

摘 要

连续管井下电驱钻井是未来智能动力钻井的发展趋势和技术基础，作为井下钻具的重要组成部分，马达的设计极其重要。通过分析比较并结合目前电机的发展现状，选择开关磁阻电机作为钻具马达。开关磁阻电机的结构简单，调速范围宽，效率高，系统可靠性高，而且电机转子上无永磁体，允许较高的温升，这些特点特别符合钻井过程中的技术要求。因此，设计研究井下电动钻具专用马达对实现智能钻井具有重要的意义。

本文首先根据钻井工艺要求计算得到马达基本结构参数。其次，通过磁路计算和RMxprt非线性仿真两种方法对马达性能分析，检验设计参数的合理性。再次，应用电磁有限元分析软件 Ansoft 对井下电动钻具专用马达进行有限元分析，分析电机铁芯损耗、转矩波动等问题。最后，研制一套电机试验台，完成样机加工制造，进行实验研究，并且针对测试结果分析得出结论。

根据以上的理论分析计算和实验研究，完成井下电动钻具专用马达的设计研究，对下一步开展工程样机研制奠定了基础。

关键词：井下电动钻具专用马达，开关磁阻电机，有限元，马达实验

Design and Research on Motor for Downhole Drilling

Li Junlei (Mechanical Engineering)

Directed by Prof. Wang Hanxiang

Abstract

Electric coiled tubing drilling is the trend and foundation of the future intelligent power drilling. As an important part of the downhole drilling tools, the design of motor is extremely important. Through the analysis and comparison with the present situation of the development of the motor, we choose switched reluctance motor (SRM) as the drilling motor. SRM is of simple structure, wide range of speed, high efficiency, high system reliability, without permanent magnet in the motor rotor, and allows higher temperature rising. All these characteristics meet the technical requirements in the process of drilling particularly. Therefore, the design and research of the specialized SRM for the downhole drilling tools have a vital significance for the intelligent drilling.

Firstly, in this paper, the motor's basic structure parameters are calculated through the designed requirements. Secondly, through both the magnetic circuit calculation and RMxprt nonlinear simulation, we analyse the motor's performance and test the rationality of the designed parameters. Thirdly, the electromagnetic finite element analysis software Ansoft is applied for the finite element analysis of SRM, the analysis of the iron core loss and torque fluctuations, etc. Finally, we designed the motor test rig, completed the prototype processing manufacturing, tested on the site and tested parameters, and got the conclusion according to analysing the measured results.

According to the above theoretical analysis, calculation and experimental test, we completed the design and research of the specialized SRM for the downhole drilling tools, which has practical significance for the development of Electric coiled tubing drilling.

Keywords: motor for downhole drilling, switched reluctance motor, finite element, motor test

第一章 绪论

1.1 课题研究目的及意义

国外俄罗斯、美国等发达国家已研究井下电动马达连续管钻井技术多年,经过现场实验证明,该技术具有常规钻井技术无法比拟的优势,是未来智能动力钻井的基础。

国内在深井、超深井钻井中依然使用螺杆或涡轮钻具,随着全球能源需求逐年增多,开采难度不断增大,现有技术已不能满足当今钻井技术的需要,智能化钻井系统成为当今钻井工业发展的必然要求。螺杆钻具和涡轮钻具由于在控制系统方面相对落后,无法实现闭环控制,显然无法满足智能钻井的需要,井下电动马达与涡轮或螺杆马达相比具有以下技术优势。一是井下电动马达钻井技术可以进行对钻井马达的实时控制,而且不依赖泥浆传输信号,这样泥浆介质可以选用不同类型的,从而扩大了泥浆的利用效率和使用范围,特别适用于欠平衡钻井和深水钻井。二是采用螺杆钻具和涡轮钻具有时无法获得需要的转速范围以及平稳的速度控制,电动钻具可以在很宽的范围内平稳地调整转速,且其过载能力较强。三是井下电动钻井采用电缆系统进行动力和信号的传输,便于进行地面和井下信息实时互传,易于实现钻井过程闭环控制,具有比泥浆信号通讯容量大、传输信号准、传输速率快的优势,通过井下上传的钻井数据加以控制,可以提高井眼轨迹精度,可以适应在重钻井液条件下工作,是一种很有发展前景的井下动力钻具^[1]。

目前,随着石油勘探开发不断向更深地层发展,深井、超深井年钻井比例达到30%以上,且增长迅速。而深井、超深井的钻井过程中后1/3的钻井工作量需要全井2/3的钻井时间,严重影响钻井效率,连续管井下电驱钻井技术将是解决这一问题的可行方法。连续管井下电驱钻井技术是未来智能动力钻井的基础和根本,对未来钻井技术的发展产生深远影响。作为连续管井下电驱钻井技术的核心,井下电驱钻具发展的好坏对“未来智能动力钻井”具有决定性的作用,因此研制具有自主知识产权的井下电动马达对于提高我国的钻井技术水平和核心竞争力具有十分重要的意义^[2]。

1.2 连续管电动马达钻井技术概述

目前,连续管钻井技术在国外已经发展成为一项相对成熟的钻井技术。近几年来,连续管钻井技术发展迅速,在连续管制造技术、钻井工艺、钻井装备、井下钻具组合等方面都取得了一些新的进展,研发出了连续管和钻杆两用的复合钻机、复合材料连续管、

变径连续管（锥形连续管）、连续管位移增大工具、连续管钻井技术专用钻头、连续管钻井专用电动马达等设备与工具，这些设备与工具为连续管钻井技术的应用和推广创造了条件。连续管技术与欠平衡钻井技术、水平井技术、侧钻技术的结合也取得了显著的效果，使钻井技术的整体水平有了新的提高。目前连续管钻井技术在我国基本还是空白领域，因此大力发展连续管钻井技术，特别是连续管井下电驱钻井技术，对于提高我国整体钻井技术水平，降低钻井成本具有至关重要的作用^[3-5]。

连续管井底电驱动钻井是连续管钻井技术发展的高级阶段，连续管井下电驱动钻井装备主要包括地面设备（监控系统、信号处理系统、泵车、连续管卷筒、注入头等）、带传输动力和信号线的复合材料连续管和井底电驱动钻具三大部分^[6]。“连续管井下电驱动钻井技术”将钻头、信号传感器（包括压力传感器、温度传感器和振动传感器等）、井底电动马达等结合在一起，通过连续管内的动力和信号线与地面设备相连，组成了一套科学、有效、精确的闭环控制钻井系统。

虽然连续管钻井技术的发展时间较为短暂，随着此项技术现场应用的逐步增多，其技术水平也正在不断发展提高。随着连续管钻井技术的不断提高，相关钻井装备的设计出现，连续管钻井技术将会迅速发展。

如图（1-1）所示，为加拿大应用连续管钻井的发展情况^[7]，可见连续管钻井的发展迅速，其中煤层气开发极大的推动了其发展，主要原因是连续管钻井具有建井周期短、钻井速度快的优势。

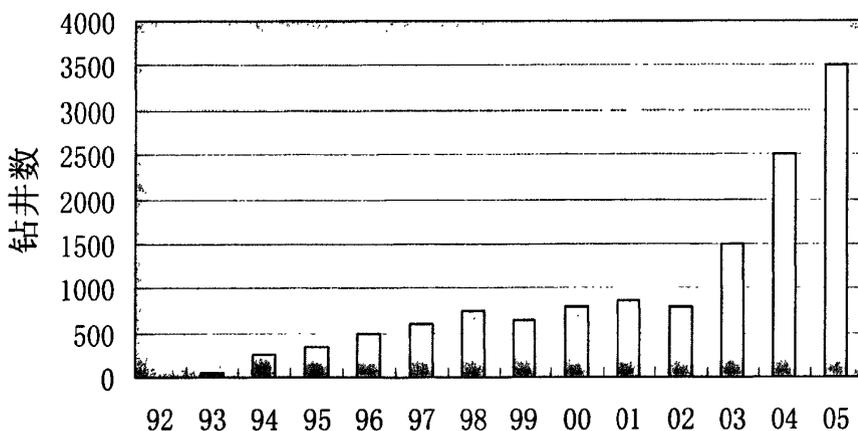


图 1-1 加拿大连续管钻井的发展

Fig.1-1 The development of coiled tubing drilling in Canada

1.2.1 国内外发展状况

通过调研发现，在我国连续管井底电驱钻具技术研究尚属空白。而英国、美国等国

家的连续管井底电驱钻具技术的发展已经相对成熟^[8-12]。

(1) Schlumberger的下属Anadrill公司研制的VIPER连续管钻井系统，这套系统可以对钻井信息进行实时输出、钻井方向进行精确的控制、对井底压力进行实时监测。VIPER系统是一种利用电缆进行控制的BHA（Bottom Hole Assembly，井下钻具组合），由井底定向仪器和随钻测量仪器组成。该系统通过随钻控制定向技术对钻井方向进行准确、实时、连续的控制。该系统应用的钻井定向工具，可以进行正、反两方向的连续旋转，这样可以更好的控制钻井的井眼轨迹。通过上传的数据参数进行校正，然后进行计算机控制，这样实现了实时井下参数的微调。VIPER的井下部分系统是由顶部模块、测井工具、定向工具和电动马达四部分组成，具体结构如图（1-2）所示。

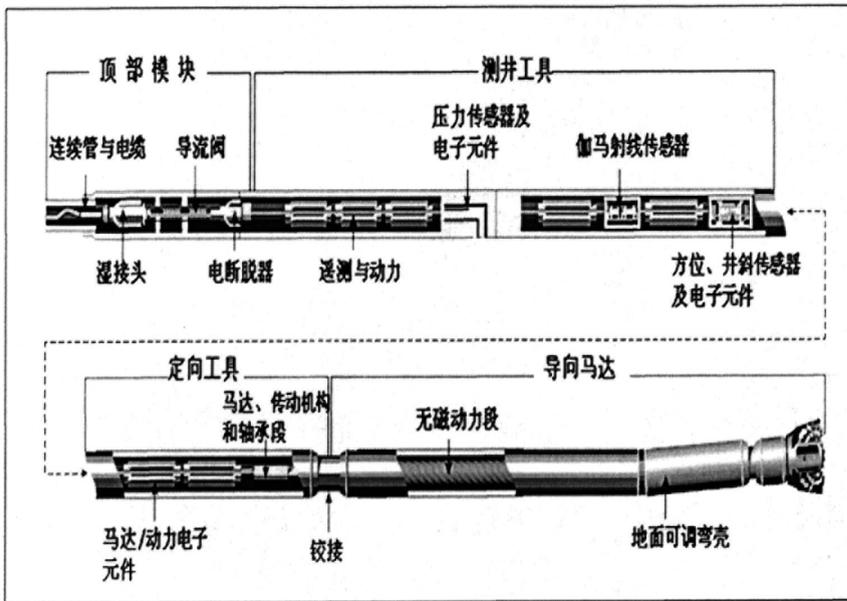


图1-2 VIPER连续管钻井系统

Fig.1-2 VIPER coiled tubing drilling system

(2) 美国的电钻井技术

美国的电动钻具研究始于20世纪70年代，其目的是研究井下电动钻具与连续管的结合应用。美国XL公司设计出一套电动式连续管钻井系统，其井下钻具组合用电动马达取代了原有的容积式马达。通过地面的电脑直接控制电动马达，通过键盘、操纵杆等可以直接发出信号命令来控制速度。为了解决马达失速问题，采用了设定极限电流和极限钻压的方法。在接近极限转速时，利用井下连续管上传的数据参数，减小钻压，使电流值发生变化，防止了BHA发生过载的现象。图（1-3）为XL的电动井下钻具组合。

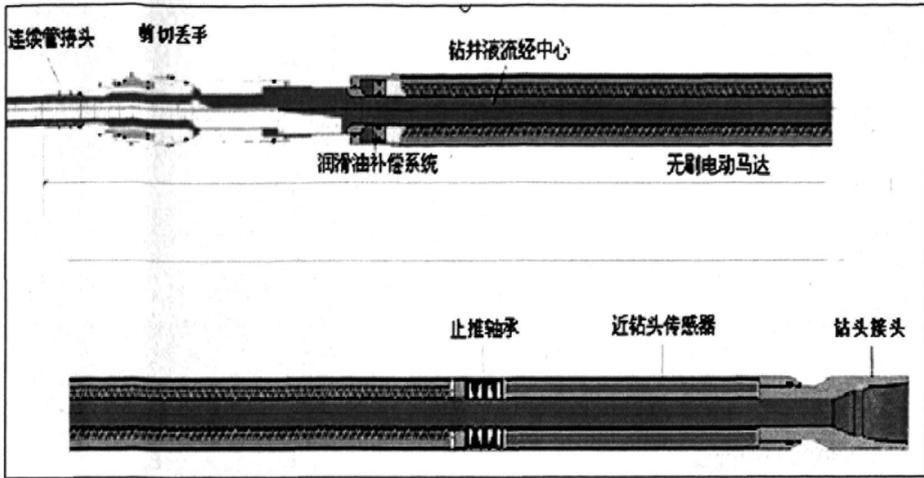


图1-3 XL公司连续管电动BHA

Fig.1-3 The all electric BHA of Co. XL

(3) AnTech公司作为一家英国的连续管钻井设备研发公司，该公司设计研发了连续管钻井用井下钻具组合，该系统的关键部件是一种可以准确调整钻头方向的电驱动式定向工具，可以平稳、准确的控制钻头和马达的方位。该设计使用的连续管的尺寸范围为外径 $\text{Ø}50.8\sim\text{Ø}73\text{mm}$ ，而且连续管内置电缆以传输各种信号。该电动连续管钻具组合是由连续管接头、断脱短接、钻压/振动测量短节、遥测系统、钻具导向工具短节、电驱式定向器、井下电动马达、钻头等组成^[13]。

1.2.2 电动连续管钻井技术发展趋势

(1) 研究设计井底动力钻具，钻具设计要求结构简单紧凑，运行稳定，便于调节以及工作寿命长；

(2) 设计发展井下推进器，并应用于钻具组合中，能够使连续管钻井过程中增加拉力或推力，这就会提高连续管钻井技术在大位移定向井、水平井中的应用；

(3) 研制新型连续管，提高连续管的疲劳寿命，目前主要的研究方向为新型钛合金连续管、复合材料连续管等；

(4) 提高测量、控制和传输等发面的技术水平，进一步提升连续管钻井技术的自动化和智能化水平^[14-18]。

1.3 开关磁阻电动马达概述

作为一种新型电机，电机开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor, SRM），该电机系统是在变频调速之后新型调速电机^[19-22]。表（1-1）为开关磁阻电机调速系统与其

他调速系统比较。开关磁阻电机具有结构紧凑,便于调速且调速性能优异的优点。开关磁阻电机系统的组成有四部分组成:开关磁阻电机本体、控制器、功率变换器和位置检测器。控制器内包含功率变换器和控制电路,电机本体的一端安装有转子位置检测器。

表 1-1 开关磁阻电机调速系统与其它调速系统的性能比较

Table1-1 The performance comparison of SRM system and others system

指标 \ 类型	直流调速系统	PWM变频调速系统	开关磁阻电机调速系统
成本	1.0	1.5	1.0
额定转速时效率(%)	76	77	83
1/2额定转速时效率	65	65	80
电动机容量/体积	1.0	0.9	>1.0
控制能力	1.0	0.5	0.9
控制电路复杂性	1.0	1.8	1.2
可靠性	1.0	0.9	1.1
噪音/db	65	74	74

注: 1. 各系统均为 7.5kW、1500r/min, 恒转矩负载

2. 上表中性能指标均以直流调速系统为 1 作为比较标准

1.3.1 开关磁阻电机的优点

开关磁阻电机结构简单,性能优越,可靠性高,覆盖功率范围广,开关磁阻电机的应用领域广泛,在各种需要灵活调速和要求高效的场合得到了广泛应用^[23-27]。

(1) 开关磁阻电机结构简单,价格相对便宜,电机转子上没有绕组和磁铁。

(2) 电机转子无永磁体,允许较高的温升。由于绕组均在定子上,电机容易冷却。效率高,损耗小。

(3) 转子上没有电刷结构,使其适用于高速驱动,且转子的转动惯量小,有较高转矩惯量比。

(4) 调速范围宽,控制灵活,易于制动,并适用于要求频繁启动(1000次/小时),正反向运转的特殊场合。

(5) 启动电流小,启动转矩大,低速时运行性能优异。

1.3.2 开关磁阻电机的应用现状和前景

开关磁阻电机具有非常广泛的应用范围，而且随着相关联的技术（电力电子技术、控制技术）不断提高，不同类型的开关磁阻电机在多个领域中得到了广泛应用。以下为开关磁阻电机在多个工业领域内的应用情况^[28-31]。

(1) 煤矿机械

煤矿生产具有环境恶劣、安全性要求严格的特点，煤矿机械设备多数需要进行调速控制，这就对电机提出了严格的要求。目前，我国煤矿开采所用的电机主要有直流电机和异步电机。直流电机具有很大的应用限制，电机的电刷在工作过程中易产生火花，带来安全隐患；异步电机的启动转矩较小，但启动电流很大，这就造成对电网的极大冲击。开关磁阻电机调速系统作为一种新型的调速系统，由于其结构简单、运行性能稳定和安全性高的优点，在采煤设备中得到了广泛的应用。开关磁阻电机的应用方面包括：牵引驱动设备、煤炭输送机、绞车电机、矿井用电车牵引设备、风机和水泵电机等。但目前开关磁阻电机在煤矿机械方面的应用存在一定问题，位置传感器使得电机的可靠性降低，研发无位置传感器的开关磁阻电机是目前发展的主要方向。

(2) 纺织业

纺织企业采用的无梭织机多为直流调速驱动和异步变频调速驱动。直流调速系统存在一定的安全隐患，电机的电刷在工作过程中易产生火花，而且该系统不适合运行在粉尘的环境下；异步变频调速驱动系统的效率和功率因数在低速或负载发生波动时会急剧下降；变频器的发热会造成过热保护产生误动作，而且电机的启动电流很大，造成了对电网的冲击。与之相比，开关磁阻电机调速范围广、运行效率高，启动电流小、启动转矩大，适合频繁启停及正反转运行。

(3) 石油开采

目前石油开采使用的抽油机有两种：游梁式抽油机和无游梁式抽油机，主要以游梁式抽油机为主。游梁式抽油机使用的电机大多为 Y 系列电机，起动方式为带载直接起动，为满足起动所需的较大转矩，通常选择的电机功率较大，但运行时所需转矩较小，这样就造成了电机长时间处于轻载运行状态，导致了很大的功率损耗，造成了能源的极大浪费。变频调速系统应用于少数抽油机，原因是投入费用高，无法大规模的推广发展。许多油田开展了利用开关磁阻电机改造游梁抽油机的工作，通过改造，实现了油田节能降耗的目的。开关磁阻电机的应用给油田带来了巨大的经济效益和社会效益^[32-34]。

(4) 机械加工

目前开关磁阻电机已开始 in 机械加工领域内应用,以龙门刨床为例,龙门刨的电机运行时主要存在正反转换向频率高、负载变化剧烈等问题,要实现转速的实时稳定,对电机的性能提出了很高的要求。开关磁阻电机能够实现上述提出的技术要求,而且起动转矩大,起动电流小,很适合作为龙门刨床的电机提供动力。

(5) 风力发电

风力发电作为一项很有发展前景的发电技术,正在迅猛发展。开关磁阻发电机的结构简单紧凑和控制方式灵活准确,该发电机应用于风力发电系统,具有能量转换效率高、可靠性强、降低成本等优势,在风能利用这一领域有着巨大的发展前景。但目前发电系统应用开关磁阻发电机还处于初级阶段,需要进一步的研究。

综上,从目前应用情况来看,出于降低成本的考虑,成本开关磁阻电机在工业领域的应用主要还是在保证系统性能的前提下对原有设备进行改造调整。风力发电系统中应用开关磁阻电机还处在理论研究的初级阶段。可以预见,在未来的数年内开关磁阻电机必定会在更多领域中得到广泛应用,取代目前的直流调速系统,部分替代感应电机变频调速系统与永磁同步电机,发挥开关磁阻电机独特的优势与作用。

1.4 课题主要研究内容

根据查阅的资料,结合连续管井下电驱钻井技术和开关磁阻电机的研究现状,根据钻井过程井下实际工况,对该研究课题进行研究,具体研究内容如下:

(1) 根据拟定的研究内容和研究目标查阅国内外开关磁阻电机研究方面的资料,熟悉并掌握开关磁阻电机的基本性能与应用范围。

(2) 通过电机工作原理分析研究,结合相关电磁理论,进行电动马达的电机本体参数设计。

(3) 通过磁路计算和计算机非线性仿真两种方法对电机性能分析,通过对比进行参数调整。

(4) 应用电磁有限元分析软件 Ansoft 对开关磁阻电机进行有限元分析,对开关磁阻电机的静态和瞬态电磁场进行了初步的探讨。为开关磁阻这种机电一体化电机的设计开发提供了一种行之有效的方法。

(5) 根据设计参数进行电动马达本体及实验台设计,进行样机加工制造,现场实验与参数测试分析。

第二章 电动马达的基本结构与工作原理

采用开关磁阻电机作为钻具马达，其结构和工作原理与传统交直流电机有着根本的区别，为了设计与研究开关磁阻电机，需要从电机基本结构、电机工作原理、电机内部电磁关系、稳态运行性能等方面进行系统的分析与研究，才能为电动马达的设计研究提供的充分的理论依据。

2.1 SRM 的系统组成

开关磁阻电机系统是机电一体化发展的产物，其系统如图（2-1）所示。该系统由开关磁阻电机本体、功率变换器、位置传感器和控制器四部分组成。

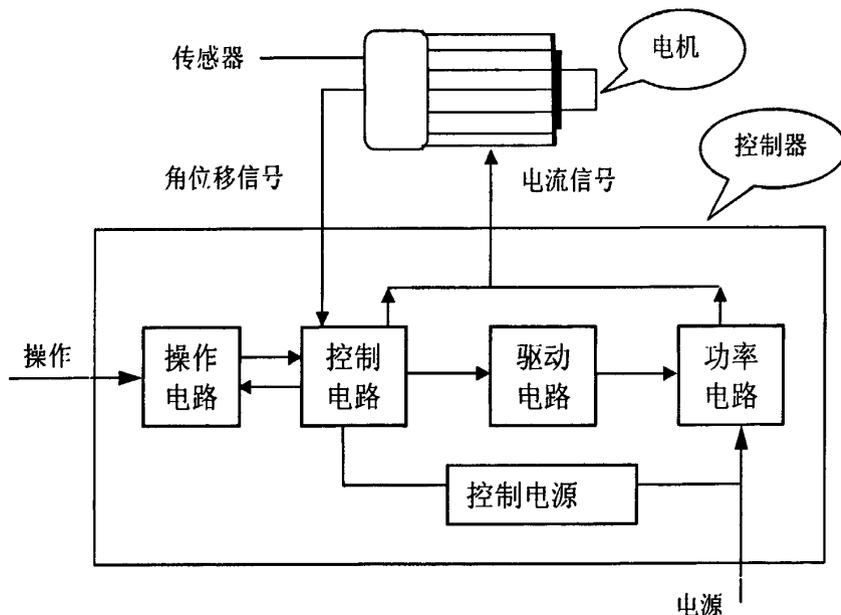
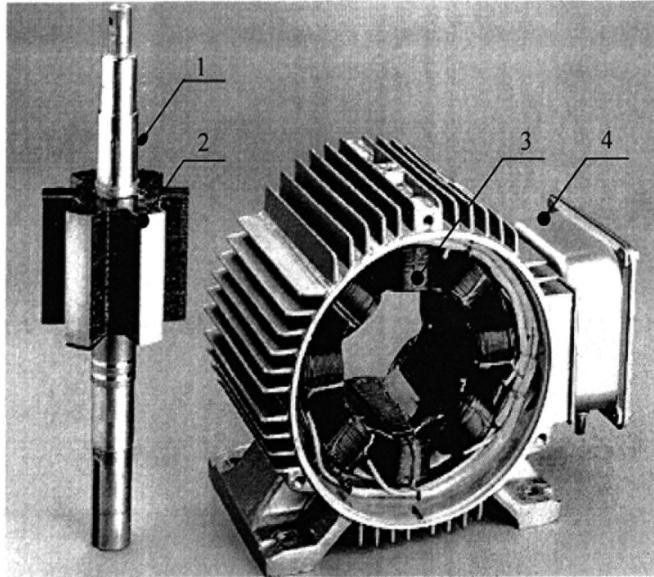


图 2-1 开关磁阻电机调速系统组成

Fig.2-1 Switched reluctance motor speed control systems

2.1.1 开关磁阻电机

作为开关磁阻电机系统的执行部分，开关磁阻电机本体具有结构简单的优点，电机转子无永磁体，允许较高的温升，特别适合石油钻井井下高温环境；由于绕组均在定子上，电机容易冷却。如图（2-2）所示为通用型开关磁阻电机的实物结构。



1-电机主轴 2-转子 3-定子绕组 4-接线盒

图 2-2 通用型开关磁阻电机图例

Fig.2-2 General switched reluctance motor

2.1.2 功率变换器

功率变换器的作用是对电源提供的能量做一定转换后，以合适的能量形式提供给电机。由于开关磁阻电机为单向绕组电流，其功率变换器的结构简单。由于电路中绕组与主开关之间是串联关系的，这样可以预防发生系统短路故障。

由于工作额定电压、电机相数和电路中主开关器件的种类不同，功率变换器的主电路形式存在变化。此外，开关磁阻电机的设计受功率变换器主电路形式的影响较大，需结合参数要求、具体运行性能、使用场所等方面综合考虑，选择最优组合的方案。

2.1.3 控制器

在整个调速系统中控制器是核心部分，通过对位置传感器所测得的信号、绕组电流等数据进行处理，发出指令控制功率变换器的主开关的通断，完成控制功能。控制器的组成主要有单片机、信号处理芯片和接口电路。控制器在开关磁阻电机系统中的主要功能有：角度位置控制，电流斩波控制，速度调节，电机四象限运行，过流保护，欠压过压监测等。

2.1.4 位置传感器

位置传感器在开关磁阻电机系统中的作用是把转子位置信号提供给控制器，控制器根据信号准确控制电流的通断。目前常用的位置传感器主要有光电器件、电磁线圈法和霍尔元件法等方式。随着技术的发展，对位置检测采用无位置传感器的设计方法是发展趋势，能够实现系统成本降低、系统可靠性提高、电机结构简化等作用。

2.2 SRM 工作原理和运行特性

2.2.1 SRM 的工作原理

开关磁阻电机在结构、工作原理等方面与其他类型电动机具有极大的不同，开关磁阻电机以“磁阻最小原理”工作的电机，即为磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合，由于磁场发生扭曲从而产生了切向拉力。通过开关磁阻电机的工作原理可以得到电机结构设计时，转子在运行过程中要具有较大的磁阻变化。开关磁阻电机结构为双凸极结构，即凸极定子和凸极转子，且定转子具有不同极数。如图（2-3）所示为开关磁阻电机本体的截面图。

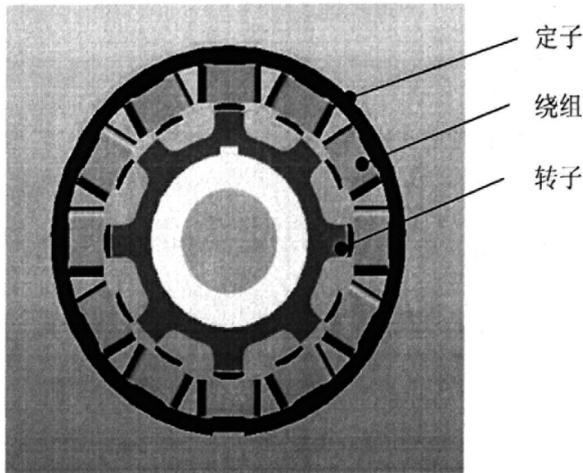


图 2-3 开关磁阻电机本体截面图

Fig.2-3 Section graph of SRM

以 12/8 级开关磁阻电机为例分析，如图（2-4）所示为某相电路的电路原理图和电机剖面图。S1 和 S2 为开关，U 为直流电源，VD1，VD2 是续流二极管。呈凸极结构的定、转子，由定转子冲片叠压而成，转子上无绕组，定子绕组的绕组方式主要有串联、并联以及两者结合等，转子上安装有测试转子位置信号的位置传感器，根据位置信号控制电子开关的通断，使电机保持连续运行状态。由于转子凸极与定子凸极的对齐与错开

产生了电机磁阻的变化^[35-39]。

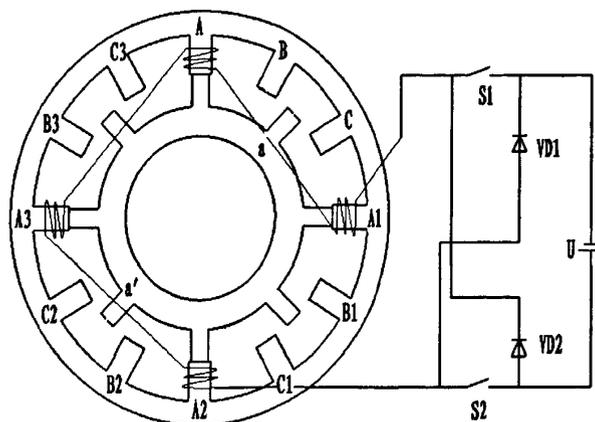


图 2-4 三相 12/8 极开关磁阻电机结构

Fig.2-4 Structure of three phases 12/8 poles SRM

当定子 C 极通电后，由于磁力作用使转子产生转动转矩，使转子 aa'极与定子 CC2 极重合，此时 C 相绕组具有最大电感。若以图中给出的定、转子位置作为电机运行的初始位置，以 A→B→C→A 顺序为各绕组线圈通电，开关磁阻电机的运行方向为逆时针；相反，如果依以 C→B→A→C 顺序为各绕组线圈通电，则开关磁阻电机的运行方向为顺时针。通过以上分析，可以得到开关磁阻电机的运行旋转方向与绕组线圈中的电流方向无关，只由绕组线圈中通电顺序决定。这就要求，通过设计一个可以调控的电子开关，根据位置传感器测得的转子位置对各相电路进行有序的、周期的、合理的关断与导通，实现开关磁阻电机以要求的旋转方向连续运行。此外，由电路原理图得到，当 S1, S2 导通时，能量由电源转换到 A 相绕组中；当 S1、S2 断开时，通过续流二极管 VD1、VD2 的续流作用，将电能回馈到电源中。由此得到，开关磁阻电机具有能量利用率高、系统效率高的运行特点。

2.2.2 SRM 的运行特性

图（2-6）中转速 n_1 是在最大允许电流和最高电压条件下的一个临界速度。即为开关磁阻电机在获得最大转矩时的电机转速，称为基速，该速度是 SRM 在获得最大电磁功率情况下，电机输出的最低转速；转速 n_2 指的是 SRM 能得最大功率的情况下，电机输出的最高转速。在开关磁阻电机的转速低于 n_1 的情况下，电机的控制方式为电流斩波控制方式，其运行特性为恒转矩的；在开关磁阻电机转速高于 n_1 情况下，电机的控制方

式为角度位置控制方式，其运行特性为恒功率的；当电机转速高于 n_2 时，无法进行调节，开关磁阻电机的运行方式将具有自然特性，输出转矩随与电机转速平方成反比，即呈串励性运行。

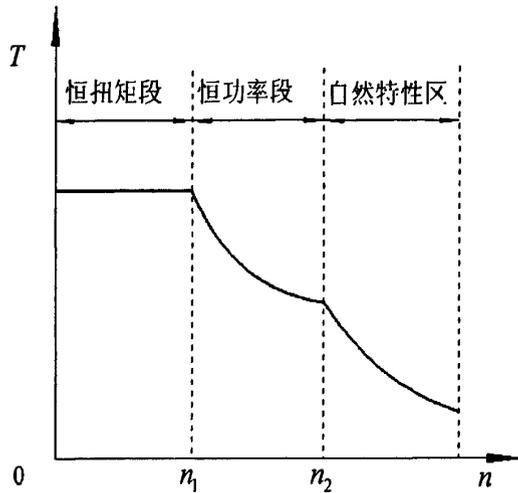


图 2-5 开关磁阻电机的典型运行特性

Fig.2-5 The typical operation characteristics of SRM

2.3 开关磁阻电机的数学模型

进行开关磁阻电机的设计与分析，需要将开关磁阻电机简化为数学模型。几种常用的开关磁阻电机模型有线性电机模型、准线性电机模型、非线性电机模型。

不考虑电机的电磁涡流、边缘效应、磁滞、绕组间的互感等因素，认为开关磁阻电机的电感与绕组电流大小无关，只受转子位置影响，这种假设简化了开关磁阻电机的运行过程中的运行特性分析计算，但是，因为将 SRM 运行时的非线性因素完全忽略，使得该数学模型与电机实际运行特性偏差较大，造成了设计计算时的误差产出。准线性模型的原理是将开关磁阻电机的磁化曲线进行分段线性化，对定转子凸极对齐时的电磁饱和进行分析，这种模型为控制器设计和电机特性分析提供了简便的方法，然而该模型准确性、精确度有限，导致设计计算时也存在误差。这两种计算模型中，SRM 的参数具有相应的解析表达式，在分析计算电机性能时，通过解析式对转矩和电流进行定性分析。实际上，由于开关磁阻电机的双凸极结构，电机具有非线性，绕组电感在电机运行时不是定值，而是与转子位置角、电流相关的函数。开关磁阻电机的绕组电流、磁链等参数是非线性的，导致了精确数学模型很难建立^[40-41]。

2.3.1 SRM 基本方程式

与其他类型的电机比较，SRM 系统的运行理论在本质上没有差异，都可以看做二端口装置，即为机械端口和电端口，对 m 相的开关磁阻电机，若不考虑绕组间互感、磁滞效应和涡流效应等。如图（2-6）所示为其系统原理图。

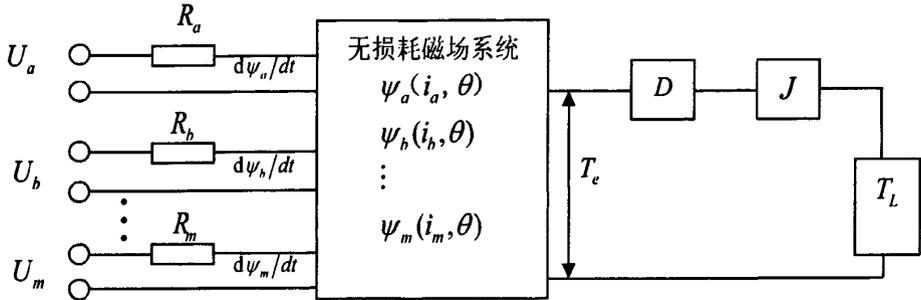


图 2-6 m 相 SRM 系统示意图

Fig.2-6 System diagrammatic sketch of m phases SRM

上图中， D 为系统的摩擦系数， J 为开关磁阻电机转子及负载的转动惯量之和， T_L 为负载转矩。开关磁阻电机的结构和工作原理较为简单，但由于电机的双凸极结构特点、磁路和电路的非线性，造成电机各运行参数随转子位置变化作周期性变化，磁通波形和绕组电流不规则，开关磁阻电机的设计计算很难运用传统电机性能分析方法。但是，所有电机的电磁过程都是通过电磁感应定律、能量守恒定律、全电流定律等基本的电磁关系建立的，开关磁阻电机也是符合这些电磁规律的。

(1) SRM 电动势平衡方程

一台 m 相的开关磁阻电机，运用电路定律，可以得到该电机 k 相的电动势平衡方程式为：

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (2-1)$$

式中： U_k —— 电机 k 相绕组电压；

i_k —— 电机 k 相电流；

R_k —— 电机 k 相电阻；

ψ_k —— 电机 k 相绕组磁链。

假设电机磁路是线性的，并忽略所有电阻压降，则式（2-1）可写为：

$$U_k = \frac{d\psi_k}{dt} = L_k \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_k}{d\theta} \omega = e_s + e_r \quad (2-2)$$

式中： ω ——电机运行的转子角速度， $\omega = d\phi/dt$ ；

e_s ——绕组中因磁链变化产生的感应电动势；

e_r ——转子旋转时产生的感应电动势。

由式(2-2)可以推导出能量关系式

$$U_k i_k = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_k i_k^2 \right) + \frac{i_k^2}{2} \frac{dL_k}{d\theta} \omega \quad (2-3)$$

由式(2-3)可以看出，电机输出功率有由两部分组成，磁场储能与输出的机械能。开关磁阻电机通过能量的不断储存、转换，实现高效率、大功率的特点。

(2) 磁链方程

开关磁阻电机的磁链是绕组电流和转子位置角的函数，故磁链 ψ_k 为：

$$\psi_k = \psi(i_1, i_2, \dots, i_m; \theta) \quad (2-4)$$

与电机自感相比，相与相之间的互感可以看作很小，从计算方便程度方面考虑，SRM的设计计算时往往将互感忽略不计，这样，开关磁阻电机的磁链方程可以近似为：

$$\psi_k = \psi(i_k, \theta) = L(i_k, \theta) i_k \quad (2-5)$$

(3) 转矩平衡方程

当电机工作时，电机主轴上所受负载发生变化，就会影响电机转速，这一过程会产生加速度，由此得到转矩平衡方程：

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + K\omega + T_L \quad (2-6)$$

或

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2-7)$$

式中： J ——系统转动惯量；

K ——摩擦系数；

T_L ——负载转矩；

ω ——为机械角速度。

磁共能 W' 函数可以由电磁转矩 T_e 表示：

$$T_e = \frac{\partial W'(i_c, \theta_0)}{\partial \theta_m} \quad (2-8)$$

只有当负载转矩与电磁转矩处于平衡状态时， $J \frac{d^2\theta}{dt^2}$ 为零，电机处于稳定运行状态。

式 (2-5)、(2-6) 和 (2-8) 一并构成了开关磁阻电机基本平衡方程组，该方程组从理论上准确、完整的描述了开关磁阻电机中的力学关系及电磁关系，然而由于电机电路、磁路的存在严重的非线性，对上述方程组的计算变得很难，往往需要根据具体的电机结构及所需要的精确程度加以适当的简化，通常采用线性模型、准线性模型和非线性模型的求解方法。

2.3.2 数学模型的求解方法

对以上方程建立的数学模型计算很难得出解析解，原因是这些方程具有严重的非线性。因此，要找到一种解决该方程的方法，需要权衡实际应用与理论假设。目前，人们针对磁链变化的研究计算，主要采用了以下几种建模方法^[42]。

(1) 理想线性模型

忽略 SRM 磁路饱和的影响，假设绕组电感与电流大小无关，不计磁场边缘扩散效应、铁芯的涡流效应和磁滞效应，开关磁阻电机理想线性模型将磁链 ψ_k 近似为绕组电流 i_k 的线性函数。可以通过这种理想模型认识开关磁阻电机工作的基本运行特性和各运行参数之间的关系，并可依据该模型对控制方式进行探讨研究。该模型的求解的误差偏大，精度较低。图 (2-7) 为线性模型中的磁化曲线。

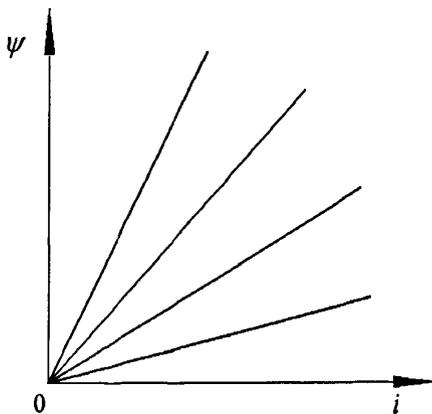


图 2-7 线性模型中的磁化曲线

Fig.2-7 The magnetization curve of linear model

(2) 准线性模型

准线性模型就是对实际的磁化曲线进行处理简化,使其分段线性化。该模型的建立前提是因为开关磁阻电机磁链存在不同线性变化率的饱和区和非饱和区。该模型近似地考虑磁路的边缘效应、饱和效应,但忽略了相间耦合效应,分别建立解析式来表示每段磁化曲线。通常可将磁化曲线分段为两段(非饱和区和饱和区)或是三段(线性区、低饱和区及高饱和区)。准线性模型在求解开关磁阻电机问题时,能够达到一定的精确度,提高计算的可靠性。图(2-8)为分段线性模型中磁化曲线。

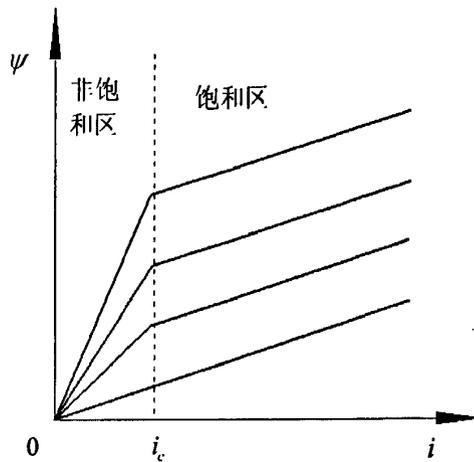


图 2-8 分段线性模型中的磁化曲线

Fig.2-8 The magnetization curve of piecewise linear model

(3) 非线性模型

开关磁阻电机的实际磁化曲线如图(2-9)所示,具有非线性特点,要准确计算开关磁阻电机的性能,对电机的稳态运行特性进行仿真,需要采用非线性模型计算。第一种方法是通过实验方法或数值方法得到的磁化曲线族,并以此为基础建立相应的数据库,利用此数据库对电机运行性能进行计算分析。这种方法虽然计算比较准确,但计算速度较慢,且特定磁化曲线数据库很难得到。第二种方法是利用电机磁化曲线上几个特殊位置,以磁链或电流作为转子位移角的函数进行模型分析,通过查值得到中间位置的电机电磁特性。

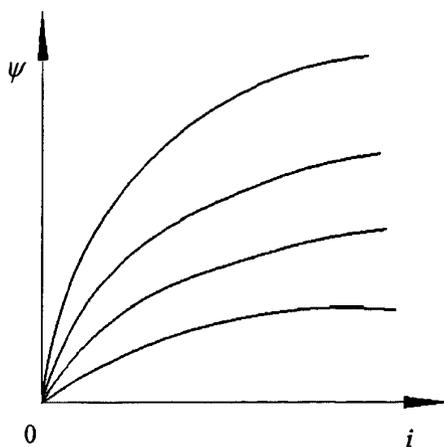


图 2-9 SRM 实际磁化曲线

Fig.2-9 SRM real magnetization curve

2.3.3 基于线性模型的 SRM 分析

为了弄清开关磁阻电机内部的基本电磁关系和运行特性，可以对简化模型进行研究。为此，我们作如下假设：

不计磁路饱和的影响，假设电感与电流大小无关；所有的功率损耗忽略不计；电机运行状态为恒转速运行；假设开关动作是瞬时完成的。

(1) 开关磁阻电动机绕组线性电感模型

将电机模型进行上述假设即可认为是理想线性模型。如图（2-10）所示为绕组相电感 L 与转子位置角 θ 间关系曲线。以转子位置角为横轴，定子凸极与转子凹极两者对齐的位置作为原点位置（ $\theta=0$ ），电感在该位置处于最小值 L_{\min} ；当定子凸极中心与转子凸极中心两者对齐时，相电感在该位置处于最大值 L_{\max} 。开关磁阻电机转子槽宽尺寸通常大于定子极弧宽度尺寸，对齐时，开关磁阻电机在转子位置角 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 段持续最小电感；同样道理得出，开关磁阻电机在转子位置角 $\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4$ 段持续最大电感。由于定、转子凸极不断对齐、错开，相电感在最小电感 L_{\min} 和最大电感 L_{\max} 间线性变化，这个过程的变化频率与转子极数成正比，变化周期为电机转子极距。

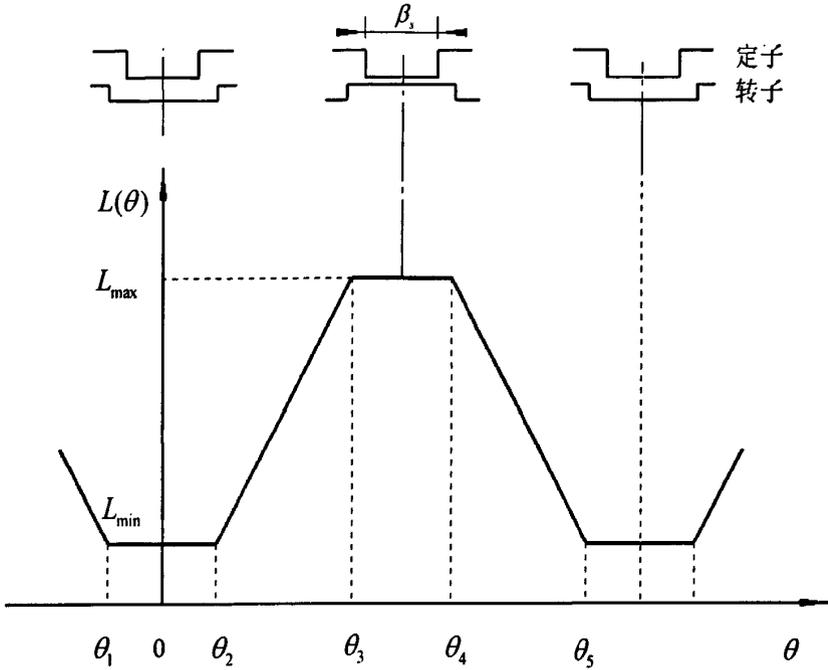


图 2-10 线性模型中相电感与转子位置角的关系曲线

Fig.2-10 Curve of phase inductance with the stator and rotor position

通过以上分析，我们可以得到理想线性 SRM 模型中相电感 L 随转子位置角 θ 变化关系，其函数形式表示为：

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\ L_{\min} + K(\theta - \theta_2) & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3 \leq \theta < \theta_4 \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & \theta_4 \leq \theta < \theta_5 \end{cases} \quad (2-9)$$

$$K = (L_{\max} - L_{\min}) / (\theta_3 - \theta_2) = (L_{\max} - L_{\min}) / \beta_s \quad (2-10)$$

式中： β_s 为定子磁极极弧。

(2) 开关磁阻电机磁链分析

当直流电源 u_k 为开关磁阻电机供电时，其一相电路方程为：

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (2-11)$$

绕组电压压降 $R_k i_k$ 相对于 $d\psi_k/dt$ 要小，否则会使开关磁阻电机的效率很低，所以在误差允许范围内将电阻压降忽略，得到：

$$d\psi_k = \frac{U_k}{\omega} d\theta \quad (2-12)$$

推导得出电感 $\psi(\theta)$ 和转子位置角 θ 的关系，其函数表示形式为：

$$\psi(\theta) = \begin{cases} \frac{U_k}{\omega}(\theta - \theta_{on}) & (\theta_{on} \leq \theta < \theta_{off}) \\ \frac{U_k}{\omega}(2\theta_{off} - \theta - \theta_{on}) & (\theta_{off} \leq \theta < 2\theta_{off} - \theta_{on}) \\ 0 & \text{其他位置} \end{cases} \quad (2-13)$$

当 $\theta = 2\theta_{off} - \theta_{on}$ 时，磁链衰减至零，直至下一周期主开关导通前。由此画出磁链随着转子位置的变化曲线，如图（2-11）所示。

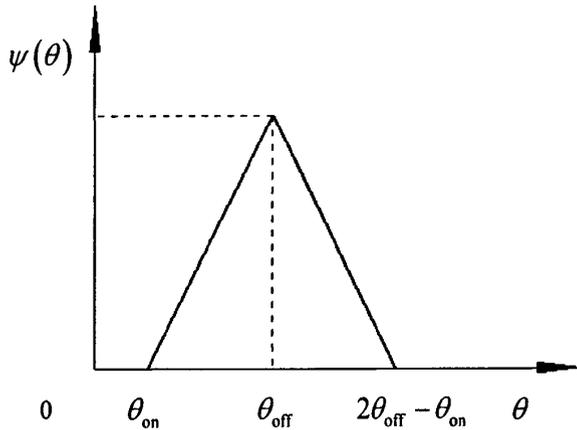


图 2-11 线性模型中磁链随转子位置的变化曲线

Fig.2-11 Flux linkage-angle curve in linear model

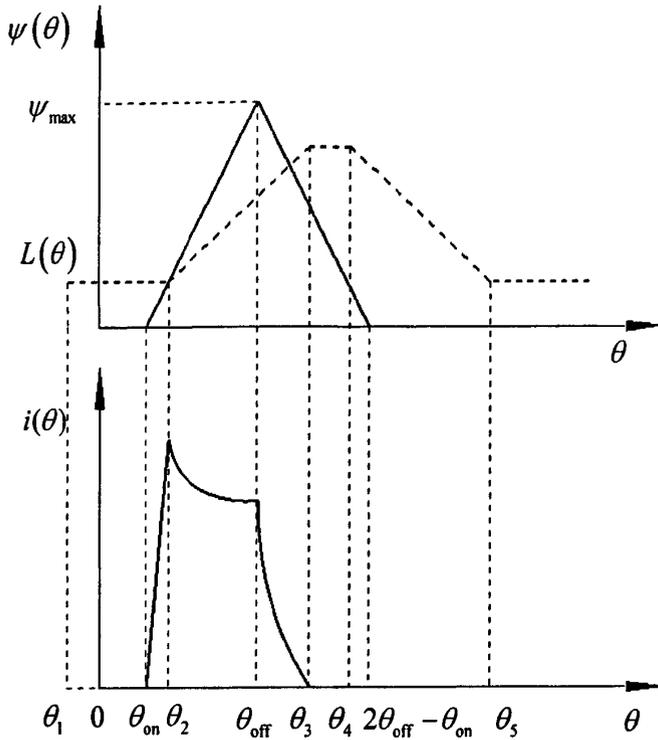
（3）绕组电流的分析

根据上面的分析，若将 $\psi(\theta) = L(\theta)i(\theta)$ 代入式（2-12）得：

$$U_k = \frac{d\psi_k}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = L \frac{di}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = L \frac{di}{d\theta} \omega + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (2-14)$$

如图（2-12）所示，若绕组在位置角 $\theta_2 \leq \theta < \theta_3$ 区域内通电，绕组电感增大，产生正向旋转电动势，电机输出电动转矩，电能部分转换成电机机械能，部分以磁能形式储存；若绕组在位置角在 $\theta_2 \leq \theta < \theta_3$ 内断电，磁能部分转换为电机的机械能，部分则向电源反馈，这时电机转轴上仍是电动转矩。在位置角 $\theta_3 \leq \theta < \theta_4$ 区域内，最大电感保持恒定值，旋转电动势变为零，此时如果电流续流，绕组中储存的磁能只向电源反馈，电机转轴上无电磁转矩。最后，若电流在电感下降区域即位置角 $\theta_4 \leq \theta < \theta_5$ 内未断开，由于旋转电动势是负值，造成制动转矩的产生，这时向电源反馈的能量包括两部分，一部分是绕组释放的磁能，另一部分是制动转矩产生的机械能，此时开关磁阻电机处于发电状态。

通过上面的分析得到，为了获得较大的转矩输出，一方面需要尽量减小制动转矩，这就在绕组电感开始减小时快速是绕组电流降低为零，另一方面要提高电动转矩，在绕组电感上升区域提高电流值。所以可以看出图(2-12)中的电流波形是一种典型的角位置控制方式。



在一定的转速和电压条件下，绕组电流大小只与电机初始条件以及位置角存在函数关系。根据分段给出的电机初始条件，并结合式(2-9)，得出绕组电流*i*(*θ*)的分段函数表达式：

$$i(\theta) = \begin{cases} \frac{U}{\omega} \frac{\theta - \theta_{on}}{L_{min}} & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) \\ \frac{U}{\omega} \frac{\theta - \theta_{on}}{L_{min} + K(\theta - \theta_2)} & (\theta_2 \leq \theta < \theta_{off}) \\ \frac{U}{\omega} \frac{2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta}{L_{min} + K(\theta - \theta_2)} & (\theta_{off} \leq \theta < \theta_3) \\ \frac{U}{\omega} \frac{2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta}{L_{max}} & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) \\ \frac{U}{\omega} \frac{2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta}{L_{max} - K(\theta - \theta_4)} & (\theta_4 \leq \theta \leq 2\theta_{off} - \theta_{on} \leq \theta_5) \end{cases} \quad (2-15)$$

(4) 电磁转矩的分析

忽略电路中机械耗损、电阻耗损和铁心耗损的前提下，由于能量守恒，电机输入的电能 W_e 转化为两部分，分别为电机转轴上输出的机械能 W_m 和电机磁储能量 W_f ，即为：

$$dW_e = dW_f + dW_m \quad (2-16)$$

通过端电压、电流计算绕组输入电能，为：

$$dW_e = Uidt \quad (2-17)$$

由电磁感应定律得：

$$U = \frac{d\psi}{dt} \quad (2-18)$$

式 (2-18) 带入式 (2-17) 得：

$$dW_e = id\psi \quad (2-19)$$

通过电磁转矩 T 和角位移 θ 计算机械能，即为：

$$dW_m = Td\theta \quad (2-20)$$

式 (2-19) 和式 (2-20) 可以得出：

$$dW_f = id\psi - Td\theta \quad (2-21)$$

式 (2-21) 上式表明，忽略各类损失的电机系统中，磁储能是通过变量 ψ 和 θ 表示的，磁储能由 ψ 和 θ 决定，当 ψ 是定值时，由式 (2-20) 得到转矩为：

$$T = -\frac{\partial W_f(\psi, \theta)}{\partial \theta} \quad (2-22)$$

由式 (2-19) 可以得到：

$$W_e = W_f = \int_0^\varphi id\varphi \quad (2-23)$$

假设磁路不计磁滞损耗且为线性磁路，则磁链 ψ 可由电感 L 表示：

$$\psi = L \cdot i \quad (2-24)$$

将式 (2-24) 代入式 (2-23)，得到磁储能的计算式：

$$W_f = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2-25)$$

将上式带入式 (2-22) 得到：

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2-26)$$

(4) 线性模型分析结论

通过上述一系列假设条件下得出的分析结果,让我们了解到开关磁阻电机的工作原理,可以定性分析电机的工作状态和转矩产生。得出以下结论:

① 由于电机转子转动时气隙发生变化产生了开关磁阻电机的电磁转矩,电感的变化率越大,转矩越大。开关磁阻电机设计时,定子极数应大于转子极数,可以增大电感的变化率,对于增大电机的输出转矩具有很重要的意义。

② 式(2-26)可以得到电机输出转矩与绕组电流平方是正比关系。在日常电机的使用过程中,存在磁路饱和问题,不存在这种正比关系了,但是,电机输出转矩仍然与绕组电流值的变化规律一致。由此,要提高电机的电磁转矩,增大电流是可以实现的一种方式。

③ 在电感上升或下降阶段,绕组电流能够分别产生正向或反向的电磁转矩。虽然电磁转矩的方向与绕组电流的方向无关,可以通过改变绕组电流通断控制,改变转矩的方向。

2.4 本章小结

(1) 介绍了开关磁阻电机驱动系统的组成,由开关磁阻电动机、功率变换器、位置传感器和控制器四部分组成,本文主要针对开关磁阻电机本体计算设计与研究,对功率变换器、位置传感器和控制器主要进行原理研究与选型。

(2) 分析了开关磁阻电机工作原理,开关磁阻电机遵循“磁阻最小原理”。并以三相12/8极开关磁阻电机为例分析了其工作原理。分析了开关磁阻电机运行特性,通过其运行曲线可以得到,开关磁阻电机的运行分为恒扭矩段、恒功率段和自然特性段。

(3) 通过电动机的基本方程式建立了开关磁阻电机的数学模型,针对其数学模型提出了理想线性、模型准线性模型、非线性模型三种求解方式。其中,线性模型忽略了电磁、涡流、磁滞、边缘效应、绕组间的互感等非线性因素,基于线性模型进行开关磁阻电机分析,包括开关磁阻电动机绕组分析、磁链分析和电磁转矩分析。

第三章 电动马达的设计计算与非线性仿真

第二章对开关磁阻电机的工作原理和运行特性进行了研究，并建立了相关的数学模型，本章将结合电动马达的实际设计要求，运用电路磁路计算公式与经验公式进行马达结构参数的设计，并且使用快速非线性仿真软件进行运行参数的仿真计算，然后进行比较分析。

3.1 SRM 基本结构要求

开关磁阻电机与传统电机在结构、原理等方面的存在不同，这样在设计方面，开关磁阻电机的设计具有自己特点，其结构参数需要满足一些基本要求。

随着开关磁阻电机的研究发展，不断有新的电机设计方案出现。根据每极齿数划分有单齿结构电机和多齿结构电机，通常来讲，多齿结构电机单位铁芯体积输出转矩要比单齿结构电机大，但由于主开关器件与铁芯的开关频率和损耗也随之增加，这就限制了高速开关磁阻电机的发展，因此，通常设计时不采用多齿结构。按气隙磁场的分布情况可分为轴向结构电机与径向结构电机，轴向结构多用于单相开关磁阻电机。按电机相数可划分成单相、两相、三相、四相和五相等，当开关磁阻电机相数少于三相时，电机不具有自启动能力，因此对于要电机四象限运行和自启动情况下，选用电机相数不少于三相。此外，电机相数的增加还能够降低转矩脉动、减小噪声，但是相数过多会造成功率器件的数量与成本的增加^[43-44]。

3.1.1 SRM 的极数和相数

由于开关磁阻电机结构是双凸极结构，电机性能的好坏很大程度上取决于定、转子极对数。设计电机过程中需要充分考虑定、转子数的合理匹配。电机需要实现任意位置上正、反自启动能力；要获得较大的输出转矩需要使绕组电感尽量减小；为达到各相绕组的开关频率最小的目的，需要使得各绕组互感尽量降低。为满足上述要求，定、转子极数应满足如下要求^[45]：

$$\text{LCM}(N_s, N_r) = qN_p \quad (3-1)$$

式中：LCM——最小公倍数；

N_r ——电机转子极数;

N_s ——电机定子极数;

q ——电机相数。

根据要求并结合实际应用,列出常见的开关磁阻电机定子、转子极数及相数搭配,可以根据表中所列参数进行选取。表(3-1)为常见的定子、转子极数及相数搭配。

表 3-1 常见的定子、转子极数及相数搭配

Table 3-1 Stator and rotor number in common use

相数	定子极数 (N_s)	转子极数 (N_r)
两相	4	2
	8	4
三相	6	2
	6	4
	12	8
四相	8	6
五相	10	8

3.1.2 SRM 的极弧

要实现 SRM 在任意位置时的正、反自启动功能。当开关磁阻电机的某一相定、转子的位置是凸极对凸极,相邻的定、转子极弧需要有重叠部分,这样才能实现在邻相通电时,电机可以输出电磁转矩,实现启动。为此,定、转子应满足的条件为:

$$\min(\beta_s, \beta_r) \geq \frac{2\pi}{qN_r} \quad (3-2)$$

或

$$\beta_s + \beta_r \leq \frac{2\pi}{N_r} \quad (3-3)$$

式中: β_s 、 β_r 为定子、转子极弧的弧度。

3.2 SRM 参数设计与计算

开关磁阻电机的转子上没有线圈和永磁体,坚固、可靠性高,特别适合井下恶劣环境。本次设计中,电机部分结构尺寸受到限制,而且要求设计满足钻井井下用电动马达。需要根据给定的参数进行设计计算。

3.2.1 给定参数与基本要求

表（3-2）和图（3-1）给出了本次设计的电机参数要求和尺寸要求，需要根据要求设计电机的具体尺寸参数，其他要求按照并用条件逐步解决。

表 3-2 电机参数

Table3-2 Switched Reluctance Motor data

项目	参数
额定功率	10kW
电源电压	380VAC
额定转速	1000r/min
电机耐温	≥120℃

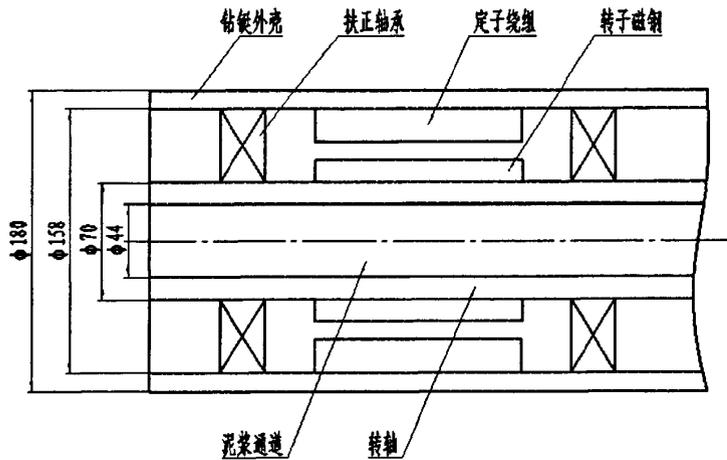


图 3-1 电机尺寸要求

Fig.3-1 Dimensional requirements of SRM

3.2.2 主要尺寸的计算选择

(1) 相数、极数

选用三相 12/8 的电机结构，在保证足够的转矩输出情况下，获得平滑的电磁转矩，降低转矩波动。

(2) 绕组端电压

开关磁阻电机的电源可以直接采用直流电流，也可采用交流经整流得到的直流电源，在工业驱动应用时，常常采用单相或三相交流电源整流。未考虑电容滤波作用时，令 U_d 为全波整流后的直流电压，则

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{3} U_2 \quad (3-4)$$

式中： U_2 为交流电源的相电压。

$$\text{本电机设计的绕组相电压为 } U = U_d = \frac{3\sqrt{2} \times 380}{\pi} = 514(\text{V})$$

(3) 细长比 λ

λ 的定义

$$\lambda = l/D_r \quad (3-5)$$

式中： D_r ——转子外径；

l ——铁芯长度。

λ 的大小影响开关磁阻电机的运行性能和经济指标。当 λ 值较大时，电机形状变得细长，电枢绕组的端部长度相对整个绕组占较小比例，这样可以减少用铜量，且细长的铁芯使得端部磁场影响变弱，在建立二维模型计算磁化曲线时计算误差较小； λ 值较大，减小了电机的转动惯量，利于开关磁阻电机的启动与调速。但是，由于电机细长带来了一定的问题，电机内部的通风散热条件变差。反之，当 λ 值较小时，电机会比较粗短，其特点与 λ 值较大时相反。

对于普通的开关磁阻电机，在选择 λ 时一般为 0.5-3.0，但本设计存在尺寸的严格要求，同时为了满足输出扭矩的要求，初选 λ 为 5.0。

(4) 气隙

开关磁阻电机的气隙有两种。通常指的气隙 g 是指定、转子凸极相对表面之间空气间隙的距离大小，通常称作第一气隙，最大电感 L_{\max} 值受第一气隙的影响；还有一种气隙 g_r 是指转子槽底与定子凸极表面的空气间隙，称为第二气隙，它的大小影响到最小电感 L_{\min} 值。

为得到较大的电机电磁转矩，应尽量降低气隙 g 。但受到加工工艺、装配工艺等的限制，气隙 g 不能过小。若考虑到减小电机的振动和噪音，气隙应取得稍大些。综合考虑气隙 g 取值为 0.5mm。

为取得较低的最小电感，提高电机的输出功率，第二气隙应选取较大，至少为气隙 g 的 20-30 倍，但不能过大，否则导致电机轴径不够或转子轭高度不足。所以 g_r 选择 20mm。

通过计算公式得出电机具体尺寸，根据工程设计特点做出圆整，具体参数如表(3-3)所示。

表 3-3 电机尺寸参数汇总

Table3-3 The dimensional data of SRM

参数	尺寸	参数	尺寸
定子外径 D_s (mm)	158	转子极弧 β_r ($^\circ$)	15
转子外径 D_r (mm)	104	定子轭高 h_s (mm)	6.5
铁芯叠长 l (mm)	500	转子轭高 h_r (mm)	8
气隙 g (mm)	0.5	轴径 D (mm)	70
第二气隙 g_i (mm)	20.5	定子槽深 d_s (mm)	20
定子极弧 β_s ($^\circ$)	15	每相绕组匝数 n	130

3.3 磁路计算

(1) 电磁功率 P_{em} (W):

$$P_{em} = P \frac{1+\eta}{2\eta} = 10000 \times \frac{1+0.8}{2 \times 0.8} = 11250$$

(2) 额定电磁转矩 T_{em} (N·m):

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{11250}{105} = 107.1$$

(3) 绕组电流有效值 I (A):

$$I = \frac{P_{em}}{U} = \frac{11250}{514} = 21.9$$

(4) 槽满率计算。

定子极间窗口面积 S_w (mm²):

$$\begin{aligned} S_w &= \frac{1}{2} \pi \left[\left(\frac{D_s}{2} - h_s \right)^2 - \left(\frac{D_r}{2} + g \right)^2 \right] - \frac{1}{2} b_s d_s \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{3.14}{12} \left[\left(\frac{158}{2} - 6.5 \right)^2 - \left(\frac{104}{2} + 0.5 \right)^2 \right] - \frac{1}{2} \times 8 \times 20 \\ &= 247 \end{aligned}$$

每槽导体净面积 S_{cu} (mm²):

$$S_{Cu} = \frac{1}{2}nS = \frac{1}{2}n \times \frac{\pi d^2}{4} = \frac{1}{2} \times 130 \times \frac{3.14 \times 1.58^2}{4} = 73.45$$

所以槽满率 $k = \frac{S_{Cu}}{S_w} = 0.52$

(5) 电流密度 $J(\text{A}/\text{mm}^2)$:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{21.9}{1.96} = 11.2$$

(6) 每相绕组导线总成 $l'(\text{m})$:

$$l' = nl_{av} = n(2l + 2b_s - 5) = 143$$

每相绕组电阻 $R'(\Omega)$:

$$R' = \rho \frac{l'}{S} = 1.58$$

(7) 电负荷 $A(\text{A}/\text{m})$:

$$A = \frac{qnl}{\pi(D_r + 2g)} = \frac{3 \times 130 \times 21.9}{3.14 \times (104 + 1) \times 10^{-3}} = 25900$$

(8) 损耗计算:

铜损 $P_{Cu}(\text{W})$ $P_{Cu} = qI^2R = 3 \times 21.9^2 \times 1.58 = 2273$

铁损 $P_{Fe}(\text{W})$ $P_{Fe} = 0.085n^{-0.5}U^2 = 710$

机械损耗 $P_{FW}(\text{W})$ $P_{FW} = 17nD_r^2l \times 10^{-9} = 105$

杂散损耗 $P_s(\text{W})$ $P_s = 0.07(P_{FW} + P_{Cu} + P_{Fe}) = 216$

总损耗 $\sum P(\text{W})$ $\sum P = P_s + P_{FW} + P_{Cu} + P_{Fe} = 3304$

(9) 效率 η :

$$\eta = \frac{P - \sum P}{P} \times 100\% = 70.6\%$$

3.4 RMxpert 非线性仿真

RMxpert 是专门进行旋转电机的设计分析软件,也是 Ansoft 软件的一个模块。可以快速计算如同步电机、感应电机、开关磁阻电机等多种电机的性能参数。RMxpert 还能快速地进行多种设计方案评估,并对设计方案进行参数优化,根据模型的对称性将优化设计后的方案自动生成二维/三维有限元分析模型^[46]。

3.4.1 仿真数据

通过输入电机的基本参数，可以建立相关电机模型，通过快速非线性仿真得出总体数据、加载类型、定转子数据、绕组数据、材料消耗、满负荷运行数据、电机启动数据等。表（3-4）至表（3-10）为具体参数输出。

表 3-4 总体数据

Table3-4 General data

额定功率 (kW)	10	驱动电路	全电压
额定电压 (V)	514	超前触发角 (°)	0
额定转速 (r/min)	1000	触发脉冲宽度 (°)	115
摩擦损耗 (W)	0	晶体管总压降 (V)	1.4
通风损耗 (W)	0	二极管总压降 (V)	1.4
加载类型	恒扭矩	工作温度 (°C)	120

表 3-5 定子数据

Table3-5 Stator core data

定子极数	12
定子外径 (mm)	158
定子内径 (mm)	105
定子轭高 (mm)	6.5
极弧系数	0.4
定子长度 (mm)	500
叠压系数	0.95
定子材料	DW470-50

表 3-6 转子数据

Table3-6 Rotor core data

转子极数	8
气隙长度 (mm)	0.5
转子内径 (mm)	70
转子轭高 (mm)	8
极弧系数	0.27
转子长度 (mm)	500
叠压系数	0.95
转子材料	DW470-50

表 3-7 绕组数据

Table3-7 Stator coil data

绝缘厚度 (mm)	0.3	导线漆膜直径 (mm)	0.11
端部调整 (mm)	0	每相绕组导线总长 (mm)	1045.12
并联路数	4	每相绕组电阻 (Ω)	1.82681
每极线圈匝数	130	电感 (mH)	1.92429
并绕根数	1	铁芯电阻 (Ω)	5.32342e+007
导线直径 (mm)	0.767	频率 (Hz)	144.279

表 3-8 满负荷运行数据

Table3-8 Full-load operation data

输入直流电流 (A)	28.1587	晶体管损耗 (W)	53.4613
相电流 (A)	25.6965	总损耗 (W)	3686.28
相电流密度(A/mm ²)	13.9038	输出功率 (W)	10787.3
摩擦通风损耗 (W)	0	输入功率 (W)	14473.6
铁芯损耗 (W)	0.00654592	效率 (%)	74.531
铜线损耗 (W)	3618.79	额定转速 (r/min)	1082.09
二极管损耗 (W)	14.0251	额定扭矩 (N·m)	95.1963

表 3-9 材料消耗

Table3-9 Material consumption

定子铜密度 (kg/m ³)	8900
定子铁密度 (kg/m ³)	7872
转子铁密度 (kg/m ³)	7872
定子铜重量 (kg)	13.4088
定子铁重量 (kg)	21.4304
转子铁重量 (kg)	10.3
总重量 (kg)	45.1393

表 3-10 电机启动数据与磁链数据

Table3-10 Start operation and flux linkage data

定子极磁密度 (Tesla)	1.32568
定子轭磁密度 (Tesla)	1.11923
转子极磁密度 (Tesla)	1.32196
转子轭磁密度 (Tesla)	0.909374
启动扭矩 (N·m)	774.126
启动电流 (A)	255.699
最大启动电流 (A)	280.598

3.4.2 仿真曲线

图 (3-2) 至图 (3-11) 为 RMxpri 软件快速非线性仿真得到的开关磁阻电机性能曲线。从曲线中可以得到效率、输出转矩、输出功率、输入电流等参数随转速的变化趋势。

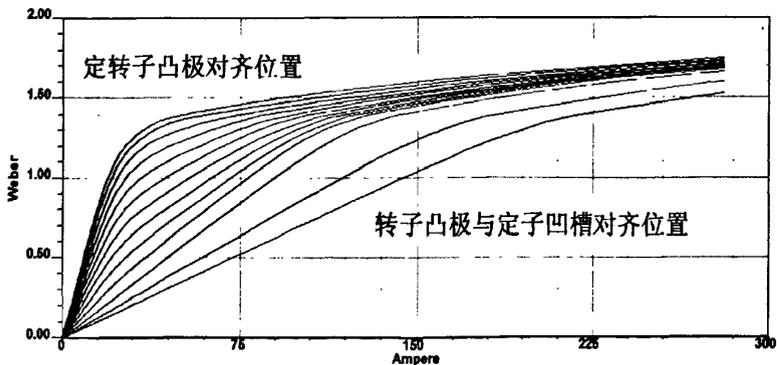


图 3-2 磁链曲线

Fig.3-2 The curve of flux linkage vs current at various positions

转子在不同位置的磁链曲线，又称为开关磁阻电机的磁化曲线簇。由定转子凸极对齐位置时的磁链随电流变化的曲线得到，随着电流的升高，磁链值提高，此时磁链和电流成线性关系；当电流上升到某一值后，磁链值的上升速度缓慢，趋于恒值，磁链在定转子凸极对齐位置时达到高度饱和。定子凸极和转子凹槽对齐位置，磁链和电流基本成线形关系，只有当电流达到一定值后，才出现非线性变化的特点。

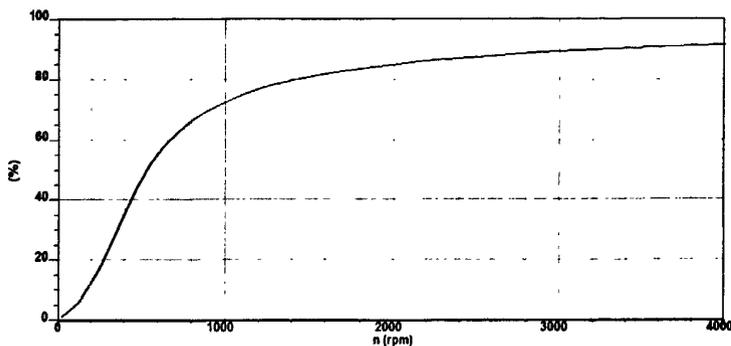


图 3-3 效率—转速曲线

Fig.3-3 The curve of efficiency vs speed

从图（3-3）的效率—转速曲线得出，在 0~500r/min 段，效率随着转速的提高迅速提升，在转速 500r/min 后效率就超过 60%，随着转速的不断提高，效率增速减慢，最终能达到 90%以上。在额定转速 1000r/min 时，设计的开关磁阻电机效率为 72.68%。

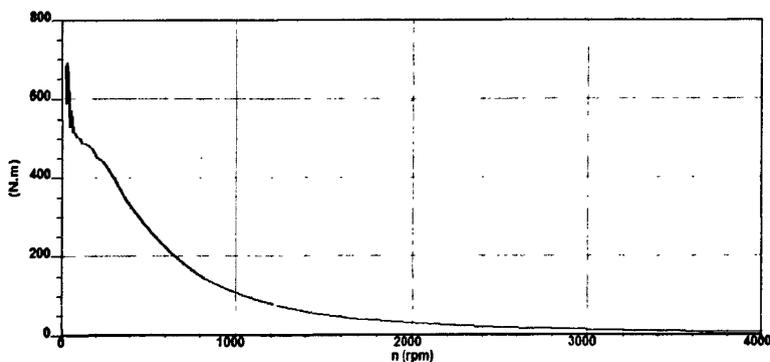


图 3-4 输出转矩—转速曲线

Fig.3-4 The curve of output torque vs speed

从图（3-4）输出转矩—转速曲线得出，开关磁阻电动机在启动时的很大，约为 600 N·m，这反映了开关磁阻电机良好的机械特性。随着转速的增加，输出转矩逐渐降低，当转速高于 2000r/min 后，输出转矩降至 50 N·m 以下，该电机运行时不能超过额定转速过大，否则将无法输出足够扭矩。得到在额定转速 1000r/min 时，设计的开关磁阻电机的输出转矩为 108.2 N·m。

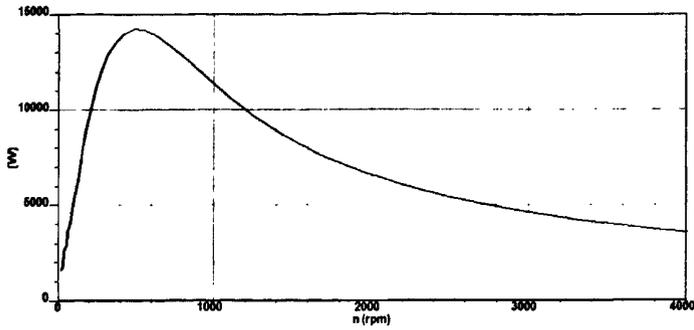


图 3-5 输出功率—转速曲线

Fig.3-5 The curve of outpower vs speed

从图（3-5）输出功率—转速曲线得出，当转速在 0-500r/min 段，开关磁阻电机的输出功率随着转速的迅速提高，最高达到 14.2kW；当电机转速高于 500r/min 后，输出功率逐渐变小，在额定转速 1000r/min 时，得到输出功率为 11.2kW，满足设计电机功率 10kW 的要求。

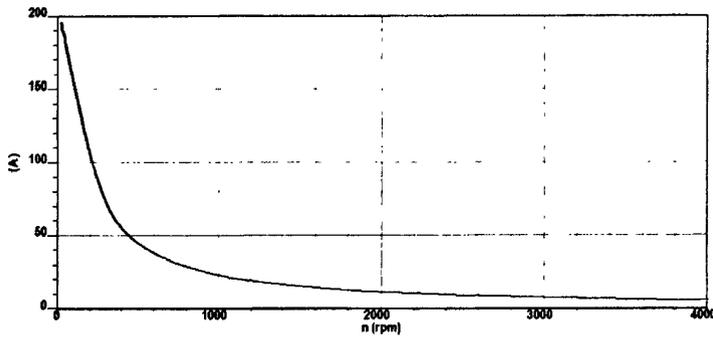


图 3-6 输入电流—转速曲线

Fig.3-6 The curve of input DC current vs speed

从图（3-6）输入电流—转速曲线得出，随着转速的提高，输入电流值降低。在额定转速 1000r/min 时，得到输入电流值为 22.3A。

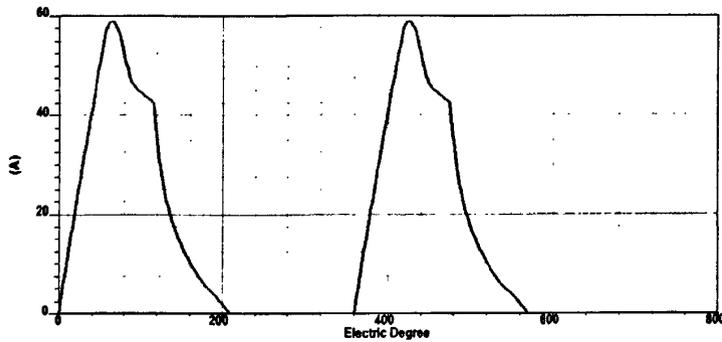


图 3-7 额定相电流波形

Fig.3-7 The curve of rated phase current

从额定相电流曲线得出，电流的最大脉冲值接近 60A，其电流波形特点与第二章分

析的典型电流波形一致。

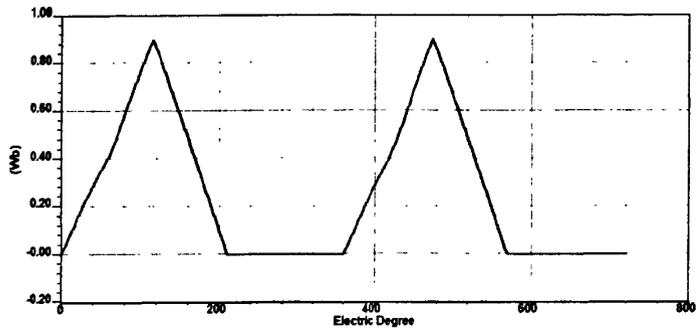


图 3-8 磁链波形

Fig.3-8 The curve of flux linkage

从图（3-8）磁链波形曲线得出，最大的磁链值为 0.85Wb。

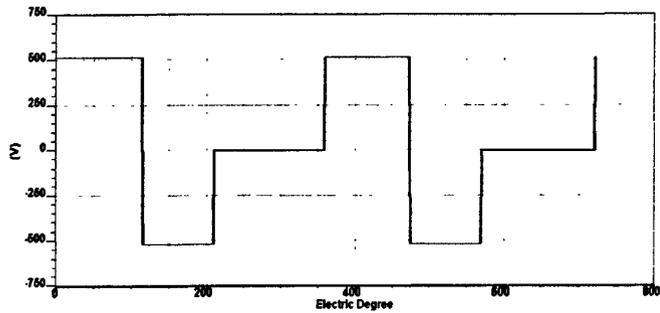


图 3-9 相电压波形

Fig.3-9 The curve of phase voltage

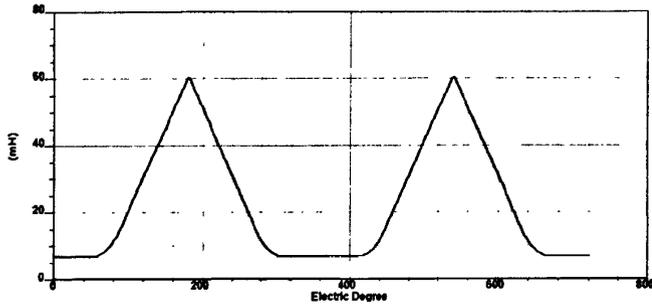


图 3-10 气隙绝缘波形

Fig.3-10 The curve of air-gap inductance

电磁饱和在开关磁阻电机的研究中一直作为一项研究重点。开关磁阻电机的气隙越小，饱和度越高，而电磁饱和会使开关磁阻电机径向力减少，从而使其转矩脉动减小。由于定、转子的偏心存在，开关磁阻电机的气隙不能无限变小。而且气隙越小越容易引起开关磁阻电机相应相的局部电磁饱和。本电机设计采用的气隙为 0.5mm，由图（3-10）得到，在气隙为 0.5mm 时的电感曲线上，最大电感值为 60.2mH。

3.5 磁路法计算值和软件仿真结果的分析比较

以上利用磁路法计算和软件仿真两种方法对开关磁阻电机进行了设计计算，通过仿真曲线得到数据，在转速为 1000r/min 时，额定扭矩、额定功率、损耗、效率、有效电流等重要参数进行比较分析。

表 3-11 磁路计算与仿真计算结果比较

Table3-11 The compare of magnetic circuit calculation and RMxpert simulation

项目	磁路计算结果	仿真计算结果	比较情况
额定扭矩(N·m)	107.1	108.2	基本一致
铜损(W)	2273	2559.68	略有差距
铁损(W)	710	0.00775386	相差极大
效率	70.6%	72.68%	相差不大
有效相电流(A)	21.9	22.3	相差不大

在磁路法计算时，对于损耗的计算有铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗。铜损数值正比于电流有效值的平方，与仿真计算结果相差不大。

铁损是由涡流损耗和磁滞损耗造成的，磁路法计算采用的是经验公式计算，这些计算公式更多的适用于常规电机，在开关磁阻电机的铁损计算中存在较大误差。而仿真计算中铁损几乎为零，由硅钢片参数设定造成（RMxpert 仿真选用硅钢片的 B-H 曲线如图 3-11），涡流损耗和磁滞损耗很小，现场应用时由于绝缘处理等问题，会导致铁损变化剧烈。铁损对于开关磁阻电机有着重要影响，本文第五章现场实验中将对铁损问题进行分析。

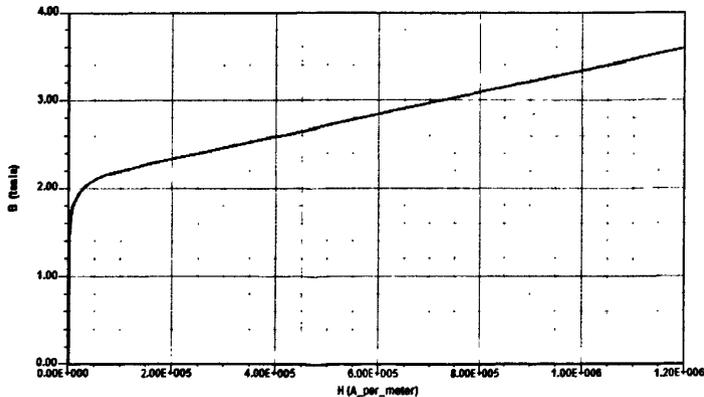


图 3-11 硅钢片的 B-H 曲线

Fig.3-11 B-H curve of silicon steel

由于仿真计算时忽略了摩擦、通风损耗等,使得仿真结果大于计算结果。

综合考虑, RMxpri 仿真结果很好的验证了磁路计算结果。所以形成了开关磁阻电机设计的基本思路,先进行基本磁路计算,再通过快速非线性仿真对计算参数进行校正,最后取得更为准确的设计参数。

3.6 本章小结

(1) 根据开关磁阻电机设计的基本要求,选择了合理的电机定子、转子极数及相数,确定了三相 12/8 的电机结构;为了满足开关磁阻电机在任何位置下,都具有正、反自启动能力,确定了定、转子极弧设计要求。

(2) 结合提出的参数要求,设计计算了电机的结构参数,主要有定转子内外径、气隙、极弧等。通过磁路计算方法,计算得到了设计电机的额定电磁转矩、槽满率、电流密度、损耗和效率等。

(3) 利用 RMxpri 非线性分析软件对设计电机仿真分析,通过输入电机的基本参数,可以建立相关电机模型,仿真得出了总体数据、加载类型、定转子数据、绕组数据、材料消耗、满负荷运行数据、电机启动数据等,而且得到了效率、输出转矩、输出功率、输入电流等参数随转速变化的曲线。

(4) 对磁路法计算和软件仿真两种方法得到的开关磁阻电机参数进行了比较分析,在转速为 1000r/min 时,通过对额定扭矩、额定功率、损耗、效率、有效电流等重要参数的比较分析,两种方法的计算结果基本一致,对差异很大的参数进行了原因分析。

第四章 电动马达的有限元分析

第三章对电动马达的基本参数进行设计与非线性仿真,本章利用有限元法对电机进行分析计算,有限元法是一种离散的数学方法,它以场的观点,精确的建立电机模型,全面、系统地分析电机性能,为电机的优化设计、驱动控制提供理论依据。

4.1 ANSOFT 有限元分析介绍

基于 Ansoft 软件建立开关磁阻电机二维和三维有限元模型,采用相应的控制策略对开关磁阻电机有限元模型进行动态仿真研究。由于开关磁阻电机的运行具有非线性的特点,许多电机的运行参数在实际运行时会出现非线性的变化,在电机的计算过程中使得计算误差变得较大。由于具有特殊电机结构,开关磁阻电机的许多运行参数不可能通过常规的计算得到。随着计算机技术的提高,特别是计算机辅助设计技术的快速发展,多种电磁场有限元计算分析的软件相继问世。这些软件可以较为完善对电机的静态场进行分析,通过电机静态分析结果对电机进行设计方面的优化与改进。但这些静态分析结果不能精确地对电机模型计算,需要进行瞬态分析,以提高计算准确程度。Ansoft 电磁场分析软件不仅能够实现电机静态电磁场分析,该软件具有强大的瞬态场分析能力,而且具有强大的后处理功能,这为开关磁阻电机的设计计算提供了一个准确、方便、快捷的计算工具^[47-56]。

相对于其他软件而言,Ansoft 软件具有其独特的优点:第一,该软件具有丰富的电机库,在电机库中有许多开发成熟的电机模型,可以直接使用,方便设计分析;第二,利用该软件进行有限元设计分析时,不是单纯针对电机模型仿真分析,而是将电机驱动电路部分与之结合一起分析,是一种整体分析的设计理念;第三,在该软件中建立模型后,可以对某些需要进一步优化计算的电机参数进行优化设计。开关磁阻电机进行瞬态模型建立,设计电机的功率变换电路,完成开关磁阻电机起动性能的仿真研究。

4.2 SRM 二维有限元计算的基本假设与基本方程

4.2.1 SRM 二维有限元计算的基本假设

求解区域内有电流源存在,计算分析时多采用矢量磁位,结合开关磁阻电机的结构

特点及工作原理作如下的假设：

- (1) 电流密度在所有导线上是均匀分布的；
- (2) 定转子的磁导率为各向同性，即具有单值 B-H 曲线；
- (3) 忽略电机的外部磁场，即假设定子外部磁场为零；
- (4) 忽略电机的端部效应，假设电流在相邻定子齿间极窗内是均匀分布；
- (5) 假设定转子无限长，磁场近似为二维进行分析。

4.2.2 SRM 磁场偏微分方程的推导

根据假设，开关磁阻电机的 Maxwell 方程组为：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_z \text{ (安培环路定理)} \quad (4-1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (磁通连续性定理)} \quad (4-2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \text{ (各向同性介质的本构方程)} \quad (4-3)$$

式中： ∇ ——向量微分算子；
 \mathbf{B} ——磁通密度矢量；
 \mathbf{H} ——磁场强度矢量；
 μ ——磁导率；
 \mathbf{J}_z ——电流面密度矢量。

针对开关磁阻电机电磁场问题，为了方便计算求解，实现磁变量与电变量的分离，引入矢量磁势 \mathbf{A} ，导出电磁场求解的偏微分方程，其定义为：

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (4-4)$$

为了磁势散度的限制，保证了磁势的唯一性，针对本文的二维静态场，将库仑条件作为限定条件：

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (4-5)$$

根据式 (4-1) ~ (4-5) 得到磁势的偏微分方程为：

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_z \quad (4-6)$$

即
$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial y^2} = -\mu \mathbf{J}_z \quad (4-7)$$

由上式可得，在平面磁场中，电流密度矢量 \mathbf{J} 与磁势矢量 \mathbf{A} 沿 z 轴方向只有一个分量 J_z 和 A_z ，用磁矢势法分析的二维磁场主自由度只有 A_z 。

4.3 ANSOFT 有限元分析过程

(1) 根据开关磁阻电机的设计计算的结构参数, 在电机设计软件 RMxpirt 中生成电机的几何模型, 如图 (4-1) 所示。

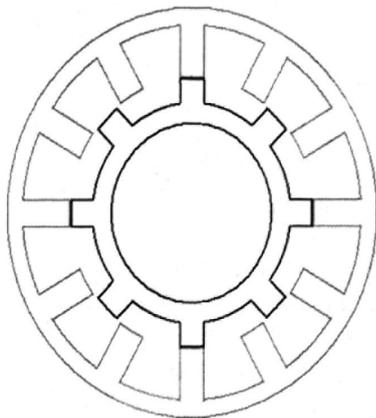


图 4-1 RMxpirt 生成的开关磁阻电机模型

Fig.4-1 SRM model in RMxpirt

(2) 将 RMxpirt 中生成的开关磁阻电机模型导入有限元分析软件 Ansoft Maxwell 2D 中, 生成电机的二维有限元模型 (如图 4-2 所示)。并定义电机各部分的材料属性。由于电机的对称性, 取模型的 1/4 进行分析 (如图 4-3 所示)。这样可以降低计算量, 提高计算效率。

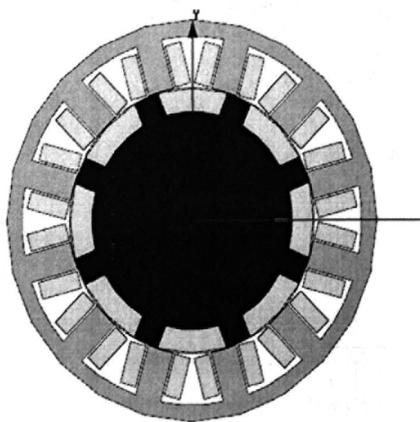


图 4-2 Maxwell 2D 模型

Fig.4-2 Maxwell 2D model

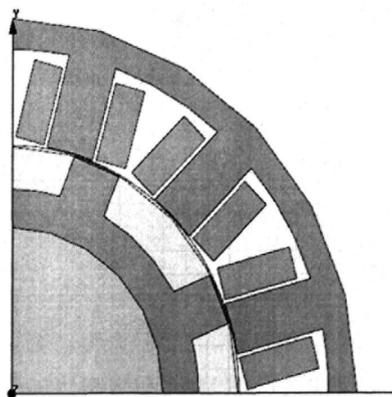


图 4-3 1/4 模型

Fig.4-3 1/4 model

(3) 定义计算分析的电机模型的边界条件和电机绕组的激励源。边界条件采用的是主从边界方式, 采用外电路驱动形式的绕组激励源。

Ansoft 软件可以将电机模型与外加电路构成一个系统整体进行仿真分析。由驱动电

路和功率变换器模型构成外电路，可通过 Ansoft 中的 Maxwell CircuitEdit 软件输入^[57]。由开关磁阻电机的工作原理得到，根据转子的位置信号控制主开关的通断，故以转子位置为变量，根据转子位置提供换信号给功率变换器。在功率变换器中（如图 4-4），由开关磁阻电机的等效线圈 L_a - L_c 、端部的漏感 L_1 - L_3 、线圈电阻 R_1 - R_3 ，三者通过串联形式形成一相等效绕组， S_1 - S_6 为主控制开关， D_1 - D_6 续流二极管， DS_1 - DS_6 为单向二极管， VCC 为直流电源， C_1 为寄生电容，可以通过设置滞环电流值和阈值电流值对每一相绕组电流进行斩波控制。在驱动电路中（如图 4-5）， V_1 、 V_2 、 V_3 为受控电源，通过检测转子位置得到电压信号控制开关 S_1 - S_6 的通断，完成每一相绕组的电流通断^[58]。

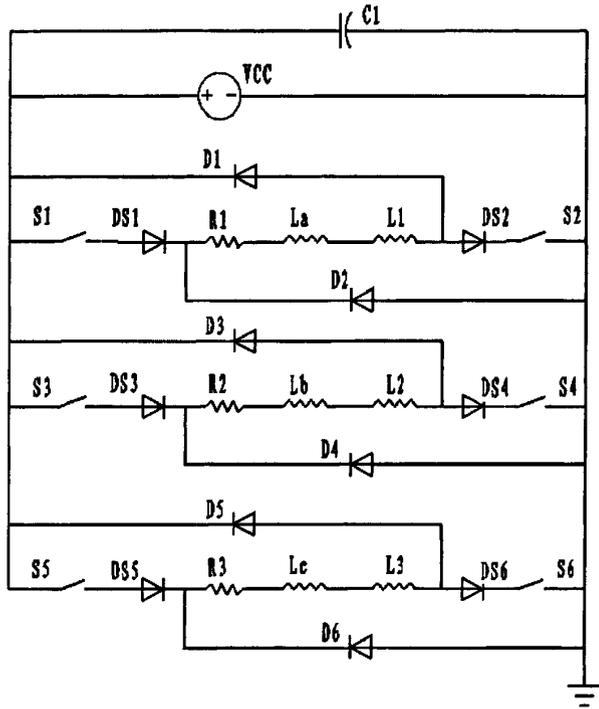


图 4-4 功率变换器模型

Fig.4-4 Power converter model

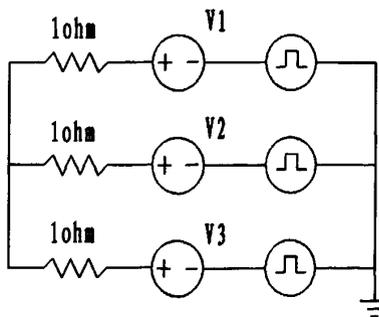


图 4-5 驱动电路模型

Fig.4-5 Driving circuit model

(4) 设置转子转速、有限元分析的步长及其有限元模型的网格剖分。其中网格划分结果如图(4-6)所示。

电机有限元分析设置的具体数据: 初始角度为 22.5° ; 时长 8ms, 步长 0.1ms; 转速 1000r/min; 电压 518V。

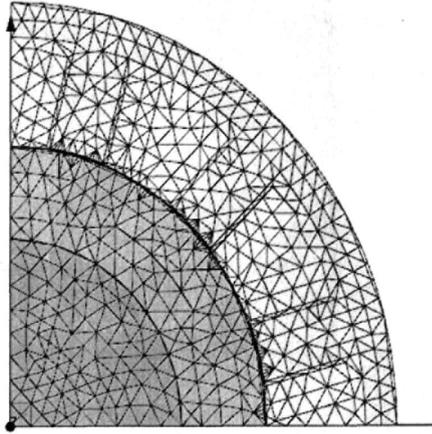


图 4-6 网格划分结果

Fig.4-6 Meshing result

通过以上的四步工作可以在 Ansoft 中建立开关磁阻电机的有限元计算模型, 接着就可以进行开关磁阻电机的瞬态仿真计算。

4.4 有限元分析结果与结论

通过 Ansoft 有限元分析软件的后处理功能, 得出分析结果, 现实相关的磁力线、云图、矢量图等, 并且借助动画设计功能, 生产变化的动画效果, 便于直观的分析电机运行的电磁特性。

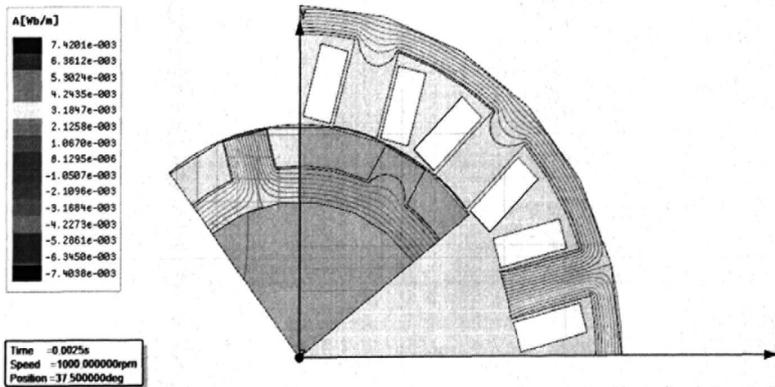


图 4-7(1) 某相导通, 定转子极对齐时的磁力线

Fig.4-7(1) The magnetic line when stator and rotor align

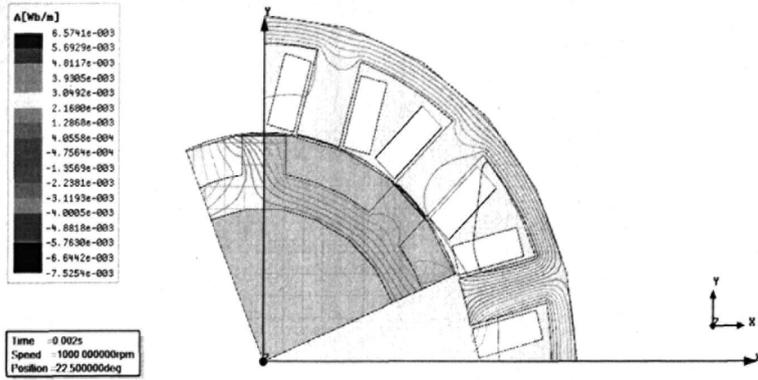


图 4-7(2) 某相导通，定转子极不对齐时的磁力线

Fig.4-7(2) The magnetic line when stator and rotor stagger

通过磁力线来表达电磁场的分布，通过上图可以看出，当开关磁阻电机任一相绕组导通后，通过比较定、转子的凸极在对齐和非对齐两种情况下的磁力线分布得出，开关磁阻电机的磁通分为两部分：为定子磁极产生的磁通绝大部分经第一气隙到达转子凸极，这部分磁通称为电机的主磁通，另外有一部分磁通通过极间气隙到了定子轭部，这部分磁通称为电机的漏磁通。

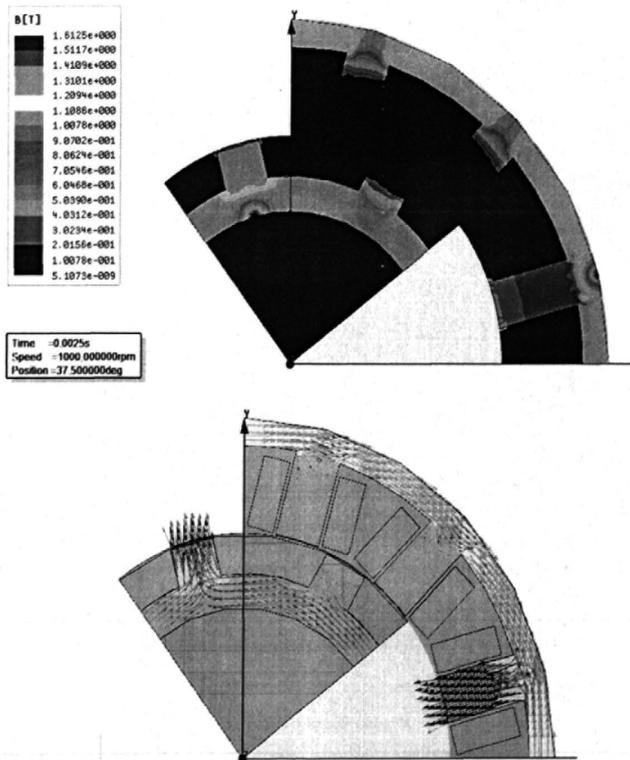


图 4-8(1) 对齐时的磁密云图和磁密矢量图

Fig.4-8(1) Flux density diagram and vector diagram when stator and rotor align

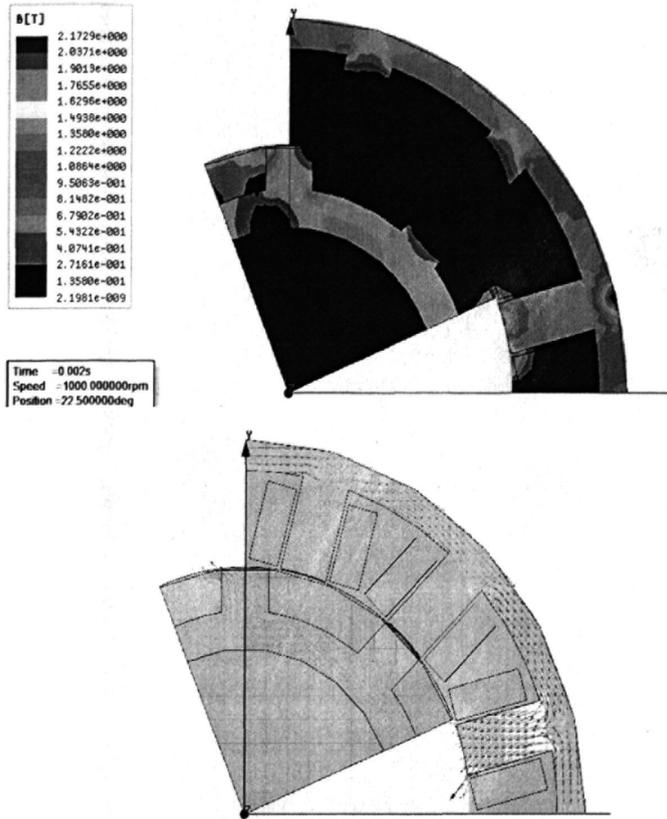


图 4-8(2) 不对齐时的磁密云图和磁密矢量图

Fig.4-8(1) Flux density diagram and vector diagram when stator and rotor stagger

磁场的强弱通常用磁通量密度表示，从图 4-8 (1) 和 4-8 (2) 可以看出，某一相在导通时，定转子位置重合，磁通量密度最大，磁场强度主要集中于定、转子极间气隙处。通过在定转子不同相对位置下的磁通量密度分布得出，随着定转子的相对位置发生变化，气隙磁阻发生变化，使电机内部磁感应强度发生变化^[59]。

开关磁阻电机磁力线与磁感应强度变化趋势一致，两者都反映了定、转子相对位置改变时的磁阻变化，磁阻变化影响开关磁阻电机内部磁场分布情况，磁场变化包括磁力线方向的改变，以及改变了磁场中磁感应强度大小。

瞬态分析得出的电机运行的性能曲线，包括扭矩波动曲线（图 4-9）、绕组电流波形（图 4-10）、磁链波形图（图 4-11）、反电势波形图（图 4-12）、铁芯损耗波形（图 4-13）。

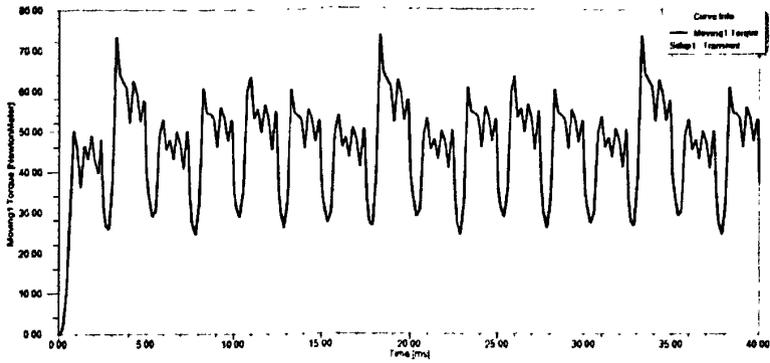


图 4-9 转矩波动波形

Fig.4-9 The curve of torque fluctuations

由图（4-9）转矩波动波形得到，系统稳定运行时的最大转矩为 $74 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，最小转矩为 $25 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，平均转矩为 $55 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，由转矩波动系数定义得到，该系统的转矩波动系数为 0.89，电机的转矩波动较大。

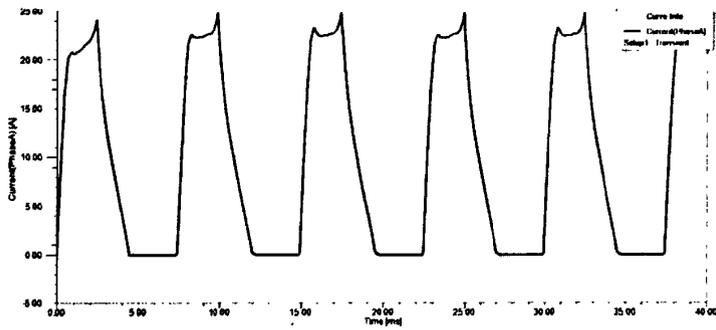


图 4-10 绕组电流波形

Fig.4-10 The curve of branch current

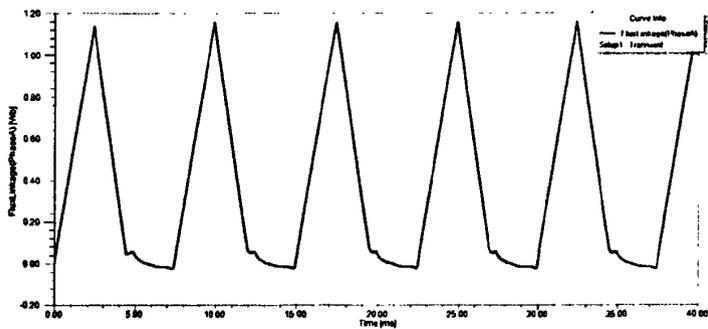


图 4-11 磁链波形

Fig.4-11 The curve of flux linkage

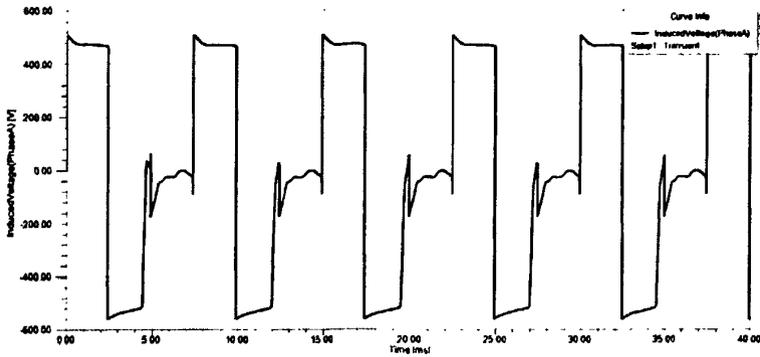


图 4-12 反电势波形

Fig.4-12 The curve of back emf

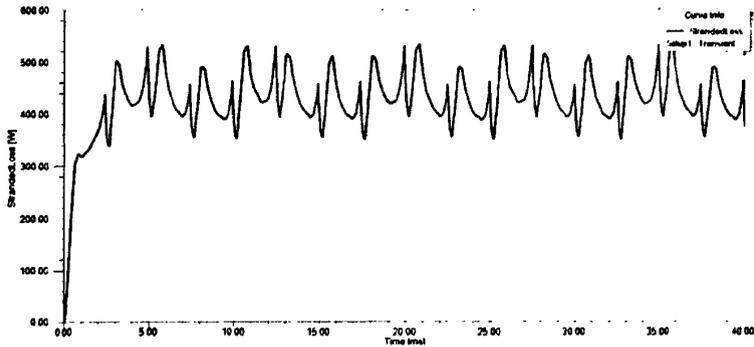


图 4-13 铁芯损耗波形

Fig.4-13 The curve of iron core loss

对以上曲线分析可以得出，电机运行时出现转矩波动较大、铁芯损耗较大的问题。针对开关磁阻电机转矩波动问题，从波动产生的原因分析，结合相应理论提出了相关解决方案。

开关磁阻电机转矩波动原因是由于开关磁阻电机采用双凸极的电机结构，电机磁路具有高度饱和特性。转矩波动大是开关磁阻电机的突出问题。最大限度的降低转矩波动是开关磁阻电机设计的关键问题之一。

开关磁阻电机转矩波动原因主要是电机结构设计和电机控制。从电机结构上看，转矩波动主要是由边缘磁通（在定、转子凸极重合之前的时刻）产生的，边缘磁通的存在使得电流呈现严重的非线性，这就产生了电机的转矩波动。电机结构对转矩波动的影响原因包括定、转子凸极的结构，定、转子外径、绕组匝数、铁芯长度等尺寸参数的设计。一般情况下，随着电机转子外径的尺寸增加，转矩波动情况加剧；铁芯长度增加会使电机转矩提高，这样就造成了转矩波动情况的加剧；增加定子外径尺寸，能够使电流峰值降低，这样会使转矩波动程度降低。从开关磁阻电机控制方面考虑，转矩波动受到斩波频率的大小，不同的开通、关断角等的影响。

针对本设计，由于存在尺寸上的限制和规定，在电机本体设计时采用了控制转子外径、减小铁芯长度等方法来控制转矩波动，同时调整定、转子的磁极结构，达到降低转矩波动的目的。

4.5 本章小结

(1) 介绍了 Ansoft 公司推出的 Maxwell 2D 电磁场分析软件，此软件既可以进行静态电磁场分析又能对瞬变电磁场的进行分析计算。确定了开关磁阻电机二维有限元计算的基本假设，推导了开关磁阻电机磁场偏微分方程。

(2) 将 RMxpert 中生成的开关磁阻电机模型导入有限元分析软件 Ansoft Maxwell 2D 中，进行有限元分析。分析得出了开关磁阻电机磁感应强度变化与磁力线的走向一致，都反映了定、转子相对位置改变时磁阻改变对电机内部磁场的影响；通过转矩波动曲线分析得出，转矩波动大是开关磁阻电机的突出问题，并提出来改进转矩波动的方法。

第五章 实验装置设计与实验研究

5.1 电机实验台设计

5.1.1 实验台总体设计方案

电动马达实验台设计需要根据开关磁阻电机试参数设计,如扭矩测量、调速设计、功率测试、温升测试等,通过测试参数选择相关测试设备,以满足测试所需速度、精度等。

实验台的技术要求有:额定转速以下乃至堵转零转速时都能保持稳定的恒扭矩加载,额定转速以上能够保持稳定的恒功率加载,这对于那些需要进行低转速乃至堵转时加载的实验来说是非常理想的;响应快,加载控制器扭矩响应达 5ms,这对于要求快速响应的测试情况非常有意思;采用的扭矩传感器要求直接测量,精度高,响应快,可靠性好,结构紧凑。

图(5-1)所示为电机实验台设计的总体方案,实验台由测试电机本体、轴承支架、传感器、负载设备及底座等组成。

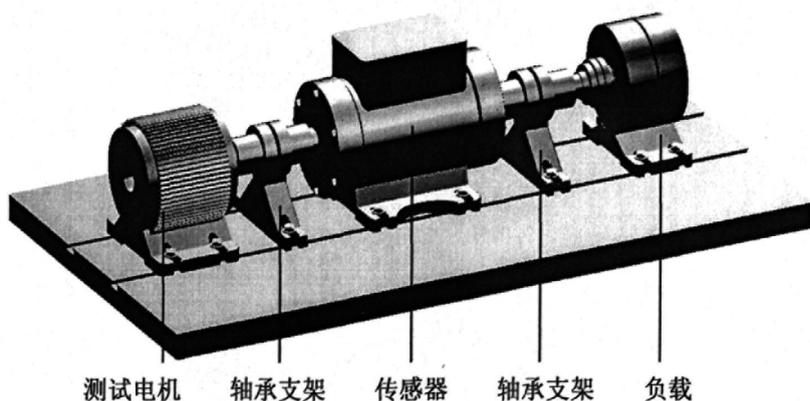


图 5-1 电机实验台的设计方案

Fig.5-1 The design scheme of motor test bench

5.1.2 马达本体设计

马达本体主要是由电机转子、电机定子、定子绕组、电机转轴、前后端盖、遮光板、位置传感器等组成,其基本结构如图(5-2)所示。

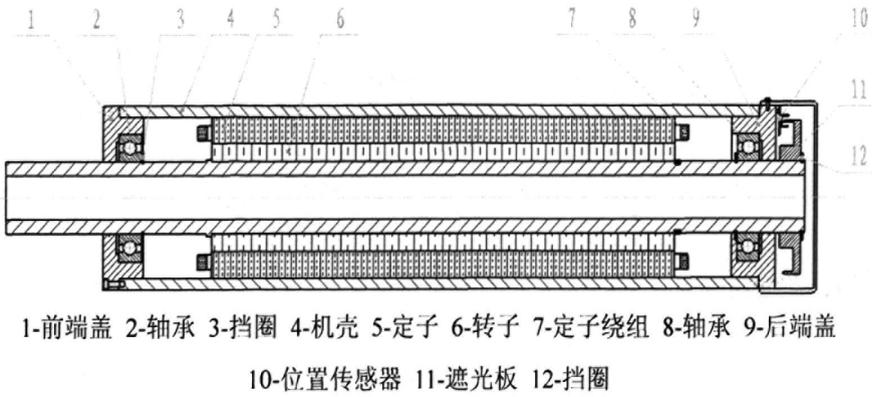


图 5-2 马达本体结构图

Fig.5-2 Motor structure chart

开关磁阻电机设计制造的整个流程：根据以上对开关磁阻电机参数设计，结合实际加工时的技术要求，进行马达本体三维模型建立，完成二维图纸设计，进行定、转子冲片加工，通过将冲片压叠完成定、转子的组装（如图 5-3），进行线圈绕组的缠绕（如图 5-4），最后进行位置传感器、遮光板、机壳等组装，这样就完成电机本体的组装。

(1) 电机本体三维实体模型

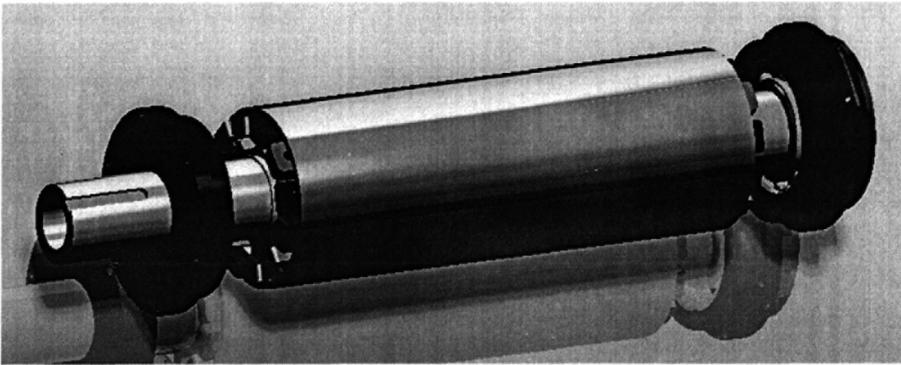


图 5-3 电机本体三维模型

Fig.5-3 3D model of SRM

根据设计尺寸，利用三维绘图软件绘制开关磁阻电机本体的三维实体模型，如图 (5-3) 所示。

(2) 定、转子结构

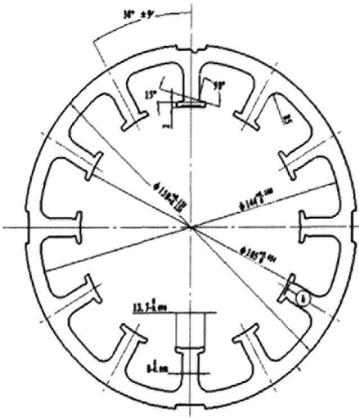
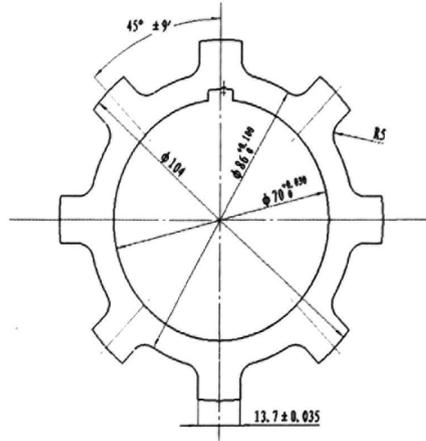


图 5-4 开关磁阻电机定子尺寸图

Fig.5-4 The dimensions of SRM stator



5-5 开关磁阻电机转子尺寸

Fig.5-5 The dimensions of SRM rotor



图 5-6 定子、转子实物图

Fig.5-6 SRM stator and rotor

(3) 绕组接线方式及绕组实际情况

开关磁阻电动机的绕组连接方式主要是指组成一相绕组的各个线圈的连接。由于开关磁阻电机的结构形式和运行要求各异，绕组的排列顺序与连接方式也有不同。对一绕组而言，主要有两种连接方式：一种是线圈正向串联连接方式，即同一相的线圈在串联磁路上的磁势的作用方向是相同的，无法相互抵消。另一种线圈向串联串联连接方式，即同一相的线圈所在的磁极具有相同极性，磁势在每对极的串联磁路上是相互抵消的。本设计采用反向串联的绕组接线方式^[60-61]。图(5-7)本电机绕组的实物图。

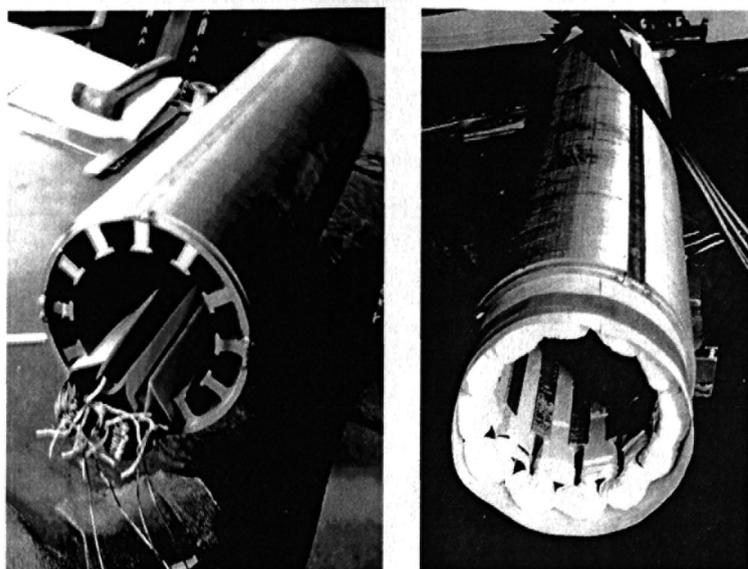


图 5-7 电机绕组实物图

Fig.5-7 The SRM stator coil photo

(4) 本体其他结构及零件

① 前后端盖设计：前后端盖的设计不但要充分考虑机壳尺寸、轴承尺寸等尺寸要求，而且要设计密封圈槽，保证密封效果。如图（5-8）所示为前端盖的结构图。

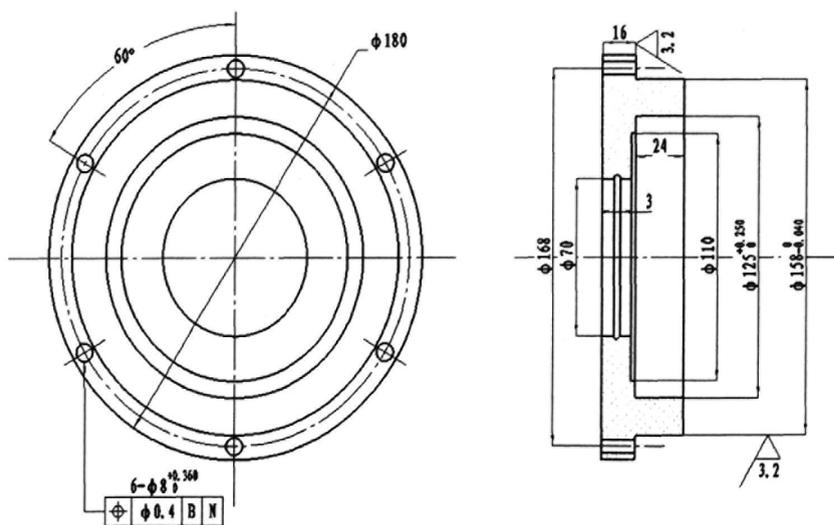


图 5-8 前端盖结构图

Fig.5-8 End cover structure

② 位置传感器类型选择：本电机控制所需的转子位置信号是通过光电式位置传感器测得的，光电式位置传感器的工作原理是，信号盘安装在发光二极管与光敏晶体管之间，当遮光板上的透光孔旋转到两者之间时，发光二极管发出的光线就会照射到光敏晶体管上，此时光敏晶体管导通，其集电极输出低电平；当遮光板上的遮光部分旋转到发

光二极管与光敏晶体管之间时，发光二极管发出的光线就不能照射到光敏晶体管上，此时光敏晶体管截止，其集电极输出高电平。

③ 轴承选型：根据内外径尺寸要求，结合轴承所受载荷，选择了轴承类型为深沟球轴承 6214。

5.1.3 其他相关设备的选型

(1) 磁粉制动器

磁粉制动器作为过载器，用在发动机、电动机、电动结构、液压元件、减速器等动力机械中作转矩测量时的加载装置。根据电磁原理，磁粉制动器利用磁粉进行转矩传递。其电流和转矩之间基本成线性关系。在无滑差情况下，磁粉制动器可以传递一定的转矩，具有响应速度快、结构简单、噪音小、无污染、节能等优点，是一种性能优越的多用途控制设备。如图（5-9）所示，为一种常见的磁粉制动器。

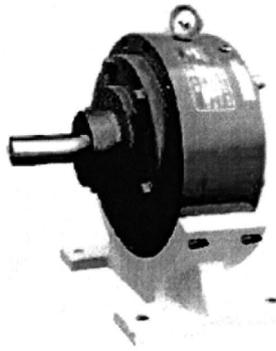


图 5-9 磁粉制动器

Fig.5-9 Magnetic powder brake

磁粉制动器可以轻松进行大范围的控制；可以达到连续滑动运转；可以得到安定的扭力；无鸣叫音，运转相当安静；热容量很大，由于使用了耐热性优越的磁粉及运用了理想的冷却方法；可以达到平顺的连续及驱动状态；由于静摩擦系数和动摩擦系数几乎一样，所以完全连结时不会产生震荡，可以因应负载加减速度。本实验台设计选用的是 CZ-50 型机座式磁粉制动器。

(2) 转矩转速传感器

选用 JN338-AF 型法兰式转矩转速传感器。图（5-10）所示是专为轴向安装空间小的使用场合而设计的一种新型转矩转速传感器，它的轴向尺寸为 70mm，法兰盘输出，扭矩测量精度高，转速适用范围广，可动态、静态测量连接部位转动轴的转矩、转速、轴功率。电源供电和信号传递为非接触式；无轴承，可适用于各种转速；与动力轴、负

载轴连接为刚性连接；安装调试方便，用户轴的径向跳动小于 1mm 即可使用，传感器底部调节螺栓可方便调节安装同轴度。



5-10 法兰式转矩转速传感器

Fig.5-10 Flange torque speed sensor

(3) 控制器

本实验所设计的开关磁阻电机功率为 10kW，本控制器以 IGBT 为主开关元件，其具有通态电压低、耐高电流、高电压的特点，目前已广泛应用于噪音低、体积小、变频电源性能高、电源不间断等场合。控制器根据位置传感器的输出信号对电机控制，可以实现的功能有：启动/停止、正向调速、反向调速、换向能功能，并且具有过载、控制器过热、电源缺相、超速、短路等故障的保护功能。图（5-11）所示为开关磁阻电机控制器。



5-11 开关磁阻电机控制器

Fig.5-11 SRM controller

(4) 电源控制及数据测试设备

选用 CKW-5/36-1 型控制电源对电机电源进行调节，并通过控制器面板的电流显示表显示数据；智能扭矩仪的输出器，可以实时显示扭矩、转速、功率等参数。

转矩转速功率测试仪选用 JYY-100 型转矩转速功率测试仪，这样测试仪是采用微电脑技术设计的智能化、高精度电子仪器，能与各种量程的应变式扭矩传感器配套使用，测试机械的扭矩、转速和功率。图（5-12）所示为电源控制及转矩转速功率测试仪。



图 5-12 电源控制及转矩转速功率测试仪

Fig.5-12 Power controller and torque speed tester

5.1.4 实验台搭建

在完成电机总成样机研制后，搭建样机测试平台，该测试平台主要包括电机本体及控制柜、粉磁制动器、转矩转速传感器、测试支架及冷却系统、配电柜、智能扭矩仪及电机参数测试仪器等组成，测试平台具体结构见图（5-13）。

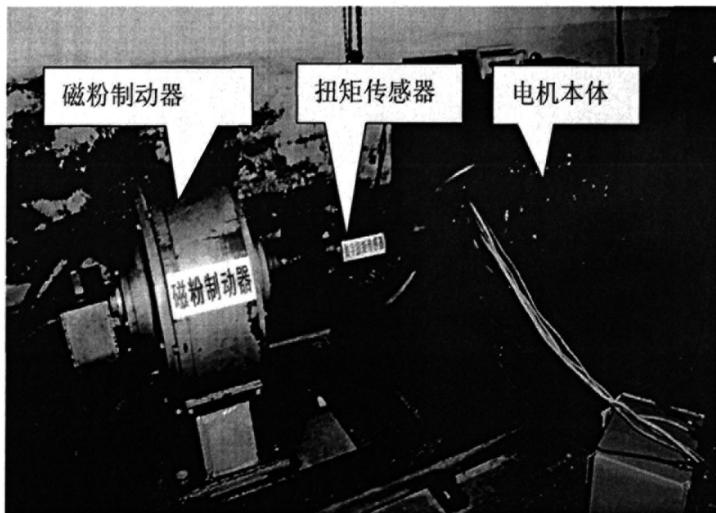


图 5-13 实验平台的结构图

Fig.5-13 SRM test bench structure photo

5.2 现场测试

5.2.1 实验目的

此次实验的目的是测验开关磁阻电机系统在此种特定要求下的转速、转矩是否达到常规要求，如调速、调扭矩、升温。同时，通过实验发现电机实际应用时存在的问题并提出解决方案。

5.2.2 实验条件

地点：开关磁阻电动机实验平台。

温度：环境温度 32℃。

电源电压：397V 交流。

电流频率：50Hz。

控制器规格：11-15kW 壁挂式。

本电动机调速系统为电子产品，应注意防尘、防潮、防震、防电磁干扰。

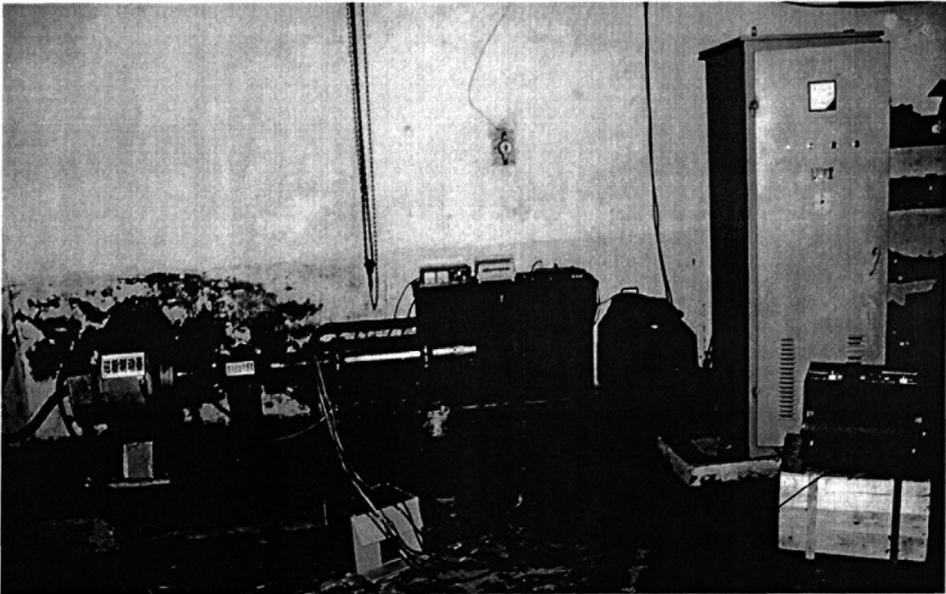


图 5-14 电机现场测试图

Fig.5-14 SRM field testing photo

5.2.3 实验项目

(1) 额定转速时的功率、电流、转矩。

- (2) 在 1.5 倍转矩时, 200r/min、500r/min、1000r/min 的功率、电流。
- (3) 供电电流 20A、转速 1000r/min 时的功率、转矩。
- (4) 恒功率段, 随着转速提高各参数变化情况。
- (5) 额定功率、额定转速时, 在有冷却、无冷却两种条件下的温升情况。

5.3 数据分析

- (1) 额定转速时的转矩、功率、电流。数据见表 (5-1)。

表 5-1 额定转速 1000 r/min 测得的转矩、功率、电流数据

Table 5-1 The data tested when SRM in rated speed

转速 (r/min)	转矩 (N·m)	功率 (kW)	电流 (A)
1001	98.1	10.15	26.5
1002	96.2	10.06	26.8
1000	97.5	10.20	26.0

计算得到平均值, 在额定转速 1000r/min 时, 转矩为 97.3 N·m, 功率为 10.14 kW, 电流值为 26.4A。

- (2) 测试电机在超转矩时的数据参数, 对于分析电机过载性能有重要意义, 本实验测试了超转矩 140N·m 时, 200r/min、500r/min、1000r/min 的电流、功率。具体数据见表 (5-2)。

表 5-2 超转矩时的参数测试

Table 5-2 The data tested when SRM exceed rated torque

转矩 (N·m)	转速 (r/min)	功率 (kW)	电流 (A)
142	201	2.95	19.9
141	500	7.4	26.1
140	1000	14.66	45.6

- (3) 供电电流 20A 时的转矩、功率。

控制供电电流在 20A, 测试在转速 1000r/min 时的运行参数, 得到的扭矩为 81N·m, 功率为 8.5kW。

- (4) 恒功率段 (转速 1000r/min 至 2000r/min), 随着转速提高各参数变化情况测试, 通过分析电机的输出扭矩、功率因数及电机功率等参数, 得出恒功率段的各参数变化, 更好的分析开关磁阻电机运行性能。具体测试数据见表 (5-3)。

表 5-3 井下电动钻具专用开关磁阻电机总成样机性能测试表

Table 5-2 Performance of SRM used in electric drilling

输出转速 (r/min)	转矩 (N.m)	输出功率 (kW)	电流(I)	功率因数	有功功率 (kW)	无功功率 (kW)	视在功率 (kW)	电机效率 (%)
1003	95.25	10	26.8	0.9983	12.8	0.3	13.1	78.1
1100	86.85	10	28.0	0.9985	12.6	0.4	13.0	78.3
1201	79.55	10	29.2	0.9984	12.5	0.35	12.85	77.6
1304	73.26	10	30.1	0.9992	12.8	0.3	13.1	76.3
1402	68.14	10	30.4	0.9990	13.0	0.35	13.35	76
1500	63.69	10	30.6	0.9993	13.3	0.45	13.75	75.2
1603	59.60	10	31.1	0.9991	13.5	0.51	14.01	74
1702	56.13	10	31.3	0.9985	13.8	0.62	14.42	72.5
1804	52.96	10	32.1	0.9983	14	0.7	14.7	71.4
1906	50.12	10	33.4	0.9965	14.1	0.8	14.9	70.9
2005	47.65	10	34.5	0.9954	14.3	1.0	15.3	69.9

由上表测得数据，绘制出恒功率段扭矩、电流和效率随着转速变化的曲线，如图（5-15、16、17）所示。

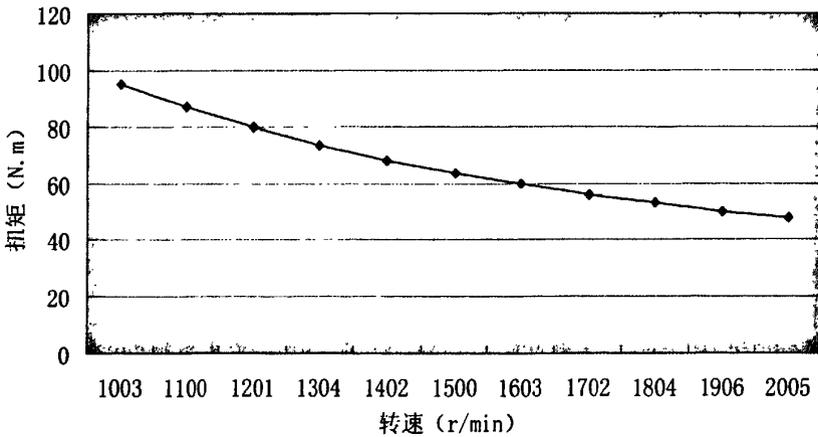


图 5-15 扭矩-转速曲线

Fig.5-15 The curve of output torque vs speed

由图（5-15）的扭矩-转速曲线可以得到，输出转矩随着转速的提高而降低，这与理论分析和非线性仿真结果一致。

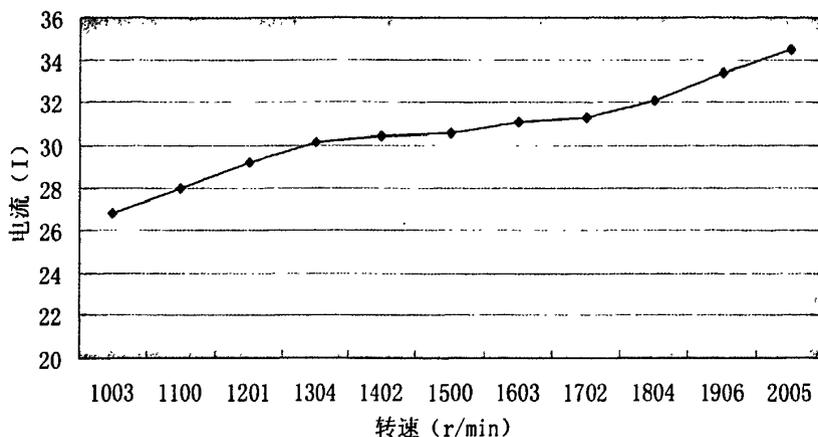


图 5-16 电流-转速曲线

Fig.5-16 The curve of input current r vs speed

由图 (5-16) 的电流-转速曲线可以得到, 电流随着转速的提高而逐渐变大, 这与理论分析和非线性仿真结果一致。

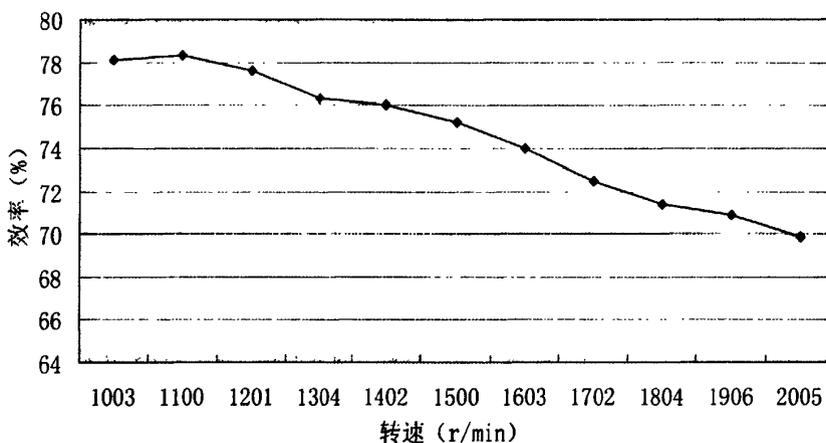


图 5-17 效率-转速曲线

Fig.5-17 The curve of efficiency vs speed

由图 (5-17) 的效率-转速曲线可以得到, 电机恒功率运转情况下, 转速在 1000-1200r/min 段时, 效率保持在 78%左右, 满足电机设计的效率要求; 当转速超过 1300r/min 后, 效率随着转速的提高而降低。建议本开关磁阻电机在恒功率运行时, 尽量在 1000-1200r/min 段运行, 以保证 78%以上的效率。

(5) 温度测试

实验前的最初测试时, 发现马达的温度升高较快, 针对温升问题, 为了保证电机安全稳定专门设计了一套水冷系统, 本系统的原理就是通过冷却水冲刷电机本体外壁, 带走部分热量, 实现降温作用。表 (5-4) 为电机在有冷却系统时所测电机内部温度数据。通过数据对比分析更好的研究开关磁阻电机的温度变化, 分析温度变化原因, 设计

解决这一问题的技术方案。

表 5-4 不同条件条件下电机内部温度变化

Table 5-4 Motor internal temperature changes in different condition

	电机内部温度 (°C) (无冷却)	电机内部温度 (°C) (水冷)
加载前	32	29
加载后 6 分钟	46	42
加载后 12 分钟	68	54
加载后 18 分钟	72	52
加载后 24 分钟	75	50
加载后 30 分钟	80	46
加载后 36 分钟	80	46

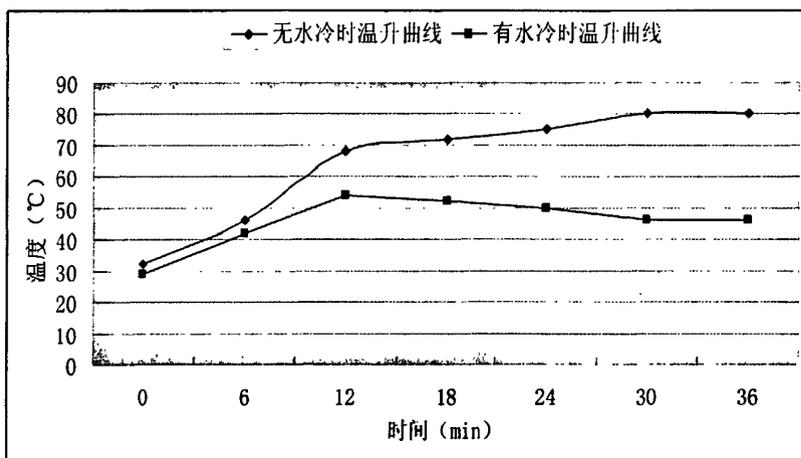


图 5-18 不同条件下的温升曲线

Fig.5-18 The curve of temperature changes in different condition

通过图 (5-18) 的温升曲线得到, 在 0-12 分钟段, 两种情况下的温度升高都很迅速。超过 12 分钟后, 无水冷却系统的测试曲线表明, 温度继续上升, 但速度减缓, 最高电机温度接近 80°C; 而有水冷系统的测试曲线表明, 温度略有下降, 此后基本保持不变。以下针对温升变化的具体原因分析并提出相应的解决方案。

温升变化原因主要为涡流损耗和磁滞损耗, 这两种损耗即电机铁损。开关磁阻电机的铁心损耗主要集中在定子铁心, 且定子轭损耗最大。

开关磁阻电机与交流异步电动机的结构不同, 随着电机频率的不断提高, 铁损比重也随之增加, 开关磁阻电机在实际使用时, 其频率常常高于 200Hz, 铁损比重较高, 所以计算设计电机结构时不能忽略。此外, 开关磁阻电机温升也受电机铁损是影响很大,

铁损分析计算对于分析温升也具有重要意义。现有的开关磁阻电机设计方法与理论存在不足,铁损理论与方法都还未成熟。铁心中磁通变化情况及其规律与电机转速、相电流、开断角等都有密切关系,与异步电动机相比,开关磁阻电机的磁通变化规律要复杂的多,目前为止,异步电动机的铁损尚未建立准确的计算模型,多数情况下需要依靠经验值计算,所以,开关磁阻电机的铁损计算与分析更无法实现。铁损的研究分析已成为开关磁阻电机研究的核心问题之一^[62]。

铁心损耗分析及热设计是开关磁阻电机设计一项重要内容。

本次开关磁阻电机设计过程中,为了解决温升问题,提出了部分解决方案:适当增加了铁心长度;绕组线圈的绝缘级别为 H 级绝缘;硅钢片的使用上,采用低损耗类型;改进开关磁阻电机的冷却方式。采取了以上针对性的解决措施,保证了本次设计的开关磁阻电机的可靠运行。

5.4 实验结论

(1) 井下电动钻具专用开关磁阻电机及控制系统在额定转速 1000r/min 时,能正常发挥 10kW 的功率及 97.3N·m 的转矩;

(2) 该电机在在低、中、高三种转速时,能超转矩 1.5 倍运转,能够满足设计要求。

(3) 该电机在恒功率段工作时,能够较高的输出转矩和效率,但随着的转速的提高,输出转矩和效率会随之降低。

(4) 温升问题是开关磁阻电机存在的重要问题,考虑到钻井过程中电机内外可以通过泥浆,这样会利于电机散热,但井底环境温度较高,所以电机线圈选择时应采用 H 级绝缘。

结 论

本文通过对井下电动钻具专用马达(开关磁阻电机)进行设计研究,得出如下结论:

(1) 根据拟定的研究内容和研究目标查阅国内外开关磁阻电机研究方面的资料,熟悉并掌握了开关磁阻电机的基本性能及应用领域,确定了利用开关磁阻电机作为井下马达的设计方案。

(2) 通过研究开关磁阻电机的工作原理,结合相关电磁理论,进行了电动马达的电机本体参数设计。通过磁路计算和计算机非线性仿真两种方法对电机性能分析,通过分析比较了两种方法得出的数据,得到两种方法计算出的参数基本一致。此外, RMxprt 仿真得出了开关磁阻电机参数和性能曲线。

(3) 应用电磁有限元分析软件 ANSOFT 对开关磁阻电机进行有限元分析,得到了相关的磁力线、云图、矢量图等,而且得出了开关磁阻电机铁芯损耗波形、转矩波动曲线等重要曲线。针对转矩波动问题,由于本设计存在尺寸上的限制和规定,选择了在电机本体设计时控制转子外径、减小铁芯长度等方法来控制转矩波动方法,同时调整定、转子的磁极结构,达到降低转矩波动的目的。

(4) 形成了一套井下电动钻具专用马达设计技术:根据电机工作工况和实际要求确定电机基本参数,如相数、级数等;利用基本方程计算确定电机基本机构参数;采用快速非线性仿真得出电机的运行特性,分析设计参数的合理性;利用有限元分析电机的瞬态特性,及定转子的磁场分布,进一步调整优化电机尺寸。

(5) 设计了电动马达本体及实验台,完成了样机加工制造,进行了现场实验与参数测试分析。测试结果表明:电机在额定转速下能正常发挥出设计功率及转矩;电机在恒功率段工作时,能够较高的输出转矩和效率,但随着的转速的提高,输出转矩和效率会随之降低;温升问题存在且较为明显。

另外,本课题还可以在以下方面进行进一步的完善和研究:

(1) 针对开关磁阻电机存的温升问题,进行铁损理论方面的研究。

(2) 进一步优化结构,完善性能,为后期开展井下钻具钻井实验做准备。

参考文献

- [1] 符达良. 井下动力钻具的发展及其在推广应用中的问题[J]. 石油机械, 1999, 27(12)
- [2] 安庆宝等. 复合材料连续管井下智能电驱钻井技术[C]. 石油钻井院所长会议, 2010
- [3] 唐志军, 刘正中, 熊继有. 连续管钻井技术综述[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 73~75
- [4] 彭俊生等. 国外连续管钻井技术与装备发展概况[J]. 石油工程技术, 2009, 7(4): 30~33
- [5] 贺会群. 连续管钻井技术与装备[J]. 石油机械, 2009, 37(7): 1~6
- [6] D.R. Turner, T.W.R. Harris. Electric Coiled Tubing Drilling: A Smarter CT Drilling System[J]. SPE/IADC 52791, 1999
- [7] Michael Wheatall. Advanced Drilling: A Technology Focus Area for Conoco Phillips[R]. ConocoPhillips Company, 2006
- [8] Philip Head. Electric Coiled Tubing Drilling (E-CTD) Project Update[J]. SPE 68441, 2001
- [9] Dan Turner and Philip Head. New DC Motor for Downhole Drilling and Pumping Applications[J]. SPE 68489, 2001
- [10] Daniel R. Turner and Philip F. Head. The All Electric BHA: Recent Developments toward an Intelligent Coiled-Tubing Drilling System[J]. SPE 54469, 1999
- [11] Philip F. Head. Electric Coiled Tubing Drilling – The First Steps toward a Smart CT Drilling System[J]. SPE 46013, 1998
- [12] Paul Lurie. Smart Drilling with ELECTRIC DRILLSTRING[J]. SPE/IADC 79886, 2003
- [13] Roy Marker, John Haukvik Anaconda. Joint Development Project Leads to Digitally Controlled Composite Coiled Tubing Drilling System[J]. SPE 60750, 2000
- [14] 孙宝福. 电动连续管钻井[J]. 国外石油机械, 1999, 10(3): 16~18
- [15] Anyuan Chen, Ravindra. B. Ummaneni. Review of Electrical Machine in Downhole Applications and the Advantages[R]. IEEE 978-1-4244-1742, 2008
- [16] E.Alan Coats. Drilling with Composites: An Overview of an Integrated Composite Coiled Tubing Drilling System and Components. OTC 14061, 2002
- [17] Don Francis. Coiled Tubing Drilling: A Look at Industry Interest[J]. E&P, 2006, 79 (8): 25~26

- [18] 陈立人, 张永泽, 龚慧娟. 连续管钻井技术与装备的应用及其新进展[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 59~62
- [19] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.110~134
- [20] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [21] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [22] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [23] F Liang, Y Liao, T.A. Lipo. A New Variable Reluctance Motor Utilizing an Auxiliary Commutator Winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1994, 30 (2): 423~432
- [24] 颜威利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [25] 王周叶, 陈世元. 外转子双凸极永磁电动机有限元分析[J]. 微电机, 2006, 39(9): 16~18
- [26] 曹家勇, 周祖德, 陈幼平等. 开关磁阻电动机特性检测与参数识别方法研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 25~30
- [27] 吴红星, 嵇恒, 倪天等. 新型开关磁阻电机发展综述[J]. 微电机, 2001, 44(1), 2011
- [28] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010, 12~14
- [29] 曹家勇等. 开关磁阻电动机控制技术的研究现状和发展趋势[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(1): 1~6
- [30] 王宏华等. 开关磁阻电动机调速系统的发展及现状[J]. 电气传动, 2001, (5): 3~8
- [31] Lovatt H C, Stephenson J M. Optimum Excitation of Switched Reluctance Motor. Proc. of IEEE Eighth International Conference on Electrical Machines And Drives, UK, 1997, 356~360
- [32] 张志学. 开关磁阻电机在节能长冲程抽油机的应用[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(8): 75~78
- [33] 王守民. 油田在役常规游梁式抽油机的增程与节能改造研究[D]. 浙江: 浙江大学. 2001
- [34] 母丹. 抽油机节能改造项目中开关磁阻电机的应用[D]. 北京: 北京交通大学. 2008
- [35] 廖海平, 陈永校. 开关磁阻电机原理与特性分析[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(5): 45~49

- [36] 李晓艳. 12/8 极开关磁阻电动机调速系统的仿真分析与设计[D]. 哈尔滨理工大, 2005
- [37] 路广. 基于 DSP 的开关磁阻电机的直接转矩控制策略研究[D]. 河北工业大学, 2008
- [38] 马博. 基于组合控制方式的开关磁阻电机调速系统的设计与研究[D]. 中南大学, 2008
- [39] 薛梅. 开关磁阻电机非线性建模方法及智能控制策略研究[D]. 天津大学, 2008
- [40] 欧阳启. 电动车用开关磁阻电机控制系统研究及实现. 湖南: 湖南大学, 2006
- [41] 刘芸芸. 基于单片机的开关磁阻电机调速系统设计. 浙江: 浙江大学, 2005
- [42] Nisai H, Marcus Menne, Robert B. Inderka. High-Dynamic Four-Quadrant Switched Reluctance Drive Based on DITC. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, pages: 1232-1242
- [43] 韩玉涛. 30kW 开关磁阻电机控制系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2000
- [44] 宋伟官. 基于 DSP 的开关磁阻电机控制系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005
- [45] 詹琼华, 马志远, 郭伟. 电动汽车用 20kW 开关磁阻电动机的设计与实验研究[J]. 电机与控制学报, 1999, 3(3): 161~164
- [46] 杨泽斌, 黄振跃, 张新华. 基于 Ansoft 的开关磁阻电机起动性能仿真分析与实验研究[J]. 微电机, 2009, 42(8): 19~22
- [47] 姜文刚, 陈保进. 基于 Ansoft 的汽车开关磁阻电动机仿真分析[J]. 农机化研究, 2005, 271~273
- [48] 赵文祥, 吉敬华. 基于 Ansoft 的矿用开关磁阻电机电磁场有限元分析[J]. 煤矿机械, 2006, 27(6): 978
- [49] 许志伟, 谢卫才, 林友杰等. 基于 Ansoft 的开关磁阻电机设计和有限元分析[J]. 防爆电机, 2009, 44(6), 14~17
- [50] 杨泽斌, 孙玉坤, 张新华. 基于 Ansoft 的磁悬浮开关磁阻电动机磁力仿真计算初探[J]. 微特电机, 2008
- [51] 赵文祥, 吉敬华, 白雪等. 基于 ANSOFT 的矿用开关磁阻电机电磁场有限元分析[J]. 煤矿机械, 2006
- [52] 杨枢林, 冯东升. 开关磁阻电动机调速系统在煤矿井下输送机上的研究与应用[J]. 电机与控制应用, 2010
- [53] 姜良成. 基于有限元方法的开关磁阻电机静态特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007

- [54] 郭志. 开关磁阻电机静态特性参数计算及有限元分析. 天津: 天津大学, 2008
- [55] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [56] 周会军, 丁文, 鱼振民. 基于 Maxwell 2D 的开关磁阻电动机的仿真研究[J]. 微特电机, 2007: 10~12.
- [57] Scott Stanton. Analysis of a Dual Channel Switched Reluctance Motor[M]. Ansoft Corporation, 2004
- [58] 刘良成, 李忠杰, 李红梅. 小功率开关磁阻电动机静态特性的计算与测试[J]. 微电机, 2000, 33(4): 6~8
- [59] 许珍, 全力, 韦银. 气隙对开关磁阻电动机转矩的影响[J]. 微电机, 2006, 1(39): 30~31
- [60] 詹琼华. 开关磁阻电机绕组连接方式的研究[J]. 电机与控制学报. 2002, 6(2)。
- [61] 刘闯, 周强, 杨丽. 开关磁阻电机两种绕组连接方式下铁心损耗的有限元计算. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- [62] 林鹤云, 周鄂, 黄建中等. 开关磁阻电机磁场有限元分析与铁耗计算[J]. 电工技术学报, 1996, 11(1): 24~29

致 谢

本文是在导师王旱祥教授、董怀荣教授级高工精心指导下完成的。在我三年的硕士生学习期间，王老师在我的生活、学习等各个方面都给予了无微不至的关怀和照顾，这些我将永志不忘。在论文的完成之际，特向王老师表示衷心的感谢，并致以崇高的敬意！

特此感谢中石化胜利油田钻井工艺研究院石油机械所的各位领导和朋友的真心帮助，他们在学习上给我指导，在生活上给我关心，帮助我顺利完成论文。在攻读硕士期间，得到了师兄的很多帮助，刘延鑫师兄多方面进行了很多的指导，以及实验室的各位同学的热心帮助，在此表示衷心的感谢！还要感谢这些年来帮助过我的老师、同学和朋友们，有了他们的无私关怀，我才得以顺利完成学业！

最后，要感谢我的家人，有了他们的支持，我才能够专心致力于科研，顺利的完成学业，有了他们才有了我的一切！

李俊磊

中国石油大学(华东)

2012年3月