

# 新型平面磁阻电动机的特性分析

张 宙<sup>1</sup>, 潘剑飞<sup>1</sup>, 简伟泉<sup>2</sup>, 赵世伟<sup>1</sup>

(1. 香港理工大学电机工程系, 香港)

(2. 先进器材有限公司, 香港)

**摘 要:**论述了一台应用于工业位置控制的新型平面开关磁阻电动机。该二维电机机械结构简单, 性能可靠, 并且可以工作在恶劣的环境中。由于该电机具有独特的磁路结构, 在  $x$  和  $z$  方向的互感几乎为零, 从而无需引入任何解耦装置。该新型磁阻电机二维运动系统是传统的  $X-Y$  工作台理想的替代品, 将应用于工业产品自动化的加工和组装领域中。

**关键词:**开关磁阻; 平面电机;  $X-Y$  工作台

## Novel Planar Switched Reluctance Motor for Industrial Applications

CHEUNG Norbert C<sup>1</sup>, PAN Jian-fei<sup>1</sup>, GAN Wai-chuen<sup>2</sup>, ZHAO Shi-wei<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

(2. ASM Assembly Automation Ltd., Hong Kong)

中图分类号: TM3 文献标识码: B 文章编号: 0219-2713(2006)04-0001-04

### 0 引言

现代工业领域产品的加工或组装离不开精确的二维控制系统。传统的  $X-Y$  工作台利用旋转电动机配合机械传输部件实现直线运动, 将两个直线系统分别叠加在一起, 实现平面运动。该方法具有成本高, 精度低, 复杂的机械结构并且需要经常的维修和保养。目前, 人们尝试使用直接驱动式运动系统来取代旋转-直线的传统方法来实现直线或者是平面运动。

Sawyer 电机<sup>[1]</sup>是第一台可以实现二维运动的直驱式平面电机, 也是目前应用于工业领域唯一产品。虽然它可以在整个工作空间中提供比较一致的性能和高速运行, 但是由于采用开环控制, 该运动系统会在外界的干扰下产生失步, 并且性能由此变差。后来的电机侧重于闭环控制, 由于感应电机复杂的铁心结构, 无法实现二维直接驱动的系统<sup>[2]</sup>。以永磁体来传导磁路的永磁电机开始被人们所重视。但无论将永磁体固定在动子或者是定子上, 设计者都无法避免复杂的定子线圈结

构<sup>[3]</sup>或者是在由大量高成本的 N&S 极组成的定子平面<sup>[4]</sup>。

因此, 本文的作者提出一种应用于二维运动空间的直驱式, 成本低, 简易加工的开关磁阻电机运动系统。该电机主要是由以下部分组成:

- (1) 铝制基座和叠压硅钢片组成的定子阵;
- (2) 共有 6 个叠压硅钢片组成的动子槽, 并且每个槽和相邻的槽都是负责不同方向的运动;
- (3) 两组机械导轨支撑的运动平台, 维持动子与定子间的气隙;
- (4) 每个移动平台上分别固定光栅传感器, 用来实时采集并反馈位置信息。

本文从原理和性能上对平面磁阻电机的结构进行详细论述, 文章的安排如下: 第 1 节重点论述电机的设计及其制造。系统的数学描述将在第 2 节给出。第 3 节主要介绍了该电机的磁特性, 并且将有限元分析结果和实验结果进行比较和参照。最后一节是本文结论。

### 1 电机的设计和制造

平面开关磁阻电机的设计是源自于以往课题

对一台直线开关磁阻电机的设计思想。该直线电机用来进行精密的位置控制, 实现  $1 \mu\text{s}$  的位置精度<sup>[5]</sup>。平面电机结合了直线电机的优点, 并将运动空间扩展到二维。表1列举该电机的机械参数。

表1 平面电机参数

符号	参数	具体数值
$M_x$	动子质量(X)	8.75 kg
$M_y$	动子质量(Y)	15 kg
$S$	基座尺寸	450 × 450 mm
$l$	运行空间	300 × 300 mm
$z$	气隙	0.55 mm
$N$	每项线圈匝数	160 N
$R$	各项电阻	1.5 $\Omega$
$d$	齿距	6 mm
$q$	槽距	6 mm
$u$	传感器精度	0.5 $\mu\text{m}$

平面电机是直线电机设计方案的延伸。该运动系统采用“动子激励”方式, 有以下几方面的原因:

- (1) 基座加工简单, 成本低, 并且无复杂线圈结构;
- (2) 基座尺寸易调整并且运行距离可调;
- (3) 动子线圈槽及其加载线圈容易加工;
- (4) 整体的制造成本低。

图1是电机的整体结构图。

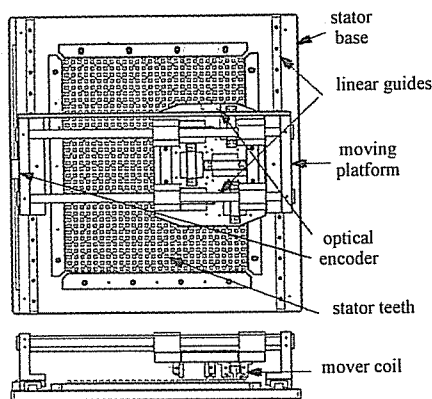


图1 电机结构 - 俯视图及其仰视图

### 1.1 动子结构

整体运动平台包含了两组三项线圈。每个激励线圈都按照互相垂直的方式排布, 并安装到动子的线圈槽内(图2)。所有的动子及其线圈具有相同的尺寸和额定参数<sup>[6]</sup>。这种各项互相垂直的结构安排具有以下方面的优点:

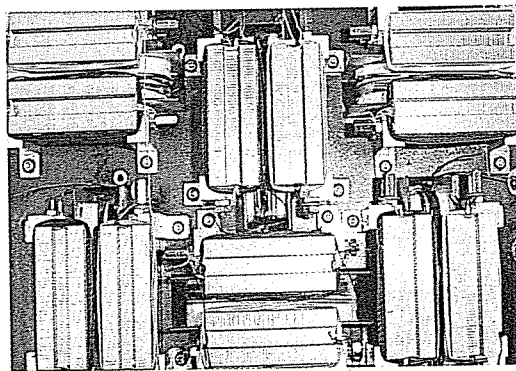
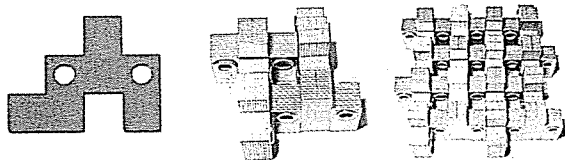


图2 动子结构

- (1) 各自独立的动子槽和线圈简化了绕线的方式从而降低生产动子移动平台的成本;
- (2) 磁通解耦式的线圈安排实现零互感;
- (3) 可以通过调整机械支撑部件而简便实现长距离运动范围。

### 1.2 定子结构

定子块采用叠压硅钢片结构, 并由环氧树脂胶连接而成; 定子由多组的定子块组成定子块方阵; 这些定子块方阵固定在铝制的基座上保持动子及定子之间的气隙长度。定子块方阵取代了以往用整体原料切割的方式, 而采用“积木”拼接的形式, 是该电机设计的独特之处<sup>[8]</sup>。定子组件, 如图3所示, 每一个都是用0.5 mm厚硅钢片叠压而成, 具有相同的参数。每4块定子组件相互垂直的穿插在对方的齿槽内, 形成定子块。继而可以根据设计尺寸的需要将一定量的定子块拼接在一起。该创新性的设计不仅减少了涡流的影响, 而且由于将“拼接组件”的概念引入到电机设计中, 从而使得电机大规模投入生产和灵活的尺寸结构成为可能。所有的电机都是从一块定子组件开始设计拼接而成。此方案大大减少生产的复杂性和加工成本。



(a) 定子单元 (b) 定子块 (c) 定子方阵  
图3 定子的形成

## 2 运动系统的表示

整体系统模型可以用如下状态方程表示为

$$\dot{I}_k = \frac{1}{L_k} \left[ U_k - \left( R_k + \frac{\partial L_k}{\partial s_{x(y)}} v_{x(y)} \right) \right] I_k \quad (1)$$

$$v_{x(y)} = [ F_{x(y)} - B_{x(y)} v_{x(y)} - F_{Lx(y)} ] / M_{x(y)} \quad (2)$$

$$s_{x(y)} = v_{x(y)} \quad (3)$$

式中:  $U_k$  和  $I_k$  分别是第  $k$  个线圈的输入电压和电流矢量 ( $k = 1 \sim 6$ );

$F_{x(y)}$ ,  $B_{x(y)}$ ,  $v_{x(y)}$  和  $F_{Lx(y)}$  分别是电磁力, 摩擦系数、速度和负载矢量;

$s_x$  和  $s_y$  是  $x$  和  $y$  方向的位置矢量。

因为各项间的互感接近于零, 所以  $R_k$  是  $L_k$  是  $6 \times 6$  对角矩阵。

每项线圈自感的表达式均可以按照傅立叶级数的形式近似展开<sup>[9]</sup>。

$$L_a = L_{ls} + L_o + L_{\Delta} \cos \left( \frac{2\pi s_{x(y)}}{p} \right) \quad (4)$$

$$L_b = L_{ls} + L_o + L_{\Delta} \cos \left( \frac{2\pi s_{x(y)} - \frac{2}{3}\pi p}{p} \right) \quad (5)$$

$$L_c = L_{ls} + L_o + L_{\Delta} \cos \left( \frac{2\pi s_{x(y)} - \frac{4}{3}\pi p}{p} \right) \quad (6)$$

式中:

$$L_o = \frac{\mu_0 d^2 N^2}{z} \frac{p-q}{p} \quad (7)$$

$$L_{\Delta} \approx \frac{\mu_0 d^2 N^2}{z} \frac{q}{p} \quad (8)$$

$L_{ls}$  是漏感。

根据计算磁共能相对位置的变化率, 电机出力方程表示如下

$$F_{x(y)} = \frac{\partial W_{co}}{\partial s_{x(y)}} \quad (9)$$

如果电机运行于非饱和区, 则出力方程可简化为

$$F_{x(y)} = \frac{1}{2} \frac{\partial L_k}{\partial s_{x(y)}} I_k^2 \quad (10)$$

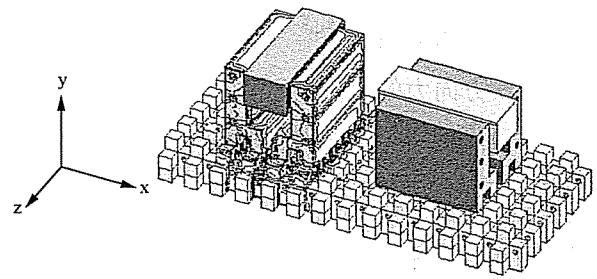
### 3 特性分析

为了精确地分析平面磁阻电机的特点, 采用三维有限元法, 从而边缘效应等三维效果可以被模拟出来; 相应的实验测试结果和有限元分析的结果进行比较。本文的有限元结果是基于英国 BATH 大学研究开发的软件平台 MEGA 仿真分析上得出。

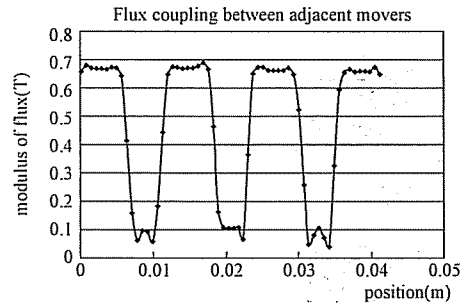
#### 3.1 互感效应

互感效应的分析是研究任何一个动子和它相

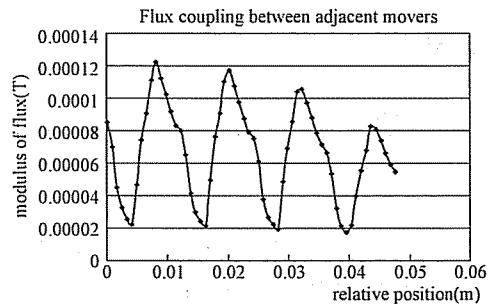
邻最近的动子之间的关系。其中一个动子通电, 观察另一个动子感应的电压或者电流情况。图 4(a) 显示了在一个动子和其相邻最近的动子的三维有限元模型上通入 8A 电流时, 磁通的分布情况。直观的说, 磁力线只在产生线圈对应动子及其对应的定子组和空气隙中分布, 而相邻的动子里几乎不存在磁力线。主要原因是因为两个动子之间的磁阻相对来说很大。对于测量互感的实验在文献 [6] 中已经详细阐明。这里给出有限元分析的仿真结果 [图 4(b), (c)]。从数值结果可以看出, 任何两个动子之间的互感效应都是可以忽略不计的。



(a) 3D 模型



(b) 通电动子



(c) 相邻动子

图 4 磁通分布

#### 3.2 单项力

由于动子各项之间是相互解耦的, 在有限元建模时只需要一个动子, 相应的定子组以及足够的空气空间就可以完整的描述该电机的有限元模

型。然后将电流作为输入,观察不同电流激励下的出力情况。出力是由力传感器测量并直接将测试结果送入计算机。具体实验方法已经在文献[6]中给出。图5给出有限元分析和实验结果的比较图。

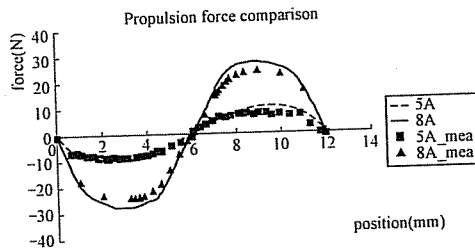


图5 不同电流激励下的输出比较

### 3.3 Z方向力偏差

在z方向力的偏差是研究在相同的x位置上,由于边缘效应,通电后力分布情况。由于详尽的描述需要四维空间表述,在此选择其中一种情况( $x=3\text{ mm}$ )来观察不同的z的位置输出力的值,如图6所示。在图6中显示有一定的偏差达到2.5N左右,但是该影响与x方向的出力相比所占比重很小,因此在控制方案中无须引入补偿系统。

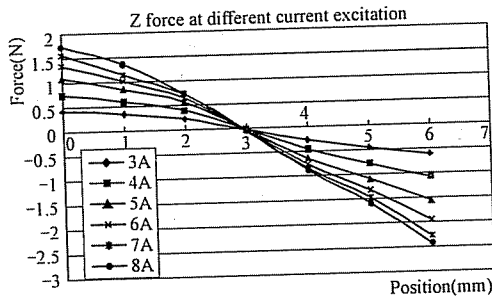


图6 相同x位置不同z位置下的力分布

## 4 结语

本文论述了平面开关磁阻电动机运动系统。该电机具有简单和灵活的机械结构。电机的6个独立动子可以单独由绕线机绕制而成;定子是由相同的定子元素排列组成的定子阵,从而使得大批量、简易的加工和生产成为可能。而且不需要引入任何复杂或者昂贵的机械部件,如永磁体、换向器等。初步的实验结果证实该电机具有良好的电磁特性,适合于高精度的位置控制领域。

### 参考文献

[1] Pelta Edmond R. Two-Axis Sawyer Motor for Motion Systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1987, 12

(5): 20 - 24.

[2] Fujii Nobuo, Kihara Toru. Surface Induction Motor for Two-Dimensional Drive[J]. *Transactions of IEE of Japan*, 1998, 118 - D(2): 221 - 228.

[3] Flores Filho A F, Susin A A, Sliveira M A. Development of a Novel Planar Actuator[A]. *In Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives*[C]. 1999, 268 - 271.

[4] Ebihara Daiki, Watada Masaya. Study of a Basic Structure of Surface Actuator[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, 25(5): 3916 - 3918.

[5] Gan Wai-Chuen, Cheung Norbert C, Li Qiu. Position Control of Linear Switched Reluctance Motors for High-precision Applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(5): 1350 - 1362.

[6] Pan Jianfei, Cheung Norbert C, Yang Jinming. High-precision Position Control of a Novel Planar Switched Reluctance Motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(6): 1644 - 1652.

[7] Liu Cheng-Tsung, Kuo Jian-Long. Experimental Investigation and 3-D Modeling of Linear Variable-reluctance Machine with Magnetic-flux Decoupled Windings[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(6): 4737 - 4739.

[8] Cheung Norbert C, Pan Jianfei, Yang Jinming. Two Dimensional Variable Reluctance Planar Motor[P]. U. S. Patent LUNGBJ/101/US, May 6, 2004.

[9] Khorrani F, Krishnamurthy P, Melkote H. Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors[M]. Springer ISBN: 3 - 540 - 00936 - 1, 2003.

### 作者简介

张宙(Dr. Norbert C. Cheung),男,博士,1981年毕业于英国伦敦大学;1987年毕业于香港大学,获硕士学位;1995年于澳大利亚新南威尔大学获得博士学位。从事运动控制,执行器的设计和电子驱动器的研究和开发工作,现执教于香港理工大学电机工程系。

潘剑飞,男,2001年毕业于长春理工大学(原长春光学精密机械学院),获得学士学位。现就读于香港理工大学电机工程系,从事开关磁阻电机设备的控制工作。

简伟泉(Dr. Wai-Chuen Gan),男,博士分别于1995,1997和2002年于香港科技大学电子工程学系获得学士、硕士和博士学位。主要从事电子设备的鲁棒控制,数字信号处理和电子驱动器的开发和研究。现工作于先进器材有限公司(香港)。

赵世伟,男,2000年毕业于中南大学信息工程学院,获得学士学位;2003年毕业于华南理工大学电力学院,获硕士学位;现就读于香港理工大学电机工程系,从事开关磁阻电机设备的控制工作。