

压电型宏微双驱动精密定位系统点位协调控制*

刘定强 黄玉美 谢礼 杨勇
(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

【摘要】 设计了基于压电型微驱动器的宏微双驱动精密定位系统,宏动台由伺服电动机直接驱动,微动台由压电陶瓷驱动器和弹性铰链构成,并由压电陶瓷驱动器驱动。微动台安装在宏动台上,微动台和宏动台是串联关系。宏动台用于实现大行程微米级定位,而纳米级定位由微动台实现。利用基于运动控制卡的开放伺服功能来协调宏微工作台之间的控制,而位置反馈由两个高精度光栅完成,精度检测由激光干涉仪完成。当宏动台运动结束后,微动台根据测得的定位误差做出补偿进给。实验表明,在行程 100 mm 的范围内每隔 1 mm 采集一点,误差控制在 ± 100 nm 以内。

关键词: 宏微驱动 弹性铰 压电驱动器 点位协调控制
中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0220-04

Positioning Control of Piezoelectric Macro-micro Dual Drive

Liu Dingqiang Huang Yumei Xie Li Yang Yong
(School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

Based on the piezoelectric driver, a macro-micro dual drive precision positioning system was designed. The macro stage of the system was drove by servo motor. The micro stage was consisted of piezoelectric driver and flexible hinge, and drove by the former. The micro stage was mounted on the macro stage and showed a series connection. The macro stage and micro stage were used to realize large workspace and compensate the error of position, respectively. With the open serve control of motion control card, the control system of macro motion and micro motion was harmonized. The positioning feedback was realized by two high precision optical grating. The precision detection was completed by laser interferometer. In the whole closed loop control system, the micro stage compensated the position error when the macro stage finished moving. Experiment results showed that within the travel range of 100 mm, the position error in every millimeter was less than ± 100 nm.

Key words Macro-micro dual drive, Flexible hinge, Piezoelectric driver, Positioning coordination control

引言

随着国内外对宏微双驱动系统研究的深入,其在超精密加工中运用越来越广泛,因此研究大行程宏微双驱动系统十分重要^[1-2]。宏微双驱动微操作系统在很多方面的性能要优于传统的采用单一驱动方式的微操作系统,是实现高精度定位的一种有效手段^[3-6]。但微动进给平台最大行程只有几十微

米,在实际加工中受限。因此需要在超精密加工中解决大行程且具有宏微可协调进给的系统。把宏驱动和微驱动结合起来,宏动台实现以地面为参考物的大范围移动和定位,微动台附着在这个大行程机构上,以宏动台为参考物实现微小位移,进而补偿大行程造成的位移精度误差^[7]。由于宏微双驱动系统被用于不同的目的^[8-9],因此采取了不同的控制算法^[10]。本文利用高精度伺服电动机驱动的宏动

收稿日期: 2010-04-27 修回日期: 2010-07-05
* 国家自然科学基金资助项目(50875209)
作者简介: 刘定强,博士生,主要从事数控设备设计方法及误差补偿研究,E-mail: liu_ding_qiang@126.com

台和由压电驱动器与弹性铰构成的微动台串联建立宏微双驱动精密定位系统;用两个高精密光栅来分别完成宏动台和微动台的位置反馈;位置反馈和宏微双驱动系统构成闭环控制;由运动控制卡来完成宏微协调闭环控制,进而把计算机 + 运动控制卡结构的控制系统应用于宏微双驱动。

1 宏微机构系统建模分析

1.1 宏微机构系统总体结构

宏微机构系统模型如图 1 所示。系统的宏动部分由高精度伺服电动机和丝杠机构组成,这种形式的传动结构紧凑,刚度较大。宏动台由图中宏动台导轨导向。微动台安装在宏动台上,由弹性铰链和压电型驱动器构成。压电驱动器输出位移,由微动台导轨进行导向。

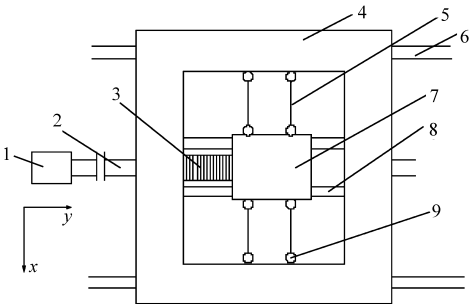


图 1 宏微机构系统原理图

Fig. 1 Macro-micro feed stage

1. 伺服电动机 2. 丝杠 3. 压电型驱动器 4. 宏动台 5. 弹性铰链 6. 宏动台导轨 7. 微动台 8. 微动台导轨 9. 弹性铰

1.2 微动台机构设计

微动台由弹性铰链和压电驱动器构成。具体结构如图 2 所示。

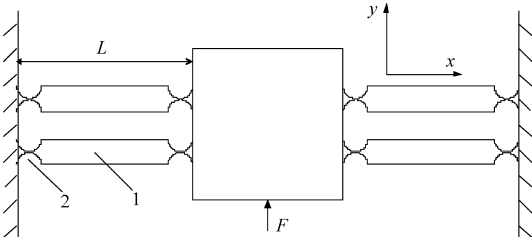


图 2 微进给平台机构原理图

Fig. 2 Micro feed stage

1. 弹性铰链 2. 弹性铰

微动台由 4 个对称布置的弹性铰链连接到宏动台上。每个弹性铰链由 2 个直圆弹性铰构成。当压电驱动器输出力 F 作用于微动台,弹性铰会发生变形,进而微动台会向 y 轴方向移动。因为弹性铰链对称布置,所以在图 2 中微动台沿 y 轴方向刚度较弱,而其他几个方向抗外载荷的能力都比较强。

1.3 压电微驱动器

精密进给系统采用宏微两层工作台、两级进给的方法。宏动台采用伺服电动机加滚珠丝杠的形式,而微动台的进给由微驱动器完成。由于压电陶瓷具有分辨率高、位移响应快、结构紧凑、刚度高等优点,所以把压电型驱动器作为微动台的位移输入。

压电陶瓷驱动器是根据逆压电效应制成的,即在经过极化处理的陶瓷体上施加一个与极化方向相同或者相反的电场,而引起陶瓷片伸长或缩短的形变。为了在较低的工作电压下获得较大的位移变形量,通常采用多层的压电陶瓷片堆叠结构,多个压电陶瓷片构成机械上串联、电路上并联的叠型结构。压电陶瓷驱动器具有输出力大、响应速度快、控制精度高等优点,但同时压电材料固有的迟滞、蠕变、非线性等特点又给压电陶瓷驱动器的控制带来了困难。研究压电陶瓷驱动器的特性,对提高压电微动台的性能非常重要。

本文选用 PI 公司生产的 p255.4s 型压电陶瓷驱动器。由于压电陶瓷材料自身特性的原因,压电驱动器的实际位移呈现迟滞非线性,如图 3 所示。压电驱动器的迟滞特性主要表现在某一时刻的位移输出不仅取决于当前时刻的输入,还取决于上一时刻的输入。

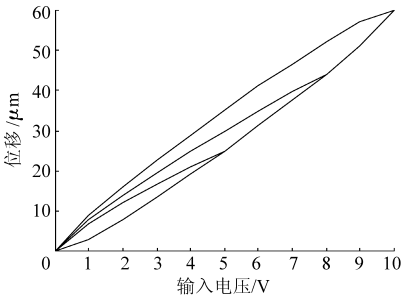


图 3 压电陶瓷的迟滞曲线

Fig. 3 Hysteresis curves of piezoelectric driver

实验采用美国 Delta Tau 公司生产的开放式多轴运动控制器(PMAC)对压电陶瓷驱动器进行电压输入,采用电感测微仪测量压电陶瓷驱动器的输出位移,实验结果描绘的迟滞曲线如图 4 所示。由图可以看出压电陶瓷驱动器有明显的迟滞,在实际应用中要建立迟滞非线性模型进行补偿。

压电陶瓷驱动器采用应变片传感器作为反馈元件,应变片传感器输出电压 $0 \sim 10\text{ V}$,对应压电陶瓷驱动器行程 $0 \sim 60\text{ }\mu\text{m}$,将应变片输出电压经 ACC-28B 型模拟数字转换器转换后,输入 PMAC 硬件寄存器,ACC-28B 型模拟数字转换器有 16 位精度,采用无符号的转换方式,但不能直接接入 PMAC,必须有一块接口板卡,本实验采用 4 通道模拟量输出

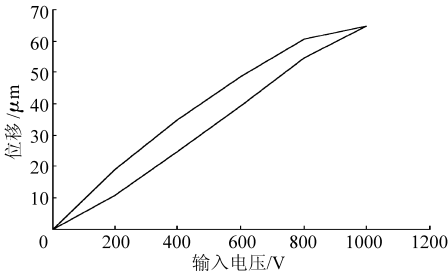


图 4 压电陶瓷迟滞曲线实验结果
Fig. 4 Experiment of hysteresis curves

接口卡 ACC-8ES。当把反馈值送入 PMAC 控制卡后,就构成了闭环控制。整个闭环控制系统采用 PID 控制和陷波滤波算法,对压电陶瓷驱动器进行闭环反馈控制,结果如图 5 所示。

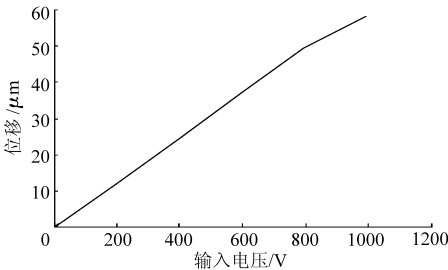


图 5 压电陶瓷闭环实验结果
Fig. 5 Curves of distance in closed loop

从图 4、5 中可以看出,闭环比不闭环的线性度要好很多。实际使用中,用 0~50 μm 这一段线性度最好的部分。

2 宏微双驱动系统的协调控制

2.1 Turbo PMAC 开放伺服功能

Turbo PMAC 的开放伺服功能是新开放的一项伺服功能,利用开放伺服可以使用高级语言编写复杂灵活的运动程序和任意复杂的控制算法,可以任意读写 PMAC 的 I 、 P 、 Q 和 M 变量,并按浮点数方式存储这些变量。开放伺服算法使用 L 和 F 变量访问寄存器,并支持所有数学运算符、关系运算符和数学函数功能。开放伺服算法定义了特定的访问伺服环的函数: MTRNUM 函数返回当前正在运行的电动机号; COPYREG 函数将正在运行的电动机的 5 个关键寄存器的值复制到 5 个 P 变量中,5 个关键寄存器存放的分别是实际速度、期望速度、跟随误差、实际位置和期望位置; RETURN 函数将指定的参数放入一个指定的 24 位整型寄存器。开放式伺服算法的程序控制结构和 PLC 程序相似,使用 IF/ELSE/ENDIF、WHILE 和 EDNWHILE 等。Turbo PMAC 的开放伺服功能为宏微协调程序的编写提供了很大的灵活性。

2.2 控制系统的 PID 调节

宏微双驱动系统采用 PID 控制加上速度、加速

度反馈控制和前馈控制方法,控制原理如图 6 所示。

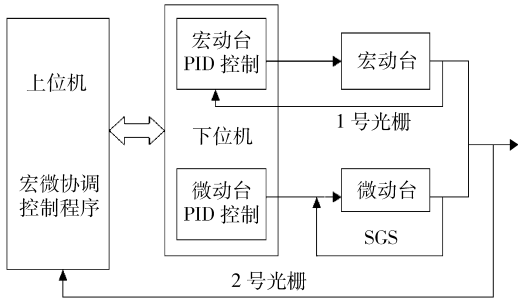


图 6 宏微点位控制原理图
Fig. 6 Principle of positioning control

将该算法用于实际伺服算法时

$$D(n) = 2^{-19} I_{x30} \{ I_{x08} [E(n) + (I_{x32} C(n) + I_{x35} A(n)) / 128 + I_{x33} I(n) / 2^{23}] - I_{x31} I_{x09} C(n) / 128 \} \quad (1)$$

其中 $I(n) = \sum_{j=0}^{n-1} E(j)$

式中 $D(n)$ ——16 位伺服周期输出命令 (−32 767 ~ +32 768), 它被转换成 I_{x69} 定义的模拟电压范围输出

I_{x08} ——电动机 x 的一个内部位置放大系数 (通常设为 96)

I_{x09} ——电动机 x 速度环的内部放大系数

$E(n)$ ——伺服周期 n 内的跟随误差, 为该周期内指令位置与实际位置的差值

$C(n)$ ——伺服周期 n 内的实际速度, 为该周期内最后两个实际位置的差值

$A(n)$ ——伺服周期 n 内的指令速度, 为该周期内最后两个指令位置的差值

$I(n)$ ——伺服周期 n 的跟随误差的积分

PMAC 通过调节 I 变量调节控制系统的参数, I_{x30} 对应比例增益 P , 提供系统所需要的刚度, 数值大时系统的刚性好, 但是太大会引起系统的振荡, 太小会使系统的响应时间长且慢; I_{x33} 对应积分增益 I , 用于消除稳态误差; I_{x31} 对应微分增益, 用于提供足够的阻尼以保证系统稳定, 数值越大阻尼越大, 系统越稳定; I_{x32} 对应于速度前馈, 用于减少由于微分增益的引入所引起的跟随误差; I_{x35} 对应加速度前馈增益, 用于减少由系统惯性带来的跟随误差。

3 宏微点位控制原理与实验

点位控制中宏微两级运动是分离的, 具有先后关系, 点位控制即宏动台运动结束后, 微动台根据测得的定位误差做补偿进给, 点位控制只对始末两点间的位置精度有要求, 对中间位置的定位精度和运动轨迹无要求。宏微的协调采用阈值切换方式, 当

宏动台运动的目标位置与实际位置的差值小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,此时宏动台电动机抱闸,启动微动台,采用大闭环光栅反馈,对宏动台进行误差补偿,同时压电陶瓷驱动器采用内部应变片传感器实现内部局部反馈控制,宏微点位控制流程图 7 所示。现场实验测试如图 8 所示。

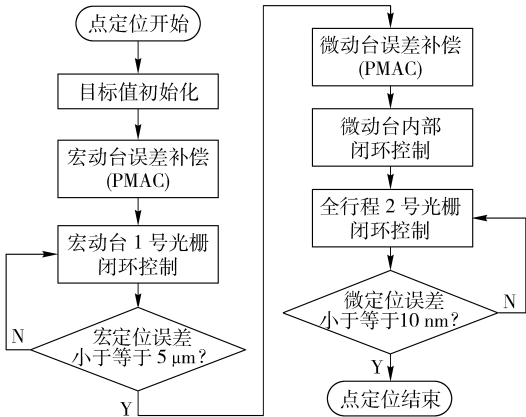


图 7 宏微点位控制流程图
Fig. 7 Flow chart of positioning control

宏微点位控制采用 Renishaw 激光干涉仪进行位置误差测量。在行程 100 mm 的范围内每隔 1 mm 采集一个点,采集的误差曲线如图 9 所示。由误差曲线可以看出宏微点位控制可以把误差控制在 $\pm 100\text{ nm}$ 以内。

4 结束语

对宏微双驱动协调点位控制建模以及控制方法进行了研究和试验验证。采用高精密伺服电动机和压电型微驱动器分别构成了系统的宏驱动和微驱动。该系统同时具备伺服电动机的运动行程较大和

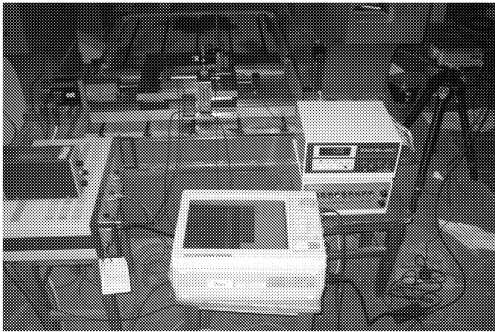


图 8 现场实验测试

Fig. 8 On-the-spot experiment

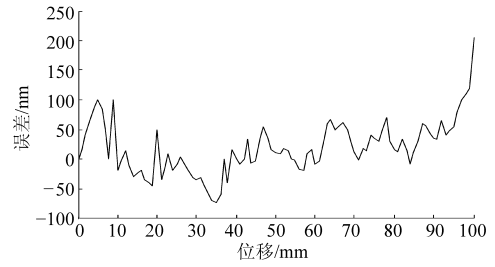


图 9 位置误差曲线

Fig. 9 Position error curves

压电陶瓷驱动器响应快、位移分辨率高等优点。而驱动微动台的压电驱动器本身固有的非线性迟滞特性,则通过闭环控制来补偿压电驱动器的非线性。同时对宏微双驱动点位协调控制进行了研究和实验。利用两个光栅分别作为宏位移和微位移的位置反馈,PMAC 运动控制卡来完成所有闭环控制。点位控制方法采用阈值切换方式,当宏动台运动的目标位置与实际位置的差值小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,启动微动台,采用光栅反馈对误差补偿。在点位控制实验中,位置误差由激光干涉仪进行测量。实验结果表明本文采用的控制策略能达到高精度定位的要求。

参 考 文 献

1 Sharon A, Hogan N, Hardt D E. High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system[C]//Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Philadelphia, 1988, 1:126 ~ 132.

2 Weber T E, Hollis R L. A vision based correlator to actively damp vibrations of a coarse-fine manipulator[C]//Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Scollsdale, 1989, 2:818 ~ 825.

3 Chen O J, Wolfgang H. Development of 4 DOF planar macro-micro manipulators system[C]//Proceedings of the IEEE 28th Annual Conference on Industrial Electronics, Sevilla, 2002, 3:2 231 ~ 2 236.

4 Sanjoo K, Chung W K, Youm Y. On the coarse/fine dual-stage manipulators with robust perturbation compensator[C]//Proceedings 2001 ICER, IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, 2001, 1:121 ~ 126.

5 Guo S X, Sugimoto K, Hata S. Development of a macro/micro mechanism for human scale teleoperating system[C]//Proceedings of 11th International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, 2000:163 ~ 168.

6 肖献强,朱家诚,李欣欣. 压电型宏/微双驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 140 ~ 143.

Xiao Xianqiang, Zhu Jiacheng, Li Xinxin. Modeling and control of a serial type macro-micro dual drive ultra-precision positioning mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 140 ~ 143. (in Chinese)

(下转第 233 页)

3-RPS 并联机构。

3.3.2 机构处于奇异位型附近时的情况

对机构处于奇异位型附近时进行了测试。例如,上平台与下平台距离很近、平台直径较大($H_{\min} < 0.2R_u$),并联机构是一个扁平的结构,机构接近于奇异位型,此时算法仍然收敛,但收敛速度变慢。奇异位型时肯定不收敛。因此,应用本算法时要避开奇异位型。

4 结束语

根据 3-RPS 型并联机构的结构特征,提出了一种正解数值算法。该算法不需要导数运算和雅可比矩阵及其求逆运算,物理模型清晰,计算公式简单。使用新算法可以实现任意的精度要求,编程工作量减少 60%,与现有算法相比,一次迭代节省时间 30%,因而适用于实时控制。

参 考 文 献

- 1 Lee K, Shah K D. Kinematic analysis of a three degrees of freedom in-parallel actuated manipulator[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(3): 361 ~ 367.
- 2 Warldron K J, Raghavan M, Roth B. Kinematics of a hybrid series-parallel manipulation system[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1989, 111(2): 211 ~ 221.
- 3 Hashimoto Minoru, Imamura Yuichi. Kinematic analysis and design of a 3 DOF parallel mechanism for a passive compliant wrist of manipulators[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1998, C64: 2 116 ~ 2 123.
- 4 Pfreundschun G H, Khmer V, Thomas G S. Design and control of a 3 DOF in-parallel actuated manipulator[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, 2: 1 659 ~ 1 664.
- 5 王进戈, 范丽华, 徐礼钜. 3-RPS 并联平台机构的位置正解与奇异构形分析的数值-符号解[J]. 机械设计, 2005, 22(5): 15 ~ 19.
Wang Jing, Fan Lihua, Xu Liju. Positional forward solution and numeric-symbolic solution of singular configuration analysis for 3-RPS parallel platform mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(5): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 6 李树军, 王阴, 王晓光. 3-RPS 并联机器人机构位置正解的杆长逼近法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2001, 22(3): 285 ~ 287.
Li Shujun, Wang Yue, Wang Xiaoguang. Forward position analysis of 3-RPS in-parallel manipulator using self-modified successive approximation method[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2001, 22(3): 285 ~ 287. (in Chinese)
- 7 张继有, 原福永, 刘大为, 等. 基于神经网络的并联 3 自由度机器人位置正解[J]. 计算机仿真, 2004, 21(10): 133 ~ 135, 106.
Zhang Jiyu, Yuan Fuyong, Liu Dawei, et al. Solution for forward kinematics of 3-DOF-parallel-robot based on neural network[J]. Computer Simulation, 2004, 21(10): 133 ~ 135, 106. (in Chinese)

(上接第 223 页)

- 7 陈洪涛, 程光明, 肖献强, 等. 宏/微双重驱动技术的研究和应用现状[J]. 机械设计与制造, 2007(1): 153 ~ 155.
Chen Hongtao, Cheng Guangming, Xiao Xianqiang, et al. Research and application of macro/micro dual-drive technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(1): 153 ~ 155. (in Chinese)
- 8 Roberto Horowitz, Li Yunfeng, Kenm Oldham. Dual-stage servo systems and vibration compensation in computer hard disk drives[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(3): 291 ~ 305.
- 9 晏祖根, 孙立宁, 詹华群. 基于实时误差补偿的机器人系统研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(11): 1 299 ~ 1 303.
Yan Zugen, Sun Lining, Zhan Huaqun. Research on high-speed high-precision robot based on real-time error compensation[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(11): 1 299 ~ 1 303. (in Chinese)
- 10 孙绍云, 曲东升, 孙立宁, 等. 宏/微驱动定位系统滑模变结构控制的研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 32 ~ 34.
Sun Shaoyun, Qu Dongsheng, Sun Lining, et al. Sliding mode variable structure control of a macro/micro drive positioning system[J]. Robot, 2004, 26(1): 32 ~ 34. (in Chinese)