceleration Feeding

LÜ Dun, LI Runze, LIU Hui, ZHAO Wanhua, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A comprehensive control strategy that integrates modal filter controller and zero phase tracking controller is proposed to solve the problem that when numerical control (NC) machine tools work at high speed with high feeding speed and acceleration of each axis, it is difficult to control the tracking error and guarantee machining accuracy. The principle of zero pole cancellation is firstly used to obtain a mode filter controller set in the velocity loop, which cancels the first-and second-order torsional vibration modes of the ball-screw feed system, removes the limitations of the two modes on the servo bandwidth and continuously increase the servo bandwidth. Then, the zero phase tracking controller set before the position loop is obtained and the phase lag of the servo feed system is improved by approximating the inverse of the transfer function of the whole servo feed system. Finally, the control of tracking errors of NC machine tools at high speed and acceleration feeding is realized. Simulation results and a comparison with the traditional PID control strategy show that when the feed speed is 30 m/min and the acceleration is 10 m/s<sup>2</sup>, the proposed integrated control strategy reduces the tracking error to less than 0.1% of the original one.

**Keywords:** numerical control machine tools; high-speed machining; tracking error; modal filter controller; zero phase error tracking controller

收稿日期: 2018-04-12。 作者简介: 吕盾(1978—),男,副教授;赵万华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775421)。

网络出版时间: 2018-09-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180924.1957.012.html>

高速机床是航空结构件、航空发动机整体叶轮和航天发动机诱导轮等复杂零件加工所必须的关键装备,是支撑航空航天及能源工程等高端装备制造业的基础。当前我国在复杂零件的高速加工中,加工效率和精度难以统一是急需解决的主要问题之一<sup>[1]</sup>。造成这一问题的主要原因在于,高速机床在加工复杂零件的过程中,各进给轴的跟随误差难以控制。为降低各轴跟随误差,往往只能降低进给速度加速度,牺牲了加工效率。因此,如何保证高速高加速下的高跟随精度,是实现高速机床效率与精度统一的关键问题<sup>[2]</sup>。

跟随误差是伺服进给系统的实际位置与指令位置的差值。跟随误差的大小取决于伺服进给系统接收的位置指令(或速度指令)和伺服进给系统自身的伺服特性。在高速高加速进给下,各轴位置指令的高频成分增多、频宽增大,对伺服进给系统的伺服特性提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。为了降低高速高加速进给过程中的跟随误差,必须改善伺服进给系统的幅频和相频特性<sup>[4]</sup>。

改善伺服进给系统的幅频特性主要是提高位置环带宽。伺服进给系统相当于一个低通滤波器,位置环带宽限制使得位置指令中的高频分量被衰减,输出无法及时响应输入,造成跟随误差。伺服进给系统位置环带宽的高低受到机械系统动态特性的限制。对于典型的滚珠丝杠进给系统,丝杠的一阶和二阶扭转模态是限制位置环带宽的主要原因<sup>[5]</sup>,Kamalzadeh采用陷波滤波器补偿丝杠的扭转模态,提高了位置环带宽<sup>[6]</sup>。此外,文献[7-11]采用滑模及 $H_\infty$ 控制等先进控制器,改善了伺服带宽。

改善伺服进给系统相频特性的代表性成果是Tomizuka提出的零相差跟踪控制器(ZPETC)<sup>[12]</sup>,该控制器通过对系统模型的逆设计,实现了输入输出间的相位滞后为0、静态增益为1。此后,该方法与摩擦力补偿、反向间隙及轮廓误差补偿<sup>[13]</sup>、自适应控制<sup>[14-15]</sup>、干扰观测器<sup>[16-17]</sup>及鲁棒控制器<sup>[18]</sup>、指令整形与模糊逻辑<sup>[19]</sup>等方法结合,进一步增强了伺服进给系统抗参数变化的能力和抗干扰能力。

综上所述,当前国际上对高速高加速进给下的跟随误差控制策略研究已形成一系列成果,先进的机床制造商在高速高加速进给下跟随误差控制上也达到了一定水平。但是,国内的相关理论研究和工业应用仍然存在非常大的差距,而这一差距也正是国产机床与先进进口机床在性能上差距的主要体现<sup>[20]</sup>。本文提出一种模态滤波器(MFC)与零相差

跟踪控制器综合控制策略,分别改善伺服进给系统的幅频和相频特性,实现高速高加速进给下跟随误差的控制。

## 1 模态滤波器与零相差跟踪控制器综合控制策略

### 1.1 模态滤波器设计

首先建立滚珠丝杠进给系统机械部分的等效动力学模型。为表征滚珠丝杠的一阶、二阶扭转模态,将丝杠等效为四惯量弹簧阻尼系统。此外,将电机等效为转子惯量,将联轴器等效为扭转弹簧,将滑块、丝杠螺母副及丝杠轴承等效为弹簧阻尼单元,将工作台等效为刚体。

电机转子的动力学方程为

$$J_0 \ddot{\theta}_0 + K_{\theta 0} (\theta_0 - \theta_1) = T_0 \quad (1)$$

式中: $J_0$ 为电机转子的转动惯量; $K_{\theta 0}$ 为联轴器的扭转刚度; $T_0$ 为电机驱动力矩; $\theta_0$ 为电机转子的角位移; $\theta_1$ 为丝杠等效惯量 $m_1$ 的角位移。

滚珠丝杠扭转方向的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + B_{\theta_1} \dot{\theta}_1 + K_{\theta_0} (\theta_1 - \theta_0) + K_{\theta_1} (\theta_1 - \theta_2) &= 0 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + K_{\theta_1} (\theta_2 - \theta_1) + K_{\theta_2} (\theta_2 - \theta_3) &= 0 \\ J_3 \ddot{\theta}_3 + B_n \frac{p}{2\pi} \left( \dot{\theta}_3 \frac{p}{2\pi} - \dot{x}_t + \dot{\theta}_3 d_1 + \dot{x}_3 \right) + \\ &K_n \frac{p}{2\pi} \left( \dot{\theta}_3 \frac{p}{2\pi} - \dot{x}_t + \dot{\theta}_3 d_1 + \dot{x}_3 \right) + \\ K_{\theta_2} (\theta_3 - \theta_2) + K_{\theta_3} (\theta_3 - \theta_4) &= 0 \\ J_4 \ddot{\theta}_4 + B_{\theta_4} \dot{\theta}_4 + K_{\theta_3} (\theta_4 - \theta_3) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $J_i$ 为丝杠各等效惯量的转动惯量, $i=1,2,3,4$ ; $\theta_i$ 为丝杠各等效惯量的角位移, $i=1,2,3,4$ ; $K_{\theta}$ 为丝杠各等效惯量间的扭转刚度, $i=1,2,3$ ; $K_n$ 为丝杠螺母副刚度; $B_n$ 为丝杠螺母副阻尼; $d_i$ 为工作台质心相对于螺母轴心、外力方向、工作台顶端以及滑块中心的距离, $i=1,2,3,4$ ; $p$ 为丝杠导程; $B_{\theta}$ 为丝杠各等效惯量间的等效阻尼, $i=1,2,3$ 。

滚珠丝杠轴向的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x} + B_0 \dot{x}_1 + K_0 x_1 + K_1 (x_1 - x_2) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + K_1 (x_2 - x_1) + K_2 (x_2 - x_3) &= 0 \\ m_3 \ddot{x}_3 + B_n \left( \dot{x}_3 - \dot{x}_t + \dot{\theta}_3 \frac{p}{2\pi} + \dot{\theta}_3 d_1 \right) + \\ &K_n \left( x_3 - x_t + \theta_3 \frac{p}{2\pi} + \theta_3 d_1 \right) + \\ K_2 (x_3 - x_2) + K_3 (x_3 - x_4) &= 0 \\ m_4 \ddot{x}_4 + B_4 \dot{x}_4 + K_3 (x_4 - x_3) + K_4 x_4 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $m_i$  为丝杠各等效惯量的质量, $i=1,2,3,4$ ;  $K_i$  为丝杠各等效惯量间的轴向刚度, $i=1,2,3$ ;  $K_0$ 、 $K_4$  为丝杠轴承支承刚度; $x_i$  为丝杠各等效惯量的轴向位移, $i=1,2,3,4$ ;  $B_0$ 、 $B_4$  为丝杠轴承阻尼。

工作台的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m_t \ddot{x}_t + B_5 (\dot{x}_t - \dot{\theta}_t d_3) + B_n (\dot{x}_t - \dot{\theta}_t d_1 - \dot{x}_3 - \dot{\theta}_3 \frac{p}{2\pi}) + K_n (x_t - \theta_t d_1 - x_3 - \theta_3 \frac{p}{2\pi}) &= -F_t \\ J_t \ddot{\theta}_t + 2B_t \dot{\theta}_t d_4^2 + B_n (\dot{\theta}_t d_1 - \dot{x}_t + \dot{x}_3 + \dot{\theta}_3 \frac{p}{2\pi}) d_1 + B_5 (\dot{\theta}_t d_3 - \dot{x}_t d_3) + 2K_t \theta_t d_4^2 + K_n (\theta_t d_1 - x_t + x_3 + \theta_3 \frac{p}{2\pi}) d_1 &= -F_t d_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $m_t$  为工作台质量; $J_t$  为工作台转动惯量; $B_t$  为导轨滑块副阻尼; $K_t$  为导轨滑块副刚度; $B_5$  为滑块沿进给方向运动时的摩擦阻尼; $F_t$  为外力。

综合式(1)~(4),滚珠丝杠进给系统的动力学方程可表达为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (5)$$

式中: $M$  为质量矩阵; $C$  为阻尼矩阵; $K$  为刚度矩阵; $F$  为外力; $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$  为分别为位移、速度和加速度矩阵。

由式(5)可得滚珠丝杠进给系统电机处力入编码器速度出的传递函数为

$$H_v = \frac{j\omega}{K - M\omega^2 + j\omega C} \quad (6)$$

根据式(6),求解滚珠丝杠进给系统电机力入编码器速度出的频响曲线,可以获得丝杠的一阶和二阶扭转振动振型及固有频率。

由式(6)求解一阶和二阶扭转振动模态的零极点。设计模态滤波控制器  $H(z)$ ,使其零极点与一阶和二阶扭转模态零极点相抵消,削弱这两阶扭转模态对位置环带宽的限制作用。

1.2 零相差跟踪控制器设计

对加入模态滤波器后伺服进给系统的传递函数进行辨识,以设计零相差跟踪控制器。辨识模型采

用离散传递函数形式

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1})y(k) &= z^{-d}B(z^{-1})u(k) \\ A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + a_{n_b}z^{-n_b} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $u(k)$  和  $y(k)$  分别为进给系统的输入和输出; $d$  为进给系统的延时周期数。

辨识得到的伺服进给系统离散传递函数为

$$G_c(z) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (8)$$

式中: $d$  表示系统延时, $A(z^{-1})$  和  $B(z^{-1})$  为互质的离散多项式。

理论上,零相差跟踪控制器  $C_r(z)$  应取伺服进给系统传递函数  $G_c(z)$  的逆。然而,当  $G_c(z)$  为非最小相位系统时, $B(z^{-1})$  会存在不稳定的零点,导致控制器不稳定。因此,将  $B(z^{-1})$  分解为

$$B(z^{-1}) = B^a(z^{-1})B^u(z^{-1}) \quad (9)$$

式中: $B^a(z^{-1})$  为单位圆内的系统零点组成的多项式; $B^u(z^{-1})$  为单位圆外和单位圆上的系统零点组成的多项式。

零相差跟踪控制器的传递函数为

$$C_r(z) = \frac{zA(z^{-1})B(z)}{B(z^{-1})[B(1)]^2} \quad (10)$$

加入零相差跟踪控制器后,系统的传递函数变化为

$$G(z) = \frac{Y(z)}{R(z)} = G_c(z)C_r(z) = \frac{B(z^{-1})B(z)}{[B^u(1)]^s} \quad (11)$$

系统输入变为  $u(k+d+s)$ ,表示超前于需要输入值  $u(k)d+s$  步, $s$  为不稳定零点个数。

1.3 综合控制策略仿真模型

将设计得到的模态滤波器与零相差跟踪控制器集成到 PID 控制框架中,建立综合控制策略的仿真模型,模型为连续模型,指令周期为 2 ms,如图 1 所示,其中模态滤波器设置在速度环内,零相差跟踪控制器设置在位置环之前。

2 实验验证

2.1 实验装置

实验装置为铣床 X 轴进给系统,如图 2 所示。

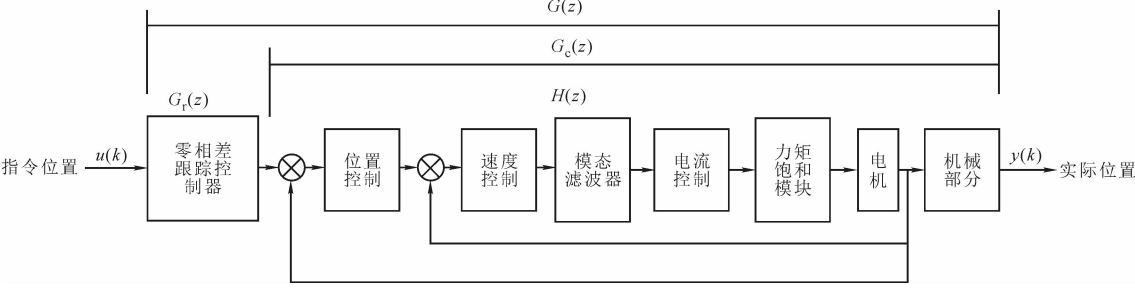


图 1 模态滤波器与零相差跟踪控制器综合控制策略仿真模型框图

该进给系统为滚珠丝杠传动,电机为伺服交流电机,型号为 SGMGH-30ACA,驱动器为 SGDM30ADA。进给系统采用半闭环控制,增量式码盘线数为 2 500,速度环采样时间为 250  $\mu$ s。数控系统为 PA 开放式数控系统。通过查阅机床相关手册以及数控系统和驱动器内的参数设定,建模所需参数如表 1 所示。

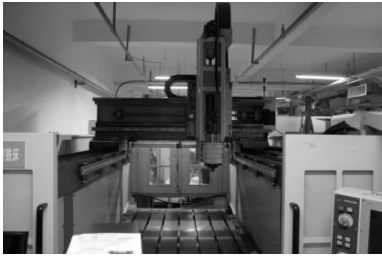


图 2 实验装置照片

表 1 机床相关参数

| 参数                                                                  | 数值               |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|
| 杨氏弹性模量 $E/\text{GPa}$                                               | 20               |
| 剪切弹性模量 $G/\text{GPa}$                                               | 77.5             |
| 泊松比 $\mu$                                                           | 0.27             |
| 材料密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$                             | 7 850            |
| 电机转子惯量 $J_0/\text{kg}\cdot\text{m}^2$                               | 0.001 7          |
| 螺母推力刚度 $k_0/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$              | $3.6\times 10^7$ |
| 螺母轴向阻尼 $c_0/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}$ | $6\times 10^2$   |
| X 轴移动部件质量 $m/\text{kg}$                                             | 1016             |
| 滚珠丝杠长度 $l/\text{m}$                                                 | 1.80             |
| 滚珠丝杠导程 $p/\text{m}$                                                 | 0.01             |
| 滚珠丝杠直径 $d/\text{m}$                                                 | 0.04             |
| 丝杠支撑轴承前轴向刚度 $k_1/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$         | $8.0\times 10^8$ |
| 丝杠支撑轴承后轴向刚度 $k_2/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$         | $8.0\times 10^8$ |
| 丝杠支撑轴承前轴向阻尼 $c_1/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$         | $5.0\times 10^1$ |
| 丝杠支撑轴承后轴向阻尼 $c_2/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$         | $5.0\times 10^1$ |
| 位置环比例增益 $k_p/\text{s}^{-1}$                                         | 2                |
| 速度环增益 $k_v/\text{V}^{-1}\cdot\text{A}^{-1}$                         | 40               |
| 速度环时间积分常数 $\tau/\text{ms}$                                          | 40               |
| 速度环滤波截止频率 $f_1/\text{rad}$                                          | 6 300            |
| 速度环反馈滤波截止频率 $f_2/\text{rad}$                                        | 12 600           |
| 电机扭矩常数 $C_t/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$                | 0.164 6          |

2.2 滚珠丝杠进给系统等效动力学模型实验验证

滚珠丝杠进给系统等效动力学模型的准确性是模态滤波器设计的基础。为了验证等效动力学模型,给电机施加快速正弦扫频激励力信号,得到电机力入编码器速度出幅频响应,如图 3 所示。图 3 的

实验结果表明,滚珠丝杠进给系统存在 6 阶固有频率,分别为 20.2、49.8、70.8、121.6、378.9 和 941.4 Hz,其中 378.9 和 941.4 Hz 为一阶和二阶扭转振动的固有频率。理论计算得到的一阶和二阶扭转振动的固有频率分别为 378 和 957.3 Hz。一阶和二阶扭转振动固有频率的实验测试结果和理论计算结果基本一致,可以证明所建立等效动力学模型及模态滤波器设计的准确性。

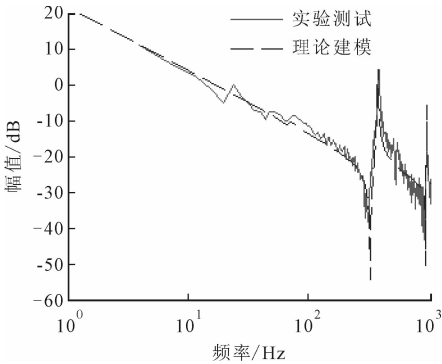


图 3 滚珠丝杠进给系统电机力入编码器速度出幅频响应

2.3 伺服进给系统传递函数辨识及零相差跟踪控制器求解

辨识信号采用 10 m/min 匀速直线运动和幅值为 40  $\mu$ m 的 M 序列的叠加信号。将辨识信号作为插补指令输入数控系统,同时采集编码器反馈的输出位移信号,采样周期为 2 ms。根据 1.2 节所述方法,求解零相差跟踪控制器传递函数。

2.4 伺服进给系统实际位置的理论仿真与实验测试对比

令 X 轴做直线往返进给运动,指令位置  $u(k)$  的速度变化曲线如图 4 所示。最大速度为 10 m/min,加速度为 2  $\text{m/s}^2$ ,加减速策略为 S 型,行程为 200 mm。

图 5a 为实际位置  $y(k)$  的理论仿真与实验测试结果,从图 5b 中可以看出,理论仿真与实验测试结果

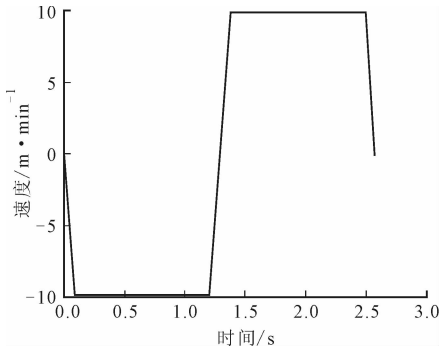
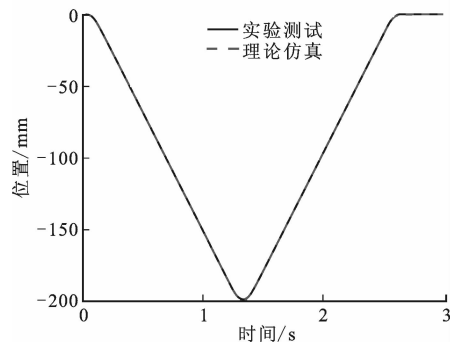
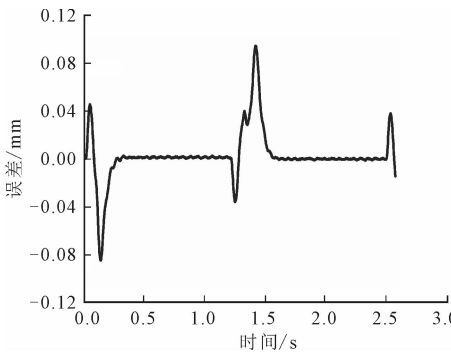


图 4 进给运动的速度曲线

果非常吻合,二者之间的差异小于  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,证明了第 1 节所建立的综合控制策略仿真模型的正确性。



(a)实验测试与理论仿真结果对比



(b)实验测试与理论仿真结果之差

图 5 伺服进给系统实际位置与误差的实验测试与理论仿真结果

3 控制效果及分析

在实验验证了所建立综合控制策略仿真模型正确性的基础上,利用该仿真模型进一步分析综合控制策略对高速/高加速下跟随误差的控制效果。在仿真模型中输入如图 4 所示变化趋势的速度指令,其速度分别为 10、20、30 和 50 m/min,加速度分别为 2、5 和 10 m/s<sup>2</sup>,行程为 1 m。

图 6 示出了速度为 30 m/min、加速度为 10 m/s<sup>2</sup> 时,4 种控制策略下,跟随误差在整个行程上(随

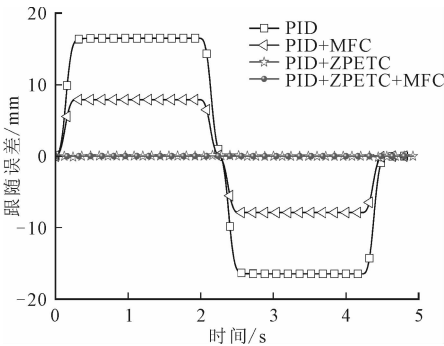


图 6 4 种控制策略下跟随误差随时间的变化

时间)的变化。从图 6 中可知,在 PID、PID+MFC、PID+ZPETC 和 PID+ZPETC+MFC 这 4 种控制策略下,跟随误差最大值分别为 16.486、7.907、0.150 和 0.016 mm。

由图 6 可见,PID 控制策略下的跟随误差非常大,这主要是由于伺服系统的相位滞后而引起的。采用 PID+ZPETC 控制策略,相对于 PID 及 PID+MFC 控制策略,显著缩小了相位滞后,如图 7 所示,因此跟随误差大幅降低。

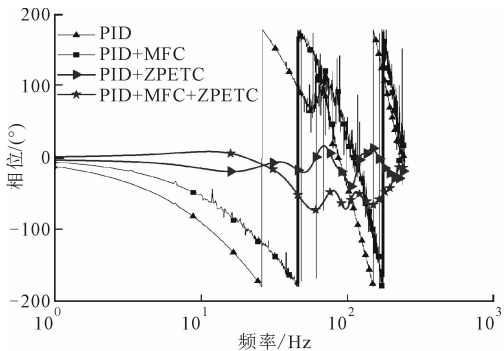


图 7 伺服进给系统在不同控制策略下的相频曲线

相位滞后的改善,显著减小了跟随误差。此时,引起跟随误差的主要原因变为伺服进给系统位置环带宽的限制。由于加减速过程中指令的频宽较匀速过程大,因此,PID+ZPETC 控制策略下,跟随误差在加减速过程中比较突出。采用 PID+ZPETC+MFC 控制策略,在保证较小相位滞后的前提下,进一步提高了伺服系统的位置环带宽,如图 8 所示,因此,跟随误差进一步减小。

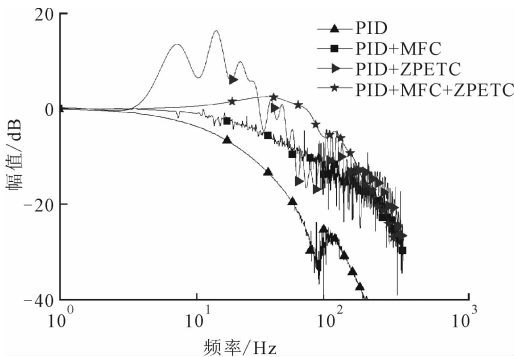


图 8 伺服进给系统在不同控制策略下的幅频曲线

图 9 所示为采用 PID+ZPETC+MFC 控制策略,不同进给速度加速度下的最大跟随误差,其中加速度为 0 表示匀速过程中的最大跟随误差。

从图 9 中可以看出:在 PID+ZPETC+MFC 控制策略下加减速过程中的跟随误差大于匀速过程;在某一加速度下,跟随误差随着速度的增大而增大;

在某一速度下,跟随误差随着加速度的增大而增大;当进给速度为 50 m/min、加速度为 10 m/s<sup>2</sup> 时,跟随误差大幅增大到 188.3  $\mu$ m。造成跟随误差大幅增大的原因是,高速/高加速需要的电机扭矩超出了电机限制,如图 10 所示。

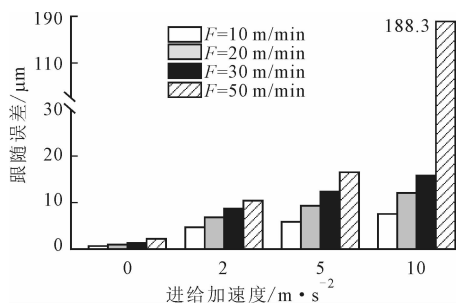


图9 PID+ZPETC+MFC 控制策略在不同速度和加减速下的跟随误差

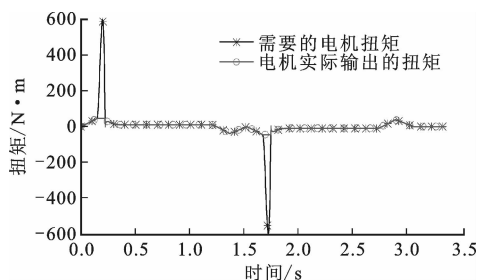


图10 高速高加速需要的电机扭矩与电机实际输出扭矩对比

## 4 结 论

(1)PID+ZPETC+MFC 控制策略改善了伺服进给系统的相位滞后、提高了伺服进给系统的位置环带宽,当进给速度为 30 m/min、加速度为 10 m/s<sup>2</sup> 时,将跟随误差由 PID 控制策略下的 16.486 mm 大幅降低到 15.5  $\mu$ m。

(2)PID+ZPETC+MFC 控制策略下,匀速过程中的跟随误差很小,加减速过程中的跟随误差相对突出,且跟随误差随速度及加速度的增大略微增大。

(3)随着速度和加速度的增大,所需要的电机扭矩也不断增大,当需要的电机扭矩超过电机扭矩限制时,PID+ZPETC+MFC 控制策略不能再对跟随误差实施有效控制。

## 参考文献:

[1] 卢秉恒,赵万华,张俊,等. 高速高加速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.

- [2] 赵万华,张俊,刘辉,等. 数控机床精度评价新方法 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 93-98.  
ZHAO Wanhua, ZHANG Jun, LIU Hui, et al. New evaluation method on the precision of NC machine tools [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 93-98.
- [3] 徐文祝,姜万生,赵万华. 数控机床控制性能影响因素的探究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(30): 7349-7358.  
XU Wenzhu, JIANG Wansheng, ZHAO Wanhua. Research on factors affecting CNC control performance [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(30): 7349-7358.
- [4] 刘辉,黄莹,张会杰,等. 数控机床进给系统传动刚度变化对运动精度稳定性的影响规律 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 128-133.  
LIU Hui, HUANG Ying, ZHANG Huijie, et al. Effects of transmission stiffness variations on the dynamic accuracy consistency of CNC feed drive systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 128-133.
- [5] SMITH D A. Wide bandwidth control of high-speed milling machine feed drive [D]. Gainesville, FL, USA: University of Florida, 1999: 55-66.
- [6] KAMALZADEH A, ERKORKMAZ K. Accurate tracking controller design for high-speed drives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2007, 47(9): 1393-1400.
- [7] ALTINTAS Y, ERKORKMAZ K, ZHU W H. Sliding mode controller design for high speed feed drives [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 265-270.
- [8] OKWUDIRE C, ALTINTAS Y. Minimum tracking error control of flexible ball screw drives using a discrete-time sliding mode controller [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2009, 131(5): 051006-051012.
- [9] BRUSSEL H V, BRAEMBUSSCHE P V D. Robust control of feed drives with linear motors [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 325-328.
- [10] HO M H, LAI Y S. Controller design of servo drives for bandwidth improvement [C]// 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 52-56.
- [11] ERKORKMAZ K, KAMALZADEH A. High band-

- width control of ball screw drives [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 393-398.
- [12] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(1): 65-68.
- [13] LI X W, ZHANG J, ZHAO W H, et al. A zero phase error tracking based path pre-compensation method for high speed machining [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(2): 230-239.
- [14] TSAO T C, TOMIZUKA M. Adaptive zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 1987, 109(4): 349-354.
- [15] YEH S S, HSU P L. An optimal and adaptive design of the feedforward motion controller [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(4): 428-439.
- [16] HARA H, SATOH T, SAITO N, et al. Disturbance observer-based predictive functional control using zero phase error tracking controller [C]//2015 World Congress on Industrial Control Systems Security. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015:19-20.
- [17] 陈兴林, 刘川, 周乃新. 基于 ZPETC-FF 和 DOB 的精密运动平台控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(1): 1-6.
- CHEN Xinglin, LIU Chuan, ZHOU Naixin. Controller design based on ZPETC-FF and DOB for precision motion platform [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(1): 1-6.
- [18] 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(1): 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(1): 121-126.
- [19] SCHMIDT R, BEGNEAUD M, VAUGHAN J. Tracking of a target payload via a combination of input shaping, zero phase error tracking control, and fuzzy logic [C]//ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2016: 89DUMMY.
- [20] 赵万华, 张星, 吕盾, 等. 国产数控机床的技术现状与对策 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(9): 16-22.
- ZHAO Wanhua, ZHANG Xing, LÜ Dun, et al. Technical status and strategies for domestic CNC machine tools [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 16-22.

## [本刊相关文献链接]

- 徐思雨, 祝继华, 姜祖涛, 等. 无序多视角点云的自主配准方法. 2018, 52(11): 134-141. [doi:10.7652/xjtuxb201811020]
- 成旭华, 姚建勇, 乐贵高. 电液伺服系统多模型鲁棒自适应控制. 2018, 52(11): 156-162. [doi:10.7652/xjtuxb201811023]
- 陈保家, 邱光银, 肖文荣, 等. 航空发动机转子轴承运行可靠性评估方法. 2018, 52(10): 41-48. [doi:10.7652/xjtuxb201810006]
- 孙泽明, 庞培川, 张芊, 等. 基于可听声波的 GIS 击穿点定位方法. 2018, 52(10): 88-94. [doi:10.7652/xjtuxb201810012]
- 马光亮, 续丹, 王斌, 等. 用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略. 2018, 52(10): 102-109. [doi:10.7652/xjtuxb201810014]
- 宋喜玉, 任修坤, 郑娜娥, 等. 多目标跟踪下的分布式 MIMO 雷达资源联合优化算法. 2018, 52(10): 110-115. [doi:10.7652/xjtuxb201810015]
- 陈阳, 张瑞智, 金锴, 等. 采用电荷平衡模数转换器的高精度 CMOS 温度传感器. 2018, 52(10): 124-131. [doi:10.7652/xjtuxb201810017]
- 单亚飞, 李天卉, 杨竹强, 等. 超临界环己烷水平管内水动力学多值性研究. 2018, 52(9): 64-70. [doi:10.7652/xjtuxb201809008]
- 吕海财, 赵金乐, 潘辉, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 水平管内浮升力和热加速效应评判准则. 2018, 52(9): 140-147. [doi:10.7652/xjtuxb201809019]
- 刘玉春, 王洪雁. 提升空时自适应检测性能的多输入多输出雷达稳健波形设计. 2018, 52(8): 124-131. [doi:10.7652/xjtuxb201808019]
- 宗潇, 刘继平, 杨赅石, 等. 矩形通道内蒸汽射流凝结换热面积的实验研究. 2018, 52(7): 46-51. [doi:10.7652/xjtuxb201807007]
- 周家森, 齐宝金, 魏进家, 等. 铜基疏水冷表面液滴冻结实验研究. 2018, 52(7): 108-114. [doi:10.7652/xjtuxb201807016]
- 孟文俊, 张四聪, 淡紫嫣, 等. 按类统计方法在滚动轴承可视化可靠性动态评估中的应用. 2018, 52(6): 23-29. [doi:10.7652/xjtuxb201806004]
- 田红亮, 何孔德, 陈从平, 等. 采用俞茂宏统一强度理论求解套管的极限外压强. 2018, 52(5): 1-11. [doi:10.7652/xjtuxb201805001]
- 钟德星, 杨元, 刘瑞玲, 等. 基于单目视觉的装配机器人研究及应用. 2018, 52(5): 81-87. [doi:10.7652/xjtuxb201805012]

(编辑 刘杨)