

平面磁阻电动机的高精度位置控制

潘剑飞¹, 张宙¹, 杨金明²

(1、香港理工大学电机工程系, 2、华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 本文论述了平面开关磁阻电动机的位置控制方案。该平面电动机的移动平台包含 6 个线圈, 定子平台由层压的硅钢薄片构成。同传统的各个轴相互叠加的 X-Y 工作台相比, 该平面电机具有机械结构简单, 高性能, 并且可以在恶劣环境下工作的特点。各个轴均配有直线编码器, 使得该电机可在闭环模式下工作。该电机的动子线圈各相之间具有极小的耦合效应, 不需要任何极间的解耦装置。初步的实验结果表明该电机具有很好的控制精度。

关键词: 平面电机, 开关磁阻, 位置控制

High-Precision Position Control of a Novel Planar Switched Reluctance Motor

Jianfei Pan, N.C. Cheung, and Jinming Yang

0 引言

工业中经常需要二维精确的运动控制。通常采取的方法是应用直流/交流电机作为主要的运动装置, 配合诸如连杆或是齿轮等使旋转运动转化为直线/平面的运动。虽然这种方法被广泛的应用, 但是精度低, 复杂的机械结构和校准手续, 及其高成本、低可靠性是主要的弱点。

一些直接驱动的平面电动机方案如下:

Sawyer 电机[1, 2] 是最先被提出来且唯一在工业中应用的电机。虽然它在整个的工作进程中可以提供相当高的速度和加速度, 但是它工作在开环模式下, 容易“失步”, 并且特别容易收到外界的干扰。

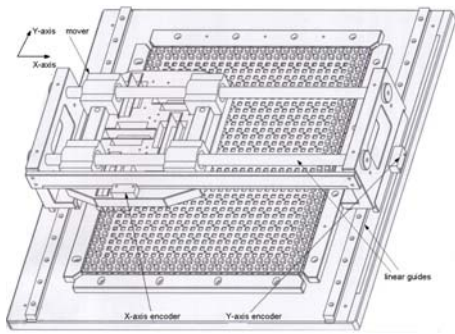
文章[3-5]介绍了基于永磁原理的平面电机。在文[3]中, N 极和 S 极永磁铁按照“西洋跳棋”的方式排列形成定子。动子平面由 8 个固定在两个直线导轨的线圈构成。另一个永磁平面电机的方案[4, 5]介绍的是将叠绕的线圈作为电机的定子, 而动子是将两个高性能永磁体固定在不摩擦小车上。这两种永磁平面电机

的结构复杂, 永磁体的利用率也很低, 并且加工和维修的成本极高。

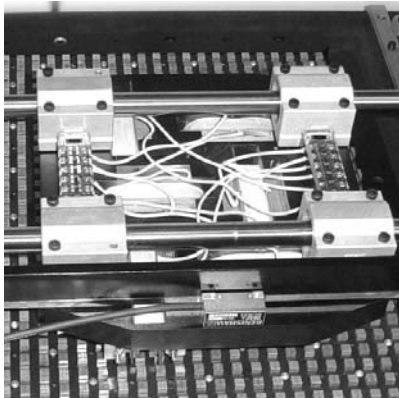
本文提出基于开关磁阻原理的平面电机方案[6]。与同类永磁平面电机相比, 开关磁阻平面电机的加工费用相当低; 磁阻电机具有简单的机械结构和机械部件。另外, 由于运动系统是自协调的直接驱动系统, 因此不需要任何轴之间的校准和旋转到直线之间的耦合装置。

1 平面磁阻电动机的结构

图 1 是平面磁阻电机的整体结构。它是分别基于 X 和 Y 轴“延展”的 6/4 型旋转磁阻电机形式。电机在二维模式下工作, 定子是由所有结构相同的“突起”的导磁方块组成; 整个动子安装在两个直线导轨上, 每个直线导轨负责 X 和 Y 方向的运动。



(a)



(b)

图 1 平面磁阻电机 (a) 示意图 (b) 实际电机

定子导磁方块(图 2)由叠加的硅钢片压制而成, 各个导磁块是由环氧树脂固定在一起。这样安排的好处在于大大减少加工的成本并且简化整体机械结构。硅钢片的叠片式结构降低涡流效应。再有, 相同导磁块可以构成任何需要大小或者尺寸的电机, 提高电机设计的灵活性。

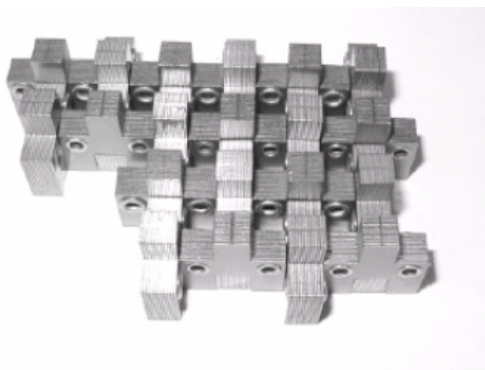
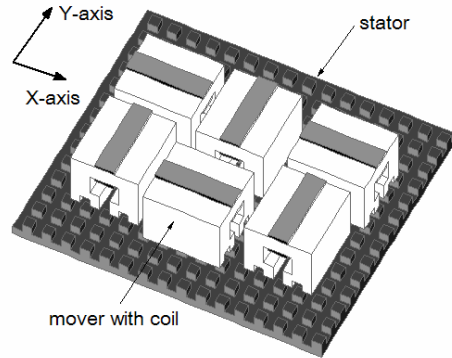
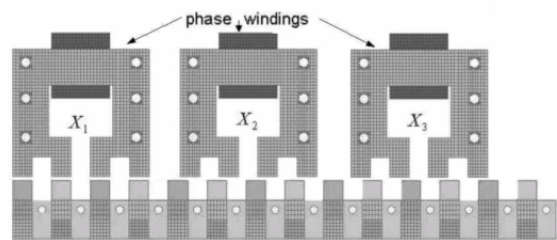


图 2 定子构造

负责两个轴的动子的机械结构也是完全相同的。每个轴的三个相都缠绕线圈。图 3 (a) 和(b)显示了电机整体三维图和侧视图。负责两个轴运动的三个动子极相互垂直, 每个轴的动子极只产生本方向的运动, 两个轴之间产生的力是相互垂直的。表一介绍了电机的主要参数。



(a)



(b)

图 3 电机整体示意图 (a) 三维图 (b) 侧视图

极距	6 mm
气隙	0.55mm
每相匝数	160
额定功率	120W
相电阻	1.5 Ω
基座尺寸	450 \times 450mm
动子尺寸	250 \times 220mm

表一 电机主要参数

2 电磁特性

这一节主要介绍的是实验测量获得的电机的磁通特性曲线和力参数。运用插值法得到电机的三维特性。

方程(1)是对开关磁阻电机电压关系的描述。因为该平面电机是解耦的，每一个相都可以单独控制，因此方程对任一轴的运动都适用。

对任一轴的第K相，

$$V_k(t) = R_k i_k(t) + \frac{\partial \lambda_k(i_k(t), x(t))}{\partial x(t)} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{\partial \lambda_k(i_k(t), x(t))}{\partial i_k(t)} \frac{di_k(t)}{dt}$$

$$\text{并且, } \lambda_k = \lambda_{kj} + \lambda_{km} + \lambda_{ke} \quad (1)$$

其中 $V_k(t)$, i_k 和 R_k 分别为相电压, 相电流和相电阻. $x(t)$ 和 λ_k 为电机所处位置和总磁链. 其中总磁链 λ_k 由自感磁链 λ_{kj} , 互感磁链 λ_{km} , 和漏磁链 λ_{ke} 构成。

力方程如下，

$$f_{x(y)}(i_a(t), i_b(t), i_c(t), x(t)) = \sum_{k=a}^c \frac{\partial \int_0^{i_k(t)} \lambda_k \cdot d\tau_k(t)}{\partial x(t)}$$

$$= \sum_{k=a}^c f_k(i_k(t), x(t)) = M_m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B_v \frac{dx(t)}{dt} + f_l(t) \quad (2)$$

$f_{x(y)}$ 是 X/Y 方向总电磁力 $f(t)$, M_m 和 B_v 分别是质量和摩擦系数。

在磁链测量的实验中，采用的是方法是“检测线圈法” [11]. 输入的交流电电流从 0A~50A 可调引入到主线圈中。通过测量在检测线圈中互感的电压，磁通可以按下式计算，

$$\varphi(t) = -\frac{1}{N_s} \int e(t) \cdot dt \quad (3)$$

其中 $e(t)$ 是互感电压， N_s 是检测线圈匝数。

磁链为，

$$\lambda(t) = N_1 \cdot \varphi(t) \quad (4)$$

其中 N_1 是主线圈匝数。

图四是相对不同位置和电流记录下的磁滞回线曲线。从图中可以看出，最大的差别为 0.2 Wbt 左右，也就是总磁链的 10%。实际上在大多数时间电机是运行在额定电流以下，而且电流从负的最大变化到正的最大值的几率也很小。故磁滞效应对电流控制器的负担很小，无需采用非线性进行补偿。通过连接磁滞回线的顶点，并且将所得数值进行差值，可以得到磁链相对于电流和位置的三维图（图5a）。

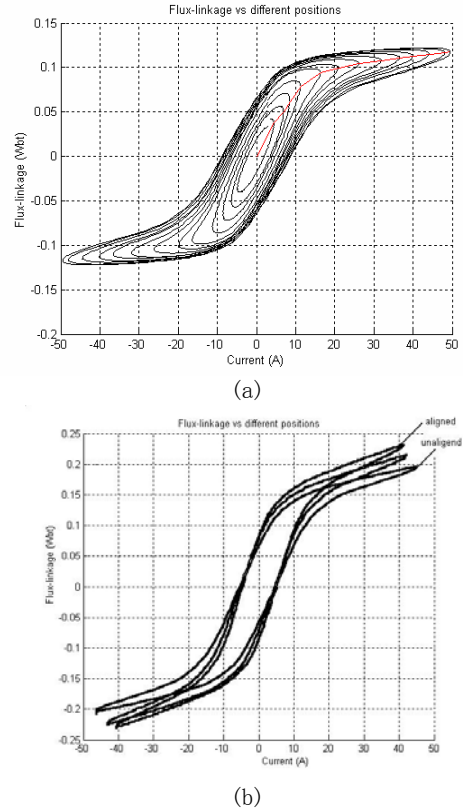


图 4 磁滞回线 (a) 相对电流 (b) 相对位置

下一步就是测量电机输出力相对于不同位置和电流的变化曲线。实验过程是将电机固定在不同的位置，注入电流(0~25A)，从力传感器测量电机输出力。由于各相是电磁解耦而且机械参数均相同，只要测量一相的力就足够

了。图 5(b)是力相对于不同电流和位置的三维曲线。

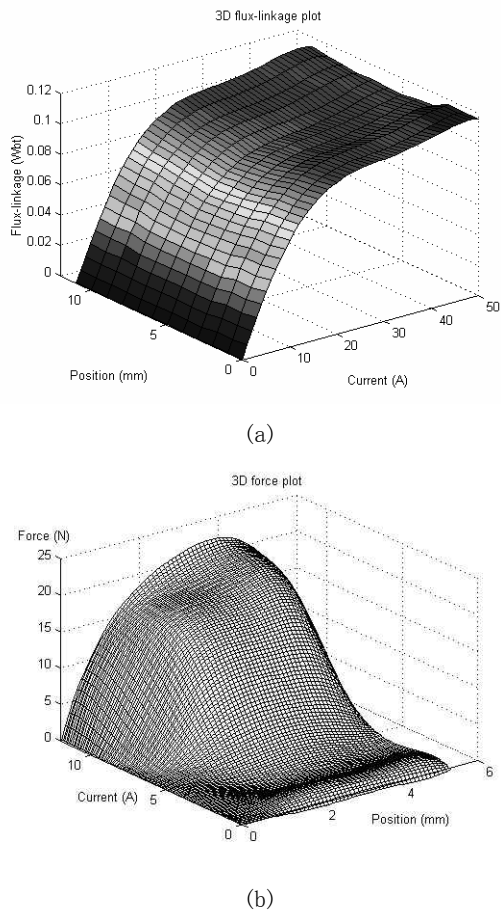


图 5 电机电磁特性 (a) 磁链相对电流和位置曲线 (b) 力相对电流和位置曲线

3 控制方案

由于电机机械和电磁特点，每个运动方向可以单独进行控制。图 6 是控制系统示意图。电磁和机械响应相比至少快一个数量级，因此采用双环控制。内环为电流环，用来调节电压和电流非线性。外环是位置环，用来控制电机运行位置的动态特性。在这之上，力的非线性函数用来补偿电机自身电磁参数相对于电流和位置的非线性特性。

3. 1. 二维查表法

在控制器中，关于力的函数，即所需电流在不同位置和力的函数呈非线性关系。为了优化好计算效率和尽量减少对内存的占用，本文采用低精度二维查表的方法。对于每个方向，判别函数负责将力分解成三个分量。表 2 显示相对于不同的位置，哪一相应该相应的导通。为了获得三者之间的逆函数关系，在另外的一个实验中，动子被固定在一个极距的 50 个不同的位置，然后测量产生不同的力所需的电流值。文中采用 27×27 的表，实验表明可以使力输出精度在 $\pm 5\%$ 左右。

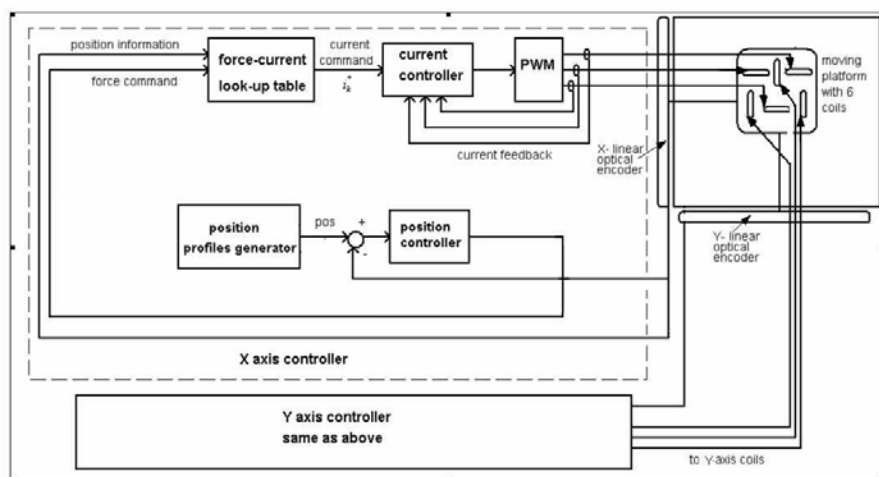


图 6 系统控制示意图

4 实验结果

实验采用 dSPACE DS1104 DSP 运动控制卡。控制卡具有 250MHz DSP 能够进行实时计算，而且和电脑可以直接接口。它具有 2 路 24 位传感器输入，6 路 12 位模拟输入和输出。图 7 是实验总体装置图。内环采用 10KHz 的采样频率，外环 2 KHz。

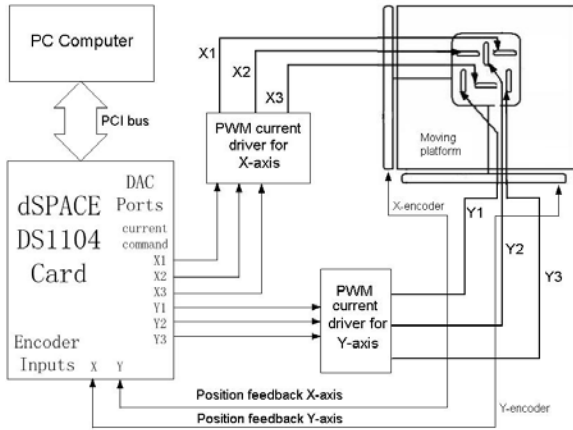
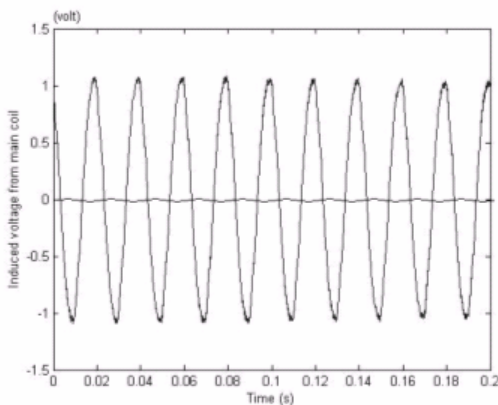
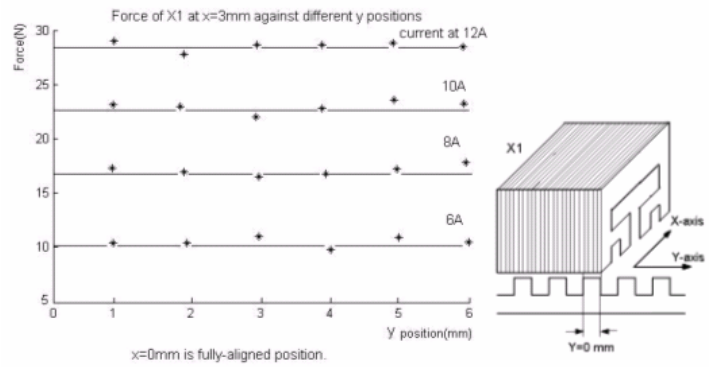


图 7 实验装置总体示意图

实验验证了各相之间的耦合程度很小。两个运动轴直接的耦合小于 1%，因此两个运动轴之间的耦合可以由各轴的控制纠正。图 8a 是当最近的 X 轴的一相通正弦波的时候，Y 轴某相的输出电压。从实验可以看出 Y 的输出电压接近零。图 8b 是在 X 轴上测量到的 Y 轴上力的变化。力的变化也接近零。因此该电机独特的结构决定了轴与轴之间的互感很小。



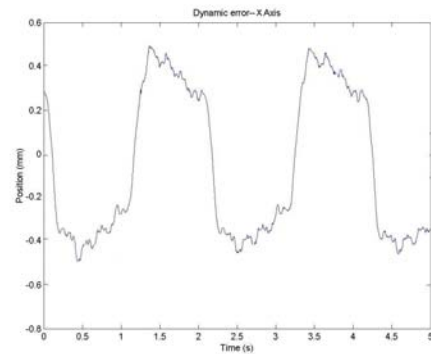
(a)



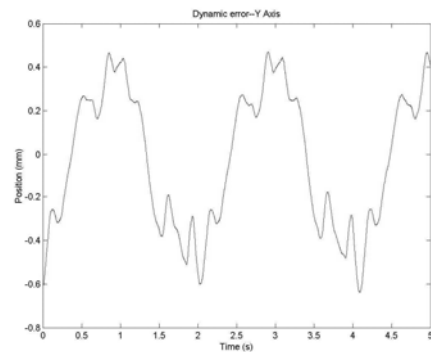
(b)

图 8 X, Y 之间的耦合

图 9 显示电机画圆时的动态特性。总的来说轨迹跟踪的很好。只是有些地方动态误差达到 0.5mm。这是因为电机模型存在不均匀的机械摩擦；由于需要机械上的支撑，两个运动轴的有效质量也是不同的，故各自的动态响应也有差异。Y 轴的动力学响应误差与 X 轴相比要大些。



(a)



(b)

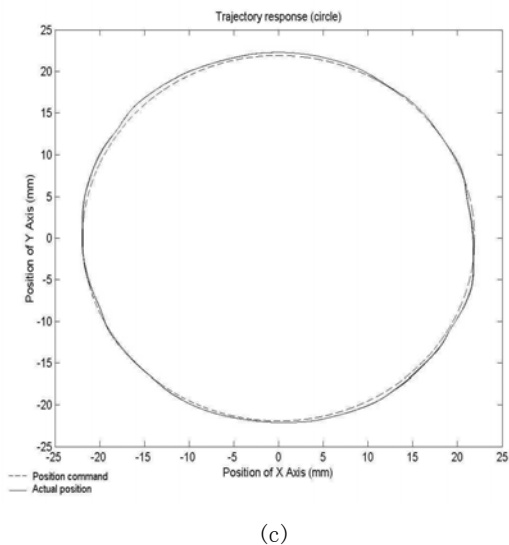


Fig. 11 动态响应 (画圆) (a) X 动态响应误差 (y-mm, x-s); (b) Y 动态响应误差 (y-mm, x-s); (c) 动态运行轨 (y-mm, x-s)

当 20A 的电流注入到线圈中时，加速度可以达到 2G。点对点的运动，精度可达到 5 微米。

5 结论

本文阐述了新型平面磁阻电机的二维运动位置控制方案。电机的构造很简单，可以运行在恶劣的工作环境中。电机由 6 线圈组成的移动平台构成。定子基座是由叠加的硅钢片模块构成，可以进行大规模的生产和加工，成本很低。而且不需要任何复杂或是昂贵的机械部件，比如永磁体，换向器等。

控制方案采用了二维查表法补偿电机的电磁和机械的非线性。由于电机的独特的构造，X 和 Y 之间的互感效应很小从而可以被忽略。初步的实验结果显示空载时电机位置精度可以达到 5 微米，加速度达到 2 个重力加速度。因此该电机可以预计取代工业自动化应用中传统的 X-Y 工作台。

6 致谢

本文作者在此感谢香港大学基金会和香港理工大学研究委员会对本相目 B-Q473 所提供的支持和帮助。

7 参考文献

- [1] B.A. Sawyer, "Magnetic positioning device", U.S. Patent 3,457,482, July 1969.
- [2] E.R. Pelta, "Two-axis sawyer motor for motion systems", IEEE Control Systems Mag., Oct 1987.
- [3] D. Ebihara, M. Watada. "Study of a Basic Structure of Surface Actuator." IEEE Trans. on Magnetics, Vol.25, No.5, pp.3916-3918, September 1989.
- [4] A.F. Flores Filho, A.A. Susin, M.A. da Sliveira. "Electrical Machines and Drives, 1999. Ninth International Conference on (Conf. Publ. No. 468), 1-3 Sept. 1999
- [5] Junichi Tsuchiya and Gunji Kimura. "Mover Structure and Thrust Characteristic of Moving-Magnet-type Surface Motor."
- [6] N.C. Cheung, J.F. Pan, J.M. Yang, "Two Dimensional Variable Reluctance Planar Motor," U.S. Patent (filed: May 2004).
- [7] W.C. Gan, N.C. Cheung, "Development and Control of a Low-cost Linear Variable reluctance Motor for Precision Manufacturing Automation," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, p 326-333, Vol. 8, Issue 3, Sep 2003.
- [8] W.C. Gan, N.C. Cheung, Q Li, "Position Control of Linear Switched Reluctance Motors for High Precision Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, p 1350-1362, Vol. 39, Iss. 5, Sep/Oct 2003.
- [9] C.T.Liu and J.L.Kuo, "Experimental investigation and 3-D modelling of linear ar variable-reluctance machine with magnetic-flux decoupled windings," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 30,no.6, pp. 4737-4739, Nov 1994.

- [10] T.J.E. Miller, "Switched reluctance motor and their control", Magnet Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [11] K.K.C. Chan, N.C. Cheung, "Modelling and characterisation of a novel two-finger variable reluctance gripper," ISA Transactions (accepted for publication, 12 Feb 2004).
- [12] Xue, X.-D., Cheng, K.W.E., Ho, S.L." Simulation of switched reluctance motor drives using two-dimensional bicubic spline", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 17, Issue: 4, Dec. 2002, Pages: 471 – 477.
- [13] J.M. Stephenson, J. Corda, "Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from non-linear magnetization data", IEE Proceedings, vol 126, pp 393-396, 1979.
- [14] Lu, W., Keyhani, A., Klode, H., Proca, A.B. "Modeling and parameter identification of switched reluctance motors from operating data using neural networks", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, June 2003, Pages:1709 - 1713 vol.3.

8 作者简介。



潘剑飞 2001年毕业于长春理工大学（原长春光学精密机械学院），获得工程学士学位。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。



张 宙 (Dr. Norbert C. Cheung) 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。



杨金明 博士，1987年毕业于北京航空航天大学，获学士学位；1990年获硕士学位，毕业于浙江大学；2000年毕业于华南理工大学，获博士学位。主要从事于电机设备的驱动和非线性控制。目前工作于华南理工大学。