

文章编号 1004-924X(2007)01-0063-06

高增益 PID 控制器实现纳米定位

卢礼华¹, 郭永丰¹, 大刀川博之², 梁迎春¹, 下河边明²

(1. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 东京工业大学 精密工学研究所, 日本 横滨 2268503)

摘要:建立了高增益 PID 闭环控制系统,在“直流伺服电机+滚珠丝杠”驱动机构上实现了大范围的纳米定位。对于“伺服电机+滚珠丝杠”驱动系统来说,摩擦是实现纳米定位精度的主要障碍,它影响着系统微动特性并导致稳态误差。针对这种驱动系统,在根据标定参数计算得到的线性传递函数的基础上,设计高增益不完全微分、比例反馈 PID 控制器,配置闭环控制系统的极点为负实轴上的多重极点,避免了摩擦力建模和补偿。实验结果表明,该高增益闭环控制系统有效地抑制了摩擦等非线性因素的影响,在系统的宏动和微动特性阶段都可以实现单步的纳米定位并取得了一致的响应,10 nm~10 mm 阶跃响应的稳态误差不超过 ± 2 nm。

关键词:滚珠丝杠;PID 控制器;纳米定位;摩擦

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A

High-gain PID controller for nanometer positioning

LU Li-hua¹, GUO Yong-feng¹, Tachikawa Hiroyuki², LIANG Ying-chun¹, Shimokohbe Akira²

(1. *Precision Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*; 2. *Precision and Intelligent Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-8503, Japan*)

Abstract: Nanometer positioning was realized in a DC-motor and ball-screw-driven stage by a high gain controller. With effecting of friction on microdynamic characteristics and steadystate errors of the stage, it is a major obstacle to the achievement of nanometer positioning. In this paper, a high gain PID control structure was designed with proportional and derivative terms placed in the feedback path. Controller parameters were calculated by multiple closed-loop poles placement according to the macro-dynamics alone and no friction modeling and compensation were necessary. Experimental and simulated results indicate that the PID controller can provide a sufficiently high loop gain to suppress friction effect so that single-step nanometer positioning and uniform responses of micro-motion and macro-motion are achieved. In point-to-point positioning for step heights from 10 nm to 10 mm, the positioning error is within ± 2 nm.

Key words: ball screw; PID controller; nanometer positioning; friction

收稿日期:2006-07-04;修订日期:2006-10-08.

基金项目:日本东京工业大学资助项目

1 引言

滚珠丝杠传动机构广泛应用在精密机床和测量设备中,而摩擦极大地影响其在微纳米运动范围内的响应性能并使之呈现与宏观运动特性完全不同的微动特性^[1],是实现大范围纳米定位的主要障碍。虽然很多学者对摩擦力进行了研究^[2],然而一个描述所有摩擦行为的模型是异常复杂的,很难直接应用于控制系统中。目前通用的伺服定位方案是宏、微两级控制,即针对不同运动阶段的系统特性设计对应的控制器,控制系统结构非常复杂^[3],而且由于摩擦力随时间和位置变化,宏动和微动特性的边界定义比较困难^[4]。

理论上讲,具有高闭环增益的控制系统对摩擦扰动和系统参数的变化具有高的鲁棒性^[5,6]。本文针对直流伺服电机和超精密滚珠丝杠驱动机构的简化线性传递函数,即宏动特性,设计了PID闭环控制结构,比例和微分环节放在反馈通道上,控制器参数通过将闭环系统的多重极点配置在负实轴上计算得到,计算方法简单。由于驱动机构具有足够高的刚度,高增益控制器不会激励系统的未建模高频动态特性,系统可以得到稳定的响应。同时,高闭环增益抑制了摩擦扰动和系统参数变化的影响,控制器中的积分环节则可以消除稳态误差,从而在宏动和微动阶段都可以实现纳米定位。

2 定位系统的组成与建模

图 1 是超精密滚珠丝杠伺服驱动系统示意图。计算机发出的控制信号通过放大器传递给直流伺服电机,驱动滚珠丝杠,从而拖动工作台产生位移。工作台位置由激光干涉仪采集,分辨率为 1.2 nm,通过并行的 I/O 板反馈给计算机。工作台由两条直线滚珠导轨支撑,通过螺钉和滚珠丝杠螺母刚性连接在一起,滚珠丝杠由滚珠轴承支撑,通过刚性联轴节和电机轴联结,由于采用预压滚珠丝杠和轴承,机械系统具有高刚度且没有回程间隙,有利于高增益闭环控制的实现。驱动机构总行程 140 mm。传动机构、激光干涉仪和激光头一起安装在一块定位基板上,然后将定位基板固定在大理石平台上,有效地保证了定位系统的稳定性。

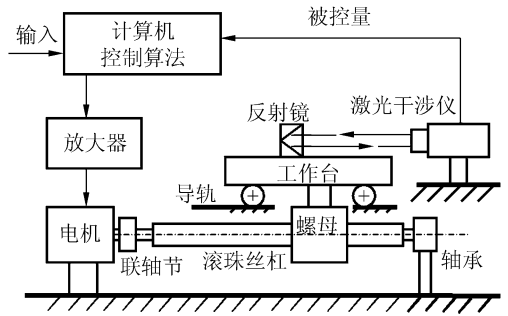


图 1 定位系统的组成简图

Fig. 1 Schematic diagram of table system

忽略摩擦和电机电感的影响,直流伺服电机和滚珠丝杠驱动机构可以简化为一个仅包含质量和阻尼的二阶系统,传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s} \quad (1)$$

其中 a_1 和 b_0 由电机和放大器的参数、电机的转动惯量和阻尼系数计算得到, $a_1 = 9.52$, $b_0 = 0.17$ 。在使用电压放大器的情况下,系统的阻尼系数 a_1 由机械系统阻尼和电机反电势两部分组成。图 2 是采用频谱分析仪得到的该驱动机构在幅值为 3.0 V 的正弦电压输入下的频率分析实验结果。从增益曲线可以看到,该机构在很宽的频带上都具有良好的频率特性,有利于高增益控制的实现。

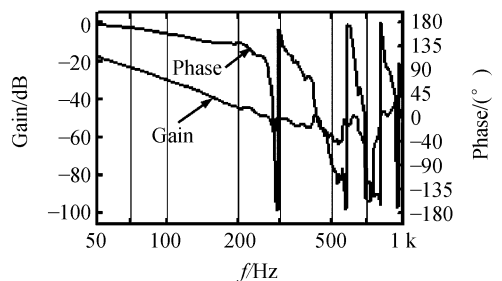


图 2 驱动机构的宏动特性

Fig. 2 Macro-dynamics of drive system

公式(1)和图 2 可以很好地描述驱动机构的宏动特性,但是当定位精度在微米或亚微米尺寸时,摩擦力主导了系统的响应,呈现出与宏动特性完全不同的微动特性。图 3 是采用频谱分析仪得到的该驱动机构在幅值为 100 mV 的正弦电压输入下的频率分析实验结果。可以看到,驱动机构基本上可以等效为一个阻尼系数较小的二阶系

统,这就是系统的微动特性。摩擦力在微动阶段的作用可以等效为一个弹性系数为 k_f 的弹簧,传动机构的微动特性一般用下式描述:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0}, \quad (2)$$

其中, $a_0 = k_f/M$ 。 M 为传动机构的等效运动质量。

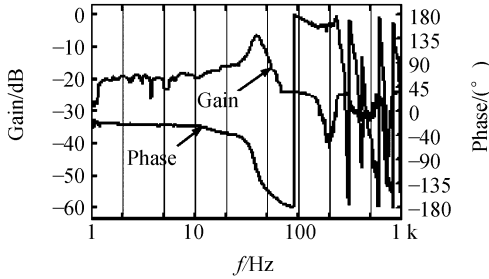


图 3 驱动机构的微动特性

Fig. 3 Microdynamics of drive system

由于摩擦特性随机构的运行状态而变化,很难通过给定一个确定的弹簧系数 k_f 来描述系统的微动特性。

3 控制器设计

PID 控制器是目前应用最广泛的一种控制结构,但是微分易引进高频干扰,在误差扰动突变时尤其显得不足。在控制算法中加入低通滤波器,构成不完全微分 PID 控制器,可使系统性能得到改善。图 4 是闭环控制系统框图,其中, K_c 是比例增益, T_i 是积分时间常数, T_d 是微分时间常数, N 是微分因子。比例和微分环节被放在反馈通道上,在改变给定输入时,控制器输出不会立刻改变,而被控量的变化通常是比较缓和的,相对于传统的串联 PID 控制结构,这种控制结构避免了在给定输入变化时引起的系统振荡和超调,从而明显改善系统的动态特性。

由于执行机构具有饱和特性,且 PID 控制器中含有积分环节,在给定值变化较大时,会发生积分饱和现象,导致系统性能恶化甚至失去稳定。抗积分饱和算法可以有效地解决这个问题^[5]。

基于简化的二阶线性传递函数公式(1),图 4 所示的闭环系统的极点可以通过改变控制器的 4 个参数任意配置。将闭环系统的极点配置为负实

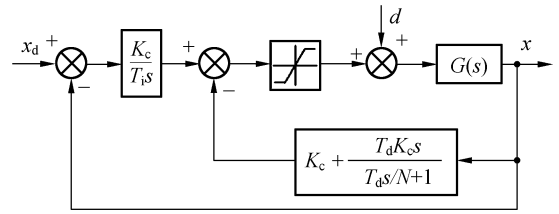


图 4 闭环系统框图

Fig. 4 Block diagram of closed-loop system

轴上的多重极点,即闭环系统传递函数具有如下形式:

$$T(s) = \frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{A}{(s+p)^4}, \quad (3)$$

其中 $-p$ 为闭环系统的多重极点。求解得到控制器的参数计算公式:

$$\left. \begin{aligned} K_c &= \frac{15p^4 - 4a_1p^3}{b_0(4p - a_1)^2} \\ T_i &= \frac{15p - 4a_1}{4p^2 - a_1p} \\ T_d &= \frac{81p^4 - 108a_1p^3 + 54a_1^2p^2 - 12a_1^3p + a_1^4}{(15p^4 - 4a_1p^3)(4p - a_1)} \\ N &= \frac{81p^4 - 108a_1p^3 + 54a_1^2p^2 - 12a_1^3p + a_1^4}{15p^4 - 4a_1p^3} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4 仿真与实验结果

PID 控制器离散后,用 C 语言编制控制程序,运行在 DOS 操作系统下,模拟控制电压由一个 12 位的 D/A 板发送给功率放大器,功率放大器的饱和电压为 3.0 V。将闭环系统的多重极点配置为 $-p = -2\pi \times 50$,由公式(4)计算得到控制器参数见表 1。

表 1 PID 控制器参数

Tab. 1 PID controller parameters

闭环极点	K_c	T_i	T_d	N
$-2\pi \times 50$	5.49×10^5	1.19×10^{-2}	4.19×10^{-3}	5.23

采用 PID 闭环控制结构,阶跃响应实验和仿真结果见图 5~8,仿真中没有考虑摩擦力的影响。由于闭环多重极点配置在 $-p = -2\pi \times 50$,相对于常用的滚珠丝杠伺服驱动系统具有更高的闭环增益,抑制了摩擦对响应的影响以及微米和毫米级的阶跃响应,实验和仿真结果非常吻合。

由于微动特性和宏动特性的巨大差异,亚微米范围内的阶跃响应实验和仿真结果存在较大的误差,即使在这种情况下,闭环系统仍然有足够的力量实现稳定的纳米分辨率的定位。另外,由于执行机构的饱和,虽然控制器中加入了抗积分饱和算法,毫米级的阶跃响应仍存在较大的超调。

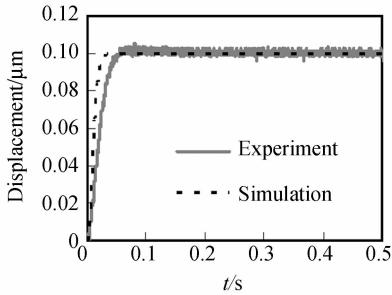


图 5 0.1 μm 阶跃响应

Fig. 5 0.1 μm step response

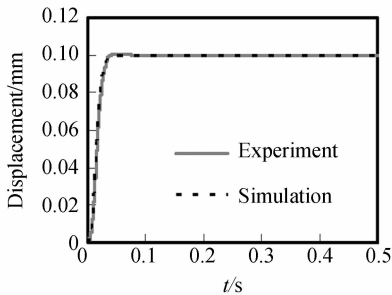


图 6 0.1 mm 阶跃响应

Fig. 6 0.1 mm step response

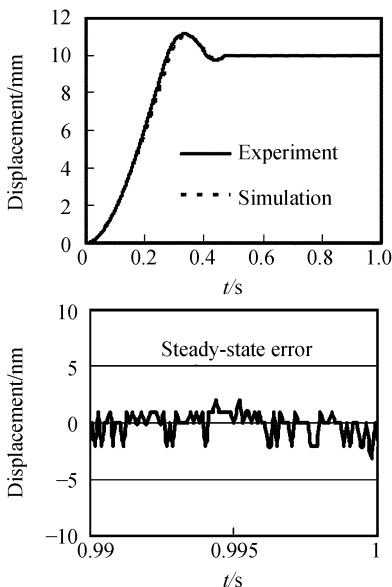


图 7 10 mm 阶跃响应和稳态误差

Fig. 7 10 mm step response and steady-state error

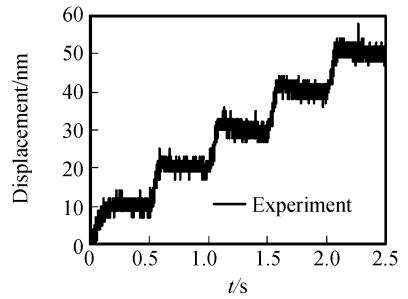


图 8 10 nm 分步阶跃响应

Fig. 8 10 nm stepwise response

此外,1.0 μm 和 1.0 mm 的阶跃响应都获得了实验验证。为了评价系统的定位精度,定义 10 mm 阶跃响应的稳态误差为 0.99 s 到 1.0 s 的平均误差,10 nm~1 mm 阶跃响应的稳态误差为 0.49 s 到 0.50 s 的平均误差。结果表明,阶跃响应稳态误差全部 $< \pm 2$ nm (每个尺寸的阶跃响应实验在不同的位置重复 27 次)。

为了考查闭环系统对摩擦力的鲁棒性,在仿真中,建立摩擦力模型如下:

$$\tau_f = \begin{cases} -K_i i, & |\omega| < 1 \times 10^{-6} \text{ rad/s and } |K_i i| < T_{f\max} \\ T_{f\max} \text{sgn}(\omega), & |\omega| \geq 1 \times 10^{-6} \text{ rad/s or } |K_i i| < T_{f\max} \end{cases}, \quad (5)$$

$T_{f\max}$ 是最大静摩擦力, ω 是电机的角速度, K_i 是电机的力矩常数, i 是电机电流。经实验测定,该驱动机构的静摩擦力约为 $T_f = 0.0254 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。仿真中,设定 $T_{f\max} = nT_f$, ($n=1, 2, 4$)。0.1 mm 阶跃响应实验与无摩擦仿真结果的误差见图 9。图 10 给出了存在摩擦与无摩擦时 0.1 mm 阶跃响应仿真结果的相对误差,可以看出,闭环系统在摩擦力变化较大时仍然是稳定的。

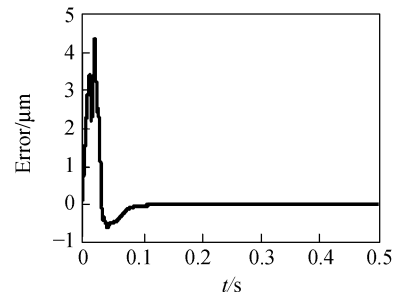


图 9 0.1 mm 阶跃响应仿真与实验误差

Fig. 9 0.1 mm step response error of simulation relative to experiment

在亚微米定位阶段,微动特性控制了系统的

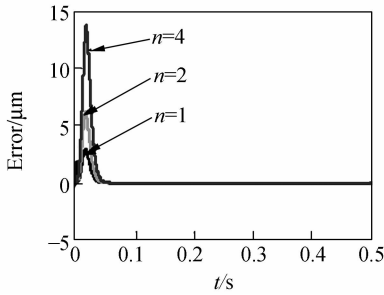


图 10 有摩擦相对无摩擦 0.1 mm 阶跃响应误差

Fig. 10 0.1 mm step response error of simulation with friction relative to without friction

响应,影响定位精度。系统的微动特性受摩擦力等非线性因素的影响,随时间和位置有明显的变化,通过对系统的微动特性进行多次频谱分析实验,粗略计算得到公式(2)中 $a_0 = 60\ 000$ 。图 11 给出了 $0.1\ \mu\text{m}$ 阶跃响应实验结果和采用微动特性公式(2)组成的闭环系统的仿真结果,比较图 5 可以看到,采用微动特性得到的仿真结果更加接近实验数据。

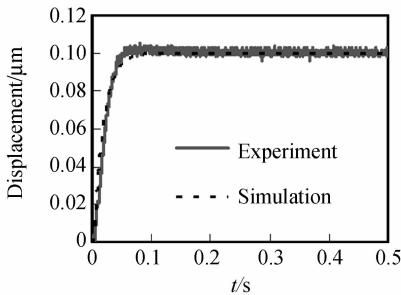


图 11 $0.1\ \mu\text{m}$ 阶跃响应

Fig. 11 $0.1\ \mu\text{m}$ step response

因此,在采用微动特性组成的闭环系统中,从参数 a_0 的变化对系统性能的影响可以得到控制器在微动阶段的执行性能。图 12 给出了 a_0 取不同值时闭环系统 Bode 图。可以看到,微动特性下,闭环系统的带宽相对减小,这意味着在微动阶段,系统的响应速度相对于宏动阶段会有所减慢,这也通过 $0.1\ \mu\text{m}$ 阶跃响应实验得到了验证。

采用高增益 PID 闭环控制系统,对摩擦和系统参数变化具有很高的鲁棒性,在系统的宏动和微动阶段都可以得到稳定的响应和纳米定位精

度。只是,由于执行机构饱和与积分饱和的影响,即使在采用抗积分饱和算法的情况下,毫米级的阶跃响应仍存在较大的超调。Bang-Bang 控制理论上可以获得时间最优的无超调阶跃响应^[7],将其与该 PID 控制结构结合在一起,大范围的运动采用 Bang-Bang 控制,在误差较小时采用 PID 控制实现定位,将可以实现大范围无超调的快速纳米定位。

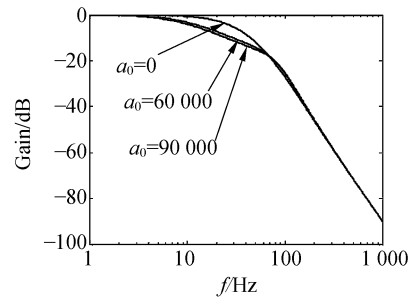


图 12 不同 a_0 值的闭环 Bode 图

Fig. 12 Bode diagram of closed-loop system with different values of a_0

5 结 论

随着滚珠丝杠机构加工装配技术的提高,直流伺服电机和滚珠丝杠的伺服驱动机构具有越来越高的刚度和精度。对于这种驱动机构,摩擦等非线性因素是其获得纳米级定位精度的主要障碍。高增益控制器本质上可以抑制摩擦力的影响,获得一致的响应性能。应用高增益不完全微分、比例反馈 PID 控制器,采用极点配置方法,通过预先设定期望的闭环极点为负实轴上的多重极点来计算控制器的参数,简单易行。实验和仿真结果显示,该控制结构可以有效地抑制摩擦力的影响,在驱动系统的宏动和微动范围内取得一致的响应和纳米精度。只是,由于执行机构饱和与积分饱和的影响,较大尺寸范围的阶跃响应仍存在超调。如果在考虑到执行机构饱和的情况下,将 Bang-Bang 控制与该 PID 控制结构结合在一起,采用两级控制,将有望实现大范围无超调的快速纳米定位。

参考文献:

- [1] 郑子文,李圣怡.滚珠丝杠传动机构的微动特性及轨迹跟踪控制[J].光学精密工程,2001,9(4):360-363.
ZHENG Z W, LI SH Y. Ultra-precision positioning and tracking using ball screw[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 360-363. (in Chinese)
- [2] HSIEH C, PAN Y C. Dynamic behavior and modeling of the pre-sliding static friction[J]. *Wear*, 2000, 242(1):1-17.
- [3] CHEN C L, JANG M J, LIN K C. Modeling and high precision control of a ball-screw-driven stage[J]. *Precision Eng.*, 2004, 28:483-495.
- [4] CHEN J S, CHEN K C, LAI Z C, *et al.*. Friction characterization and compensation of a linear-motor rolling-guide stage[J]. *Intern. J. Mach. Tools Manuf.*, 2003, 43(9): 905-915.
- [5] MAO J H, TACHIKAWA H, SHIMOKOHBE A. Precision positioning of a DC-motor-driven aerostatic slide system[J]. *Precision Eng.*, 2003, 27(1):32-41.
- [6] 陈涛,陈娟,蒋风华.伺服系统两种非线性补偿方法的对比实验[J].光学精密工程,2003,11(1):94-97.
CHEN T, CHEN J, JIANG F H. Two low-speed nonlinear compensations for servo system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 94-97. (in Chinese)
- [7] 张寅孩,张仲超.用 Bang-Bang 控制策略实现快速定位最优系统[J].电力电子技术,2003,31(1):22-24.
ZHANG Y H, ZHANG ZH CH. A high-performance high-speed positioning orientation optimum system with low-cost based on Bang-Bang controller[J]. *Power Electron.*, 2003, 31(1): 22-24. (in Chinese)

作者简介:卢礼华(1977—),男,河南太康人,哈尔滨工业大学在读博士研究生,主要研究方向为超精密位置控制技术。

E-mail: lihual@hit.edu.cn

郭永丰(1963—),男,哈尔滨工业大学教授,主要研究方向为特种加工技术。E-mail: guoyf@hit.edu.cn