

基于 PD 反馈控制的音圈电机直驱式微动台 直线度补偿技术

李 奇

(季华实验室, 广东 佛山 528200)

摘 要: 采用高频响、短行程型音圈电机驱动的微动台结构, 设计挠性弹簧为系统提供足够的刚度, 建立了喷墨打印扫描轴直线度误差补偿系统。分析了音圈电机直驱微动台的数学模型, 研究了该类电机的伺服控制方法, 提出了基于 PD 控制的位置闭环控制器, 增强了系统的抗干扰能力。试验结果表明: 该方法能够满足喷墨打印扫描轴直线度精度要求, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 音圈电机; 微动台; 位置闭环控制; 直线度补偿; 喷墨打印

中图分类号: TH122; TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0059-07

doi: 10.12177/emca.2022.073

Straightness Compensation Technology of Voice Coil Motor Direct-Drive Micro-Motion Positioning Stage Based on PD Feedback Control

LI Qi

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

Abstract: The micro-motion positioning stage structure driven by high frequency response and short stroke voice coil motor is adopted, and the flexible spring is designed to provide sufficient stiffness for the system, and the straightness error compensation system of inkjet printing scanning axis is established. The mathematical model of voice coil motor direct-drive micro-motion positioning stage is analyzed, and the servo control method of this kind of motor is studied, and a position closed-loop controller based on PD control is proposed, which enhance the anti-interference ability of the system. The test results show that this method can meet the requirements of the straightness accuracy of the scanning axis of inkjet printing and has strong robustness.

Key words: voice coil motor; micro-motion positioning stage; position closed-loop control; straightness compensation; inkjet printing

0 引 言

在平板曝光、晶圆光刻、显示面板检测与修复^[1-4]等高精度装备中, 为了保证工件与加工工具之间精确的相对位置关系, 一般采用宏动-微动台技术。音圈电机直接驱动的微动台结构, 具有精度高、响应快、推力大等优点, 广泛应用于半导体精密加工等领域^[5-7]。

关于音圈电机直驱微动伺服系统设计与控制方法, 很多学者做了大量的研究探索。KIM 等^[8]提出一种包含柔性铰链与电涡流阻尼器的纳米定位台。柔性铰链和电涡流阻尼器分别为定位台提供刚度和阻尼, 定位台具有合适的阻尼比, 缩短了调节时间。定位台获得较好的数值和试验结果。KIM 等^[9]介绍了一种用于半导体微纳加工、显示面板检测的精密伺服定位台。该定位台的微动台

收稿日期: 2022-06-15; 收到修改稿日期: 2022-07-10

作者简介: 李 奇(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高精度运动平台、宏动/微运动平台和激光干涉仪实时反馈/测量系统。

采用多个音圈电机驱动,与宏动台之间无机械耦合,定位精度达数十纳米。TSUMURA 等^[10]研究了一种气体静压式轴承-导轨高速定位台,定位台带磁力预加载,具有纳米级定位精度。仇礼钦^[11]介绍了一种由音圈电机和磁悬浮补偿器搭建的 z - R_x - R_y 三自由度定位台,基于音圈电机良好的动态特性,取得了较好的试验结果。王福超等^[12]采用完全控制跟踪方法(PTC)对音圈电机驱动快速反射镜进行控制,有效改善系统的动态性能,拓展控制带宽。邢向^[13]研究了一种基于音圈电机的大行程双自由度快速刀具伺服装置(FTS),建立了整体闭环控制函数,对装置的刚度、阶跃响应等方面进行了分析与测试。

本文采用音圈电机直驱式微动台机构,建立了喷墨打印扫描轴直线度误差补偿系统。设计了结构紧凑的挠性弹簧,为微动台提供足够的刚度。分析了基于音圈电机的直线度误差补偿系统的数学模型,并根据该系统的机械结构及其控制要求,设计了位置反馈控制器。为满足系统的响应时间和超调量要求,提出基于 PD 控制的位置闭环控制器,引入虚拟刚度和虚拟阻尼,大幅缩短了响应时间和超调量。本文提出的直线度补偿方法,有效地提高了系统的打印精度。

1 喷墨打印宏动-微动台系统构成

本文以精密运动控制为核心,建立了基于喷墨打印的宏动-微动台系统,如图 1 所示,该系统可对扫描主轴进行直线度误差补偿。具体工作原理:在喷印运动平台上,宏动台沿扫描主轴做往复直线运动,微动台安装在宏动台上,微动台上的吸盘能够稳定地保持住工件(玻璃基板)。喷头固定在喷头模组上,喷头模组沿步进主轴做点到点直线运动。扫描主轴和步进主轴都由直线电机驱动。受限于导轨加工精度,扫描主轴存在几何误差,其中水平直线度误差是影响打印精度的主要因素,扫描主轴长度超过 3 米,水平直线度误差达数十微米。要完成高精度喷墨打印,必须通过微动台进行误差补偿。

喷墨打印过程如图 2 所示,喷头模组沿步进主轴移动到指定位置,宏动-微动台在扫描主轴上往复运动,在此过程中,喷头模组中的喷嘴将墨滴准确地喷射到相应的子像素槽中。

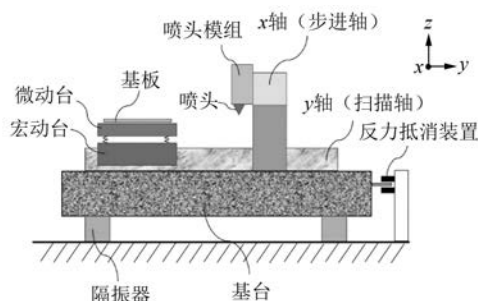


图1 喷墨打印宏动-微动台系统

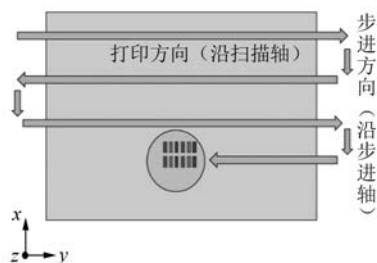


图2 步进-扫描喷墨打印过程示意图

宏动-微动台音圈电机布局如图 3 所示,音圈电机定子安装在宏动台底板上,音圈电机转子连接传动机构,传动机构完成多自由度解耦。通过对应的正逆运动学公式,4 个音圈电机可实现微动台 x - y - z 3 个自由度微小运动。具体方法: y 轴音圈电机同向平移,控制微动台沿 y 轴方向运动; x 轴音圈电机同向平移,控制微动台沿 x 轴方向运动; x 轴或 y 轴音圈电机异向平移,控制微动台绕 z 轴旋转运动。

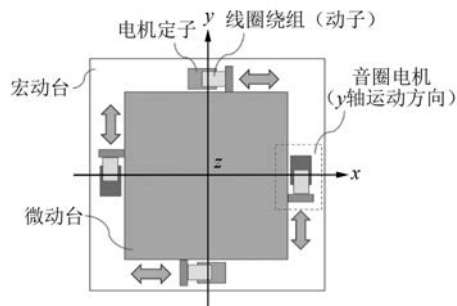


图3 宏动-微动台音圈电机布局图

2 音圈电机直驱式微动台及数学模型

2.1 音圈电机基本原理及结构

音圈电机是一种特殊形式的直接驱动电机,如图 4 所示,结构与扬声器类似^[14]。其工作原理

为:通电线圈(导体)在磁场中会产生力,力的大小与施加在线圈上的电流成比例。基于此原理制造的音圈电机运动形式可以为直线或者圆弧。

电磁力方程:

$$F_e = BLNi = k_e i \quad (1)$$

电机力常数:

$$k_e = BLN \quad (2)$$

音圈电机线圈绕组存在反电动势,大小为

$$e = k_b Blv = k_b Bl \frac{dx}{dt} = k_E \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中: N 为线圈匝数; l 为每匝线圈导体处在磁场中的平均有效长度; B 为线圈所在空间的磁感应强度; i 为线圈导体中的电流; k_b 为反电动势系数; k_E 为反电动势常数。

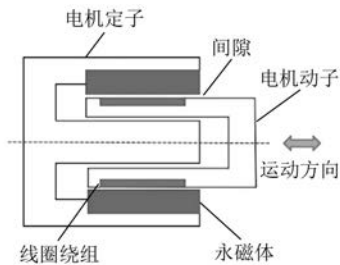


图4 音圈电机结构

如图5所示,设音圈电机线圈绕组端施加电压为 u ,线圈电阻为 R ,电感为 L ,线圈回路的动态电压平衡方程为

$$u = e + iR + L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

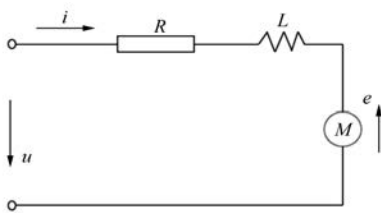


图5 音圈电机等效电路图

2.2 直驱式微动台受力分析

直驱式微动台结构如图6所示,音圈电机定子固定在宏动台,动子与微动台固连,微动台和宏动台之间装有精密直线导轨。为简化模型,只对一个音圈电机及相应负载进行受力分析,如图7所示。音圈电机为微动台提供电磁推力 F_e ,微动台与宏动台做相对直线运动。运动过程中,微动台受到摩擦力 f 、速度阻尼力 F_d 、弹簧弹力 F_k 、外

部扰动力 f_d 。

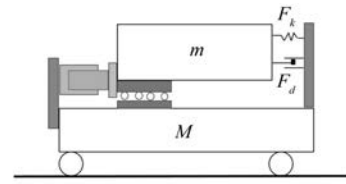


图6 微动台结构简图

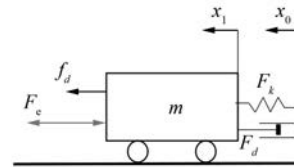


图7 质量-阻尼-弹簧微动台系统

微动台力平衡方程:

$$F = F_e + f_d - f - F_d - F_k \quad (5)$$

根据牛顿第二定律:

$$F = ma \quad (6)$$

微动台加速度:

$$a = \ddot{x} \quad (7)$$

式(5)中摩擦力 f 为干摩擦力,可认为是一个恒定值。 F_d 为黏性摩擦力,与微动台速度成正比:

$$F_d = d\dot{x} \quad (8)$$

式中: d 为速度阻尼系数。

精密直线导轨的干摩擦力与黏性摩擦力相比非常小,可忽略不计,外扰力暂不考虑。弹簧弹力也是微动台运动的阻力,表达式为

$$F_k = kx \quad (9)$$

式中: k 为挠性弹簧弹力系数。

将式(6)~式(9)代入式(5),得到:

$$F_e = m\ddot{x} + d\dot{x} + kx \quad (10)$$

2.3 微动台数学模型

根据微动台的受力分析,联立式(1)、式(4)、式(10),构成微动台运动方程组:

$$\begin{cases} u = e + iR + L \frac{di}{dt} \\ F_e = k_e i \\ F_e = m\ddot{x} + d\dot{x} + kx \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可得到微动台位移输出 x 与音圈电机电压输入的微分方程:

$$u = \frac{Lm}{k_e} \frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{Ld + Rm}{k_e} \right) \frac{dx}{dt} +$$

$$\left(\frac{Lk + Rd}{k_e} + k_e \right) \frac{dx}{dt} + \frac{kR}{k_e} x \quad (12)$$

由式(12)可得微动台位移输出 x 与音圈电机电压输入 u 之间的传递函数:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{k_e}{(ms^2 + ds + k)(\tau_1 s + 1)R + k_e k_e s} \quad (13)$$

式中: $\tau_1 = \frac{L}{R}$, 为线圈回路的电气时间常数。

可得到微动台位移 x 与音圈电机推力 F_e 之间的传递函数:

$$P(s) = \frac{X(s)}{F_e(s)} = \frac{1}{ms^2 + ds + k} \quad (14)$$

3 微动台系统设计

3.1 音圈电机与精密直线导轨选型

微动台系统音圈电机采用雅科贝思 AVM100-HF-10, 具体参数如表 1 所示。精密直线导轨选择 THK VR1-20Px5Z 交叉滚柱导轨, P 级精度, 最大行程 12 mm。精度曲线如图 8 所示, 可见 100 mm 行程内, 导轨平行度在 2 μm 以内。

表 1 音圈电机主要参数

参数名称	参数值
行程 s/mm	10
持续推力 @ 100 $^{\circ}\text{C}$ F_c/N	192.5
峰值推力 F_{pk}/N	770
力常数 $\pm 10\% k_e / (\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	55.0
反电动势常数 $\pm 10\% k_E / (\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2})$	55.0
电机常数 @ 25 $^{\circ}\text{C}$ $k_m / (\text{N} \cdot \text{Sqrt}^{-1} \cdot \text{W}^{-1})$	29.85
电阻 @ 25 $^{\circ}\text{C}$ $\pm 10\% R_c / \Omega$	3.40
电感 $\pm 20\% L_c / \text{mH}$	4.43
电气时间常数 T_1 / ms	1.30
持续电流 @ 100 $^{\circ}\text{C}$ i_c / A	3.5
峰值电流 i_p / A	14
最高电压 $u_{\max} / \text{V}$	120

3.2 挠性弹簧的设计

为了让微动台具有较好的动态特性, 需要引入一个弹簧来增加系统刚度。由式(15)可知, 直驱式微动台为典型的二阶质量-阻尼-弹簧系统。系统固有频率为

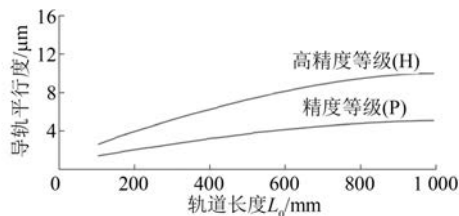


图 8 THK VR 系统导轨精度曲线

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (15)$$

根据胡克定律, 弹簧最大变形力:

$$F_{k_{\max}} = k \Delta x \quad (16)$$

微动台质量 $m = 100 \text{ kg}$, 设定微动台响应频率 $f_n \geq 5 \text{ Hz}$, 代入式(11)得到弹簧刚度 $k \geq 9.86 \times 10^4 \text{ N/m}$, 弹簧刚度 k 取 10^5 N/m 。微动台沿 xy 方向行程为 $\pm 1 \text{ mm}$, 因此弹簧最大变形力为 $\pm 100 \text{ N}$ 。微动台的速度阻尼力和摩擦力可忽略不计。由表 1 可知, 音圈电机持续推力大于弹簧最大变形力, 微动台能够运动。

考虑到微动台空间比较紧凑, 设计一种与宏动台-微动台相适应的挠性弹簧。挠性弹簧的安装位置如图 9 所示, 挠性弹簧的两端分别固定在宏动台和微动台上, 需提供 x 和 z 两个刚度相等的自由度。为便于设计与分析, 采用板簧来设计挠性弹簧。具体结构如图 10 所示。板簧材料为弹簧钢 60Si2Mn, 弹性模量 $E = 206 \text{ GPa}$ 。

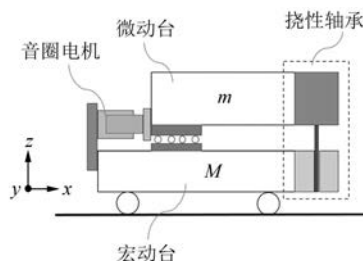


图 9 挠性弹簧的安装位置

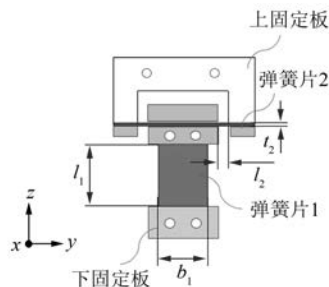


图 10 挠性弹簧结构

对挠性弹簧进行受力分析,如图 11 所示,设弹簧高度-厚度比 L_0/t 大于 5。在外力 P 作用下,挠性弹簧微小变形满足欧拉伯努利梁变形公式:

$$\delta = \frac{PL_0^3}{3EI} \quad (17)$$

挠性弹簧截面矩:

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (18)$$

式中: b 、 t 分别为挠性弹簧宽度和厚度。

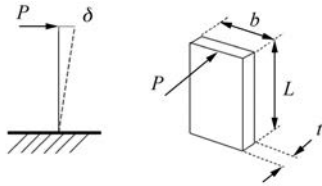


图 11 挠性弹簧受力图

由式(17)、式(18)得到弹簧刚度:

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{E}{4} b \left(\frac{t}{L_0} \right)^3 \quad (19)$$

根据式(19)得到弹簧 x 轴刚度与 z 轴刚度:

$$k_x = k_1 = \frac{E}{4} b_1 \left(\frac{t_1}{L_1} \right)^3 \quad (20)$$

$$k_z = 2k_2 = 2 \frac{E}{4} b_2 \left(\frac{t_2}{L_2} \right)^3 \quad (21)$$

式中: b_1 、 b_2 、 t_1 、 t_2 、 L_1 、 L_2 分别为弹簧片 1、2 的宽度和高度。

表 2 为挠性弹簧的具体参数,代入表 2 的数据,得到 $k_x = k_z = 1.09 \times 10^5$ N/m。

表 2 挠性弹簧具体参数

弹簧片	弹性模量 E/GPa	厚度 t/mm	宽度 b/mm	高度 L_0/mm
弹簧片 1	206	0.45	20	9.5
弹簧片 2	206	0.45	10	9.5

4 微动台 PD 控制方法与仿真分析

4.1 PD 控制系统设计

建立基于 PD 控制的位置闭环控制系统,如图 12 所示。其中, r 、 x_{out} 、 H 、 F_r 分别表示位置环输入、位置环输出、位置反馈信号和外部扰动力。 k_e 、 k_E 、 L_c 、 R_c 分别表示音圈电机力常数、反电动势常数、电感和电阻。 k_p 、 k_d 表示 PD 控制器的比例、微分参数。

不考虑外扰力,则位置闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{X(s)}{R(s)} = \frac{k_e(k_D s + k_P)}{(ms^2 + k)(L_c s + R_c) + k_e k_E s + k_e(k_D s + k_P)} \quad (22)$$

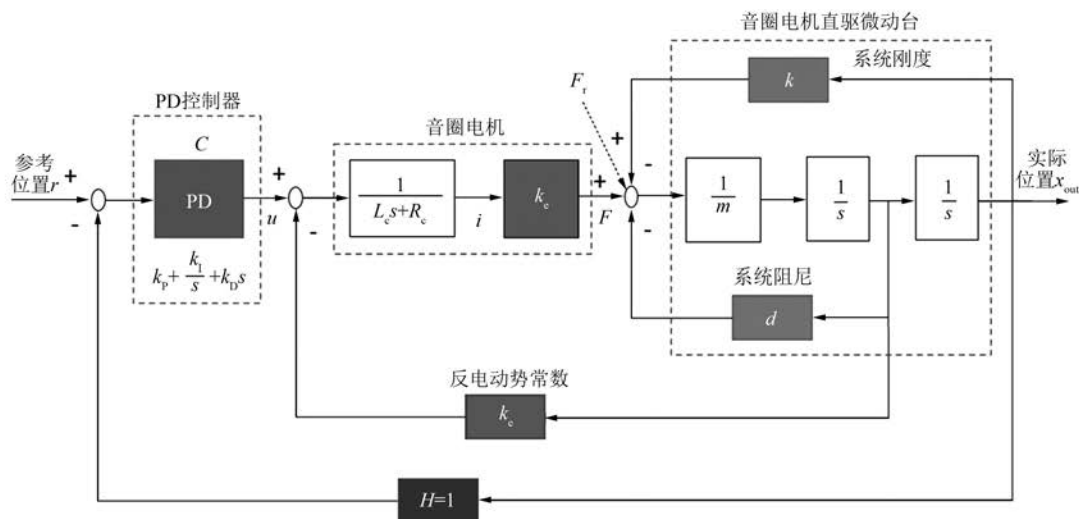


图 12 微动台位置闭环控制框图

表1中音圈电机电感 $L_c = 4.43$ mH, 可认为 L_c 趋近于0, 传递函数变为

$$G(s) = \frac{\frac{k_e}{R_c}(k_D s + k_P)}{ms^2 + \frac{k_e}{R_c}(k_E + k_D)s + \left(\frac{k_e}{R_c}k_P + k\right)} \quad (23)$$

按表1数据, $\frac{k_e}{R_c} = 16.2$ 。

在式(24)、式(25)中, 分别定义 d_v 、 k_v , 前者决定系统阻尼, 后者决定系统刚度。

$$d_v = \frac{k_e}{R_c}(k_E + k_D) \quad (24)$$

$$k_v = \frac{k_e}{R_c}k_P + k \quad (25)$$

由式(23)可知, 系统阻尼由音圈电机反电动势常数 k_E 和PD微分常数 k_D 决定, 系统刚度取决于PD比例常数 k_P 和弹簧刚度 k 。 d_v 、 k_v 分别为系统虚拟阻尼和虚拟刚度。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, d = 2\zeta m \omega_n \quad (26)$$

式中: ω_n 、 ζ 分别为系统固有频率和阻尼系数。

让系统达到最佳阻尼状态, 取 $\zeta = 0.7$, $d_v = 4\,340$ N·s/m。代入式(24), 求得 K_D 约为212。

式(25)中, 因 k 值较大, k_P 可在 $1 \sim 8\,000$ 以内取值。

4.2 PD控制仿真与分析

微动台为开环控制, 位移输出与音圈电机推力输入满足传递函数式(14), 系统固有频率由微动台质量和弹簧刚度决定。采用PD反馈控制, 表3为微动台PD控制参数, 测试1至测试4输入为参考位置阶跃。

表3 微动台PD控制参数

参数	m/kg	$k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$d/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	k_D	k_P	ω_n
测试1	100	1.0×10^{-5}	891	212	4\,240	17.6
测试2	100	1.0×10^{-5}	891	20	20	31.6
测试3	100	1.0×10^{-6}	891	20	20	100
测试4	100	1.0×10^{-6}	891	212	6\,360	100

图13为对应的响应输出曲线。在测试1中 k_D 赋值212, 以此保证系统达到最佳阻尼状态, k_P 取值为 k_D 大小的20倍, 使系统超调量约为28%, 调节时间约为0.3 s。在测试2中, 弹簧刚度保持不变, k_D 与 k_P 赋值20, k_D 较小, 系统处于欠阻尼状态, 调节过程中会出现振荡, 超调量过大。在测试3中, 弹簧刚度增大, k_D 与 k_P 仍赋值20, 系统响应频率增大, 但仍处于欠阻尼状态, 调节过程中出现振荡, 超调量过大。测试4中弹簧刚度保持不变, 阻尼系数有所增加, 系统调节时间约为0.3 s, 但调节过程中超调量过大。通过试验对比, 发现测试1中的参数可以使闭环反馈系统有较好的响应结果。

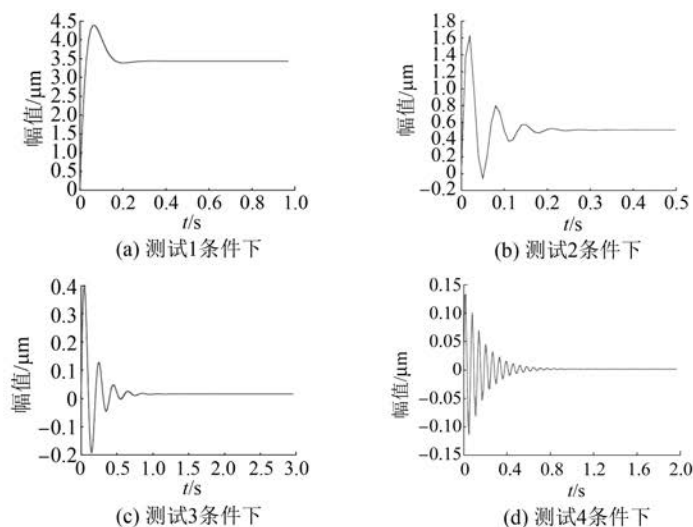


图13 不同测试条件下反馈对应位移阶跃输入的响应

5 结 语

基于音圈电机直驱的微动台系统,设计一种挠性弹簧,为系统提供外部刚度。挠性弹簧无需解耦即可实现 x 和 z 两个自由度精密运动。微动台采用 PD 位置闭环反馈伺服控制,仿真分析了系统在不同刚度、阻尼以及 PD 参数下的动态响应。仿真测试结果表明,微动台在参考位移阶跃输入下,超调量低于 30%,在 $1\ \mu\text{m}$ 以内,调节时间小于 0.3 s。系统能够实现喷墨打印的扫描主轴直线度误差补偿。

【参考文献】

- [1] SAKATA K, ASAUMI H, HIRACHI K, et al. Self resonance cancellation techniques for a two-mass system and its application to a large-scale stage[J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2014, 3(6): 455.
- [2] TOMITA Y, KOJIMA E, KAWACHI S, et al. Development and applications of sumitomo precision stage technologies for FPD process[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2012, 78(2): 117.
- [3] BUTLER H. Position control in lithographic equipment an enabler for current-day chip manufacturing[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2011, 31(5): 28.
- [4] KIM K, CHOI Y M, GWEON D G, et al. A novel laser micro/nano-machining system for FPD process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3): 497.
- [5] MA Z P, ZHAO X Y, WANG F J, et al. Design of a direct-drive XY table system: electromechanical and dynamic optimization [J]. Materials Science Forum, 2011, 697: 813.
- [6] 冯晓梅, 张大卫, 赵兴玉, 等. 基于音圈电机的新型高速精密定位系统设计方法[J]. 中国机械工程, 2005(16): 1414.
- [7] CHEN W, LIAO Y Y. Driving means to position a load: US 6983703 B2[P]. 2006.
- [8] KIM Y, SOHN B, YOUM W, et al. Voice coil motor nano stage with an eddy current damper [C] //2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008.
- [9] KIM K, CHOI Y M, NAM B U, et al. Dual servo stage without mechanical coupling for process of manufacture and inspection of flat panel displays via modular design approach[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13: 407.
- [10] TSUMURA T, YOSHIOKA H, SHINNO H, et al. Magnetically preloaded aerostatic guideway for high speed nanometer positioning [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2014, 8(4): JAMDSM0054.
- [11] 仇礼钦. 三自由度磁悬浮位姿调节机构设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [12] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1997.
- [13] 邢向. 双自由度大行程 FTS 装置的研制及性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [14] 兴连国, 周惠兴, 侯书林, 等. 音圈电机研究及应用综述[J]. 微电机, 2011, 44(8): 82.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部