

文章编号 1004-924X(2004)04-0411-04

## 磁悬浮进给机构的磁力耦合

宋文荣<sup>1,2</sup>, 陈阳<sup>3</sup>, 宋晓东<sup>4</sup>, 何惠阳<sup>2</sup>, 郭凡林<sup>1</sup>

(1. 厦门宏发电声有限公司, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国电子科技集团公司 第48研究所, 湖南 长沙 410111; 4. 吉林建筑工程学院 基础科学系, 吉林 长春 120021)

**摘要:** 研究了磁悬浮进给机构在进给运动时的磁力耦合现象。进给机构的磁悬浮系统采用了具有自动归中作用的V型导轨结构, 保证了机构进给运动的导向精度, 可应用于光刻机等精密光机系统, 且满足超净无尘及精密定位要求。通过分析机构磁悬浮系统中电磁铁的磁力分布, 给出了耦合磁力的计算公式。分析结果表明: 磁悬浮系统在其控制过程中存在着磁力耦合, 具体表现为: 如果进给运动时平台在水平方向发生偏移, 那么左右两侧电磁铁的磁力在水平及水平垂直方向将产生相互耦合作用; 而垂直方向的偏移不会引起磁力的耦合。在控制系统中引入补偿器后, 可使系统解耦, 因产生的耦合磁力很微小, 可以忽略不记。

**关键词:** 磁悬浮; 进给机构; 电涡流传感器; 磁力耦合

中图分类号: TH133.3 文献标识码: A

## Magnetic force coupling in maglev feeding mechanism

SONG Wenrong<sup>1,2</sup>, CHEN Yang<sup>3</sup>, SONG Xiaodong<sup>4</sup>, HE Huirong<sup>2</sup>, GUO Fanlin<sup>1</sup>

(1. Xiamen Hongfa Electroacoustic Co., LTD, Xiamen 361021, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. 48th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha 410111, China; 4. Department of Basic Science, Jilin Institute of Construction Engineering, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The magnetic coupling force existing when a magnetic levitation (maglev) feeding mechanism moves was analyzed. With a V-shaped guide rail in its maglev system and a balance point automatically progressed, the maglev feeding mechanism has a high guiding accuracy, and can be applied to IT manufacturing devices such as laser lithography tools to meet the needs of the super clean condition and the precision positioning. Then the distribution of the magnetic forces in the maglev system was analyzed, and a set of formulas of the coupling was derived. The results show that the magnetic force coupling exists in the maglev system's controlling process. When the feeding mechanism moves its offset along the y axis, the magnetic forces of the two magnets along the y axis and the z axis must couple each other; but when the feeding mechanism moves its offset along the z axis, there will be no magnetic force coupling between the two magnets along the y axis and the z axis. The magnetic force coupling can be reduced or even be eliminated after

收稿日期: 2004-02-18; 修订日期: 2004-06-08.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20020621); 中国科学院研究生科学与社会实践创新研究专项资助项目(科发人教字[2002]118号)

a decoupling control with compensation added into the maglev controlling system.

**Key words:** magnetic levitation(maglev); feeding mechanism; eddy sensor; magnetic force coupling

## 1 引言

进给机构是自动化/半自动化集成电路(IC)加工设备中不可或缺的重要机械部件之一,电子元器件的精确定点输送、印刷电路基板的精密进给等等都依赖于精密进给机构来实现。针对集成电路制作的高集成度、超细线宽、高加工尺寸精度、超洁净无尘环境等新技术要求,利用磁悬浮技术,结合直线电机能实现无接触驱动的性能特征,研究设计了一种磁悬浮进给机构<sup>[1-2]</sup>。该机构做进给运动时无摩擦磨损,不产生金属粉尘污染,无须油脂润滑,这既可满足超洁净无尘制造环境的要求,又可提高机构的运动灵敏性,有利于实现更高的进给定位精度。

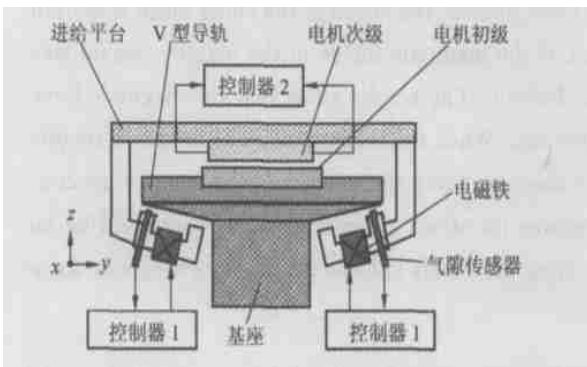


图1 磁悬浮进给机构结构简图

Fig. 1 Structure of maglev feeding mechanism

## 2 磁悬浮进给机构的结构

磁悬浮进给机构的结构模型如图1所示。导轨下边是斜平面,对称分布成V型。两边的U型电磁铁分别与导轨斜平面平行放置,并与进给平台联成一体。直线电机的次级安装在平台的下方,初级固定安装在运行导轨的上平面。工作时,电磁铁线圈通电产生磁力将整个平台升起,控制通电电流的大小,保持电磁铁磁极表面与导轨斜平面的气隙为 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ <sup>[3-4]</sup>,同时,电机次级与初级的气隙为 $0.5\sim 0.8\text{ mm}$ ,平台与导轨之间没有任何接触。在初级的驱动下,次级将带动平

台沿V型导轨在图示 $x$ 方向作直线的无摩擦进给运动。进给运动的精度控制另文叙述。

## 3 进给机构的磁力耦合

### 3.1 进给机构的磁力分析

单个电磁铁与导轨面之间产生的磁力如图2所示。铅垂于导轨斜面的磁力 $F$ 可以分解为垂直与水平两个方向的分量 $F_z$ 和 $F_y$ 。两个电磁铁产生的磁力于垂直方向分量的合力 $2F_z$ 就是机构所需的磁悬浮力,于水平方向的两个分量在理想状况下应大小相等、方向相反。当水平分量大小不等时,平台进给移动时会发生水平 $y$ 方向的偏移。此时电磁铁与导轨斜面之间的气隙发生变化,磁力小的一侧气隙变大,磁力大的一侧气隙变小。与此同时,电涡流气隙传感器的感应电压也相应改变,于是通过控制器的处理和放大作用,及时修正各电磁铁的输入电压,如气隙变大一侧的电磁铁则增大其输入电压,而气隙变小一侧的电磁铁则减小其输入电压,籍此改变各电磁铁磁力的大小,使水平方向两磁力大小相等,平台重新回到水平平衡位置,与导轨两侧斜面保持相等的气隙 $g$ 。因此进给机构具有自动归中作用,可实现较高的导向精度。

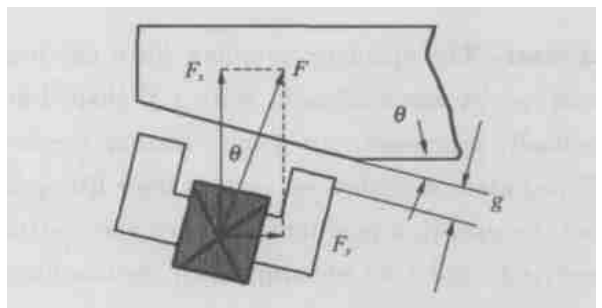


图2 电磁铁磁力分析图

Fig. 2 Magnetic force analyzing

很显然,对于该进给机构,气隙的变化在引起水平方向磁力改变的同时,必定会引起总磁力的改变,由此垂直方向的磁力分量随之变化。所以,两方向的磁力存在着耦合现象。

### 3.2 电磁铁磁力的计算

单个电磁铁产生的磁力由下式计算确定<sup>[5-6]</sup>。

$$F(i, g) = \frac{1}{4} \mu_0 n^2 A \frac{U^2(t)}{R^2 g^2(t)}, \quad (1)$$

由磁力分析图 2 可得水平分量和垂直分量分别为

$$\begin{cases} F_y(i, g) = K \frac{U^2(t)}{g^2(t)} \sin \theta \\ F_z(i, g) = K \frac{U^2(t)}{g^2(t)} \cos \theta, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\mu_0$ —空气磁导率;

$n$ —电磁铁绕组的匝数;

$A$ —铁芯横截面积;

$U(t)$ —电磁铁输入控制电压;

$\theta$ —导轨斜面与水平面的夹角(参见图 2);

$R$ —电磁铁绕组的电阻;

$g(t)$ —电磁铁与导轨斜面的气隙;

$$K = \frac{\mu_0 n^2 A}{4 R^2}。$$

### 3.3 电涡流传感器输出电压的计算

依据电涡流气隙传感器的工作原理, 通过检波、滤波和线性矫正电路将被测金属相对传感器探头之间的距离变化转换成电压变化。故传感器的输出特性气隙-电压曲线如图 3 所示。理想的气隙-电压曲线是斜率恒定的直线, 其中  $a-c$  段为线性区, 即有效测量段,  $b$  为传感器的线性中点。机构平衡时的气隙应尽量与传感器的线性中点  $b$  相吻合。在线性区内输出感应电压  $u(t)$  与气隙  $g(t)$  的关系可用式(3)表示

$$u(t) = -k_s g(t), \quad (3)$$

式中  $k_s$  为直线的斜率。为了提高传感器的分辨率, 一般电路设计使  $k_s > 10$ 。

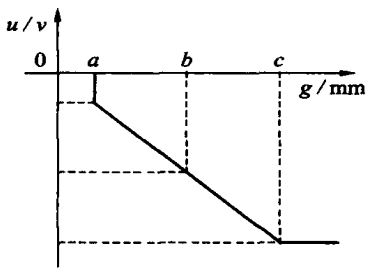


图 3 气隙—电压曲线

Fig. 3 Curve of  $g-u$

如果气隙变化量为  $\Delta g$ , 则传感器输出电压变

化量的绝对值为

$$|\Delta u| = | -k_s \Delta g | = k_s \Delta g, \quad (4)$$

### 3.4 耦合磁力的计算

假定进给平台在悬浮过程中受到水平正  $y$  方向扰动力的作用, 于  $y$  方向向右产生  $\Delta y$  的侧移, 参照图 2, 则左右两侧传感器的气隙改变量均为

$$\Delta g = \Delta y \sin \theta, \quad (5)$$

此时左侧传感器的气隙为  $g_l = g_0 - \Delta y \sin \theta$ , 右侧传感器的气隙为  $g_r = g_0 + \Delta y \sin \theta$ ,  $g_0$  为平衡时的悬浮气隙。

将式(5)代入式(4)得进给机构两侧传感器的感应电压变化量的绝对值为

$$|\Delta u| = k_s \Delta y \sin \theta$$

则经过控制器后最终输入到两侧电磁铁的控制电压分别为

$$U_l = U_0 - k_s \Delta y \sin \theta$$

$$U_r = U_0 + k_s \Delta y \sin \theta$$

式中  $U_0$  为悬浮平衡时电磁铁的输入控制电压。

将  $g_l$ 、 $g_r$ 、 $U_r$  和  $U_l$  代入式(2), 计算左右两侧电磁铁在  $y$ 、 $z$  方向产生的磁力分别为

$$\begin{cases} F_{ly} = K \frac{U_l^2}{g_l^2} \sin \theta = K \left( \frac{U_0 - k_s \Delta y \sin \theta}{g_0 - \Delta y \sin \theta} \right)^2 \sin \theta \\ F_{lz} = K \frac{U_l^2}{g_l^2} \cos \theta = K \left( \frac{U_0 - k_s \Delta y \sin \theta}{g_0 - \Delta y \sin \theta} \right)^2 \cos \theta, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_{ry} = K \frac{U_r^2}{g_r^2} \sin \theta = K \left( \frac{U_0 + k_s \Delta y \sin \theta}{g_0 + \Delta y \sin \theta} \right)^2 \sin \theta \\ F_{rz} = K \frac{U_r^2}{g_r^2} \cos \theta = K \left( \frac{U_0 + k_s \Delta y \sin \theta}{g_0 + \Delta y \sin \theta} \right)^2 \cos \theta, \end{cases} \quad (7)$$

因为  $k_s > 10$ , 所以可以证明

$$\begin{cases} F_{ly} < F_{ly0} = F_{ry0} = K \frac{U_0^2}{g_0^2} \sin \theta < F_{ry} \\ F_{lz} < F_{lz0} = F_{rz0} = K \frac{U_0^2}{g_0^2} \cos \theta < F_{rz}, \end{cases} \quad (8)$$

式中  $F_{l0}$ 、 $F_{r0}$  为悬浮平衡时左右两侧电磁铁  $y$  向和  $z$  向的磁力,  $F_{ly0}$ 、 $F_{ry0}$ 、 $F_{lz0}$ 、 $F_{rz0}$ 。

在实际磁悬浮系统结构中, 整个悬浮平台的质量  $m = 6.0 \text{ kg}$ , 铁芯的横截面积  $A = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , 空气磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ , 导轨斜面与水平面的夹角  $\theta = 15^\circ$ , 电磁铁线圈匝数

$n = 100$ , 电阻  $R = 2 \Omega$ 。初始平衡点的气隙  $Z_0 = 0.4 \text{ mm}$ , 根据式(2)计算线圈输入控制电压  $U_0 = 1.49 \text{ V}$ , 传感器的比例放大系数  $k_s = 15 (\text{V}/\text{mm})$ 。

假定向右水平偏移量  $\Delta y = 0.2 \text{ mm}$ , 将以上各参数值代入式(6)、(7)中计算得:  $F_{ly} = 2.37 \text{ (N)}$ ,  $F_{lz} = 8.84 \text{ (N)}$ ,  $F_{ry} = 14.30 \text{ (N)}$ ,  $F_{rz} = 53.37 \text{ (N)}$ 。

则计算平台  $y$  和  $z$  方向的合力大小分别为

$$\begin{cases} F_y = 2.37 - 14.30 = -11.93 \neq 0 \\ F_z = 8.84 + 53.37 = 62.21 \neq mg (= 58.8), \end{cases} \quad (9)$$

式(9)例证计算显示, 磁力水平分量的合力不为零, 负号表示合力方向为水平向左。因此进给平台在该合力的作用下, 将沿负  $y$  方向向左偏移, 纠正外力干扰引起的向右偏移, 直至两侧气隙相等, 达到新的悬浮平衡状态。同时, 在此调节过程中  $z$  方向磁力的合力不等于悬浮平台的重力, 因此在垂直方向的原悬浮平衡状态被打破, 平台在  $z$  方向将发生位置的跳动。这需要通过控制器不断调节电磁铁的电压, 使垂直方向磁力的合力最终等于平台的悬浮重力, 实现新的悬浮平衡。

以上分析结果表明: (1) 只要平台在水平  $y$  方向发生偏移, 就一定会使左右两侧电磁铁在水

平  $y$  及垂直  $z$  方向产生相互耦合作用。(2) 在进给运动过程中, 机构的水平  $y$  方向左右偏移是不可避免的, 因此磁力耦合总是存在的。且偏移量越大, 耦合磁力越大, 耦合越强烈。为了减小甚至消除磁力耦合的影响, 需要在控制系统中根据偏移量的大小引入交叉耦合反馈, 实现解耦控制。

## 4 结 论

进给机构采用了 V 型导轨结构的磁悬浮系统, 这不同于列车的磁悬浮系统结构。列车的垂直悬浮力和水平导向力是由两套相互独立的磁悬浮系统产生, 所以磁悬浮系统的结构相对复杂, 所需控制环节繁多, 成本昂贵。进给机构则将悬浮力和导向力产生系统合二为一, 既简化了结构, 减少了控制环节, 降低了制作成本, 又可以保证进给运动的导向精度。

只要平台进给运动时在水平  $y$  方向发生偏移, 就一定会使左右两侧电磁铁的磁力在水平  $y$  及垂直  $z$  方向产生相互耦合作用。在控制系统设计时引入补偿器可使系统解耦, 此时耦合作用将能得以减轻或消除。

## 参考文献:

- [1] 宋文荣, 于国飞, 孙宝玉, 等. 微电子制造领域的磁悬浮精密定位平台的结构设计研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 271-275.  
SONG W R, YU G F, SUN B Y, et al. Research on the structure design of a precision stage based on magnetic levitation technology and used in micro electron manufacturing field[J]. *Optic and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 271-275. (in Chinese)
- [2] 宋文荣, 于国飞, 王延凤, 等. 磁悬浮微进给机构的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 1090-1093.  
SONG W R, YU G F, WANG Y F, et al. Research on micro feed mechanism based on magnetic levitation technology [J]. *Journal of Chinese Mechanical Engineering*, 2003, 14(13): 1090-1093. (in Chinese)
- [3] XIA Z, CHEN Q Y, MA K B, et al. Design of superconducting magnetic bearings with high levitation force for fly-wheel energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1995, 5(2): 622-625.
- [4] BOEHM J, GERBER R, HARTLEY J R, et al. Development of active magnetic bearings for high speed rotors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1990, 26(5): 2544-2546.
- [5] 施韦策 G, 布鲁勒 H, 特拉克斯勒 A. 主动磁轴承基础、性能及应用[M]. 北京: 新时代出版社, 1997.  
SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. *The foundation, performance and applications of active magnetic bearing* [M]. Beijing: Xinshidai Press, 1997. (in Chinese)
- [6] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.  
ZHAO K H, CHEN X M. *Electromagnetics* [M]. Beijing: People's Education Press, 1978. (in Chinese)

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后, 现在厦门宏发电声有限公司博士后工作站从事技术研发工作, 主要研究方向为光学精密机械、微机械及其自动化, 在国家一级刊物上发表论文 10 余篇。