

GAOJINGDU PINGMIAN DIANJI JISHU

高精度 平面电机技术

周赣 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

东南大学出版社

GAOJINGDU PINGMIAN DIANJI JISHU

高精度 平面电机技术

周赣 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分九章，主要内容包括平面电机关键技术、平面电机的设计和工艺、磁场分析方法研究、直线执行器电磁建模、直线执行器控制研究、磁悬浮平面电机控制研究、平面电机控制系统设计、三自由度平面电机运动控制实验。

本书内容理论系统全面、可读性强、实用性高，可供从事直线和平面高精度伺服驱动的工程技术人员学习使用，也可供高等院校的机电类专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高精度平面电机技术 / 周赣著. —北京: 中国电力出版社, 2015.11

ISBN 978-7-5123-8365-4

I. ①高… II. ①周… III. ①电机 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 237835 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 11 月第一版 2015 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.5 印张 169 千字

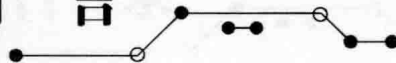
印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言



在许多高新技术领域，如集成电路制造、微型机械装配、生物细胞作业、超精密加工及测量等，都需要具有高速度和高精度的两维定位装置。然而，传统的叠加式二维定位平台无法摆脱机械式传动机构和摩擦所带来的固有缺点，包括定位精度较低、动子部件质量较大、响应速度慢、制造成本高等。因此基于直接驱动的磁浮/气浮平面直接驱动电机被提出来实现高速度和高精度定位，因动子平台在一个近似平面的空间范围内运动，业界称为平面电机。与传统的两维定位装置相比，平面电机具有直接驱动、无摩擦、无反冲、功耗小、定位精度高等优点。

本书结合编者所在东南大学参与的多个平面电机相关的科技项目和社会实践，从平面直接驱动技术的现状、无铁平面电机的关键技术综述、平面电机的电磁力建模方法、平面电机的设计原则和案例、用于平面驱动的直线执行器的建模、直线执行器的控制策略、磁悬浮平面电机建模、平面电机控制系统设计、平面电机的三自由度运动控制策略等方面，全面阐述了平面电机的基本原理、建模方法、设计原则和控制策略，并以一种由四组直线电机驱动的平面电机为例，给出了平面电机控制器的设计方案和控制效果。

本书共分9章，主要内容包括平面电机关键技术、平面电机的设计和工艺、磁场分析方法研究、直线执行器电磁建模、直线执行器控制研究、磁悬浮平面电机控制研究、平面电机控制系统设计、三自由度平面电机运动控制实验。本书内容理论系统全面、可读性强、实用性高，可供从事直线和平面高精度伺服驱动的工程技术人员学习使用，也可供高等院校的机电类专业师生参考。

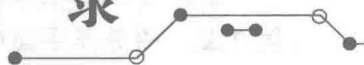
本书受“东南大学出版基金”资助，在此表示衷心的感谢。感谢导师黄学良教授对本书部分研究内容的指导和建议，感谢张前、谭力、程永飞、孙立成等研究生对书稿资料搜集和整理做出的贡献。

由于作者水平和时间所限，书中不妥和错误之处在所难免，作者真诚地希望广大读者对本书的各个方面给以批评指正（电子邮箱：zhougan2002@seu.edu.cn）。

作者

2015年6月

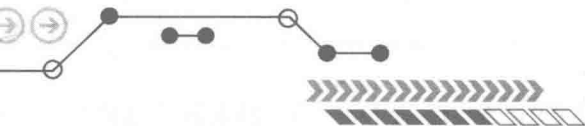
目 录



前言

第 1 章 概述	1
1.1 无铁平面电机的研究意义	2
1.2 无铁平面电机的研究现状	2
第 2 章 平面电机关键技术	5
2.1 永磁和绕组阵列	5
2.2 电磁执行器	10
2.3 悬浮和轴承	11
2.4 位置传感器	12
第 3 章 平面电机的设计和工艺	13
3.1 结构设计	13
3.2 电磁部分设计和工艺	15
3.3 机械部分设计和工艺	22
第 4 章 磁场分析方法研究	28
4.1 相关电磁理论	28
4.2 基于傅里叶分解的磁场谐波分析法	30
4.3 表面等效磁荷分析法	36
第 5 章 直线执行器电磁建模	42
5.1 麦克斯韦应力张量法	42
5.2 虚功法和洛伦兹力法	55
5.3 各类电磁力建模方法对比	72
5.4 电路建模	78
第 6 章 直线执行器控制研究	85
6.1 Halbach 直线执行器设计	85
6.2 基于 dq 变换的电磁力解耦控制模型	89

6.3	执行器电流控制策略	90
6.4	执行器控制实验	91
第 7 章	磁悬浮平面电机控制研究	97
7.1	基于模式力的动力学建模	97
7.2	基于小信号分析的运动控制方程	100
7.3	基于模式力的运动控制策略	103
第 8 章	平面电机控制系统设计	111
8.1	控制系统硬件设计	111
8.2	软件设计	130
第 9 章	三自由度平面电机运动控制实验	142
9.1	解耦和控制策略	143
9.2	平面电机定位实验	145
	参考文献	153



第 1 章

概 述

高精度定位平台的典型应用有半导体光刻定位平台、纳米技术工作台等，其中最重要的应用是半导体产业中的光刻定位平台^[1~3]。在高精度定位平台领域，我国落后发达国家至少 15 年，国家 973 和 863 计划的申请指南中多处涉及用于光刻机等超精密运动机构领域。光刻定位平台要在一个近似平面的空间范围内进行精密运动控制，包括定位晶圆的大行程水平运动和极微的调准调焦运动，即沿垂直轴的微动（百微米数量级）和绕坐标轴的微小转动（毫弧度数量级）。早期，高精度定位平台多采用精动台和粗动台层叠的多层动子结构，其中，粗动台常采用气浮直线电机驱动的龙门架型或十字架型双层机械结构，用于提供水平 x 、 y 轴的大行程运动；精动台由压电执行器、音圈电机等微动执行器驱动，用于提供沿 x 、 y 、 z 轴的微小平动及转动。多层机械结构和传动装置的存在，造成该类定位平台的体积和质量较大，需占用较大作业空间且响应缓慢。为解决上述问题，从 21 世纪初开始，各国学者陆续开始了如图 1-1 所示的新型定位平台的研究，该类平台最明显的特点是：动子部分为一个安装有永磁体（或线圈）的刚体，和

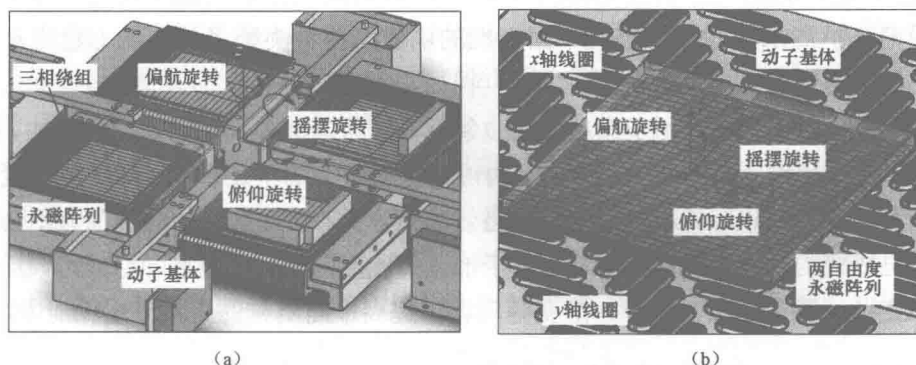


图 1.1 单层动子结构的平面电机

(a) 第一类平面电机；(b) 第二类平面电机



定子部分的线圈（或永磁体）配合直接产生平面运动 [4~6]。学术界称这种具有单层动子结构的定位平台为平面电机（或表面电机、平面执行器）。

1.1 无铁平面电机的研究意义

随着材料科学及先进制造业的快速发展，微米、纳米级别的高精度定位平台技术得到了深入的研究和发展。平面电机作为一种能够直接输出多维电磁推力的电动机，它可用于构造具有直接驱动特点的新型高精度定位平台。采用平面电机直接驱动平面工作台，可以克服传统驱动方式存在的摩擦、侧隙变形等影响平面定位装置性能的一系列问题。此外，平面电机直接通过电磁力产生平面运动，还具有出力密度高、低热耗、高精度等特点，在现代制造装备中具有很大的应用潜力，近年来受到了广泛关注^[7]。

按照基本电磁结构和驱动方式，平面电机主要可分为以下两类。

（1）第一类平面电机。如图 1.1（a）所示，电磁执行器具有明显的直线电机结构，分布于动子四角或四边。该类平面电机的电磁结构简明，可采用传统直线电机的电磁力建模和控制方法，通过协控直线电机执行器的出力来控制动子平台的运动。因为永磁阵列运动时不能超出对应线圈阵列的平面区域，所以该类电机水平行程的扩展将以增大动子尺寸为代价。

（2）第二类平面电机。如图 1.1（b）所示，电磁执行器不具备明显的直线电机结构，而由两自由度永磁阵列（其磁场可分解为沿正交的 x_m 轴、 y_m 轴方向周期分布的两个分量）和配套的线圈阵列构成。因为两自由度永磁阵列可和 x 、 y 轴线圈分别产生 x 、 y 轴水平力，所以只需增大定子线圈阵列的平面安装范围即可扩展水平行程。该类平面电机的电磁拓扑种类繁多，电磁力建模及控制方法和传统直线电机区别较大，是当前一个研究热点。

另外，由于主要应用于高精度定位领域，平面电机多采用无铁动磁结构，并采用气浮或磁浮支撑。其中，无铁结构可消除磁阻力的不良影响，其力能密度低的缺点可通过 Halbach 永磁阵列的聚磁效应来弥补；动磁结构的动子部分不会受到供电线缆的动力学扰动，安装于定子部分的线圈阵列也更易散热；采用气浮或磁浮支撑可避免摩擦、侧隙、形变等问题，提高平面电机的高精度定位能力。

1.2 无铁平面电机的研究现状

第一类平面电机的电磁执行器具有明显的直线电机结构，可直接使用直线

电机的电磁力建模和控制方法。

1997年,麻省理工大学的 Kim 博士研制出了世界上第一台平面电机样机,样机采用图 1.1(a)所示的无铁动磁结构,采用 Halbach 永磁阵列来增加气隙磁密。Kim 博士运用矢量磁位与傅里叶级数方法,推导出了定子绕组与动子永磁阵列磁场的解析形式,采用 Maxwell 应力张量法推导出了基波力和各次脉动力的解析表达式;采用经典的 dq0 分解法对垂直和水平电磁力进行解耦控制,通过协控 4 台直线电机执行器的电磁力来控制平面电机的 6 自由度运动;建模时假设电磁力集中作用于永磁阵列质心,不考虑边端效应^[4]。开展类似研究的有韩国忠州大学的 Jung^[9]、日本东北大学的 Gao^[10]、加拿大多伦多大学的 Fulford^[11]等,为降低磁悬浮支撑的难度,上述学者对 Kim 博士电机的结构做了一些改进,但在电磁力建模和解耦控制方面没有本质创新。

国内开展第一类平面电机研究的机构有清华大学、东南大学等。清华大学的汪劲松对微偏航角状态下(偏航运动指绕 z 轴的偏航转动)平面电机的三自由度控制策略做了仿真研究^[12]。东南大学本书作者所在课题组开展的创新性研究包括:建立了直线执行器的数值洛伦兹力模型,利用该模型可替代有限元和实验快速准确地计算磁力、磁力矩,基于数值洛伦兹力法,对直线执行器的边端效应、偏航角对电磁力的影响、分布电磁力引起的磁力矩扰动等做了深入的研究;针对平面电机的驱动电流有无穷多解的问题,提出了一种新型的基于切线圈法和 Moore-Penrose 伪逆法的磁力、磁力矩解耦控制策略,可快速求解欧姆发热最小的驱动电流,并有效抑制边端效应;此外,提出了基于梯形线圈阵列的直线执行器新结构,理论上可大幅度降低高次脉动力比例^[13~18]。相关研究成果已在 *IEEE Transactions on Magnetics*、*International Review of Electrical Engineering* 发表论文 3 篇,在中国电机工程学报、电工技术学报上发表论文 5 篇,在国际会议上发表论文 10 余篇。

第二类平面电机的最重要特征是采用两自由度永磁阵列,两自由度永磁阵列的磁场沿两个正交的方向都呈周期性变化,通过设计配套的线圈阵列来产生磁力、磁力矩。该类电机的永磁阵列和线圈阵列拓扑种类繁多,发展出了一些不同于直线电机的电磁力建模和解耦控制的方法。由于定位于高精度伺服领域,在电机本体的优化设计方面也发展出了一些不同于传统电机的新理论。

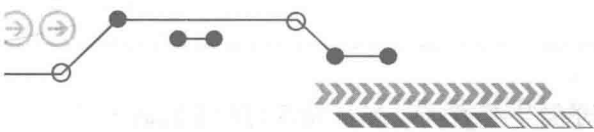
国外开展相关研究的有韩国首尔大学的 Cho^[19],巴西南里奥格兰德联邦大学的 Silveira^[20],美国德州农机大学的 Hu^[21]等。上述学者提出了多种新型



的两自由度永磁阵列和配套线圈阵列结构,旨在提高气隙磁密和减小高次力脉动;采用的电磁力建模方法包括解析洛伦兹力法、Maxwell 应力张量法等,电磁力解耦控制多采用 $dq0$ 分解法;电磁力建模时采用集中力假设,没有考虑电磁力分布引起的转矩,可以说,上述学者采用的电磁力建模方法是直线电机建模方法的两维度扩展。在第二类平面电机领域研究成果最突出的是荷兰埃因霍温技术大学, Jansen、Lierop 等学者提出了多种电机拓扑,其中最具有代表性的是图 1.1 (b) 所示的人字形线圈拓扑。具体的研究成果包括:采用矢量磁位和傅里叶级数法计算两自由度永磁阵列的磁场,采用解析洛伦兹法推导出了单线圈的磁力、磁力矩模型,首次在模型中考虑了分布电磁力引起的转矩;运用 Moore-Penrose 伪逆等线性代数理论提出了合力-单线圈电流变换的电磁力解耦控制策略、发热最小驱动电流的寻解方法、基于活动线圈组的边端效应抑制策略;提出了一套以发热最小、力脉动最小等为优化目标的平面电机设计理论雏形,优化参数包括永磁阵列厚度、极距、线圈几何参数等^[22~25]。

国内开展第二类平面电机研究的机构有清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学等。清华大学的朱煜等学者在永磁阵列和线圈阵列拓扑优化、可增大电磁推力的电流控制策略等方面做了深入的理论研究^[26, 27]。上海交通大学的曹家勇提出了一种新型的动圈式有铁平面电机结构,采用储能法推导出了电磁力的解析表达式^[28, 29]。哈尔滨工业大学的寇宝泉提出了一种新型的九相平面电机,开展了永磁阵列和线圈拓扑设计、电磁力控制等方面的理论和实验研究^[30]。

根据电磁推力的产生原理,又可将平面电机划分为感应型、变磁阻型、永磁同步型三类。三类电机电磁推力的产生原理分别与同类型的旋转电机电磁转矩产生原理相似。上述三类平面电机中,感应平面电机的研究尚处于初级阶段,研究的较少。变磁阻平面电机,经过二三十年的研究和开发,目前已经初步进入了产品化阶段。变磁阻平面电机具有结构简单、控制容易等优点,同时,它存在推力波动大、定位精度低、定子之间吸引力大、磁路饱和严重、发热量大等诸多问题,因此,其应用档次受到了限制。永磁同步平面电机(Synchronous Permanent Magnet Planar Motors, SPMPM)是近期研究和开发的热点。由于它在结构、控制精度、损耗等方面具有良好的综合性能,其在光刻机、扫描探针显微镜、纳米技术工作台等现代精密、超精密定位设备中具有巨大的应用潜力,引起了国内外学术界和工程界的广泛兴趣^[7, 31]。



第2章

平面电机关键技术

2.1 永磁和绕组阵列

2.1.1 Halbach 永磁阵列

Halbach 永磁阵列的概念最早是由美国劳伦斯伯克利国家实验室的 Klaus Halbach 教授提出的^[40], 在 20 世纪 90 年代被国内外研究机构相继应用于粒子加速器、自由电子激光装置、同步辐射装置等高能物理领域中。Halbach 永磁阵列具有许多优良特性, 从 20 世纪 90 年代开始, 国际上开始重视其在电机领域中的应用^[41~55]。

Halbach 永磁阵列在高性能电机领域中的应用研究之所以越来越热, 是由于 Halbach 永磁阵列具有如下优良特性:

(1) 用 Halbach 永磁阵列, 容易得到在空间按较理想正弦分布的磁场, 可大大减弱电机的齿槽效应力矩^[44~47, 53, 55, 56]。文献[44]以一台 12 极的内转子电机(永磁体的内半径为 29mm)为例, 指出采用 Halbach 永磁阵列后, 气隙中的径向和周向磁密波形在 $r=29\text{mm}$ 处(即永磁体内径处)含有较丰富的谐波分量, 但在 $r=27\text{mm}$ 处就可以得到相当理想的正弦分布磁场, 即谐波随半径的减小而迅速减小, 仅仅在 2mm 之内就可以得到理想的正弦分布磁场; 另外还指出, 即使采用每极较少的永磁体段数(例如 3 段, 甚至 2 段), 也可以得到和理想的 Halbach 永磁阵列类似的磁场分布。上述特点使得 Halbach 永磁电机的齿槽效应力矩几乎可以忽略不计, 有利于提高电机的性能; 该特点也说明要制造此种高性能电机的成本不高, 因为通过采用较少段数的 Halbach 永磁阵列, 以及采用简单绕组和定转子非斜槽结构, 就可得到理想的正弦分布磁场, 避免了常规高性能电机制造时, 往往须采用定转子斜槽结构及复杂的分布绕组等措施才能得到较理想正弦分布磁场的缺点。

(2) Halbach 永磁阵列的特点之一是阵列的一侧磁场很强, 另一侧磁场很弱,



有人甚至形容这种阵列是一种“磁单极子”^[45, 48~50, 54], 这一特性有助于提高电机的气隙磁密。文献[45]以某种径向激磁的电机(该电机的磁体厚度是极距的一半)为例, 指出在同样的体积条件下, 采用 Halbach 永磁阵列和采用常规的径向永磁阵列相比较, 前者产生的气隙磁密的最大值比后者大 41%, 在磁密呈较理想正弦分布的气隙处, 前者的磁密幅值比后者大 11%。文献[49]以一台人工心脏血泵驱动永磁电机为例, 指出采用了 Halbach 永磁阵列后, 即使在气隙由 0.75mm 增加到 1.0mm 的不利的情况下, 每极气隙磁通仍增加 25%以上, 而转子轭部磁通减少了 30%。显然, 上述特性对于提高电机的力能密度和缩小电机的体积都十分有利; 同时, Halbach 永磁阵列具备的“磁单极子”特性可大大减弱电机轭部磁通, 即该阵列具有磁自屏蔽特性。该特性一方面可以大大减少电机本体的漏磁现象, 减少电机对外部环境的电磁干扰; 另一方面可以减少轭部铁芯的质量(也有助于降低成本), 使得电机转子的质量和转动惯量相应变小, 有助于提高电机的动态特性, 这非常适合于要求有较高动态性能的伺服电机。例如, 文献[50]以一台 4000r/min 时功率为 1.2kW 的 Halbach 伺服电机为例, 指出由于低的转动惯量, 该电机可在相当短的时间内(约 100ms)由静止加速至 2000r/min。

(3) 采用 Halbach 永磁阵列, 可以提高电机的效率^[45, 48~53]。文献[48]以应用于高速飞轮领域的机电式电池中的无刷永磁电机为例, 指出采用 Halbach 永磁阵列的电机, 与采用传统的具有定子齿槽结构的电机相比, 效率可从 91.9% 提高到 98.7%。文献[10]以人工心脏血泵驱动永磁电机为例, 指出采用 Halbach 永磁阵列的电机与采用径向永磁阵列的电机相比, 效率提高了 10%以上。文献[50]以一台较大功率的电机(28kW)为例指出, 与常规的径向永磁阵列型电机相比, 采用 Halbach 永磁阵列的电机的空载损耗可以降低一个数量级。

(4) 采用 Halbach 永磁阵列, 可以降低电机的电磁力脉动^[45, 48, 52, 53], 这一特性尤其适合于高精度的伺服系统, 并可降低对电机轴承的要求。

(5) 采用 Halbach 永磁阵列的电机, 还具有冷却容易、电感系数相对较小等特点^[48, 55]。

综上所述, 将 Halbach 永磁阵列应用于电机, 可以提高电机的力能密度, 提高电机的静态和动态性能, 提高电机效率, 减少电机的齿槽力矩, 降低电机的力矩脉动, 减少电机的体积, 减少电机对外部环境的电磁干扰, 并具有制造容易、制造成本较低等优点, 这些特点尤其适合于高速电机、伺服电机、直线电机等电机领域, 有着诱人的应用前景。

目前, Halbach 永磁阵列已经受到学术界和工业界的广泛关注, 在永磁电机领域获得了一定应用。

1. 在单自由度电机中的应用

(1) 高速电机。Halbach 永磁阵列的低铁耗特点被大量应用在高速电机中, 如飞轮储能系统。高速电机要求在额定功率下的高效率和低空载损耗, 尽管传统的永磁铁芯无刷电机也可以做到额定功率下的高效率, 但其在空载状态下的铁芯损耗是不可忽略的。另外, 不稳定的磁阻力也会对轴承系统提出额外的推力要求, Halbach 永磁无铁电机可在满足高效率和低空载损耗的基础上提供相对较高的力能密度。

(2) 伺服电机。伺服电机要求具有低齿槽转矩、低脉动转矩、低惯性等特点, Halbach 永磁无铁电机就具有上述特点, 因此 Halbach 永磁阵列已被应用于磁盘驱动器和汽车电动助力转向器等伺服电机系统。

(3) 直线电机。直线电机是指能将电能直接转化成直线运动机械能的电机, 因其磁单边性和磁场良好的正弦性, Halbach 永磁阵列已被广泛应用在高性能直线电机系统中, 图 2.1 (a) 为 MIT 的 Kim 博士设计的一种基于 4 组 Halbach 直线电机的定位平台系统。

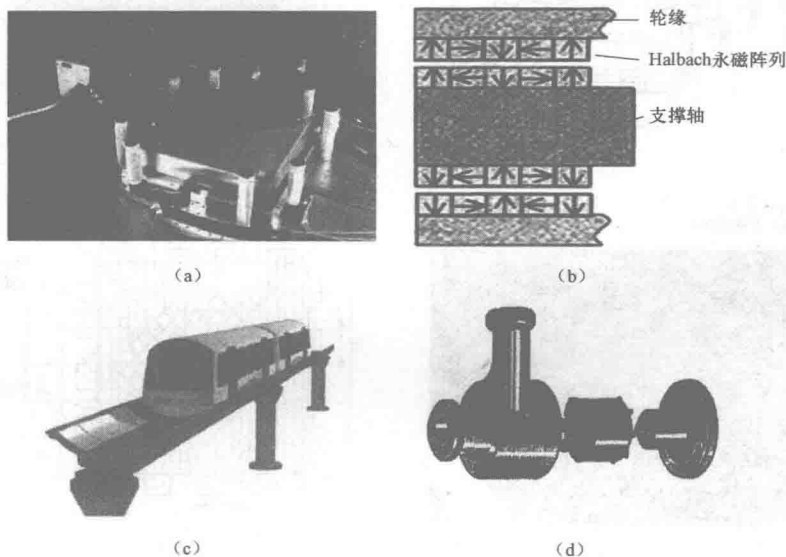


图 2.1 Halbach 永磁阵列在单自由度电机中的应用

(a) 基于直线电机的光刻平台; (b) Halbach 磁轴承; (c) Magplane; (d) NAS 血泵系统

(4) 磁轴承。磁轴承具有无接触、无摩擦、无磨损、高速度、高精度、不



需要润滑和密封等特点, Halbach 永磁阵列已被广泛应用在磁轴承中, 图 2.1(b) 为一种应用在飞轮装置中的轴向被动磁轴承。

(5) 磁悬浮列车。MIT 从 1992 年开始对 Magplane (磁悬浮飞机) 系统进行研究, 当时有超导型和永磁型两种, 后来只研究永磁型 (永磁体比超导磁体重 40%, 但原理简单、造价低)。图 2.1(c) 所示的 Magplane 系统采用永磁 EDS 悬浮和 LSM 推进, 悬浮用 Halbach 磁体以 37° 水平倾角安装在车体两侧, 推进用 Halbach 磁体安装在车体中央, 与轨道中央的 LSM 线圈作用产生推进力。

(6) 血泵系统。Halbach 永磁阵列被应用于一种人工心脏血泵驱动电机中, 图 2.1(d) 为该血泵系统的装配图。

2. 在平面电机中的应用

Halbach 永磁阵列在平面电机系统中也得到了广泛应用。图 2.2(a) 为 MIT

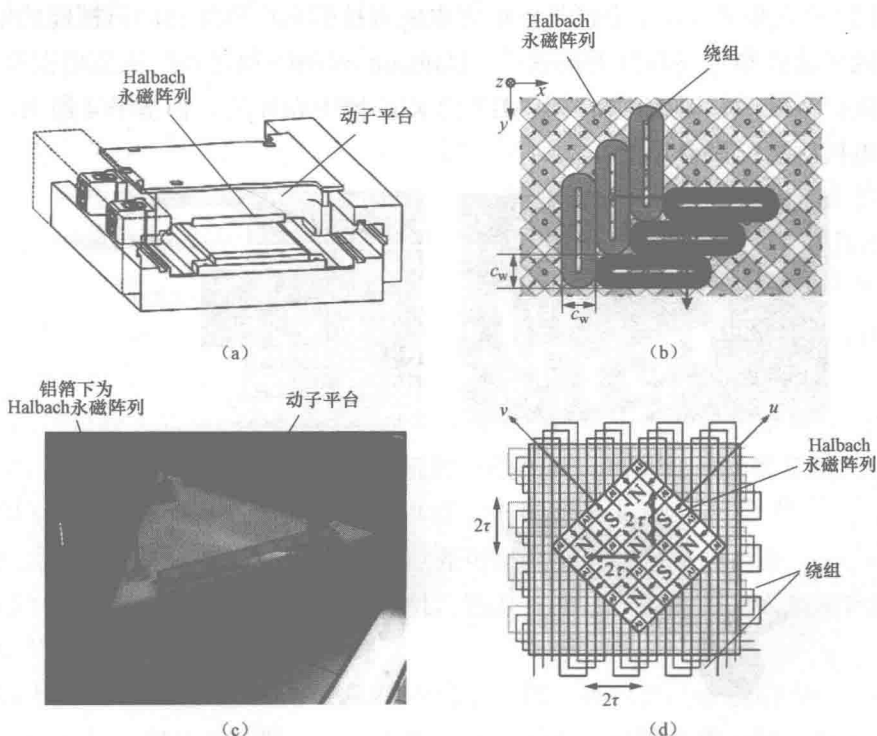


图 2.2 Halbach 永磁阵列在平面电机中的应用

c_w —线圈宽度; r —极距

(a) Williams 博士研究的平面电机; (b) Eindhoven 大学研制的平面电机;

(c) TIEJUN HU 博士研制的平面电机; (d) H.Ohsaki 教授研制的平面电机



2.1.3 两自由度绕组阵列

两自由度绕组阵列是平面电机产生电磁力的另一个主要部件,作用在动子上的电磁力是由绕组中的电流和永磁阵列的磁场相互作用产生的,绕组的形状、尺寸、位置必须配合永磁阵列的结构合理设计。

对于图 2.4 (a) 和图 2.4 (b) 所示的平面电机,绕组阵列具备对称多相绕组结构,当永磁阵列位于绕组边端效应可忽略的任意位置时,都可通过控制绕组电流在永磁阵列下方产生需要的绕组行波磁场,所以该类电机一般通过控制绕组磁场来控制磁力和磁力矩。

对于图 2.4 (c) 所示的平面电机结构,绕组阵列不具备对称多相绕组结构,所以基于磁场控制的电磁力建模方法不再适用。无铁平面电机的单个绕组可被当成洛伦兹力执行器使用,由于洛伦兹力执行器的电磁力和电流成正比,所以单线圈电磁力模型具有 $w = f_c(p, K_c) i_c$ 的形式,其中 i_c 为线圈电流幅值, p 表示动子的位置向量, K_c 表示随 p 变化的模型系数向量。

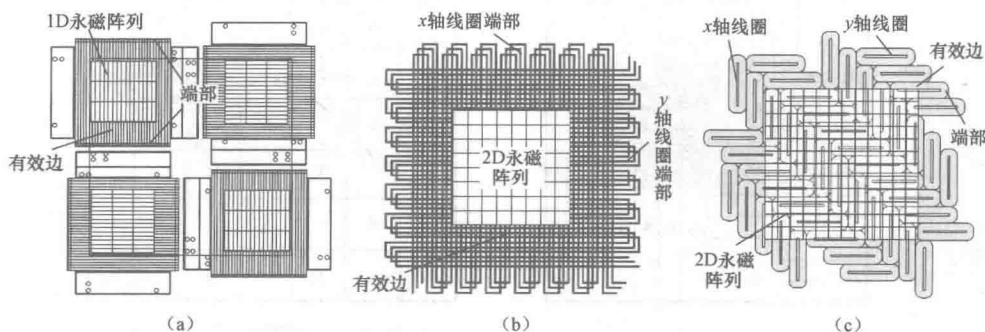


图 2.4 典型平面电机的电磁结构

(a) 第一类平面电机; (b) “长有效边线圈”第二类平面电机;

(c) “短有效边线圈”第二类平面电机

2.2 电磁执行器

平面电机的大行程电磁执行器一般由直流电机、同步电机、感应电机、变磁阻电机、直线电机等实现,微动执行器一般由音圈电机、超声波电机等实现。下文分旋转电机和直线电机两类来讨论各种大行程电磁执行器的特点。

1. 旋转电机执行器

各种旋转电机作为电磁执行器的利弊如下:

(1) 直流电机。控制简单, 但电刷的存在使直流电机需定期维护且不适合真空作业环境。

(2) 感应电机。控制较困难。

(3) 变磁阻电机。电机齿槽引起的齿槽力会给精密定位带来难度。

(4) 同步电机。较适合光刻作业, 为避免磁阻力和齿槽力, 可采用无铁、无齿槽、绕组表面安装的机构。

2. 直线电机执行器

传统的平面定位系统通过齿轮、滚珠丝杠等传动机构把旋转电机的旋转运动转化为直线运动, 因为传动机构存在齿隙、摩擦、不确定的滚珠运动等问题, 所以很难进行高精度的定位。另外, 机械摩擦造成的粉尘、润滑等也是技术难题, 造成的后果是, 技术人员被迫在工作台上再设置一个精动工作台来进行微小位移校正, 这种多动子结构定位平台系统庞大, 响应缓慢。

在高精度平面电机控制中, 与旋转电机驱动相比, 直线电机直接驱动具备的优势有:

(1) 没有机械噪声和附加的传动误差。

(2) 没有丝杠等的附加质量, 能够获得更大的加速度和更快速的响应。

(3) 直线电机不仅能产生单边力, 也能产生垂直力, 可作为两自由度执行器使用。

2.3 悬浮和轴承

目前主流的悬浮技术有如下4种:

(1) 电动悬浮。利用涡流现象产生的排斥力来推动动子平台, 这种悬浮方式能量损耗较大, 散发的热量会影响定位精度。

(2) 超导悬浮。在目前技术条件下, 超导悬浮实现起来昂贵而且复杂。

(3) 气体悬浮。实现方式较简单, 气浮轴承的刚度也较理想, 但气浮不适合半导体加工的真空作业环境。

(4) 磁悬浮。与其他悬浮技术相比, 磁悬浮更适合光刻作业环境。

在平面电机系统中, 需要一定数量的轴承支撑动子平台, 如需实现无摩擦支撑, 常采用的有空气轴承和磁轴承(分别对应上述气体悬浮技术和磁悬浮技