

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 王 勇 导师 赵 韩

合肥工业大学出版社

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枏巍

副主任委员：陈心昭 赵 韩

委 员(按姓氏笔画为序)：

史铁钧 刘全坤 陈心昭

张崇巍 杨伯源 费业泰

赵 韩 钟玉海 徐枏巍

出版编辑委员会

主任委员：吴玉程 马国锋

委 员：朱 红 孟宪余 曹 兵

郭志勇 王连超 权 怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》(教研〔2005〕1号)文件精神,培养研究生创新意识、创新能力,提高研究生培养质量,合肥工业大学设立了研究生科技创新基金,以支持和资助研究生的教育创新活动,为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新,出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学 2006 届部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量,《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则,充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版,得到了相关兄弟院校和有关专家的大力支持,也得到了研究生导师和研究生的热情支持,我们谨此表示感谢,希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好,但由于我们经验不足和学识水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2007 年 11 月

总 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》。

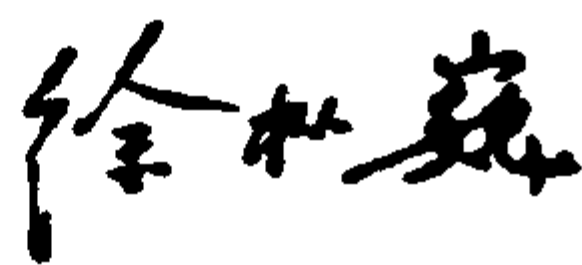
此次入选《斛兵博士文丛》的论著,均为 2006 年毕业并获得博士学位的博士研究生学位论文,是在广泛动员、严格把关的基础上,根据质量第一、公平公开、规范评审的原则认真遴选出来的。同时这些论著注重坚持基础研究与应用研究并举,是兼顾理论价

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 62 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 62 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



二〇〇七年十一月

致 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 勇

2007 年 9 月

摘 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—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的意义和方法。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

ABSTRACT

The research foundation formed in the development of engineering magnetics and its present status are briefly retrospected; the latest evolution related to physical field analysis and multi-physics coupling problem of magnetic machine are particularized. Deficiencies of current design and analysis method of magnetic machine are also listed. Based on these, measures and meanings of systematic research on physical variables calculation and coupling effects among multi-physics are discussed. Also, mathematical and physical theories and methods which are generally applicable to the following studies are summarized.

Based on field analyzing, those generally ignored or assumed ingredients of design such as magnetic resistance, magnetic leakage, skin effect and linearization of B-H magnetic curve, are taken into consideration. The relational dynamic problems, for instance, how rotating speed influences the distribution of magnetic field, are also discussed. By contrastive analysis, necessity of field analyzing in magnetic machine design is explained. Quantitative results are obtained, so those side effects which may present to both magnetic circuit and field-circuit integration method are clarified.

Temperature field calculations contribute to another field analysis for magnetic machine. Compared with the coarse calculating way by means of Newton formula or equivalent heat network method, temperature of each part obtained by field analysis are more direct and exact, and disciplinarian of heat distribution and transformation can also be found easily through the presentation of heat grads, heat flow density and other heat parameters.

Main components in an electromagnetic bearing rotor supporting systems are exemplified in this book.

Another main topic of this book is multi-physics coupling problem in magnetic machine. From the macro-mechanic point of view, the paper classifies the phenomena and forms of coupling in magnetic machine, intending to discuss its method and significance to magnetic machine design. In this section, coupling problems are divided into several parts: single-field interior coupling, two-field' mutual coupling, coupling among three or above-three fields, and some complex coupling problems. Main couplings in entity of magnetic machine are analyzed one by one in illustrative way. To some sorts of complex coupling, decomposed ways for modeling and numerical solution are put forward. Idea of magnetic machine design considering multi-physics coupling is discussed, that is, the Multidisciplinary Design Optimization method. An integrated platform frame for magnetic machine analysis and design is also conceived basing on this idea.

Based on all the above analyses, surrounding the essential problem of magnetic machine design and contraposing deficiencies of current methods, a field-circuit integrated way considering coupling effect for magnetic machine design is put forward as conclusion. A practical design example is particularly performed to illustrate the process and feasibility where the method is utilized for the geometric and electromagnetic parameters design of magnetic machine in admissible precision.

KEY WORDS: Magnetic machine; Field variables analysis; Multi-physics coupling; Design

目 录

第 1 章 绪 论	(001)
1.1 概述	(001)
1.2 研究基础和现状	(005)
1.3 本书的研究内容和方法	(014)
第 2 章 磁力机械设计的基础理论体系研究	(023)
2.1 磁力机械设计的基础理论体系组成	(023)
2.2 磁力机械中的物理场	(025)
2.3 磁力机械的电磁场理论	(032)
2.4 磁力机械中的热问题	(043)
2.5 磁力机械的场量数值计算方法	(047)
2.6 本章小结	(055)
第 3 章 磁力机械中的材料非线性、铁损及漏磁分析	(058)
3.1 磁力机械中磁介质	(058)
3.2 材料磁化特性对设计参数的影响	(063)
3.3 磁力机械中的涡流损耗和磁滞损耗分析	(068)
3.4 磁力机械中的漏磁场分析和计算	(086)
3.5 本章小结	(091)
第 4 章 磁力机械中电磁作用下的温度场问题	(095)
4.1 磁力机械热分析目的和方法	(095)



4.2	温度场分析中有关热参数的确定	(098)
4.3	稳态温度场的有限元方法	(101)
4.4	电磁轴承-转子系统主要部件的温度场分析	(105)
4.5	本章小结	(113)
第5章 磁力机械中的多场耦合分析		(115)
5.1	磁力机械中的多物理场耦合效应	(116)
5.2	单场内部参数耦合分析	(121)
5.3	两场局部耦合分析	(126)
5.4	多物理场耦合分析	(141)
5.5	在磁力机械设计中考虑耦合效应	(146)
5.6	本章小结	(149)
第6章 场路结合并考虑耦合的磁力机械设计方法		(154)
6.1	磁力机械设计的现行方法	(154)
6.2	场路结合、考虑耦合的磁力机械设计方法	(163)
6.3	实例——滚筒磁性支承组件设计	(164)
6.4	本章小结	(176)
第7章 总结与展望		(178)
7.1	全文工作总结	(178)
7.2	本书工作的局限和后续工作展望	(181)
附 录		(183)

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 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 Maricourt 在 1269 年前后描述了磁石的 N 极和 S 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—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 Neumann 和 Weber 于 1845 年和 1846 年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。英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)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 1865 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 Maxwell 电磁场方程组,标志着经典电磁学理论体系的建立。Maxwell 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^[5]。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^[6]、Magnetic Machine^[7]、Magnet Tools^[8]、Magnetic Mechanism^[9]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。

磁力机械种类众多,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、磁力钻孔机、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。