

二维高精度磁悬浮定位平台的研究

景敏卿, 刘恒, 梁金星, 虞烈

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了解决传统精密机械支承平台由于传动副的间隙、摩擦以及传动杆件弹性变形等引起的运动与定位误差问题,研制了具有“近零摩擦”运动副的高精度磁悬浮二维定位平台样机。该定位平台采用两层结构,最大行程 500 mm,每层平台均采用结构相同的 6 对电磁铁,并以四角磁悬浮支承和侧向平动控制的方式置于导轨之上来实现平台的磁悬浮运动。通过设计磁悬浮平台的受力结构,获得了对平台垂直、水平方向的解耦控制方案。根据电磁轴承系统的数学模型分析,设计并开发了二维电磁悬浮平台 and 控制系统,使用 dSPACE 数字控制平台和模拟控制手段,实现了电磁悬浮平台在比例、积分和微分(PID)控制下的 5 自由度静态稳定悬浮。试验结果表明,悬浮精度达到了 10 μm ,因而有希望成为新一代半导体制造中的高精度定位平台。

关键词: 磁悬浮定位平台;PID 控制;磁悬浮

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1377-05

Two-Dimensional High Precision Positioning Maglev Stage

JING Minqing, LIU Heng, LIANG Jinxing, YU Lie

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To eliminate the movement and position error caused by gap, friction of motion pair and elastic deformation of driving-part for the traditional mechanical stage, a prototype for two-dimensional movement maglev stage with near-zero-friction motion pair is developed, where the double stage structure with 500 mm movement distant is adopted, each stage is constructed with six pairs of the same electromagnets to achieve magnetic levitation motion, and the stage in the way of foursquare magnetic levitation and translational control in the side direction are located above the lead rail. Designing the magnetic force applied to the one-dimension stage, the decoupling control scheme of the maglev stage for vertical and horizontal directions is established. According to the mathematic model of active magnetic bearing system, the two-dimensional maglev stage and the control system are designed and developed. With the method of dSPACE digital control prototype and analog control, the maglev stage is successfully levitated in 5 degrees of freedom under PID control, and the start-levitation characteristic and shock response of the maglev stage are tested. The suspension accuracy of two-dimensional maglev stage gets to 10 μm , which predicts the further applications for the next-generation of semiconductor manufacturing.

Keywords: maglev positioning stage; proportional plus integral plus derivative control; magnetic levitation experiment

在半导体芯片的制作和封装设备中,由于快速而精确的定位、非常精细的运动、超洁净环境等要

求,因此使得现有定位平台的机构设计理论和运动控制技术面临着极限的挑战。传统的机械定位采用

刚性接触支撑和“旋转电机加滚珠丝杠”的驱动方式,存在着运动副摩擦等,不仅会产生微小金属粉尘,影响微电子产品的质量,而且驱动件的质量惯性和连接间隙也降低了设备的定位精度和响应频率.近年来,在半导体制造行业中研制的光刻机大都采用气浮支撑定位方式,虽然消除了摩擦,但其结构庞大复杂、支撑刚度小,使得承载能力和抗冲击能力降低,并限制了定位精度的提高.高精高速磁悬浮平台的研制,能够实现机构的无接触支承和导向,使传动力在气隙中产生,运动部件无摩擦、磨损,而且取消了从电动机到工作台之间的一切中间环节,从而实现了“零传动”.因此,磁悬浮平台具有进给速度高、加速度大、刚度和定位精度高、行程长度不受限制等优点,是微电子产品制造的一个理想方案^[1].

目前,国外许多公司和机构均在进行磁悬浮技术的应用研究,并出巨资联合开发研制磁悬浮结构的新一代定位平台^[2-4].1997年美国Intel、AMD、Micron、Motorola、SVGL和USAL等公司及荷兰ASML公司在共同研发的极紫外光刻样机上,采用了无摩擦的磁悬浮定位平台,定位精度达到纳米等级.美国Integrated Solutions Inc.公司将研制的磁悬浮精密平台应用于极紫外光刻机(EUVL)上,它以气浮平台作为粗动台,以磁悬浮平台作为微动台,精度误差大约是20 nm.

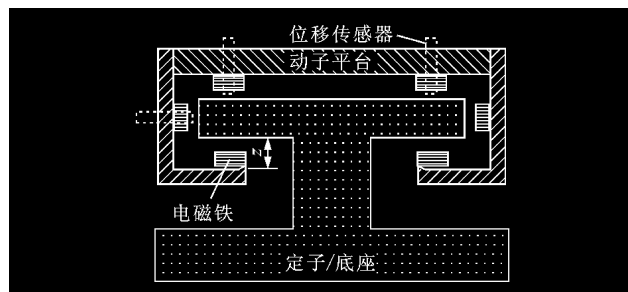
围绕磁悬浮高精度定位平台,国内也进行了不同程度的相关工作,并有相关论文发表,但大多数是对电磁悬浮平台的仿真研究,或者在研制的简化原理样机上进行验证,如沈阳工业大学^[5-6]、西安交通大学^[7]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[8]等所做的基础研究工作.本文在国家重点基础研究发展规划项目“磁悬浮直线定位平台的研制”资助下,成功地研制了二维磁悬浮定位平台原理样机,实现了10 μm的定位精度,初步达到了粗动台的要求,并取得了重要的进展.

1 磁悬浮平台结构

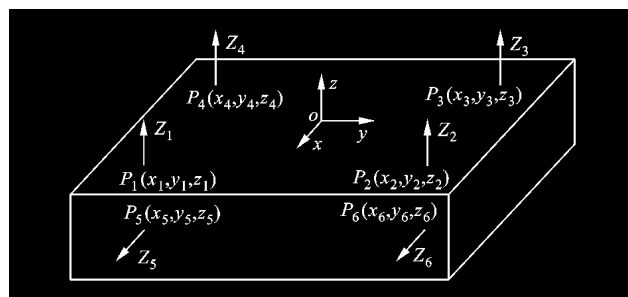
磁悬浮平台采用两层平台结构,每层平台均采用中空结构,在内侧放置成对电磁铁,并以四角磁悬浮支承的方式置于导轨之上.每层平台均采用结构相同的12个电磁铁,组成6个电磁铁对,每个电磁铁对以差动方式工作.

如图1所示,在磁悬浮平台中,沿 z 方向设计了4对8个电磁铁,每一对电磁铁均上下对中,控制磁悬浮平台 z 方向的平动和绕 x 、 y 轴的转动共3个自

由度,因此磁悬浮平台存在一个冗余约束.沿 x 方向设计了2对4个电磁铁,每一对电磁铁均前后对中,控制磁悬浮平台 x 方向的平动和绕 z 轴的转动共2个自由度, y 方向为导轨方向,即磁悬浮平台的运动方向,由直线电机提供牵引力作往复运动.



(a)平台下层结构示意图



$Z_1 \sim Z_4$:垂直受力方向; Z_5 、 Z_6 :水平受力方向; $P_1 \sim P_6$:磁力作用点

(b)平台下层动子受力图

图1 磁悬浮平台结构及受力简图

磁悬浮平台的垂直运动不会引起平台水平方向上的气隙变化,而平台在水平方向上的扰动也不会对其垂直方向的气隙产生影响,所以单方向的平动不会引起别的方向上力的变化.当平台在 x 、 y 、 z 方向分别发生微小转动时,对平台水平方向和垂直方向电磁力大小的影响可以忽略不计,因此可以近似认为各个方向互不影响,从而可对平台的 x 、 z 方向分开独立控制.

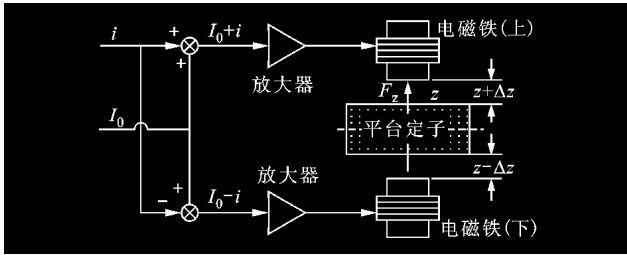
2 电磁轴承的系统模型

根据磁悬浮平台的受力情况,可对 x 、 z 方向分开独立控制,即对 z 方向上的4对电磁铁和 x 方向上的2对电磁铁采用分散独立控制.

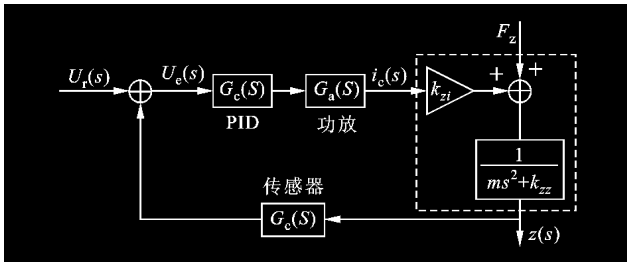
在 z 方向上,每对电磁铁分别放置于导轨的上、下方,以差动方式工作,由2路对称结构的功率放大电路分别为其提供控制电流,单通道电磁轴承简图如图2所示.电磁轴承产生的动态力近似表达式为

$$F_z = k_{zz}z + k_{zi}i \quad (1)$$

式中: k_{zz} 为 z 方向的位移刚度系数; k_{zi} 为 z 方向的电流刚度系数; i 为控制电流.由于位移刚度值是负



(a)单通道电磁轴承系统简图



$G_c(s)$:PID 控制调节器的传递函数; $G_s(s)$:位移传感器传递函数;

$G_a(s)$:功率放大器传递函数; $U_r(s)$:参考电压; s :实数变量;

m :平台质量

(b)磁悬浮平台闭环控制原理框图

图 2 磁悬浮平台单通道的控制原理

的,因此电磁轴承系统本质上是不稳定的. 与一个稳定的弹簧-阻尼系统对比,则有

$$i = \frac{(k - k_{zz})z + d\dot{z}}{k_{zi}} \quad (2)$$

式中: k 和 d 分别是稳定系统的刚度和阻尼系数. 只要 i 与 z 满足比例微分(PD)关系,系统就可能稳定,所以电磁轴承最基本的控制是比例微分控制. 为了消除稳态误差,通常还引入积分控制器(PID). 采用 PID 控制策略对磁悬浮平台实现闭环控制的框图如图 2b 所示. PID 控制器的传递函数为

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{1 + sT_d} \quad (3)$$

式中: k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数; T_d 为微分时间常数.

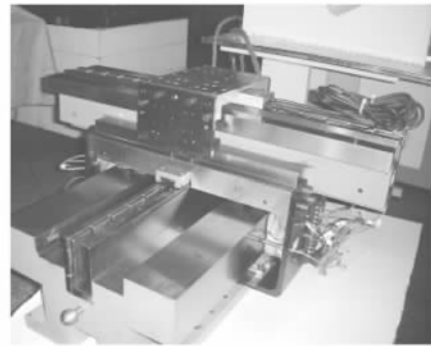
对于单自由度系统,控制电流的调节仅需要比例与微分环节就可以实现系统稳定,为了使平衡位置与载荷变化无关,在系统控制回路中增加了一个积分环节,以消除静态误差. 为了消除高频干扰,引入一阶惯性环节,而磁悬浮平台闭环线性系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{k_z G_c(s) G_a(s)}{ms^2 + k_{zz} + k_z G_c(s) G_a(s) G_s(s)} \quad (4)$$

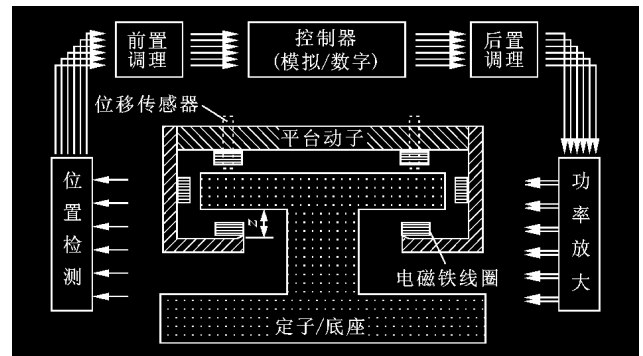
3 磁悬浮试验

研制的样机如图 3a 所示,分上、下两层,其中:平台上层的总质量为 8.65 kg,悬浮间隙为 0.4

mm;平台下层总质量为 80 kg,悬浮间隙为 0.8 mm;最大行程为 0.5 m. 磁悬浮平台每层的控制系统框图如图 3b 所示,它主要由位移传感器、调理电路、控制器、功率放大器、电磁铁和磁悬浮平台机体组成,其中位移检测采用涡流传感器,其增益 $A_s = 8000 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$,功率放大器采用电压-电流型的开关功放,其增益 $A_a = 1 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$. 电磁铁采用 U 型结构,平台上层的刚度参数 $k_{zz} = -4.35 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_{zi} = 47.63 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1}$. 采用的控制器有 2 种:①数字控制开发平台 dSPACE,用于快速方便地获得各通道的控制参数,并作为模拟 PID 控制器相关元件参数选取的参考;②常规的模拟 PID 控制器.



(a)二维磁悬浮平台实物图



(b)磁悬浮平台控制系统框图

图 3 磁悬浮平台控制系统

dSPACE 是一套基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发工作平台,硬件配有 32 路并行采集单元、数据实时处理单元以及 32 路 D/A 输出单元,可直接与磁悬浮平台控制系统的前置调理及后置调理单元连接,完成多通道并行的最高 10 kHz 的高速计算控制. 通过 MATLAB/Simulink,按照式(3)建立数字 PID 控制器,直接在 dSPACE 上运行,并进行 PID 控制器参数的动态调试,从而获得稳定悬浮的控制参数(见表 1).

根据表 1,计算出模拟 PID 控制器电路相应的阻容元件值,控制器换成模拟 PID 电路,调整控制

参数,使平台获得稳定悬浮.此时,dSPACE 仅完成了试验数据的采集处理,以测试系统的静态和动态特性.

表1 磁悬浮平台上层控制的PID参数

控制参数	通道					
	1	2	3	4	5	6
$k_p/A \cdot m^{-1}$	3.5	3.7	3.0	3.1	3.1	3.1
$k_i/A \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$	1.2	1.8	0.9	0.9	2.9	2.7
$k_d/A \cdot s \cdot m^{-1}$	0.021	0.027	0.033	0.033	0.035	0.036

3.1 稳态悬浮

在实际的定位平台磁悬浮试验中,无论采用数字控制还是模拟PID控制电路,都是先对垂直方向进行3个自由度的悬浮,调整到较好的悬浮效果后,再加上水平方向的控制,对平台进行5个自由度的悬浮控制.

通过调节PID控制器参数,实现定位平台上层的稳定悬浮,用dSPACE测量和计算的各点位移最大值如表2所示.在模拟PID控制电路时,定位平台的悬浮状态良好,各个通道电磁铁处的位移很小:垂直方向的1、2通道的最大位移为0.008 mm,位移气隙比最大为4%,3、4通道的位移甚至更小,最大位移约为0.004 mm,位移气隙比为2%;水平方向5通道的位移较大,约0.012 mm,位移气隙比为6%.所以,磁悬浮平台具有较高的悬浮精度.

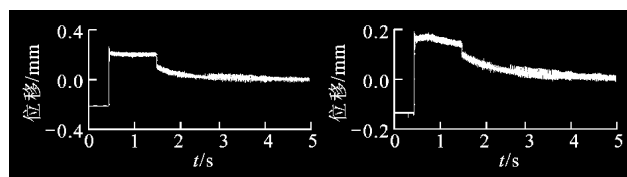
表2 磁悬浮平台上层各个通道的最大位移

参数	通道					
	1	2	3	4	5	6
最大位移/mm	0.008	0.007	0.004	0.004	0.012	0.009
位移气隙比/%	4.00	3.75	2.00	2.00	6.00	4.25

3.2 起浮特性

在定位平台稳定悬浮的基础上,对它的起浮特性进行了测试,并观察了起浮时间.利用dSPACE测得典型通道的位移波形如图4所示.

在数字PID控制下,定位平台起浮时从功率放大器加电到平台稳定悬浮都有一个调整过程,在垂直方向上4个通道的波形都有一个较短的“台阶”,在水平方向上2个通道的“台阶”较长,基本上在垂直方向上的过渡时间较短,约3.5 s,水平方向的过渡时间约为4 s,基本上滞后于垂直方向,其原因在于垂直方向总的电磁控制力在起浮过程中占了主导



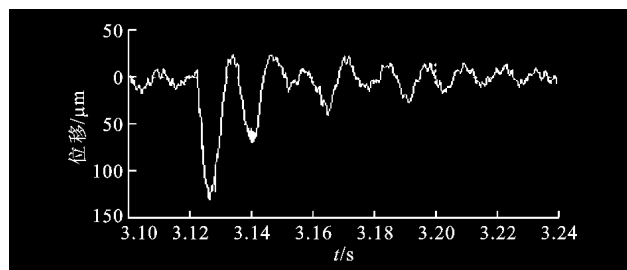
(a)通道1 (b)通道2
图4 磁悬浮平台上层的起浮特性曲线

地位.

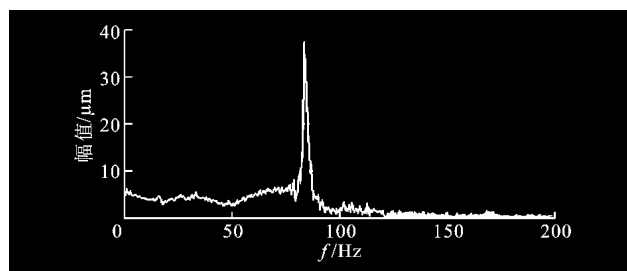
当改为模拟PID控制时,由于过渡时间较短,因此起浮效果好于数字PID控制.其中,在使用简单的PID控制策略(垂直方向大约2 s,水平方向大约3 s)时,模拟控制的反应速度要比数字控制快,使得平台起浮的过渡时间较短,效果也较好.

3.3 冲击响应

通过敲击定位平台上层动子的表面几何中心,利用dSPACE测试系统,定性获得了在冲击响应下动子垂直方向的位移波形和谱图(见图5).



(a)通道1的波形



(b)通道1的频谱特性

图5 磁悬浮平台垂直方向的冲击响应

虽然敲击时并不能保证冲击力完全垂直作用在平台表面的几何中心,但是各个通道所反映的过渡过程和频率特性基本上是一致的.磁悬浮平台系统从偏离到恢复至平衡位置的过渡时间基本维持在0.07 s左右,定位平台上层的一阶固有频率出现在第1个尖峰处,均为84 Hz.上层的实际合成刚度为

$$k = 4\pi^2 mf^2, k = 2.4 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (5)$$

式中: f 为定位平台的一阶固有频率.

由系统传递函数式(4)可知,系统的理论刚度为

$$k_{eq} = k_z + k_p A_s A_a k_z$$

$$k_{eq} = 2.68 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6)$$

式中: k_z 和 k_z 为平台上层的刚度参数; k_p 为控制器的比例系数; A_s 为传感器增益; A_a 为功放增益。

对比式(5)和式(6)的2个计算结果,可知实际刚度和理论刚度比较相符,说明系统一阶固有频率估算正确。

4 结 论

围绕磁悬浮高精定位平台,本文研制了双层磁悬浮定位平台原理样机,试验结果表明,无论是数字控制还是模拟控制,磁悬浮平台上、下层都获得了良好的悬浮效果,其垂直方向的悬浮精度在 $10 \mu\text{m}$ 以内,最大行程为 500 mm ,可以满足高精度定位粗动平台的要求。本文的主要结论如下。

(1) 双层磁悬浮定位平台采用2层结构,每层平台均采用结构相同的6对电磁铁,以四角磁悬浮支承和侧向平动控制的方式置于导轨之上,从而实现了平台的磁悬浮运动。

(2) 磁悬浮定位平台单方向的平动不会引起其他方向上力的变化,当存在微小转动时,对定位平台水平方向和垂直方向电磁力的影响可以忽略不计,从而可对定位平台的 x 、 z 方向分别进行独立控制。

(3) 依靠闭环反馈控制,能够消除电磁轴承系统本质上的不稳定,对于单自由度系统,通过采用PID控制策略,可实现对磁悬浮平台稳定悬浮的控制。

(4) 对二维磁悬浮平台进行数字和模拟控制下的悬浮试验,使平台上、下层成功地获得了5自由度的稳定悬浮。试验结果表明,定位平台上层在模拟PID电路控制下获得了较好的悬浮效果,可使垂直方向的悬浮精度达到 $8 \mu\text{m}$ 以内,最好的通道达到 $4 \mu\text{m}$,而定位平台下层垂直方向的悬浮精度可稳定在 $6 \mu\text{m}$ 以内。当二维定位平台的上、下层同时悬浮时,其上、下层之间的影响较小。

参考文献:

- [1] DONALD M R, EDDIE L. Future prospects magnetic for maglev technology applications [C]// The 18 th Magnetically Levitated System and Linear Drives Conference. Shanghai, China:[s. n.], 2004:65-75.
- [2] KAZNORI I, FUMIO S. New scanners for the 100 nm era [J]. SPIE, 2001,43(46): 621-633.
- [3] LEX M. A novel planar magnetic bearing and motor configuration applied in a positioning stage [D]. Delft, India: Delft University of Technology, 2000.
- [4] MARC B, VAN DE COEN V, SJEFF T, et al. The performance advantages of a dual stage system [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 53(77): 742-757.
- [5] 郭庆鼎,刘德君,赵希梅. 基于输入解耦的6DOF磁悬浮平台悬浮高度的 H_∞ 控制 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(11):70-74.
GUO Qingding, LIU Dejun, ZHAO Ximei. H_∞ control of 6DOF magnetic suspension planar stage suspension height based on input decoupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 70-74.
- [6] 杨霞,吴红波,李新叶,等. 磁悬浮平台系统的 P-Fuzzy-PID 控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(12): 45-47.
YANG Xia, WU Hongbo, LI Xinye, et al. P-Fuzzy-PID control in a magnetic suspension platform system [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(12):45-47.
- [7] 郝晓红,梅雪松,张东升,等. 新型磁悬浮精密定位平台的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9):937-940.
HAO Xiaohong, MEI Xuesong, ZHANG Dongsheng, et al. New magnetically levitated precision positioning stage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9):937-940.
- [8] 朱涛. 极紫外光刻机工件台精密机械及相关技术 [D]. 长春:中国科学院研究生院, 2006.

(编辑 管咏梅)