
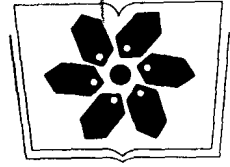


可控磁悬浮转子系统

◎ 虞 烈 著

 科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

可控磁悬浮转子系统

虞烈 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

对磁悬浮支承技术及其系统动力学的研究涉及机械工程、力学、电磁学、电气工程、电子学、控制工程和计算机科学等多种学科的交叉。本书围绕电磁轴承及系统动力学,就电磁场理论,电磁轴承的静、动态性能,相关经典及现代控制理论在电磁轴承中的应用,功率放大器,系统动力学及系统设计等主要内容作了较为全面的阐述。此外,还介绍了国内外在该领域对诸如非线性因素影响、不平衡补偿、冲击动力学、涡流损失以及系统实现等前沿问题的最新研究进展。

本书可供从事机械电子学、磁悬浮支承技术、高速透平机械、转子系统动力学、振动及振动控制、空间陀螺技术等领域的科研人员、工程技术人员以及高等院校相关专业高年级本科生和研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

可控磁悬浮转子系统/虞烈著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011042-0

I. 可… II. 虞… III. ①磁悬浮—技术—应用—电磁轴承②磁悬浮—技术—应用—转子—系统动力学 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 101578 号

策划编辑:钟 谊/文案编辑:孙克玮/责任校对:朱光光

责任印制:刘秀平/封面设计:陈 敬

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

*

2003年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年8月第一次印刷 印张:20

印数:1—1 500 字数:396 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

可控磁悬浮技术在今天之所以受到科技界和工业界越来越多的关注,除了其在基础理论和实现技术方面均日趋成熟之外,更得益于该项技术在两大工业领域(磁悬浮列车和电磁轴承支承的高速转子)应用中所取得的巨大成功。

原则上讲,磁悬浮列车技术和电磁轴承转子系统技术属于同类技术的两个不同分支,既有共同之处也不乏区别。本书仅讨论电磁轴承转子系统的基础理论和应用研究的问题。

在各种旋转机械(如电机、压缩机、风机、水泵、机床主轴等)中采用电磁轴承取代传统的机械轴承,除了在工作转速、减少摩擦磨损、降低功耗等方面使机组整体性能得到明显的改善之外,更为重要的是:通过电磁轴承技术,同时将信息技术、微电子技术和计算机技术方便地集成到一大类以处理材料、能量传递与转换为主要目标的传统机械产品中去,促进产品的智能化、小型化、集成化和数字化,从而带动传统机械产品的改造与升级。

除民用工业之外,电磁轴承在军工和空间技术领域占有特别重要的地位,例如在超低温泵、新一代战机中的高温燃气轮机、微尺度机械加工、空间陀螺、储能飞轮、导弹发射装置等机械电子装备中都可以发现众多在特殊工况和环境下应用电磁轴承技术的成功范例。因此,对于可控磁悬浮转子系统动力学的研究无论是对于民用工业还是军工及空间技术的发展来说,都具有极为重要的意义。

希望本书在电磁轴承基础理论及系统动力学研究方面能为国内同仁提供帮助,借以促进该领域科学研究工作的深入开展。

全书共分十章。在第一章绪论中,除了关于学科发展史、电磁轴承分类和研究内容介绍之外,着重从机械电子学角度阐述了机械电子产品的发展趋势;第二章内容为磁场、磁路分析和数值计算;单自由度系统在电磁轴承中相当于基本组成单元,有必要详细介绍,这部分内容包括在第三章中;第四、五章讨论了径向、推力和圆锥电磁轴承的静、动特性以及非线性因素对于轴承性能的影响;有关经典控制、现代控制理论的内容见第六章,包括模拟PID的控制及实现问题;对模拟功放、开关功放的讨论见第七章;第八、九章主要从系统角度讨论了电磁轴承转子系统动力学问题,包括系统稳定性、冲击动力学和不平衡补偿等;第十章则主要介绍了电磁轴承设计的基本原则和方法。

鉴于推动磁悬浮支承技术的科学工作者主要来自两方面的客观事实:一部分来自机械工程和电气工程,另一部分来自计算机和控制工程——他们既拥有各自

专业领域的优势,2 对其他陌生领域的知识有所不足,因此,本书特别希望能够弥补这两者之间的鸿沟,以工程应用为主要目标,力求在机械平台、控制器、功率放大器、系统总体设计与实现等主要内容的组织上既保持一定的理论深度,又比较结合工程实际。

同时由于可控磁悬浮技术的多学科交叉性,书中对所涉电磁场理论、转子动力学、控制理论、电子学、电器学等内容的取舍以服务于磁悬浮技术为首要前提,同时辅以必要的基础及预备知识,从而体现既突出重点,又能保持知识结构完整性的原则。

本书是在参阅了国内外大量文献,以及总结我们在此领域内的科学研究与研究生教学经验和体会的基础上写成的。如果没有西安交通大学润滑理论及轴承研究所和机械电子及信息系统研究所同仁的鼓励、推动和帮助,这本书的完成是不可能的。特别感谢杨叔子院士和谢友柏院士在作者申请中国科学院科学出版基金过程中对本书的热情推荐。

特别感谢王世琥高级工程师和景敏卿副教授多年来在此领域内与作者本人的亲密合作,在科学研究、科学实验和将此项技术推向工程应用过程中所做的创造性工作和付出的艰辛劳动。特别感谢刘恒博士、姜培林博士、季进臣博士和孙岩桦博士在本领域若干前沿研究方向上的紧密配合与协作,以及他们本人所做出的杰出贡献。

感谢张钢博士、陈立群博士、曹建荣博士、刘淑琴博士、谢振宇博士、董光能副教授和王熙哲高级工程师在相关研究工作中的配合。

感谢吴步洲硕士、耿海鹏硕士、李晓荣硕士、沈钺硕士帮助完成了书中的图稿。

感谢葛颖女士为本书出版所付出的艰苦劳动,她帮助完成了绝大部分书稿的打印工作。

特别感谢我的夫人梁颖庄女士在本书修改、定稿过程中所提供的富有远见的建设性意见。

最后我要特别感谢中国科学院科学出版基金委员会对本书出版的资助以及科学出版社责任编辑钟谊女士、文案编辑孙克玮先生在本书修改和定稿过程中的热情帮助。

由于学识所限,书中疏漏谬误之处,尚望大家不吝指正。

虞 烈

于西安交通大学机械电子及信息系统研究所
现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室

2002. 6

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言——关于机械电子学	1
1.2 电磁轴承发展简史	5
1.3 电磁轴承分类	7
1.4 电磁轴承支承的高速转子动力学	9
参考文献	12
第二章 电磁轴承中的磁场	17
2.1 Maxwell 方程	17
2.2 边界条件	20
2.3 直角坐标系中的微分方程	22
2.4 非线性边值问题的等价变分问题	24
2.5 电磁轴承中的磁场数值计算	25
2.6 磁路计算	32
参考文献	34
第三章 单自由度磁悬浮系统	36
3.1 电磁轴承的作用力	36
3.2 电磁铁线圈的端电压方程	41
3.3 系统控制策略选择	44
3.4 稳定性条件和参数选择范围	49
3.5 单自由度系统状态方程	52
参考文献	55
第四章 电磁轴承的静动特性	56
4.1 径向电磁轴承	56
4.2 推力电磁轴承	63
4.3 圆锥型电磁轴承	80
参考文献	92
第五章 非线性因素对电磁轴承静动态性能的影响	94
5.1 轴承承载力和名义最大承载力	94
5.2 力变化率与电流变化率	95
5.3 力-位移灵敏度	97
5.4 计入非线性因素的动态承载力	99
5.5 非线性磁场对电磁轴承性能的影响	106

参考文献	107
第六章 电磁轴承系统的控制	108
6.1 经典控制理论	108
6.2 PID模拟控制及实现	121
6.3 现代控制理论	133
参考文献	164
第七章 功率放大器	166
7.1 电压-电压型功率放大器	166
7.2 电压-电流型功率放大器	167
7.3 集电极输出、差动功放电路	173
7.4 功率放大器参数选择	177
7.5 开关放大器	179
参考文献	184
第八章 电磁轴承支承的转子系统	185
8.1 电磁轴承支承的刚性转子	185
8.2 轴向推力轴承对转子横向振动的影响	187
8.3 系统状态方程	188
8.4 支承在弹性支座上的电磁轴承转子系统	198
8.5 热套转子应力分析	208
8.6 电磁轴承支承的多质量弹性转子	217
8.7 高速转子在保持轴承中的冲击动力学	233
参考文献	240
第九章 高速转子的自动平衡技术	242
9.1 转子动平衡理论基础	242
9.2 刚性转子的周期激振力	248
9.3 电磁轴承支承下的刚性转子自动平衡原理	252
9.4 凹陷滤波技术	256
参考文献	265
第十章 电磁轴承设计	267
10.1 电磁轴承的承载能力	267
10.2 电磁铁铁芯设计	268
10.3 电磁轴承优化设计	280
10.4 电磁轴承的磁损	283
10.5 减少功率消耗的电磁轴承设计	295
10.6 无传感器电磁轴承	298
10.7 系统开发的快速控制工程	305
参考文献	308
参考文献注释	311

第一章 绪 论

1.1 引言——关于机械电子学

计算机技术和网络技术的蓬勃发展使人类正在步入一个崭新的信息社会。在这个社会中,信息和信息处理在产品的设计、制造过程中的重要性日益突出。如果从功能实现的角度出发,大部分机械、电子、电气产品可以归纳为以下三种类型:

第一类产品以完成信息传递、信息转换为主要特征,如手表、录音机、录像机、银行自动取款机、打印机、复印机、扫描仪等办公用品设备即属此类。

第二类产品以机床、车辆、机器人代表。这类产品通常必须同时处理材料、能量和信息。对这类产品的要求是信息处理功能的大幅度增强,自动化、智能化程度不断提高,更加节省能源、方便用户以及对资源最大限度的合理利用等。

第三类是以各种透平机械、汽轮发电机、水轮发电机、电动机、风机和水泵等为代表的机械产品。它们在传统意义上都是以处理材料和能量流为主的。在信息化浪潮的推动下,微电子技术和信息技术的引入将极大地促进这类传统机械产品的更新换代,使产品的小型化、智能化、集成化、数字化程度得到极大幅度的提高,产品的可控性和可靠性以及整机性能亦得到综合的改善,从而在此基础上形成新的机械电子系统或产品(图 1-1)。

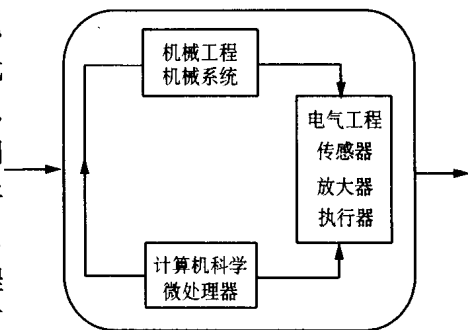


图 1-1 机械电子系统

因此,在新产品设计、开发及制造过程中广泛利用微电子技术和计算机技术以增强产品的信息处理功能,发展新一代的机械电子产品,正在成为产品发展的主流方向;尤其对于传统机械产品来说,微电子技术和信息技术的成功运用将构成产品增值的主要部分;而机械电子学(mechatronics)则为机械电子系统的研究和开发提供了相应的理论、方法和工具。

世界各国对于机械电子学的定义稍有不同,但总体意义却是完全一致的。例如,瑞士联邦工学院的 Schweitzer 教授将机械电子学定义为:

机械电子学是融机械工程、电气工程和计算机科学于一体的跨学科工程领域。典型的机械电子系统从周围环境中拾取信号,经处理后生成输出信号并将其转换

成力、运动和动作……

英国关于机械电子学的定义为：

机械电子学是在产品的设计、制造以及过程处理中对机械工程、电子学和智能计算机控制理论及技术的交叉与集成。

而来自美国的定义则更为简洁：机械电子产品就是由信息所驱动的机械系统。

当人们参照机器人、自动驾驶车辆、智能化电器和磁悬浮轴承这类对象来讨论机械电子学所包含的内容时，首先涉及的中心议题就是如何将各种经典的或现代的控制理论和方法应用于机械平台，从而在机器（机械）中产生各种期望的可控运动。机械电子学在这里所起的作用之一是：运用先进的控制方法解决工业实际问题，弥合理论和实际之间的鸿沟，对各种场合下的实际工程问题加以规范化，并将控制技术集成到整个技术系统中去，从而使产品性能得到改进，机器运行得更快、更好，效率更高，加工、生产更加便宜。

但这还不是机械电子学的全部内涵。由于技术应用业已成为当代人们日常生活的一部分，因此，从某种意义上来说，人类不得不接受这样一种技术系统与生命系统共存的局面，这种共存关系必然会导致人、机之间的交流与合作。这就要求新一代机器向智能化和可共同操作的方向发展。

机械电子产品是在传统机械产品基础上发展起来的。简单的机械完成独立而简单的功能；由简单机械组合而成的复杂机械则完成复杂的工作任务。但不论是简单或复杂的纯机械系统，其功能实现都是可预测的，它们在工业生产中的运作过程都是预先“刻画”好了的，Schweitzer 把传统机械的每一步进程形象地比喻为留声机的重放过程^[1]。因此对传统机械的操作或干预通常比较直接和简单。即便如此，随着任务、情况复杂程度的不断增加，在这类传统机械中也不得不将诸如模糊控制、神经网络和专家系统等先进控制方法和传统手段结合起来使用。这些方法的有效性通常只能根据结果的好坏来加以评判，而很难给出严格的数学证明。所有这些实际上已经远远超出了一般控制理论的研究内容。因此，在许多情况下仅仅强调机器的自动化水平是不够的。对于所有具有不确定性的环境来说，未来的机器必须具有一定程度的智能，包括对各种不可预见意外情况的处理能力。事实上，操作者本身在许多紧急情况下往往就是意外事件的最佳处理者。为了更好地发挥操作者的作用，这就要求机器能够在紧急状态下给操作者提供人/机交互界面。

例如，对于一台运行中的汽轮发电机或涡轮膨胀机，对应于某一种紧急状态，除了配备相应的报警和应急系统外，在线监测和诊断处理系统还应当同时向有关部门和人员通报下列情况：

- (1) 状态的紧急程度；
- (2) 如何才能摆脱危险状态；

- (3) 干预路径和操作系统;
- (4) 事故诱发原因等;
-

这样,对一个机械电子产品的评定除了对机器的自动化、拟人化程度评估以外,还包括对机器所能提供的人机交互能力的评估。因此,机械电子学比起传统意义上的工业自动化及控制技术来,其研究内容被极大地拓展了。

最后,机械电子学处理问题的方法与传统机械工程也有着很大的不同。例如,经典力学所处理的问题大多数属于分析范畴:在系统受力已知时求解系统的运动,在通常情况下,解是惟一的;与之相反,机械电子学则主要研究那些在更大程度上隶属于综合范畴的命题:例如当运动设定时,需要对系统施加什么样的力以及如何在技术上予以实现等。一般说来,这时解的惟一性消失了,而只能代之以更大范围内的系统规划。

对应于不同的应用场合,机械电子产品的结构、型式可能会千差万别,但以下特点却是共同的:

(1) 产品或关键部件应当具有自适应、自学习和自校正功能,并且能够由更高层次的专家系统、神经网络和模糊控制技术所支持。

(2) 软件是机械电子产品中不可分割的有机组成部分,也是名符其实的机械零件,从而增加了系统的柔性。

(3) 在信息处理方面,由于受控机械结构及周围工作环境的复杂性,对于信息处理、信息融合和指令融合技术的研究越来越重要。

(4) 为了增加系统的可靠性,传感器和执行器的冗余设计、容错设计与实现在系统设计初始阶段就应当予以考虑。

(5) 系统应当具有友好的人/机交互界面。

(6) 为了适应产品集成化和小型化的需要,更加广泛地使用集成化技术成为机械电子产品发展的一个重要方向。

从20世纪70年代起,在不同经济领域内,对于信息技术以及相关人才的需求就一直呈急骤上升趋势。越来越多的专家学者致力于机械电子学的研究,以及运用机械电子学这一工具从事各种新产品的开发,以满足于经济发展的需要^[1~10]。

本书所介绍的电磁轴承,就是典型的机械电子产品之一。

和许多新技术一样,电磁轴承技术的发展同样受现代工业对新一代支承技术需求的驱动。

随着现代工业的发展,对旋转机械提出了各种越来越苛刻的性能要求。在能源化工机械中,要求转子的旋转速度和精度越来越高、转子与定子间的间隙越小越好以追求更高的效率;而对另一些工作在极端高温或低温环境下的军工、航空航天领域的旋转机械来说,除了要求能够承受严酷的环境考验之外,对于支承的可控

性、安全及可靠性的考虑往往是第一位的。

与其他机械相比,旋转机械的最大特点在于:转子运动始终被约束在间隙比极小的空间内。这种间隙比,对于传统的油润滑轴承来说,大致在 $1/1000 \sim 5/1000$ 范围内。由于转子在运行中所受到的各种激励作用,这种小间隙约束是很容易遭到破坏的,这也是支承之所以成为制约高性能旋转机械进一步发展的关键技术的原因。

对于新一代支承技术性能指标的要求大致可以概括为:

- (1) 高转速:从每分钟数十转到数十万转;
- (2) 高精度:要求支承具有良好的动态性能。例如,转子的动态振幅要求控制在一定的范围内;
- (3) 可控性;
- (4) 对于各种严酷环境的适应性;
- (5) 可靠性;
-

迄今为止,能够同时满足上述要求、可投入实际工程应用的支承技术当首推主动控制的电磁轴承。图 1-2 为电磁轴承工作原理图。

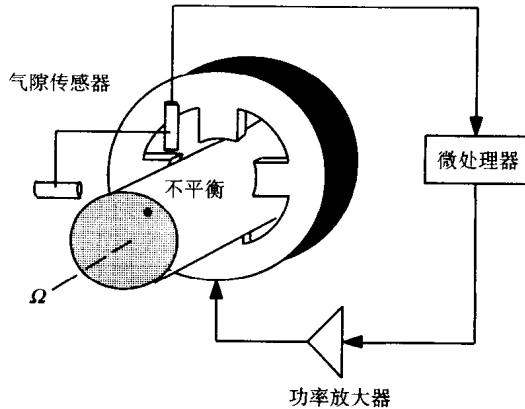


图 1-2 电磁轴承的工作原理

在图 1-2 中,传感器在线地拾取转子的位移信号;控制器对位移信号进行相应处理并生成控制信号;功率放大器按控制信号产生所需要的控制电流并送往电磁铁线圈,从而在执行电磁铁中产生磁力,以使得转子稳定地悬浮在平衡位置附近。

电磁轴承拥有许多传统轴承所不具备的优点:

- (1) 可以达到较高的转速。理论上讲,电磁轴承支承的转子最高转速只受到转子材料的限制。一般说来,在相同轴颈直径下,电磁轴承所达到的转速比滚动轴承大约高 5 倍,比流体动压滑动轴承大约高 2.5 倍。

(2) 摩擦功耗较小。Helmut 曾对一台压缩机采用不同支承时的功耗作过比较:在 10 000r/min 时,其功耗大约只有流体动压滑动轴承的 10%~20%^[11]。

(3) 由于电磁轴承依靠磁场力悬浮转子,因此在相对运动表面之间不接触,没有由磨损和接触疲劳所带来的寿命问题。电子元器件的可靠性大大高于机械零部件,所以电磁轴承的寿命和可靠性均大大高于传统轴承。

(4) 无需润滑。由于不存在润滑剂对环境所造成的污染问题,在真空、辐射和禁止润滑剂介质污染的场合,电磁轴承有着无可比拟的优势。加之省去了润滑油存储、过滤、加温、冷却及循环等成套设备,因此,从总体上来说,电磁轴承在价格和占有空间上完全可以和常规轴承技术相竞争。

(5) 对极端高温、极端低温运行环境都具有很好的适应性。

(6) 可控性。电磁轴承的静态及动态性能都是在线可控的。

(7) 可测试、可诊断、可在线工况监测。事实上,电磁轴承本身就是集工况监测、故障诊断和在线调节于一体的。

1.2 电磁轴承发展简史

对于被动、主动或混合型磁悬浮轴承的研究,大概早在 150 多年之前就已经开始了^[12~20]。有关电磁轴承最早的理论文献出自英国物理学家 Earnshaw。早在 1842 年,Earnshaw 就向人们介绍了无源磁轴承,并证明了:由于磁场力与气隙的平方成反比关系,仅靠永久磁铁是无法使一个铁磁体在所有 6 个自由度上都保持在稳定悬浮状态的^[12]。1939 年,Braunbeck 所作的理论分析进一步表明,惟有抗磁性材料,同时还必须辅以恰当的磁铁形状和结构,才有实现稳定磁悬浮的可能^[21]。其理论依据如下:

对于静力场 $\mathbf{F}(x, y, z)$ 中的任一质点,设质点坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,质点受力为 $\mathbf{F}(x_0, y_0, z_0)$ 。当满足条件

$$\mathbf{F}(x_0, y_0, z_0) = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F}(x_0, y_0, z_0) < 0 \quad (1.2)$$

时质点处于稳定平衡状态。这时式(1.1)是静力平衡条件,式(1.2)则是质点的稳定条件。

进一步地,如果力场 \mathbf{F} 是一个无旋场,则 \mathbf{F} 总可以表示为一势函数 ψ 的梯度:

$$\mathbf{F}(x, y, z) = -\nabla\psi(x, y, z) \quad (1.3)$$

相应的稳定平衡条件可以表示为

$$\nabla\psi(x_0, y_0, z_0) = 0$$

$$\nabla^2 \psi(x_0, y_0, z_0) > 0 \quad (1.4)$$

Braunbeck 将上述分析进一步延伸到对于磁场中的铁磁体的受力及稳定性分析。一个放置在磁场强度为 \mathbf{H} 的磁场中的物体所受到的磁场力为

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{2}(\mu - \mu_0) V \nabla H^2 \quad (1.5)$$

其中: μ 为物体的磁导率, μ_0 为真空磁导率。

对于铁磁物质来说, 由于 $(\mu - \mu_0) > 0$, 且 $\nabla H^2 > 0$, 所以放置在恒定磁场中的铁磁体在任何情况下都无法处于稳定悬浮状态。对于抗磁体或超导体来说情况有所不同。这时尽管 ∇H^2 不能为负, $(\mu - \mu_0)$ 却有可能取负值, 这一结论也适用于因感应生成涡流的导体。因此, 对于抗磁体、超导体以及铝、铜等导电材料, 有可能获得稳定的悬浮状态。

1937年, Kemper 申请了一个关于磁悬浮支承技术的专利, 在专利中提出了采用新的交通方式的可能性, 并给出了相应的实验结果^[19,20]。同年, Beams 和 Holmes 研究了利用磁场力悬浮钢球并使之旋转以测定材料强度^[17,18]。1946年, Beams 采用被动/主动混合式磁轴承, 以支承工作转速为 16 600r/min 的离心机转子, 技术上采用了光电位置反馈控制, 但由于当时缺乏先进的控制部件, 所获得的刚度和阻尼都极小^[25]。大约在 1957年, La Recherche Aeronautique 公司第一次给出了关于主动控制磁悬浮支承的完整描述, 并于数月后产生了关于完全主动控制的电磁轴承专利^[35,36]。在此期间, 关于电磁轴承的研究文献还可见诸^[35~51]。

大约在 1970年, Societe Europeenne de Propulsion(SEP)公司开始了对被动、主动式磁悬浮轴承的性能研究, 并用于卫星姿态控制的飞轮装置^[55~69]。1976年, SEP 和 SKF 在法国的 Vernon 组建了一个新的公司——Societe de Mecanique Magnetique (S2M), 以发展国际性的电磁轴承市场。1976年, Schweitzer 运用磁轴承对转子实施主动控制^[68]。近 20年来, 随着大功率电子元器件计算机技术以及控制理论和轴承转子系统动力学的进步, 磁悬浮技术得到了飞速发展^[52~74]。从 1988年起, 国际上每两年召开一次国际电磁轴承学术会议, 专门讨论关于电磁轴承理论和工业应用问题^[75~80]。

来自两方面的科学家共同推动了电磁轴承技术的发展: 一部分来自计算机科学和控制工程, 另一部分来自机械工程和电气工程。他们的共同愿望都希望扩大本门学科在工程应用领域的空间。对于机械和电气工程方面的专家而言, 希望在那些以处理能量转换为主的传统机械及电气产品中, 通过引入信息及计算机科学中的相关技术, 进而开发新一代机械电子产品。当前在电磁轴承研究领域内颇具名望的学者, 如 Schweitzer (ETH, Switzerland), Allaire (Virginia, U. S. A), Childs (A&M, U. S. A) 和 Burrows (Bath, U. K) 等, 他们都具有从事机械工程、轴承技术

和转子动力学研究的长期工作经验。

目前,电磁轴承已经应用在 300 多种不同的旋转或往复运动机械上,其中如航天器中的姿态控制陀螺、水泵、风泵、离心机、压缩机、高速电动机、发电机、斯特林制冷机、各种超高速磨、铣切削机床、飞轮蓄能装置和搬运系统等。电磁轴承在军工和空间技术领域尤其占有特殊的位置,例如,20 世纪 70 年代初世界上首批电磁轴承就是应用在法国空间工程上的。美国 NASA 将电磁轴承应用于低温泵,以确保转子在 -351°F 的极端低温环境下正常运转;同时,NASA 所进行的在航空发动机中用电磁轴承取代传统滚动轴承的研究也业已开展了多年。新的支承结构方式所带来的好处是大大提高了发动机的工作温度,机组重量也大为减轻。NASA 已经完成了在 $500^{\circ}\text{F}(260^{\circ}\text{C})$ 工作温度下的发动机转子——电磁轴承系统中试考核,其最终目标是希望该系统能够经受住 $800\sim 1000^{\circ}\text{F}(427\sim 538^{\circ}\text{C})$ 高温条件下的运行考验。在现行机组中,润滑系统所占质量大约为整机质量的 $15\%\sim 20\%$,这样因采用电磁轴承所减轻的机组质量将是极为可观的。在美国空军从 1990 年起所执行的一项发展地面轻量级火箭拦截导弹计划中,由于常规机械/液压支承装置无法对作用时间极短的脉冲推力做出快速反应,因此采用了电磁轴承作为拦截火箭的发射支承。

电磁轴承技术的先行者、瑞士联邦工学院的 Schweitzer 教授在第四届国际电磁轴承会议上明确指出这一技术的成功导致了支承技术的革命,认为电磁轴承技术目前所面临的态势与 20 世纪 60 年代初电子计算机的发展状况极为类似——磁悬浮技术将迅速地越来越多的技术领域(特别是军工和空间技术)所接受^[78~81]。

1.3 电磁轴承分类

1. 永久磁铁轴承

完全由永久磁铁组成的轴承,无法在所有自由度上都能够保证被支承物体的稳定悬浮;但是在某些方向上依赖永久磁铁轴承起到支承物体或减轻轴承载荷的作用却是可实现的。

在永久磁铁材料选择上,人们更倾向于采用钡-铁镧氧材料以减少涡流损失和增加承载力。另一种新的磁性材料是钐-钴合金(Samarium-Cobalt),这种钴稀土材料的矫顽磁力比通常永久磁铁要高出 $20\sim 50$ 倍,所能提供的磁斥力也要大得多^[53]。

2. 抗磁材料轴承

抗磁性材料的相对磁导率 $\mu_r < 1$ 。可用来制作磁悬浮轴承的抗磁材料不是很多,如铋(Bismuth)和石墨(graphite)等。但它们的抗磁性都很弱,因而这种轴承的承载能力和刚度都很低,除了学术研究之外,目前其实际工业应用前景还不很明

朗^[30-32]。

3. 超导磁轴承

利用金属在超低温工况下电阻消失的超导特性可制作超导磁浮轴承。在超导线圈中通以电流,只要是在超低温状态,即使驱动电压不再存在,这时电流仍将保持流动。根据迈森内尔-奥克森弗尔德(Meissner-Ochsenfeld)效应^[16],超导体具有抗磁性($\mu_r = 0$),采用高温超导材料(HTS)做成的超导轴承,在无需施加主动控制的情况下即可实现稳定悬浮,并且可以指望获得足够的磁场力。除了必要的超低温环境外,使该项技术从实验室研究进入工业应用还需要相当长的过程^[29,34,51]。

4. 交流轴承

基于电磁感应原理,当转子与定子间的相对运动速度较大时,会感应出很大的涡流,从而产生电动式悬浮。类似的原理还适用于另一场合,即以交变磁通来代替相对运动,同样也可以在转子表面感应出涡流,因此这种轴承有时亦被称为交流轴承。一般说来,交流轴承的阻尼性能较差。这一效应有时也被用来冶炼合金^[14,15,28]。

5. 利用载流导体在磁场中所受到的洛伦茨力

对于通电导体在磁场中所受到的洛伦茨力,可以有两种利用方式:

第一种和常见的感应电机原理类似,这时作用在转子上的力除产生驱动力矩外,还应当在径向方向上提供支承力。一般在定子中采用两组不同的绕组结构:第一组绕组用以产生驱动转子旋转的力偶;在第二组绕组中则通以适当的控制电流以生成径向力分量从而支承转子。

第二种是在上述结构基础上采用永磁化了的转子,从而使作用在转子上的洛伦茨力能同时实现力矩驱动和磁悬浮的双重功能。

6. LC 调谐电路轴承

LC 自激电路在工作状态稍微偏离共振态时具有较为稳定的刚度特性。LC 电路由电磁铁线圈的电感和电容组成。由于转子的动态位移将导致电磁铁线圈电感的改变,LC 电路以趋于共振态的方式工作,导致来自交流电压源电流的增加,迫使转子回复到正常位置。这时电源是一个以定常频率工作的交流电源。这种轴承的主要缺陷在于不能产生阻尼^[37,40,42,47,49,50,52]。

7. 可控直流电磁铁轴承

即所谓电磁轴承或主动磁轴承,也是本书将要予以重点介绍的。主动磁轴承的控制方法很多,如磁通控制、位移控制以及在没有传感器轴承中所采用的电感控制方式等^[75-80]。

8. 组合控制轴承

例如,采用永久磁铁和可控电磁铁相结合而构成的组合轴承,可以收到减小功耗、增加系统可控性的效果;采用 LC 电路与可控电磁铁组合结构,能够增加系统

的可控性及阻尼等。在空间工程中,采用超导轴承和电磁轴承而组成的混合型轴承,在提供足够的承载力和刚度、有效控制系统的动力学行为等方面都具有更大的优越性,因而特别适用于那些超低温环境业已具备的场合。

1.4 电磁轴承支承的高速转子动力学

电磁轴承是集机械工程、力学、电磁学、电子学、控制工程和计算机科学等于一身的典型机械电子产品。电磁轴承支承的高速转子动力学通常讨论以下内容:

在电磁轴承转子系统中,既要处理机械平台的建模问题,又要处理信号拾取、控制调节、功率放大及执行器平台的建模问题。在一般情况下,上述环节的动态模型可以在状态空间内以线性微分方程的形式给出,而在特殊场合,则不得不涉及对各种非线性问题的处理。在系统动力学分析过程中,则主要利用系统状态方程分析系统的闭环稳定性和系统在外激励力作用下的动态响应。在线性范围内对电磁轴承动态性能采用位移刚度系数和电流刚度系数作为一阶近似,除此之外,研究方法通常的轴承转子系统动力学并无二致。和许多复杂动力学系统一样,在建模过程中,对于系统参数的辨识常常是必要的。

1. 转子动力学

电磁轴承转子系统属于机械电子耦合系统,因此在设计过程中有关转子动力学方面的知识,如结构与强度、振动模态分析、模态缩减、转子不平衡激励、系统稳定性及动态响应等,都应当视为已知的。

此外,电磁轴承还带来一些特殊问题。例如,热套装配及应力问题就是其中之一。在电磁轴承转子系统中,热套是常见的装配方式之一。在径向轴承叠层转子和轴之间以及在推力盘和轴之间,为了制造方便都必须采用热套装配。在高转速条件下,为了避免铁芯、推力盘与转轴在结合面上因离心力作用而发生松动或分离,要求装配过盈度高和热套紧密;而为了减小热套过程中的温差,减小转子在热套装配后的残余应力、避免材料损坏,又希望过盈程度低些、热套松弛些。因此,从这个意义上来说,如何处理好热套装配过程中的上述矛盾,直接影响到转子所能达到的最高转速。

2. 传感器、信号拾取和处理

对于转子能否成功地实现在线控制首先取决于对转子当前状态或信息的准确获取,而传感器的灵敏度、精度、可靠性和性能稳定性则是实施在线控制的先决条件。涡流传感器、电感传感器、光电传感器及 CCD 阵列等都可以用来测定转子的动态位移;转子位移也可以利用霍尔传感器先行测定气隙磁通,然后再转换为位移信号和控制信号。在一般情况下,对于来自传感器的信号通常还应当进行数据预处理,包括剔除温漂、转轴的热膨胀、被测量表面材质和交变磁场等对测量信号所

带来的影响等。

3. 控制方法

对于一定的控制对象,有关控制方法的选择并不是惟一的。在经典控制和现代控制理论中所涉及的各种控制方法差不多都在不同范围内被成功地应用于电磁轴承转子系统的控制,例如 PID 控制、LQG 控制、 H_∞ 控制及 μ 综合、时间延迟控制、模糊控制、自适应控制、滑模控制和解耦控制等。无论采用哪一种控制策略(分散控制或集中控制,模拟控制或数字控制)或具体运用哪一种控制方法,总的目的是希望在付出代价最小的前提下,使系统获得更好的稳定性、更强的鲁棒性和抗干扰能力。

4. 功率放大器和电磁铁执行器

功率放大器的选择视应用对象而异。一般说来,对于中、小型电磁轴承,采用三极管模拟功放比较简便,但是由电源提供给系统的能量大部分由于三极管功耗而损失了,同时还带来了十分麻烦的热耗散问题。因此,人们在大功率机组中越来越倾向于采用开关功放以降低系统功耗。对于电磁铁执行器的设计与制作来说,则通常需要考虑诸如磁场分析、铁磁材料选择、磁极安排、绕组布置以及针对各种目标函数的电磁铁结构优化等问题。

5. 周向阻尼和热耗散

电磁轴承的周向阻尼和热耗散,也许是电磁轴承中最难处理的问题之一了。电磁轴承的功率损失包括铜损和铁损两部分,铜损的计算比较简单,只有在极高温条件下才需要计及温度对电阻的影响。而铁损在许多情况下往往只能借助于实验或经验公式从而对铁芯的铁损做出粗略的估计;另一方面的功率损耗来自转子的周向阻尼,尽管转子是在无接触条件下依靠电磁力实现悬浮的,但实验表明,在许多情况下由于涡流效应在转子表面所产生的周向阻尼会比气体轴承大得多,计算也复杂得多。特别对于高速转子,系统的热分析及冷却更是有待于解决的重要问题之一。

6. 保护轴承、转子着陆过程中的冲击动力学

在电磁轴承中,保护轴承占有十分重要的地位,保护轴承亦被称为应急轴承。在系统发生故障时,对转子的应急保护主要由保护轴承来提供。在电磁轴承突然断电后,高速旋转的转子迅即进入自由落体状态,继而与保护轴承内壁发生冲击、碰撞和摩擦。在转子着陆过程中,转子动能逐渐被转化为摩擦热,如果这些热量不能顺利地发散,将导致转子的热变形和电磁轴承损坏,因此对保护轴承以及转子在着陆过程中的冲击动力学研究同样是十分必要的。

7. 非线性在电磁轴承中是经常遇到的普遍现象

除了电磁力与转子位移间本质上存在的非线性关系之外,非线性还来自铁磁材料的导磁特性、电磁铁线圈的感抗特性、功率放大器的有限电流输出特性以及电