

合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

磁力机械分析与设计方法

著摇王摇勇摇摇导师摇赵摇韩

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁力机械分析与设计方法 王勇著 合肥:合肥工业大学出版社, 2007

(斛兵博士文丛)

王勇著 合肥:合肥工业大学出版社, 2007

I 磁...摇 II 王...摇 III 磁...应用—机械学—研究 IV 磁...摇

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 12345 号

磁力机械分析与设计方法

王勇著 王策策划编辑 马国锋 责任编辑 吴毅明 孟宪余

出版 合肥工业大学出版社	版次 2007年 12月 第 1版
地址 合肥市屯溪路 111号	印次 2007年 12月 第 1次印刷
邮编 230026	开本 787mm×1092mm 1/16
电话 0551-2910666	印张 12.5
发行部 0551-2910666	字数 32千字
网址 www.hfut.edu.cn	印刷 安徽江淮印务有限责任公司
电子邮箱 wcy@hfu.edu.cn	发行 全国新华书店

王勇著 合肥:合肥工业大学出版社, 2007 定价 12.50元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

致摇摇谢

本书研究工作得到国家自然科学基金面上项目资助,成书过程得到合肥工业大学研究生教育创新工程项目资助,在此表示衷心的感谢!

本书研究内容基于作者博士学位论文,是在导师赵韩教授的精心指导和热情关怀下完成的。导师钻研进取的治学风格和淡泊随和的生活态度使我获益匪浅,将使我受益终身。中国科学院等离子体物理研究所武松涛教授、中国科学院智能机械研究所葛运健教授、西北工业大学机电学院陈国定教授、华东理工大学机械工程学院郑建荣教授、中国科学技术大学精仪系竺长安教授、安徽大学电子科学与技术学院陈军宁教授、合肥工业大学机械与汽车工程学院桂贵生教授、王其东教授、陈剑教授等对作者博士论文的研究工作提出了许多宝贵意见;南京航空航天大学徐龙祥教授、朱如鹏教授、中国科学技术大学孔凡让教授、合肥工业大学机械与汽车工程学院柯尊忠教授等老师在本书出版前对书中内容提出了许多中肯和宝贵的意见。作者在本书出版之际向导师和诸位老师表示最衷心的感谢和诚挚的敬意!

感谢机械与汽车工程学院原理零件教研室各位老师在工作上的关心和帮助。

感谢所有关心、支持和帮助过我的老师、同学和朋友们。

感谢被本书引用的所有文献作者。

感谢我的父母、妻子、女儿和亲人的关心和支持。他们的爱、鼓励和无私奉献是我不断进取的力量源泉。

王摇勇

圆园园年 怨月

圆园

摘 摇 要

本书简要回顾了磁力机械的应用和研究现状,提出了现有磁力机械设计方法中存在的局限性和不足,分析了系统研究磁力机械的场量计算和考虑多物理场间耦合效应的设计分析方法的重要意义。

基于场分析方法,针对常规设计方法计算电磁参数中普遍忽略的(如磁阻、漏磁、涡流和集肤效应等)、假定的(如磁性材料特性的线性化假设等)因素及有关动态问题(如转速对电磁场分布的影响),用数值方法作了较详细的定量计算和讨论,为设计中考虑材料非线性、铁损、漏磁等因素影响提供了依据。

对磁力机械中电磁作用下的温度场问题,讨论了现有热分析中沿用低压电器的基于牛顿散热公式的简化算法和等效热路法等方法局限性,并在给定热源条件下,对电磁轴承-原转子系统主要部件用场分析方法进行了热分析,其结果直观地给出了温度场分布和变化规律,较准确地反应了散热体各部分热量的获取和损失、热梯度、热流密度等热参数,可作为优化结构参数设计、合理布置散热形式的参考。

在多场耦合问题中,讨论了磁力机械中多物理场耦合的现象、形式,从宏观耦合机理角度对磁力机械中多场耦合进行了分类,论述了耦合问题分析对磁力机械设计意义和方法。将磁力机械耦合问题分为单场、两场、三场及多场局部耦合问题及复杂耦合问题分别加以讨论。在单场耦合中,讨论了结构因素引起的耦合和磁场内部的场路耦合分析方法,在两场局部耦合中,给出了电磁、机电、热电、热磁、磁场与结构场、结构与温度场等常见耦合分析方法,对三场及多场耦合问题,讨论了在可列出各场数理方程的情况下采用数值方法分析场间耦合;对不能用耦合方程明确描述的复杂耦合分析,提出了将多物理场、多过程、交互式的全局耦合问题转化为各局部耦合

问题和各子系统间的耦联问题而得到求解的耦合分析方法。

在上述分析基础上,本书建立了场路结合并考虑耦合的磁力机械设计方法,提出用“场”和“耦合”的观点指导设计过程,以改进现有磁力机械结构和电磁部分设计中依赖经验参数并被分开设计等缺陷,使结果更接近实际。最后以一个大型转子磁性支承系统为实例,说明了设计中将常规计算与场分析相结合并考虑最典型耦合效应的磁力机械结构电磁参数的设计过程和可行性。

关键词 磁力机械 场量分析 多场耦合 设计

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 概 述	(1)
1.2 研究基础和现状	(2)
1.3 本书的研究内容和方法	(3)
第 2 章 磁力机械设计的基础理论体系研究	(4)
2.1 磁力机械设计的基础理论体系组成	(4)
2.2 磁力机械中的物理场	(5)
2.3 磁力机械的电磁场理论	(6)
2.4 磁力机械中的热问题	(7)
2.5 磁力机械的场量数值计算方法	(8)
2.6 本章小结	(9)
第 3 章 磁力机械中的材料非线性、铁损及漏磁分析	(10)
3.1 磁力机械中磁介质	(10)
3.2 材料磁化特性对设计参数的影响	(11)
3.3 磁力机械中的涡流损耗和磁滞损耗分析	(12)
3.4 磁力机械中的漏磁场分析和计算	(13)
3.5 本章小结	(14)
第 4 章 磁力机械中电磁作用下的温度场问题	(15)
4.1 磁力机械热分析目的和方法	(15)

C 磁力机械分析与设计方法

摇源圆摇温度场分析中有关热参数的确定	(源愿)
摇源猿摇稳态温度场的有限元方法	(源员)
摇源源摇电磁轴承-转子系统主要部件的温度场分析	(源缘)
摇源缘摇本章小结	(源猿)
第 缘章摇磁力机械中的多场耦合分析	(源缘)
摇缘员摇磁力机械中的多物理场耦合效应	(源远)
摇缘圆摇单场内部参数耦合分析	(源员)
摇缘猿摇两场局部耦合分析	(源远)
摇缘源摇多物理场耦合分析	(源员)
摇缘缘摇在磁力机械设计中考虑耦合效应	(源远)
摇缘远摇本章小结	(源愿)
第 远章摇场路结合并考虑耦合的磁力机械设计方法	(源缘)
摇远员摇磁力机械设计的现行方法	(源缘)
摇远圆摇场路结合、考虑耦合的磁力机械设计方法	(源猿)
摇远猿摇实例——滚筒磁性支承组件设计	(源源)
摇远源摇本章小结	(源远)
第 苑章摇总结与展望	(源愿)
摇苑员摇全文工作总结	(源愿)
摇苑圆摇本书工作的局限和后续工作展望	(源员)
附摇录	(源猿)

总摇序

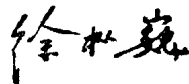
当今世界科学技术突飞猛进,知识经济飞速发展,以经济和科技为基础的综合国力的竞争日趋激烈。而科技的竞争、经济的竞争乃至综合国力的竞争,归根结底是人才的竞争。面对新的形势、新的要求,党中央先后作出了实施“科教兴国”、“人才强国”战略和走自主创新道路,建设创新型国家的重大决策。胡锦涛同志在党的十七大报告中又提出,建设人力资源强国和创新型国家是我国全面夺取建设小康社会新胜利的两大新目标。高等学校是国家创新体系的重要组成部分,肩负着培养自主创新型人才的历史使命。研究生教育处于高等教育的最高层次,是国家培养高层次创新型人才的主要渠道。研究生,特别是博士研究生的科研工作,一般处于本学科的前沿,具有一定的创造性。为鼓励广大研究生,特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究,进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力,激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性,展示我校博士研究生的学术水平,为他们的尽快成才搭建平台,学校经过精心策划,编辑出版了《斛兵博士文丛》。

此次入选《斛兵博士文丛》的论著,均为 2005 年毕业并获得博士学位的博士研究生学位论文,是在广泛动员、严格把关的基础上,根据质量第一、公平公开、规范评审的原则认真遴选出来的。同时这些论著注重坚持基础研究与应用研究并举,是兼顾理论价

值与实践意义的最新研究成果。可以说,这套《斛兵博士文丛》(第一卷)虽然也可能有这样或那样的不足,但基本反映了我校博士研究生所具有的坚实的理论基础、系统的专门知识,以及较高的学术造诣和分析能力;体现了他们崇尚学术、追求真理、勇于创新的科学精神,实事求是、严谨认真的治学态度,不断进取、追求卓越的学术品格;展现了我校“勤奋、严谨、求实、创新”的校风学风。

建校 100 年来,学校充分发挥人才培养、科学研究和服务社会的功能,为国家和社会培养了一大批杰出人才,一代又一代的莘莘学子在这里勤奋耕耘、茁壮成长。出版《斛兵博士文丛》也是我校实施研究生教育创新工程、培养研究生创新精神、提高研究生创新能力的一个重要举措。合肥工业大学经过 100 年的建设和发展,逐步形成自身的办学特色,也取得许多令人瞩目的成就。我们正在不断改善办学条件,逐步完善相关政策,营造有利于高层次创新型人才尽快成长的良好环境,确保学校多出人才、快出人才、出好人才。

我衷心希望广大研究生特别是博士研究生,发扬我校优良的传统、校风、学风,在合肥工业大学自由宽松、开放和谐、充满生机和活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新,通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文,为进一步提高我校的学术水平、科研创新能力和综合实力作出更大的贡献,努力把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师 摇 

二〇〇七年十一月

第 1 章 绪论

磁力机械作为一类新型的机器或机构,近年来得到了越来越广泛的应用。从一些典型磁力机械的设计方法上看,目前我国在磁力机械应用方面数量虽不断增多,但总体说来研究基础仍较薄弱。例如,工程领域仍沿用传统的磁路设计方法构建磁场,参数计算中广泛使用试凑法和经验参数,对设计要素往往过多地简化、假设或依赖于经验,使设计效率和精度不高。又如,对磁力机械中涉及的电磁、机械等各类参数的设计和分析,其研究往往局限于各自学科领域,尤其是设计工作主要限于电磁领域,对磁力机械工作中客观存在的多场耦合效应未能体现,使设计不能正确反映真实过程。

鉴于磁力机械的工作特点和应用中对设计精度、效率等方面提出的要求,磁力机械的设计方法有必要作系统深入的研究,为工程应用提供准确的理论基础。目前磁力机械虽已成为一门新兴交叉学科,但其设计方法尚未成熟和自成系统。本书拟针对现有方法中的上述两方面缺陷展开讨论,提出磁路法中忽略或假设的相关设计因素、磁力机械中多物理场耦合效应在设计中如何加以分析和考虑的方法,以克服长期使用的磁路设计方法的缺点,满足应用要求,并为进一步完善的磁力机械设计方法打下基础。

1.1 绪论概述

人类认识磁现象和应用磁性材料的历史已很悠久。最早关于磁石的记载在我国春秋时期的《管子·地数》中。司南的出现表明我国早在汉代就已

对磁现象加以利用。英国人威廉·吉尔伯特在1544年前后描述了磁石的晕极和杂极,验证了同性相吸和异性相斥的现象^[1]。1785年库仑定律发表,1820年奥斯特发现了电流磁效应,此后毕奥-萨伐尔定律和拉普拉斯定律给出了电流磁效应的定量描述,安培从奥斯特的实验中总结了右手螺旋法则和安培定律。与此同时,电工学中最重要基本定律欧姆定律和基尔霍夫定律相继发表。法拉第于1831年、美国的亨利于1830年左右各自发现电磁感应现象,法拉第根据电磁感应原理发明了世界上第一台直流发电机,并提出场的观念和力线概念。德国人海因里希·鲁道夫·亥姆霍兹和安德烈·玛丽·安培分别给出了电磁感应定律的定量表述,俄国人楞次给出了确定感应电流方向的楞次定律。英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(詹姆斯·克拉克·麦克斯韦)通过假说将法拉第的力线观念用数学公式表达,形成了自己的电磁理论,于1864年发表,并被后来的赫兹实验所验证。该理论经后人整理而成的麦克斯韦电磁场方程组,标志着经典电磁学理论体系的建立。麦克斯韦电磁学与牛顿力学、热力学基本定律一起构成经典物理学,在不断发展中沿用至今^[2]。如今,磁学已成为物理、电气、材料、化学、冶金和其他工程学科领域内的学者和工程师共同研究的一个开放领域^[3]。磁性物理学对材料微观理化结构和相互作用机理的阐述,改变了磁性材料的设计和加工方式;工程师的实际经验结合磁场设计理论和分析方法的不断完善,使高性能的磁性装置的设计制造成为可能;新技术、新材料、新工艺在磁领域的应用,尤其是近代计算机技术、计算方法和试验研究技术的应用,促进了电磁理论特别是计算电磁学理论研究的深入和磁应用领域的空前发展。尤其从上世纪中叶以来,伴随着计算机存储器使用的铁氧体磁芯和磁记录材料的出现和需求量增加,以及以磁放大器为代表的非线性磁性应用的相继问世,磁性应用技术得到迅猛发展^[4]。同时,随着现代工业的进步和发展,工业生产中日益重视对新技术的需求和对环境的保护,西方发达国家相继制订了严格的环境保护和产品可靠性等法规,促进了新技术和新产品的开发和利用,客观上也推动了工程磁学的发展。磁应用从传统的强电领域扩展到计算机与信息技术、测试与自动控制、传动与动力系统等领域。各类磁性功率器件不断增多;利用磁性材料的各种磁效应(磁致伸缩效应、热磁效应、磁光效应、电磁效应等),人们开发了多种磁性传感器和其他测量器件;磁性材料作为信息产品的基础材料应用于各类存储

设备 磁性设备和装置作为动力和控制元件(各类电机、变压器、电感、传感器、继电器、电磁铁、开关电源、磁无源器件等)广泛应用于工业动力系统和自动控制系统中 等等。如今 磁的应用已渗透到人们生产和生活的方方面面 ,严格区分磁应用的类型、尽数磁器件的所有应用实例已是件困难的事。

在工程磁学应用研究中 ,与磁的一些前沿研究领域同样值得关注的是磁学与相关学科的学科交叉的理论与应用发展。目前广泛应用的磁力机械 就是引人关注的一个磁应用领域。

利用磁能产生的力或力矩 ,以无接触方式驱动或控制置于磁场中的执行构件 ,使其按确定的运动或动力要求动作的机器或机构 ,统称为磁力机械^[1]。磁能的应用领域涵盖很广 ,磁力机械作为磁能在机械领域的典型应用 ,在有关文献中也被称为磁力驱动器^[2]、磁驱动^[3]、磁传动^[4]、磁耦合^[5]、磁驱动^[6]、磁驱动^[7]、磁驱动^[8]、磁驱动^[9]、磁驱动^[10]等。与电机一样 ,磁力机械也是运动电荷磁效应所产生的磁阻力和洛伦兹力的典型工程应用。

按所用磁场场源形式 磁力机械可分为永磁型、电磁型和永磁电磁混合型 根据其应用功能 磁力机械有驱动、传动、支承和联接等类型 ;从磁场设计计算角度还可对磁力机械做不同分类 ,如按磁场空间分布特性有轴对称场、平面对称场等 ,按时间特性有恒定场和时变场 ,按磁场媒质有线性媒质场和非线性媒质场等。严格地说 ,除永磁磁场和直流电激磁系统磁场可在一定的条件下简化为线性平面恒定场外 ,磁力机械中的磁场大多数场合是非线性三维恒定场或时变场。

磁力机械种类繁多 ,应用广泛的有永磁或电磁吸盘、磁力离心泵和转子泵、电磁离合器和制动器、磁力联轴器、磁悬浮轴承、磁力搅拌器、磁力钻机、磁力减振器等 ,对一些机械基础件和常用机构采用磁力驱动 ,形成磁力弹簧、磁力齿轮、磁力凸轮、磁力变矩器、磁力减速器、磁力带传动、磁力密封器、飞轮电池、磁力间隙运动机构等类型。图 1-1 示出几种典型的磁力机械。



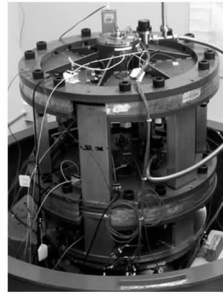
a)



b)



c)



d)

图 1-1 几种典型的磁力机械

磁泵^[1] 磁轴^[2] 磁轴^[3] 磁轴^[4] 磁轴^[5] 磁轴^[6] 磁轴^[7] 磁轴^[8] 磁轴^[9] 磁轴^[10]

磁力机械的利用磁场透过磁路传递力或扭矩的工作原理,使其与常规机械相比有很显著的应用特点。其优点主要表现在:

(1)节能环保。采用永磁提供力源时无需消耗电能;在磁力泵、磁力密封等设备中,磁力驱动将轴传递动力的动密封转化为静密封,在实现动力的零泄漏传递的同时,也避免了可能的有毒害、强酸碱等工作介质对环境的污染;采用非接触式传动(如磁力齿轮)和支承(如磁力轴承)系统由于无需润滑,使洁净生产成为可能。

(2)效率高,寿命长。非机械接触的工作方式,避免了机械磨损,使运行时的有害功耗降低,同时提高了机械的使用寿命。

(3)工作平稳,可靠性高。主从件间的非刚性联接阻止了振动或冲击的传递,使运行工况平稳;永磁执行器(如磁力联轴器)的过载保护、电磁执行器的在线检测等功能,提高了磁力机械的工作可靠性。

(4)应用范围广。磁力机械除了能代替同类型常规机械的工作外,还能运行于一些极端工况,如禁止润滑介质污染、极端高温或低温、辐射、超高速

等场合,在支承、联接或传动需实施主动控制等场合,磁力机械是首选设备。

磁力机械的主要缺点是:

(1)磁力机械设计制造相对困难。与常规机械相比,磁力机械的设计制造过程涉及结构、电磁、控制等领域,其基础研究尤其是设计方法研究尚不成熟,客观上增加了设计制造的难度,也导致目前总体而言磁力机械在性价比上并无优势。

(2)磁场存在可干扰周围环境。磁场在工作空间内的存在,将限制易受干扰的仪器和设备的使用,并可能造成其他类型的磁污染。磁场干扰的负作用可通过电磁兼容性设计来改善。

磁力机械特点鲜明,因符合生态环保这一现代机械产品发展态势要求而更凸现其优越性。目前设计制造水平不高制约了磁力机械发展。在设计方法上,已有工程设计中仍以大量使用试凑法和经验公式来确定参数的磁路方法为主,且设计工作主要集中在电磁领域,对磁力机械工作中各物理场间存在的耦合效应未予考虑或作简化处理,设计结果不够精确。改进现有设计方法的缺陷,形成较系统和精确的设计分析理论,是该领域研究的基础工作,也是应用中提出的要求,本书将围绕该问题展开研究。

1.1 研究基础和现状

1.1.1 关于电磁场的分析计算方法

磁力机械设计的理论基础主要涉及电磁场理论和机械设计理论,其中基于电磁场理论的磁场参数设计和分析是磁力机械设计的核心。与其他电磁场问题一样,磁力机械设计含两方面问题:按已确定的边界条件、媒质结构尺寸求场分布的正问题;按执行器的静力学和动力学要求的磁场分布确定场源、媒质分布、媒质结构型式和尺寸等的反问题。

电磁场设计和分析的两类问题中,所用方法有磁路法、图解法、实验法、解析法和近似解析法以及数值算法。

在磁场参数设计中,磁路法作为现有磁力驱动机构和设备普遍使用的

C 磁力机械分析与设计方法

工程设计方法已较成熟,但由于精度不高只能作为应用于近似设计。为保证计算结果的可靠性,设计人员在实践中总结了诸如退磁因子法、比例法、连续积分法、解析法、相似法、模型法等实用方法^[56],在电流和铁磁材料的分布具有较简单的几何形状、磁路各处磁导率是标量时,磁路法是实用的磁力机构预设计方法。在解决多网孔复杂磁路计算中,网络拓扑分析法^[57]是磁路法的典型应用。

图解法也是一种近似的分析计算方法。在不少实际问题中,由于场域几何特性的复杂性,有时难以应用解析法做精确计算,这时所研究的场是二维场或轴对称场时,可应用图解法。确定电机和一些电器的气隙磁导时常用图解法,在电磁场场图的分析研究中也常使用图解法^[58]。

电磁场的实验分析研究在解决实际问题中常常起着很重要的作用。实验法包括实测法和电模拟法,后者包括数学模拟和物理模拟。实测法采用电磁测试设备和方法实测磁力设备的磁场性能参数特别是动态过程参数,直观真实地反映设备的设计性能指标,并据此验证和修改设计计算方法、数学模型和实际结构。在不同场合中使用数字存储示波器、微机控制动态测力装置、瞬变过程的暂态记录仪以及各类磁场参数测试仪器作参数测试,是一些磁力装置和电磁控制元件制造中必不可少的环节。电模拟是根据被研究的真实装置(原型)的性质或现象与模型之间场方程上的相似性,表征原型和模型的物理量间有确定的对应关系(相似判据^[59]),从而通过测量模型的物理量以定量研究原型的一种实验方法。仅建立在微分方程和类比概念基础上、模型与原型对应物理量的物理本质相异的电模拟称为数学模拟,方法简单但精度有限;保持模型和原型中对应的物理量具有相同的物理本质、按实际原型尺寸或按比例制成模型进行实测以确定设计参数的电模拟称为物理模拟,模拟过程需花费较多时间和成本,但较数学模拟更准确和符合原型。

解析法和近似解析法中常用分离变量法、有效等位面法、均匀磁化法等方法^[60]。其中分离变量法用于求解由拉普拉斯方程或泊松方程所描述的边值问题,是将待求的位函数分解为几个一维函数的乘积从而变偏微分方程为常微分方程的一种解法。该方法中只要选取的坐标系能使场域的边界面和相应的坐标面吻合(从而边值能得到明确描述),则一般可获得待求问