



潘剑飞 曹广忠 张 宙 著

# 平面电机设计与控制



科学出版社

# 平面电机设计与控制

潘剑飞 曹广忠 张 宙 著

本书得到“国家自然科学基金(51007059)”、“广东省自然科学基金(2008225)”、“深圳大学出版基金”及“深圳市基础计划(JC201005280390A)”的资助

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了平面电机的理论、设计和控制方法。全书分为八章。第一章介绍了平面电机的概念及其应用背景。第二章介绍了平面电机的发展现状。第三章介绍了能量转换基本理论及与平面电机相关的知识体系。第四、五章详细系统地介绍了基于开关磁阻原理平面电机的设计、测量、建模、线性化及仿真分析。第六、七、八章对平面电机的速度、轨迹位置控制进行阐述,分别采用PID、自抗扰、系统辨识及自适应控制等高级控制算法对以平面开关磁阻电机为被控对象的运动控制系统进行仿真与实验实现,并针对平面电机的控制特点,构建基于一枚DSP芯片的二维位置控制系统。

本书适合自动控制、电气工程及相关学科的高年级本科生和研究生、科研人员参考阅读,也可供从事电机设计与控制工作的工业界科技人员、科技管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

平面电机设计与控制/潘剑飞,曹广忠,张宙著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030959-4

I. ①平… II. ①潘… ②曹… ③张… III. ①电机-设计 ②电机-控制系统 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第080472号

责任编辑:牛宇锋/责任校对:张凤琴

责任印制:赵博/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年6月第一次印刷 印张:12 1/4

印数:1—2 500 字数:232 000

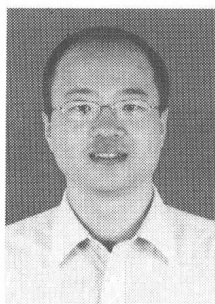
定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



潘剑飞，毕业于香港理工大学电机工程学系，获博士学位，现工作于深圳大学机电与控制工程学院自动化系，任副教授，研究生导师。主要研究领域包括运动控制系统、新能源及电力电子技术。获一项美国专利，独著英文专著一部，主持和参与多项国家自然科学基金、广东省自然科学基金等课题，在国内外知名期刊、会议发表论文 30 余篇。



曹广忠，博士，教授，研究生导师，毕业于西安交通大学，韩国科学技术院（KAIST）博士后，英国中央兰开夏大学（UCLAN）高级访问学者。现任深圳大学机电与控制工程学院副院长，深圳大学自动化研究所所长，深圳大学-美国 TI 公司高级嵌入式控制联合实验室主任。广东省“千百十”人才工程培养对象，深圳市高层次专业人才地方级领军人才。长期从事控制理论及应用、磁悬浮技术、电力电子技术等方向研究；主持完成国家自然科学基金、广东省自然科学基金等 20 多项课题，获教育部科技进步三等奖、广东省科学技术三等奖、深圳市科技创新奖等，拥有专利 4 项，发表学术论文 60 余篇。



张宙博士 (Dr. Norbert C. Cheung)，毕业于澳大利亚新南威尔士大学电气工程专业，现任香港理工大学电机工程学系副教授，特许（注册）工程师，英国电机工程师协会会员（IET Member）、美国电气电子工程师协会高级会员（IEEE Senior Member），多个国际知名期刊审稿人。发表国际知名期刊文章 40 多篇，国际会议文章 100 多篇，获 5 项发明专利。获 2006 年度香港理工大学卓越成就奖、美国电气电子工程师协会工业应用学会最佳文章奖、美国电气电子工程师协会工业电子学学会最佳演讲奖、中国电源学会杰出文章奖、香港理工大学最有价值产品开发奖。主要研究领域包括微特电机设计、高性能运动控制、电力电子技术以及新能源应用技术。

## 主要符号表

<p><math>B</math> 磁感应强度, T</p> <p><math>B_v</math> 摩擦系数, N/m</p> <p><math>d</math> 极宽, mm</p> <p><math>e</math> 电动势, V</p> <p><math>e_{\text{bemf}}</math> 动生电动势, V</p> <p><math>f</math> 合力或力指令, N</p> <p><math>H</math> 磁场强度, A/m</p> <p><math>i</math> 电流, A</p> <p><math>J_s</math> 电流面密度, A/m<sup>2</sup></p> <p><math>K_c</math> 增益</p> <p><math>K_p</math> 比例系数</p> <p><math>K_i</math> 积分系数</p> <p><math>K_d</math> 微分系数</p> <p><math>K_s</math> 增益</p> <p><math>l</math> 叠片厚度, mm</p> <p><math>L</math> 电感, H</p> <p><math>L_{\Delta}</math> 电感变化, H</p> <p><math>M</math> 质量, kg</p> <p><math>N</math> 匝数</p> <p><math>p</math> 极距, mm</p> <p><math>q</math> 槽宽, mm</p>	<p><math>R_{x(y)}</math> 电阻, <math>\Omega</math></p> <p><math>\mathcal{R}</math> 磁阻, A/Wb</p> <p><math>s</math> 位置, m</p> <p><math>T</math> 时间, s</p> <p><math>v</math> 速度, m/s</p> <p><math>V</math> 电压, V</p> <p><math>\bar{v}</math> 体积, m<sup>3</sup></p> <p><math>W_c</math> 磁共能, J</p> <p><math>W_e</math> 电能, J</p> <p><math>W_i</math> 储能, J</p> <p><math>W_m</math> 机械能, J</p> <p><math>z</math> 气隙长度, mm</p> <p><math>\lambda</math> 磁链, Wbt</p> <p><math>\varphi</math> 磁通, Wb</p> <p><math>\Gamma</math> 磁动势, At</p> <p><math>\zeta</math> 阻尼比</p> <p><math>\omega_n</math> 自由振荡频率, rad/s</p> <p><math>\theta</math> 角度, rad</p> <p><math>\mu_0</math> 真空磁导率, H/m</p> <p><math>\mu_r</math> 相对磁导率</p> <p><math>\mu</math> 磁导率, H/m</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## 序

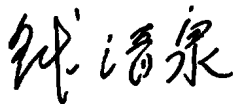
平面电机设计与控制是工业自动化领域一个崭新的研究方向。该书作者以自主研发的平面开关磁阻电机为研究对象，从平面电机的概念建立开始，科学地阐述了平面电机的建模、设计、仿真及实验，设计并实现以速度与位置为被控量的各类控制算法，并在此基础上给出基于数字信号处理器的平面电机运动控制系统设计，为平面电机的理论研究奠定了基础。

该书内容新颖，紧跟学术前沿，工业价值丰富，为平面电机的设计和基于此类电机的控制系统构建及其潜在的工业应用等起到指导和推动作用。

该书所述的大部分工作是在深圳大学自动化研究所开展的，该所由一批具有丰富研发经验的年轻科研骨干人员组成，是一个充满活力和朝气的科研团队，共获得国家自然科学基金、省部级基金等二十余项，发表了一系列高水平学术论文，培养了多名研究生。

我相信，该书将有助于有兴趣的读者循序渐进地跨入平面电机设计与控制领域，开发创造出新的研究成果和实用产品。该书不仅可推荐用做研究生的参考教材，而且适合作为从事自动化、机电一体化的工程技术人员和科研人员阅读及参考。

中国工程院院士



2011年5月

# 前 言

电力电子技术的飞速发展使自动控制系统发生了深刻的变化，其中作为被控对象的直线和平面电机就是其典型表现之一。平面电机是一种无须通过任何中间转换机构将电能直接转化为二维平面运动的新颖电机。鉴于目前针对平面电机的研究及相关文献甚少，特别是迄今为止国内外尚无介绍平面电机原理及设计、仿真和控制方面的书籍，作者结合多年来在此领域的研究成果，撰写了这本拙作，供广大从事平面电机教学和研究的科技工作者、大专院校的师生和学生，以及希望了解平面电机的人员参考。

全书分为八章。第一章绪论介绍了平面电机的概念及其应用背景。第二章介绍了平面电机的发展现状，比较分析了基于不同原理平面电机的优缺点。第三章介绍了能量转换基本理论与平面电机相关的知识体系，以便读者对平面电机理论基础有一个总体印象。第四、五章详细系统地介绍了基于开关磁阻原理平面电机的设计、测量、建模、线性化及仿真分析。在第四、五章的基础上，第六、七、八章对平面电机的速度、轨迹位置控制进行阐述，分别采用 PID、自抗扰、系统辨识及自适应控制等高级控制算法对以平面开关磁阻电机为被控对象的运动控制系统进行仿真与实验实现，并针对平面电机的控制特点，构建基于一枚 DSP 芯片的二维位置控制系统，是本书的重点和主要内容。

本书的出版得到深圳大学科学技术部主任李学金教授及其他有关人士的鼓励和支持，对此，作者表示衷心的感谢。在本书编写过程中，作者参阅和引用了许多相关著作和论文，在此对这些著作和论文的作者表示衷心感谢。本书编写过程中还得到了邱洪、李金全、蔡伟泽等的支持与帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限，疏漏和不足之处敬请广大读者不吝批评指正。

作 者

2011 年 3 月 12 日

# 目 录

序	
前言	
主要符号表	
第一章 绪论	1
参考文献	3
第二章 平面电机的发展	4
2.1 直线、平面电机的结构及与旋转电机的差别	4
2.2 平面步进电机	5
2.3 平面感应电机	8
2.4 平面永磁电机	9
2.5 平面开关磁阻电机	13
2.6 小结	21
参考文献	22
第三章 平面电机的理论基础	24
3.1 平面电机的分析方法	24
3.2 平面电机的电磁学方程	32
参考文献	34
第四章 平面电机的测量、建模及仿真	36
4.1 平面开关磁阻电机的磁参数测量	36
4.2 直流法和交流法的对比	38
4.3 磁链实验测量结果	39
4.4 零互感测试	43
4.5 力参数测量	47
4.6 平面电机的建模	54
4.7 平面开关磁阻电机的建模	58
4.8 平面开关磁阻电机的动态模型	59
参考文献	59
第五章 平面电机的线性化	62
5.1 相励磁方案	62
5.2 平面开关磁阻电机的励磁规则	64



5.3	平面开关磁阻电机的线性化	66
5.4	电流控制器	69
	参考文献	77
<b>第六章</b>	<b>平面电机的速度控制</b>	<b>78</b>
6.1	平面电机伺服控制系统结构	78
6.2	控制方法回顾	79
6.3	PID 控制器的缺点	81
6.4	自抗扰控制器	82
6.5	速度控制器的搭建	87
6.6	仿真结果	89
6.7	实验结果	92
	参考文献	99
<b>第七章</b>	<b>平面电机轨迹运行控制</b>	<b>101</b>
7.1	平面开关磁阻电机位置控制器	101
7.2	双环位置控制器	106
7.3	平面开关磁阻电机的自校正调节方法	109
	参考文献	128
<b>第八章</b>	<b>基于 DSP 的平面电机控制系统设计</b>	<b>130</b>
8.1	引言	130
8.2	系统设计方案	130
8.3	系统硬件设计	134
8.4	系统的软件设计	143
8.5	系统实验	165
8.6	小结	167
	参考文献	167
<b>附录</b>		<b>168</b>
	附录 A 电机指标参数	168
	附录 B dSPACE DS1104 控制系统开发环境	172
	参考文献	173
	附录 C 平面开关磁阻电机磁性材料的磁化曲线	173
	附录 D1 光栅尺及其使用简介	174
	附录 D2 磁栅尺及其使用简介	176
	参考文献	177
	附录 E 电磁学基本理论回顾	178

# 第一章 绪 论

在直线电机 (linear motor) 诞生以前, 一般采用旋转电机配合机械运动转换机构 (如传送带、齿轮、丝杆等) 将旋转运动转化为直线 (或平移) 运动。为了实现二维平面运动, 一般须借助两套这样的直线机构在相互垂直的方向上叠加而成, 如 X-Y 工作台。这类实现平面运动的运动控制系统具有以下缺点: ① 成本高; ② 机械结构复杂; ③ 具有累积误差, 须频繁对机构进行调试和校准。

由于采用旋转电机配合机械转换装置实现直线或平面运动存在诸多缺点, 人们逐渐开始关注于采用直接驱动式系统实现直线或平面运动。所谓直接驱动式系统 (direct drive systems), 是指无须引入机械传动部件, 利用电能直接产生机械能实现所要求运动形式的控制系统, 具有出力密度高、热耗低、精度高等特点; 因省去从旋转到直线或到平面运行的机械转换装置, 可把控制对象与执行机构集成为一体化结构, 具有反应快、灵活度高、随动性好和结构简单等优点<sup>[1]</sup>。此类运动控制系统可以消除回差、迟滞等由于运动方式转化带来的问题, 并避免经常性的机械调整和维修。

随着直驱式直线电机的发展, 人们开始采用两台直线电机垂直叠加实现平面运动<sup>[2]</sup>。由于在每个运行方向上机械输出直接作用于负载, 简化了机械机构, 降低了成本, 提高了系统性能, 且系统整体相对旋转电机构成的二维运动机构, 装配简便。但是, 两套驱动装置实现二维运动, 机构仍显复杂, 机构的叠加又增加了控制的复杂性, 而且在每个方向上机构的控制方式也存在差别。另外, 由于两个运动方向不在同一个平面, 机械安装的微小误差势必带来较大的运行位置误差, 且误差按运行情况不同, 累积的程度也有差别, 须采用控制方法 (如插补算法) 或机械方式进行机构校准。系统整体控制精度由两套直线运动控制系统机械加工及安装精度和控制精度共同决定。

目前尚无平面电机的精确定义。作者认为, 参考直线电机的定义, 平面电机是指将电能直接转换成二维平面平移运动的机械能, 而无须引入机械转换或传动机构, 且运动平面保持在同一高度的执行装置。直接采用平面电机代替两组旋转电机配合机械转换机构实现二维平面运动的优点如下:

(1) 采用平面电机驱动的传动装置, 无须机械转换机构而直接产生二维推力, 简化整个装置复杂度, 保证系统运行可靠性, 提高能量转换效率, 降低系统成本, 易于维护。

(2) 平面电机通过电能直接产生二维平面电磁推力, 其运动可以实现无机械

接触,从而使传动部件无任何磨损,减少机械损耗。

(3) 采用旋转电机配合机械转换机构在运行时不可避免地产生噪声,而平面电机是靠电磁推力直接运行的,故整个装置或系统噪声很小或无噪声,运行环境好。

(4) 平面电机结构简单,动定子可以采用环氧树脂等材料密封成整体,因此可以在一些特殊场合,如潮湿、腐蚀、具有有毒气体等环境下运行,并且可以在高温或低温条件下使用。

(5) 平面电机结构是开放式的,即动定子和励磁线圈可以直接暴露在空气中,一般定子较长,具有很大的散热面,热量很易散发掉,因此这一类电机热负荷可以很高,并且不需要附加冷却装置。

当然,平面电机由于其自身结构的特点,也具有一定的缺点,概括如下:

(1) 与旋转电机相比,平面电机效率和功率因数低,尤其在低速时比较明显。一是由于平面电机的气隙 (air gap) 一般比旋转电机大,所需磁化电流较大,从而使损耗增加;二是由于平面电机在两个方向上磁路开断,产生了所谓的边缘效应,间接导致损耗增加。但从整个装置或系统看来,由于采用平面电机省去了中间传动装置,构建整个运动控制系统后效率有时可比采用旋转电机高。

(2) 由于平面电机动定子之间在线圈励磁后垂直方向吸力相对驱动力较大,平面电机对直线导轨的要求相对较高,选择高质量的直线导轨是电机设计和加工成本须考虑的因素之一。

(3) 由于采用直接驱动方式,中间没有缓冲环节,系统参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响将直接反映到平面运动系统的静、动态特性中,加之平面电机在两个运动方向上的耦合及端部和齿槽效应对电磁推力平稳性的影响,会损害系统的运行稳定性并降低定位精度。因此须采取适当的控制技术以减小这些参数变化和外部扰动所带来的影响,使其能够应用于高速和高精度定位的场合<sup>[3]</sup>。

是否选择平面电机,或者采用旋转电机配合机械传动部件实现二维平面运动需要综合考虑。综上所述,基于平面电机的优点,结合现代电力电子驱动技术及控制技术的发展,构建以平面电机为控制对象的运动控制系统,是一个崭新的研究方向,具有潜在的工业应用价值。

作者认为,一个具有工业实用价值、理想的平面电机应具备下述特点:

- (1) 系统成本低、效率高、响应快;
- (2) 能在宽范围温度条件下工作;
- (3) 抗干扰能力强、控制精度高及维护方便。

到目前为止,符合平面电机定义的平面执行机构主要有如下几种:

- (1) 平面步进式电机;
- (2) 平面感应电机;

- (3) 平面永磁电机;
- (4) 平面开关磁阻电机。

平面步进电机 (sawyer motor) 是一种能够提供二维运动方式, 且应用于工业的二维电机。虽然在整个行程中该电机可以提供稳定的输出性能, 但其开环运行方式存在低频振荡及高频失步的缺陷, 噪声和振动较大<sup>[4]</sup>; 平面感应电机初级具有复杂的绕组结构, 加工复杂、控制困难, 且由于复杂的机电特性, 很难实现高速和高精度的二维运行方式<sup>[5]</sup>; 平面永磁电机须安装永磁体, 配合电枢绕组, 结构复杂、制造成本高、输出性能不稳定、受环境影响较大, 且易产生齿槽推力扰动<sup>[6]</sup>。除平面步进电机工作于开环方式外, 平面感应电机和平面永磁电机均具有复杂的绕组结构或昂贵的永磁体阵列, 因此阻碍了其在工业上的实际应用, 目前尚处于基础研究阶段。

鉴于开关磁阻电机的卓越性能及快速发展, 作者旨在设计一种基于开关磁阻原理、结构简单、加工成本低新型平面电机, 从而为二维直接驱动式运动控制系统提供一种综合解决方案。开关磁阻电机具有很多显著优点, 如结构简单、稳定性高、成本低及在恶劣环境下运行等, 这些特点都符合理想平面电机的要求。但是开关磁阻电机也具有很多缺点, 如磁路具有很强的非线性特征, 输出具有较大的转矩 (推力) 脉动等, 控制算法也较其他原理的电机复杂, 这些原因导致长期以来, 人们都没有尝试将开关磁阻电机应用于高精度控制领域中。近几年由于电力电子及数字信号处理技术的飞速发展, 人们开始从“通过改进控制策略简化机械结构”的理念出发, 逐渐恢复对开关磁阻电机的研究兴趣。通过对开关磁阻电机原理及结构的深入研究, 作者首次尝试设计一种满足高精度要求、具有工业应用价值的直接驱动式平面开关磁阻电机<sup>[7]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Boldea I, Nasar S A. Linear Electric Actuators and Generators. Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
- [2] Mak S T. Precision motion control of X-Y table with closed-loop commuted stepper motor. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 1997.
- [3] 杨金明, 吴捷, 张宙, 等. 平面电动机的现状及发展. 微特电机, 2003, 31 (6): 31~34, 44.
- [4] Sawyer B A. Magnetic positioning device: US Patent, 3457482. 1969-7-1.
- [5] Fujii N, Kihara T. Surface induction motor for two dimensional drive. Transactions of IEE of Japan D, 1998, 118 (2): 221~228.
- [6] Ebihara D, Watada M. Study of a basic structure of surface actuator. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25 (5): 3916~3918.
- [7] Cheung N C, Pan J F, Yang J M. Two-dimensional variable reluctance planar motor: US Patent, 7170203. 2007-1-31.

## 第二章 平面电机的发展

与传统 X-Y 工作台有着本质区别，平面电机去除了采用两个直线电机叠加的机械机构，取而代之的是一个在两个垂直方向上（如 X、Y）均可以直接运行和控制的平移运动平台。本章回顾几种不同工作原理的平面电机，并对它们的特性进行比较。

### 2.1 直线、平面电机的结构及与旋转电机的差别

直线电机可以形象地理解为将旋转电机沿轴向“切开”，再将转子和定子进一步拉伸而成，如图 2.1 所示。拉伸后运动的部分称为“动子”（mover），静止的部分称为“定子”（stator）。线圈既可以缠绕在定子上，也可以安放在动子上。按照线圈放置的位置，可以分为“主动定子-被动动子”式（active-stator-passive-mover）和“主动动子-被动定子”式（active-mover-passive-stator）两种不同的电机结构。

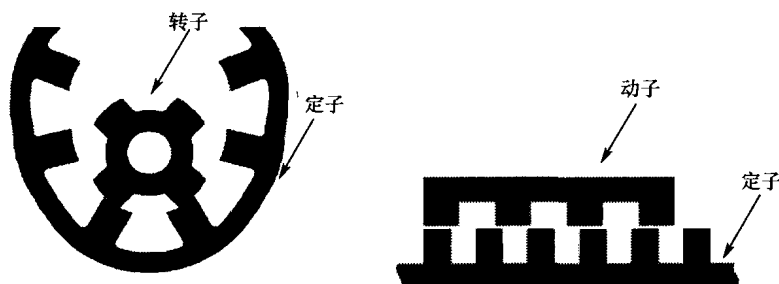


图 2.1 直线电机的演变

当运动方式由旋转变为直线时，许多物理现象也随之发生变化。首先，旋转磁场转变为直线磁场。在直线磁场中使电机产生直线运动的力称为推力（propulsion force or thrust），与推力或运动方向相垂直的力称为垂直力或压力（normal force），这是直线电机与旋转电机的显著区别之一。

同时可以发现，与旋转电机不同，直线电机具有运行起点和终点，行程具有有限的长度。因此，当电机运行至两个端部时，将出现边缘（或边端）效应（end or edge effects），这是直线电机与旋转电机相比所具有的独特特征。

第三个显著的差别是相对旋转电机，直线电机具有较大的气隙长度（air gap

length)。在旋转电机中，气隙尽可能越小越好，较大的气隙将直接影响电机效率。通过下面一个简单的例子说明气隙大小对磁感应强度  $B$  的影响。

**例 2.1** 已知理想电磁铁如图 2.2 所示，线圈绕线匝数  $N$  为 150，激励电流  $i=5\text{A}$ ，不考虑漏磁通、磁通分布在气隙分布的边缘效应等影响，假设全部磁通沿虚线所示路径闭合， $l=20\text{mm}$ ，电磁铁相对磁导率  $u_r=400$ ，求磁感应强度  $B$  在气隙  $\delta=0.1\text{mm}$  和  $\delta=1\text{mm}$  下的近似值。

由安培环路定理

$$\oint Hdl = \sum i = Ni \quad (2.1)$$

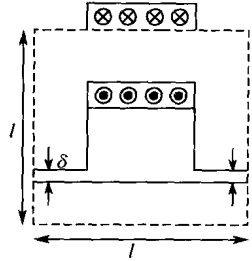


图 2.2 电磁铁示意图

可知，由于铁磁物质和空气的磁导率不同，在整个闭合磁路中磁感应强度  $B$  近似不变，则有

$$\frac{B}{u_1}l_1 + \frac{B}{u_2}l_2 = Ni \quad (2.2)$$

即

$$\frac{B}{u_0 u_r} (2l + 2l - 2\delta) + \frac{B}{u_0} 2\delta = Ni \quad (2.3)$$

整理得

$$B = \frac{Ni}{\frac{4l - 2\delta}{u_0 u_r} + \frac{2\delta}{u_0}} = \frac{Niu_0 u_r}{(4l - 2\delta) + 2\delta u_r} \quad (2.4)$$

将已知条件及  $\delta=0.1\text{mm}$  和  $\delta=1\text{mm}$  分别代入式 (2.4)，可得： $B_{\delta=0.1}=2.36\text{T}$  和  $B_{\delta=1}=0.43\text{T}$ 。可见气隙相差 10 倍导致磁感应强度相差 5.5 倍左右。

平面电机可以看做是两个直线电机在两个垂直方向上的进一步“延展”。为了满足平面电机的定义，电机结构必须满足动子平台可以在二维平面的维度上自由进行平移运动的条件，且运行高度在同一平面上。平面电机并不是由两个直线电机在相互垂直方向上的简单叠加所形成的机构（这样的机构被称为“双直线电机”）。因此，在设计平面电机时，须合理考虑电机结构，如同将两个直线电机“集成在”一个平面上而实现平面运动。

目前针对平面电机的研究可以分为平面步进式、平面永磁式、平面感应式和平面开关磁阻式等几个类型。

## 2.2 平面步进电机

平面步进电机是研究最早的一类平面电机，也是唯一在工业领域中得到应用

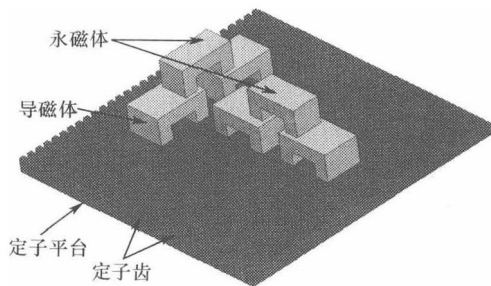


图 2.3 平面步进电机的整体结构

的平面电机，它已成功应用在平面绘图仪和晶片测量仪等精密加工系统装置中<sup>[1,2]</sup>。如图 2.3 所示，在同一个运行平面上，通过双轴垂直组合直线步进电机实现平面运动，即通过两个直线电机在同一水平高度的叠加实现平面二维运动。因此，从严格意义上讲，它属于双直线电机的类型。由于历史的原因，我们沿用平面步进电机的

称呼。

在平面步进电机中，一般将永磁体和驱动线圈作为转子，而将均匀分布平行槽的叠片铁芯作为定子，为转子提供闭合磁路。转子包括两套正交排布的驱动线圈，每个转子包含一个永磁体，永磁体的两极末尾分别附属于一个 U 型导磁体，线圈缠绕在永磁体上，永磁体的两个极与铁磁物质（如硅钢片）相连，作为与定子极组的导磁回路。由于借助永磁体和电励磁的作用，电机磁场不仅与各相绕组通电电流有关，而且还和永磁体提供的内在固定磁场大小有关。

通过线圈励磁，磁路将沿着永磁体、转子极、定子极形成闭合回路，从而实现一个轴的直线步进运动。随着各相控制绕组中的电流励磁顺序和大小的变化，各个极下磁场方向顺序和大小发生变化，带动转子产生连续的直线运动。将两个同样的运动轴垂直装配在移动平台内，即可实现在垂直方向上的二维运动。

按电机机理来分，由于转子存在永磁体和励磁线圈，平面步进电机属于混合式电机。从控制的角度来说，平面步进电机运行于开环步进模式，因此具有步进电机的特点，如位移量与输入脉冲数严格成正比、无积累误差、具有良好的跟随性、结构简单可靠、输出力较大、动态响应快、自启动能力强等特点。基于开环运行的缺点如下：

- (1) 低频振荡及失步；
- (2) 无法抵抗额外的干扰；
- (3) 运行速度和加速度不能很高；
- (4) 自身噪声和振动较大。

平面步进电机的控制策略采用一种“数字开环控制系统”结构，控制精度可达  $0.2\text{mm}$ <sup>[3]</sup>。当高速运行在开环模式时，平面步进电机会产生失步而影响其性能，调节时间较长（ $100\sim 200\text{ms}$ ），抗干扰能力差。如果配合位置反馈装置构成闭环数控系统，如采用光栅测量反馈，则控制系统可实现微米级的定位精度。同时采用速度反馈可改善电机的瞬态特性，速度可达  $1.5\text{m/s}$ ，加速度可达  $30\text{m/s}^2$ <sup>[3]</sup>。

由于电机动子没有导向装置，动子将在不平衡力的作用下发生旋转。旋转扭矩是由偏离动子移动平台几何中心的合力产生的。若在一个极距内，电机一端相对另一端旋转  $1/4$  极距，则几乎会丧失所有的作用力。其中有两种有效抑制旋转的方法<sup>[4]</sup>：

- (1) 合理排布动子线圈以平衡旋转效应；
- (2) 缩短极间距和槽宽的长度比。

例如，在动子上可采用如图 2.4 所示的绕组分布结构，这种布置还可产生角位移为  $n \times 90^\circ$  的旋转运动，可通过减小槽宽极距比来降低偏转角对平面步进电机输出力的影响<sup>[4]</sup>。

从构成电机材料的角度，采用单一材料制作绕组铁芯很难同时满足电机高速度和大力矩的要求。目前的材料很难同时满足低涡流损耗和高饱和磁通密度特性，因此通常使用由几种不同材料混合而成的复合磁性结构，如采用波明德（Permendur）合金复合

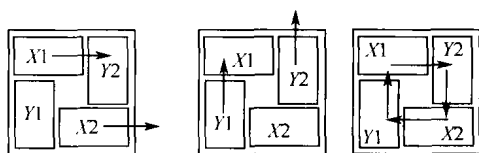


图 2.4 平面步进电机绕组分布图

X 代表 X 方向，Y 代表 Y 方向

磁路结构为主导磁材料，以铁磁材料为导磁材料和支撑件，磁通密度可达到 2.4T，可实现较大的电机力的输出。利用两种材料不同的特性，可以在成本增加不多的基础上实现高速度和低运动损耗<sup>[3]</sup>。

平面步进电机的步进运行通常为开环控制。近年来，人们开始借助适当的测量系统或传感器构建闭环控制系统。由于定子齿距或磁极呈规则的均匀分布，若将其看做参考网络，用其实现位置测量是一种具有应用意义的测量方法。利用定子平面为作参考坐标，可采用电容检测法、光学检测法、电磁检测法和磁检测法等方法实施位置检测。电容检测法利用大面积的齿面来进行测量，可以减小定子平面的不均匀度影响，提高测量精度，但该方法对平面步进电机在定子平面的偏转很敏感；光学检测法对磁场不敏感，但平面步进电机需要两条光栅测量，增加了安装和维护成本，且对定子表面质量有很高要求，故很难实现高精度测量；电磁检测法通过直接测量磁阻变化来实现位置的高精度测量，速度可达 3m/s 以上，但该方法对磁场干扰很敏感，需进行电磁隔离。磁检测法可将检测装置与动子绕组结合制作为一体结构，无须加装辅助设施即可实现位置的精确测量，因而得到更多应用<sup>[5]</sup>。将磁检测法应用于平面步进电机的闭环控制系统，分辨率可提高 8 倍，刚度提高 3 倍，调节时间减小到 5~30ms，有效改善平面步进电机的动态特性。



### 2.3 平面感应电机

当人们开始使用感应电机原理构造平面电机时，首次尝试用两个直线感应电机垂直叠加实现二维运动。相对于平面永磁电机，这种装配方式不会涉及多重复杂的电枢绕组或磁极结构，具有与单边直线感应电机相同的构造，但 X 和 Y 方向的两个绕组必须在磁场相互作用下垂直相交。由于两个垂直绕组的电磁交叉耦合，很难获得一个理想的磁路<sup>[6]</sup>。

在文献 [7] 中提出了一种圆形结构的平面感应电机，如图 2.5 所示，其移动平台有一个圆形结构作为运动核心。这种平面电机初级绕组的铁芯采用环形结构，次级由简单的导磁板构成。电枢绕组的各线圈分别单独通电，不但可实现平面驱动，还可实现平面上的旋转运动。当平面驱动时，将绕组线圈沿运动轴线分成两部分，环形绕组由各电流控制逆变器供电<sup>[8]</sup>，使两部分线圈产生的合成磁场沿直线运动的轴方向，如图 2.6 (a) 所示；旋转驱动时，所有的线圈共同产生旋转磁场，这时其原理等同于轴向气隙旋转电机<sup>[9]</sup>，如图 2.6 (b) 所示。

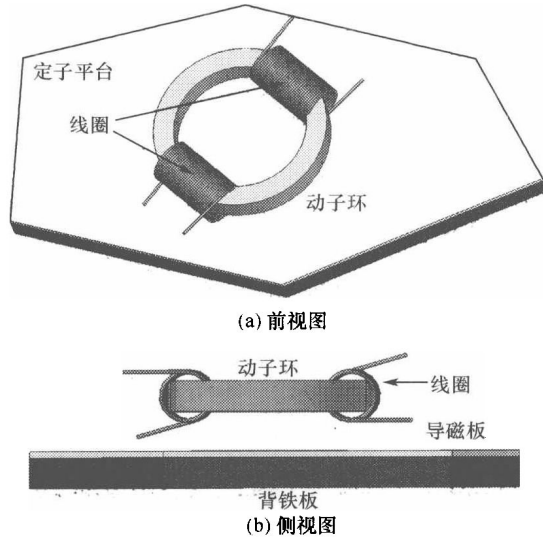


图 2.5 平面感应电机示意图

虽然这种平面感应电机可以实现多自由度的运动，但此类电机的制造很复杂，且平面感应电机较难获得高气隙磁通密度，但可利用简单的次级平面实现较宽运动范围的平面运动。由于复杂的机电特性，在分析平面感应电机特性时，常常基于简化原理，在研究时须借助不同程度上的近似，如等效磁路法等。平面感应电机虽然很难实现高速和高精度平面驱动，但理论上适用于大负载平面运动下