



Y1837177

磁力驱动泵传动效率的研究与分析

Research and Analysis on Transmission Efficiency of Magnetic Drive Pump

专业名称: 化工过程机械

指导老师: 袁丹青 副教授

姓 名: 李建萍

2010 年 12 月

摘 要

磁力驱动泵是将现代磁学原理和新密封技术应用于普通离心泵而发展起来的一种新型泵,它利用磁力联轴器实现扭矩的无接触传递,彻底解决了传动轴处的泄漏问题,达到完全无泄漏的效果,因而广泛应用于核工业和化工等特殊行业中。近年来随着计算机技术的发展,磁力驱动泵的研究取得了一些理论成果,但仍然存在一些技术难题,如寻求精确的磁路求解法、涡流问题、高温问题、监控问题、滑动轴承和磁钢材料等限制了磁力驱动泵的应用。

本文从磁力驱动泵的发展现状及研究特点出发,针对磁力驱动泵的传动效率问题,应用电磁场有限元分析技术,对不同永磁体排列方式的磁力联轴器内部磁场和涡流场进行研究分析,为高效磁力泵的设计与研究提供一定的理论基础。本文主要工作和结论如下:

1. 总结磁力驱动泵的发展历史及研究现状并进行简要分析,确定了基本研究路线;阐述了磁力联轴器传动的工作原理、应用特点以及磁力驱动泵在发展过程中亟需解决的主要问题。

2. 分析磁力驱动泵特有的各项能量损失产生的原因、影响因素以及控制方法;总结各项能量损失功率常用的计算方法及工程上常用的计算公式,为分析和控制磁力联轴器隔离套中涡流损失提供理论依据。

3. 利用 AutoCAD 软件设计磁力联轴器上不同永磁体的排列方式,采用 ANSYS 软件分析不同永磁体排列方式形成的磁场特点,其中 Halbach 阵列永磁体具有很好的单边聚磁特性,故将其应用于磁力联轴器中以提高工作气隙中的磁场强度。

4. 基于 Maxwell 方程组,利用 ANSYS 对不同永磁体排列方式的磁力联轴器建立二维分析模型,对其工作气隙磁场进行求解计算。分析研究磁力线、磁场强度以及隔离套中的涡流分布特点;计算不同永磁体排列方式的磁力联轴器的传动转矩值并进行对比分析,结果表明 Halbach 型磁力联轴器传动转矩较普通排列明显提高;分析不同转角差、隔离套相对磁导率、工作气隙厚度、永磁体厚度和轭铁厚度对传动转矩的影响。

5. 利用 ANSYS 对磁力联轴器的涡流场进行瞬态分析,计算不同永磁体排列方式的磁力联轴器中涡流损失功率的大小;分析隔离套的厚度、半径、电阻率、相对磁导率以及磁转子转速对涡流损失功率的影响。

关键词: 磁力驱动泵, Halbach 阵列, 气隙磁场, 转矩, 瞬态分析, 涡流损失, 有限元分析

ABSTRACT

Magnetic drive pump is a new type of pump, combining modern magnetic theory and new sealing technology in common centrifugal pump. It uses magnetic coupling to transfer torque non-connect and to solve the problems of leakage caused by pump with shaft seal, so it is widely used in nuclear, chemical and other special industry. In recent years, with the development of computer technology, some theoretical results of magnetic pump have been gained. But there are still some technical problems discouraging the application of magnetic drive pump, such as the method of solving magnetic circuit accurately, eddy current, high temperature, monitoring, the materials of bearings and magnets, etc.

The current situation and characteristics of magnetic drive pump were reviewed. Aiming at the transmission efficiency, the magnetic field and eddy current of magnetic coupling with different arrangement of permanent magnets were analyzed, using electromagnetic finite element analysis technology. This will provide basic theory for the research of high-efficiency magnetic pump. The main work and results of this research are as follows:

1. The development and research situation of magnetic drive pump were summarized and analyzed briefly, and the specific research program was identified by analysis. The characteristics and basic principle of magnetic coupling were described. The main problems which need to be solved in the develop-process were pointed out.

2. The causes, influential factors and control methods of magnetic drive pump's specific energy loss were analyzed. The methods of calculating energy power loss were summarized and common formulas for eddy current power loss which used in engineering were introduced. All of these formulas provided theoretical basis for the analysis of eddy current of magnetic coupling.

3. The arrangement of permanent magnets of magnetic coupling was designed by AutoCAD. We analyzed the magnetic field characteristics of permanent magnets with different arrangement by ANSYS software. In order to improve magnetic field intensity, the Halbach array was applied to magnetic coupling.

4. Based on the Maxwell equations, the 2D analytical models of magnetic coupling with different arrangement of permanent magnets were established by ANSYS. The air-gap magnetic

field was calculated. Then the distribution of magnetic force lines, magnetic field intensity and eddy current of isolating shell were analyzed. The torque of magnetic coupling with different arrangement of permanent magnets was calculated. Compared with the coupling with traditional magnet arrangement, the coupling with Halbach array has a significantly improved torque. The impacts of angle deviation, air-gap, relative permeability of isolating shell, and thickness of permanent magnets and yoke irons on the transmission torque were analyzed.

5. Transient analysis of eddy current field in the magnetic coupling was carried out. Then the eddy current power loss of magnetic coupling with different arrangement of permanent magnets was calculated. The influences of the thickness, radius, resistivity, relative permeability of isolating shell and the speed of magnetic rotor on the eddy current power loss were analyzed.

Key words: magnetic drive pump, Halbach array, air-gap magnetic field, torque, transient analysis, eddy current loss, finite element analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景、目的及意义	1
1.2 磁力驱动泵简介	2
1.2.1 磁力驱动技术	2
1.2.2 磁力驱动泵及其工作原理	3
1.2.3 Halbach 阵列概述	6
1.3 磁力驱动泵的研究现状	7
1.3.1 国外研究现状	7
1.3.2 国内研究现状	9
1.4 本文研究的主要内容	10
第二章 磁力驱动泵能量损失的理论分析	12
2.1 磁力驱动泵的涡流问题	12
2.1.1 涡流的产生及其影响	12
2.1.2 涡流损失功率的计算	13
2.1.3 涡流损失的影响因素	16
2.2 内磁转子的水力摩擦损失与计算	17
2.3 冷却润滑流道的能量损失	19
2.4 小结	21
第三章 磁力联轴器气隙磁场的有限元分析	22
3.1 永磁体空间磁场的计算	22
3.1.1 麦克斯韦方程组	22
3.1.2 等效面磁荷模型	24
3.1.3 等效面电流模型	25
3.2 磁转矩的计算	26
3.2.1 高斯定理求解法	26
3.2.2 经验公式求解法	27
3.3 有限元分析简介	28
3.4 气隙磁场的有限元分析	29

3.4.1 二维磁场有限元分析模型	30
3.4.2 结果与分析	34
3.4.3 各结构参数对传动转矩的影响	45
3.5 小结	49
第四章 磁力联轴器涡流场的有限元分析	51
4.1 磁力联轴器涡流概述	51
4.2 涡流场有限元分析简介	51
4.2.1 发展现状	51
4.2.2 控制方程	52
4.3 磁力联轴器二维涡流场的有限元分析	54
4.3.1 二维涡流场有限元分析模型	54
4.3.2 计算结果与分析	56
4.3.3 参数对涡流损失功率的影响	59
4.4 小结	64
第五章 总结与展望	65
5.1 全文工作总结	65
5.2 工作展望	66
参考文献	68
致 谢	72
攻读硕士学位期间发表的学术论文	73

第一章 绪论

1.1 课题研究背景、目的及意义

1943 年,英国学者 Charles 和 Geoffrey Howard 为解决化工泵在输送危险介质中的泄漏问题,设计并制造了世界上第一台磁力驱动泵^[1-2]。磁力驱动泵利用磁力联轴器代替传统联轴器,实现了力和转矩的无接触传递,彻底解决了机械传动泵“跑、冒、滴、漏”的问题,达到了完全无泄漏的效果。自从美国颁布空气洁净法令,把传统密封泵列为世界上最大的污染源之一以来,国内外学者更加大了对磁力驱动泵的研究并在理论研究方面取得一定的成果。20 世纪 90 年代永磁材料以及磁力传动技术等新科技的发展,在一定程度上促进了磁力驱动泵的发展并被广泛应用于冶炼、石化、医药、塑料、食品、核工业以及污水处理等行业中。

为了满足现代化生产和石油化工公司成套设备向大型化发展以及各种生产的需要,国外磁力驱动离心泵的设计朝着微型化和大型化两个方向发展,二者都着力解决寿命、高效、安全可靠等技术难题^[3]。我国的磁力驱动泵技术起步较晚,但随着科学技术和工业化程度的进一步发展,对磁力驱动泵的要求也越来越高。目前,磁力驱动泵进一步发展的关键问题是如何提高泵的可靠性及其效率,降低泵的生产成本。我国泵行业现阶段的技术水平及配套能力,已经具备了保证磁力驱动离心泵能够可靠运行的设计水平和制造能力,但是关键的问题是如何提高磁力泵的效率^[4]。

本课题主要是研究如何提高磁力驱动泵的传动效率,在研究中应用钕铁硼材料的高剩磁以及高矫顽力的特点,同时将高聚磁排列方式 Halbach 阵列应用到磁力驱动泵中以提高工作气隙磁密进而提高磁力驱动泵的传动转矩。研究分析了不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩值以及金属隔离套上的涡流损失大小,并将结果进行对比分析,为高效磁力泵的设计与制造提供理论依据。

研究的意义在于,将 Halbach 阵列应用于磁力驱动泵并利用 Halbach 阵列的单边聚磁特性来提高磁力泵工作气隙中的磁场强度,进而提高磁力驱动泵的传动转矩,使得高转矩、超高转矩磁力驱动泵的研究与制造成为可能,以满足现代工业领域对磁力驱动泵高转矩的要求;通过对磁力驱动泵功率损失的研究,分析磁力驱动泵特有的各项能量损失,探讨提高磁力驱动泵传动效率的途径,有助于高效磁力泵的设计与制造,并对其进行合理的动力系统匹配,进而降低磁力驱动泵的生产成本,为企业创造更大的经济效益,提高能源利用

率,扩大磁力泵在各个行业中的应用,减少环境的污染,这也是满足 21 世纪制造生态环保、与人友好绿色产品的要求。

1.2 磁力驱动泵简介

1.2.1 磁力驱动技术

磁力驱动技术是永磁耦合驱动技术的简称,是指在外力作用下,以现代磁学的基本理论为基础,利用传动机构中主、从动极上安装的永磁材料产生的磁耦合力带动从动轴实现动力和转矩传动的一种新兴驱动技术^[5]。实现这一技术的装置称为磁力驱动器、磁力耦合器、磁力联轴器等。

1. 磁力驱动技术的应用特点

磁力驱动技术被提出以来,由于零泄漏的特性使其在防止泄露、减少污染、节约能源等方面有着突出的优点,因而被广泛应用于对密封有特殊要求的工业领域中,其应用的主要特点^[2]有:

- (1) 将轴传递动力的动密封转化为静密封,实现动力的无接触传递和输送介质的零泄漏;
- (2) 可避免振动传递,实现工作机械的平稳运行;
- (3) 实现工作机械运行中的过载保护;
- (4) 与刚性联轴器相比,安装、拆卸、调试、维修均较方便;
- (5) 可实现直线运动、旋转运动及直线运动与旋转运动的螺旋型复合运动;
- (6) 净化工作环境,消除污染,实现文明生产。

磁力驱动技术发展的时间不长,在实际应用中还存在的一些问题,主要有:永磁体磁场的存在干扰周围的环境;磁力联轴器在起动过程中易产生滞后现象;与接触式密封装置相比较,传动效率相对降低。

2. 磁力驱动与机械驱动^[4]

磁力驱动不同于机械驱动,它向传动部件传递力和转矩时,与输送介质相接触的动力传递轴不与外界空间相连通,而是利用磁场透过磁路工作间隙或隔离套的薄壁传递力和转矩。如磁力驱动泵和磁力驱动搅拌反应釜,采用磁力驱动密封装置后取消了传统泵、釜采用的轴为接触式的动密封装置,将轴与机体的动密封转化为隔离套与机体的静密封,达到理想的密封效果,从根本上消除了转动轴密封处所产生的泄漏,解决了工业用泵、釜等设备一直存在的“跑、冒、滴、漏”和机械密封发热、磨损等一系列问题,为安全可靠输送

或搅拌反应有毒、易燃、易爆、腐蚀及各种贵重介质创造了条件。

1.2.2 磁力驱动泵及其工作原理

磁力驱动泵是应用磁力驱动和新型密封技术而设计的一种新型离心泵。因其采用磁力联轴器,工作时与叶轮相连的从动轴不需要伸出泵体外部,变动密封为静密封,彻底解决了普通泵传动轴处“跑、冒、滴、漏”的问题,广泛应用于输送贵重、有毒、易爆或放射性较强的物质^[6]。因此,磁力驱动泵被誉为是化工行业输送危险介质“最安全的解”。

1. 磁力驱动泵结构

磁力驱动泵主要是由泵体、磁力联轴器、电动机三部分组成。当电动机带动外磁转子旋转时,磁场能穿透空气隙和隔离套,带动与叶轮相连的内磁转子作同步旋转,实现动力的无接触传递,将动密封转化为静密封。由于泵轴、内磁转子被泵体、隔离套完全封闭,实现了输送介质的零泄漏,消除了石油化工业易燃、易爆、有毒、有害介质通过泵密封处泄漏的安全隐患^[7]。图 1.1 是常用磁力驱动泵的结构示意图。

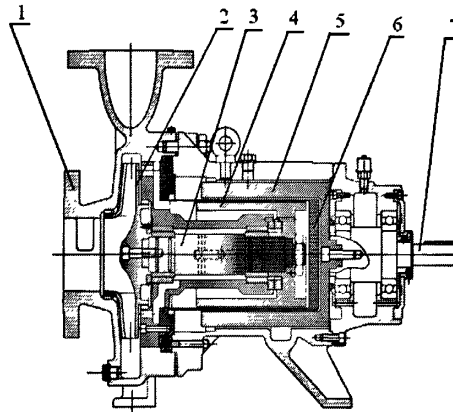


图 1.1 磁力驱动泵结构示意图

1.泵体; 2.叶轮; 3.从动轴; 4.内磁转子; 5.外磁转子; 6.隔离套; 7.主动轴

Fig.1.1 Schematic diagram of magnetic drive pump

磁力联轴器是磁力驱动泵的重要部件,主要由外磁转子、内磁转子和隔离套三大部件组成,在内磁转子外表面和外磁转子内表面上均设置有按一定方向充磁的均匀排列的永磁体。通常外磁转子与电动机直接相连并处在大气中,内磁转子与泵轴相连为一个整体,被包容在泵体与隔离套形成的密闭空间内并浸没在输送介质中^[8]。

2. 磁力驱动泵类型及结构特点^[4]

磁力驱动泵的结构类型按照磁力驱动器的形式可分为两种,即圆盘形和圆筒形,如图 1.2 和图 1.3 所示。其中,磁力驱动离心泵圆筒形结构的优点是结构简便,适用性好;大

功率发展可靠性好；轴向作用力小，径向力可调节到较小状态。圆盘形结构的优点是简单可靠，使用方便；轴向作用力较大，除特殊情况外不易向大功率方向发展。

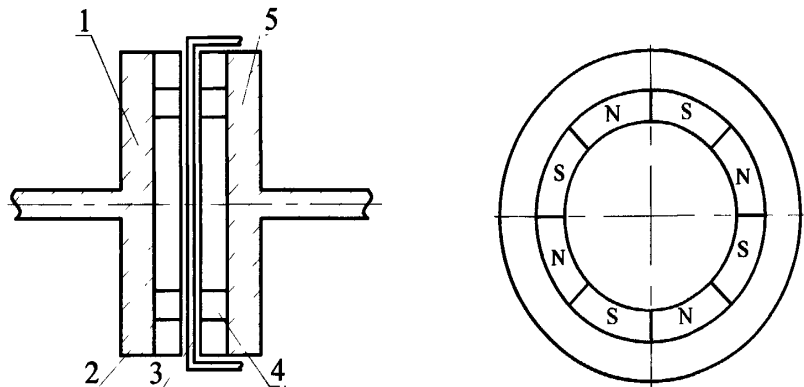


图 1.2 圆盘式磁力联轴器结构示意图

1.外磁转子；2.外磁转子用永磁体；3.隔离套；4.内磁转子用永磁体；5.内磁转子

Fig.1.2 Schematic diagram of the basic structure of disc-type magnetic coupling

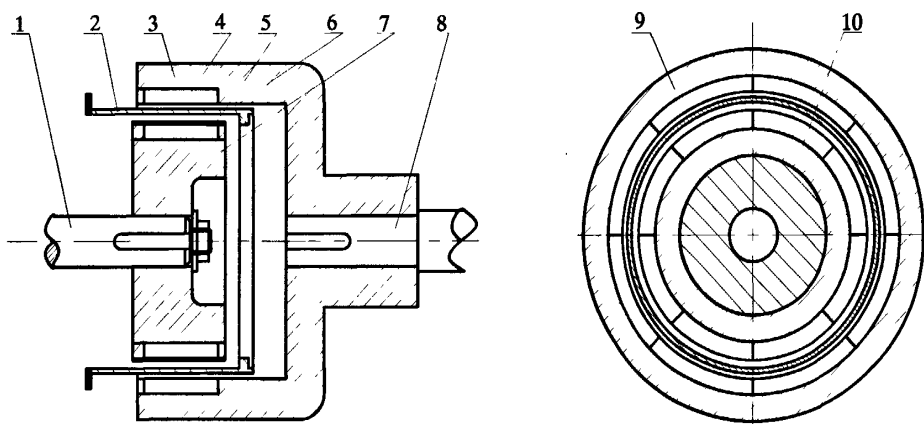


图 1.3 圆筒式磁力联轴器结构示意图

1.从动轴；2.隔离套；3.外磁转子；4.外磁转子用永磁体；5.内磁转子用永磁体；
6.工作气隙；7.内磁转子；8.主动轴；9.外轭铁；10.内轭铁

Fig.1.3 Schematic diagram of the basic structure of cylindrical magnetic coupling

按照泵腔内内磁转子与叶轮的支撑方式，圆筒形磁力驱动泵结构可分为两类，一类是定轴式磁力驱动泵，轴两端支撑不做旋转运动，内磁转子与叶轮一体作为旋转部件；另一类为动轴式磁力驱动泵，内磁转子、叶轮与轴为一体，轴的两端用轴承支撑整体作旋转运动。其中动轴式磁力驱动泵从外形上看又可分为两种，一是电机与外磁转子直接相连，泵结构紧凑、体积小，适合于小功率（小于等于 45kW）磁力驱动泵；二是电机与外磁转子的轴承支撑架相连，外磁转子安装在轴承支撑悬架上，悬架的法兰端与泵体相连，轴与电机相连，这种泵稳定性好，体积相对较大，结构复杂，适合用于大功率（大于 45kW）磁

力驱动泵。

按照泵轴在泵体内的位置可分为立式和卧式两种；按照压出室的形式、吸入方式、叶轮级数以及不同的使用条件等方面，可将磁力驱动泵分为涡旋式及离心式等多种形式。目前，磁力驱动离心泵的应用范围最为广泛，而其他类型的泵正在使用或生产过程中。

磁力驱动泵是磁力驱动技术和离心泵的结合体，是一种新型离心泵，其结构特点主要有：以静密封代替动密封，彻底解决普通泵的泄漏问题；由于输送的介质多为强酸强碱等强腐蚀性流体，泵体内所有零部件均采用抗腐蚀的特殊材料；泵内金属隔离套在交变磁场作用下产生涡流热，如不及时冷却会损坏磁力联轴器；传递振动小，噪声小；过载保护等。

3. 磁力驱动泵面临的主要问题

目前，磁力驱动泵发展过程中亟需解决的主要问题^[4]有：

（1）磁场强度的有限元计算

目前计算磁力联轴器传动转矩值多采用实验方法或者是半理论半经验公式法，这样计算出的转矩误差较大，往往采用加大安全系数来保证其使用的安全性，结果多耗费了材料。

（2）轴承的寿命

大型磁力驱动泵的使用表明其不成功或不可靠的主要原因是轴承。轴承采用的润滑剂是被密封的工艺流体，在真空中则没有润滑功能。制造滑动轴承所用的材料必须具有耐腐蚀、耐磨损和自润滑的功能。

（3）高温问题

由于永磁材料磁性能的限制，钕铁硼的工作温度在 150°C 以内，钕钴的工作温度可达 300°C 。超出此极限，材料的磁性能就会下降，因此必须采用冷却措施。现在新发展的涡流型磁力联轴器，内磁转子采用鼠笼式结构，避免了高温流体与永磁材料的直接接触，可使得工作温度高达 450°C 。

（4）监控问题

目前，磁力驱动泵在应用中存在的主要问题是大中型磁力驱动泵的传动缺乏安全可靠，滑动轴承寿命低、易磨损，磨损后间隙增大，导致内外永磁体与隔离套碰撞而退磁，如不及时停机，后果不堪设想。今后的设备都应配置检测控制系统，一旦发生磨损、磨蚀以及温度过高等问题，由传感器发出的信号经放大发送到控制开关，控制系统就会自动报警或停机。

（5）涡流问题

金属隔离套在交变磁场中产生感应电流，感应电流在隔离套内自行封闭，形成的涡流

将产生大量的热量。涡电流产生的交变磁场与原磁场方向相反，削弱原磁场的磁场强度，使得传动的转矩减小，机器的传动效率降低。因此，准确得计算涡流损失功率的大小，采取有效措施减小涡流强度值，可使得磁力传动的效率大大提高。

1.2.3 Halbach 阵列概述

1979 年，美国劳伦斯伯克利国家实验室的物理学家 Klaus Halbach 博士提出了一种新型的永磁体结构—Halbach 阵列^[9]。这种阵列完全用稀土永磁材料组成，通过将不同充磁方向的永磁体按照一定规律排列，使磁力线在永磁体一侧汇聚，而在另一侧削弱，进而获得理想的单边磁场^[10]。随后，Halbach 阵列被广泛应用于大型粒子加速器、自由电子激光装置、真空设备等高能物理领域^[11]和高速电机、高精度伺服电机、直线电动机、多自由度电机、磁悬浮列车系统、磁轴承、医学领域^[12]。常用的 Halbach 阵列有两种形式：直线形 Halbach 阵列和环形 Halbach 阵列，其中直线形 Halbach 阵列是最基础的阵列形式，是径向阵列和切向阵列的组合物，主要应用于直线电机中；环形 Halbach 阵列则可视为由直线形 Halbach 阵列弯曲首尾相接而形成的圆环形状。图 1.4 示出环形 Halbach 阵列示意图，理想的 Halbach 阵列能够产生理想的正弦交变磁场。

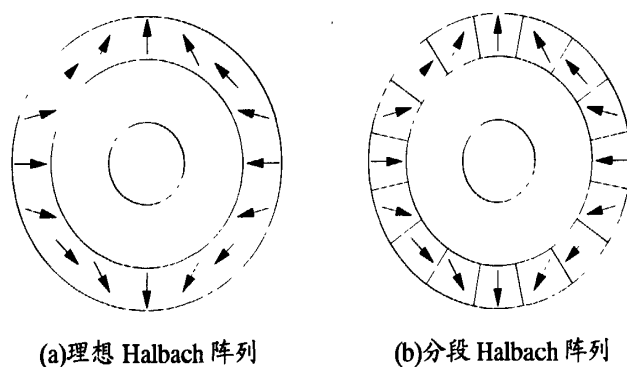


图 1.4 Halbach 阵列示意图

Fig.1.4 Schematic diagram of Halbach array

实际应用中，由于理想 Halbach 阵列充磁比较麻烦且不易实现，常采用将离散的磁块拼接在一起近似为理想 Halbach 阵列，即分段的 Halbach 阵列。Halbach 阵列常见的分段形式有三种^[13]：每极两段的 Halbach 阵列(Halbach(2))、每极三段的 Halbach 阵列(Halbach (3))、每极四段的 Halbach 阵列 (Halbach (4))。图 1.5 为常见的分段式直线型 Halbach 阵列永磁体充磁方向示意图。

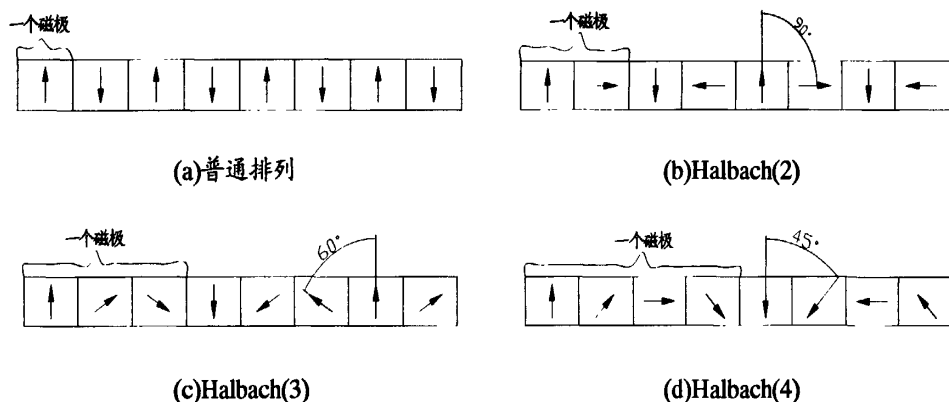


图 1.5 常见永磁体充磁方向

Fig.1.5 Magnetization direction of common permanent magnet

图 1.6 是永磁体为普通排列与分段式 Halbach 阵列的环形磁场分布图。从图中可以明显看出：永磁体为普通排列时的环形磁场关于永磁体呈两端对称分布，而 Halbach 阵列磁场则呈现其“磁单极子”特性，即永磁体一侧的磁场增强而另一侧的磁场减弱，且永磁体每极分段数越多，其单边聚磁效应就越好，越接近理想状态，这就是环形 Halbach 阵列所形成磁场的特点。将 Halbach 阵列应用在磁力驱动泵中，利用其良好的单边聚磁特性来增强磁力联轴器工作气隙中的磁场强度，从而增强磁力驱动泵的传动特性。

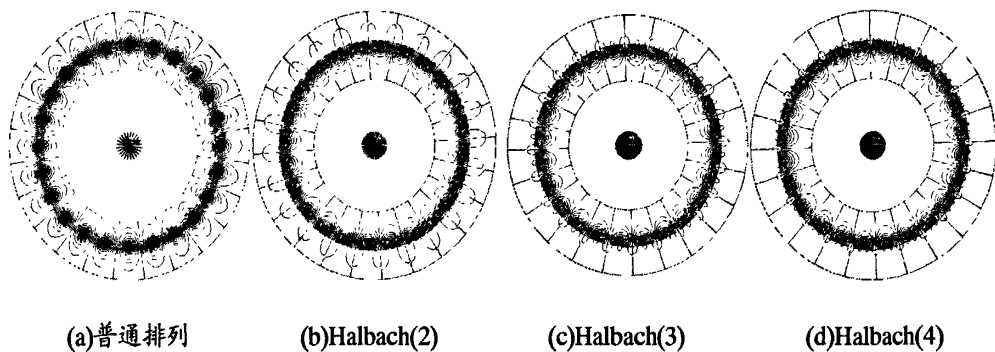


图 1.6 环形磁场分布图

Fig.1.6 Distribution of circular magnetic field

1.3 磁力驱动泵的研究现状

1.3.1 国外研究现状

早在 20 世纪 30 年代，人们就已经提出磁力驱动技术。但由于当时对这一技术缺乏足够的认识以及受永磁材料发展局限性的制约，这一时期虽然对磁力驱动技术进行过很多的实验研究，但终没有取得太大进展。1943 年，英国学者 Charles 和 Geoffrey Howard 首次

提出采用磁力驱动泵来解决输送危险介质泵的泄漏问题,并获得首项发明专利。1950年,英国 HMD 公司将第一台无填料密封的磁力驱动泵交付使用^[14-15]。从此,磁力驱动泵正式登上了工业发展的历史舞台。英国的卜门化学工业公司和德国的拜尔公司率先使用了磁力驱动泵。在随后的 30 年里,无泄漏磁力驱动泵的应用范围很有限,主要用于泵送对生命有威胁的或极其危险的流体介质。当时,由于这类泵的价格很高,以及某些出现在市场上的不成功或不可靠产品的不良影响,许多人认为是在不得已时才使用磁力驱动泵^[16]。20 世纪 70 年代随着现代工业由资源型向技术型转化,人类环保意识的提高以及稀土永磁材料磁性能的提高,使得磁力驱动泵迅猛发展并逐渐扩展了其应用范围^[17]。

国外生产磁力泵的厂家主要有英国 HMD 无密封泵公司、Totton 泵公司、Hilge 泵公司,美国 Goulds 泵公司,日本 Lwaki 公司,德国 Klaus Union 公司、Sihi 公司等^[18-19]。其中,英国 HMD 泵公司作为磁力驱动泵研究开发的先驱,其产品代表着目前磁力驱动泵的发展极限^[20]:流量达 $1150\text{m}^3/\text{h}$,扬程达 1000m ,介质的温度范围是 $-120^\circ\text{C}\sim 450^\circ\text{C}$,功率达 450kW ,粘度极限为 $100\sim 200\text{cP}$,固体颗粒含量达 1.5% (质量比重),磁力联轴器效率为 $85\sim 95\%$ 。

磁力驱动泵的传动效率是伴随着磁力驱动技术的发展以及永磁材料磁性能的改善而不断提高和发展的。图 1.7 是不同永磁体材料在不同时期磁效率的对比图,从图中可以明显看出永磁材料在不同时期的发展及其磁效率的提高。世界上第一台用于工业生产的磁力驱动泵采用铝镍钴磁体,因其功率传动效率较低而需安装一个软起动装置^[16]。但随着材料磁性能的提高,磁力驱动泵的传动效率得到增强,其结构也在一定程度上得到简化。

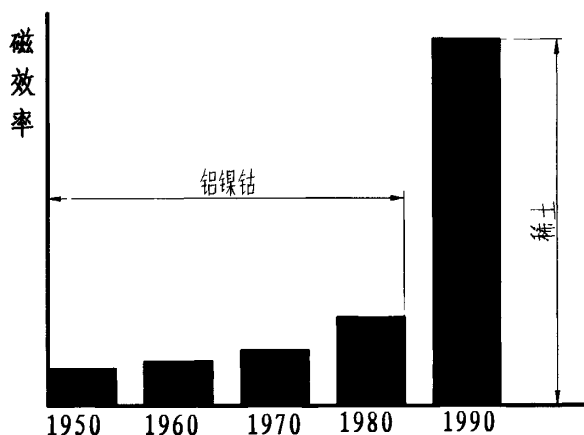


图 1.7 磁效率的提高示意图

Fig.1.7 Schematic diagram of magnetic efficiency

1966 年,美国学者 K.Ojima 等人研制出 SmCo_5 粉末粘结永磁材料,最大磁能积约为 5.1MJGOe ,成为第一代稀土永磁材料诞生的里程碑^[21]。

1977年,日本学者 T.Ojima 等人研制出 $\text{SmCoCuFeZr}_{7.2}$ 永磁材料,标志着第二代稀土永磁材料的诞生,钐钴合金的应用使得磁力传动部件的传动效率提高了约 3~4 倍^[22]。

1983年,日本住友公司和美国通用公司分别研制出磁能积高达 36.5MGOe 钕铁硼永磁材料,标志着第三代稀土永磁材料诞生^[23]。

R.M. Hornreich 和 S. Shtrikman^[24]对同步传动的磁力联轴器做了优化设计。

M.N. Nargrial^[25]对使用高性能永磁体的磁力联轴器进行了优化设计。

M.J. Schroder^[26]对磁力联轴器的设计方案进行优化。

C. Ferreira 和 J. Vaidya^[27]用二维和三维有限元法分析磁力耦合传动转矩。

W. Wu, H.C. Lovatt 和 J.B. Dunlop^[28]用三维有限元模型分析磁力联轴器并进行优化设计,旨在获得磁力联轴器选用最小体积的磁性材料。

Yeong-Der Yao, Gwo-Ji Chiou, Der-Ray Huang 和 Shyh-Jier Wang^[29]研究分析了圆盘式磁力联轴器不同磁极数对耦合转矩的影响。

1.3.2 国内研究现状

我国的磁力驱动技术起步较晚,开始于上世纪八十年代。甘肃省科学院磁性器件研究所是国内最早开展磁力驱动泵研制的单位之一,现已成功研制出稀土钴磁力联轴器和磁力驱动泵的系列产品,其技术水平在某些方面已达到国际先进水平^[4]。20世纪80年代我国著名的磁学专家李国坤教授在国际上率先提出了组合拉推磁路理论^[30],并得到广泛认同。现研发的新型组合拉推式稀土钴磁力联轴器和磁力驱动设备,已经投入大批量生产并广泛应用于许多工业部门中。1989年温州工科所等5家泵厂组建南方磁力泵联营公司,生产18.5kW以下的耐腐蚀系列泵产品。1992年沈阳水泵厂设计制造 CIH 系列磁力泵,共有29个规格,流量为 2~460m³/h、扬程为 3.5~150m、电机功率在 100kW 以下、工作温度小于 250℃^[31]。到目前为止,我国生产的磁力驱动泵最大功率为 185kW,流量为 560m³/h,扬程为 56m^[32]。2009年,安徽卧龙泵阀有限责任公司成功研制出国内首台氟塑料自吸式磁力泵——ZMD 系列自吸式磁力泵,该泵内部的过流部件完全采用高效耐腐蚀的氟塑料制成,彻底消除了一般磁力泵易产生磁涡流的不良现象^[33]。

1978年,严可镜进行磁力耦合式高压反应釜的研制^[34],1981年通过技术部鉴定并生产^[35],在此基础上还设计出高温高压磁力反应釜。

1988年,叶子兆^[36]对磁力驱动离心泵的磁路进行设计与计算。

1995年,卢东^[37]阐述了圆筒形同轴式磁力联轴器的结构原理,提出在磁力联轴器设

计过程中应注意的若干因素。

1995 年, 陈志刚^[38]从气隙磁场的分析出发, 探讨了磁力联轴器传动转矩的计算方法。

1999 年, 施卫东和魏东^[39]提出了设计磁力驱动装置结构、磁路、隔离套的新方法, 并对磁力传动转矩进行了分析与计算。

1999 年, 赵德成^[40]描述了磁力联轴器的结构及其磁钢在圆周方向的紧密排列方式, 列举出可供选用的磁性材料并提出磁力联轴器在使用过程中应注意的若干问题。

2001 年, 刘建瑞^[41]介绍了化工泵磁力耦合传动的结构原理, 以及磁性材料的选择、磁钢形式与磁转矩的计算, 对磁力耦合传动器的设计具有一定的指导意义。

2001 年, 李廷占^[42]在推导出磁力联轴器磁力矩公式的基础上对磁力联轴器的各主要部分进行各种因素的分析比较, 提出优化设计思路, 解决了磁体长度与气隙长度之比、长径比、最大磁力矩与最短磁路、相对位移角和磁极张角的比率等问题。

2004 年, 窦新生、赵克中和徐成海^[43]对磁力驱动技术的磁路排列作了分析、对比, 提出了磁转矩设计计算的几种方法以及磁隙发生变化时在设计计算过程中对一些参数的修正问题。

2006 年, 孔繁余, 陈刚, 曹卫东等^[44]在磁路设计基本原理的基础上探讨了磁力泵磁力联轴器的磁场分布情况及磁转矩的影响因素。

2008 年, 张清^[45]在电磁场基本原理的基础上, 分别应用解析法和有限元法对圆盘式磁力驱动器的涡流损耗进行了分析。

从以上分析可以看出, 国内外学者对磁力驱动泵的研究主要集中在永磁材料的研制、磁力联轴器结构的优化设计、传动转矩计算及其影响因素等方面, 对不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动特性的研究很少, 尤其是对 Halbach 阵列应用于磁力泵的研究几乎为零。

1.4 本文研究的主要内容

随着工业的迅速发展和磁力驱动泵应用范围的扩展, 人们对磁力驱动泵传动转矩和力的要求越来越高。因此, 如何提高磁力驱动泵的传动转矩成为目前迫切需要解决的重要问题。本文主要以一台磁力驱动泵为研究对象, 利用 ANSYS12.0 中的电磁场分析模块, 分析将 Halbach 阵列应用于磁力驱动泵时的传动情况以及金属隔离套上涡流损失功率的大小, 并将计算结果与永磁体为普通排列时的磁力驱动泵的传动情况进行对比分析, 具体研究内容如下:

1) 根据电磁场和磁力驱动的基本理论, 研究分析磁力驱动技术和磁力驱动泵的工作原理;

2) 综述 Halbach 阵列的应用特点, 利用 ANSYS 软件分析分段式直线形和环形 Halbach 阵列的磁场分布情况;

3) 分析磁力驱动泵特有的各项能量损失产生的原因、影响因素及控制方法;

4) 建立圆筒式磁力联轴器磁场分析的有限元模型, 进行气隙磁场的有限元分析; 分析磁力联轴器各结构参数对工作气隙磁场的影响, 并将永磁体为普通排列方式的磁力联轴器传动转矩值与永磁体为 Halbach 阵列的磁力联轴器传动转矩值进行对比分析;

5) 建立磁力联轴器涡流损耗的模型, 利用 ANSYS 软件磁力联轴器金属隔离套上的涡流场进行瞬态分析, 计算金属隔离套涡流损失功率的大小, 并分析磁力联轴器各结构参数对涡流损失功率的影响; 将永磁体为普通排列方式的磁力联轴器的涡流损失功率与永磁体为 Halbach 阵列的磁力联轴器涡流损失功率进行对比分析, 从而证明 Halbach 阵列应用于磁力驱动泵的优势。

第二章 磁力驱动泵能量损失的理论分析

从磁力驱动泵的结构示意图可以看出：磁力驱动离心泵在结构上与普通离心泵有很大区别，除了由叶轮和泵体组成的水力部件外，还增加了磁力驱动装置以及由隔离套、内磁转子等组成的转子室、轴承支撑结构等。磁力驱动泵特有的结构就决定了其能量损失较普通离心泵大，工作效率低。对磁力驱动泵特有的能量损失进行分析与研究，准确的计算各项能量损失并进行合理的动力系统匹配是提高磁力泵效率、改善磁力泵传动性能的重要因素。

磁力驱动泵的能量损失除了具有普通离心泵的水力损失、容积损失和机械损失外，还增加了转子的惯性损失以及转子室中内磁转子与液体的摩擦损失、润滑冷却流道内液流的容积损失、摩擦损失和局部阻力损失，如果隔离套为金属材料，还会产生磁涡流损失等。目前，对磁力驱动泵中水力部件的能量损失的研究资料比较多，理论也比较成熟，此处就不在赘述。本章主要研究分析磁力驱动泵特有的能量损失，探讨提高磁力泵传动效率的途径。

2.1 磁力驱动泵的涡流问题^[4]

2.1.1 涡流的产生及其影响

磁力驱动泵正常工作时，电动机带动外磁转子旋转，通过磁力耦合作用带动与叶轮相连的内磁转子同步旋转，在内外磁转子间就会产生一个交变的旋转磁场。相对于该旋转磁场来说，处在内外磁转子之间的隔离套做切割磁力线的运动，若隔离套为金属材料，则必然会在隔离套表面产生自行封闭的环形感应电流，像水的漩涡一样，被称为磁涡流，如图 2.1 所示。

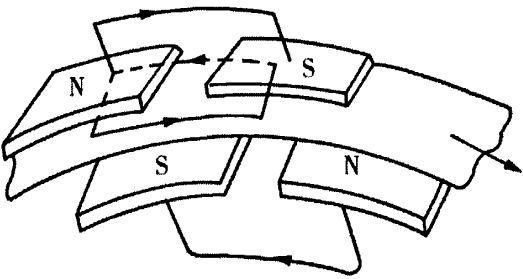


图 2.1 涡流的产生

Fig.2.1 Generation of eddy current

涡流产生的过程称为趋肤效应过程，一方面，感生电流产生的磁场与永磁体磁场方向

相反,产生反力矩,减弱了工作磁场的磁场强度,降低了传动转矩和力;另一方面,涡流损耗以焦耳楞次热的形式在金属隔离套上释放能量,消耗原动机的功率,降低泵的工作效率。磁力驱动泵正常工作时,采用金属隔离套密封的磁力驱动装置由于涡流的产生,会连续不断的释放热量,使内外永磁体的工作环境温度不断上升,当温度升高到某一额定温度值时,永磁体的磁性能随温度的继续升高而降低,磁力联轴器传动的力和转矩值也随之降低,进而影响磁力联轴器正常的运行工作。当温度升高到永磁材料的居里温度点时,永磁材料的磁性能将完全消失,磁力联轴器将完全失去工作作用。磁涡流损失功率一般占总功率损失的 5%~25%,是石油、化工等设备必须掌握和控制的技术问题^[46],也是最难克服和解决的技术难题。

2.1.2 涡流损失功率的计算

涡流的产生将会带来极大的危害,但是目前准确的计算涡流损失功率的数值非常困难。如果能够精确的把握隔离套内涡流损失的大小,就有可能比较准确的预测磁力泵的效率 and 合理的功率配套,并进行冷却系统的计算。因此,准确计算涡流损失的大小是发展高速、高压和高效磁力驱动泵的重要条件。下面简要介绍一种磁涡流损失功率的计算方法。

1. 模型与假设

①基本模型与参数

磁场与隔离套的基本模型如图 2.2 和图 2.3 所示,其基本参数包括隔离套轴向磁化长度 L (mm)、隔离套厚度 t (mm)、内外转子转角差 φ (rad)。

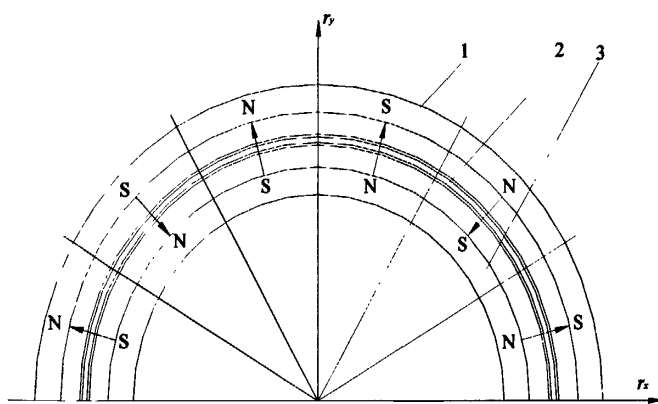


图 2.2 磁场基本模型

1.外磁转子; 2.隔离套; 3.内磁转子

Fig.2.2 Basic model of magnetic field

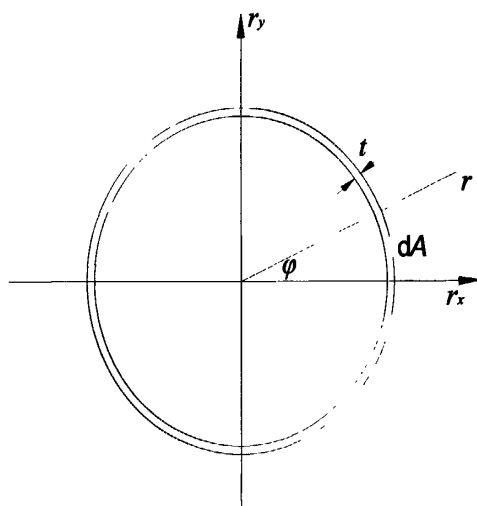


图 2.3 隔离套基本模型

t .隔离套壁厚度; φ .内外磁转子转角差; dA .单元的体积

Fig.2.3 Basic model of isolating shell

②假设条件

- a. 磁感应强度 $\vec{B}$ 沿 r 取向, 且在隔离套内随 θ 坐标变化, 即

$$\vec{B} = B_r \vec{r} \quad B_r = B_0 \cdot \sin \varphi$$

式中, B_0 为工作气隙中的最大磁感应强度。隔离套相对内外磁转子的运动为逆时针旋转, 由变化磁场所产生的电流沿 Z 向, 电动势 $\vec{E}$ 变化为

$$\vec{E} = E_z \vec{Z}$$

式中, E_z 为随 φ 变化的最大电动势。

- b. 隔离套位移电流相对于传导电流可以忽略不计。

- c. 隔离套厚度 t 远小于其轴向长度 L , 因此可以忽略端部效应, 仅以横截面为研究对象。

2. 涡流损失功率理论计算式的导出

按照 Maxwell 方程

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

根据上述假设条件 a.和式(2.1)在其坐标下可得

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{1}{r} \times \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \quad (2.2)$$

$$B_r = B_0 \sin m\varphi$$

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = B_0 m \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.4)$$

把式(2.4)、(2.3)代入式(2.2)中, 得

$$\frac{dE_z}{d\varphi} = -r \frac{2\pi n}{60} m B_0 \cos m\varphi \quad (2.5)$$

对式(2.5)两边同时积分得

$$\int_0^{E(\varphi)} dE_z = -\frac{\pi n r B_0}{30} \int_0^\varphi \cos m\varphi d(m\varphi) \quad (2.6)$$

$$E_z(\varphi) = -\frac{\pi n r B_0}{30} \sin m\varphi \quad (2.7)$$

电流密度为

$$\delta_{cy} = \gamma E_z(\varphi) = -\frac{\gamma \pi n r B_0}{30} \sin m\varphi \quad (2.8)$$

如图 2.3 所示, 在单元面积 $dA = r d\varphi t$ 中的功率损失为

$$dp = (\delta_{cy} r d\varphi t)^2 dr = (\delta_{cy} r d\varphi t)^2 \frac{1}{\gamma} \times \frac{dL}{r d\varphi t} \quad (2.9)$$

在整个隔离套中的涡流损失功率 P_j 为

$$P_j = \int_0^L \int_0^{2\pi} (\delta_{cy} r d\varphi t)^2 \frac{1}{\gamma} \times \frac{dL}{r d\varphi t} = L r^3 t \frac{\pi^3 n^2 B_0^2}{900} \gamma \quad (2.10)$$

式中 L ——磁化长度, m;

r ——隔离套半径, m;

t ——隔离套厚度, m;

n ——电机转速, r/min;

B_0 ——磁感应强度, T;

γ ——电导率, s/m。

目前, 国内已有大量文献对磁涡流的损耗作了定性分析, 常见的磁涡流损失功率的经验计算式见表 2.1^[30,47-53]。这些公式的推导分别基于 Maxwell 方程组、电磁感应原理等, 为磁力联轴器隔离套中的涡流计算和控制提供理论依据。

表 2.1 常用涡流功率损失计算式

Tab.2.1 Common formular of eddy current power loss

序号	涡流 P_w (M_w) 计算式 W (N·m)	文献来源	作者	备注
1	$P_w = kn^2 pD^2 / \rho \sigma_b M_{k \max} = ktn^2 r \gamma M_{k \max}$	中国稀土学报 1994 年第 12 期	李国坤	$\frac{pD}{\sigma_b} = \delta$
2	$P_w = 3.37 \times 10^{-8} \times tn^2 r \gamma M_{k \max}$	水泵技术 1998 年第 2 期	周朝纪	——
3	$P_w = \frac{N}{24\rho} h^2 \omega^2 B_0^2 LS$	水泵技术 1999 年第 2 期	施卫东	——
4	$M_w = (knrt / \rho) M_{k \max}$	水泵技术 2000 年第 5 期	陈存东	——
5	$P_w = \frac{\pi^3}{7200} (n^2 TP) \frac{B^2}{f_0} \frac{D^2}{\sigma_s} \gamma$	流体机械 2001 年第 3 期	李福宝	σ_s 材料的许用应力, f_0 磁场交变频率
6	$P_w = Lr^3 t \frac{\pi^3 n^2 B_0^2}{900} \gamma$	化工机械 2003 年第 6 期	赵克中	——
7	$P_w = \frac{4}{3} \pi^3 \eta_x \times DLt^2 f^2 B_0^2$	——	——	η_x 为磁化系数
8	$P_w = k \frac{B^2 D^3 Ln^2}{\sqrt{\rho \mu f}}$	通用机械 2004 年第 11 期	于华宇 肖建邦	μ 材料的磁导率, f 磁场的交变频率
9	$P_w = 0.0689 Lr^3 tn^2 B_0^2 \gamma$ $= 3.2 \times 10^{-8} tn^2 \gamma r M_{k \max}$ $M_w = 3.23 \times 10^{-7} \times nrt \gamma M_{k \max}$	通用机械 2005 年第 4 期	冯忠明 陈存东	——

2.1.3 涡流损失的影响因素

通过以上对磁力联轴器隔离套涡流损失功率计算公式的分析中可以得出,影响涡流损失功率大小的因素主要有:

(1) 隔离套的半径。其对涡流损失的影响最大,改变隔离套的半径是改变涡流损耗最直接最有效的途径,即在磁转矩不变的情况下将之做成细长形,可以大大减小涡流损耗。

(2) 磁转子转速 n 和磁感应强度 B 。在只改变转速 n 或穿过隔离套的磁感应强度 B 的情况下,同样可使得涡流损失发生变化,但在功率 P 不变的条件下, $B^2 n^2$ 不会有太大

的变化,所以磁感应强度和转速对涡流损耗的影响不是太大,只在选择磁感应强度和转速时予以考虑。

(3) 隔离套的电阻率 ρ 。电阻率是材料的固有属性,随着电阻率的增大,隔离套中的涡流损失降低,因此选用电阻率较大的材质如钛合金、哈氏合金做隔离套,可以有效的降低涡流损失;涡流的趋肤效应使得涡流密度高度集中在隔离套的表层中,改变隔离套表层的晶粒组织从而提高其电阻率也是降低涡流损失的一种方法。

(4) 工作磁场的交变频率。在转速不变的情况下,作用在隔离套上的交变磁场频率增大时,涡流损失降低,因此在磁力驱动泵性能和结构允许的条件下,尽可能的提高磁场交变频率。

通过以上的分析,在设计磁力驱动泵隔离套及相关零部件时,就能有目的地采取有效措施,在满足传动转矩要求的前提下,尽可能的降低隔离套的涡流损失,进而提高磁力驱动泵的传动效率。

2.2 内磁转子的水力摩擦损失与计算^[46]

磁力驱动泵正常工作时,内磁转子浸没在输送介质中,随外磁转子同步旋转。高速旋转的内磁转子与输送介质产生摩擦,不可避免的要产生能量损失,即内磁转子的水力摩擦损失,它包括两部分即圆柱面摩擦损失和端面摩擦损失。磁力驱动泵的结构形式不同,内磁转子与液体的接触摩擦面个数就不同,所产生的水力摩擦损失也就不相同。有的内磁转子与叶轮连为一体即定轴式磁力驱动泵,接触摩擦面个数少,其水力摩擦损失就小;有的则是通过轴将内磁转子与叶轮连接即动轴式磁力驱动泵,接触摩擦面个数多,所产生的水力摩擦损失就比较大。一般来说,应尽量减少水力摩擦面的个数以降低内磁转子的水力摩擦损失。

整个内磁转子所受摩擦阻力:

圆柱面:

$$f = \lambda \rho' (R_c \omega)^2 D_c \pi L_c / 2g \quad (2.11)$$

端面:

$$d f' = \lambda' \rho' (r \omega)^2 2 \pi r dr / 2g \quad (2.12)$$

整个内磁转子所受摩擦阻力矩:

$$\begin{aligned}
 M &= \int_{R_c}^{R_c} \lambda' \rho \frac{(r\omega)^2}{2g} 2\pi r dr + \lambda \rho \frac{(R_c\omega)^2}{2g} D_c \frac{D_c}{2} \pi L_c \\
 &= \frac{\lambda_d \pi \rho' \omega^2}{5g} (R_c^5 + 5R_c^4 L_c)
 \end{aligned} \quad (2.13)$$

整个内磁转子的摩擦损失功率为：

$$P_c = M\omega = \frac{\lambda_d \pi \rho' \omega^3}{5g} (R_c^5 + 5R_c^4 L_c) \quad (2.14)$$

式中 ρ' ——介质密度， kg/m^3 ；

ω ——内磁转子角速度， rad/s ；

R_c ——内磁转子外半径， m ；

L_c ——内磁转子长度， m ；

λ 、 λ_d ——内磁转子端面、圆柱面摩擦系数。

实际上，内磁转子的水力摩擦损失要复杂得多。这主要是因为实际使用的内磁转子不是标准的圆盘，其表面液体的流动情况十分复杂，而且与内磁转子的表面粗糙度、结构、形状都有十分密切的关系。从式（2.14）可以看出：整个内磁转子的水力摩擦损失功率与内磁转子半径的四次方成正比，因此，减小内磁转子的半径是降低内磁转子水力摩擦损失功率最有效的途径。通过对磁路的优化设计，合理的选择磁路的长径比 L/D ，才能使能量损失控制在最小的限度内，否则会使能量损失增大，磁力驱动泵的传动效率降低。

确定磁转子的长径比时首先要满足其传动转矩的要求，同时应具有较低的涡流损失和较好的成本效益。磁转子的直径与磁体的总用量成反比，从增大转矩和降低成本考虑应该增大磁转子的直径。但是，增大直径会增加内磁转子的水力摩擦损失和隔离套的涡流损失，降低传动效率，提高运行成本。缩小磁转子的半径其传动转矩会有所降低，但可以减小内磁转子的水力摩擦损失和隔离套的涡流损失，提高传动效率。然而当要求传动转矩一定时，磁转子的直径不能过小，否则将导致磁转子过长，永磁体的用量增大，磁能的利用率降低，轴承的支撑难以解决，安装也不方便。因此，磁转子长径比选择的原则是转速低、扬程小时取小值；转速高、扬程大时取大值。表 2.2 为磁转子长径比经验值选用参考表。

磁转子长径比的计算和尺寸的确定比较复杂，在磁路设计中磁转子的长度、直径与传动转矩值 T 以及功率损失成正比关系，因此，可通过优化设计，将长径比的关系列为高次方程，通过逼近法等计算方法求得理想的长径比。合理的选择磁路的长径比，可使内磁转子的水力摩擦损失功率控制在最小限度内。

表 2.2 磁转子长径比的选用

Tab.2.2 Selection of the ratio of length and radius of magnetic rotor

最大静磁转矩 (N·m)	磁转子长径比
≤300	0.2~1
300~500	1~2
≥500	2~3

2.3 冷却润滑流道的能量损失^[4,46]

在磁力驱动泵的工作过程中,内磁转子与隔离套之间工作间隙中的流体随内磁转子的旋转而运动,液体的运动对隔离套壁产生冲撞和摩擦,使隔离套壁产生热量;金属隔离套受交变磁场的影响产生涡流并发热,这两项热量使得永磁体的工作环境温度不断上升。为了确保运行的可靠性,磁力驱动泵一般都设置导流孔,引导一部分工作介质来冷却内磁转子和隔离套,同时冷却并润滑滑动轴承,因此在磁力驱动离心泵的结构设计中一般都设有冷却润滑流道。冷却润滑系统的设计是否合理,将直接影响磁力驱动泵的效率 and 运行的可靠性,同时它也造成了磁力驱动泵一部分的容积损失,即冷却润滑流道的能量损失。但是,只要冷却润滑流道布置合理,将流道内的流量控制在必需的范围内,这项能量损失就能降低到最低的限度。不过,如果流道的布置不妥,将会产生流动紊乱,产生流道损失之外的附加水力损失,这种现象在设计过程中应尽量避免。

冷却润滑流道的布置方式有两种:一种是在泵出口部位增设引管,将输送的介质通过外循环管路以强迫循环的方式进行冷却润滑,称为外循环式;另一种是通过在泵内高压部位设置导流孔,强迫输送的介质循环流动,将轴承处因旋转摩擦产生的热量带走并起到润滑轴承的目的,并对产生磁涡流热的隔离套进行冷却,称为内循环方式。大功率的磁力驱动泵,常采用外循环式冷却润滑,这时如果冷却润滑液采用与泵送液体相独立的液体,则此时冷却润滑流道的损失将不计入泵内损失而需另行计算;而小功率磁力驱动泵,一般采用内循环方式,其循环流量应以能带走隔离套和轴承处的热量并使液体不至汽化为最小流量的界限,运行应在安全的工作范围内。采用独立冷却润滑方式时,应保证冷却润滑液与泵送介质互不渗流,一般采用以泵送介质内循环润滑方式为主,辅以泵外水冷却方式,循环流道的设计要合理,泵外辅助冷却液应保持一定流速。

根据冷却部位的不同,冷却液流量可分为 q_1 和 q_2 两部分。其中 q_1 润滑内磁转子和隔离套的间隙,然后从轴中心孔回流到泵进口低压区,主要带走隔离套的涡流热量和内磁转

子圆盘摩擦损失产生的热量; q_2 流向滑动轴承处, 然后通过叶轮处的平衡孔回流到低压区, 带走滑动轴承摩擦热量和轴承左端圆盘损失产生的热量。冷却液流量 q_1 的计算公式为:

$$q_1 = \left[\frac{2}{5} \pi K' \rho' \omega^3 \left(\frac{D_2}{2} \right)^5 + 2 \pi K' \rho' \omega^3 \times \left(\frac{D_2}{2} \right)^4 L_z + W_1 \right] \times \frac{1}{\rho' C \Delta T} \quad (2.15)$$

式中 ρ' ——介质的密度, kg/m^3 ;

C ——介质的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

ΔT ——介质允许的温升, K ;

K' ——圆盘摩擦系数, $K' \approx 1.31 \times 10^{-6}$;

ω ——内磁转子角速度, rad/s ;

D_2 ——内磁转子外径, m ;

L_z ——内磁转子轴向长度, m ;

W_1 ——磁力驱动泵统计涡流损失, kW , $W_1 \approx 0.15 M \omega$;

M ——磁力联轴器转矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$.

冷却液流量 q_2 计算式为:

$$q_2 = \frac{2}{5} \frac{1}{\rho C \Delta T} \pi K' \rho \omega^3 \left(\frac{D_2}{2} \right)^5 + 0.0012 \frac{d_N}{3600} \quad (2.16)$$

式中 $0.0012 \frac{d_N}{3600}$ ——经验值, 推荐滑动轴承冷却液流量;

d_N ——滑动轴承内径, m .

导流孔直径的确定:

$$d = \left[\frac{4(q_1 + q_2)}{\pi \lambda (2gH_d)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

式中 λ ——导流阻压系数, $\lambda = 0.55 \sim 0.75$;

H_d ——导流孔压力水头, 按泵内开导流孔的位置计算, m .

对于小流量高扬程的磁力驱动泵来说, 选择过大的冷却循环压差, 将造成很大的能量损失, 而对于容易汽化的液体, 如果冷却循环量过小, 回流到泵吸入口的循环液体温度升高可能引起泵的汽蚀, 因此必须适当的加大冷却循环量。冷却润滑流道的能量损失与涡流损失、内磁转子的水力摩擦损失相比要小很多。采用金属隔离套的磁力驱动泵冷却润滑流道的能量损失占泵总消耗功率的 4%~6%, 而采用非金属隔离套的磁力驱动泵冷却润滑流

道的能量损失仅占泵总消耗功率的 2%~3%。

2.4 小结

本章主要分析磁力驱动泵所具有的特殊能量损失：磁涡流损失、内磁转子的水力摩擦损失以及冷却润滑流道的能量损失，为后面分析磁力驱动泵中的涡流损失奠定理论基础。

1) 介绍涡流产生的原因，总结目前国内计算磁涡流损失功率常用的计算公式；根据经验公式，分析影响涡流的主要因素并提出控制涡流损失功率大小的方法。

2) 阐述内磁转子水力摩擦损失产生的原因及其重要组成部分，根据经验公式分析其影响因素。

3) 介绍磁力驱动泵内冷却润滑流道的布置方式以及由此而造成的能量损失，并根据需要选择流道的布置方式。

第三章 磁力联轴器气隙磁场的有限元分析

磁力联轴器的气隙磁场不仅影响其传动转矩的大小,同时也是决定金属隔离套中涡流损失大小的主要因素。因此,对磁力联轴器的气隙磁场进行分析,准确计算气隙磁场的磁场强度,正确掌握磁场的分布规律是准确计算磁力联轴器传动转矩和隔离套中涡流损失的前提条件。本章将以 24 极式磁力联轴器为研究对象,对不同永磁体排列方式的磁力联轴器的气隙磁场进行模拟并分析各结构参数对其传动转矩的影响。

3.1 永磁体空间磁场的计算

计算永磁体在空间所产生磁场的大小除了可以应用电磁场基本理论——麦克斯韦方程组外,还有两种完全等效的物理模型即等效面磁荷模型和等效面电流模型^[54]。

3.1.1 麦克斯韦方程组^[55-59]

100 多年前,詹姆斯·麦克斯韦在提出位移电流的概念以后,对前人在实验中得出的电磁场基本定律进行数学上的总结,创立了电磁场的基本方程组——麦克斯韦方程组,完善了电磁场理论。麦克斯韦方程组描述了电磁场的基本特性,正确的反映了电磁场中各物理量之间的相互关系,是支配所有宏观电磁学现象的一组基本方程。它由四个基本定律组成,即安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律。

1. 安培环路定律

无论空间介质和磁场强度 $\vec{H}$ 的分布如何,在磁场中磁场强度沿任何一条闭合路径的线积分等于穿过该积分路径所确定曲面 Ω 的电流总和,即随时间变化的磁场将激发电场。这里的电流包括传导电流和位移电流,用积分形式表示为:

$$\oint_r \vec{H} dl = \iint_{\Omega} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dS \quad (3.1)$$

式中, $\vec{H}$ 为磁场强度 (A/m); $\vec{J}$ 为传导电流密度矢量 (A/m²); $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 为位移电流密度; $\vec{D}$ 为电通密度 (C/m²)。

2. 法拉第电磁感应定律

电场强度沿任一闭合路径的线积分等于该路径所交链的磁通量时间变化率的负值,即随时间变化的磁场将激发电场。用积分表示为:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{l} = - \iint_{\Sigma} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad (3.2)$$

式中, $\vec{E}$ 为电场强度 (V/m); $\vec{B}$ 为磁感应强度 (T 或 Wb/m²)。

3. 高斯电通定律

在电场中, 不管电介质与电通密度矢量的分布如何, 穿出任何一个封闭曲面的电通量等于这一闭合曲面所包围的自由电荷总量。用积分形式表示为:

$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV \quad (3.3)$$

式中, ρ 为电荷体密度 (C/m³); V 为闭合曲面 S 所围成的体积区域。

4. 高斯磁通定律

磁场中, 不论磁介质与磁通密度矢量的分布如何, 穿过任何一个闭合曲面的磁通量等于零。用积分形式表示为:

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (3.4)$$

对于一般的时变场来说, 微分形式的麦克斯韦方程组可写成

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.8)$$

事实上, 这四个方程并不是完全独立的, 后两个方程是基于高斯定理和斯托克斯定理从前两个方程导出的, 前两个方程被称为是麦克斯韦第一方程和和第二方程。在这两个矢量方程中含有五个独立的矢量函数, 为了得到确定的解, 还需要表达场矢量间相互关系的方程, 即本构关系。简单媒质的本构关系为:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.9)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.10)$$

在电源以外区域还有

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.11)$$

式中, ε 、 μ 、 σ 分别为介电常数 (F/m)、磁导率 (H/m) 和电导率 (S/m)。式 (3.9) ~ (3.11) 说明了五个场矢量之间的关系, 被称为电磁性能的本构方程。

麦克斯韦方程组是解决各种电磁问题的出发点, 但是由于包含了五个矢量未知函数, 直接求解比较困难。因此, 在电磁场数值分析中通常引入电位和磁位作为辅助函数简化计算。

3.1.2 等效面磁荷模型^[60]

等效面磁荷模型认为空间磁场是由磁荷产生的。一块有限大小的永久磁铁在空间产生的磁场可认为是按某种规律分布的磁荷在空间产生磁场的迭加, 关系如下:

$$\rho_m = -\mu_0 \nabla \cdot \mathbf{M}_r \quad (3.12)$$

式中 ρ_m ——体磁荷密度;

$\mathbf{M}_r$ ——剩磁化强度;

μ_0 ——真空磁导率。

一般永磁体沿磁化方向均匀充磁, 此时剩余磁化强度 $\mathbf{M}_r$ 为常矢量, 则 ρ_m 恒等于零。因此, 对于均匀磁化的永磁体, 只存在面磁荷且标量磁位 φ_m 与面磁荷密度的关系为:

$$\varphi_m = \oint_S \frac{\sigma_m}{4\pi\mu_1 |\vec{r}|} dS + C \quad (3.13)$$

式中 r ——源点与场点之间的距离;

S ——永磁体边界面;

C ——积分常数, 取决于磁位参考点的选择;

μ_1 ——永磁体磁导率。

则永磁体所产生的空间磁场的磁场强度为:

$$\vec{H} = -\nabla \varphi_m = -\nabla \oint_S \frac{\sigma_m}{4\pi\mu_1 |\vec{r}|} dS \quad (3.14)$$

材料的磁场强度与磁感应强度之间的关系:

$$\vec{B} = \mu_2 \vec{H} \quad (3.15)$$

求得待求磁场的磁感应强度。

式中 μ_2 ——待求场的磁导率, 如果没有磁介质, 则 $\mu_2 = \mu_0$ 。

3.1.3 等效面电流模型

等效面电流模型认为, 在磁化永磁体内部存在着密度为 $\vec{J}_m$, 单位为 A/m^2 的圆电流分布^[61];

$$\vec{J}_m = \Delta \times \vec{M} \quad (3.16)$$

对于已经磁化的永磁体, 磁感应强度与磁场强度之间的关系满足^[57];

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \mu_0 \vec{M}_r \quad (3.17)$$

式中 $\vec{B}$ ——永磁体工作点的磁感应强度;

μ_0 ——真空磁导率;

μ_r ——永磁体相对磁导率;

$\vec{H}$ ——永磁体工作点的磁场强度;

$\vec{M}_r$ ——剩余磁化强度。

根据永磁体的退磁曲线, 当 $\vec{B} = \vec{B}_r$ 时, $\vec{H} = 0$, 此时由式 (3.17) 可得:

$$\vec{M}_r = \frac{\vec{B}_r}{\mu_0} \quad (3.18)$$

在考虑永磁体内部没有宏观电流的情况下即 $\nabla \times \vec{H} = 0$, 对式 (3.18) 两边同时取旋度, 则有:

$$\nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \right) = \nabla \times \frac{\vec{M}_r}{\mu_r} \quad (3.19)$$

式 (3.19) 拥有电流密度的量纲, 体现了永磁体的励磁作用。若永磁体被均匀磁化, 其内部各点处的剩余磁化强度的大小和方向均相同。永磁体内部的等效电流密度等于零, 但在平行于剩余磁化强度的侧面上有一层等效面电流, 等效面电流密度为:

$$\vec{J}_s = \frac{\vec{M}_r \times \vec{n}}{\mu_r} \quad (3.20)$$

式中 $\vec{n}$ 为永磁体边界外法向单位矢量。则待求场点的磁感应强度^[59]为:

$$\vec{B}(r) = \int_S d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \frac{\vec{J}_s \times \vec{r}}{r^3} dS' \quad (3.21)$$

式中 r ——永磁体源点与待求场点之间的距离;

S' ——面电流分布区域的面积;

S ——待求区域面积。

3.2 磁转矩的计算^[4]

在磁力联轴器的设计过程中,传动转矩的计算非常重要。目前,计算磁转矩的方法较多,如等效磁荷法、麦克斯韦应力法、静磁能理论转矩求解法、气隙数值法,转矩有限元计算法等,但是这些计算方法比较复杂,工程上最常用的方法有两种,即高斯定理求解法和经验公式求解法。

3.2.1 高斯定理求解法

该方法是应用高斯定理和永磁材料的 B - H 曲线来求解传动转矩,其表达式为:

$$T = \left(\frac{1}{5000} \right)^2 K M H m S t_h R_c \sin \left(\frac{m}{2} \phi \right) \quad (\text{kgf} \cdot \text{cm}) \quad (3.22)$$

式中 K ——磁路系数,对于组合拉推磁路, $K=4 \sim 6.4$;

M ——磁化强度, $M = \frac{B_m + H_m}{4\pi}$, Gs;

B_m 、 H_m ——工作点的磁感应强度与磁场强度;

H ——外磁路在内磁体处产生的磁场强度, Oe, $H = N_1 \times 4\pi m \left(1 - \frac{t_g}{\sqrt{t_g^2 + t_0^2}} \right) \eta$;

N_1 ——极面形状的经验系数;

t_g ——工作气隙宽度, cm;

t_0 ——磁极弧长, $t_0=0.5$ (内磁极外弧+外磁极内弧), cm;

η ——磁体厚度系数, η 与 t_h/t_0 的关系见表 3.1;

m ——磁极的极数;

S ——磁极的极面积;

t_h ——永磁体厚度, $t_h = \frac{1}{2}(t_{im} + t_{om})$, cm;

R_c ——作用到内磁极上的磁力至转动中心的平均转动半径, $R_c = \frac{1}{2}(R_2 + R_3)$

cm;

ϕ ——工作时的转角差, 度。

当 $\sin \left(\frac{m}{2} \phi \right) = \sin 90^\circ$ 时, 磁力联轴器的传动转矩达到最大值, 即内外磁转子之间的转

角差为磁体张角一半时传动转矩达到最大值，此时内外磁转子之间所产生的轴向力相互抵消。

表 3.1 η 与 t_h/t_0 的关系

Tab.3.1 The relationship between η and t_h/t_0

t_h/t_0	η	t_h/t_0	η
0.2~0.4	0.7	0.7~0.9	0.95
0.5~0.6	0.85		

3.2.2 经验公式求解法

计算圆筒式磁力联轴器转矩时，还可以用比较实用的经验公式求解法。圆筒式磁力联轴器是由内外两个磁环组成，每个磁环都有 m 个 N、S 极交替排列的瓦形永磁体组成，其气隙中心的磁场强度按内外相对应的两块永磁体产生的磁场强度的迭加来计算，其值分别为：

$$H_i = \frac{B_r}{\pi} \left[t_g^{-1} \frac{L_{s2} \times L_b}{t_g \sqrt{t_g^2 + L_b^2 + L_{s2}^2}} - t_g^{-1} \frac{L_{s1} \times L_b}{(4t_{im} + t_g) \sqrt{(4t_{im} + t_g)^2 + L_b^2 + L_{s1}^2}} \right] \quad (3.23)$$

$$H_o = \frac{B_r}{\pi} \left[t_g^{-1} \frac{L_{s3} \times L_b}{t_g \sqrt{t_g^2 + L_b^2 + L_{s3}^2}} - t_g^{-1} \frac{L_{s4} \times L_b}{(4t_{om} + t_g) \sqrt{(4t_{om} + t_g)^2 + L_b^2 + L_{s4}^2}} \right] \quad (3.24)$$

$$H_g = H_i + H_o \quad (3.25)$$

式中 H_i ——内磁环上永磁体产生的磁场强度，Oe；

H_o ——外磁环上永磁体产生的磁场强度，Oe；

H_g ——工作气隙中的磁场强度，Oe；

B_r ——永磁体剩余磁感应强度，Oe；

t_g ——工作气隙宽度，cm；

L_b ——永磁体轴向长度，cm；

L_{s1} ——内永磁体内弧长，cm；

L_{s2} ——内永磁体外弧长，cm；

L_{s3} ——外永磁体内弧长，cm；

L_{s4} ——外永磁体外弧长，cm；

t_{im} ——内永磁体厚度，cm；

t_{om} ——外永磁体厚度, cm。

当电动机带动外磁转子旋转后, 由于内磁转子的负载惯性和负载阻力的作用, 只有当外磁转子相对与内磁转子旋转一定角度后, 内外磁转子才开始同步转动。当内外磁转子的转角差为永磁体磁极张角一半时, 内磁转子上的永磁体同时受到邻近两块外磁转子永磁体的吸力和斥力的作用而产生最大磁力矩, 最大磁力矩与磁场的关系为:

$$T_{\max} = \frac{1}{3} B_r H_g S_m R \quad (3.26)$$

式中 B_r ——永磁体剩余磁感应强度, Oe;

H_g ——工作气隙中的磁场强度, Oe;

S_m ——内外永磁体磁极相互作用的总面积, cm^2 ;

R ——内外永磁体平均作用半径, cm。

3.3 有限元分析简介

有限元分析方法又称为有限单元法, 是随着计算机技术而发展起来的一种数值求解方法, 起源于航空工程中的矩阵分析。它是把一个连续的介质看成是由有限数目的单元组成的集合体, 在各单元内假定具有一定的理想化位移和应力分布模式, 各单元间通过节点相连接并实现力的传递。有限元分析方法的出现为解决那些复杂的工程计算问题提供了一种有效的途径, 如核反应堆的温度场, 确定传热和冷却系统的合理性; 分析涡轮机叶片内的流体动力学参数以提高运转效率等。近年来随着计算机技术的发展和普及, 有限元分析技术已经从最初的求解线性工程问题进展到分析非线性问题, 由单一的结构力学计算发展到求解许多物理场问题如流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算以及流固耦合问题的计算等。

用有限元法求解问题的基本步骤为:

第一步, 问题及求解域定义: 根据实际问题近似确定求解域的性质和几何区域。

第二步, 求解域离散化: 将求解的区域进行网格划分, 使其离散成有限个单元。

第三步, 确定状态变量和控制方法: 对于一个具体的物理问题, 通常可以用一组包含问题状态变量边界条件的微分方程式来表示并将其写成泛函形式。

第四步, 单元推导: 对离散的单元构造合适的近似解。

第五步, 总装求解: 将单元总装成求解区域的总矩阵方程, 反映对近似求解域的离散要求, 总装要在相邻单元节点处。

第六步, 联立方程组求解并对结果进行分析: 对联立方程组的求解可以采用直接法、

迭代法和随机法。

目前,用于电磁场有限元分析的商用软件比较多,主要有:美国 Swanson Analysis System 的 ANSYS 软件;美国 MacNeal Schwendler Corp 的 MSC/EMS 软件;加拿大 Integrated Engineering Software Inc.的系列产品以及美国 Ansoft Corp.的 Maxwell 软件等,其中最具有影响力的是 ANSYS 软件,它是一种融合了结构、热、流体、电磁和声学的大型 CAE 通用有限元分析软件,被广泛应用于航空航天、机械、汽车交通、电子等一般工业和科学研究领域^[62]。ANSYS 以麦克斯韦方程组为出发点,分析电磁领域中的磁通密度、能量损耗、磁场强度、磁漏、磁力及磁转矩、阻抗、电感、涡流等问题。其强大的后处理功能允许用户显示磁力线和磁场强度并进行力和转矩以及其它参数的分析。

电磁场的有限元分析一般可归结为求解微分方程,而要求得磁力驱动泵内磁场的偏微分方程的唯一解需要增加一定的辅助条件。常见的辅助条件有两种:一是表达场的边界所处的物理环境,即边界条件;二是表达场的初始状态即所谓的初始条件。而所要研究的磁力驱动泵内的电磁场是只有边界条件没有初始条件的边值问题。通常所用的边界条件^[59]有三种:

(1) Dirichet 条件:通常定义为 $\bar{A}=0$, 在该边界条件下意味着磁力线平行于边界线,阻止磁通穿过边界。

(2) Neuman 条件:通常定义为 $\frac{\partial \bar{A}}{\partial n}=0$, 即磁场垂直于边界。高磁导率的边界、物理模型中不同介质的交界线处属于该边界类型。

(3) Robin 条件:即混合边界条件,描述了磁矢量 $\bar{A}$ 与其法向分量之间的关系,永磁体的交界线处为该边界类型。

本文主要是应用 ANSYS 软件对磁力联轴器的气隙磁场进行静态分析,计算磁力联轴器的传动转矩值并分析各结构参数对传动转矩值的影响。

3.4 气隙磁场的有限元分析

磁力联轴器转矩的传动过程主要发生在工作气隙中,因此气隙磁场是影响磁力联轴器工作特性的重要因素。当磁转子静止时,内外磁转子间的气隙磁场只是由磁转子上的永磁体产生,而当内外磁转子做同步旋转时,气隙磁场就是两部分磁场迭加而形成的复合磁场,其中一部分是磁转子上永磁体在气隙中产生的原磁场,另一部分是金属隔离套内部的涡流在工作气隙中产生的附加磁场。通过对气隙磁场的有限元分析来计算磁力联轴器的传动转

矩，为后文研究磁力驱动泵的传动效率奠定基础。

本节将主要应用 ANSYS 分析软件中的电磁场分析模块对磁力联轴器的气隙磁场进行分析,在考虑金属隔离套的涡流效应时,分别研究永磁体为普通排列和 Halbach 阵列(每极 2 段、每极 3 段、每极 4 段)的磁力联轴器的磁场分布情况,并计算这四种永磁体排列方式的磁力联轴器的传动转矩值。(如无特殊说明, Halbach(2)代表每极 2 段的 Halbach 阵列, Halbach(3)代表每极 3 段的 Halbach 阵列, Halbach(4)代表每极 4 段的 Halbach 阵列)。这四种永磁体排列方式的示意图如图 3.1 所示。

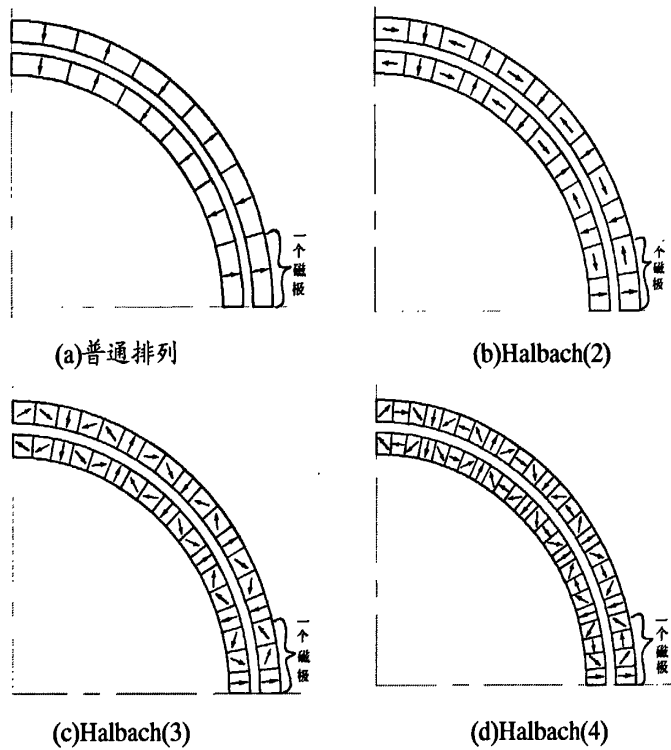


图 3.1 磁力联轴器的永磁体排列方式示意图

Fig.3.1 Schematic arrangement of permanent magnets of the magnetic coupling

3.4.1 二维磁场有限元分析模型

1. 基本假设

(1) 磁转子气隙磁场的分布是一个非线性的三维问题,磁力联轴器转矩传动的物理过程主要发生在工作气隙中,由于气隙尺寸相对于磁力联轴器轴向尺寸来说很小,因此可假设磁力联轴器的轴向尺寸远大于气隙尺寸,在忽略永磁体端部效应的前提下认为工作气隙磁场强度沿轴向不发生变化,这样就可以将磁场分布的三维问题转化为二维问题进行处理。

(2) 磁转子的内外轭铁均为导磁体且足够厚,在轭铁处不发生磁饱和现象,可以忽

略轭铁由于磁化而对气隙磁场产生的影响。

(3) 内外永磁体沿径向均匀磁化。

(4) 磁力联轴器正常工作时内外磁转子同步旋转，隔离套静止不动，此时工作气隙中的磁场是旋转变化的，假设内外磁转子静止不动，隔离套以反方向旋转，将旋转变化的动磁场转化为静磁场分析。

2. 物理模型

本研究选用 IMC80-65-125 型磁力泵作为研究对象，其转速为 2900r/min，永磁体对数为 24，其结构尺寸如图 3.2 所示。表 3.2 列出了磁力联轴器各部分结构的材料属性。

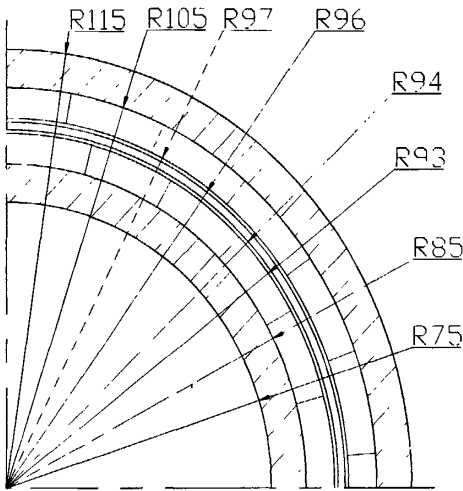


图 3.2 几何模型示意图 (1/4) (单位: mm)

Fig.3.2 Schematic of geometric model (1/4) (Unit: mm)

表 3.2 基本材料特性

Tab.3.2 Properties of the basic material

结构	永磁体	轭铁	隔离套	空气隙
材料	钕铁硼 N35SH	A3 钢	316L 钢	空气
矫顽力 (MA/m)	0.868	—	—	—
剩磁 (T)	1.2	—	—	—
相对磁导率 μ_r	1.05	8000	1	1
电阻率 ($\Omega\cdot m$)	—	—	0.75×10^{-7}	—

令整个求解区域为 $\bar{\Omega}$ ，外磁转子的外边界及内磁转子的内边界为 Γ_1 ，所有不同介质的交界线为 L ，则 $\bar{\Omega}=\Omega\cup\Gamma_1\cup L$ ， Ω 为 $\bar{\Omega}$ 中除去边界和介质交界线以后的场域。

根据电磁场理论, 在 Ω 中有:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

如果材料为非线性, 则磁导率为磁感应强度 $\vec{B}$ 的函数, 即:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.28)$$

磁感应强度 $\vec{B}$ 可以通过矢量磁位 $\vec{A}$ 得到, 即:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.29)$$

由以上各式可得:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (3.30)$$

对于线性各向同性材料则有:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (3.31)$$

对于非线性的各向异性材料则有:

$$\frac{1}{\mu(B)} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \quad (3.32)$$

则在求解域 $\bar{\Omega}$ 上求解磁转子内的矢量磁位 $\vec{A}$ 的微分方程为:

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) = 0 \\ \Gamma_1: \vec{A} = 0 \\ L: \left(\beta \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} \right)_{L^+} = \left(\beta \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} \right)_{L^-} \end{cases} \quad (3.33)$$

式中, n 为 L 的法线方向; β 为材料的磁阻率, 对于空气 $\beta = \frac{1}{\mu_0}$, 对于钕铁硼

$\beta \approx \frac{1}{(1.05-1.1)\mu_0}$, 对于铁磁材料由其磁化曲线 $\vec{B} = f(\vec{H})$ 确定。由式 (3.33) 求得 $A(x, y)$

后, 代入式 (3.27) 便可求得 $B(x, y)$ 即得到磁转子的磁场分布。

利用有限元法求解电磁场拉普拉斯方程的边值问题, 就是把该边界条件等价为一个相应的条件变分问题, 再通过引入近似函数把条件变分问题离散为方程组, 最后求解该方程

组得到磁场的分布，再利用 **Maxwell** 应力法求得磁力联轴器的最大转矩值^[4]。

3. 有限元分析过程

本文利用电磁场分析软件 **ANSYS12.0** 对磁力联轴器的磁场进行有限元分析，具体操作步骤如下：

(1) 创建物理环境

在定义问题的物理环境时，进入 **ANSYS** 前处理器，主要分以下几步操作：

首先要设置 **GUI** 菜单过滤，以便在进行二维静态磁场分析时过滤掉一些不必要的菜单及相应的图形界面，便于操作。

其次定义单元类型及其选项并设置实常数：单元类型选择二维电磁场分析最常用的 **Plane53** 作为分析单元，并设置自由度为磁矢势 **AZ** 和单元通用速度方程，设置转速是常数为 **OMEGAZ**。

最后定义材料属性：磁力联轴器各部分结构的材料属性见表 3.2。

(2) 建立模型，对模型的不同区域赋予材料属性并划分网格

首先，利用 **ANSYS12.0** 软件对不同永磁体排列方式的磁力联轴器进行建模，如图 3.3 所示。为每一块永磁体建立局部坐标系，对建立好的模型指定各个区域特性，包括单元类型、局部坐标系、实常数和材料性质等。

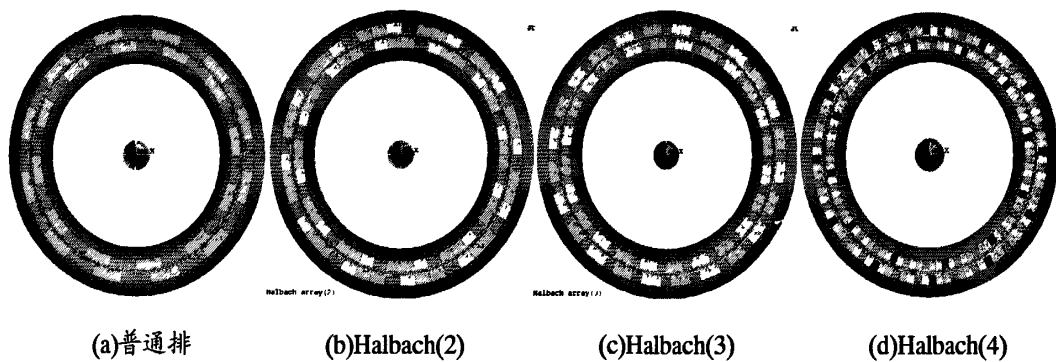


图 3.3 物理模型

Fig.3.3 Physical model

其次，划分有限元网格。在有限元分析过程中，网格划分起着至关重要的作用，它直接影响着计算结果的精度。为了保证分析结果的精度，选用四边形划分网格，控制单元的长宽比例，将产生转矩的内外磁转子间的工作气隙区域的网格细化。

(3) 施加边界条件和载荷

对外磁转子的外边界和内磁转子的内边界施加磁力线平行条件，将内轭铁及内磁转子上的单元组设置为一个组件并施加力矩标志，以便在后处理中计算磁力联轴器所传动的转

矩值。

(4) 求解及后处理

定义分析类型及分析选项，由于本模型在分析过程中考虑了隔离套的速度效应，所以求解器选择系数矩阵求解器 Sparse solver，然后开始求解。完成求解后，利用 ANSYS 后处理功能计算磁力联轴器的传动转矩值并查看计算结果，进行分析。

3.4.2 结果与分析

1. 普通排列

24 极式磁力联轴器每块永磁体的磁极张角为 15° ，利用 ANSYS 软件对金属隔离套考虑速度效应和没有速度效应两种情况下磁力联轴器磁场的分布情况进行分析，转角差每隔 2.5° 计算一次，其磁力线分布图和磁场强度分布云图如图 3.4 和 3.5 所示。

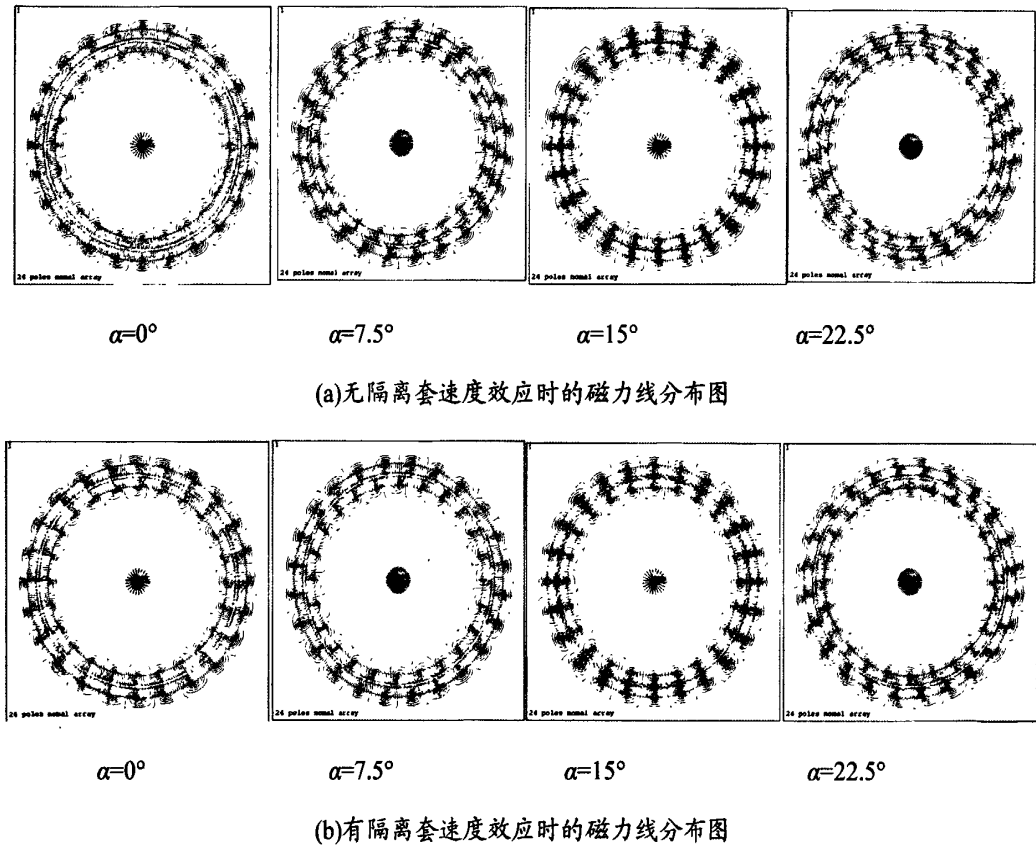
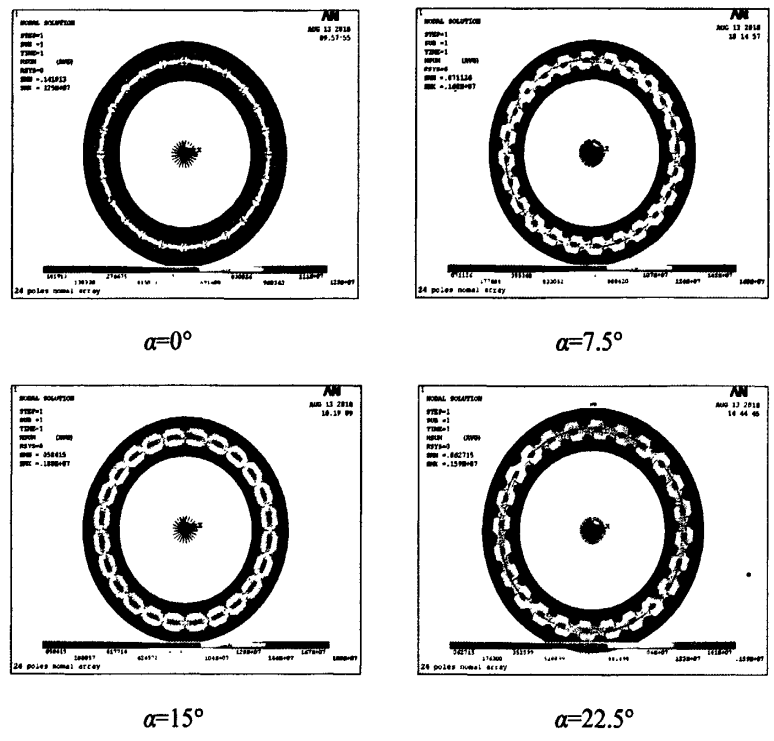
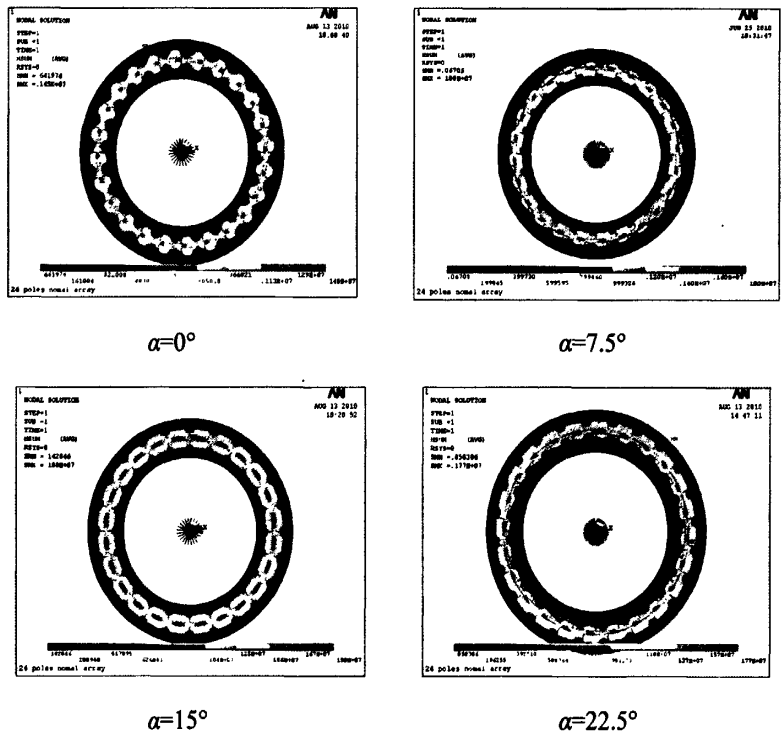


图 3.4 普通排列磁力线分布图

Fig.3.4 Magnetic flux distribution of normal array



(a)无隔离套速度效应时的磁场强度分布云图



(b)有隔离套速度效应时的磁场强度分布云图

图 3.5 普通排列磁场强度分布云图

Fig.3.5 Magnetic field intensity contour of normal array

从图 3.4 和图 3.5 中可以看出：磁力联轴器中的磁场分布呈现周期性，且相对于永磁

体呈对称分布。当内外磁转子之间的转角差为 0° 时，内外永磁体异极相对，二者之间的相互作用力表现为只有沿径向的吸引力，此刻工作气隙中的磁场强度最大，但由于没有沿圆周方向的切向力，磁力联轴器处于静止状态；随着内外磁转子之间转角差的增加，工作气隙中的磁场强度逐渐减弱，但是二者之间的切向磁作用力在逐渐增强；当转角差为 7.5° 时，内外磁转子的径向作用力相互抵消，而切向的作用力相互增强达到最大值，此时磁力联轴器的传动转矩应达到最大值；当转角差为 15° 时，内外磁转子上的永磁体同极相对，表现为斥力，此时工作气隙中的磁场强度最弱，几乎等于零，没有切向方向的作用力，磁力联轴器处于静止状态。

对比图 3.4 和图 3.5 中的(a)、(b)图可以看出：当考虑隔离套的速度效应时，磁力联轴器中的磁场分布不均匀，且在沿隔离套转动方向的磁场强度大于背向转动方向的磁场强度。这主要是因为金属隔离套在交变的磁场中产生了磁涡流，变化的涡流又感生磁场，从而影响原磁场的分布。图 3.6 为转角差为 7.5° 时隔离套中的涡流强度分布图。从图中看出：隔离套上产生的涡流为周期性变化并呈涡旋状分布，最大值为 $0.311\text{E}+09\text{A/m}^2$ 出现在隔离套的外侧，且由外向内是逐渐渗透的，这也说明了涡流的“趋肤”特性。

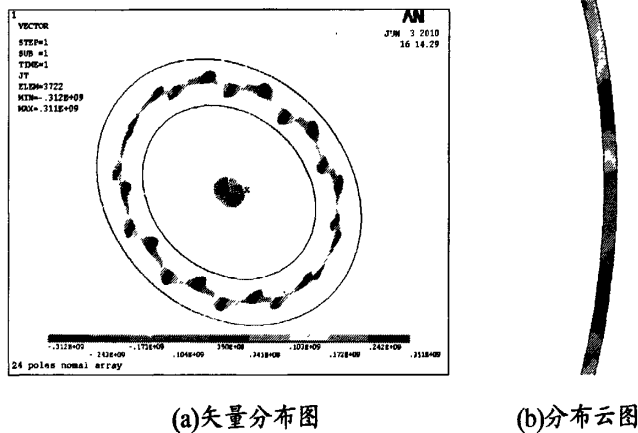


图 3.6 普通排列涡流强度分布图

Fig.3.6 Distribution diagram of eddy current of normal array

金属隔离套考虑速度效应和没有速度效应两种情况下磁力联轴器传动转矩值随转角差的变化曲线如图 3.7 所示。从图中看出：磁力联轴器传动转矩值与转角差的关系基本为正弦曲线，且随转角差呈周期性变化，变化周期为 30° ($4\pi/m$)。当 $\alpha=0^\circ$ 、 15° 时磁力联轴器已有了微小的传动转矩值，当 $\alpha=7.5^\circ$ 时磁力联轴器的传动转矩达到最大值，而当 $\alpha=22.5^\circ$ 时达到反向最大值。隔离套无速度效应时传动的转矩值明显大于有速度效应的转矩值，二者之间的差值就是由于产生涡流所造成的能量损失，经计算此永磁体排列方式的磁

力联轴器中涡流损失效率约为传动功率的 10.61%。当 $\alpha=0^\circ$ 时，虽然工作气隙中的磁场强度最大，但此时磁力联轴器的内外磁转子处于静止状态，所以涡流损失功率为 0。

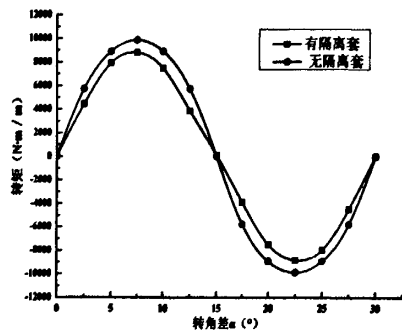
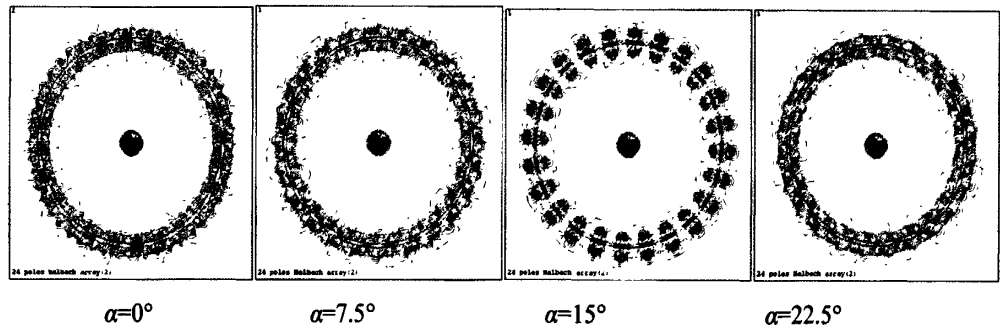


图 3.7 普通排列转矩随转角差的变化曲线

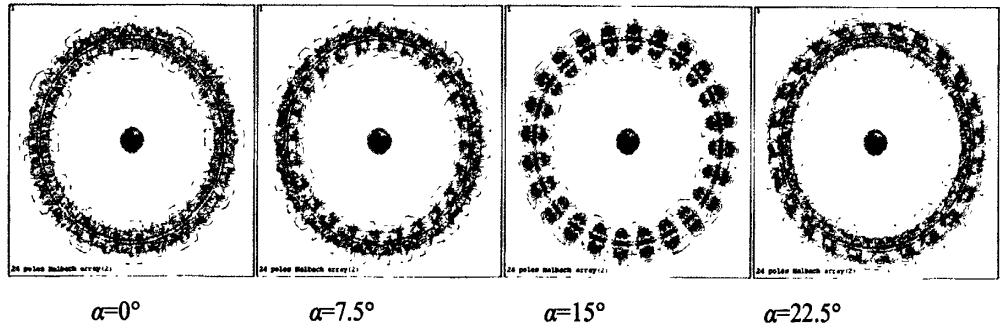
Fig.3.7 Change of torque with different angle deviation of normal array

2. Halbach(2)

Halbach(2)相邻两永磁体磁化方向的夹角为 90° ，相邻的两段永磁体为一磁极。Halbach(2)型圆筒式磁力联轴器磁转子上永磁体的充磁方向如图 3.1 (b) 所示，其磁力线和磁场强度分布如图 3.8 和图 3.9 所示。



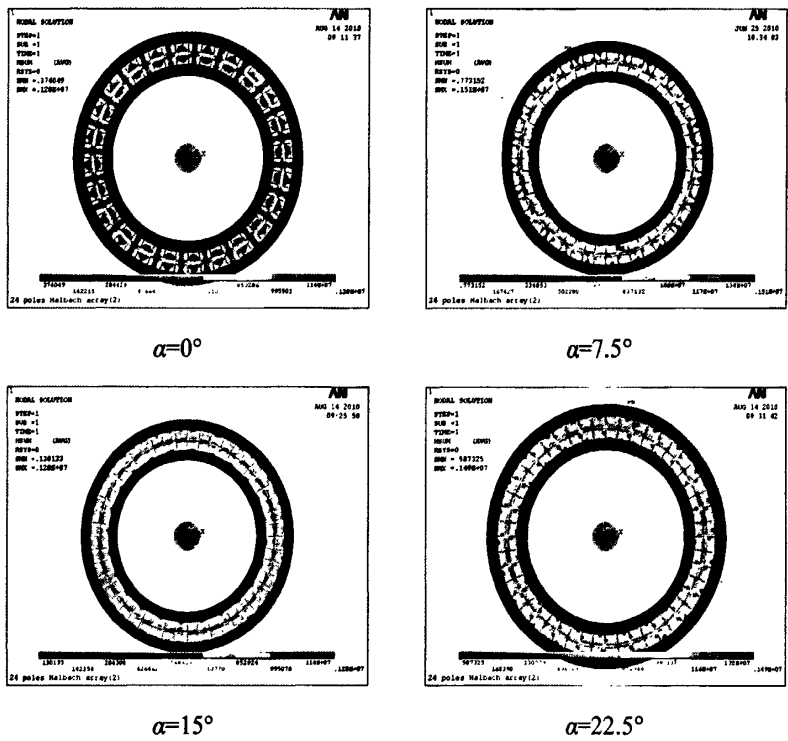
(a) 无隔离套速度效应时的磁力线分布图



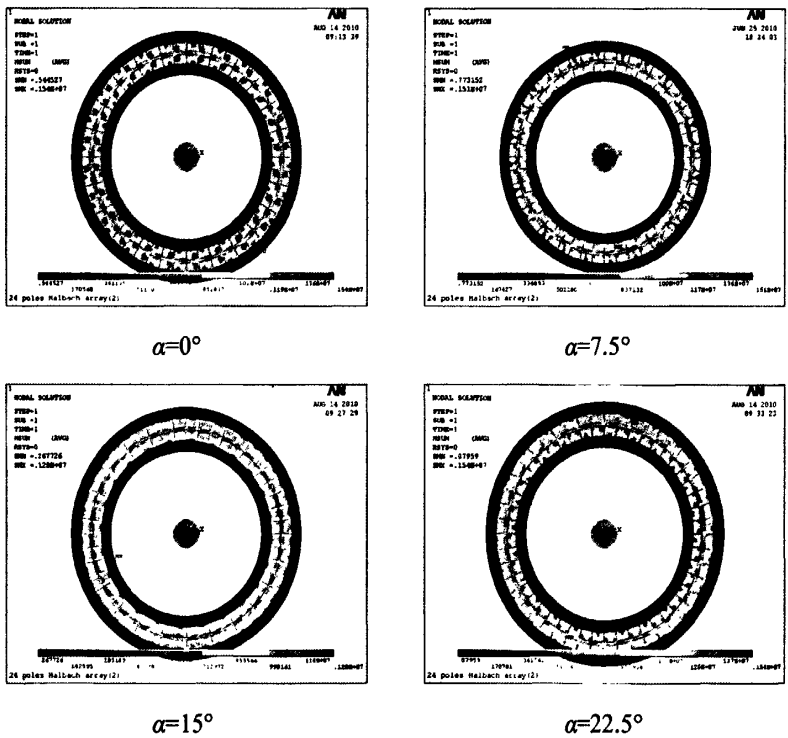
(b) 有隔离套速度效应时的磁力线分布图

图 3.8 Halbach(2)磁力线分布图

Fig.3.8 Magnetic flux distribution of Halbach(2)



(a)无隔离套速度效应时的磁场强度分布云图



(b)有隔离套速度效应时的磁场强度分布云图

图 3.9 Halbach(2)磁场强度分布云图

Fig.3.9 Magnetic field intensity contour of Halbach(2)

从图中可以看出：Halbach(2)型磁力联轴器的磁场分布呈周期性变化，由于 Halbach

阵列的单边聚磁特性，使得永磁体工作气隙侧的磁场强度较强而轭铁侧的磁场强度较弱。但隔离套中由于涡流产生的磁场对原磁场的影响较永磁体为普通排列方式时增强。图 3.10 是转角差为 7.5° 时 Halbach(2)型磁力联轴器隔离套上的涡流分布图，从图中可以看出：隔离套上的涡流呈涡旋状周期性变化，最大值出现在隔离套的最外层，且由外向内逐渐渗透，说明 Halbach(2)型磁力联轴器隔离套上的涡流分布具有“趋肤”特性。

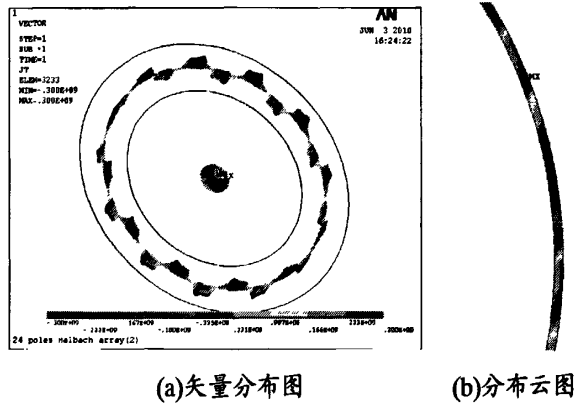


图 3.10 Halbach(2)涡流强度分布图

Fig.3.10 Distribution diagram of eddy current of Halbach(2)

在隔离套考虑有速度效应和无速度效应两种情况下，Halbach(2)型磁力联轴器传动转矩值随内外磁转子之间转角差的变化曲线如图 3.11 所示。从图中可以看出此变化周期同样为 30° ($4\pi/m$)。磁力联轴器在考虑隔离套速度效应时由于涡流的产生使得原磁场的磁场强度降低，因而传动转矩值较无隔离套速度效应时的传动转矩值降低。此种形式的磁力联轴器由于隔离套中的涡流而造成的能量损失约占总传动功率的 11.45%。

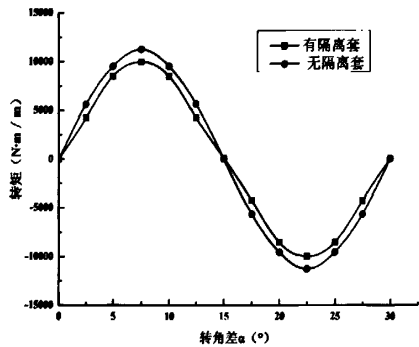
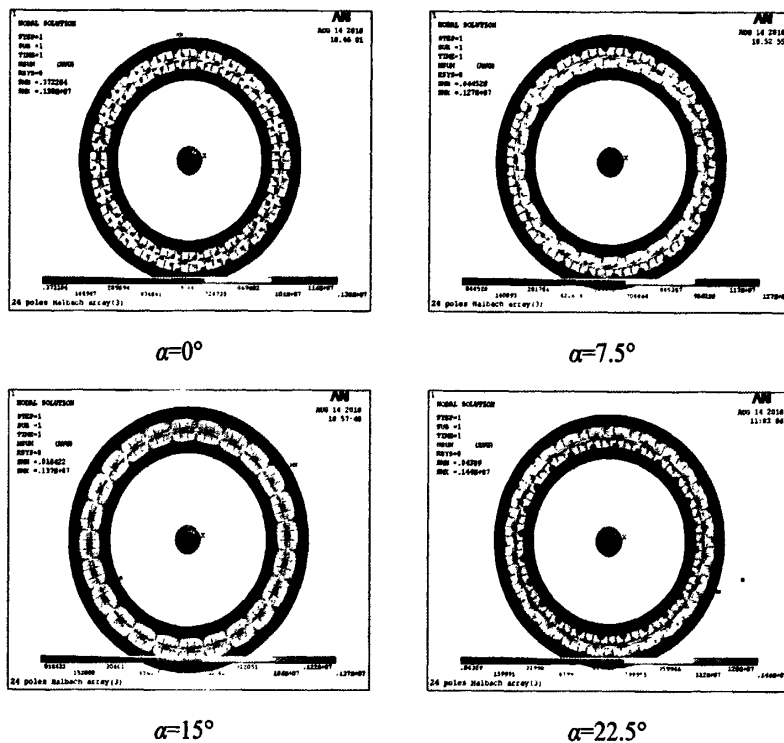


图 3.11 Halbach(2)转矩随转角差的变化曲线

Fig.3.11 Change of torque with different angle deviation of Halbach(2)

3. Halbach(3)

Halbach(3)相邻两段永磁体磁化方向的夹角为 60° ，相邻的三段永磁体粘连在一起为一磁极。Halbach(3)型圆筒式磁力联轴器内外磁转子上永磁体的充磁方向如图 3.1(c)所示。

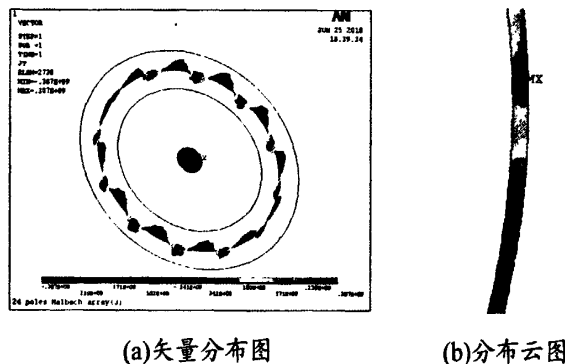


(b)有隔离套速度效应时的磁场强度分布云图

图 3.13 Halbach(3)磁场强度分布云图

Fig.3.13 Magnetic field intensity contour of Halbach(3)

从图中可以看出：Halbach(3)型磁力联轴器的气隙磁场仍然是呈周期性变化，磁场强度主要集中在工作气隙中，减弱了轭铁中的磁场强度，使得工作气隙中的磁场强度较 Halbach(2)型的磁场强度要强，但是隔离套中由于涡流而产生的磁场对原磁场的干扰也相应增强。图 3.14 为转角差 7.5°时 Halbach(3)型磁力联轴器隔离套中的涡流分布图。



(a)矢量分布图

(b)分布云图

图 3.14 Halbach(3)涡流强度分布图

Fig.3.14 Distribution diagram of eddy current of Halbach(3)

从图中可以看出：Halbach(3)型磁力联轴器隔离套上的涡流呈涡旋状周期性变化，最大涡流值出现在隔离套的最外层，且由外向内逐渐渗透，渗透的深度由隔离套的材料性质

决定。因此，由隔离套涡流而产生的热量主要集中在隔离套的最外层。

图 3.15 为在隔离套考虑速度效应和没有速度效应两种情况下，Halbach(3)型磁力联轴器传动转矩随转角差的变化曲线。从图中可以看出其传动转矩值与转角差呈正弦周期性变化，变化周期仍为 30° ，二者之间的差值是由于涡流的产生而造成的能量损失。从图中可以看出，当转角差 $\alpha = 7.5^\circ$ 时，两种情况下的传动转矩都达到最大值，而此时由于涡流造成的损失也达最大值，约为总传动功率的 12.33%，较 Halbach (2) 型有所增加。

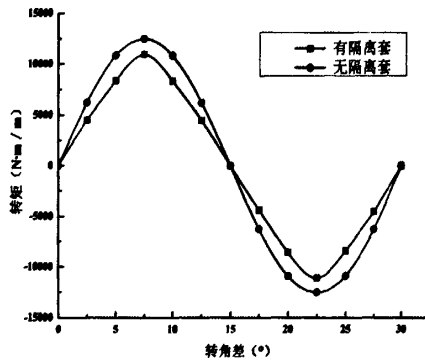
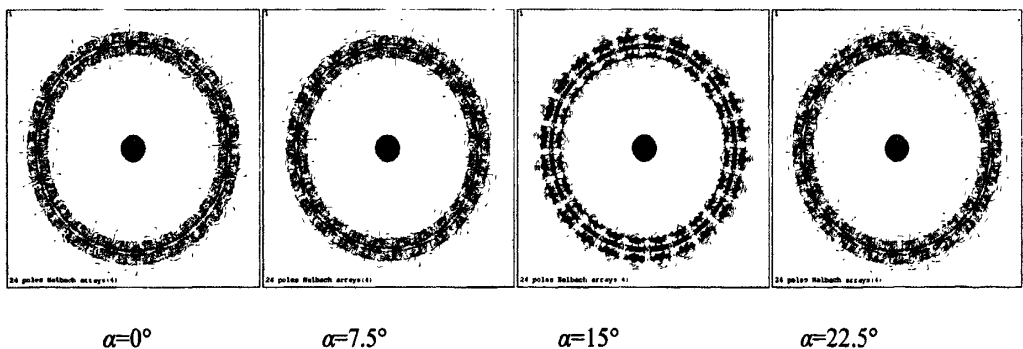


图 3.15 Halbach(3)转矩随转角差的变化曲线

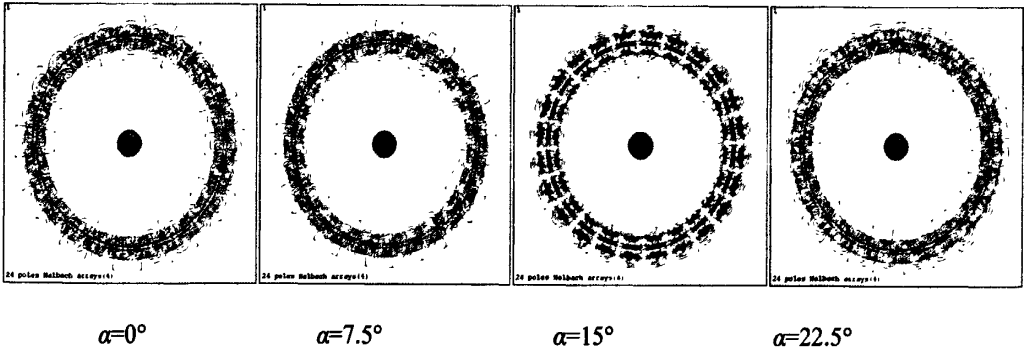
Fig.3.15 Change of torque with different angle deviation of Halbach(3)

4. Halbach(4)

Halbach(4)相邻两永磁体磁化方向的夹角为 45° ，相邻的四段永磁体粘连在一起为一磁极。Halbach(4)型圆筒式磁力联轴器内外磁转子上永磁体的充磁方向如图 3.1(d)所示，其磁化方向沿周向呈 45° 方向旋转变化。图 3.16 和图 3.17 分别为其磁力线分布图和磁场强度分布云图。



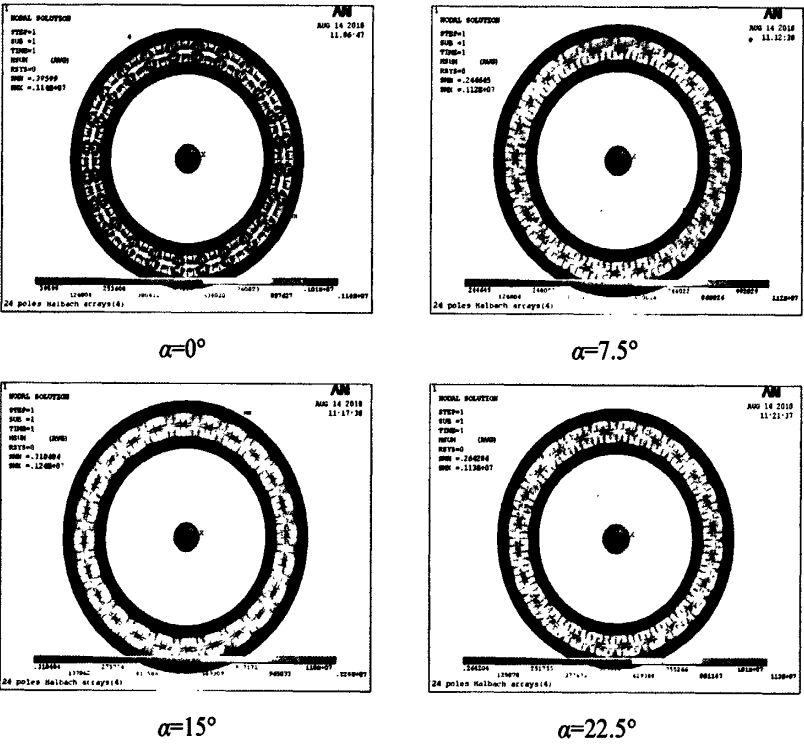
(a) 无隔离套速度效应时的磁力线分布图



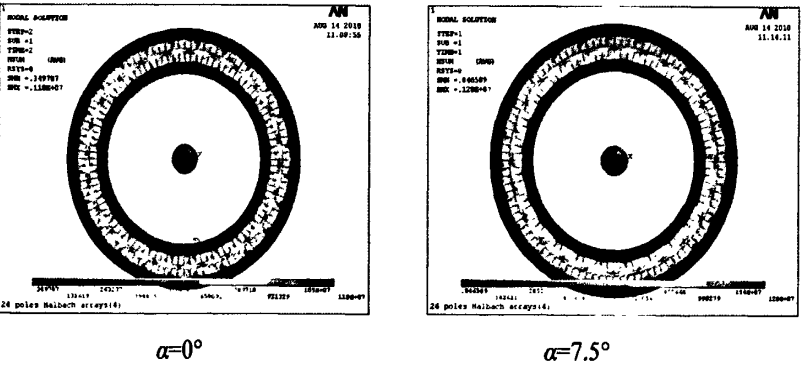
(b)有隔离套速度效应时的磁力线分布图

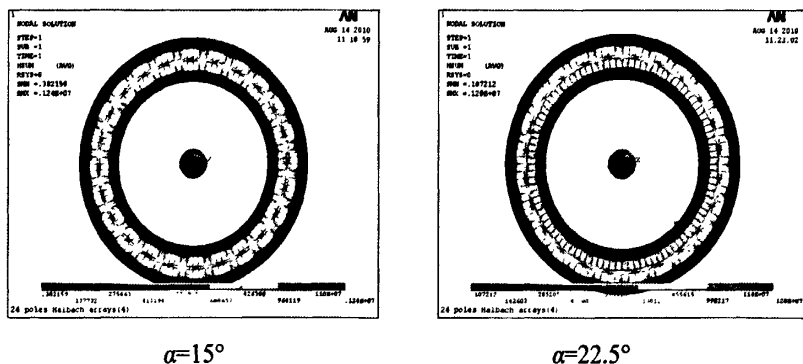
图 3.16 Halbach(4)磁力线分布图

Fig.3.16 Magnetic flux distribution of Halbach(4)



(a)无隔离套速度效应时的磁场强度分布云图





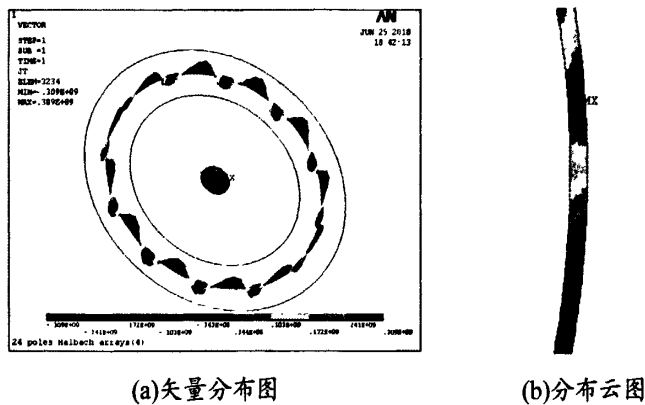
(b)有隔离套速度效应时的磁场强度分布云图

图 3.17 Halbach(4)磁场强度分布云图

Fig.3.17 Magnetic field intensity contour of Halbach(4)

从图中可以看出：Halbach(4)型磁力联轴器的气隙磁场呈周期性变化，且在工作气隙侧的磁场强度较大而轭铁侧的磁场强度较弱。观察图 3.17 发现磁场强度最大值主要集中在工作气隙和隔离套中；由于考虑速度效应时金属隔离套上有涡流产生，产生的涡流又会感生磁场，该磁场方向与原磁场方向相反，从而减弱了原磁场的磁场强度，而且由于涡流的存在使得原磁场的分布不规则。

图 3.18 为转角差 7.5° 时 Halbach(4)型磁力联轴器隔离套上的涡流分布图。从图中可以看出隔离套上的磁涡流呈涡旋状周期性分布，涡流强度的最大值出现在隔离套的最外层，然后由外向内逐渐渗透，反映了隔离套上涡流的“趋肤效应”。



(a)矢量分布图

(b)分布云图

图 3.18 Halbach(4)涡流强度分布图

Fig.3.18 Distribution diagram of eddy current of Halbach(4)

图 3.19 为在考虑隔离套有无速度效应两种情况下，Halbach(4)型磁力联轴器传动转矩随转角差的变化曲线。从图中可以看出，磁力联轴器传动转矩值与转角差呈正弦周期性变化，变化周期为 30° 。两条曲线之间的差值就是由于隔离套的速度效应产生涡流所造成的能量损失，当 $\alpha = 7.5^\circ$ 时，两种情况下的传动转矩都达到最大值，而此时的涡流损失也是

最大值，此时的涡流损失约占总传动能量的 13.13%。

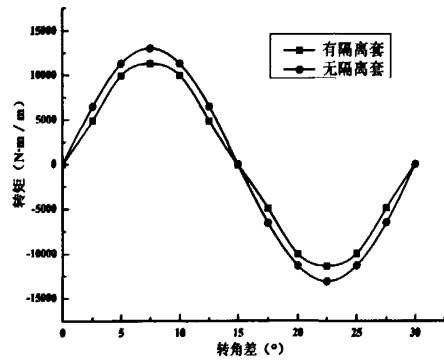


图 3.19 Halbach(4)转矩随转角差的变化曲线

Fig.3.19 Change of torque with different angle deviation of Halbach(4)

对比图 3.4~图 3.17 的磁力线分布图和磁场强度分布云图发现，Halbach(4)型磁力联轴器工作气隙中的磁场强度最大，Halbach(3)型磁力联轴器工作气隙中的磁场强度次之，Halbach(2)型磁力联轴器工作气隙的磁场强度较 Halbach(3)型要弱一些，永磁体为普通排列的磁力联轴器的气隙磁场强度最小，这体现了 Halbach 阵列的优点，即磁场分布具有单边聚磁特性，且每极分段数越多其单边聚磁效应就越好，越接近理想状态。工作气隙中的磁场强度决定着其传动转矩和涡流损失的大小，因此 Halbach(4)型磁力联轴器的传动转矩和涡流损失最大，随着工作气隙中磁场强度的减小磁力联轴器的传动转矩和涡流损失也随之降低，永磁体为普通排列的磁力联轴器的传动转矩和涡流损失最小

3.4.3 各结构参数对传动转矩的影响

1. 转角差对传动转矩的影响

工作气隙中磁场强度的大小影响磁力联轴器的传动转矩值，而内外磁转子之间的转角差是影响气隙磁场的重要因素，当转角差不同时工作气隙中的磁场强度不同，因而磁力联轴器传动转矩值也就不同。图 3.20 为四种永磁排列方式的磁力联轴器在考虑隔离套的速度效应时传动转矩值与转角差的关系。从图中可以看出：永磁体为高聚磁排列方式（每极 2 段、3 段、4 段的 Halbach 阵列）的磁力联轴器传动转矩值明显要大于永磁体为普通排列方式的磁力联轴器的传动转矩值。在这四种永磁体排列方式中，永磁体为普通排列方式的磁力联轴器传动转矩值最小，其最大值为 8808.6 N·m/m；Halbach(4)型磁力联轴器的传动转矩值最大，其最大值为 11340 N·m/m，与普通排列方式的磁力联轴器相比传动转矩值增加了约 28.74%；Halbach(3)型磁力联轴器的传动转矩值仅次于 Halbach(4)型，其传动转矩最大值为 10948 N·m/m，与普通排列方式的磁力联轴器传动转矩值相比增加了约 24.29%；

Halbach(2)型磁力联轴器的传动转矩值小于 Halbach(3)型, 其最大值为 $9975.4 \text{ N}\cdot\text{m/m}$, 与普通排列方式相比传动转矩值增加了约 13.25%。Halbach 型磁力联轴器传动转矩值大于永磁体为普通排列方式磁力联轴器的传动转矩值, 主要是因为 Halbach 阵列磁场的单边聚磁效应, 可以将磁场强度主要集中在磁力联轴器的工作气隙中, 增强了工作气隙中的磁场强度而使传动转矩值增加; 每极分段数越多, Halbach 阵列的单边聚磁特性就越强, 越接近理想状态, 气隙中的磁场强度就越强, 因而传动的转矩值就会越大。

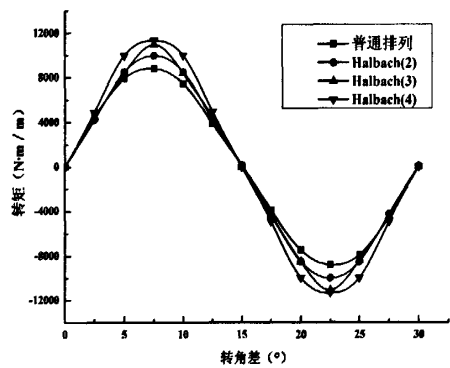


图 3.20 磁力联轴器传动转矩随转角差的变化

Fig.3.20 Change of torque with different angle deviation

2. 隔离套相对磁导率对传动转矩的影响

隔离套是磁力联轴器的重要组成部分, 位于内外磁转子之间的工作气隙中, 与内磁转子外表面和外磁转子内表面保持一定的间隙。它的主要作用是使内外磁转子在工作过程中互不干扰、不摩擦、无接触, 在磁力驱动泵中使泵体密闭、承受压力并且尽量减小对磁场能穿透做功的影响。而隔离套材料的导磁特性直接影响磁力联轴器的气隙磁场, 其导磁特性是通过材料的相对磁导率来表现的。所以, 隔离套的相对磁导率是影响磁力联轴器传动转矩的重要因素, 二者关系如图 3.21 所示。

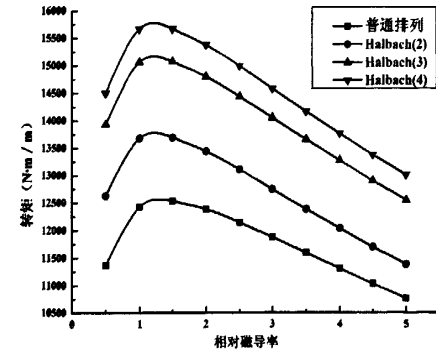


图 3.21 磁力联轴器传动转矩随隔离套相对磁导率的变化

Fig.3.21 Change of torque with relative permeability of isolating shell

从图中可以看出:磁力联轴器传动转矩随着隔离套相对磁导率的增加呈现先增加后减小的趋势。这主要是因为当相对磁导率 $\mu_r < 1$ 时,隔离套的材料表现为抗磁性,这种材料在外加磁场的作用下所产生的磁场与外磁场的方向相反,从而削弱了原磁场的磁场强度,使得磁力联轴器传动转矩值减小;当 $\mu_r = 1$ 时为非磁性材料,外磁场能穿透该材料而不会发生变化,此种情况下隔离套对工作气隙中的磁场几乎没有影响,磁力联轴器传动转矩值不变;当 $\mu_r > 1$ 时材料为顺磁性材料,这种材料的特性是在外加磁场的作用下能产生与外磁场同向的磁场强度,使得外磁场的磁场强度增强,从而使磁力联轴器传动转矩值增加。当相对磁导率达到某一值时,磁力联轴器传动转矩达到最大值,当相对磁导率超过这一值后传动转矩值呈现下降趋势,这是由于随着工作气隙中磁场强度的增加,磁力联轴器传动转矩值和隔离套上产生的涡流损失同时增加,当涡流损失增加的幅值大于传动转矩的增加时,就会出现传动转矩随隔离套相对磁导率的增加而降低的趋势。

3. 工作气隙厚度对传动转矩的影响

工作气隙是指磁力联轴器中内外磁转子之间的工作间隙,其厚度影响磁通密度的分布,进而影响工作气隙中的磁场强度。为了减少其他因素对计算结果的干扰,本计算模型的基本结构如图 3.22 所示,以工作气隙的中心半径为基准,只改变工作气隙的厚度,其他尺寸不变。当转角差为 7.5° 时,对四种永磁体排列方式的磁力联轴器在不同工作气隙厚度时的传动转矩进行计算,结果如图 3.22 所示。

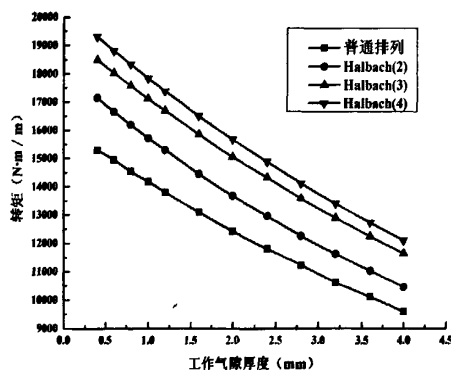


图 3.22 磁力联轴器传动转矩随气隙厚度的变化

Fig.3.22 Change of torque with different air gap

从图中可以看出,不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩随气隙厚度的增加呈现出下降的趋势,且气隙厚度越大下降的速率越缓慢。这是由于随着工作气隙厚度的增加,气隙中的磁通密度降低,对应的磁场强度变弱。对比四条曲线可以发现,永磁体为普通排列方式的磁力联轴器传动转矩值随气隙厚度的变化曲线斜率最小,而 Halbach(4)型磁力联

轴器传动转矩的变化曲线斜率最大,这是由于当气隙厚度相等时,永磁体为普通排列方式的隔离套上产生的涡流损失最小,对原磁场的影响也较小,而 Halbach(4)型磁力联轴器工作气隙中的磁场强度最大,隔离套上产生的涡流损失最大,对原磁场的影响也就最大,所以其曲线的斜率也就最大。这种情况也体现了 Halbach 阵列的高聚磁特性。

4. 永磁体厚度对传动转矩的影响

在磁力联轴器的设计中,永磁体所产生的磁场决定着工作气隙中原磁场。永磁体产生磁场的磁通密度不仅与永磁体所采用的永磁材料有关,还取决于永磁体耦合面上的剩余磁感应强度,而永磁体的厚度影响其耦合面上的剩余磁感应强度,进而对磁力联轴器的传动转矩产生重要影响,二者的关系如图 3.23 所示。

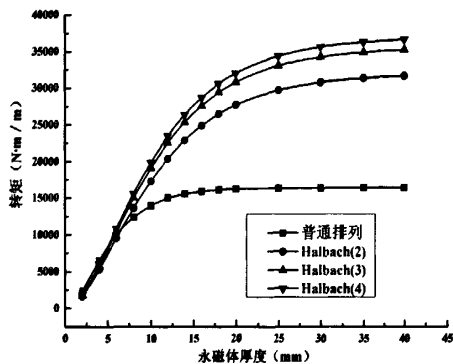


图 3.23 磁力联轴器传动转矩随永磁体厚度的变化

Fig.3.23 Change of torque with different thickness of magnets

从图中可以明显看出:在一定范围内,随着永磁体厚度的增加,各种永磁体排列方式的磁力联轴器所传动的转矩增加较快,且 Halbach 阵列所传动的转矩值较传统磁体排列明显增大,但并没有突出 Halbach 阵列的高聚磁特性。当永磁体厚度增加到 15mm 时,普通排列的磁力联轴器所传递的转矩值趋于饱和,这是因为随着永磁体厚度的增加,磁势、磁阻和漏磁也增加,当厚度增加到一定值以后,所增加的磁势几乎全部消耗在增加的磁阻和漏磁上,对传动转矩的贡献很小;而 Halbach 阵列的转矩值仍呈现出较大的增长趋势,但当永磁体厚度增加到一定值后,其传动的转矩值增加趋势缓慢,这说明在大型磁力联轴器中 Halbach 阵列的高聚磁特性表现的更为突出,其传动性能更加优于永磁体为普通排列方式的磁力联轴器。但是为了提高永磁体的利用率,永磁体的厚度不宜太大。

5. 轭铁厚度对传动转矩的影响

在永磁体为普通排列方式的磁力联轴器中,轭铁的主要作用是防止外磁场对内部磁场的干扰和影响;改变磁路中的磁感应强度,调整漏磁的大小;可以定向改变磁路中磁感应

强度的空间分布,使其分布在磁力联轴器的工作气隙中。在磁力联轴器中使用轭铁能明显提高其传动性能,其传动性能提高到不加轭铁时的 120%左右^[2]。而 Halbach 阵列本身具有磁屏蔽作用,可以将磁场集中在工作气隙一侧,因此轭铁对不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩的影响是不同的,二者关系如图 3.24 所示。

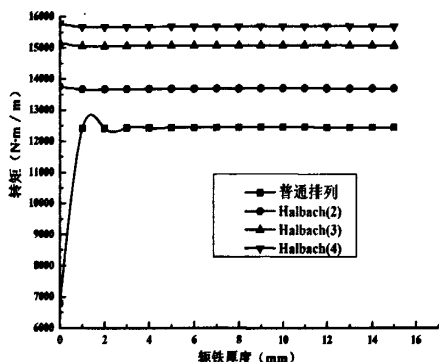


图 3.24 传动转矩随轭铁厚度的变化

Fig.3.24 Change of torque with different thickness of yoke

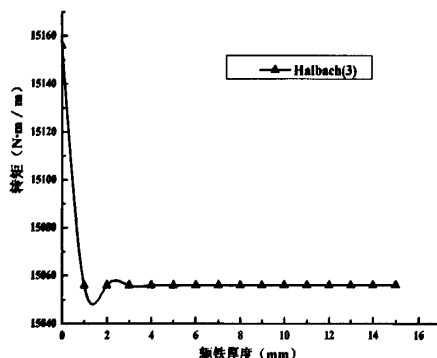


图 3.25 Halbach(3)传动转矩随轭铁厚度的变化

Fig.3.25 Change of torque with different thickness of yoke

从图 3.24 中可以明显看出:永磁体为普通排列的磁力联轴器随轭铁厚度的增加其传动转矩迅速增加,当轭铁厚度增加到一定值后其传动转矩值不再增加。Halbach 阵列的磁力联轴器随轭铁厚度的增加传动转矩值变化不明显,为了更清楚的说明其变化趋势,图 3.25 示出了 Halbach(3)型磁力联轴器传动转矩随轭铁厚度的变化曲线。从中可以清楚看出随着轭铁厚度的增加, Halbach 阵列的磁力联轴器传动转矩降低,但是变化不大,达到一定值以后不再变化。这主要是因为 Halbach 阵列自身的磁屏蔽作用,可以将磁场集中在工作气隙一侧,以至于在磁力联轴器不使用轭铁时传动转矩值最大,而对较小尺寸的轭铁会出现磁饱和现象,从而使其传递的转矩值有所降低,从图中可以看出影响很小,可以认为轭铁不会对 Halbach 阵列的传动性能产生影响。因此在设计 Halbach 型磁力联轴器时可以取消轭铁结构,这样可以减小磁力联轴器的结构尺寸,降低整体质量,从而减小传动机构的转动惯量及其惯性转矩值。

3.5 小结

本章主要利用 ANSYS 软件研究磁力联轴器的空间磁场分布情况及传动转矩的计算,主要内容有:

1) 阐述了磁力联轴器气隙磁场有限元分析的理论基础,介绍了商用软件 ANSYS 在电磁场分析中的应用。

2) 应用 ANSYS 软件对 4 种不同永磁体排列方式的磁力联轴器的空间磁场进行模拟, 对比分析它们空间磁场的分布特点, 结果表明所有型式的磁力联轴器空间磁场都呈周期性分布。

3) 利用 ANSYS 软件的后处理功能计算四种不同永磁体排列方式的磁力联轴器的传动转矩并进行对比, 分析磁力联轴器各结构参数以及材料性能对传动转矩的影响, 说明将 Halbach 阵列应用于磁力驱动泵的优越性。

第四章 磁力联轴器涡流场的有限元分析

通过对 24 极式磁力联轴器气隙磁场的有限元分析,可以得到工作气隙中磁场的分布状况,分析了结构参数对磁力联轴器传动转矩的影响。本章将结合工作气隙中的磁场分布特点和电磁场基本理论来分析隔离套中的涡流分布以及所造成的功率损失。

4.1 磁力联轴器涡流概述

圆筒式磁力联轴器隔离套的筒体部分位于内外磁转子之间的工作气隙中,是一个薄壳结构的固定密封部件。当内外磁转子同步旋转工作时,隔离套处于大小和方向都在不断变化的工作磁场中,因此金属隔离套的筒体部分在垂直于磁力线方向的截面上就会感应出涡电流,并产生大量的热量。磁力联轴器的涡流发热问题将会造成很大的功率损失,使磁力联轴器的传动效率降低。正常情况下在转速为 2900r/min 时,金属隔离套的涡流损失功率约占总传动功率的 10~30%,特殊情况下涡流损耗功率甚至超过总传动功率的 50%^[63],尤其是高转速和大功率的磁力驱动泵,涡流损失功率在数值上更大。如果不及时对磁力联轴器进行冷却,则有可能造成内外磁转子上永磁体退磁、隔离套过热损坏等严重后果,并最终使磁力联轴器失去传动特性而失效。因此,磁力联轴器的涡流问题将直接关系到其运行的可靠性和稳定性。

对于磁力驱动泵,只有从量值上较为准确地掌握涡流损失功率,才能比较准确的确定其效率,并进行合理的动力配套和冷却系统的设计,这也是发展高温、高压和大功率磁力驱动泵的必然前提。

4.2 涡流场有限元分析简介

4.2.1 发展现状

磁力联轴器金属隔离套中磁涡流的产生,使得工作气隙中原本单一的旋转磁场转化为磁场和感应电场的耦合场,增加了确定涡流损失大小的困难。目前,国内外学者在对磁力联轴器磁涡流场的研究中积累了大量的经验,对涡流损失功率的计算也主要依靠经验公式法,表 2.1 列出了基于 Maxwell 方程组推导出来的常用涡流损失功率的计算公式。随着计算机技术的发展和 CAE 技术的不断应用,已经能够快速准确的对气隙磁场进行数值模拟、磁场参数计算等。表 4.1 列出了国内外学者对涡流场的主要研究。目前,采用有限元法对磁力联轴器涡流场进行的分析研究相对较少,对导体中涡流场的准确预测是计算涡流功率

损耗和传动效率的前提。涡流场按照场矢量和相应的电磁位随时间的变化规律可以分为两类：瞬态场和正弦稳态场。正弦稳态场是瞬态场的一种特殊情况，因此本章将利用 ANSYS 软件对磁力联轴器的涡流场进行瞬态分析，得出隔离套中所产生涡流的分布状况以及由涡流所导致的能量损失，分析各种因素对涡流损失功率大小的影响。

表 4.1 国内外学者对涡流场的研究^[64-70]

Tab.4.1 Study on eddy current field of all over the world scholars

时间	学者	主要研究
1983 年	Yoshimoto T	在忽略定子磁极结构的前提下首先用有限元法计算了实心转子内涡流对磁场的影响。
2002 年	孙岩桦，虞烈	在对实心转子电磁轴承涡流场损耗进行分析时，利用有限元法分析了转子内涡流场的分布及其对磁极和气隙中主磁场的影响。
2006 年	付敏，邹继斌等	采用三维有限元法对 U 型单相自启动永磁同步电机的涡流场进行分析，得到了铜皮套筒内的涡流分布及其损耗。
2006 年	赵韩，李露等	以一块变压器的铁心叠片即薄平半导体为模型，用有限元方法直观地表现因涡流效应而引起的磁场和电流的变化，并分析了影响涡流大小的因素和减小涡流损害的方法。
2006 年	杨通，周理兵等	利用 ANSYS 软件建立实心笼型异步电机二维有限元模型，分析了在考虑磁路饱和情况下电机启动时转子中的涡流分布情况并计算了转子笼条和实心体中的涡流损耗。
2007 年	王晓远，李娟等	在考虑电机运动效应时采用瞬态计算对盘式永磁同步电机永磁体内的涡流进行有限元分析并绘制了磁矢量位和涡流的波形图。

4.2.2 控制方程

涡流场分析的理论基础是 Maxwell 方程组，由于磁力联轴器中不存在静止的电荷，因此可将 Maxwell 方程组简化为^[59]：

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = 0 \end{cases} \tag{4.1}$$

式中各物理量意义同前一章所述。

在实际电磁场求解过程中,为了使上述方程组求得唯一解,还必须附加描述电磁物质属性的本构方程^[71]:

$$\begin{cases} \bar{D} = \varepsilon \bar{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \bar{E} \\ \bar{J} = \sigma [\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}] \\ \bar{B} = \mu \bar{H} = \mu_r \mu_0 \bar{H} \end{cases} \quad (4.2)$$

式中 ε ——介电常数, F/m^2 ;

ε_r ——相对介电常数;

ε_0 ——真空介电常数, F/m^2 ;

σ ——电导率, S/m ;

μ ——磁导率, H/m ;

μ_r ——相对磁导率;

μ_0 ——真空磁导率, H/m ;

v ——导体运动速度, m/s .

当考虑材料的非线性特性时,存在 $\bar{B} = \mu \bar{H}$, 此时有 $\mu = \mu(\bar{H})$ 。对于各向异性材料,其电导率 σ 和磁导率 μ 为一矩阵。

Maxwell 方程组在解决具体问题时还需要用到矢量 $\bar{B}$ 、 $\bar{E}$ 、 $\bar{J}$ 所满足的偏微分方程,由于磁力联轴器中不存在自由电荷,所以其满足的微分方程为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \bar{B} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \\ \nabla^2 \bar{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \\ \nabla^2 \bar{J} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{J}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{J}}{\partial t} \end{cases} \quad (4.3)$$

介电常数 ε 又称电容率,是指介质在外加电场时产生的感应电荷削弱原电场,原外加电场与最终介质中电场的比值。它是用来衡量绝缘体储存电能的性能,因此在导电介质中,方程右端第一项可忽略,上式变为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \bar{B} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \\ \nabla^2 \bar{E} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \\ \nabla^2 \bar{J} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{J}}{\partial t} \end{cases} \quad (4.4)$$

此方程是研究导电介质中涡流问题和集肤效应的基础，称为涡流方程。

在求解上述方程过程中为了求解的方便，引入了矢量磁位 $\bar{A}$ 、标量磁位 ϕ ：

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (4.5)$$

$$\phi = -\frac{\mu}{\sigma} \nabla \cdot \bar{A} \quad (4.6)$$

由于金属隔离套上没有源电流，只存在因其转动而产生的涡流，所以隔离套上的涡流密度为：

$$\bar{J} = \bar{J}_e \quad (4.7)$$

在考虑导体的速度效应时，导体中的涡流密度为：

$$\bar{J}_e = \sigma \left[-\nabla \phi + \bar{v} \times (\nabla \times \bar{A}) \right] \quad (4.8)$$

4.3 磁力联轴器二维涡流场的有限元分析

4.3.1 二维涡流场有限元分析模型

1. 基本假设

(1) 内外磁转子之间的工作气隙尺寸远小于其轴向尺寸，在忽略永磁体端部效应的前提下，将气隙磁场分布的三维问题转化为二维问题进行处理。

(2) 在磁转子的平均半径平面上，其物理参数是周期性变化的。

(3) 磁力联轴器内外磁转子的轭铁均为导磁体且足够厚，在轭铁处不发生磁饱和现象，可以忽略内磁转子轭铁内侧和外磁转子轭铁外侧的漏磁场，永磁体产生的磁场全部作用在工作气隙中。

(4) 忽略材料相对磁导率随温度的变化，永磁体和轭铁材料相对磁导率为常数。

(5) 每一块永磁体沿径向均匀充磁。

2. 创建物理环境

利用 ANSYS 软件进行有限元分析时,首先要确定所选用的单元类型、设定节点自由度、设置实常数、定义材料属性等。本文在分析过程中要考虑到隔离套的速度效应,因此隔离套选用 Plane53 作为分析单元,定义其节点自由度为 Keyopt(1)磁矢势 AZ 和采用通用速度方程的 Keyopt(2),设置实常数为转速 OMEGAZ;其他结构静止不动,选择 Plane53 为分析单元,只定义节点自由度为 Keyopt(1)磁矢势 AZ。由于每块磁性材料的充磁方向均不相同,需要定义局部坐标系以便于设置永磁材料属性。设置隔离套和空气隙的相对磁导率为 1,进行瞬态分析时需要分析隔离套上产生涡流的分布以及涡流的功率损失,需设置隔离套的电阻率为 $0.75e-7$, 轭铁的相对磁导率为 8000,其他部件的材料属性见表 3.2。

3. 建立模型及网格划分

利用 ANSYS12.0 软件对不同永磁体排列方式的磁力联轴器建立模型,如图 3.3 所示。对建立好的模型的各个区域指定单元类型、自由度选项、实常数,确定分析单元的坐标系并分配材料属性。为了确保计算结果的精度,选用四边形网格对建立的模型进行网格划分,设定四边形网格的长宽比例。在进行涡流场分析时,内外磁转子之间的工作气隙是重点关注区域,应将网格画的密一些,其他区域的网格可由小到大逐渐过渡。

瞬态分析时,金属隔离套中产生涡流,由于涡流的集肤效应,涡流场将向隔离套表面积聚,集肤深度为 $\delta = (\pi\mu\omega\sigma)^{-1/2}$, 其中, δ 为集肤深度, μ 为绝对磁导率, ω 为旋转角速度, σ 为电导率^[72]。对涡流场的计算精度要求较高时,划分的有限元单元在隔离套表面附近必须足够细,以便捕捉到涡流的集肤现象。因此,要求隔离套上至少要有一层或两层单元。图 4.1 为隔离套和气隙处划分网格的局部放大图。

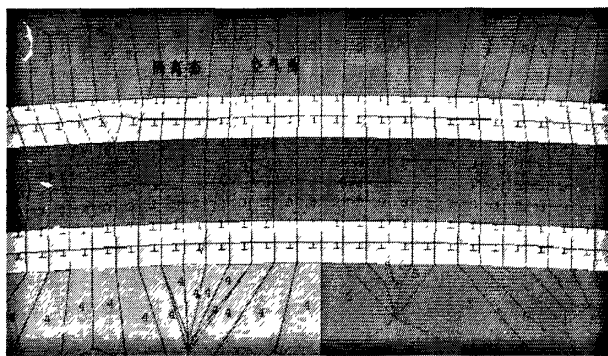


图 4.1 隔离套和空气隙处的局部网格放大图

Fig.4.1 Partial enlargement of mesh of the isolating shell and air gap

4. 施加边界条件和载荷

网格划分完以后,需要对分析的物理模型施加边界条件和载荷。由于磁力联轴器磁转子的内外轭铁均为导磁体且足够厚,磁场在轭铁处不发生磁饱和现象,且内轭铁的内侧和

外轭铁的外侧是空气，则在边界处轭铁材料的相对磁导率远大于空气的相对磁导率，故可认为该边界处只存在第一类边界条件，即在该边界处施加磁力线平行于边界的条件，设定边界处的节点 $AZ=0$ 。磁力联轴器隔离套中涡流是由于隔离套切割磁力线所产生的，故不需要施加电流激励源。将内磁转子上的单元组设置为一个组件并施加力矩标志。

4.3.2 计算结果与分析

选择瞬态分析选项，由于计算模型中考虑了隔离套的速度效应，故以 Sparse solver(稀疏矩阵求解器)为求解器，定义磁力联轴器分析的时间步长为一个周期，对每一个循环周期取 20 个时间子步作瞬态分析，根据有限元计算结果绘出涡流强度随时间变化的波形图并分析永磁体内涡流功率损耗的影响因素。图 4.2 为磁力联轴器工作气隙中任意一点处的磁感应强度 B 随时间的变化曲线。

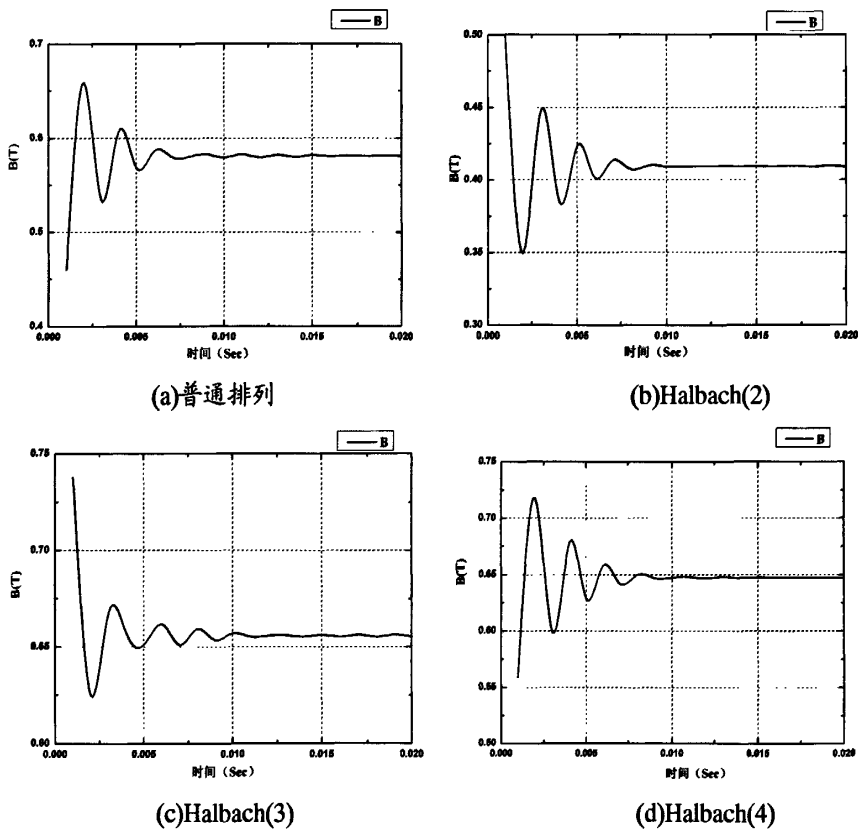


图 4.2 磁感应强度 B 随时间的变化曲线

Fig.4.2 Curve of magnetic flux density with time

从图中可以清楚的看出：起始时刻，不同永磁体排列方式的磁力联轴器工作气隙中的磁通密度随时间的变化波动都较大；随着时间的推移，当起动时间大约为 0.010Sec 时，工作气隙中的磁通密度都趋于稳定，说明此时工作气隙中的磁场已趋于稳定，磁力联轴器

处于稳定工作状态。由此可知：磁力联轴器在起动瞬间会出现震动现象，但稍后就会消失。由于不同永磁体排列方式磁力联轴器工作气隙中选取点的位置不同，造成磁感应强度随时间变化的波形图有区别，但总的变化趋势基本相同。图 4.3 为不同永磁体排列方式的磁力联轴器隔离套上内外两侧任意一点处所产生的涡流强度随时间的变化曲线。

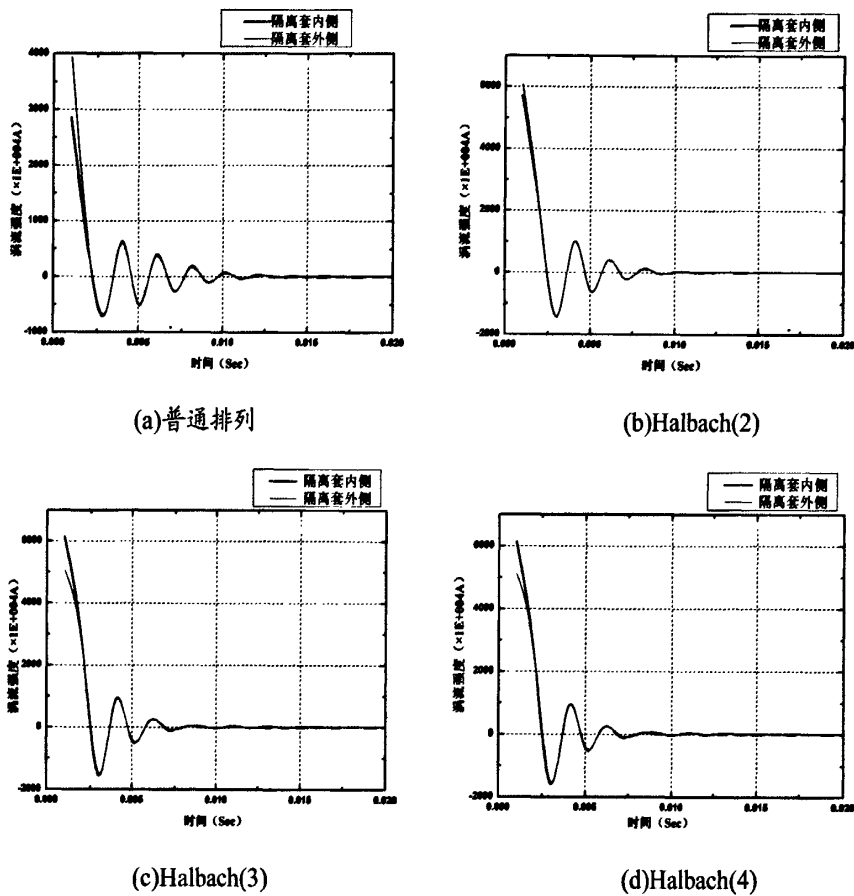


图 4.3 涡流强度随时间的变化曲线

Fig.4.3 Curve of eddy current with time

从图中可以清楚的看出：起始时刻由于工作气隙中的磁感应强度急剧变化，使得初始时刻隔离套上所感生的涡流强度较大，随着时间的变化，涡流强度的变化逐渐趋于缓和。当磁力联轴器工作间隙中的磁感应强度趋于稳定时，隔离套上所产生的涡流强度变化也逐渐平稳。图 4.4 为不同永磁体排列方式的磁力联轴器工作平稳时隔离套上所产生的涡流强度随时间的变化曲线。从中可以看出：磁力联轴器平稳工作时隔离套上所产生的涡流与时间呈正弦曲线、周期性变化关系。由于隔离套上产生的涡流具有“集肤效应”，使其主要集中在隔离套的外表面上，然后由外向内逐渐渗透，所以隔离套外侧的涡流强度大于内测的涡流强度且内侧涡流强度的变化总是滞后于外侧涡流强度的变化。

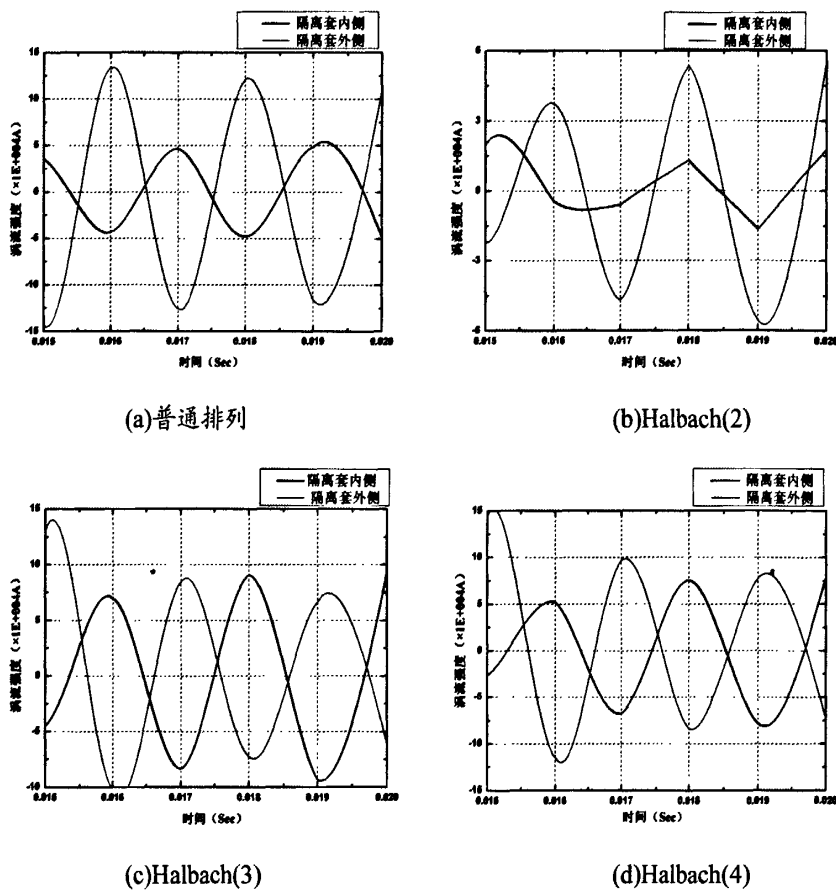


图 4.4 稳定时刻涡流强度随时间的变化曲线

Fig.4.4 Curve of eddy current with time at stable

图 4.5 为隔离套上的涡流损失功率随时间的变化曲线。从图中可以看出：隔离套上产生涡流造成的损失在起始时刻波动幅值较大，这是因为在起始时刻隔离套上产生的涡流强度值最大，但由于时间较短隔离套产生的热量较少，所以此刻磁力联轴器的涡流损失功率较小。随着磁力联轴器的工作趋于平稳，涡流损失功率也趋于稳定值。

永磁体为普通排列方式的磁力联轴器稳定工作时隔离套上的涡流损失功率为 304.4kW/m，约占总传动功率的 10.17%；Halbach(2)型磁力联轴器稳定工作时隔离套上的涡流损失功率为 312.8kW/m，约占总传动功率的 10.33%；Halbach(3)型磁力联轴器稳定工作时隔离套上的涡流损失功率为 347.3kW/m，约占总传动功率的 10.45%；Halbach(4)型磁力联轴器稳定工作时隔离套上的涡流损失功率为 360.8kW/m，约占总传动功率的 10.48%。这说明由于 Halbach 阵列的单边聚磁特性，使得 Halbach 型磁力联轴器的涡流损失功率较大，且每极分段数越多的 Halbach 型磁力驱动泵的涡流损失功率就越大。

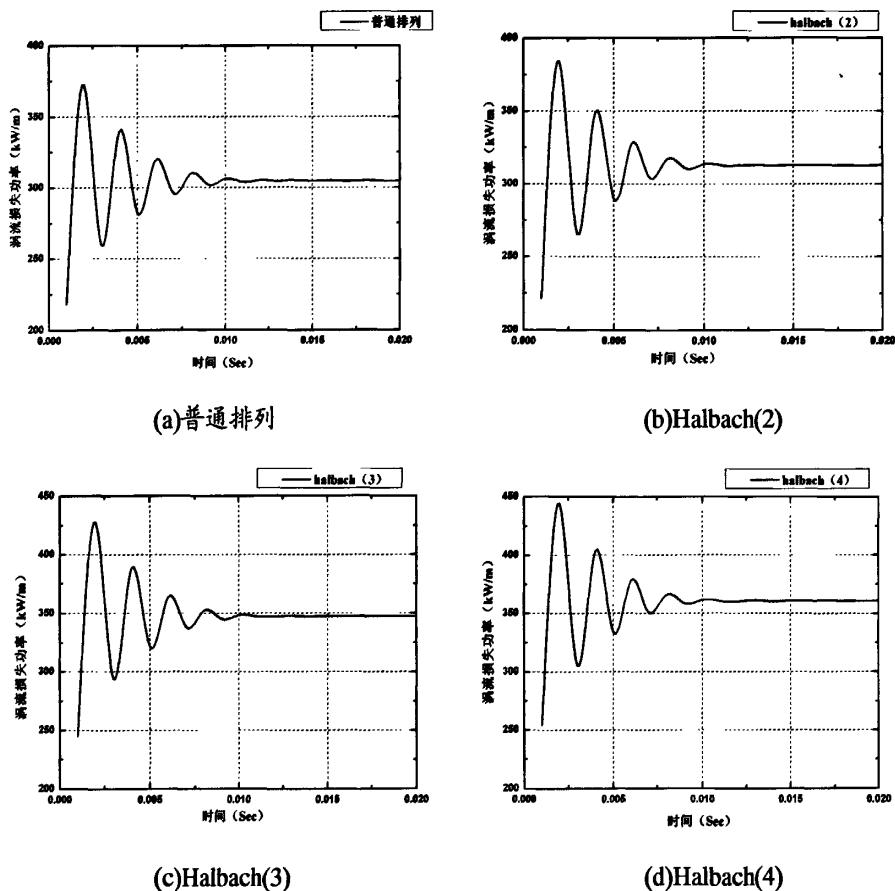


图 4.5 涡流损失功率随时间的变化曲线

Fig.4.5 Curve of eddy current loss power with time

通过对不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩的分析得出:与普通永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩值相比较, Halbach(2)型磁力联轴器传动转矩值增加了约 13.25%, Halbach(3)型磁力联轴器的传动转矩值增加了约 24.29%, Halbach(4)型磁力联轴器的传动转矩值增加了约 28.74%。由此可见采用高聚磁排列方式(Halbach(2)、Halbach(3)、Halbach(4))的磁力联轴器中的涡流损失功率虽然增加了,但其传动转矩值同样也增加且增加的速率大于涡流损失功率增加的速率,所以将高聚磁排列方式应用到磁力联轴器中时其传动的效率得到提高,传动性能明显得到增强,同时使得高转矩、超高转矩磁力驱动泵的研究与制造成为可能。

4.3.3 参数对涡流损失功率的影响

从以上分析可知:磁力联轴器的工作气隙厚度、永磁体厚度等影响工作气隙中的磁场强度,因而也会对隔离套上的涡流损失产生影响;隔离套本身的特性如隔离套的电阻率、厚度、半径和相对磁导率以及电动机的转速等是影响涡流损耗的主要因素。当内外磁转子

之间的转角差为磁极张角一半($\alpha/2$)时,磁力联轴器的传动转矩最大,因此本文以内外磁转子之间的转角差为 $\alpha/2$ 时的磁力联轴器为研究对象,分析各参数对隔离套涡流损失功率的影响。

1. 磁转子转速对涡流损失功率的影响

磁力联轴器隔离套上的涡流损失是由于金属隔离套在工作气隙中相对磁转子运动并切割磁力线产生电流,导致隔离套发热而造成一定的能量损失。因此,磁转子运动的快慢将直接影响产生的涡流大小,进而影响涡流损失功率并最终影响磁力驱动泵的传动效率。在其他参数不变的情况下,在一定范围内只改变磁转子的转速,则隔离套中的涡流损失功率将发生相应的变化,二者的关系如图 4.6 所示。

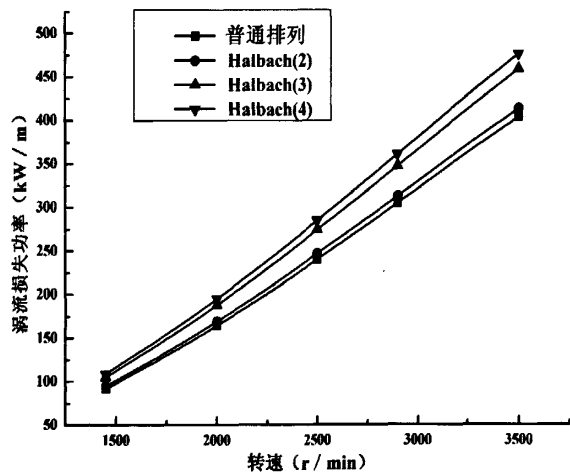


图 4.6 涡流损失功率随磁转子转速的变化

Fig.4.6 Change of eddy current power loss with different speed

图 4.6 为不同永磁体排列方式的磁力联轴器隔离套上的涡流损失功率随磁转子转速变化的曲线。从图中可以看出:当转速较低时,不同永磁体排列方式的磁力联轴器中的涡流损失功率差别不大;随着磁转子转速的增加,隔离套中的涡流损失功率呈上升趋势,且转速越大其涡流损失功率增加的速率就越大。这是因为转速越大,工作气隙中磁场强度的变化频率就越快,导致隔离套中的涡流强度越大,隔离套因产生热量而造成的能量损失也就随之增加。与普通排列方式磁力联轴器中的涡流损失功率相比较, Halbach(2)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 2.72%, Halbach(3)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 14.13%, Halbach(4)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 18.56%。

2. 隔离套电阻率对涡流损失功率的影响

金属隔离套在工作气隙磁场中切割磁力线产生电流,导致隔离套发热造成一定的能量

损失,而非金属隔离套在磁场中运动不会产生电流,避免了因电流发热而造成的能量损失。电阻率是用来衡量各种物质电阻特性的物理量,反映物质对电流的阻碍作用,电阻率越大,对电流的阻碍作用就越大,该物质在变化的磁场中就越不易感生电流,因此隔离套的电阻率是影响涡流损失功率的一个重要因素。保证其他参数不变,在一定范围内改变隔离套的电阻率,则隔离套中的涡流损失功率也会发生相应的变化,二者的关系如图 4.7 所示。

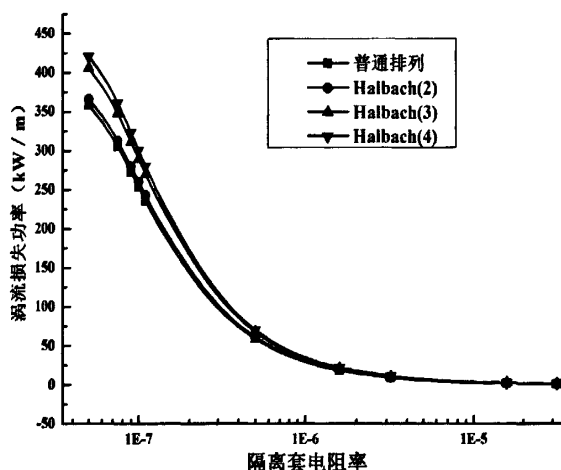


图 4.7 涡流损失功率随隔离套电阻率的变化

Fig.4.7 Change of eddy current power loss with different resistivity of isolating shell

图 4.7 为不同永磁体排列方式的磁力联轴器隔离套中的涡流损失功率随隔离套电阻率变化的曲线。从图中可以清楚的看出:隔离套的电阻率较小时,其导电特性较大,不同永磁体排列方式的磁力联轴器中的涡流损失功率差别较明显,随着隔离套电阻率的增加,隔离套中的涡流损失功率急剧下降,但变化趋势逐渐趋于平缓,且涡流损失功率逐渐趋近于 0,不同永磁体排列方式的磁力联轴器中的涡流损失功率之间的差别也逐渐趋于 0。说明采用电阻率较大的隔离套时,高聚磁排列方式磁力联轴器的传动性能更加优越。与永磁体为普通排列方式磁力联轴器的涡流损失功率相比, Halbach(2)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 2.92%, Halbach(3)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 14.41%, Halbach(4)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 18.89%。

3. 隔离套厚度对涡流损失功率的影响

由分析可知,涡流在隔离套上的分布呈涡旋状周期性变化,最大值出现在隔离套的最外侧且由外向内逐渐渗透。因此隔离套厚度影响磁力联轴器中涡流的分布及其损失功率的大小。因此在其他参数不变的前提下,在一定范围内改变隔离套的厚度,隔离套中的涡流损失功率随之发生变化,二者关系如图 4.8 所示。

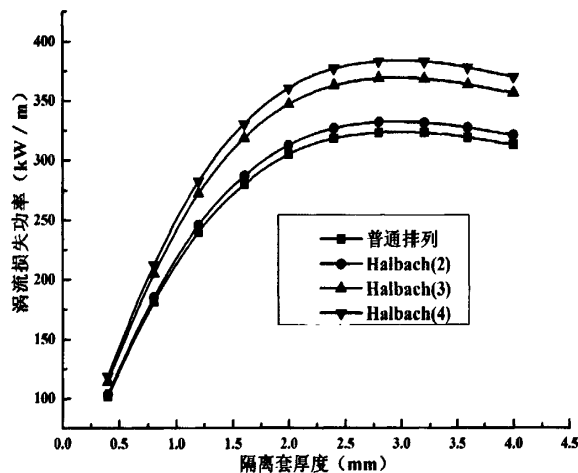


图 4.8 涡流损失功率随隔离套厚度的变化

Fig.4.8 Change of eddy current power loss with different thickness of isolating shell

图 4.8 为不同永磁体排列方式的磁力联轴器隔离套中的涡流损失功率随隔离套厚度的变化曲线。从图中可以清楚地看出：当隔离套厚度较小时，不同永磁体排列方式的磁力联轴器中的涡流损失功率之间的差别较小，随着隔离套厚度的增加，隔离套中的涡流损失功率急剧增加，但增加速率逐渐减小。但当隔离套厚度增加到一定值以后，随着隔离套厚度的增加，隔离套中的涡流损失功率有下降的趋势，这主要是因为随着隔离套厚度的增加，隔离套中产生的涡流强度对原磁场的影响增大，且增大速率大于涡流损失功率增加的速率，使得原磁场强度迅速降低。与永磁体为普通排列方式的磁力联轴器的涡流损失功率相比较，Halbach(2)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 2.46%，Halbach(3)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 13.66%，Halbach(4)型磁力联轴器的涡流损失功率增加了约 18.04%。

4. 隔离套半径对涡流损失功率的影响

由前面的分析可知隔离套的半径是影响隔离套中涡流损失功率的重要因素，在一定范围内改变隔离套的半径，隔离套中的涡流损失功率也发生一定的变化。为了减小其他因素对计算结果的干扰，选用隔离套中心半径为研究对象，在保证其他参数不变的前提下，在一定范围内改变隔离套的中心半径，则隔离套中的涡流损失功率的变化曲线如图 4.9 所示。

从图中可以清楚地看出：随着隔离套半径的增加，隔离套中的涡流损失功率呈现上升趋势，二者之间几乎为线性变化关系。高聚磁排列方式（Halbach 阵列）的磁力联轴器中的涡流损失功率要大，与永磁体为普通排列方式的磁力联轴器中的涡流损失功率相比较，此种情况，Halbach(2)型磁力联轴器中的涡流损失功率增加了约 8.49%，Halbach(3)型磁力联轴器中的涡流损失功率增加了约 20.30%，Halbach(4)型磁力联轴器中的涡流损失功率增

加了约 24.90%。

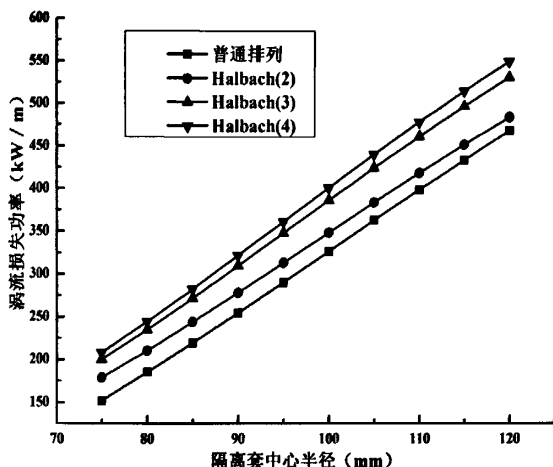


图 4.9 涡流损失功率随隔离套半径的变化

Fig.4.9 Change of eddy current power loss with different radius of isolating shell

5. 隔离套相对磁导率对涡流损失功率的影响

材料的绝对磁导率是表征该材料的磁性、导磁性以及磁化难易程度的物理量，而相对磁导率是指磁性材料本身的绝对磁导率和真空磁导率的比值，在实际应用中一般用材料的相对磁导率代替其绝对磁导率来表征材料的磁性、导磁性以及磁化的难易程度等。磁力联轴器正常工作时，隔离套位于周期变化的旋转磁场中，其相对磁导率的大小表明隔离套导磁的难易程度和对工作气隙中原磁场的影响程度。保证其他参数不变，在一定范围内只改变隔离套的相对磁导率，隔离套中的涡流损失功率随之发生变化，二者关系如图 4.10 所示。

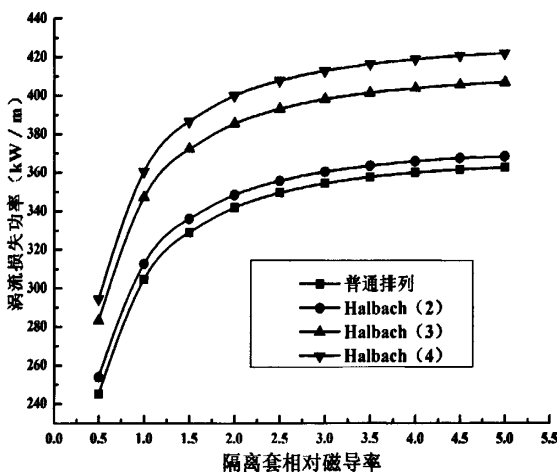


图 4.10 涡流损失功率随隔离套相对磁导率的变化

Fig.4.10 Change of eddy current power loss with different relative permeability of isolating shell

从图中可以清楚地看出：随着隔离套相对磁导率的增加，隔离套中的涡流损失功率急

剧增加,但是增加速率逐渐降低使得曲线的变化趋于平坦。高聚磁排列方式的磁力联轴器中的涡流损失明显要大,与普通永磁体排列方式的磁力联轴器中的涡流损失相比较, Halbach(2)型磁力联轴器中的涡流损失功率增加了约 2%, Halbach(3)型磁力联轴器中的涡流损失功率增加了约 12.87%, Halbach(4)型磁力联轴器中的涡流损失功率增加了约 17.13%。

4.4 小结

本章利用 ANSYS 软件对磁力联轴器隔离套中的涡流场进行瞬态分析,计算其涡流损失功率并分析各种因素对涡流损失功率的影响,主要包括:

1) 阐述了圆筒式磁力联轴器隔离套中涡流产生的机理以及所造成的危害,介绍了利用有限元法进行涡流场分析的发展现状及有限元分析涡流的理论基础。

2) 在基本假设的前提下,利用有限单元法建立圆筒式磁力联轴器涡流场的二维有限元模型,对涡流场进行瞬态分析。分析工作气隙中的磁感应强度、隔离套上的涡流强度以及涡流损失功率随时间变化的波形图。

3) 分析磁力联轴器各参数对隔离套中涡流损失的影响,结果表明:在不影响工作气隙中磁场强度的条件下,减小磁转子的转速,隔离套半径、厚度以及相对磁导率,增大隔离套的电阻率可以有效地降低隔离套中的涡流损失。这对以后控制磁力联轴器中的涡流损失,提高其传动效率具有一定的参考价值。

第五章 总结与展望

5.1 全文工作总结

本文在综述磁力驱动泵研究现状的基础上,分析了其特有的各项能量损失及控制因素。以 24 极式磁力联轴器为研究对象,利用 ANSYS 有限元分析软件着重对不同永磁体排列方式的磁力联轴器的气隙磁场和涡流场的分布进行研究,以实现提高磁力驱动泵的传动性能,所做的主要工作和结论有:

(1) 阐述了磁力驱动泵的工作原理,根据其特殊的结构分析了其特有的三种主要能量损失:磁涡流损失、转子室中的水力摩擦损失和冷却润滑流道内的液流及容积损失,并探讨了降低这三种能量损失的控制因素。

(2) 理想的 Halbach 阵列充磁比较困难,在实际生产中主要应用分段的 Halbach 阵列。常用 Halbach 阵列的分段形式有三种:Halbach(2)、Halbach(3)、Halbach(4)。利用 AutoCAD 设计普通永磁体排列和 Halbach 阵列永磁体的充磁方向,利用 ANSYS 分析软件分析了这四种排列方式永磁体的磁场分布特点。分析结果表明:普通永磁体排列方式形成的磁场关于永磁体呈对称分布;分段的 Halbach 阵列具有单边聚磁特性,且每极分段数越多其单边聚磁特性就越强,越接近理想状态。

(3) 基于 Maxwell 方程组和一定的假设条件,利用 ANSYS 建立磁力联轴器的二维有限元分析模型,分析隔离套在考虑速度效应和没有速度效应时不同永磁体排列方式的磁力联轴器中气隙磁场的分布特点,计算不同永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩。结果表明:由于 Halbach 阵列的高聚磁特性使得工作气隙中的磁场强度增强,磁力联轴器传动转矩值增大,与普通永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩相比, Halbach(2)型磁力联轴器传动转矩值增加了 13.25%, Halbach(3)型磁力联轴器传动转矩值增加了 24.29%, Halbach(4)型磁力联轴器传动转矩值增加了 28.74%。

(4) 分析转角差、隔离套相对磁导率、工作气隙厚度、永磁体厚度、轭铁厚度对传动转矩的影响,结果表明:不同永磁体排列方式的磁力联轴器的传动转矩随转角差呈正弦周期性变化并得出最大转矩值出现的位置;在满足结构要求的前提下应尽量减少工作气隙的厚度;随永磁体厚度的增加, Halbach 型磁力联轴器传动转矩值变化较大且能充分利用其单边聚磁特性;普通永磁体排列方式的磁力联轴器传动转矩值随轭铁厚度的增加呈明显上升趋势, Halbach 型磁力联轴器的传动转矩值随轭铁厚度的增加呈现下降趋势且变化不

明显可以忽略不计,在设计 Halbach 型磁力联轴器时可以取消轭铁结构,减小结构尺寸从而减小磁力联轴器的转动惯量及惯性转矩值。

(5) 利用 ANSYS 分析软件对磁力联轴器的涡流场进行瞬态分析,探讨隔离套上的涡流分布特点,计算不同永磁体排列方式的磁力联轴器的涡流损失功率。分析结果表明:隔离套上的涡流呈涡旋状周期性分布且最大值出现在隔离套的最外侧,然后由外向内逐渐渗透分布;Halbach 阵列的聚磁特性增加了磁力联轴器工作气隙中的磁场强度,使得 Halbach 型磁力联轴器的涡流损失功率有所增加,与普通永磁体排列方式的磁力联轴器的涡流损失功率相比较, Halbach(2)型增加了 2.76%, Halbach(3)型增加了 14.09%, Halbach(4)型增加了 18.53%。

(6) 分析隔离套厚度、半径、电阻率、相对磁导率和磁转子转速对涡流损失功率的影响,结果表明:隔离套的厚度、半径、相对磁导率和磁转子转速越大,涡流损失功率就越大;隔离套电阻率越大,涡流损失功率就越小。因此在满足结构要求的前提下,应采用较小的隔离套厚度、半径、相对磁导率,较大的隔离套电阻率,降低磁转子的转速,可以有效地控制涡流损失功率。

综上所述,将 Halbach 阵列应用到磁力驱动泵中,虽然传动转矩和涡流损失功率都较普通永磁体排列方式的磁力联轴器增加了,但传动转矩增加的较多,因此 Halbach 型磁力驱动泵的传动效率高于普通磁力泵的传动效率,尤其是对隔离套电阻率较大的磁力驱动泵来说其传动效率更大。

5.2 工作展望

由于作者水平有限,本文所做的研究还存在很多不完善的地方,另外影响磁力驱动泵传动效率的因素还有很多,要想彻底的研究磁力驱动泵的传动特性,提高其传动特性,仍然需要大量的计算和实验研究,今后可在以下几个方面进行研究:

(1) 本文重点分析了涡流损失对磁力驱动泵传动效率的影响,但是磁力驱动泵特殊的结构还增加了另外两种主要的能量损失:转子室内的摩擦损失以及冷却润滑流道内的能量损失。今后应着重从这两个方面研究磁力驱动泵的传动效率。

(2) 磁力联轴器三维磁场的有限元分析。本文对磁力联轴器气隙磁场的有限元分析是在一定的假设条件下建立的二维分析模型,假设条件比较多,使得计算结果与实际工作时差别较大。进一步的研究中应分析三维涡流场的分布特点。

(3) 三维涡流损耗的有限元分析。本文应用有限元法分析隔离套中的涡流分布时只

进行了二维瞬态分析,进一步的研究中应采用三维模型分析隔离套中的涡流分布及损失情况,使得分析结果更接近实际情况。

(4) 本文利用 ANSYS 有限元分析软件对磁力联轴器进行二维磁场及涡流场分析所得的相关结论,缺乏试验验证。今后应对不同永磁体排列方式的磁力联轴器的传动特性进行试验研究。

(5) 电磁场和温度场的耦合问题。磁力联轴器金属隔离套在旋转磁场中产生感应电流,隔离套发热使环境温度升高,影响材料的导磁特性,单一的电磁场分析难以解决和温度场的耦合问题。今后的研究应考虑材料的温度特性对电磁场的影响。

笔者触及磁力驱动泵传动特性的科学研究时间很短,是该领域的后来者,学术水平和研究能力有限,文中难免存在不足和谬误之处,敬请各位读者和专家指正。

参考文献

- [1] 王玉良.国外永磁传动技术的新发展[J].磁性材料及器件, 2001, 32 (4): 45-49.
- [2] 王玉良.永磁联轴器的系列化[J].磁性材料及器件, 2002, 33 (6): 33-40.
- [3] HMD. Seamless pump manufacture, at maximum velocity [J], Word Pumps, No.394, July, 1999:33-36.
- [4] 赵克中.磁力驱动技术与设备[M].北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 苏彦宏, 张泽慧.磁传动技术的发展和应[J].甘肃科技, 2004, 20 (8): 82-86.
- [6] 历建刚.泵用磁力驱动器的设计[J].延边大学农学学报, 2008, 30 (4): 291-295.
- [7] 符长军, 薛宽容.一种新型无泄漏磁力泵[J].中国设备工程, 2005, (2): 57-58.
- [8] 曹卫东, 施卫东, 孔繁余. 磁力泵联轴器设计[J].水泵技术, 2004, (6): 8-11.
- [9] K. Halbach. Design of permanent multi-pole magnets with oriented rare earth cobalt material[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1980, 169(1):1-10.
- [10] 张一鸣, 乔德治, 高俊侠. Halbach 阵列永磁体的研究现状与应用[J].分析仪器, 2010, (2): 5-10.
- [11] Tatchyn K, Boyce R, Halbach K. Design considerations for a 60-meter pure permanent magnet undulator for the SLAC linac coherent light source(LCLS)[C]. Particle Accelerator Conference. 1993, 2:1608-1610.
- [12] 周赣, 黄学良, 周勤博, 傅萌. Halbach 型永磁阵列的应用综述[J].微特电机, 2008, (8): 52-55.
- [13] Wang Xiaoyuan, Zhao Fang, Du Jingjuan, Tang Renyuan. The magnetic field simulation of multi-disc coreless permanent magnet synchronous motor based on Halbach array [C]. Proceeding of the Eighth International Conference on Electrical Machine and Systems, 2005, 3:2083-2086.
- [14] Knorr M, Schillinger A. Permanent magnet drives for pumps and agitators[J]. World Pump, 1982 (4): 175-178.
- [15] James R B. Applications for magnetic drive rotary positive displacement pumps[J]. World Pump, 1999(3): 24-28.
- [16] Doug Twyford.英国 HMD 公司无泄漏磁力驱动泵的开发与研制[J].化工装备技术, 1997, 18 (3): 50-53.
- [17] 杨超君, 顾红伟.永磁传动技术的发展现状和展望[J].机械传动, 2008, 32 (2): 1-4.
- [18] 李福宝.磁传动密封技术[J].辽阳石油化工高等专科学校学报, 2000, 16 (1): 37-39.
- [19] T.G. Hogness, M. Van Antwerp (Eds.). The Artificial Heart, Prototypes, Policies and Patients [J], Institute of Medicine, National Academy Press, 1991.

- [20] 窦淑萍, 牛剑平. 磁力驱动全密封离心泵市场前景与产业化[J]. 甘肃科学学报, 2002, 14 (专辑): 84-86.
- [21] Campbell P, Chari M, D'Angelo J. Three-dimensional finite element solution of permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1981, 17(6):2997-2999.
- [22] Nagel H, Menth A. Hard magnetic properties of Sm-Co-Cu-Fe single phase 2-17 bulk samples [J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1976, 12(6):959-961.
- [23] Ma B, Chandhok V, Dulis E. Radially oriented NdFeB magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1987, 23(5):2518-2520.
- [24] R.M. Hornreich, S. Shtrikman, Optimal design of synchronous torque couplers [J], IEEE Trans. Magnetics, 1978, 14(5):800-802.
- [25] M.N. Nargrial, Design optimization of magnetic couplings using high energy magnets[J], Electric Machines and Power Systems, 1993, 21(1):115-126.
- [26] M.J. Schroder. Design of an optimized synchronous magnetic coupling[J], Proc. Of ANSYS Conf., Pittsburgh, PA, USA, 1994, 5:53-62.
- [27] C. Ferreira, J. Vaidya, Torque analysis of permanent magnet coupling using 2D and 3D finite elements methods[J], IEEE Trans, 1989, 25(4): 3080-3082.
- [28] W. Wu, H.C. Lovatt, J.B. Dunlop, Analysis and design optimization of magnetic couplings using 3D finite element modeling[J], Proc. Of ANSYS Conf., Pittsburgh, PA, USA, 1996, 22(2):29-39.
- [29] Yeong-Der Yao, Gwo-Ji Chiou, Der-Ray Huang, Shyh-Jier Wang, Theoretical Computations for The Torque of Magnetic Coupling[J], IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(3): 1881-1884.
- [30] 李国坤, 贾汝正, 姬全胜. 磁力传动和磁力泵[J]. 中国稀土学报, 1994, 12(专辑): 534-537.
- [31] 王玉良. 磁力传动与绝对密封[J]. 抚顺石油学院学报, 1999, 19 (1): 56-59.
- [32] 咨询点击. 国内最大功率磁力泵问世[J]. 机械工程师, 2009, 9: 3.
- [33] 中聚网. 国内首台自吸式氟塑料磁力泵面世[J]. 工程塑料应用, 2009, 37 (11): 64.
- [34] 严可镜. 磁力耦合式高压釜的研制[J]. 石油化工, 1981, 10 (8): 542-543.
- [35] 严可镜, 王淑敏. 磁力驱动密封装置及其应用[J]. 化工进展, 1994, (4): 42-45.
- [36] 叶子兆. 磁力驱动离心泵的磁力设计与计算[J]. 水泵技术, 1988, (4) .
- [37] 卢东. 泵用磁力耦合器概述与设计[J]. 水泵技术, 1995, (6): 6-8.
- [38] 陈志刚. 永磁磁性传动器驱动扭矩的分析计算[J]. 江苏理工大学学报, 1995, 16 (6): 79-85.
- [39] 施卫东, 魏东. 磁力泵中磁力驱动装置的设计[J]. 四川工业学院学报, 1999, 18 (4): 5-9.

- [40] 赵德成.磁力泵的结构特点及使用与维修[J].中国氯碱, 1999, (4): 35-37.
- [41] 刘建瑞.化工泵磁力耦合传动的设计[J].流体机械, 2001, 29 (12): 35-37.
- [42] 李廷占, 张明成, 王东升.15 千瓦圆筒形推拉式磁驱动器的优化设计[J].郑州工业大学学报, 2001, 22 (3): 50-55.
- [43] 窦新生, 赵克中, 徐成海.磁力驱动技术的磁路分析及磁转矩计算[J]. 化工机械, 2004, 31 (6): 357-360.
- [44] 孔繁余, 陈刚, 曹卫东等.磁力泵磁性联轴器的磁场数值计算[J]. 机械工程学报, 2006, 42 (11): 213-217.
- [45] 张清.圆盘式磁力驱动器的涡流分析[D].吉林大学学位论文, 2008, 4.
- [46] 李金蔚.磁力驱动离心泵能量损失分析[J].流体机械, 2009, 37 (12): 39-42.
- [47] 周朝纪.圆筒形磁力联轴器传动效率探讨[J].水泵技术, 1998, (2): 27-29.
- [48] 施卫东.磁力驱动泵的功率损失分析[J].水泵技术, 1999, (2): 10-13.
- [49] 陈存东, 魏其顺, 徐大为.磁力泵涡流损失比率的探讨[J].水泵技术, 2000, (5): 27-29.
- [50] 李福宝.磁力密封传动器中涡流损失的研究[J].流体机械, 2001, 29 (3): 30-32.
- [51] 赵克中, 徐成海, 窦淑萍等.磁力驱动器涡流损失的研究[J].化工机械, 2003, 30 (6): 326-328.
- [52] 于华宇, 肖建邦.对屏蔽套磁涡流的探究[J].通用机械, 2004, (2): 71-72.
- [53] 冯忠明, 陈存东.磁力泵涡流损失的计算分析与应用[J].通用机械, 2005, (4): 81-83.
- [54] 尹华杰, 何云.永磁电机永磁体的等效模型[J].微电机, 2004, 37 (6): 14-18.
- [55] 钟顺时.电磁场基础[M].北京: 清华大学出版社, 2006.
- [56] 胡友秋, 程福臻.电磁学与电动力学(下册)[M].北京: 科学出版社, 2008.
- [57] 谢德馨, 杨仕友.工程电磁场数值分析与综合[M].北京: 机械出版社, 2008.
- [58] 金建铭.电磁场有限元分析[M].西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [59] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海容.ANSYS10.0 有限元分析实例指导教程[M].北京: 机械工业出版社, 2007.
- [60] 李景天, 宋一得, 郑勤红等.用等效磁荷法计算永磁体的磁场[J]. 云南师范大学学报, 1999, 19 (2): 33-36.
- [61] 汤双清, 陈习坤, 唐波.永磁体空间磁场的分析计算及其在永磁磁力轴承中的应用[J]. 大学物理, 2005, 24 (3): 32-36.
- [62] 马治国, 夏毅敏.ANSYS 软件应用介绍[J]. 凿岩机械气动工具, 2005, (2): 6-9.
- [63] 徐大为, 陈存东, 魏其顺.磁力泵涡流问题探讨[J]. 水泵技术, 1997, (2): 19-22.
- [64] Yoshimoto T. Eddy current effect in a magnetic bearing model[J]. IEEE Transactions on Magnetics,

1983, 19(5):2097-2099.

- [65] Yoshimoto T. Effect of nonlinear permeability on attractive force and counter torque in a magnetic bearing model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(5):1959-1961.
- [66] 孙岩桦, 虞烈. 实心转子电磁轴承涡流损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 116-120.
- [67] 付敏, 邹继斌, 魏静薇等. 基于三维有限元法 U 型单相自起动永磁同步电机涡流场与温度场的分析计算[J]. 上海交通大学学报, 2006, 4.
- [68] 赵韩, 李露, 王勇. 有限元分析涡流效应[J]. 现代制造工程, 2006, (6): 4-6.
- [69] 杨通, 周理兵, 蒋炜. 实心笼型异步电机转子涡流分析与计算[J]. 电机与控制应用, 2006, (4): 3-6.
- [70] 王晓远, 李娟, 齐立晓等. 盘式永磁同步电机永磁体内涡流的有限元分析[J]. 微电机, 2007, (1): 5-9.
- [71] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [72] 黄长华. 涡流的进一步分析[J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2004, (4): 39-40.

致 谢

本论文是在导师袁丹青副教授的悉心指导下顺利完成的,从研究方向的选取和研究工作的开展到论文撰写,处处凝结着袁老师的心血。袁老师严谨求实、勇于创新的学术精神和工作作风使我受益匪浅。两年半的研究生学习生活经历,袁老师给了我很多锻炼发展的机会,这段经历将会使我受益终生。学生的每一点进步都包含着袁老师的辛劳和教诲,在此谨向袁老师表示最衷心的感谢,并致以崇高的敬意!

非常感谢丛小青副研究员在学习和生活上给予的巨大帮助,正是在丛老师的严格要求下,我的论文才能够不断完善。

特别感谢白滨师兄,研究生张贺、何有泉、张建、王光辉、贾自强、钱玉琴、王利伟以及师弟师妹等在论文工作中提出的意见和帮助。

感谢江苏大学能源与动力工程学院研 08 级的全体同学,他们给我两年多的研究生生活中留下了最美好的回忆。

最后,要感谢我的父母和家人对我这么多年来支持和关心。他们给予我无微不至的关怀,对我的期望是我克服困难的动力。同时,对所有关心和帮助我的朋友们表示诚挚的谢意。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 第二作者.Halbach 型磁力泵隔离套中的涡流分析[J]. 中国农村水利水电. (已录用)
- [2] 第二作者.Halbach 型磁力联轴器传动转矩的特性分析[J]. 磁性材料及器件. (已录用)
- [3] 第二作者.Halbach 型磁力泵传动转矩的数值计算[J]. 排灌机械工程学报. (已录用)

