

微电子制造领域的磁悬浮精密定位平台的结构设计研究

宋文荣¹, 于国飞², 孙宝玉¹, 王延凤¹, 何惠阳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要: 利用磁悬浮技术将铁磁性平台悬浮在磁场中, 通过线性电机无接触驱动, 结合控制技术实现平台的快速精密定位。合理的设计将悬浮力和导向力两个磁悬浮系统合二为一, 即结构简单, 控制容易又能获得精确的导向精度。选用线性同步电机, 避免了感应电机磁场感应所产生的法向力对平台的振动作用, 有利于悬浮系统的控制。悬浮系统无接触, 无摩擦, 克服了磨损、金属粉尘及油脂污染等问题; 无接触线性驱动减少了机械联结件, 消除了联结间隙, 减轻了重量, 能有效提高动态响应频率和定位精度; 这些使定位平台能够满足现代信息产业对超洁净制作环境和高精度、高效率的要求。

关键词: 磁悬浮; 定位平台; 线性电机; 无接触驱动; Hopf 分叉

中图分类号: TN403 文献标识码: A

1 引言

二十世纪九十年代以来, 以信息高速公路为代表的信息革命浪潮推动着世界电子信息产业的快速发展, 成为带动世界经济增长的战略产业。其中以集成电路为主体的微电子制造业无疑是信息产业的核心和基础, 其技术水平高低和产业规模大小已经成为衡量一个国家信息工业发展及综合国力的重要标志, 直接影响到各国国民经济信息化的进程。

微电子制造领域的众多专用设备融纳了当代诸多高科技领域的最新技术成果, 涉及到光学、电子、机械、计算机、信息处理、传感与测量、伺服驱动和自动控制等高新技术方面的许多关键技术。例如光学导光稳光调制控制技术、精密传动与快速精密定位技术、模拟电子高速控制技术以及专用软件设计技术等等。为解决其中关键技术之一——精密传动与快速精密定位及控制技术, 各种类型的一维、二维或多维机械精密定位平台相继问世了, 并大量地应用在专用设备上。但随着信

息技术的发展和产品性能的日渐完美, 微电子制造业不仅对加工设备性能如定位的精度和速度提出了越来越高的要求, 而且对生产制作环境同样提出了越来越严格的要求。如 IC 芯片的生产加工要求在超洁净环境下进行。接触支撑形式的机械平台, 有的虽然能满足定位精度要求, 但由于接触引起机械摩擦, 动态响应迟钝, 定位时间较长, 不能满足高速、高效率的定位要求, 影响设备生产率的提高。且由于摩擦产生金属粉尘或为减小摩擦磨损采用油脂润滑等带来了粉尘及油脂污染, 严重影响了微电子产品的质量。所以, 机械定位平台已无法满足严格的超洁净环境要求。并因为摩擦引起磨损, 逐渐降低了设备的使用精度, 缩短了设备的使用寿命, 增加了维修更新等费用昂贵。为了消除因摩擦而引起的各种不利影响, 人们设计了气悬浮定位平台, 以气压悬浮支撑替代接触刚性支撑。但实践表明气悬浮定位平台存在着支撑刚度较小的主要缺点, 以致平台承载能力和抗冲击能力降低, 大大地限制了平台的定位精度。综合分析考虑机械、气悬浮定位平台的优缺点, 我们率先开展了磁悬浮定位平台的研究设计工作。

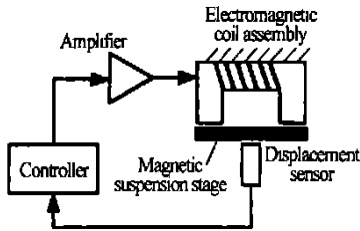
通过专利查新, 尚未发现国内外进行此项研究的相关报道。

2 磁悬浮定位平台的结构研究设计

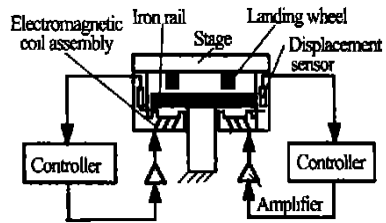
磁悬浮定位平台是利用电磁原理将平台稳定地悬浮在空中。与支撑部件没有机械接触, 因而消除了摩擦和磨损, 由此相应地克服了机械平台存在的主要缺点。从理论上分析, 没有摩擦等阻尼因素作用, 运动平台可以定位在任意精确位置, 且具有更高的激励响应频率。与气悬浮平台相比, 它能设计获得更大的系统支撑刚度。因为磁悬浮系统刚度仅与线圈电流和控制器设定增益有关^[1]。由此也克服了气浮平台承载能力及抗冲击能力低的缺点。所以, 磁悬浮定位平台既能实现快速精密定位, 大幅度提高设备的生产率, 又能满足超洁净制造环境要求, 具有非常显著的优点。

2.1 磁悬浮原理及特征

带磁物体同性相斥, 异性相吸。根据不同的结构布置, 可以采用不同的磁悬浮工作原理。目前, 在磁悬浮列车设计方面, 既有采用斥力型磁悬浮原理, 也有采用吸力型磁悬浮原理。悬浮原理不同, 其技术特征亦不相同。



(a) 电磁铁固定
(a) Coil assembly fixed



(b) 导轨固定
(b) Iron rail fixed

图 1 磁悬浮系统的结构和工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of the magnetic suspension system.

2.2 线性驱动原理及特征

现有设备上的定位平台一般以旋转电机为动力, 通过丝杠、齿条或皮带等接触传动形式驱动平台运动。这些传统传动机构都不可避免地存在着间隙和摩擦。而间隙和摩擦是影响机构设备精度的主要因素。通过预载可以消除间隙, 但却增大了摩擦, 即以牺牲另一方为代价。同时消除间隙又减小摩擦对传统传动机构是难以做到的。最近较为先进的平台则已经使用线性电机实现无接触

斥力型悬浮一般利用低温超导技术。超导体具有抗磁效应^[1] (即 Meissner - Ochsenfeld effects), 可获得比常导电磁铁大出数倍数量级的足够高强的磁通密度, 产生强大的磁场斥力足以把物体高高悬浮起来, 悬浮间隙可达 100~200mm, 适合用以实现高速运行。且速度越快磁斥力越大, 获得的悬浮间隙亦越大, 磁阻力越小。如日本研制的超导磁悬浮列车运行速度高达 500~550km/h。但制造成本极为昂贵。

本定位平台设计拟采用吸力型磁悬浮原理。其系统组成和功能如图 1 所示。(a) 电磁铁固定, 铁磁体作为平台被悬浮; (b) 铁磁体如导轨固定, 电磁铁及平台悬浮。电磁铁缠绕常导线圈, 与铁磁体及间隙形成了闭合磁路。通电后在间隙内产生磁吸力。当磁吸力与物体重力平衡时, 物体可以悬浮在空中。但要使物体实现稳定悬浮, 就必须根据物体的悬浮状态连续不断地调节磁场。这可以通过可控电磁铁来实现。传感器检测出平台偏离参考点的位移, 作为控制器的微处理器将检测的位移信号转换成控制信号, 然后功率放大器将控制信号转换成控制电流, 控制电流修正电磁铁中产生的磁力, 保持磁力与物体重力相等, 从而维持物体的悬浮位置稳定不变。

驱动, 消除了机构传动中的间隙。但平台直接安装在导轨平面上, 所以严格地说, 这种结构并不是完全无机械接触驱动的。只有在悬浮的基础上, 采用线性电机才可以实现完全无接触驱动。

把旋转电机的定子和转子沿径向切开并拉直展开, 如图 2 所示, 旋转电机就变成线性电机了。定子称为初级; 转子称为次级。转子的旋转运动就变成了次级的线性运动(当初级固定时), 或初级的线性运动(当次级固定时)。当物体与运动的

次级或初级相连即可实现线性驱动。

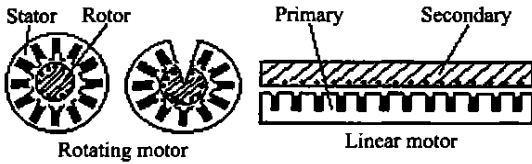


图 2 旋转电机展开为直线电机

Fig. 2 Process of a linear motor unwrapped from a rotating motor.

按照初、次级的相对长度, 线性电机一般分为短次级和短初级两种不同型式。短次级型式是把电机定子三相交流绕组或永磁磁铁铺设在整个导轨面上, 作为固定初级, 控制线路系统联结在初级上; 次级可由一小块铝板组成或者可以直接把金属平台用来作为次级。长度方向与初级相比很短, 重量相对很轻, 有利于减小往复线性运动时的惯性。短初级型式则是把一块次级板固定在导轨上, 或直接把导轨面作为次级; 初级较短, 上面铺设激磁感应线圈, 控制线路系统联结在初级上并随初级移动而移动。初级重量相对较重, 运动时惯性自然相对较大一些, 从快速精密定位和精度角度来考虑是不利的。

2.3 磁悬浮定位平台的结构设计

在微电子系统等制造领域, 电子元件如芯片电阻三维尺寸微小, 其焊接、光刻等加工制作部位面积更是细微。于是平台不仅要在移动这一维方向实现精确微小的进给运动, 而且需要保证在其它二维方向的精度。因此, 在平台的研究设计过程中, 除考虑满足移动定位精度这一最主要的性能指标之外, 还需顾及平台移动时的上下振动及左右偏摆等误差, 以达到微小元件制作时的三维尺寸精度要求。可以说定位平台是一个三维精度要求极高的精密装置。综合前述的磁悬浮原理和线性驱动原理, 设计了磁悬浮定位平台, 其结构模型见图 3(a)。

合理的结构设计是保证平台精度性能的首要前提, 并可为控制系统设计提供更宽裕的精度范围。对选购器件如传感器等、降低控制系统制作成本非常有利。在此平台设计过程中, 主要采取以下几项关键技术:

(1) 两边的 U 型电磁铁与对应的 V 型结构导轨斜面平行。此结构除产生垂直悬浮力外, 还可产生水平导向力。因为垂直导轨斜面的磁场力可以分解

为垂直和水平两个方向的分量, 垂直方向的分量合力就是所需的磁悬浮力, 水平方向的两个分量在理想状况下应大小相等、方向相反, 如图 3(b) 所示。这时平台移动时没有左右偏摆现象。当水平分量大小不等时, 平台要偏离设定移动方向, 同时电磁铁与导轨平面之间的间隙发生变化, 磁力小的一边间隙变大, 磁力大的一边间隙变小。此时, 位移传感器的电流或电压值也相应改变, 控制系统于是及时修正电磁铁的线圈电流或电压, 使水平方向磁力大小相等, 平台重新回归到原来的平衡位置, 与左右两侧导轨平面保持相等的间隙, 由此则保证了平台移动时的左右偏摆误差精度。与此结构相近的磁悬浮列车为了克服高速运行时列车左右摇摆问题, 往往在铁轨两外侧垂直面分别安装一套完整独立的磁悬浮系统, 产生水平导向力用以控制限定列车悬浮架与铁轨外侧面之间的间隙。此外, 该悬浮系统能够获得足够大的导向力以平衡高速列车通过曲线时产生的巨大的离心力, 这是其主要作用。由此可知, 磁悬浮列车的垂直悬浮力和水平导向力是由不同独立的悬浮系统产生, 结构相对复杂, 所需控制环节繁多, 成本昂贵。本平台将悬浮力和导向力产生系统合二为一, 结构设计新颖独特。既可以实现精确的垂直悬浮控制, 又可以保证水平误差精度, 且结构简单, 控制环节大为减少, 制作成本较低。

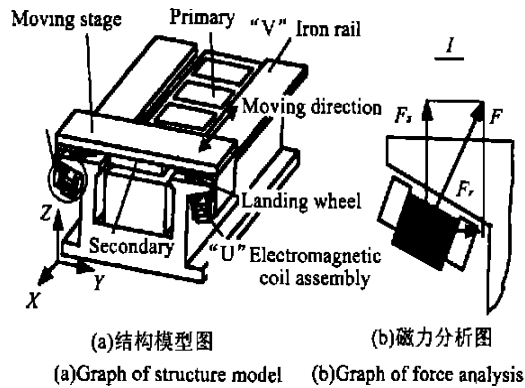


图 3 磁悬浮定位平台结构模型及磁力分析图

Fig. 3 Structure model and force analysis of the magnetic suspension stage.

(2) 对 V 型导轨两斜面进行抛光研磨加工, 平面度要求最大不超过 $1\mu\text{m}/25\text{mm}$; 并对斜面进行均质处理, 使得斜表面金属性能为各向同性。即导轨斜表面的电导率、磁导率、几何形状等均一致相同。这样可以减小金属性能的差异对传感器输出的非线性

影响。选用电涡流位移传感器来测量控制 U 型电磁铁与斜面之间的间隙大小。电涡流位移传感器实现了非接触测量,具有长期工作可靠性好、灵敏度高、抗干扰能力强、响应速度快等特点,测量精确,动态分辨率为 0.5 μm 。当测量与均质金属表面的间距时,其输出信号(电压或电流)仅是距离 δ 的单值函数,且在较大范围内具有良好的线性比例关系。这极其有利于磁悬浮控制系统的设计和精密控制的实现。

(3) 磁悬浮系统为精密定位提供了无摩擦、无阻尼、响应速度快、洁净的基础平台。然而要实现移动平台的精确定位,选用合适的线性驱动电机并对电机移动部件进行精确的位移测量且实施精密伺服控制是最终的技术关键。驱动电机选用线性同步电机,需要科学合理地布置电场和磁场,减小悬浮磁场和线性驱动磁场的相互影响作用。尤其是避免线性电机产生的垂直磁力对悬浮系统精确控制的干扰。因为在线性感应电机中,初级和次级之间的感应磁场不仅产生水平方向的驱动力,而且还产生垂直方向的法向力。驱动力与法向力之间的大小比例关系和电机滑差率有关。并且法向力的方向还与滑差率的大小有关。当滑差率小于某一值即 $f < f_0$ 时,法向力向上表现为斥力;当滑差率大于某一值即 $f > f_0$ 时,法向力向下表现为吸力^[2-3]。这种变化对磁悬浮系统是有害的,会引起平台的上下振动,不利于悬浮系统的精确控制。

在线性同步电机的固定平台(即固定初级或次级)上安装一个无触点光隔离的光栅尺,光栅尺的分辨率为 0.1 μm 。在光栅尺上带有 2 个磁感应限位开关和 1 个回零点光耦标志。高分辨率的光栅尺是实现平台移动位置精确测量的前提。

(4) 在平台的设计过程中,考虑到不仅机械结构的科学设计、金属的加工制作、材料器件的合理选用、控制系统的研究设计等会直接影响到平台的最终定位精度,而且温度对超精密定位的精度影响也是不可忽略的。因为温度的变化能引起金属台面、光栅尺的热胀冷缩,从而改变了光栅尺的分辨率和实际测量精度。为了补偿温度变化对定位精度的影响,一则在线性驱动电机内部添设了两台对流风扇,以利于热量散发;同时,在光栅尺附近安装一个数字式温度传感器,通过计算机采样,参照标定温度算出温度变化值,并乘以热胀系数,得到温度变化所引起的位移补偿值。最后把这补偿值输入伺服控制程

序,精确测得平台的实际位移,实现平台的精密定位。

3 磁悬浮定位平台的控制系统设计

先进的机械结构是磁悬浮定位平台的硬件,但如同没有软件操作系统支持,再先进硬件组成的计算机都不能工作一样,没有控制系统支持,平台无法实现最终的精密定位性能。控制系统是该平台的灵魂,主要包括两大部分内容:(1) 磁悬浮系统的高精度稳定数字控制;(2) 线性驱动系统快速响应及精密定位的伺服控制。

3.1 磁悬浮系统的控制设计

磁悬浮系统采用 PD 控制的电压控制模式,即控制电磁线圈绕组上的电压 u 从而控制磁浮间隙 x 稳定不变。电压控制模式可以更为精确地描述控制器模型,使控制器获得较好的鲁棒性,有利于提高悬浮系统的抗干扰能力。此外,在设计控制器的同时,应充分考虑到磁悬浮系统是一个非线性不稳定系统,只具有局部稳定性^[1,4,5]。由非线性动力学可知,由稳定状态变为不稳定状态,说明系统存在分岔现象。有学者对磁力轴承悬浮控制系统的 Hopf 分岔现象进行了研究^[6-7],其研究方法和结论对分析设计悬浮平台控制系统很有借鉴作用。认真研究悬浮平台系统的 Hopf 分岔现象,找出系统的稳定准则,分析系统参数与稳定分岔解及不稳定分岔解的关系,这些结果对指导设计控制器非常有益和必要。

3.2 线性驱动系统的伺服控制设计

以数字 PID 控制系统来实现线性电机的伺服控制。该系统采用软件技术实现 PID 控制参数的智能化自动整定,并利用整定后的控制参数控制线性电机的运行过程。具体表现为在电机的起停阶段或大幅度进给时,采用积分分离 PID 控制算法取消积分校正,只保留比例、微分运算,这样可减少在电机运行过程中积分校正对控制系统动态性能的影响。而当平台的实际位移与给定目标位移的误差小于设定值时,则自动恢复积分校正作用,以消除控制系统的稳态误差。积分分离 PID 控制技术弥补了模拟 PID 控制的不足,改善了控制系统的性能,减少了超调量,缩短了调整时间,使线性电机系统能获得较高的响应速度、稳定的控制精度和良好的控制效果。

随着现代控制理论的发展,出现了许多新型的控制方法,诸如自适应控制、滑模变结构控制、模糊

控制、神经网络控制、智能控制等等^[8-9]。相信把这些先进的控制方法应用到本定位平台的控制系统设计中,平台将获得更好的性能和更高的定位精度,这有待于以后进行完善。

度达到 $\pm 0.5\mu\text{m}$,在 y 方向和 z 方向的精度误差不大于 $\pm 2.0\mu\text{m}$ 。可广泛地应用于微电子制作专用设备上,如IC芯片制作的光刻设备、金丝球焊设备等。大大提高我国微电子设备的性能和制造技术水平,满足信息产业的生产和发展需要。

4 结束语

通过本控制系统,磁悬浮平台在 x 方向定位精

参考文献:

- [1] Schweitzer G, Traxler A, et al. 主动磁轴承——基础、性能及应用[M]. 北京: 新时代出版社, 1997.
- [2] 纳斯尔 S A, 波尔达 I. 直线电机[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 102- 107.
- [3] 连级三. 磁浮列车原理及技术特征[J]. 电力机车技术, 2001, 24(3): 23- 26.
- [4] 江浩, 连级三. 单磁铁悬浮系统的动态模型与控制[J]. 西南交通大学学报, 1992, 83(1): 60- 67.
- [5] 李云钢, 常文森, 龙志强. EMS磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(2): 93- 96.
- [6] 王洪礼, 吴志强. 磁力轴承转子系统的Hopf分岔[J]. 天津大学学报, 1994, 27(6): 752- 757.
- [7] 姚宏, 徐建学. 一类非线性磁浮控制系统局部分岔特性研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 61- 64.
- [8] 宋洪涛, 宾鸿赞. 把神经网络应用于丝杠磨削过程的建模与控制[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 364- 367.
- [9] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

Research on the structure design of a precision stage based on magnetic levitation technology and used in micro- electron manufacturing field

SONG Wen_rong¹, YU Guo_fei², SUN Bao_yu¹, WANG Yan_feng¹, HE Hui_yang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. Mechanical Science and Engineering Academy of Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A new kind of stage which can be positioned accurately and quickly is presented in this paper. Magnetic levitation (maglev), linear drive and control technologies are applied in the stage. With a maglev system providing normal lift force and plane guiding force, the structure of the stage is simple and it can be controlled easily. By using linear synchronous motor, vibration caused by linear induction motor disappears, which benefits the maglev controlling system. Because of levitation and non-contact driving, there are no friction, wearing, metal particle, grease pollution and linking gap, and the total weight of the stage is lighter. All above improve its dynamic response frequency and the positioning accuracy. This stage meets the requirements of modern information industry to super-clean condition, high accuracy and high efficiency in micro-electron manufacturing field.

Key words: magnetic levitation; position stage; linear motors; non-contact drive; Hopf bifurcation

作者简介: 宋文荣(1967), 男, 江西鹰潭人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事精密机械制造及自动化、微机械设计制造、机电系统动力学等方面的研究。