基于直线电机驱动气浮导轨的高精度定位平台实现

姬 琪 王红园
（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033）

摘 要：精密定位技术在产品精密加工、精密检测中发挥着重要作用。本文介绍了一种利用直线电机驱动气浮平台实现精密定位的方法，阐述了气浮平台工作原理及设计方案，推导了直线电机的控制模型，并利用新型驱动器实现了闭环控制。最后采用 LenScan 镜面定位仪对平台定位数据进行了比对，验证了定位平台定位的准确性。结果表明该平台结构可靠、系统运行稳定，X、Y 方向精度均达到微米级，满足使用要求。现已应用在对半导体器件几何参量的测试中，效果良好。

关键词：直线电机；气浮导轨；定位平台；闭环控制
中图分类号：TP29 **文献标识码**：A **国家标准学科分类代码**：510.8030

Implementation of hign-precision position platform based on air track driven by linear motor

Ji Qi Wang Hongyuan
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The precision positioning technology plays an important role in products precision machining, precision testing. A method of precision positioning with air-bearing platform driven by linear motor is introduced in this paper. The working principle and designing plan of air-bearing platform are described. The control model of the linear motor is given. And then a closed-loop control is achieved with this new driver. Finally, platform location data were compared with LenScan position device, and the accuracy of the positioning platform is verified. The result shows that the platform structure is reliable and the system is stable. That the accuracy of X and Y directions is micrometer lever and meets the requirement. Now it is used in testing of geometry parameters of semiconductor devices, and the effect is good.

Keywords: linear motor; air track; position platform; closed-loop control

1 引 言

精密定位技术是加工制造产品、半导体光刻、精密测量和生物医学等领域的重要技术之一。定位性能的好坏直接影响到产品质量及测量精度。随着精密工程的不断进步，半导体产业、精密机械工业、生物细胞领域、光电系统、表面工程等均朝着精密化的方向发展，因此，对于采用精密定位技术的高性能定位平台的需求量日益增长，其应用领域越来越广泛[1]。

在精密定位平台的研发方面，结构设计有很多种形式，传统的滚珠丝杠结构，具有低摩擦、高效率等特点。目前大多数系统采用这种结构，但定位精度稍差，反复进给有空回，影响定位精度[2]。

随着精密加工的发展，具有“零传动”特性的直接驱动系统应运而生。直接驱动定位系统中，驱动系统输出的作用力直接作用在最终的定位系统上，取消了中间的传动环节，把传动链缩短为零，因此被称为“零传动”系统[3-4]。直驱系统驱动元件一般为直线电机，具有精度高、响应快速、传动刚度高、推力平稳等优点。

此外近来国外出现了不同形式的精密定位平台产品[5]。这些产品以 PI 公司的微位移平台为代表[6]，采用了六足式调整结构实现精密定位，在半导体设备定位、激光及光机电系统操纵等诸多方面得到初步应用。

本文介绍的是一种基于直线电机驱动气浮导轨的高精度定位平台，采用直驱技术避免传动中的反向间隙、惯性、刚度不足等缺点，采用气浮导轨克服了摩擦带来的随机影响，获得较高重复定位精度及良好的稳定性。该平台具备微米级精度，主要应用在半导体器件几何参量的测试。下面进行详细介绍。

收稿日期：2015-05

2　系统组成

高精度定位平台主体部分为 H 型气浮平台，再配备直线电机、直线光栅尺、电控机柜及主控计算机来实现。

气浮平台采用气体静压导轨作为导向部件、直线伺服电机作为动力执行单元，直线光栅尺作为位移量传感器，实时反馈平台的当前位置信息，形成闭环控制。主控计算机发控制命令给电控机柜实现精密定位。

3　气浮平台

气浮平台是在承力表面间加入压缩空气，形成一层气体薄膜，实现零摩擦[7]。由于没有接触，气浮支承就避免了与传统轴承相关的摩擦、磨损、润滑处理等问题。图 1 是气体静压导轨工作原理。它由下支承板、具有节流装置的上支承板，以及供气系统组成。

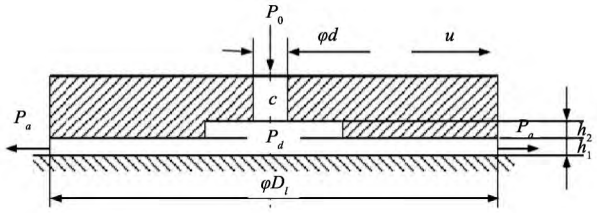


图 1　气体静压导轨工作原理

二支承板间的间隙 h 为气浮支承的气膜厚度，当气源的压力为 P_0 时，气流经过节流装置 c 产生压力降，流出节流孔后压力变为 P_d，向外流动的气体流至支承板的外边界，压力降为环境压力 P_a。这样在二支承板间隙中形成了一定的气体压力分布。将上支承板上下表面的气体压力差进行积分即可求得气浮支承的承载能力 W。因此，当外载荷一定时，平面支承轴承会自动保持相应的气膜厚度，使自身的承载能力与外载荷相平衡。

本系统气浮平台依据“H”形并联耦合布局，如图 2 所示，气浮导轨作为二维位移机构的导向与支撑部件，双边导轨为 Y 导轨，中间横梁方向为 X 导轨，分别使用单气浮导轨实现 X 向进给，采用双气浮导轨与 X 向位移台并联实现 Y 向直线进给。

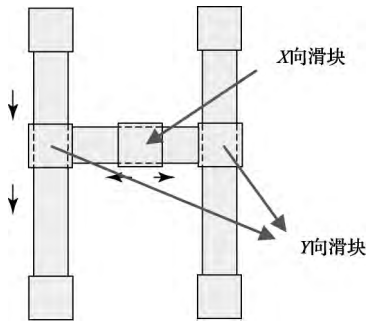


图 2　“H”型二维位移机构示意图

“H”型二维平台设计方案如图 3 所示。气浮平台以气膜支撑为主，平台整体采用大理石材料，整体稳重避免环境等外在因素干扰带来的影响。

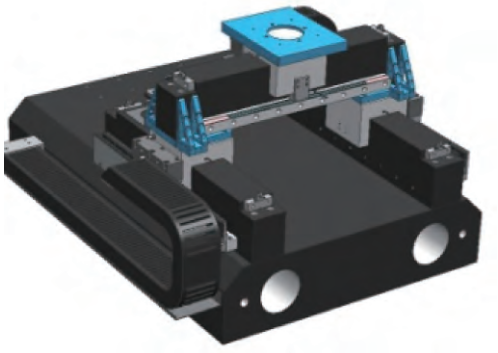


图 3　二维平台效果图

4　直线电机

直线电机可以简单理解成是将旋转电机沿径向剖开，然后将电机的圆周展开成直线，实现直线运动。本系统采用了 Aerotech 公司生产的 BLM142 型直线电机，磁轨长 480 mm，连续推力达到 173.2 N，峰值推力能到 692.7 N，满足负载重量要求。在 X、Y 方向导轨侧面安装直线电机磁轨，动子与导轨滑块相连，这种直驱方式非常适合精密测量等场合应用。由于平台刚性非常好，故 Y 方向采用单边电机驱动，结构简单，避免了同步控制带来的繁琐。

此外在安装直线电机的另一侧安装 Renishaw 直线光栅尺，实时显示位置信息，同时也作为定位闭环控制用反馈信号。

根据直线电机的工作原理可知，直线电机的输出推力和 q 轴电流（即直线电机推力电流分量）有关，近似成正比例关系，此外考虑由于端部效应及其他各种干扰导致的推力波动，建立数学模型为：

$$F = K_F i_q - F_f \tag{1}$$

式中：F 为直线电机输出推力，N；K_F 为推力系数；i_q 为直线电机的 q 轴电流，A；F_f 为直线电机的推力波动，N。

由此可得到直线电机运动部件的运动方程：

$$K_F i_q = m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} + F_f \tag{2}$$

式中：m 为运动部件的质量，kg $\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}$ 为运动部件的加速度，m/s^2 将该式进行拉氏变换，可得该环节的传递函数为：

$$K_F I_q(s) = (ms^2 + F_f)X(s) \tag{3}$$

这是一个非线性环节，该环节的控制模型如图 4 所示。

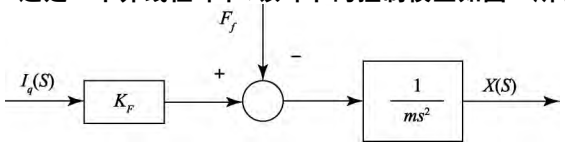


图 4　控制模型

在实际运行过程中,扰动因素都会影响到控制系统的伺服性能,可根据实际精度要求设计闭环控制。

5　控制系统

控制系统一般由主控机、控制器、驱动器、执行电机、位置检测装置等组成。主控机是用户层,提供较好的人机控制界面等;控制器主要起分析、计算、执行运动程序等功能;驱动器主要功能是进行功率放大,根据控制器指令驱动电机;执行电机为系统的运动驱动部件;位置检测装置通过检测当前电机位置信号以构成控制回路形成闭环控制系统[8-10]。闭环控制系统的原理如图 5 所示。

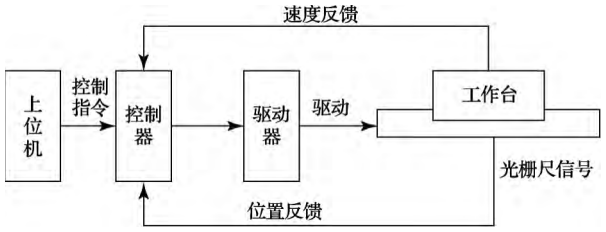


图 5　闭环控制原理图

本系统采用 Aerotech 公司生产的 Ensemble 型驱动器,该驱动器集成了普通控制器与放大器功能,无需单独添加控制器。此外 Ensemble 型驱动器提供高速位置闭环功能和可选单轴 PSO(位置同步输出)功能。无论是简单的点-点,还是复杂的速度-位置轨迹输出,都能确保关键操作的可靠性。

Ensemble 驱动器可以进行速度环、位置环闭环设计,并且具备 PID 自动整定功能。可以根据负载的实际运行波动情况,计算出伺服参数,又具有较强鲁棒性。

实际操作过程如下:

1)确保 X 方向和 Y 方向直线电机与 Ensemble 驱动器连线正确;

2)确保气源稳定;

3)确保进给方向无其它影响运动的干涉;

4) 设定电机运动频率、幅值,使其在工作范围内做快速的折返运动。此时系统会根据预设控制精度及反馈的数据自动设定 PID 参数,位置控制器经参数优化后,实现快速参数设置;

5)根据实际运行情况对参数进行微调。

图 6 所示为本系统伺服跟随误差图。

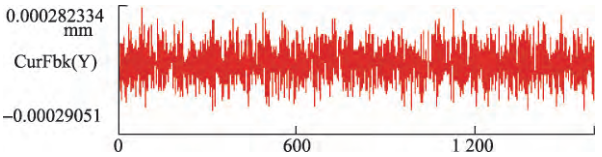


图 6　跟随误差图

6　精度标定

由于精密定位平台在安装、调试时由于各种原因会带来误差,因此必须对定位精度进行标定。可利用 LenScan 镜面定心仪进行精度检测。LenScan 镜面定心仪可以准确的确定光学系统中光学表面相对位置。它利用了短相干光源的迈克尔逊干涉仪的工作原理,如图 7 所示,参考镜位置可以精确移动,当干涉仪的测量臂与参考臂光程相等时,才能够发生干涉。这样通过监控参考镜的移动,就可以测量被测镜的位置。

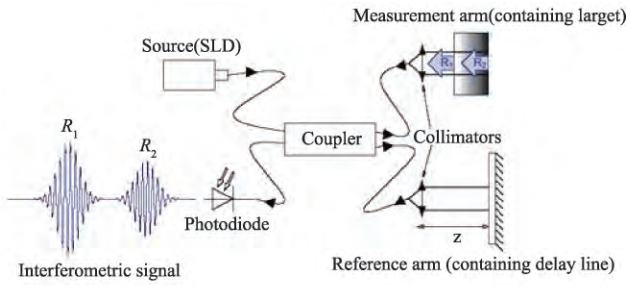


图 7　LenScan 原理示意图

测量时,首先在定位平台进给方向粘一小块平面反射镜,用 LenScan 瞄准平面镜,记录当前值为初始位置值 P_0。定位平台进给一固定值,再用 LenScan 进行测量,并记录测量值 P_1,实际位移值 $\Delta P=P_1-P_0$,将 ΔP 与定位平台设置值进行比对可以得到定位精度。实际标定时,每隔 10 mm 作为一个测试点进行测试,图 8 和图 9 是 X、Y 方向定位误差结果。

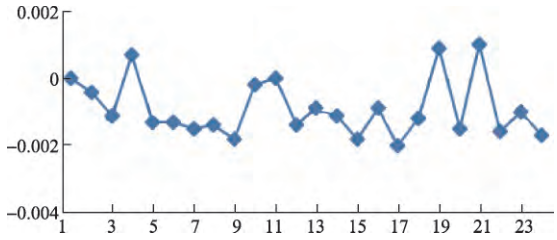


图 8　x 方向误差分布

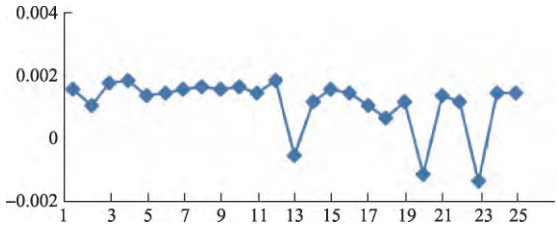


图 9　y 方向误差分布

(下转第 94 页)

[M]. 北京: 北京航天航空大学出版社,2005.
[7] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京: 科学出版社,2008.
[8] 蒋玲,陈智军,高智翔,等. 反射率补偿型声表面波标签的温度测量[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2372-2377.
[9] 李聪,代后兆,张亚宁,等. 一种新型低成本高精度热电阻测温模块的研制[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(6):577-584.
[10] 行鸿彦,武向娟,吕文华,等. 自动气象站数据采集器温度通道的环境温度补偿[J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1868v1875.
[11] 李强,安强. 铂热电阻 Pt100 桥式温度变送器电路的传递函数[J]. 铁道技术监督,2012,40(11):20-25.

作者简介

邓友,硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与测控。
E-mail:dengyou0809@qq.com
丁卫撑,副教授,主要研究方向为智能核仪器。

(上接第 88 页)

[12] 沈文伟,杨建华,陈叶富,等. 嵌入式数据库 SQLite 在可视嗅觉系统中的应用[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1289-1293.
[13] 史恒亮,白光一. 嵌入式数据库的现状和发展趋势[J]. 计算机系统应用,2010,19(2):205-208.
[14] 曾云,胡频. 嵌入式数据库在 QT 中的应用研究与实现[J]. 国外电子测量技术,2010,29(9):73-76.
[15] 秦振华,夏斌,谢宏,等. 便携式心电信号采集电路设计[J]. 电子设计工程,2010,18(8):123-126.

作者简介

童祖兵:1991 年出生,在读硕士研究生,主要研究方向为嵌入式及机器人。
E-mail:key_box@sina.com
李丹:1976 年出生,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、嵌入式、机器人。
E-mail: lanldok@163.com

(上接第 91 页)

从图中可以看出 X、Y 方向定位均控制在 2 μm 以内,对 X、Y 方向数据求标准偏差,可以得到 X 方向定位精度为 0.87 μm,Y 方向为 0.86 μm,满足使用要求。

7 结　论

本文介绍了一种利用直线电机驱动气浮平台的实现过程,对系统组成、气浮平台原理、直线电机建模及伺服控制方式实现等进行了论述,最后对定位精度进行了测试。结果表明,该定位平台运行可靠,结构稳定,精度满足使用要求。

参考文献

[1] 孙麟治,李鸣鸣,程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学精密工程,2005,11(13):69-75.
[2] 何学明,陈学东,曾理湛,等. 超精密气浮平台的定位精度分析[J]. 华中科技大学学报,2008,3(36):8-11.
[3] 张刚,刘品宽,张波,等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. 光学精密工程,2013,2(21):371-379.
[4] 张从鹏,刘强. 直线电机气浮精密定位平台设计与控制[J]. 北京航空航天大学学报,2008,2(34):224-228.
[5] YUN Y, LI Y. Design and analysis of a novel 6-DOF redundant actuated parallel robot with compliant hinges for high precision positioning[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(4): 829-845.
[6] RAKOTONDRABE M, HADDAB Y, LUTZ P. Voltage/frequency proportional control of stick-slip micropositioning systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1316-1322.
[7] 王海霞,颜桂定,李宝辉,等. 直线电机运动控制系统的软件设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2013,3(27):264-268.
[8] 余晓芬,程伶俐,胡佳文,等. 大行程纳米二维工作台的动态优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(3):289-293.
[9] 方明星,吴敏,佘锦华. 基于等价输入干扰补偿的直流电机定位控制[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9):1081-1086.
[10] 邵珠华,李强,褚进. 直线电机伺服系统的二自由度内膜控制器设计[J]. 机电一体化,2013,6:63-67.

作者简介

姬琪,1978 年出生,现为中国科学院长春精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为光电设备精密检测技术。
E-mail:jiqi@ciomp.ac.cn