

磁悬浮平面电机驱动 及控制技术

张生果 著



科学出版社

磁悬浮平面电机驱动及控制技术

张生果 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述了磁悬浮平面电机相关的基本理论和基本技术。重点阐述了磁悬浮平面电机的电气驱动技术和六自由度运动控制技术。全书侧重于基本理论和基本技术实现方法的阐述,面向基本理论和基本技术的实际工程应用。

本书可以作为高等院校和科研机构机电一体化、机械制造及其自动化、电机及其系统、控制科学与工程等专业方向研究生的参考资料,也可供相关专业科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁悬浮平面电机驱动及控制技术/张生果著. —北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043499-7

I. ①张… II. ①张… III. ①电机-控制系统-研究 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第048076号

责任编辑:宋无汗 祝 洁 杨向萍 罗 娟 / 责任校对:张怡君

责任印制:赵 博 / 封面设计:范璧合

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:11

字数:220 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

磁悬浮平面电机是近十几年出现的一种新型电气驱动装置。由于独特的机电磁一体化结构和工作原理,它具有在高真空环境下获得长行程、高加速度、高速度、高精度、多自由度运动的潜在能力,因此它在先进制造系统、IC 制造装备、精密运动和测量等装置和系统的运动驱动中具有广阔的应用前景。

关于磁悬浮平面电机的理论和技术,虽然近年来国外的研究并不少见,但由于技术封锁、商业垄断等原因,国内的专门研究文献非常少见。本书试图通过阐述磁悬浮平面电机的驱动和控制技术,以期抛砖引玉,促进国内对磁悬浮平面电机更全面深入的研究。

本书共有六章内容。第 1 章绪论,介绍了磁悬浮平面电机的基本结构、原理和特点,综述了国内外对磁悬浮平面电机相关理论和技术的研究现状。第 2 章电磁力/矩建模,论述了磁悬浮平面电机电磁力/矩建模的基本理论和方法,并介绍了模型验证的主要方法。第 3 章电气驱动——线圈阵列换流方法,论述了磁悬浮平面电机六自由度运动电气驱动的基本原理和方法,阐述了电气驱动中面临的主要问题以及解决、克服或改善这些问题的理论基础和实现方法,并对动磁式平面电机的电气驱动问题和方法进行了初步的探讨。第 4 章六自由度运动动力学建模及控制,论述了磁悬浮平面电机各自由度运动的动力学特性并建立其动力学模型,根据运动控制要求设计适当的控制器,对运动驱动和控制系统进行了综合的仿真分析。第 5 章六自由度受控条件下的悬浮运动控制,介绍了磁悬浮平面电机六自由度运动电气驱动和控制实验系统的搭建方法,重点介绍了六自由度受控条件下悬浮运动控制的实验方法。第 6 章总结与展望,是对全书内容的总结以及对未来研究的展望。

本书内容来自于作者在攻读博士学位期间的主要研究成果和近几年的研究成果,在此对我的博士生导师——清华大学机械工程系机电工程研究所朱煜教授,以及其他提供帮助的老师和同学深表感谢。对西北民族大学电气工程学院的同仁和我的家人给予的帮助、支持表示诚挚的谢意。

本书承蒙国家自然科学基金资助项目“磁悬浮动磁式平面电机多自由度运动电气驱动方法研究(51465053)”、西北民族大学引进人才科研项目“磁悬浮平面电机驱动技术研究(XBMUYJRC201301)”和中央高校基本科研业务费专项资金项目“磁悬浮动圈式平面电机电流驱动及运动控制(31920140082)”的资金支持,在此表示由衷的感谢。

由于本人学术水平和研究能力有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝指教。

张生果

2014 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 磁悬浮平面电机应用背景及研究意义	1
1.1.1 IC 制造装备技术发展及其对平面工作台运动驱动系统的要求	1
1.1.2 其他技术领域对平面电机运动系统的要求	4
1.1.3 磁悬浮平面电机驱动及控制技术的研究意义	5
1.2 磁悬浮平面电机典型结构及基本工作原理	6
1.3 磁悬浮平面电机六自由度运动特性及基本驱动方法	11
1.3.1 六自由度运动特性	11
1.3.2 六自由度运动基本驱动方法	11
1.4 磁悬浮平面电机多自由度运动控制方法	14
1.5 国内磁悬浮平面电机研究状况	20
1.6 磁悬浮平面电机研究现状及研究方法小结	22
1.7 本书研究的问题和研究内容	23
1.7.1 研究问题的提出	23
1.7.2 研究内容	25
第 2 章 电磁力/矩建模	27
2.1 引言	27
2.2 永磁阵列磁场解析模型建立及验证	28
2.2.1 永磁阵列磁场建模	28
2.2.2 永磁阵列磁场解析模型实测验证	31
2.3 基于 DQ 变换的电磁力/矩建模及电流求取	37
2.3.1 单个力单元电磁力/矩建模及线圈电流求取方法	37
2.3.2 四个力单元电磁力/矩建模及线圈电流求取方法	39
2.3.3 基于 DQ 变换的电磁力/矩模型及线圈电流求取法则讨论	44
2.4 基于洛伦兹力积分法则的电磁力/矩建模及模型验证	45
2.4.1 电磁力/矩建模	45
2.4.2 电磁力/矩模型实验验证	50
2.4.3 电磁力/矩模型与实测力/矩误差来源分析	56
2.5 小结	60

第 3 章 电气驱动——线圈阵列换流方法	62
3.1 引言	62
3.2 基于电流最小 2-范数的线圈阵列换流方法	63
3.2.1 基于电流最小 2-范数的线圈阵列换流方法	63
3.2.2 换流仿真及结果分析	64
3.3 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列电流优化换流方法	67
3.3.1 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列电流优化换流方法的原理	67
3.3.2 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列电流优化换流方法的解析算法	68
3.3.3 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列优化换流方法的数值稳定性	70
3.3.4 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列优化换流方法的仿真分析	72
3.3.5 基于电流 ∞ -范数有界的线圈阵列优化换流方法的实验验证	76
3.4 线圈阵列热损耗均匀化	81
3.4.1 线圈阵列热损耗均匀度、电流均匀度及均匀化方法	81
3.4.2 线圈阵列热损耗均匀化仿真分析	83
3.5 平面电机推动力的提高	92
3.5.1 最大力/矩(加速度)约束问题	92
3.5.2 提高平面电机推动力的方法	94
3.5.3 平面电机推动力提高的仿真分析	96
3.6 动磁式磁悬浮平面电机的电气驱动	109
3.7 小结	114
第 4 章 六自由度运动动力学建模及控制	116
4.1 引言	116
4.2 六自由度运动控制系统构建	117
4.3 六自由度运动控制对象动力学建模	119
4.3.1 六自由度控制对象刚体动力学建模	119
4.3.2 悬浮自由度重力补偿动力学建模	120
4.4 六自由度运动控制器设计	122
4.4.1 最小时间加权误差绝对值积分准则	123
4.4.2 控制器设计	124
4.5 控制系统综合仿真	127
4.5.1 控制系统综合仿真模型建立	127
4.5.2 六自由度运动电磁力/矩-线圈电流解耦仿真	128
4.5.3 各自由度控制性能仿真	131
4.5.4 控制系统各自由度轨迹跟踪性能仿真	137
4.6 小结	142

第 5 章 六自由度受控条件下悬浮运动控制	143
5.1 引言	143
5.2 实验系统机械结构及传感器配置	144
5.3 解耦及悬浮控制实验	146
5.3.1 开环悬浮控制	146
5.3.2 三自由度控制条件下悬浮定位	147
5.3.3 六自由度控制条件下悬浮定位及轨迹跟踪	151
5.4 小结	155
第 6 章 总结与展望	156
6.1 研究内容总结	156
6.2 后续研究展望	157
参考文献	159

第 1 章 绪 论

1.1 磁悬浮平面电机应用背景及研究意义

1.1.1 IC 制造装备技术发展及其对平面工作台运动驱动系统的要求

当今世界全面进入了信息化时代。信息技术(information technology, IT)的飞速发展,把人类带入了一个全新的时空环境。在这个海量信息无处不在并飞速传播的时空环境里,人类的一切生产活动,不管第一、第二产业生产活动,如能源生产、工业制造等,还是第三产业生产活动,如通信、交通等,追本溯源,都越来越依赖于信息技术的发展。作为信息技术产业的硬件基础,半导体芯片或集成电路(integrated circuit, IC)及其制造技术水平的高低已经成为衡量一个国家现代化水平和综合国力的重要标志。而作为 IC 技术核心之一的 IC 制造装备技术则是发展集成电路产业乃至信息技术产业的重要基础和战略关键。

人类生产活动对科技进步的无限需求促进了集成电路集成度的进一步提高、处理速度的进一步加快、单位体积储存容量的进一步扩大。几十年来,MPU、DRAM、Flash 等最尖端集成电路芯片的集成度、处理速度、容量按所谓“摩尔定律”快速发展,近年来还有加速发展的趋势。人类对集成电路芯片更高、更快、更强的需求必然对制造这些芯片的设备——IC 制造装备及相应的实现技术提出越来越高的要求。

光学投影曝光步进扫描光刻机是 IC 制造装备中投资最大、精度与难度最大、技术最为密集的关键设备,它由激光光源、照明系统、投影物镜系统、工作台系统、整机辅助系统等部分组成。其工作原理主要基于光学投影曝光系统技术、对准系统技术和工作台运动系统技术三大关键技术。光学投影曝光系统当前普遍采用波长 193nm 的 ArF 深紫外(deep ultra violet, DUV)光源技术^[1],工作台系统由硅片台系统和掩膜台系统组成,硅片台的步进扫描运动和掩膜台的同步扫描运动完成最后的曝光成像^[2]。图 1.1(a)为先进半导体材料光刻公司阿斯麦(Advanced Semiconductor Material Lithography, ASML)生产的某型光刻机外观图,图 1.1(b)为其双硅片台外观图^[3]。

工作台运动系统是光刻机等 IC 制造装备的关键组成部分。图 1.2 所示为典型光刻机平面电机(硅片台)运动系统,它主要由精(微)动台、粗动台、气浮导轨、直线电机、大理石基座及其他附件组成。粗动台采用气浮支承、直线电机驱动,以获得平面内的大行程运动;精(微)动台叠加在粗动台上,一般采用音圈电机或压电精

密步进电机驱动,其功能是实现步进扫描精密补偿运动和调平调焦运动^[4]。

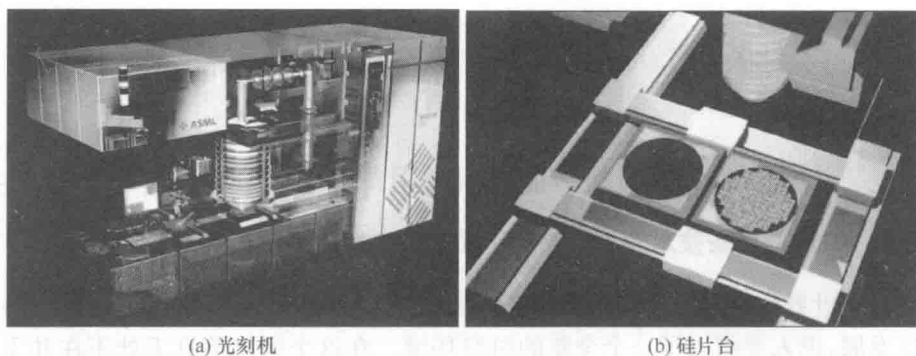


图 1.1 ASML 公司某型光刻机及硅片台外观

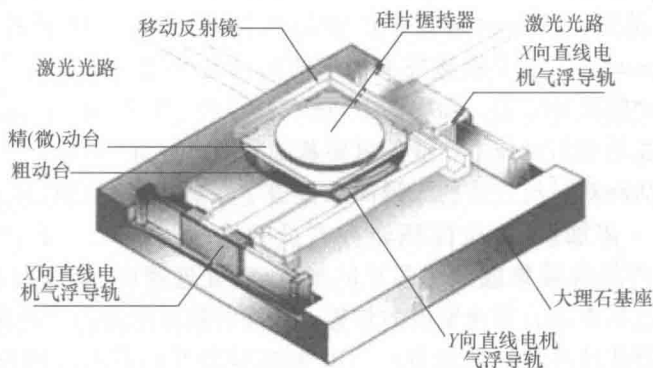


图 1.2 光刻机平面电机(硅片台)运动系统

按照如图 1.3 所示的欧洲、美国以及亚洲的韩国、日本、中国台湾等国家和地区半导体技术组织联合发布的 2013 版半导体技术发展路线图(ITRS2013)^[5]预测的未来光刻机潜在技术方案,下一代光刻机可能采用极紫外光刻(extreme ultra violet, EUV)、无掩模光刻(maskless lithography, ML2)、压印光刻(Imprint)等解决方案。无论采取哪一种解决方案,都必须采用工作台(至少要采用硅片台)运动系统,并对其环境适应性、运动性能提出了更高、更强、更优的技术要求。

(1) 纳米尺度的加工制造往往对其制造装备有着特殊的工作环境适应性要求。不同于现在的 193nm 波长光源的 DUV, EUV、ML2、Imprint 等解决方案都对硅片(台)所处的工作环境提出了高真空度、高洁净度等环境适应性要求。如 EUV 就采用波长极短(13.5nm 或者更短)的极紫外光源,它要求平面电机工作在高真空环境下以避免空气对光能的吸收^[6]。

		量产年份																
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	
DRA和MMPU 半节距最小值	可光刻半节距最小值/nm	28	26	24	22	20	18	17	15	14	13	11.9	10.9	10	8.9	8.0	7.1	
	20~30nm	193nm光源双重图案模式																
	<15~20nm	193nm光源四重图案模式	选择范围窄															
		极紫外光刻 直接自装配	选择范围窄															
<11~15nm	193nm光源四重图案模式	选择范围窄																
	极紫外光刻双重图案模式	选择范围窄																
	高数值孔径极紫外光刻	选择范围窄																
	直接自装配 无掩膜光刻 纳米压印	选择范围窄																
<8~11nm	极紫外光刻双重图案模式	选择范围窄																
	高数值孔径极紫外光刻扩展	选择范围窄																
	直接自装配	选择范围窄																
	无掩膜光刻 纳米压印	选择范围窄																
<8nm	高数值孔径极紫外光刻扩展	选择范围窄																
	极紫外光刻四重图案模式	选择范围窄																
	直接自装配扩展	选择范围窄																
	无掩膜光刻	选择范围窄																
	纳米压印 革新	选择范围窄																
芯片节距	量产年份	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	
	DRAM接触节距最小值/nm	85	78	72	66	60	55	51	46	43	39	36	33	30	28	25	23	
	逻辑电路接触节距最小值/nm	144	115	115	102	91	81	72	64	57	51	46	41	36	32	29	26	
72~100nm (36~50nm半节距)	193nm光源双重图案模式																	
	<54~72nm (<27~36nm半节距)	193nm光源三重或四重图案模式	选择范围窄															
		极紫外光刻自配置模式 直接自装配	选择范围窄															
	<36~54nm (<18~27nm半节距)	极紫外光刻自配置模式	选择范围窄															
193nm光源4次以上曝光		选择范围窄																
无掩膜光刻 纳米压印 直接自装配		选择范围窄																
<36nm (<18nm半节距)	高数值孔径极紫外光刻扩展	选择范围窄																
	极紫外光刻双重图案模式	选择范围窄																
	直接自装配 无掩膜光刻 纳米压印	选择范围窄																

图例表示实现动态随机存储器(DRAM)和微处理单元(MPU)某一半节距光刻方案的时间进度:



图 1.3 半导体技术发展路线图(ITRS2013)光刻机潜在技术方案

(2) 光刻机是一个具有超高定位精度的光机电系统,衡量其性能的一个主要指标是其所加工 IC 芯片的关键尺寸(critical dimension, CD)。目前 22nm 节点的光刻机已批量生产,22nm 以下节点的光刻机或已试产,或者正在研发、预研中。微小至十几纳米甚至几纳米的关键尺寸直接意味着光刻机的平面电机运动系统具有纳米尺度的超高定位精度^[4,5]。

(3) 追求低成本、大批量、高生产率的商业化 IC 芯片制造必然要求平面电机运动系统具备多功能、综合化的运动性能。光刻机平面电机运动系统的基本运动功能是步进、扫描、调平、调焦等,为了进一步提高生产率,未来光刻机平面电机的步进扫描运动速度将超过 1000mm/s,加速度将在 1g 以上,载于硅片台上的待加工对象——硅片,其直径将达到 450mm,相应的步进扫描运动行程至少得大于硅

片直径。由此看来,未来光刻机平面电机运动系统将是一个高速度、高加速度、大行程的多自由度运动系统^[6]。

综上所述,未来光刻机等 IC 制造装备所需要的工作台运动系统将是一个在高真空度、高洁净度环境下高速度、高加速度、大行程运动并能实现纳米级超高定位精度的多自由度运动系统。当前主流的平面电机气浮工作台运动系统,由于其很难适应高真空度、高洁净度的环境要求,在未来 IC 制造装备中的使用必将受到越来越大的限制,甚至淡出半导体制造技术领域。必须寻找新的技术支撑点,使得工作台运动系统能够同时满足环境、精度、速度、行程等方面的要求,以适应工作台运动驱动系统的发展需求。

1.1.2 其他技术领域对平面电机运动系统的要求

不仅限于 IC 制造装备领域,在其他一些工业应用领域,也广泛使用着与 IC 制造装备具有相同或相似要求的工作台运动系统。最典型的如应用于材料科学、生命科学等研究领域的表面形貌扫描显微测量技术。这类技术包括扫描隧道显微镜(scanning tunnel microscope, STM)、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)、磁力显微镜(magnetic force microscope, MFM)、激光力显微镜(laser force microscope, LFM)、热敏显微镜(thermal scanning microscope, TSM)、光子扫描隧道显微镜(photon scanning tunnel microscope, PSTM)等。图 1.4 所示为原子力显微表面形貌测量系统原理示意图^[7],其基本原理是用极尖的探针对被测表面进行扫描(探针和被测表面实际并不接触),借助纳米级的三维位移定位控制系统测出被测表面的三维微观立体形貌。

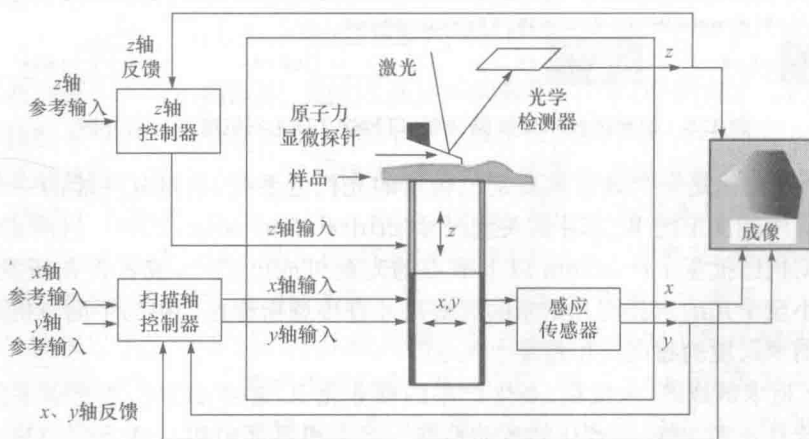


图 1.4 原子力显微表面形貌测量系统原理示意图

显而易见,这类装置或设备需要获得的三维微观立体形貌信息的数量和质量

直接取决于工作在高洁净度、高真空度环境下的三维位移定位工作台的运动性能。现有的运动系统一般采用电致伸缩(压电陶瓷)材料或磁致伸缩材料获得被测对象的三维运动,运动所需的机械机构结构复杂,运动的动态性能较差,有效运动行程很小(微米量级)。为简化机械结构,提高运动动态性能,增大有效运动行程,迫切需要一种能够工作于高洁净度、高真空环境下的三维运动驱动系统。

除此之外,在飞行器电磁弹射系统、电磁轨道炮、磁悬浮列车、磁悬浮轴承等领域,也需要大功率、高精度的平面或直线运动驱动系统。

1.1.3 磁悬浮平面电机驱动及控制技术的研究意义

采用磁悬浮技术的平面电机运动系统具有同时满足环境适应性、运动性能等方面要求的潜在能力。对于下一代光刻机等 IC 制造装备平面电机运动系统和类似环境下工作的平面电机运动系统来说,磁悬浮技术的引入将为其在高真空环境下获得高性能运动提供一条行之有效的途径。

在 1998 年,麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的 Kim^[8]在他的博士课题研究中设计并实现了一种小行程动磁式磁悬浮平面电机(图 1.5),号称“A world’s first high-precision six-degree-of-freedom magnetic levitator with large two-dimensional motion capability for photolithography in semiconductor manufacturing”,这可以说是第一台完整意义上的面向半导体制造装备的磁悬浮平面电机系统。进入 21 世纪后,欧洲、美国、日本、韩国等国家和地区的有关科研机构逐步展开了对磁悬浮平面电机运动系统技术的深入研究。

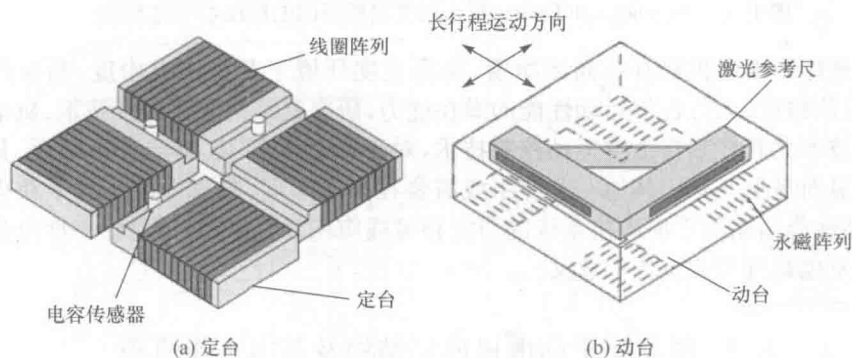


图 1.5 Kim 研究的动磁式磁悬浮平面电机

到目前为止,磁悬浮平面电机运动系统技术的研究取得了较大的进展并已有初步的实际应用。由国内外相关文献来看,这种平面电机运动系统具有如下独特的结构形式与运动方式:①整个平面电机无需机械支承、气浮支承、粗精动叠层等物理结构,有一个或两个相对于动台运动的、可以认为是刚体结构的运动部件——动台;②以同源的电磁能量悬浮并推动平面电机的动台运动,动台可以获得三维欧

氏空间全部 6 个运动自由度。由于上述独特的结构形式与运动方式,该种平面电机具备以下几个方面的运动性能:①高的推力-质量比,可以获得良好的动态运动性能;②相对运动部件之间没有机械接触,也就没有任何磨损磨粒产生;③动台水平方向的运动行程可随着定台面积的扩大而扩大。所以该种平面电机具有在高洁净度、高真空度环境下获得多自由度、高速度、高加速度、大行程等运动性能并实现纳米级高定位精度的潜在能力。根据现有关于平面电机研究和应用的技术成果,结合 2011 版半导体技术发展路线图预测的光刻机发展趋势^[4],采用磁悬浮技术的平面电机运动系统将成为满足未来光刻机等 IC 制造装备发展需求优先考虑的技术方案。

荷兰埃因霍温理工大学电气工程系、机械工程系在光刻机平面电机的研究方面处于世界领先地位,他们的研究与飞利浦应用技术公司(Philips Applied Technologies)、ASML 等 IC 制造装备研发、生产厂商有着密切的联系。在 2009 年公布的一份由 Lomonova 和 Duarte 主持编写的研究简报中^[9],明确地将磁悬浮平面电机运动系统技术作为主要的研究方向(图 1.6),进入 21 世纪,他们的研究团队也一直将磁悬浮平面电机运动系统技术作为研究重点。



图 1.6 Lomonova 和 Duarte 提出的光刻机平面电机技术研究方向

磁悬浮平面电机具有在高洁净度、高真空度环境下获得多自由度、高速高加速、高定位精度、大行程等运动性能的潜在能力,研究其结构优化设计技术、机电系统驱动技术尤其是多自由度运动控制技术,对于光刻机等 IC 制造装备来说,其重大意义显而易见。对于其他一些使用或需要在高洁净度、高真空度环境下获得多功能、高性能运动的平面电机系统的研究领域或应用场合来说,磁悬浮平面电机的研究开发也具有至关重要的意义。

1.2 磁悬浮平面电机典型结构及基本工作原理

磁悬浮平面电机所采用的线圈阵列和永磁阵列的拓扑结构可能不同,但其基本结构都是一致的,都由定台和动台两大部件组成,其中一个部件为线圈阵列台,另一个部件为永磁阵列台。若线圈阵列台为动台,则简称为动圈式,若永磁阵列台为动台,则简称动磁式。图 1.7 所示为其基本结构及运动方式,其中 x, y, z 为 3 个平动自由度坐标轴, ψ, θ, φ 为 3 个转动自由度坐标轴^[10]。

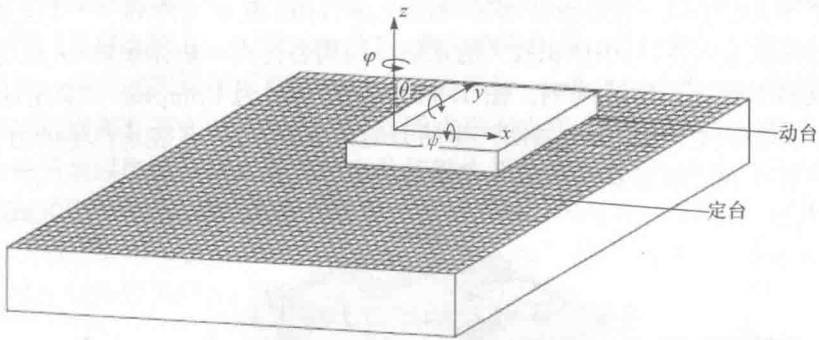
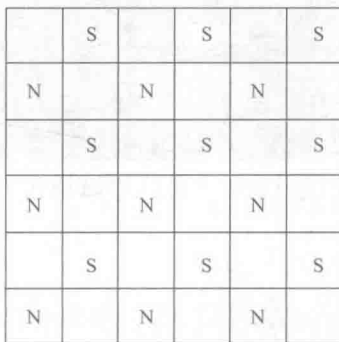
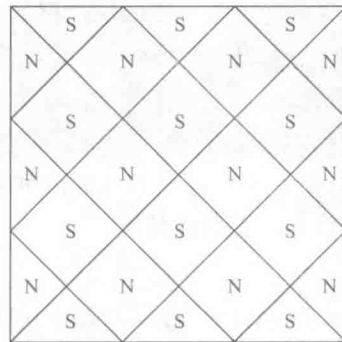


图 1.7 多自由度磁悬浮平面电机的外形结构和运动自由度

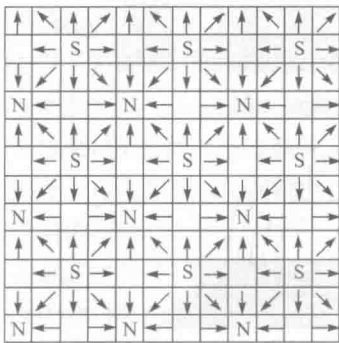
永磁阵列台普遍采用烧结钕铁硼(NdFeB)、钕铁硼(RbFeB)等稀土材料磁化加工后形成特定形状的永磁体,并按一定规则拼装固定在铝基板上形成。永磁阵列的拼装结构有普通 N-S 阵列形式、Halbach 阵列形式及其变异形式等。普通 N-S 阵列采用表面剩磁相同、体积形状相同的多个永磁体按不同磁极间隔排列形成。图 1.8(a)、(b)、(c)、(d)分别为 Askawa、Chitayat、Trumper、Cho 等提出的不同永磁阵列结构^[11-13]。



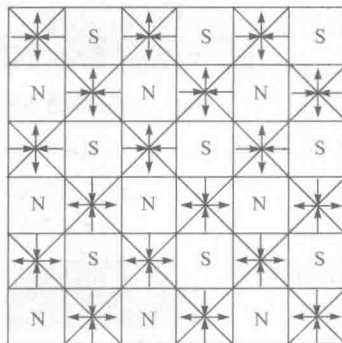
(a) Askawa提出



(b) Chitayat提出



(c) Trumper提出



(d) Cho提出

图 1.8 不同结构的永磁阵列

近年来普遍采用一种具有特殊排列形式的 Halbach 永磁阵列^[14-18],它采用大小不同的两批永磁体,其中体积较大的永磁体四周各排列一块体积较小、磁化方向与其垂直的永磁体而形成阵列。图 1.9 (a)、(b)分别为 Compter^[15]采用的一种 Halbach 永磁阵列结构及通电线圈产生的力的示意图,其中 F 表示产生的力, A 和 B 分别表示 A 相线圈和 B 相线圈, τ 是磁场极距。

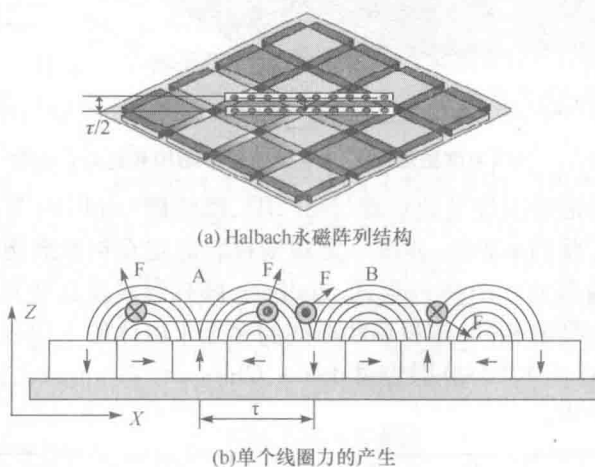


图 1.9 Halbach 永磁阵列结构及单个线圈力的产生

采用 Halbach 永磁阵列后,磁场主要集中在永磁阵列的一侧,极大地改善了磁场的可利用性^[19],而且磁场磁通密度分布更加均匀,提高了磁场能量的利用效率。图 1.10 所示为普通 N-S 永磁阵列磁场和 Halbach 永磁阵列磁场在一个断面上的磁通密度分布的对比情况^[20]。

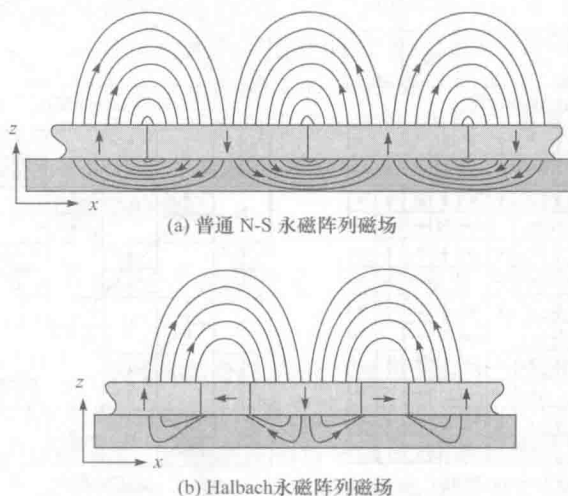


图 1.10 不同永磁阵列断面磁场分布情况

线圈阵列台是将线圈黏接灌封在不导电的铝基陶瓷板上而形成的。线圈采用铜导线密绕形成无铁芯结构以减小质量、避免磁滞损耗。线圈的形状有长方形、正方形或圆形等。线圈端面可与定(动)台台面平行,也可与台面垂直。但线圈的数量和排列规则却有很大的不同。对于动圈式平面电机,其线圈阵列一般关于台面形心对称布置以形成分解水平方向力及各轴力矩的力单元(可看成一台电机);而对于动磁式平面电机,其线圈阵列必须连续排列以形成具有一定工作面积的平面。图 1.11 (a)、(b)、(c)、(d)所示分别为 Cho^[21]、Kim^[8]、Jansen^[16,22]、Lierop^[23]等采用的不同排列形式的线圈阵列。

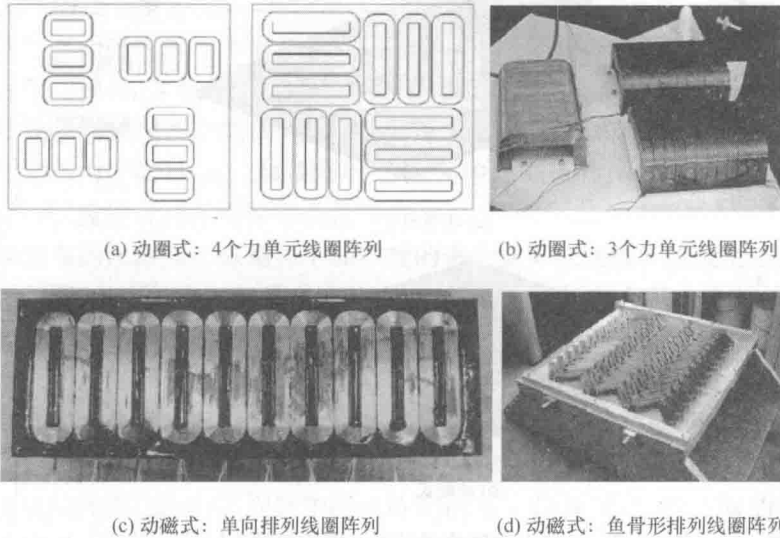


图 1.11 不同排列形式的线圈阵列

磁悬浮平面电机的工作原理基于磁阻力原理或洛伦兹力原理。采用磁阻力原理的平面电机需要铁芯和铁轭,具有磁滞损耗、涡流损耗、较强的非线性等不利因素,加之质量较大、结构不紧凑,采用比较少。而采用洛伦兹力原理的磁悬浮平面电机由于线圈不需要铁芯,在实际中得到了广泛的应用。洛伦兹力是指永磁阵列产生的(准)静态空间分布磁场和线圈阵列载流导体之间的相互作用。若对动台不加任何外界约束,则动台在三维欧氏空间具有全部 6 个运动自由度(若加以适当的约束可获得三自由度运动、五自由度运动等结构形式): x 向、 y 向、 z 向平动及绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的转动。

根据运动部件的不同,可把多自由度磁悬浮平面电机分为线圈阵列移动式(动圈式)和永磁阵列移动式(动磁式)两大类。图 1.12^[10,17]所示为两种不同运动形式平面电机的概念图。动圈式磁悬浮平面电机的优点在于推力-质量比相对较大,动台在运动过程中不需要线圈切换,控制相对简单。但在实际应用中需要在动台上

设计安装冷却系统,冷却系统形成的干扰以及必然存在的线缆干扰等问题都必须解决。动磁式磁悬浮平面电机虽然不存在线缆干扰,冷却系统的安装、干扰等问题都很容易解决,但由于永磁体形成的动台质量较大,造成推力-质量比相对较低;永磁阵列形成的动台面积有限,磁场边缘效应的影响始终存在于运动过程中,给力/矩建模和电流求解造成很大困难。由于只有面积确定的永磁阵列磁场下方的线圈才产生有效力,动台的运动必然要求线圈电流按动台运动要求连续光滑切换,这给动台的运动控制带来了很大的挑战。

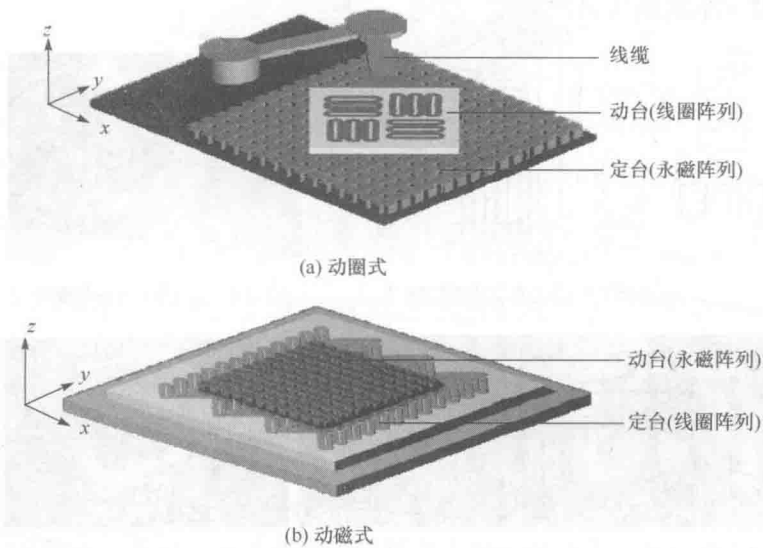


图 1.12 多自由度磁悬浮平面电机的两种不同运动形式

无论是动圈式还是动磁式,与采用机械叠加、气浮支承的平面电机运动系统相比,多自由度磁悬浮平面电机具备以下优点:①动台和定台之间没有机械接触,也就没有库伦摩擦,不产生任何磨粒,使得其特别适合工作于高真空度、高洁净度环境下;②动台是单个刚体,在三维欧氏空间具有全部 6 个运动自由度,无需多个单自由度运动刚体的机械叠加,使得动台具有获得良好动力学特性的潜能,从而可以获得较高的运动控制精度,为实现高定位精度奠定基础;③由于是单体动台,可以获得较高的推力-质量比,从而获得足够高的加速度、速度;④通过拼装永磁体或线圈,可将定台面积扩大,动台水平方向行程就可以相应扩大。

但也正是由于其独特的结构形式和运动方式,给整个平面电机运动系统的研发带来一定困难:①动台和定台都认为是刚体,同一永磁阵列和载流线圈阵列相互作用产生的洛伦兹力/矩必然导致动台各运动自由度力与力之间、力与力矩之间、力矩与力矩之间存在耦合,给其力/矩建模、线圈电流求解及控制实施带来很大的困难;②虽然平面电机结构直观,只有动台和定台两个部件,但两个部件内部都是