

文章编号 1004-924X(2003)04-0338-05

直线驱动磁悬浮进给机构的研究

孙宝玉^{1,2}, 梁淑卿², 宋文荣¹, 王延风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. 长春工业大学 机电学院, 吉林 长春 130012)

摘要:分析了传统机械进给机构的特点,设计了一种集磁悬浮和线性驱动技术为一体的精密进给平台机构,此机构采用直线同步电机对悬浮的平台机构提供驱动力。这种驱动方式避免了传统驱动方式造成的摩擦、弹性变形、滞后和非线性误差,实现了平台进给机构在水平和垂直两方向的无接触支撑和导向。针对磁悬浮平台进给机构设计了直线同步电机的结构,并对直线电机产生的磁力进行分析计算。直线驱动技术在磁悬浮平台进给机构中的应用使进给系统具有响应快速、刚度高以及定位精确的特点,能够满足微电子设备高精度、高效率 and 超洁净加工的需要。

关键词:直线驱动;磁悬浮平台;直线同步电机;数字 PID 控制

中图分类号:TN403 文献标识码:A

Linear drive technology and its application to a magnetic levitation stage in the microelectronic field

SUN Bao-yu^{1,2}, LIANG Shu-qing², SONG Wen-rong¹, WANG Yan-feng¹, HE Hui-yang¹

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

2. *Changchun University of Technology, Academy of Mechanic and Electronic Engineering, Changchun 130012, China)*

Abstract: Having analyzed the features of the conventional mechanical drive mechanism, a new kind of precision positioning stage is presented in this paper, which adopts both magnetic levitation and linear drive technologies. This drive mechanism provides power with a linear synchronous motor avoiding friction, elastic distortion, hysteresis and non-linear error, and can realize non-contact support and guidance in the horizontal and vertical directions. The structure of the linear synchronous motor for the drive mechanism was designed, and its magnetic force was analyzed and calculated. The application of the linear drive technology in the driving mechanism makes the system respond quickly and be posited accurately. With characteristics of high stiffness, high accuracy and high efficiency, the driving mechanism can meet the needs of high accuracy and high efficiency at super-clean condition in the micro-electron manufacturing field.

Key words: linear drive; magnetic levitation stage; linear synchronous motor; digital PID control

收稿日期:2003-01-16;修订日期:2003-02-19.

基金项目:吉林省科委自然科学基金资助项目(No. 20020621)

1 引言

现代制造技术正朝着高速化、精密化和模块化方向发展^[1],对精密制造设备的切削参数要求不断提高,进给系统不仅要求速度快,与高速主轴相匹配,而且要求动态特性好,能实现快速的伺服控制和误差补偿,具有较高的定位精度和刚度。在微电子领域,传统的进给系统主要是“旋转伺服电机+滚珠丝杠”驱动方式,其所能达到的最高进给速度为 90~120 m/min,最大加速度只有 1.5 g。同时,从电机主轴到工作台之间存在着许多中间环节,如联轴节、丝杠、螺母、轴承等。这些中间环节不仅加大了系统的转动惯量,影响系统动态特性,而且会产生摩擦、弹性变形、滞后和许多非线性误差,影响加工精度。直线驱动技术是采用直线电机直接驱动工作台实现进给运动,设备进给传动链长度为零,即所谓的“直接驱动”或“零传动”。它取消了动力源和工作台之间的所有中间传动环节,简化了系统的结构,保证系统运行可靠,维护简单,且精度和重复精度高。由于直线电机是由旋转电机展开形成,在理论上其行程不受限制。直线电机可以提供很宽的调速范围,从每秒几 μm 到数 m,加速度大,运动平稳。组成直线电机的初级和次级结构都很简单,特别是次级,可以借用装置本身的一部分,或者它就是电机运行的轨道。直线电机作为一种新型的驱动装置,在微电子制造领域磁悬浮平台进给机构中充分显示了它的优越性。

2 磁悬浮进给机构中直线电机的结构设计

磁悬浮平台进给机构是针对微电子行业高精度的 IC 芯片加工和超洁净的加工环境而设计制造的一种新型快速进给机构。它取代传统的旋转电机与滚珠丝杠驱动方式,将显著提高产品的生产率,改善加工环境。芯片的整个加工工艺过程从划片、粘片、金丝球焊到封装过程中除划片外,其余工序均为无切屑超精加工。整个加工车间空气含尘指数控制极为严格,且配有专门的设施除尘,如风淋室。由于芯片尺寸很小,加工面积达到 μm 级甚至更小,有些灰尘的大小几乎超过了加

工面积尺寸,如附着在加工表面将严重影响芯片的加工精度。为了避免常规的接触支撑式机械平台导致的摩擦、粉尘污染、动态响应迟钝和速度慢等缺点,并考虑到常规切削加工方法出现的漏磁粘屑现象,本文采用磁悬浮技术与直线驱动技术设计了适合于微电子领域无切屑精密、超精密加工的悬浮平台进给机构。此平台进给机构能实现在水平和垂直两方向的无接触支撑和无接触导向,具有无污染、响应快速、刚度高和精确定位等优点^[2-3]。

2.1 磁悬浮平台进给机构的原理

直线电机驱动最高速度为 1~3 m/s,因而能够满足快速进给的需要。磁悬浮系统可分为斥力型和吸力型两类。斥力型磁悬浮系统虽结构简单,但控制精度低^[4],难以满足高精度加工需要。相比之下,吸力型反馈控制磁悬浮系统虽结构复杂,但其运动、定位精度易于控制,所以我们采用稳定悬浮与直线驱动合二为一的常导磁吸型平台结构。其结构如图 1 所示,将导轨固定,平台依靠

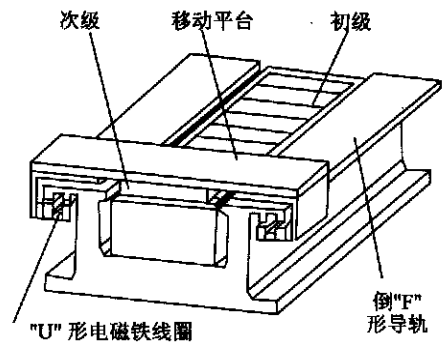


图 1 磁悬浮平台结构原理图

Fig. 1 Structure of the magnetic levitation stage.

与其装配成一体的 U 形电磁铁励磁线圈与倒 F 形导轨耦合作用而悬浮,即当线圈通电后在 U 形电磁铁中产生磁场,该磁场感应导轨使之对平台产生一向上的磁吸力,当吸力与平台重力平衡时,平台便悬浮于空中。此时,由安装于平台下面的次级和导轨中间的初级组成的直线电机驱动平台沿导轨方向移动,这就是该平台进给机构的原理。考虑到平台运动过程中由于结构不对称导致磁力分布不均,产生左右偏摆运动,造成运动误差和导向误差,将严重影响平台的定位精度,图示结构既满足悬浮需要又能实现自动导向。因为磁吸力始终集中在 U 形磁极与倒 F 形导轨相对的位置,一

旦出现左右偏摆现象,平台会自动对中。

2.2 直线同步电机的结构设计

在制造行业中,进给系统用直线电机主要是交流直线电机。交流直线电机可分为感应式和同步式两大类。虽然同步式直线电动机比感应式直线电动机成本高、装配困难,但其效率较高、结构简单、次级不用冷却、控制方便、易于达到高性能要求。因此,在磁悬浮进给机构中采用直线同步电机做为驱动装置。

由于微电子产品加工设备加工方法的特殊性(即无切屑加工),无进给冲击力,振动小,无切削颤振现象,所以平台质量轻,惯性小,所需进给推力不大,正合乎直线同步电机使用需求。平台是进给系统的运动部件,其质量与进给系统的最大加速度成反比,那么,要提高进给系统的加速度就必须减轻平台的质量^[5]。本文采用高强度的轻质材料铝合金制作平台框架,U形电磁铁与框架采用螺钉联接,直线电机安装在平台与导轨之间,如图 1 中所示,采用次级移动,初级固定的形式。次级固定在平台移动部件的下面,采用实心铁磁材料制作,初级绕组用叠片组成,以减小由交流激磁引起的涡流,横向通过的直流磁通不受叠片结构的影响^[6]。将直流激磁绕组和三相电枢绕组安装在 U 形铁心上,以构成初级,再将整个初级结构安置在 U 形导轨中间的凹槽中。直线同步电机结构如图 2 所示,因直线同步电机次级的转速始终达不到同步速度^[7],否则电机中的气隙行波磁场就不会使次级产生电磁推力,不能实现直线运动。直线同步电机滑差率及次级运行速度为,

$$s = (V_s - V) / V_s$$

$$V = (1 - s) V_s$$

其中, s 滑差率; V 一次级运行速度, m/s;

V_s 电机同步运行速度, m/s。

电机运行时,滑差率 s 在 0 与 1 之间,所以 $V < V_s$ 。但是,对于直线同步电机,次级运行速度等于电机同步速度,(即: $V = V_s$),则滑差率 s 等于 0,无法产生电磁推力。

为此,采用沿运动方向开槽的次级形式解决上述问题。如图 2 所示,设定开槽的次级结构的周期为 2τ (τ 为三相初级绕组的极距),在次级槽的凸、凹处有明显的磁极存在,这样造成初级和次级气隙分布不均匀,当初级绕组产生的磁势为正

弦时,气隙磁密就不是正弦分布,除基波外还有一系列谐波,这些谐波会在次级产生推力,促使次级沿平行于初级的方向上作直线运动。同时,要想增大系统的推力,就必须减小运动部件的质量,为使直线电机推力满足进给系统的需要,可采用有限元分析和优化设计方法求得所要求的动、静刚度条件下整个平台最轻的质量^[8]。

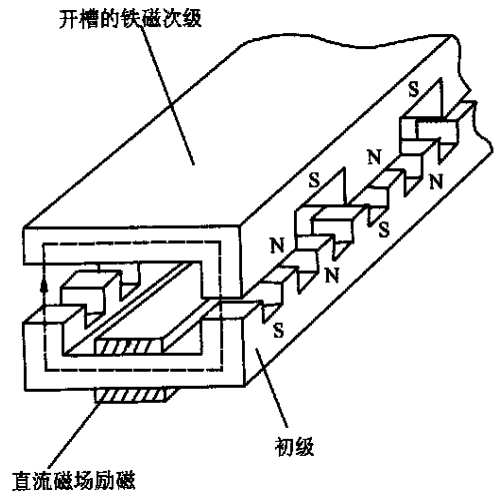


图 2 直线同步电机结构

Fig. 2 Structure of the linear synchronous motor

2.3 直线同步电机的推力和垂直力的计算

直线同步电机做为悬浮进给系统的推进装置,采用直流磁场激磁,电机产生的推力和垂直力通过计算电动机气隙磁场储存的能量来求得。直线同步电机的纵向视图如图 3 所示。

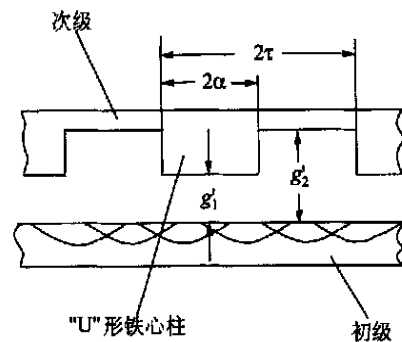


图 3 直线同步电机纵向视图

Fig. 3 Longitudinal view of the linear synchronous motor

U 形铁心的一个心柱下的气隙能量 W_m 为:

$$W_m = \frac{1}{2} u_0 2 \int [H(x)]^2 g(x) dx, \quad (1)$$

其中, u_0 —空气磁导率

2 —铁心宽度 (U 形铁心一个心柱的宽度)

$g(x)$ —沿运动方向在某一点 x 上的气隙长 ($g(x) = k_c g_0(x)$, 其中, $g_0(x)$ 为实际气隙长, k_c 为卡氏系数。)

$H(x)$ —磁场强度

由交流和直流激磁产生的磁动势分布可以表示为,

$$J(x) = J_0 + J_1 \sin(x + \alpha), \quad (2)$$

其中, α —功率角

$2J_0$ —总的直流磁势

J_1 —每极交流磁势的基波分量, 且其表达式为,

$$J_1 = \frac{3}{2} \frac{2 K W I_1}{p}, \quad (3)$$

K —绕组分布系数

W —每相匝数

I_1 —初级电流

p —极数

$g(x)$ 的变化如图 3 所示, 而

$$H(x) = \frac{J(x)}{g(x)}, \quad (4)$$

那么对于极数为 2 的直线电机来说, 联立方程

(1) —(4) 求解 W_m 得,

$$W_m = \frac{1}{g_1} u_0 J_1^2 \left[\left(1 + \frac{1}{k_c} \right) (1 + 2C^2) + \left(1 - \frac{1}{k_c} \right) \left(\frac{1}{2} \cos 2\alpha \sin 2\alpha + 4C \cos \alpha \sin \alpha \right) \right], \quad (5)$$

其中, k_c 为卡氏系数, α 、 g_1 和 g_2 如图 3 所示,

$$C = J_1 / J_0; k = g_2 / g_1; g_1 = k_c g_{10}; g_2 = k_c g_{20}; \alpha = \arctan \frac{b}{a}$$

求得 W_m , 则推力 F_x 和吸引力 F_y 可分别由下面两式求出,

$$F_x = \left(\frac{\partial W_m}{\partial x} \right) J_1, \quad (6)$$

$$F_y = \left(\frac{\partial W_m}{\partial y} \right) J_1, \quad (7)$$

则对于 U 形铁心的一个心柱,

$$F_x = \frac{1}{g_1} u_0 J_1^2 \left(1 - \frac{1}{k_c} \right) (\sin 2\alpha \sin 2\alpha + 4C \sin \alpha \cos \alpha), \quad (8)$$

$$F_y = - \frac{1}{g_1^2} u_0 J_1^2 \left[\left(1 + \frac{1}{k_c} \right) (1 + 2C^2) + \left(1 - \frac{1}{k_c} \right) \left(\frac{1}{2} \cos 2\alpha \sin 2\alpha + 4C \cos \alpha \sin \alpha \right) \right], \quad (9)$$

因为整个平台在运动过程中始终处于悬浮状态, 前进过程中无阻力, 则由推力 F_x 可求得直线电机次级沿运动方向运动的加速度:

$$a = F_x / m, \quad (10)$$

式中, m 为整个进给运动平台的总质量, 它包括平台质量、U 形电磁铁励磁线圈的质量和电机次级的质量三部分。由此可见, 要想提高平台进给加(减)速度, 就必须减小运动部件质量, 增大系统的推力。在此机构研究中, 主要通过选择合适型号的电机增大推力以及采用结构优化设计来减小运动部件的质量。

3 磁悬浮平台进给机构的运动控制

由于直线同步电机和平台之间无任何中间传动环节, 此时平台负荷的变化、直线同步电机的“端部效应”及其产生的垂直吸力都是影响平台稳定悬浮与驱动的外界干扰因素。这些干扰因素无任何缓冲环节直接作用到直线伺服系统上, 如参数调节不当, 就会造成系统性能指标降低甚至导致系统失控而振荡。因此, 必须采用全闭环控制才能满足进给系统需要。用涡流传感器检测悬浮系统的间隙, 用光栅尺检测机构运动位移, 采用数字 PID 控制系统来实现直线电机的伺服控制^[8-11]。此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直线电机的运行过程, 同时消除控制系统的稳态误差, 使直线驱动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。

4 结束语

直线驱动技术在磁悬浮平台进给机构中的应用, 可实现无超调定位^[12], 使系统调节质量和定位精度提高, 且进给系统移动快速, 定位时间短, 显著提高设备的生产率。悬浮平台无接触、无摩擦、无粉尘污染及移动快速等特点, 满足微电子产品加工过程中高效率、高精度和超洁净加工环境的需要。

参考文献:

- [1] 王先逵,陈定积,吴丹. 机床进给系统用直线电动机综述[J]. 制造技术与机床,2001,8:18-20.
WANG X K, CHEN D J, WU D. Overview of linear motor used in machine tool feeding system[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2001,8:18-20. (in Chinese)
- [2] KUZIN A. Precision magnetically suspended xy stage[A]. *Fourth International Symposium on Magnetic Bearings[C]*. 1994. 177-182.
- [3] AUER F, Van beek H F. Practical application of a magnetic bearing and linear propulsion unit for six degrees of freedom positioning[A]. *Fourth International Symposium on Magnetic Bearings[C]*. 1994. 183-188.
- [4] Tsukamoto O, Yasuda K, Chen J Z. A new magnetic levitation system with AC magnets[J]. *Transactions on Magnetics of IEEE*, 1988,24(2):1497-1500.
- [5] 夏红梅,张柏霖. 直线电动机高速进给单元的关键技术[J]. 制造技术与机床,2001,7:22-24.
XIA H M, ZHANG B L. Key technology for high speed feed unit driven by linear motor[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2001,7:22-24. (in Chinese)
- [6] 纳斯尔 S A,波尔达 I. 直线电机[M]. 北京:科学出版社,1982.
NASAR S A, BOLDEA I. *Linear motor* [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [7] 上海工业大学,上海电机厂. 直线异步电动机[M]. 北京:机械工业出版社,1979.
Shanghai University of Technology, Shanghai Motor Factory. *Linear Nonsynchronous Motor* [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1979. (in Chinese)
- [8] 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.
TAO Y H, YIN Y X, GE L Sh. *Control and application of novel PID* [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [9] 李庆雷,王先逵. 永磁交流同步直线电机位置伺服控制系统设计[J]. 中国机械工程学报,2001,5:577-581.
LI Q L, WANG X K. Position servo control system design for permanent magnet linear synchronous motor[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001,5:577-581. (in Chinese)
- [10] 刘品宽,孙立宁,曲东升,等. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. 光学 精密工程,2002,10(2):143-147.
LIU P K, SUN L N, QU D SH, *et al.* Dynamic analysis on a novel nano-positioning stage driven by PZT[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(2):143-147. (in Chinese)
- [11] 孙立宁,荣伟彬,曲东升,等. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. 光学 精密工程,2001,9(6):514-518.
SUN L N, RONG W B, QU D SH, *et al.* Research on a large travel and high resolution rotary micro-driver based on micro-manipulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(2):143-147. (in Chinese)
- [12] BERENS P. Linear Drives in the Focal Point[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2001,4:47-48.

作者简介:孙宝玉(1971-),女,吉林磐石人,1997年毕业于长春工业大学研究生部机电一体化专业,获工学硕士学位,现为长春工业大学机电学院讲师,2001年3月在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读博士学位,方向为机械制造及自动化。