

文章编号 1004-924X(2005)02-0171-08

一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制

节德刚, 刘延杰, 孙立宁, 孙绍云, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出一种宏微双重驱动精密定位机构,采用高性能直线电机直接驱动宏动平台,实现系统大行程微米级精度定位;安装在宏动平台上的压电陶瓷驱动微动平台,实现纳米级的分辨率和定位精度,以高频响动态补偿系统的定位误差;采用精密光栅尺反馈微动平台输出端的位置信号,实现定位机构的全闭环反馈控制。在分别建立宏动、微动、宏微机构模型的基础上,提出复合型宏动控制和模糊自校正PID微动控制的宏微控制策略。实验研究表明:系统的动态和稳态性能良好,该定位机构的最大工作行程100 mm,稳定时间小于40 ms,重复定位精度10 nm。

关键词:宏微双重驱动;精密定位;建模;控制策略

中图分类号:TP242 文献标识码:A

Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism

JIE De-gang, LIU Yan-jie, SUN Li-ning, SUN Shao-yun, CAI He-gao

(*Robot Research Institute of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: A macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism is presented. Combining macro with micro actuator, a system with large workspace and high resolution of motion was developed. The direct-drive motor is used in the macro motion, and PZT-driven micro stage with high frequency is mounted on the motor and compensates the position error. A high-resolution linear encoder is integrated into the closed-loop feedback, which is used to measure the position of the end-effector mounted in the micro stage. The feedforward and feedback are combined to control the macro stage, and the fuzzy-adaptive PID control algorithm is employed in the micro stage. The experimental results show that the travel range is 100 mm, the settling time is less than 40 ms and the repeatability error is 10 nm.

Key words: macro-micro dual-drive; ultra-precision positioning; modeling; control algorithm

1 引言

由于 MEMS(微机电系统)、生物医学工程、精密光学工程和超精密加工等领域的快速发展,迫切需要能够在亚微米级,甚至在纳米级精度上进行精密定位的系统及装备,各种大行程精密定位系统应运而生^[1-3]。在上世纪 80 年代中后期,国内外学者相继提出了宏微双重驱动技术^[4-6],目前它是实现大行程、高精度定位的一种有效手段。本文针对自行研制的一种宏微双重驱动精密定位机构进行建模和控制方法研究。该系统采用直线电机、压电陶瓷双重驱动和精密光栅尺作为全闭环位置反馈元件,兼备直线电机可大行程运动和压电陶瓷响应快、位移分辨率高等优点。采用高性能直线电机直接驱动作为宏动部分,避免了大多数双重驱动机构的宏动单元由滚珠丝杆(齿轮、齿条)传动的反向间隙、惯性和刚度不足等缺点,完成系统大行程的微米级定位;安装在宏动部件上的压电陶瓷微驱动器以高频响动态补偿系统的定位误差,可实现纳米级的分辨率和定位精度,与传统静态补偿相比缩短了系统的稳定时间。

对系统动力学模型分析发现,直线电机的负载波动较剧烈,同时压电陶瓷也存在着迟滞、蠕变和位移非线性等不足^[7-8],这些都严重影响了系统的动态和稳态性能。针对系统的特点,本文设计了前馈补偿和反馈控制相结合的复合型宏动控制器,模糊自校正 PID 的微动控制器。实验研究表明系统的动态和稳态性能良好,验证了宏微双重驱动机构实现大行程、高精度定位的有效性和优势。

2 系统建模与分析

2.1 宏动系统建模

系统的宏动部分采用永磁交流同步直

线电机,与旋转电机加减速结构相比,它是无接触直接驱动,即“零传动”,取消了从电机到工作台的中间传动环节,把工作台进给传动链的长度缩短为零^[9];此外还具有启动推力大,响应快、速度高,精度高等一系列优点。但由于推力波动、摩擦和负载扰动等非线性因素影响,控制比较复杂,成本高^[10]。

采用矢量控制技术,当仅考虑基波分量时,基于 $d-q$ 轴模型的直线电机的电磁推力为^[11]:

$$F = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM} i_q = K_{tm} i_q, \quad (1)$$

式中, λ_{PM} 为定子永磁体产生的励磁磁链, τ 为极距, K_{tm} 为电磁推力系数, i_q 为 q 轴定子电流。

由于直线电机自身结构的特点,工作时受到的扰动是非常复杂的。

推力波动主要是由直线电机的端部效应、齿槽效应、纹波效应及其他非线性因素引起的,其数学描述为:

$$F_l = F_{lm} \cos(ax + \theta), \quad (2)$$

式中, F_l 为推力波动, F_{lm} 为推力波动幅值, x 为电机运动部分沿运动方向的位移; a, θ 是与电机电磁结构有关的常数。

摩擦力分为动静和粘滞摩擦力三部分。动摩擦力、粘滞摩擦力存在于物体运动速度不为零时,方向与物体运动方向相反;动摩擦力的幅值不变,大小与两物体之间的正压力成正比,粘滞摩擦力的幅值与运动速度成正比;静摩擦力阻碍物体的初始运动,方向和外加驱动力方向相反,在电机低速运行时,随着速度的增大,静摩擦力由最大值 F_{rsmax} 按照指数形式下降到滑动摩擦力 F_{rd} 。比较精确的摩擦力模型为:

$$F_r = \begin{cases} -(F_{rd} + \Delta F_r e^{-c|v|}) \operatorname{sgn}(v) - Bv (v \neq 0) \\ -F_e & (v = 0, |F_e| \leq F_{rsmax}) \\ -F_{rsmax} \operatorname{sgn}(F_e) & (v = 0, |F_e| > F_{rsmax}) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, F_{rd} 为滑动摩擦力幅值, ΔF_r 为最大静摩擦力幅值 F_{rsmax} 和 F_{rd} 之差, v 为物体的运动速度, B 为粘滞摩擦系数, sgn 为符号函数, c 为与润滑等运动条件有关的常数, F_e 为外力。

由于直线电机直接驱动的特点, 使得负载推力及其他扰动直接作用到电机上, 对电机性能的影响较大。对这些因素进行实时测量计算是非常困难的甚至是不可能的。所以在设计控制系统时将它们都看成是电机所受的外部扰动。

如图 1 所示, 永磁交流同步直线电机的模型可以描述为:

$$K_{tm} i_q = ms^2 x + F_d = ms^2 x + F_r + F_l + F_t + \Delta F, \quad (4)$$

式中, F_d 为总的扰动力, F_r 为电机所受到的摩擦力, F_l 为电机所受负载推力, ΔF 由不可测参数摄动引起的推力扰动, s 为拉氏微分算子, m 为动子及负载质量和。

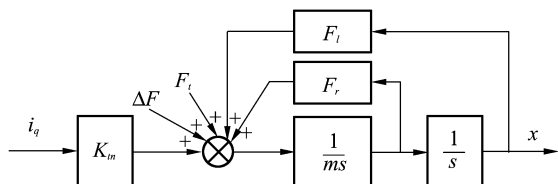


图 1 永磁交流同步直线电机模型方块图
Fig. 1 Block diagram of PMLSM

2.2 微动系统建模

当压电晶体置于外电场中, 由于电场的作用, 晶体会发生变形, 形变的大小和外电场强的大小成正比, 这种由于电场的作用而使压电晶体发生形变的现象称为逆压电效应, 可描述为:

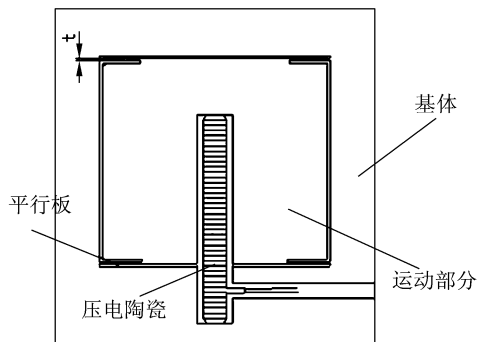
$$X = x^E T + dE, \quad (5)$$

式中, X 为应变, x^E 为弹性常数, T 为应力, d 为压电常数, E 为电场强度。

利用压电陶瓷的逆压电效应可产生微位移。压电陶瓷在电压控制下可获得纳米级分辨率, 其频率响应高、承载大、有良好

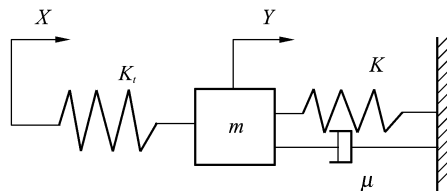
的机械静压力特性, 且结构简单及受外力干扰小等优点。

压电陶瓷直线驱动双层弹性平行板机构的微动机器人动力学模型如图 2 所示。



(a) 结构简图

(a) Structure diagram



(b) 动力学模型

(b) Dynamic model

图 2 直线驱动微动机器人结构及动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of the translation driven micro-robot

设 K_t 为传动部件的刚度, K 为平行板移动副的刚度, m 为运动部分的质量, μ 为系统的阻尼系数。当输入位移为 x 时, 驱动器的输出位移为 y , 则质量—弹簧—阻尼二阶系统的力平衡方程为:

$$m \ddot{y} + \mu \dot{y} + (K_t + K) y = K_t x, \quad (6)$$

系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_x \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}, \quad (7)$$

式中,

$$K_x = \frac{K_t}{K + K_t}$$

系统无阻尼自振频率:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K + K_t}{m}}, \quad (8)$$

阻尼比:

$$\xi = \frac{\mu}{2m\omega_n}, \quad (9)$$

因为弹性平行板的阻尼力很小,根据传递函数 $G(s)$, 可以求出微定位工作台系统的阶跃输出位移 $Y(t)$:

$$Y(t) = \frac{K_t X}{K + K_t} \times \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right], \quad (10)$$

式中,有阻尼自振频率:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$$

系统达到稳态后,微动系统的输出位移为:

$$Y = \frac{K_t}{K + K_t} X, \quad (11)$$

2.3 双重驱动系统动力学建模

宏微系统动力学模型如图 3 所示,由牛顿运动定律建立系统动力学方程:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 + \dot{x}_2) + k_2 (x_1 - x_2) = F_1 - F_2, \quad (12)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = F_2. \quad (13)$$

式中, m_1 为电机动子和微动台固定部分的质量和, m_2 为微动台运动部分质量。 c_1, c_2 分别为宏动和微动部分的阻尼系数, k_2 为微动工作台的弹性系数, 广义力 F_1, F_2 分别为直线电机和压电陶瓷的驱动力, 广义坐标 x_1, x_2 分别为宏动和宏微结合系统的位移。

式(12)和(13)中

$$F_1 = K_{in} i_q - \Delta F_1 = K_1 U_1 - \Delta F_1, \quad (14)$$

$$F_2 = K_2 U_2 + \Delta F_2. \quad (15)$$

式中, U_1, U_2 分别为直线电机和压电陶瓷的驱动电压, K_1, K_2 分别为与电机和微定

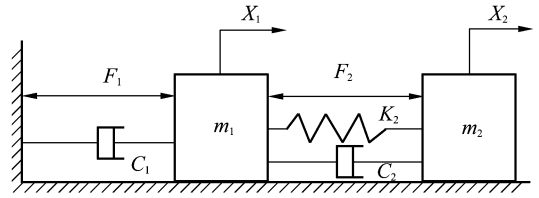


图 3 双重驱动系统动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of the dual-drive system

位系统有关的系数, ΔF_1 为电机受到的总扰动力, ΔF_2 为微动台预紧引起的力。

宏微系统模型的矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_2 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

简写为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\}, \quad (17)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。 $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{F\}$ 分别为系统的广义位移向量、广义速度向量、广义加速度向量和广义力向量。

3 控制系统设计

本文设计的双重驱动控制系统结构如图 4 所示。控制系统包括相对独立工作的宏动和微动两部分, 其中宏动系统由永磁交流直线伺服电动机及其驱动器、编码器和伺服运动控制卡组成; 微动系统由压电陶瓷驱动微位移工作台, 压电陶瓷驱动电源, 精密光栅尺和 PC 机组成。

基于宏微控制策略, 系统工作原理如下: 由主控计算机通过双端口 RAM 向伺服运动控制器下达目标运动信息(位移、速度、加速度), 宏动控制器按照预定的伺服算法控制末端进入压电陶瓷微动工作台补偿的 $\pm 10 \mu\text{m}$ 范围内, 此时主控计算机将目标位置与精密光栅尺反馈信号的差值作

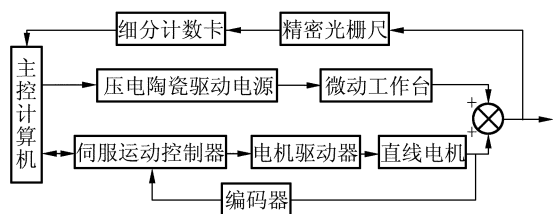


图 4 双重驱动控制系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of the dual-drive control system

为输入启动微动系统，并按照规定算法由微动控制器以高频响动态的补偿系统的定位误差达到±10 nm 的定位精度。

通过对系统动力学模型分析发现，直线电机的负载波动较剧烈；同时压电陶瓷也存在着迟滞、蠕变和位移非线性等不足，这些都严重影响了系统的动态和稳态性能。针对系统的特点，设计了前馈补偿和反馈控制相结合的复合型宏动控制器，模糊自校正 PID 的微动控制器。

宏动控制系统如图 5 所示，将前馈控制和反馈控制相结合构成复合型控制器，提高系统复现控制信号的精度；同时采用速度反馈抑制由负载扰动引起的速度波动，保证系统鲁棒稳定。

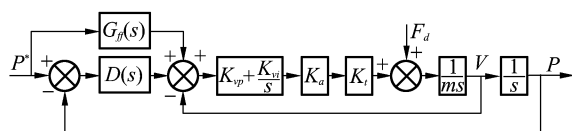


图 5 宏动复合型控制器方块图

Fig. 5 Block diagram of the macro compound controller

其中， P^* 、 P 分别为指令输入和位移输出， $D(s)$ 为位置控制器， $G_{ff}(s)$ 为前馈控制器， K_{vp} 、 K_{vi} 分别为速度控制器的比例和积分增益， K_a 为驱动器放大倍数， K_i 为电磁推力系数， F_d 为系统总扰动力。

微动控制系统如图 6 所示，将模糊控制和 PID 控制相结合，根据各自的特点设计了模糊推理自校正 PID 控制器，该控制

器通过模糊推理来实现控制器参数的实时优化，实现自适应控制，且算法实现简单。

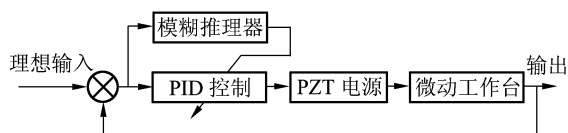


图 6 微动系统模糊自校正 PID 控制器方块图

Fig. 6 Block diagram of the micro fuzzy-adaptive PID controller

本控制系统中模糊推理机的结构如图 7 所示，该模糊自调整 PID 控制器的表达式为：

“If (e is ...) and (Δe is...) Then (k_p is ...) (k_i is ...) (k_d is ...)”

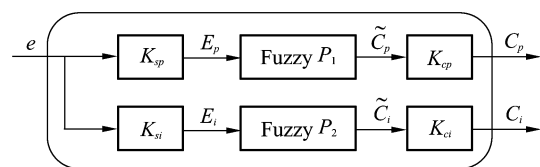


图 7 模糊推理结构图

Fig. 7 Structure diagram of the fuzzy-reasoning controller

其中， e 、 Δe 分别为系统误差， k_p 、 k_i 、 k_d 分别为控制器比例、积分和微分系数， K_{sp} 、 K_{si} 为模糊量化因子， P_1 、 P_2 分别为比例和积分修正系数推理器， \tilde{C}_p 、 \tilde{C}_i 为修正量， k_{cp} 、 k_{ci} 为比例因子， C_p 、 C_i 分别为比例和积分系数调整量。

4 实验研究与系统测试

实验系统的构成如图 8 所示，由 5 部分组成：上位监控计算机、运动控制卡、直线电机及其驱动器、压电陶瓷驱动的微动工作台及其驱动器和精密光栅尺。本研究中采用日本 YOKOGAWA 公司 LM_TM 系列永磁交流直线伺服电机，该电机内置

分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 的直线编码器,速度信号通过位置差分获得;采用德国 PI 公司 P-830 系列压电陶瓷,其电源为哈工大博实精密测控公司研制的 HPV 系列压电陶瓷电源;采用德国 HEIDENHAIN 公司的 LIP401 型精密直线光栅作为全闭环位置反馈,细分分辨率为 5 nm ;实时控制的采样周期为 0.5 ms 。

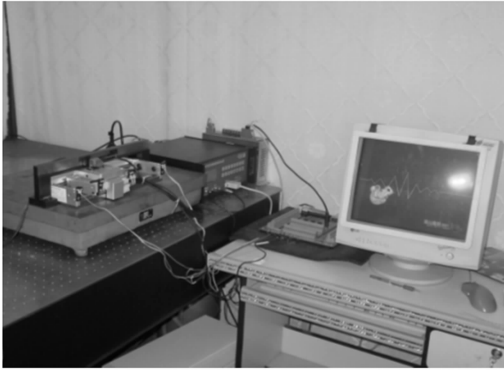
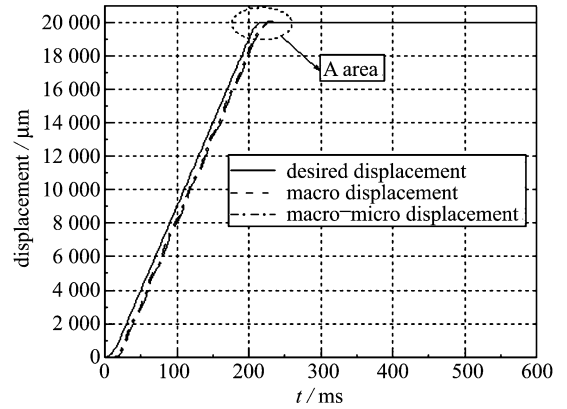


图 8 实验系统构成

Fig. 8 A photo of experimental system

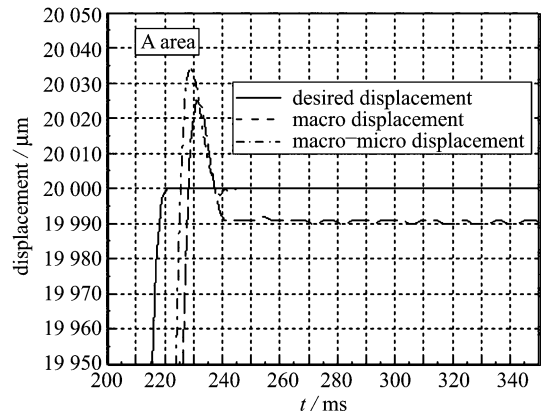
在恒温、隔振的环境下,进行系统实验研究。采用 $v=0.1 \text{ m/s}$, $a=5 \text{ m/s}^2$ 作为基准速度和基准加速度,额定负载为 0.5 kg 。图 9、图 10 分别为行程 20 mm 和 100 mm 的系统理想位移、宏动位移和宏微结合位移的响应曲线,可见动态响应曲线无超调,电机进入 $\pm 10 \mu\text{m}$ 稳定域的定位时间小于 30 ms ,宏微系统进入 $\pm 10 \text{ nm}$ 稳定域的定位时间小于 40 ms (从宏动机器人位姿到达 $\pm 10 \mu\text{m}$ 瞬间到系统位姿达到 $\pm 10 \text{ nm}$ 偏差之内的瞬时为止所经历的时间)。基于宏微双重直接驱动技术的精密定位机器人系统控制获得了满意的效果。

根据 GB12645-90 工业机器人性能测试标准,在 100 mm 的工作空间设置 5 个测试点,在基准速度、基准加速度和额定负载下,对各点位姿重复性进行测试,根据 GB/T12462-90 所规定的公式对 30 次测量数据



(a)位移曲线

(a) Displacement curve



(b)A 区域放大

(b) Magnifying curve of A area

图 9 0~20 mm 宏微系统动态响应曲线

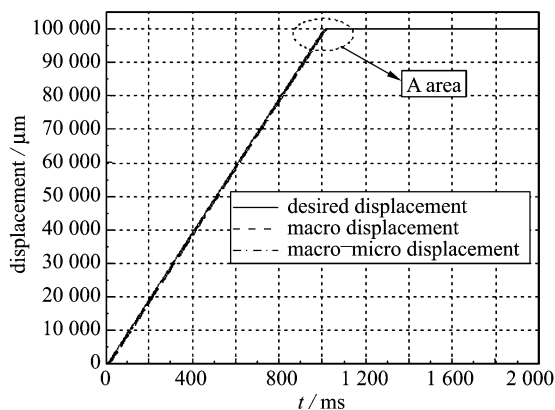
Fig. 9 0~20mm dynamic response curve of macro-micro system

进行计算,得到各点重复定位精度如表 1 所示;并对各点位姿稳定时间进行测试,重复测量 3 次后取平均值,各点宏动系统进入 $\pm 10 \mu\text{m}$ 稳定域的稳定时间和宏微系统进入 $\pm 10 \text{ nm}$ 稳定域的稳定时间如表 2 所示。

表 1 位姿重复性

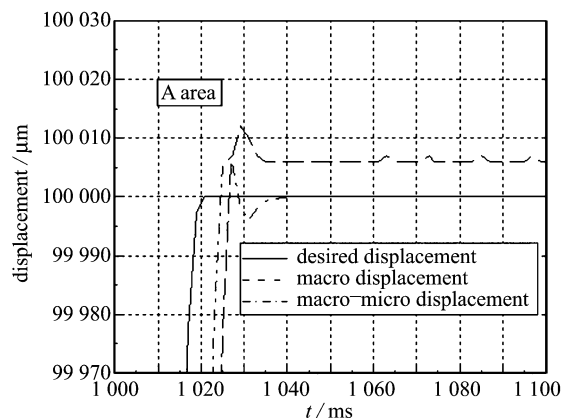
Tab. 1 Result of repeating position precision

负载	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0.5 kg	9.58	9.7	9.85	9.82	9.8



(a)位移曲线

(a)Displacement curve



(b)A 区域放大

(b)Magnifying curve of A area

图 10 0~100 mm 宏微系统动态响应曲线

Fig. 10 0~100 mm dynamic response curve of macro-micro system

表 2 位姿稳定时间

Tab. 2 Result of settling time

测试点	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
宏动系统 稳定时间	20.3	18.3	15.3	15.7	15.3
宏微系统 稳定时间	38	32.7	35.3	34	30

由表 1、2 可知，系统重复定位精度 10 nm；稳定时间小于 40 ms。

5 结 论

本文针对自行研制的一种宏微双重驱动精密定位机构进行建模和控制方法研究。该系统采用直线电机、压电陶瓷双重驱动和精密光栅尺全闭环位置反馈，兼备直线电机可大行程运动和压电陶瓷响应快、位移分辨率高等优点。对系统动力学模型分析发现直线电机力矩波动较剧烈，同时压电陶瓷存在迟滞、蠕变和位移非线性等不足的特点。本文设计了前馈补偿和反馈控制相结合的复合型宏动控制器，模糊自校正 PID 的微动控制器。基于宏微控制策略，进行了系统的实验研究。结果表明：系统的动态和稳态性能良好，该实验系统的工作行程 100 mm，稳定时间小于 40 ms，重复定位精度 10 nm。

参考文献：

[1] SANGJOO K, WAN K C, YOUNGIL Y. On the coarse/fine dual-stage manipulators with perturbation compensator[C]. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea, May, 2001:121-126.

[2] CANNON D W, MAGEE D P, BOOK W J, et al. Experimental study on micro/macro manipulator vibration control[C]. *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Minneapolis, Minnesota, April, 1996:2549-2554.

[3] KWON S J, CHUNG W K. Robust and time-optimal control strategy for coarse/fine dual-stage manipulators[C]. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, CA, April, 2000:4051-4056.

[4] HEUI J P, DONG S L, JONG H P. Ultra precision positioning system for servo motor-piezo ac-

- tuator using the dual loop and digital filter implementation[J]. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 2001, 41: 51-63.
- [5] YOSHIKAWA T, HARADA K, MATS A. Hybrid position /force control of macro/micro manipulator system[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12(4): 633-640.
- [6] 陈启军, 王月娟. 激光作业的宏-微机器人及其控制系统[J]. *机器人*, 1999, 21(3): 128-133.
CHEN Q J, WANG Y J. Macro/micro manipulator and control system driven by laser[J]. *Robot*, 1999, 21(3): 128-133. (in Chinese)
- [7] TZOU H S. Design of a piezoelectric exciter/actuator for micro-displacement control theory and experiment[J]. *Journal of the American Society of Precision Engineering*, 1991, 13(2): 104-110.
- [8] 节德刚, 孙立宁. 压电陶瓷微位移系统的模糊 PID 控制方法研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(2): 145-147.
JIE D G, SUN L N. Fuzzy-reasoning based self-tuning PID control for piezoelectric micro-displacement system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(2): 145-147. (in Chinese)
- [9] SEIICHI K, CARL K. Recent development in control of direct-drive motors at NSK[J]. *Motion and Control*, 1997, 3: 40-46.
- [10] 刘伟. 直线电机在微电子领域中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(4): 311-314.
LIU W. Linear motor's control in laser resistance trimmer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 311-314. (in Chinese)
- [11] 郭庆鼎, 王成元. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
GUO Q D, WANG C Y. *Precision control technology of PMLSM*[M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 2000. (in Chinese)

作者简介: 节德刚(1978—), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 主要研究方向为机器人智能控制、精密定位技术;

刘延杰(1975—), 男, 黑龙江人, 讲师, 博士, 主要研究方向为 IC 封装和 MEMS 加工技术;

孙立宁(1964—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微操作机器人、微驱动技术、机器人学, 现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长, 哈尔滨工业大学机电工程学院副院长, 国家 863 计划机器人主题 MEMS 专题专家组组长;

孙绍云(1973—), 女, 黑龙江人, 博士研究生, 主要研究方向为宏/微机器人;

蔡鹤皋(1933—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为机器人技术。