



先进制造技术创新研究丛书

**Related Theory and Measurement
Research on Magnetic Bearing**
Electromagnetic Field

**磁力轴承电磁场的相关理论
及其实验研究**

丁国平 著

33.3
12



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

014037751

TH133.3

12

湖北省公益出版基金资助项目
先进制造技术创新研究丛书

磁力轴承电磁场的相关理论 及其实验研究

丁国平 著



武汉理工大学出版社
· 武汉 ·

TH133.3
12



北航

C1725862

内 容 提 要

磁力轴承利用电磁力将被支承件稳定悬浮在空间,消除了支承件与被支承件之间的机械接触,与传统轴承(滚动或滑动轴承)相比具有无磨损、无需润滑、高转速、长寿命和支承特性可控可调等独特性能优势。磁场是磁力轴承实现磁悬浮的物理介质,其分布规律和特征从本质上决定了磁力轴承的整体性能。本书以 8 极径向磁力轴承为例,对转子静态悬浮和旋转两种典型运行状态,进行了电磁场有限元分析;构建了径向磁力轴承静态电磁场测量平台,测量了径向磁力轴承实验装置的静态磁通密度分布;为解决磁力轴承气隙磁场的在线测量问题,提出将光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)应用于气隙磁通密度测量,设计开发了 FBG 磁场传感装置,构建了磁力轴承 FBG 气隙磁通密度在线测量系统;在转子静止和旋转两种状态下,使用 FBG 磁场传感装置测量了不同线圈电流、不同气隙和不同转速条件下的磁力轴承气隙磁通密度,测量结果达到了一定的准确性。

图书在版编目(CIP)数据

磁力轴承电磁场的相关理论及其实验研究/丁国平著. —武汉:武汉理工大学出版社,2014.2

ISBN 978-7-5629-4229-0

I. ①磁… II. ①丁… III. ①电磁轴承—电磁场—研究 IV. ①TH133.3
②TM153

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 026494 号

项目负责人:王兆国

责任编辑:陈军东

责任校对:余士龙

装帧设计:董君承

出版发行:武汉理工大学出版社有限责任公司

邮 编:430070

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉兴和彩色印务有限公司

开 本:787×960 1/16

印 张:7.75

字 数:180 千字

版 次:2014 年 2 月第 1 版

印 次:2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

磁力轴承是典型的电磁能和机械能相互转化的装置,其电磁场特征从本质上反映了磁力轴承的整体性能。磁力轴承的磁性材料的非线性磁导率和磁饱和、漏磁、磁耦合、涡流等因素使得磁力轴承电磁场具有很强的空间非线性和动态特征。因此通过理论计算和实验测量相结合的方法研究磁力轴承电磁场的空间分布和变化规律对于提高磁力轴承的整体性能具有重要意义。

本书以 8 极径向磁力轴承为例,针对磁力轴承转子静态悬浮和旋转这两种典型运行状态,推导出磁力轴承电磁场的磁势方程,界定了磁力轴承电磁场的边界条件,选用有限元方法求解磁力轴承电磁场边值问题。

针对转子静态悬浮状态,建立磁力轴承静态电磁场模型。考虑定子和转子铁磁材料的 BH 曲线、磁饱和、漏磁、磁耦合等非线性因素,使用三维有限元方法计算磁力轴承静态电磁场的空间分布,结果表明上述非线性因素对磁力轴承的关键性能参数——气隙磁通密度和磁力有显著影响。

构建了径向磁力轴承静态电磁场测量平台,使用三通道高斯计测量了径向磁力轴承实验装置的磁通密度分布,使用磁通密度的实测值对电磁场三维有限元模型进行了修正,修正后的有限元模型达到一定的准确性。

针对转子旋转状态,建立磁力轴承旋转电磁场模型。使用二维非线性有限元方法求解了不同线圈电流、转速条件下的磁力轴承旋转电磁场的磁力线分布、气隙磁通密度、悬浮力、拖曳力和功率损耗。结果表明转子材料的磁饱和使气隙磁通密度、拖曳力出现明显饱和,饱和点由线圈电流和转子转速共同决定。

为解决磁力轴承气隙磁场的在线测量问题,提出将光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)应用于气隙磁通密度测量,设计开发了 FBG 磁场传感装置,验证了 FBG 传感装置用于气隙磁通密度测量的可行性。构建了磁力轴承 FBG 气隙磁通密度在线测量系统,实现气隙、转速、线圈电流的调节,模拟磁力轴承的工作状态。

在转子静止和旋转两种状态下,使用 FBG 磁场传感装置测量了不同线圈电流、不同气隙和不同转速条件下的磁力轴承气隙磁通密度,实测结果与有限元计算结果对比分析表明,在转子静止和旋转两种状态下,FBG 传感装置对气隙磁通密度的测量均达到了一定的准确性。

Preface

Magnetic bearing (MB) is a kind of electromechanical device with mutual conversion between electromagnetic energy and mechanical energy. MB's basic performance is represented essentially by electromagnetic field features. Magnetic material's nonlinear magnetic permeability and saturation, magnetic leakage, magnetic coupling, eddy current effect and etc. make MB's electromagnetic field present fundamentally nonlinearities. It is significant to make researches on MB's electromagnetic field with theory calculation and measurement for MB's performance improvement.

For MB's two typical working states rotor suspension and rotor rotation, electromagnetic field potential equations are derived and boundary conditions are defined for an eight-pole radial MB. Finite element method(FEM) is utilized to solve the electromagnetic field equations.

For rotor suspension, static electromagnetic field distribution is calculated through 3D FEM with consideration of nonlinearities mentioned above. Calculation results show that MB's key performance parameters——air gap magnetic flux density and magnetic forces are affected by the nonlinearities apparently. A radial MB static electromagnetic field measurement platform is constructed and a three channel Gaussmeter is utilized to measure the magnetic flux density distribution. The 3D FEM model is modified by the measurement results and achieves certain accuracy.

For rotor rotation, magnetic flux distribution, air gap magnetic flux density, suspension force, drag force and power loss of MB are calculated through 2D nonlinear FEM under different coil current and rotating speed conditions. Results show that rotor material's magnetic saturation induces saturation in air gap magnetic flux density and drag force, and the saturation points are determined by both coil current and rotating speed.

To solve air gap magnetic flux density online measurement problem, it is introduced to apply Fiber Bragg Grating(FBG) in magnetic flux density meas-

urement. A novel FBG electromagnetic field sensing device is designed and fabricated, and its feasibility in air gap magnetic flux density measurement is verified. A FBG-based air gap magnetic flux density online measurement system is established, which realizes air gap, rotor speed and coil current adjustments to simulate MB working states.

Air gap magnetic flux density is measured through the FBG electromagnetic field sensing device under different coil current, air gap and rotating speed conditions when the rotor is static or rotating. Comparison results between measurement and FEM calculation show that air gap magnetic flux density measurement through FBG electromagnetic field sensing device achieves certain accuracy.

目 录

1 引言	(1)
1.1 磁力轴承概述	(1)
1.2 磁力轴承电磁场的研究目的和意义	(2)
1.3 国内外发展概况	(5)
1.4 磁力轴承电磁场研究的项目支撑与主要工作	(8)
2 磁力轴承电磁场理论基础	(10)
2.1 磁力轴承电磁场方程组	(10)
2.2 磁力轴承电磁场的势函数方程	(13)
2.3 磁力轴承电磁场边值问题求解	(17)
2.4 本章小结	(18)
3 磁力轴承静态电磁场分析	(19)
3.1 磁力轴承三维静态电磁场有限元计算	(19)
3.2 磁力轴承静态电磁场非线性因素分析	(28)
3.3 本章小结	(35)
4 磁力轴承静态电磁场测量	(36)
4.1 径向磁力轴承静态电磁场测量平台	(36)
4.2 测量方法和步骤	(39)
4.3 径向磁力轴承静态电磁场测量结果	(42)
4.4 实验数据对有限元模型的修正	(53)
4.5 本章小结	(59)
5 磁力轴承旋转电磁场分析	(60)
5.1 旋转电磁场有限元计算	(60)
5.2 旋转电磁场解析解	(72)
5.3 旋转电磁场有限元解与解析解比较	(76)
5.4 本章小结	(78)
6 基于光纤光栅的磁力轴承磁场传感机制和测量系统	(79)
6.1 光纤布喇格光栅传感原理	(80)
6.2 基于 FBG 的磁力轴承磁场测量原理	(83)

6.3	FBG 磁场传感装置应变分析	(86)
6.4	磁力轴承 FBG 气隙磁通密度在线测量系统	(87)
6.5	本章小结	(89)
7	基于 FBG 的磁力轴承气隙磁通密度测量	(91)
7.1	实验项目(a):气隙磁通密度静态测量	(91)
7.2	实验项目(b):不同转速条件下的气隙磁通密度测量	(97)
7.3	本章小结	(103)
8	总结与展望	(104)
8.1	总结	(104)
8.2	磁力轴承电磁场研究展望	(105)
	参考文献	(106)

1 引言

1.1 磁力轴承概述

磁力轴承是利用电磁力将被支承件稳定悬浮在空间,使支承件与被支承件之间没有机械接触的一种高性能机电一体化装置,它主要由转子(被支承件)、定子(支承件)、传感器、控制器和功率放大器等部件组成(图 1-1)。定子线圈通电后产生的电磁场使转子保持在一定的位置上,定子和转子之间有间隙,转子处于悬浮状态。位移传感器监测转子的位置,一旦转子偏离所要求的位置,传感器发出偏差信号,控制器根据参考信号(转子要求的位置信号)与传感信号之差值来调整定子线圈中的电流,使转子恢复到原来的位置。

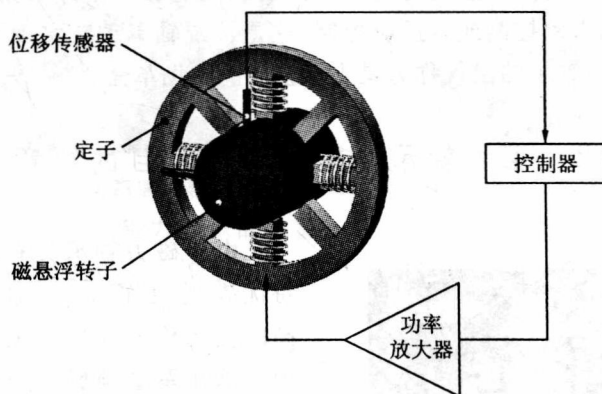


图 1-1 磁力轴承工作原理

在 5 自由度磁悬浮转子系统中,磁力轴承通常分为径向磁力轴承和轴向磁力轴承,如图 1-2 所示。磁悬浮转子系统中前后两个径向磁力轴承控制转子的四个径向自由度,一个轴向磁力轴承控制转子的轴向自由度,从而实现 5 自由度控制。径向磁力轴承与轴向磁力轴承的工作原理类似,而径向磁力轴承结构和磁场分布比轴向磁力轴承复杂,本书选取径向磁力轴承为研究对象,轴向磁力轴承的分析可采用与径向磁力轴承类似的方法和步骤。

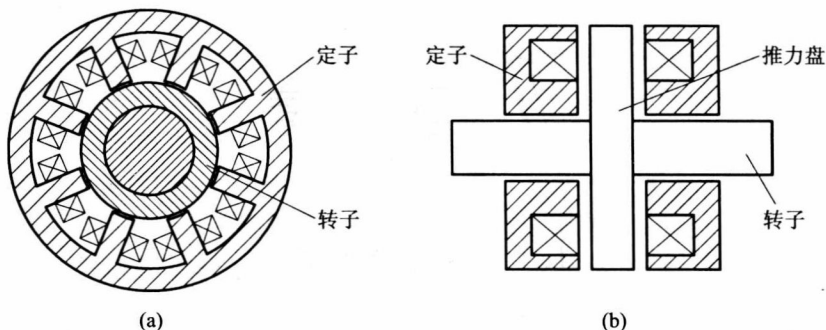


图 1-2 径向磁力轴承和轴向磁力轴承示意图

(a) 径向磁力轴承; (b) 轴向磁力轴承

由于磁力轴承的定子和转子实现了无机械接触和电子控制,磁力轴承与传统轴承(滚动或滑动轴承)相比具有一系列独特的性能。这些性能主要表现在两大方面:其一是磁力轴承消除了机械接触,因此无摩擦、无磨损、无需润滑,这使得运动部件能够高速度、高精度、长寿命、低功耗、无污染地运行;其二是磁力轴承的支承特性可以控制,这使得运动部件的性能能够根据外界条件的变化进行实时调整,实现自动控制或自适应控制,这是传统轴承无法实现的。因此,国内外学术界把磁力轴承的出现称为是支承技术的一场革命。

1.2 磁力轴承电磁场的研究目的和意义

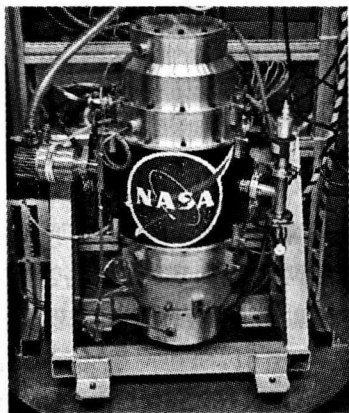


图 1-3 美国 NASA 太空站磁悬浮飞轮电池

由于磁力轴承具有以上一系列独特优势,它在军事和工业领域中具有很高的应用价值和广泛的应用前景。磁力轴承在军事领域的应用是最早的也是最成熟的,主要研究对象是飞机、潜艇、导弹和航天飞行器制导系统中元件的磁悬浮,其中包括磁悬浮飞轮电池^[1-6](图 1-3)、卫星储能与姿态控制^[7-11]、混合动力车辆^[12-15]。在工业领域中,磁力轴承已成功地应用于半导体、光学镀膜、离子蚀刻和液晶显示器等行业的关键设备——涡轮分子

泵^[16-25],高速高精度铣削机床主轴和磨削机床主轴^[26-31](图 1-4),石油和天然气工业中的低温涡轮膨胀机(图 1-5)、离心压缩机等^[32-33]。在国外已有专门的磁力轴承公司从事磁力轴承产品的生产、经营、研究、开发及应用推广,其中包括法国 S2M 公司、日本 NTN 东洋轴承公司、瑞典 SKF 公司、瑞士 IBAG 公司、美国 Clanetix 公司等。

尽管磁力轴承在上述领域已经获得成功应用,但由于磁力轴承的研究涉及机械、材料、控制、信息、传感等多学科领域,其基础理论和关键技术较复杂,目前在磁力轴承励磁方式和结构、磁悬浮转子动力学、控制系统、机电耦合、传感器、系统非线性等诸多方面仍然存在着尚未解决的问题。各国研究者也仍在致力于提高磁力轴承的整体性能,包括进行磁力轴承激励器结构的优化设计或创新设计^[34-38]、提高控制系统的鲁棒性^[39-42]、优化磁悬浮转子的动力学特性^[43-47],抑制磁悬浮转子的振动^[48-52]、降低磁力轴承的功率损耗等^[53-57]。

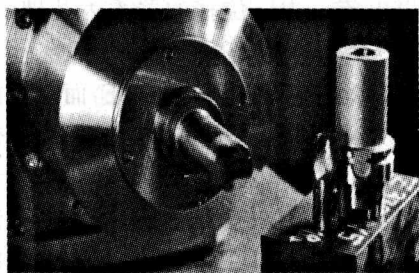


图 1-4 法国 S2M 公司高速磁悬浮主轴

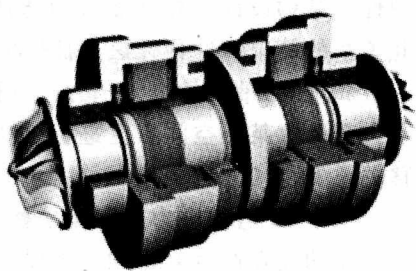


图 1-5 瑞典 SKF 公司磁悬浮涡轮膨胀机

以上研究都必须以磁力轴承的电流—力—位移之间的关系为基础,因为磁力轴承是一种典型的机电一体化系统,它运行时输入为定子线圈中的电流,输出为电磁力和转子的空间位置,电流—力—位移之间的关系从本质上直接反映了磁力轴承的整体性能,而由于磁力轴承定子与转子磁性材料的非线性磁导率和磁饱和、漏磁、磁极之间的磁耦合、涡流、磁滞等因素,使得电流—力—位移之间的关系具有很强的空间、非线性和动态特征。

在以往的研究中,通常采用磁路方法对电流—力—位移之间的关系进行研究:其优势在于模型简单,计算快捷,然而存在以下问题:

(1)在磁力轴承的结构设计阶段,为了突出主要问题,往往忽略漏磁,忽略铁芯和转子中的磁阻,认为气隙中磁场均匀分布,忽略磁性材料的磁滞和涡流,从而将电流—力—位移的关系简化为磁路进行分析和计算^[58-60],这种简化在设计初始阶段对磁力轴承承载力和静态工作点的计算是比较简便快捷的,但大大降低了计算精度,特别是对于含有永磁偏置的混合磁力轴承^[61]。

(2)在进行控制系统的设计时,往往通过简化磁路将电流—力—位移的关系在静态工作点附近进行线性化,建立控制系统的数学模型,获得磁力轴承的电流刚度和位移刚度,从而确定控制参数^[62-64]。这种局部线性化的方法在小范围内对磁力轴承的稳定控制是有效的,但当转子高速旋转时,磁力轴承的系统性能会随着转子工作点的变化而产生很大的变化,基于局部线性化的控制方法难以保证恒定的刚度和位移跟踪性能,尤其是当磁悬浮转子用于高速机床主轴时^[65]。

(3)当磁力轴承用于飞轮储能系统、涡轮分子泵等高速旋转的设备时,必须考虑磁力轴承的功率损耗问题,并将功率损耗降到最低^[66-68],而简化磁路仅考虑静态问题,很难处理涡流、磁滞等由时变的电流—力—位移关系引起的动态问题,难以进行相关的性能改善。

(4)与普通轴承支承的转子不同,磁悬浮转子的动力学特性既取决于磁悬浮转子系统的结构设计,同时也取决于控制参数的选择^[69],具有典型的机电耦合特性。结构设计与控制参数的选择都必须以电流—力—位移的关系为基础,对此关系的简单线性化无法表征机电耦合特性^[70-71]。

(5)磁力轴承的电流—力—位移关系具有显著的空间非线性特征,而以往的研究都是在某一空间点上进行这一关系的研究,无法掌握完整的电流—力—位移关系的空间分布规律。

从本质上讲,磁力轴承是一种电磁能和机械能相互转化的装置,变化的电流和变化的气隙产生变化的电磁场,变化的电磁场产生变化的电磁力,同时在电磁能和机械能的转化过程中产生一定的能量损耗,以热能的形式释放出来。使用电磁场描述磁力轴承电流—力—位移之间的关系可以从本质上考虑磁路方法难以求解的非线性和动态问题:①电磁场本身是一个空间概念,可以全面描述电流—力—位移关系的空间分布规律,更便于处理磁路方法难以考虑的漏磁和磁耦合问题;②使用电磁场数值解法可以方便地考虑磁力轴承定子与转子磁性材料的非线性磁导率和磁饱和问题,从而在磁力轴承的全工作范围内分析其整体性能;③基于电磁场的概念可以从本质上描述转子旋转过程中产生的涡流、功率损耗等问题,并根据电磁场基本方程对其进行求解。

本书旨在针对磁悬浮转子的悬浮和旋转两种典型运行状态及突出问题,对磁力轴承的电磁场进行理论分析,建立磁力轴承电磁场模型,对不同运行状态下的磁力轴承电磁场空间变化分布进行仿真计算,研制相应的实验装置,通过实验对磁力轴承电磁场理论计算进行验证和修正,从而获得磁力轴承电磁场的变化规律和空间分布。所获得的磁力轴承电磁场的变化和空间分布规律可预测不同线圈电流、不同磁极布置形式、不同转速时的磁力轴承性能,对于磁力轴承的承

载能力设计、结构尺寸设计、控制方法选择以及磁力轴承的刚度、温升、最高转速等问题的研究都具有重要的理论和实际意义。

1.3 国内外发展概况

20 世纪 80 年代,日本东京大学的 Higuchi 实验室^[72-74]、瑞士联邦工学院的 Schweitzer 实验室^[75-77]、美国弗吉尼亚大学的 Allaire 实验室^[78-80]、日本金泽大学的 Matsumura 实验室^[81-85]等少数研究机构开始系统地研究磁力轴承,在此阶段,磁力轴承的研究主要集中于机械结构和控制系统的设计、整体性能的预测等,磁力轴承采用的控制方法主要是 PID 方法,早期的模拟 PID 控制已经可以实现转子的非接触悬浮。20 世纪 80 年代末,磁力轴承实现了数字 PID 控制,状态反馈成为控制方法的研究热点,此时磁力轴承开始应用于大型涡轮压缩机。

1988 年第一届磁力轴承国际学术会议(ISMB)在瑞士苏黎世召开,标志着磁力轴承国际学术组织的正式成立,不仅为各国的研究同行提供了交流平台,还进一步加强了磁力轴承学术研究与工业应用之间的联系。随后该会议每两年召开一次,迄今为止已举办了 13 次,第 14 届国际会议将于 2014 年 8 月在奥地利举行。

从 1988 年到 1998 年的十年中,磁力轴承在整体性能、成本、效率、装机数量以及应用数量上取得了长足进步,磁力轴承的研究主题已经扩展到柔性磁悬浮转子动力学、模糊控制、滑模控制、非线性控制、功率损耗、无轴承电机、自传感磁力轴承等,其应用也扩展到高速机床主轴、涡轮分子泵、磁悬浮飞轮电池、磁悬浮人工心脏泵等,磁力轴承尤其是在真空技术领域的应用获得了快速发展,在该领域磁力轴承被广泛应用于涡轮分子泵,为半导体工业做出了重要贡献,目前磁力轴承在涡轮分子泵中的装机数量仍是最多的。除此以外,磁力轴承也成功应用于石油和天然气工业中的大型低温涡轮膨胀机、离心压缩机等。20 世纪 90 年代末,电子器件和机电元件的小型化促使磁力轴承开始实现整体系统集成,极大地降低了磁力轴承的总体成本,进一步推动了磁力轴承的工业应用。

进入 21 世纪,磁力轴承的研究主题和实际应用领域越来越广泛和多样化,同时也对磁力轴承的性能提出了更高的要求。瑞士联邦工学院的 Hannes Bleuler 教授在第 11 届磁力轴承国际学术会议(2008 年)的主题报告中指出了磁力轴承未来的发展趋势^[86]:

(1)与技术进步相比,磁力轴承未来的发展将更多地通过实际应用来推动,包括磁力轴承在人工心脏泵、纺织机械等领域的应用;

(2) 由于实际应用对功率损耗最小化提出了更高挑战,高温超导被动磁力轴承将重新成为研究热点,并将在短时期内从实验室样机阶段进入实际应用;

(3) 被动磁力轴承将最终实现在储能飞轮电池或卫星动量轮上的应用;

(4) 自传感磁力轴承仍将是研究兴趣所在,但仍需继续寻求合适的应用领域;

(5) 越来越多的研究者,尤其是中国、韩国、印度等国的研究同行,将为磁力轴承的研究带来新的观点和新的应用。

在国内,1982年上海微电机研究所研制了我国第一台全悬浮磁力轴承样机^[87],该样机采用径向被动、轴向主动的混合型磁悬浮方式。1988年哈尔滨工业大学的陈易新等提出了磁力轴承结构优化设计理论和方法,建立了主动磁力轴承机床主轴控制系统数学模型,这是国内首次对主动磁力轴承全悬浮机床主轴从结构到控制进行的系统研究^[88-89]。随后,清华大学、西安交通大学、南京航空航天大学、武汉理工大学、天津大学、上海大学等相继投入人力和物力进行研究。2000年清华大学与无锡开源机床集团有限公司合作,实现了内圆磨床磁力轴承电主轴的工厂应用实验^[90]。2002年,清华大学开始研究在10MW高温气冷堆(HTR-10)的支撑能量转换单元(PCU)系统氦气直接透平机组中采用磁力轴承支承^[91]。2005年,第一届中国磁力轴承学术会议在北京召开,为国内的磁力轴承研究和应用搭建了交流合作平台,随后该会议每两年召开一次,迄今为止已举办了4次。2006年,国内首家从事磁力轴承产品研发和推广的专业公司——飞旋科技公司成立。2007年,第九届国际真空展览会展示了我国自主研发的应用于分子泵的磁力轴承电主轴产品,标志着我国的磁力轴承已从实验室样机阶段进入产品阶段^[92]。除此以外,目前国内的磁力轴承研究机构,如南京航空航天大学、武汉理工大学等也在积极拓展磁力轴承新的应用领域,包括车载磁悬浮飞轮电池、磁悬浮风力发电机、航空用磁力轴承等^[93-95],并取得较大进展。

从所调研的文献资料来看,国内外对磁力轴承的研究多集中于磁悬浮转子动力学特性、控制系统设计、功率放大器开发等,涉及磁力轴承电磁场方面的研究相对较少,往往仅针对与磁力轴承的电磁场相关的某一问题进行单独研究。这些已进行的研究具有以下特点:

在磁力轴承的磁力计算方面,Zhilichev使用磁路方法对具有永磁激励的磁力轴承进行了分析,并讨论了二维有限元和三维有限元磁场模型的适用范围,对不同模型进行了比较^[96]。Markus Ahrens和Ladislav Kucera建立了一种考虑涡流的径向磁力轴承的解析模型,并根据此模型计算了磁力和功率损耗^[97]。

Bostjan Polajzer 等在磁力轴承的整个运行范围内,通过有限元计算确定了径向磁力轴承中与电流和位移相关的力和磁通的交联特性。基于计算结果,分析了磁非线性和耦合效应对磁力轴承特性的影响。但没有给出实验验证^[98-99]。Matti Antila 等使用非线性二维有限元方法预测径向磁力轴承的承载性能,并通过两个装有主动磁力轴承的试验装置对有限元方法计算的力进行了验证^[100]。J. Imlach 等使用线性磁路理论估算了径向磁力轴承的力和刚度,对安装在电机泵内的主动磁力轴承进行了测量,当偏心较小时,计算和测量取得较好的一致^[101]。F.-Z. Hsiao 等使用非线性有限元方法确定了径向磁力轴承的力,他们研究了两种类型的磁力轴承的几何参数的影响,但没有进行实验^[102]。David C. Meeker 建立了一种考虑涡流、漏磁和边缘效应的径向磁力轴承扩充磁路模型^[103]。Robert J. Prins 等提出一种能跟踪主动磁力轴承动态特性的基于电流的测力系统及相关技术和算法,测力原理基于简化磁路推导出的力方程,考虑到功率损耗带来的误差,他们对磁路理论计算进行了修正^[104]。

在考虑磁力轴承的涡流损耗、磁滞效应、非线性磁导率方面,T. Yoshimoto 建立了第一个涡流损耗的分析模型,此模型假设针对一个实心转子而且忽略了磁滞效应^[105]。R. B. Zmood 等推导了包含一阶模型的非旋转涡流对控制系统影响的传递函数^[106]。Rockwell 等在考虑定子的实际结构的情况下给出了 8 极磁力轴承涡流损耗的有限元计算模型^[107-108]。Hebbale 等推导出了实心转子磁力轴承在假定磁极中磁感应强度分布不随旋转而变化时,气隙和转子内电磁场的解析解^[109]。孙岩桦等采用了 Yoshimoto 的模型,给出了转子、气隙和定子内电磁场的解析解,并在此基础上计算了涡流损耗^[110]。曹广忠等提出了实心转子磁力轴承系统的磁场分布模型,给出了相应径向力和切向力的计算公式,以实际系统为例进行了相应计算和损耗分析,并在实际系统上进行了实验^[111]。考虑涡流和磁滞效应,Nobuyuki Kurita 等设计了具有平滑磁通分布的无损耗磁力轴承^[112]。T. Yoshimoto 研究了非线性磁导率对磁力轴承磁力和反力矩的影响^[113]。

在磁力轴承的结构设计和整体性能预测方面,Gorazd Stumberger 等使用微分评估方法对径向轴承进行了优化,使用二维有限元方法确定了矢量磁势的非线性解。使用麦克斯韦应力张量法计算了磁力,推导出了作为控制电流和转子位移函数的力、电流增益以及位移刚度^[114]。Lyndon S. Stephens 等针对定子开槽和转子偏心的圆柱形磁激励器,提出了一种计算气隙瞬时磁场分布的解析方法,获得的磁场分布可以用来预测激励器的性能^[115]。Zuoxing Yang 等对高速磁力轴承磨削主轴的全局线性化和微集成进行了理论分析和实验研究,分析

了工作点变化对性能的影响^[116]。Jiang 和 Li 提出并探讨了使用恒定磁通之和的方法对磁悬浮转子系统进行全局线性化,这种方法能通过直接磁通控制实现^[117-118]。Aenis 和 Knopf 等基于电流和位移的模型使用霍尔探头研究与磁力轴承离心泵运行有关的频率响应函数^[119-120]。Torbjorn A. 等开发了一种径向同极感生轴承,而且使用三维有限元软件进行了分析^[121]。顿月芹等对转子磁体永磁偏置混合磁轴承的磁场分布进行了三维有限元分析^[122]。王澄泓和汪希平等对电磁推力轴承进行了磁场分析及磁路概念设计^[123]。

对所引文献进行归纳总结发现:在磁力轴承电流—力—位移关系的研究中,部分研究者使用磁路方法或有限元方法对电磁力进行了计算和实验验证;部分研究者对磁力轴承运行过程中的涡流、磁滞等导致的损耗、反力矩、感生电磁场等问题进行了理论分析,有些也进行了实验验证;部分研究者从磁路或电磁场的角度对磁力轴承的结构设计和总体性能预测进行了研究。然而,上述研究都是对磁力轴承电磁场相关的某一个问题的展开讨论,存在一定的局限性:①在理论分析中,对磁力轴承电磁场的空间分布研究多使用二维有限元方法,忽略轴向分布;仅少数研究者进行了三维有限元计算,但忽略磁性材料的非线性磁导率和磁饱和;少数研究者使用线性解析法和有限元法计算了转子旋转条件下的磁力、反力矩和功率损耗等,但未考虑漏磁、磁性材料导磁性能等非线性因素。②仅少数研究者对磁力轴承的磁力、刚度、功率损耗进行了测量,但均没有对磁力轴承电磁场的空间分布和变化进行系统的测量。

1.4 磁力轴承电磁场研究的项目支撑与主要工作

磁力轴承电磁场研究得到国家自然科学基金项目“车载飞轮电池磁悬浮转子的基础理论及关键技术研究”(项目编号:50675163)和“基于光纤光栅传感的磁力轴承磁场分布式在汉监测”(项目编号:51105285)的支撑。

磁力轴承电磁场研究项目主要进行了以下研究工作:

第2章针对磁力轴承转子悬浮和旋转这两种典型运行状态,推导了磁力轴承电磁场的偏微分方程,界定了电磁场的边界条件,并阐述了使用有限元方法求解磁力轴承电磁场边值问题进行的原理、方法和步骤。

第3章以8极径向磁力轴承为例,使用三维非线性有限元方法计算了磁力轴承静态电磁场的空间分布,重点分析了铁磁材料的 BH 曲线、磁饱和、漏磁、磁耦合等非线性因素对磁力轴承关键性能参数—气隙磁通密度和磁力的影响。

第4章构建了径向磁力轴承实验装置电磁场测量平台,使用三通道高斯计

测量了不同线圈电流、不同磁耦合形式等条件下的径向磁力轴承实验装置的磁通密度,获得实际的电磁场分布,使用磁通密度实测值对磁力轴承电磁场三维有限元模型进行了修正。

第5章对磁力轴承的旋转电磁场进行了二维非线性有限元计算,针对磁力线分布、气隙磁通密度、悬浮力、拖曳力和功率损耗等问题,分析了磁力轴承旋转电磁场的分布和变化规律;同时使用解析法对磁力轴承的旋转电磁场进行了计算,并将旋转电磁场的有限元解与解析进行了对比分析。

第6章提出将光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)应用于磁力轴承的气隙磁通密度测量方案,设计开发了磁力轴承 FBG 磁场传感装置,分析了其传感机制和测量原理。构建了磁力轴承 FBG 气隙磁通密度在线测量系统,能够实现气隙、转速和线圈电流的调节,模拟磁力轴承的工作状态,在非接触条件下在线监测磁力轴承气隙磁通密度的变化。

第7章针对磁力轴承的静磁场和旋转电磁场,在转子静止和旋转两种状态下,使用 FBG 磁场传感装置测量了不同线圈电流、不同气隙和不同转速条件下的磁力轴承气隙磁通密度,并将实测结果与有限元计算结果进行了对比分析。

第8章对磁力轴承电磁场研究进行了总结与展望。