

南京理工大学泰州科技学院

毕业设计说明书(论文)

作 者: 吴永新 学 号: 1901050140

学院(系): 电子电气工程学院

专 业: 电气工程及其自动化

题 目: 电梯曳引用开关磁阻电机设计

指导者: 莫岳平 教授

评阅者: 葛辉 讲师

2023 年 5 月

毕业设计说明书（论文）中文摘要

电梯曳引系统对电机的要求主要集中在高效能、良好的调速性能、高扭矩、低噪音和振动、高可靠性和安全性、紧凑结构和散热性能等方面。目前主流的电梯曳引系统一般使用永磁同步电动机作为曳引。

本文设计了一种新型的曳引机，以开关磁阻电机为主体，独特的外转子式结构提供了大扭矩的同时，方便直接与曳引轮衔接。本文具体介绍了开关磁阻电机设计方法，通过 ANSYS Maxwell 进行有限元分析，以及通过 Design expert 对设计的电机参数响应面的优化，对转子极型进行优化，最终得到的设计符合实际曳引需求。开关磁阻电机具有结构简单，成本低、高效率、能够快速响应、可靠性高等优点。在未来电梯行业的市场具有一定潜力。

关键词 开关磁阻电机 外转子 有限元分析 优化设计

毕业设计说明书（论文）外文摘要

Title The Design of Switched Reluctance Motor for
Elevator Traction

Abstract

Elevator traction systems primarily require motors that deliver high efficiency, excellent speed regulation, high torque, low noise and vibration, high reliability and safety, compact structure, and good heat dissipation. Currently, permanent magnet synchronous motors are commonly used for traction in mainstream elevator systems.

This article presents a novel traction machine design, utilizing a switched reluctance motor as the main component, with a unique outer rotor structure that provides high torque while conveniently connecting directly to the traction sheave. The article details the design methodology of the switched reluctance motor, employing finite element analysis through ANSYS Maxwell, and optimizing the prototype parameters using response surface methods with Design expert software. This optimization process led to the ideal rotor pole shape, and the final design met the practical traction requirements. This system offers a simple structure, low cost, high efficiency, fast response, and high reliability, demonstrating potential in the future elevator market.

Keywords Outer-rotor Switched Reluctance Motor Finite Element
Analysis Response Surface Optimization

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及其意义	1
1.2 电梯曳引系统发展现状.....	1
1.3 开关磁阻电机研究现状及存在的问题.....	4
1.4 本文研究的内容	6
2 开关磁阻电机的结构、原理与特点	7
2.1 SRM 的基本结构	7
2.2 SRM 的特点	8
2.3 SRM 的基本方程和原理	8
2.4 SRM 的控制.....	10
2.5 本章小结	11
3 开关磁阻电机设计及有限元分析	12
3.1 ANSYS maxwell 介绍.....	12
3.2 SRM 模型的建立	13
3.3 电机建模与仿真	15
3.4 动态分析	22
3.5 本章小结	25
4 开关磁阻电机的优化设计	26
4.1 Design expert 介绍	26
4.2 优化算法介绍	26
4.3 电机结构优化设计.....	28
4.4 本章小结	33
结束语	34
致 谢	35
参 考 文 献.....	36

1 绪论

随着城市化进程的不断加速，电梯已成为现代城市中不可或缺的公共交通工具。而作为电梯系统中的核心组成部分之一，电机的性能对电梯的运行稳定性、舒适性以及能耗等方面均有着重要影响。传统的曳引电机具有结构复杂、体积大、噪声高等缺点，对电梯的设计和使用带来了一定的限制。因此，研究一种新型的电机技术以替代传统电机已成为电梯领域研究的热点之一。

1.1 研究背景及其意义

电梯曳引应用中的开关磁阻电机代表着一种创新性的电机技术。相较于传统的曳引电机，它展现出更小的体积、更轻的重量、更低的噪音以及更高的效率等优势。伴随着电梯行业的持续壮大，开关磁阻电机已广泛地融入电梯系统，实现了令人瞩目的成果。然而，在实际应用场景中，该电机的性能及稳定性仍有待于深入探究与优化。

因此，研究电梯曳引用开关磁阻电机的基本原理、特性以及优化设计等方面对于提升电梯系统的性能与稳定性、降低系统的能耗与噪音具有至关重要的意义。此外，随着智能电梯的崛起，开关磁阻电机在研究与应用方面将面临更多的挑战与机遇。因此，加大对该电机技术的研究与开发势在必行，这对于推动电梯行业的进步、提高电梯系统的智能化水平以及促进城市可持续发展具有举足轻重的意义与价值。

1.2 电梯曳引系统发展现状

（1）构成

电梯曳引系统是电梯运行的核心组成部分，主要负责提升和下降轿厢。它由曳引机(图 1.1)、曳引轮、钢丝绳、导轨、轿厢、对重系统、控制系统、电动机、制动器和缓冲器等组件组成。曳引机是系统的核心部件，通过电动机驱动，将电能转换为机械能，带动曳引轮旋转。曳引轮传递曳引力，使得钢丝绳在其作用下产生拉力，实现轿厢的升降(图 1.2)。在电梯曳引系统中，对曳引力的要求是应分别满足 GB/T 7588.1-2020《电梯制造与安装安全规范第 1 部分:乘客电梯和载货电梯》的 3 个要求^[1]。导轨引导轿厢和对重系统在井道内的垂直运动，保证平稳运行。轿厢作为乘客或货物的运输载体，与对重系统相互平衡，降低曳引机的负荷。



图 1.1 电梯曳引机

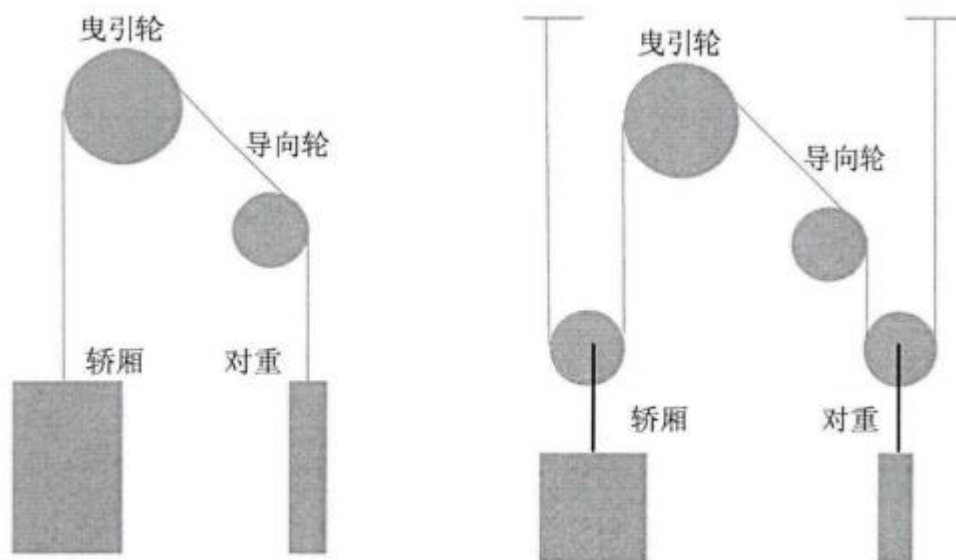


图 1.2 电梯曳引结构图

控制系统调控电梯的运行，确保安全、高效。电动机作为曳引机的驱动源，提供动力。制动器负责稳定轿厢停靠和紧急制动，保证乘客和设备安全。缓冲器则用于减轻轿厢和对重系统在超速下降时的撞击力。总之，电梯曳引系统通过各个组件的协同作用，实现电梯的平稳、安全、高效运行。

（2）发展与研究现状

电梯曳引机在过去几十年里经历了不断的发展与创新。从传统的交流电动机驱动到永磁同步电动机驱动，曳引机的技术水平已得到显著提高。目前来说曳引机的行业现状从结构上来讲，设计有无齿轮曳引机，与传统的有齿轮曳引机相比，无齿轮曳引机在结构上更为简单，具有更高的效率、更低的噪音和更小的尺寸。这使得它们在现代建筑中得到广泛应用。从电机方面，目前主流的曳引机采用永磁同步曳引机，相较于交流电动机，永磁同步电动机具有更高的效率、更小的体积和更低的噪音。随着技术的进步和市场需求的变化，曳引机已逐步发展为更高效、节能、环保、安全和智能化。无机房电梯的推广使得曳引机需要更紧凑、轻便；高速电梯的

发展要求曳引机具备更高的动力性能和制动能力。同时，电梯控制系统的发展也在推动曳引机向更高精度、更佳调速性能的方向发展。在现代电梯曳引机领域，永磁同步电机、直线电机等技术逐渐成为主流。研究者和企业不断探索和开发新材料、新设计和新工艺，以满足不断提高的电梯性能和安全要求。总之，电梯曳引机正朝着更高效、节能、安全和智能化的方向发展，以适应日益增长的市场需求和技术创新。随着物联网、大数据和人工智能技术的快速发展，电梯行业正在走向智能化与自动化。现代曳引机配备了先进的控制系统和传感器，实现了实时监控、远程诊断和智能调度等功能，提高了电梯的运行效率和安全性。从安全性能来说，人们对安全性能要求的不断提高，电梯曳引机的设计和制造也越来越注重安全。通过采用先进的制动系统、过载保护、轿厢防坠装置等技术，现代曳引机在保证运行效率的同时，充分保障了乘客的安全。

总之，电梯曳引系统对电机的要求主要集中在高效能、良好的调速性能、高扭矩、低噪音和振动、高可靠性和安全性、紧凑结构和散热性能等方面。在满足这些要求的前提下，电梯电机能够提供稳定、高效且安全的动力支持。为了满足这些要求，电梯行业不断地研究和开发新型电机技术。目前，常见的电梯电机类型包括交流异步电动机和永磁同步电动机等。

交流异步电动机曾广泛应用于电梯曳引系统，但随着技术进步，永磁同步电动机逐渐成为主流。相比交流异步电动机，永磁同步电动机具有更高的能效、更好的调速性能以及更低的噪音和振动等优点。此外，永磁同步电动机可以实现更紧凑的结构设计，适应无机房电梯的需求。

未来，随着新材料、先进控制技术和制造工艺的不断进步，电梯电机将朝着更高效、更安全、更环保的方向发展。同时，行业和研究者也将继续关注提高电梯电机的可靠性和安全性，以满足日益严格的行业标准和用户需求。通过持续的技术创新和产品优化，电梯曳引系统将为建筑和交通领域带来更优质、更可靠的服务。

（3）电梯曳引系统对电机要求

电梯曳引系统对电机的要求主要体现在以下几个方面：

首先是高效能，电梯曳引系统需要高效的电机来降低能耗、减少运行成本。因此，电梯电机应具有较高的能效比，满足节能和环保需求。其次要有良好的调速性能，电梯的运行需要在不同速度下平稳切换，以确保舒适性和准确停靠。因此，电梯电机应具有良好的调速性能，能够在宽范围内进行平稳调速。高扭矩性，电梯曳

引系统需要具有足够的扭矩来克服轿厢和对重系统的负载，以及克服摩擦等阻力。因此，电梯电机应具有高扭矩和较高的起动扭矩，以确保电梯在不同载荷条件下的正常运行。低噪音和低振动性，为了确保乘客舒适度和降低对建筑结构的影响，电梯电机应具有低噪音和低振动的特点。这需要对电机设计和制造工艺进行优化，减少噪音和振动的产生。总体来看要有高可靠性和安全性，电梯是重要的公共交通工具，因此电梯电机应具有高可靠性和安全性。这意味着电机在长时间运行过程中应保持稳定性能，并具有足够的过载和故障保护功能。

此外还要有紧凑结构，随着建筑空间的紧张和无机房电梯的普及，电梯电机的结构越来越紧凑。这要求电机具有较小的体积和重量，以便在有限的空间内安装和维护。

最后要考虑散热性能，电梯运行过程中，电机可能产生较高的热量。因此，电梯电机应具有良好的散热性能，以确保电机在长时间运行过程中的稳定性能。

1.3 开关磁阻电机研究现状及存在的问题

（1）SRM 国内外研究现状

开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor, SRM）是一种新型的电动机技术，由于其简单的结构、低成本、高效率、高可靠性等优点，近年来受到了广泛关注。以下将分别从中国和世界的角度，对 SRM 的研究现状进行介绍。

（a）国内的研究现状

SRM 技术在中国的研究和应用起步较晚，目前尚处于发展初期。在 1988 年，学者刘迪吉研究介绍了开关磁阻电机。随后涌现出一批开关磁阻电机的研究学者，分别对开关磁阻电机与发电机进行了广泛研究^[2]。在 SRM 的建模和控制算法方面，国内学者已经开展了大量的研究。例如，通过分析 SRM 的非线性特性，研究者在控制算法中引入了模糊控制、神经网络控制、自适应控制等方法，提高了 SRM 的性能和稳定性。同时，一些学者还将 SRM 应用于风力发电、空调压缩机、电动汽车等领域，取得了一定的研究成果。

（b）世界的研究现状

SRM 技术在国际上的研究较早，目前已经发展到了相对成熟的阶段。在 SRM 的设计和优化方面，国际上的研究者已经提出了许多新的思路和方法。例如，有学者提出了基于有限元仿真和遗传算法的优化设计方法，能够有效提高 SRM 的性能和效率。同时，有学者还研究了 SRM 的热特性和噪声特性，提出了一些有效的降噪措

施和散热方法。

此外，SRM 的应用领域也越来越广泛。除了传统的工业应用领域外，SRM 还被广泛应用于电动汽车、无人机、风力发电、水泵等领域^[3]。一些国际上的知名厂商，如丹佛斯、ABB 等也已经开始研究和生产 SRM 产品。

总体来说，SRM 技术在国际上已经得到了广泛的研究和应用，但在具体的实际应用中仍存在一些挑战和问题，如噪声、震动等。因此，未来需要进一步加强对 SRM 的研究和开发，寻找更优秀的设计和控制算法，进一步提高 SRM 的性能和可靠性，为其广泛应用于各个领域打下更加坚实的基础。

（2）SRM 目前存在的问题

开关磁阻电机在其发展过程中仍存在一些问题和挑战。以下是当前 SRM 研究中存在的一些主要问题：

效率和功率密度：尽管 SRM 在某些应用中具有较高的效率，但与同类电机相比，其效率和功率密度相对较低。研究者正在寻求改进设计和控制策略，以提高 SRM 的性能。

噪音和振动：SRM 的噪音和振动问题是其应用受限的一个重要因素。这是由于其开关磁阻特性和非对称结构所导致的。为减少噪音和振动，研究者正在研究如何优化电机设计和控制策略。

控制策略：SRM 需要复杂的控制策略来实现高性能和可靠性。目前，常见的控制方法包括直接转矩控制和电流控制，但它们在实现高性能和低噪音方面仍有局限性。因此，需要研究更先进的控制策略，以提高 SRM 的性能。

故障诊断与容错：SRM 的故障诊断和容错能力对其广泛应用至关重要。研究者正在寻求开发新的故障检测方法和容错控制策略，以提高 SRM 的可靠性和安全性。

材料和制造技术：SRM 的性能很大程度上取决于使用的材料和制造工艺。高性能的磁性材料、优化的线圈设计以及更先进的制造工艺可能有助于提高 SRM 的性能。

应用领域扩展：虽然 SRM 在某些特定领域（如电动汽车和工业应用）具有优势，但它在更广泛的应用领域仍受到限制。因此，需要研究不同类型的 SRM 以满足不同应用场景的需求。

热管理：SRM 在运行过程中可能产生较高的热损失，这可能导致电机过热并影响其性能。因此，研究者需要探索有效的热管理方法，以确保 SRM 在高效运行的同

时具有良好的热稳定性。

1.4 本文研究的内容

在永磁同步电动机主导曳引机市场的背景下，本研究以环保和高效为出发点，基于开关磁阻电机驱动技术，设计了一款创新型曳引机。该曳引机采用了 12/8 式 SRM 的主体结构。通过分析市场需求和设计趋势，摒弃了传统的内转子设计，转而采用独特的外转子结构以提升扭矩性能。

为进一步优化设计，本研究采用响应面方法对定转子极弧系数和轭高进行综合优化。同时，通过对极靴形状的分析 and 计算，确定了最适合本电机的极靴形状，以改善极间磁通量分布，最大限度地减少漏磁通，从而提升整体性能。

本研究所设计的开关磁阻电机曳引机，凭借其高效、环保的特点，有望为电梯曳引领域带来革新，实现高效曳引的目标。

具体内容包括：

- （1）通过经验法和有限元分析法计算，利用 CAD 和 soilwork 进行绘制，并且引入 Ansys Maxwell 进行激励和变量的设定。设计出适用于曳引系统的开关磁阻电机基本参数，并建立模型
- （2）对设计好的电机在 Maxwell 软件中进行静态分析和动态分析，通过磁密云图和磁场线分布情况，结合基本方程得出相应的特性数据，以验证设计合理性
- （3）将设计好的电机数据，选取优化参数，通过 Design expert 软件进行响应面算法优化，本文选取 BBD 法进行电机尺寸优化。
- （4）通过对磁路的计算和 Maxwell 仿真的综合分析，参考以往设计经验，确定极靴的形状。
- （5）设计出样机，通过仿真和计算确定设计是否符合曳引要求。

2 开关磁阻电机的结构、原理与特点

开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor, SRM）是一种基于磁阻转矩原理的电机。其结构简单仅有铁芯和绕组、没有永磁体故成本低、转速平稳可靠性高，因此在一些特殊应用场合中得到广泛应用。本章将从结构、特点、原理、和设计所需的基本方程开始阐述。

2.1 SRM 的基本结构

开关磁阻电机由定子和转子两部分组成，其中定子绕组产生磁场，转子由多个磁性铁片和非磁性铁片交替排列组成。转子的形状通常为对称的圆形或多边形，其中每个磁性铁片和非磁性铁片的轮廓相同。如图 2.1 为传统四相 8/6 的 SRM 结构图，图 2.2 为实物图。

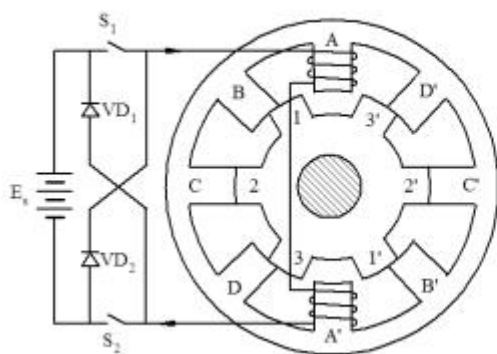


图 2.1 四相 8/6SRM 结构图



图 2.2 实物图

定子包括定子绕组和定子铁心。定子绕组通常采用三相绕组，可产生旋转磁场。定子铁心由多个铁心片叠加而成，铁心片之间采用绝缘材料隔离。定子铁心的内部开有定子凸极，其数量等于转子上凸极数量的一半。

转子由多个凸极和非凸极磁性铁片交替排列组成，每个凸极上都有一个绕组，可通过电流控制产生磁场。凸极的数量通常为偶数，其数量等于定子凸极数量的一半。

在工作过程中，控制系统通过变化绕组的电流，改变磁通量的分布，从而产生转矩。当某一凸极上的绕组通电时，该凸极成为磁极，吸引与之相邻的非凸极铁片，使转子转动。当绕组电流反转时，该凸极成为非磁极，铁片离开凸极，转子停止转动。通过不断变化绕组的电流，可实现转子的连续转动。

总的来说，开关磁阻电机的结构相对简单，由于没有永磁体和电刷等部件，因

此可减少维护成本和故障率。但同时，由于磁通量分布的不稳定性和转子振动等问题，使得开关磁阻电机在某些高精度应用领域中存在一定的局限性。

2.2 SRM 的特点

开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor, SRM）是一种基于磁阻转矩原理的电机，具体来说有以下特点：

结构简单，成本低：开关磁阻电机由少量的零部件组成，因此其结构相对简单，成本较低。同时，由于无需使用永磁体和电刷等部件，因此可减少维护成本和故障率。

高效率：相对于传统电机，开关磁阻电机具有更高的效率。由于其磁通量的变化不依赖于永磁体或者传感器，因此能够更好地适应不同的负载和转速。

能够快速响应：由于其结构简单，转子惯性小，因此能够更快地响应控制信号，实现快速加速和减速。

可靠性高：开关磁阻电机没有永磁体和电刷等易损件，因此其寿命相对较长。同时，由于其转子无需加热，因此能够更好地适应高温、潮湿等恶劣环境。

工作时噪音小、振动小：由于开关磁阻电机在工作过程中不会产生永磁体的磁场，因此工作时噪音小、振动小，能够提高电机的运行舒适性和安全性。

总的来说，开关磁阻电机具有结构简单、成本低、高效率、高可靠性、快速响应、工作时噪音小、振动小等优点，因此在一些特殊应用场合中得到广泛应用，如风力发电、空调压缩机、电动汽车等领域。

2.3 SRM 的基本方程和原理

开关磁阻电机的工作原理类似于步进电机，从机电能量转换的角度，其本质是通过耦合磁场，将相绕组的电能转换成电机轴输出的机械能^[4]，开关磁阻电机的转矩是磁阻性质，其运行原理遵循“磁阻最小原理”——磁通总是要沿磁阻最小的路径闭合，因磁场扭曲而产生切向磁拉力^[5]。

开关磁阻电机的基本方程包括磁路方程、电路方程和机械方程等，其主要是描述其工作原理和性能的数学模型，也是其运动、控制的重要工具。同时也反映了电机的动态响应特性，其解析式可用于模拟和预测电机的运行状态和性能。在实际应用中，通过对基本方程的控制和优化，可以实现电机的高效率、高可靠性和高控制精度等优秀性能。

（1）电路方程

SRM 的电路方程是描述绕组电流和电压之间关系的方程。本文所设计的 12/8 外转子式开关磁阻电机，由电路定律可得如下

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (2.1)$$

其中 u_k 为一相绕组电压， R_k 为一相绕组电阻， i_k 为一相绕组电流， ψ_k 为一相绕组磁链。

（2）磁链方程

SRM 的磁路方程是描述磁通量的变化及其对转矩的影响的方程。

磁链与转子位移角和绕组电流有关。可知 ψ_k 如下

$$\psi_k = \Psi(i_1, i_2, i_3; \theta) \quad (2.2)$$

其中 i_1, i_2, i_3 为 SRM 三相绕组电流， θ 是转子位移角。

为计算方便 SRM 间各项绕组电流的互感可以忽略，故磁链方程如下

$$\psi_k = \Psi(i_k, \theta) = L(i_k, \theta) i_k \quad (2.3)$$

（3）机械方程

SRM 的机械方程是描述转子运动和转矩之间关系的方程。则 SRM 的机械方程可以表示为：

$$T_e = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (2.4)$$

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} + k_\Omega \Omega + T_L \quad (2.5)$$

也可写成

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + k_\Omega \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2.6)$$

其中 J 为系统的转动惯量； k_Ω 为摩擦系数； T_L 为负载转矩。

设开关磁阻电机运行稳定，则 $\frac{d\Omega}{dt}=0$ ，则有

$$T_e = k_\Omega \Omega + T_L \quad (2.7)$$

磁共能 W' 表示为

$$W' = \int_0^i \Psi(i, \theta) di \quad (2.8)$$

电磁转矩 T_e 用磁共能 W' 表示为

$$T_e = \frac{\partial W'(i_1, i_2, i_3; \theta)}{\partial \theta} \quad (2.9)$$

以上需要补充说明的是，开关磁阻电机的基本方程是一个非线性的系统，其参数和变量之间存在复杂的相互影响，因此需要采用数值方法进行求解。常用的求解方法包括有限元法、有限差分法、最小二乘法等。

此外，在开关磁阻电机的研究中，通常会引入一些附加的方程和变量，以更准确地描述其工作状态和性能。例如，为了描述绕组的饱和特性，通常会引入一些磁化曲线的参数，如饱和磁导率、饱和磁场强度等。为了描述转子运动的非线性特性，通常会引入一些额外的变量，如转角速度、角加速度等。

总的来说，开关磁阻电机的基本方程是其数学模型的核心，可以用来分析和预测其工作性能，为电机的设计和控制提供重要的理论基础。

2.4 SRM 的控制

在控制外转子开关磁阻电机（SRM）时，一种常用的方法是采用不对称半桥电路。不对称半桥电路主要由两个功率开关（例如 IGBT、MOSFET 或 GAN）组成，它们可以独立地打开和关闭，以实现定子相之间电流的正向和负向传输。在 SRM 的每个相上都连接一个不对称半桥电路。以下是使用不对称半桥电路控制外转子 SRM 的基本步骤：

选择合适的功率开关：根据 SRM 的功率、电压、电流和频率要求，选择合适的 IGBT、MOSFET 或 GAN 开关。务必确保所选开关可以承受 SRM 的工作电压和电流。

驱动电路设计：设计适当的驱动电路以实现功率开关的快速、准确且安全的控制。驱动电路需要为功率开关提供足够的栅极驱动电压，并具有一定的隔离性能，以保护控制器免受高压和高电流冲击。

控制策略开发：实现 SRM 的转矩控制和速度控制。这通常需要根据电机的磁通和相电流来计算合适的电流控制策略。常用的控制策略有直接磁通控制（DTC）、矢量控制和脉宽调制（PWM）控制等。此外，为了实现电机的高效运行，可以采用最大转矩每安培（MTPA）策略。

定位和传感器：为了准确控制 SRM 的转子位置，需要使用编码器、霍尔传感器或其他传感器来实时监测转子的位置。根据传感器反馈的位置信息，可以实现对 SRM 的准确控制。

整合和调试：将电源电路、驱动电路、传感器和控制器集成在一起，对整个系统进行调试和优化，以实现 SRM 的平稳、高效和可靠运行

2.5 本章小结

本章详细探讨了开关磁阻电机的相关知识，涵盖了结构、特性、基本方程、工作原理以及控制方法。首先，介绍了 SRM 的基本结构，包括定子与转子的基本形状、绕组以及外转子设计。接着，我们分析了 SRM 的特点，例如高扭矩密度、高效率、简单结构和较低的制造成本等。然后，推导了描述 SRM 性能的基本方程，如电磁力矩、电磁感应和电磁阻抗等，为深入研究其特性和设计提供了理论基础。

在工作原理部分，我们阐述了 SRM 的磁阻变化原理、磁通路径以及相互作用产生的电磁力矩。同时，详细分析了 SRM 在不同转子位置下的磁阻变化情况，进一步揭示了电机工作过程中的关键因素，为设计和优化提供了依据。最后，在控制方法部分，我们介绍了各种控制策略，如矢量控制、脉宽调制等，并讨论了它们在提高 SRM 性能和效率方面的作用和优劣，为实际应用提供了参考。

通过对开关磁阻电机的结构、特点、基本方程、工作原理及控制方法的综合分析，本章为读者提供了一个全面、深入了解 SRM 的入门材料。

3 开关磁阻电机设计及有限元分析

开关磁阻电机的磁场高度非线性，电磁特性复杂，传统的数学解析方法难以准确分析其性能，而有限元分析法（Finite Element Analysis, FEA）可以很好的模拟电机非线性磁路，从而广泛应用于电机设计中。通过将电机的几何、材料特性、边界条件和激励源等相关信息输入到有限元模型中，FEA 可以模拟电磁场、热场等物理场的分布和变化，从而帮助评估电机性能和优化设计。本章将从有限元软件、基本模型建立、仿真分析几个方面进行阐述。

3.1 ANSYS maxwell 介绍

ANSYS Maxwell 是一款功能强大的电磁场仿真软件，由 ANSYS 公司开发。它采用有限元分析（FEA）技术，为工程师和研究人员提供了一种方便、高效的方法来研究和优化各种电磁设备的性能。Maxwell 支持静态、磁场、电场、电磁场、热场等多种分析类型，适用于电机、发电机、变压器、传感器、磁悬浮系统、天线等众多领域。

作为一款基于有限元分析的软件，ANSYS Maxwell 的核心功能是分析电磁场的分布、损耗、扭矩、力等参数。用户可以根据实际需求创建三维或二维的几何模型，然后为模型分配材料属性、边界条件和激励源。软件自动进行网格剖分，根据用户指定的求解器设置和分析选项进行仿真。

在仿真过程中，Maxwell 的求解器会计算电磁场的分布、损耗、扭矩等相关参数。用户可以实时查看仿真结果，如磁场强度、电场强度、电流密度等。此外，Maxwell 还具有优化设计功能，可以通过参数化几何模型和自动化求解过程，自动优化设计以满足用户设定的性能目标和约束条件。

ANSYS Maxwell 还可以与其他 ANSYS 软件产品相互集成，如结构分析软件 ANSYS Mechanical、流体动力学软件 ANSYS Fluent 和系统级仿真软件 ANSYS Simpler。这种集成使得工程师可以更轻松地进行多物理场耦合分析，从而更准确地评估电磁设备在实际应用中的性能。

综述 ANSYS Maxwell 是一款高效、可靠的电磁场仿真工具，广泛应用于工程领域。通过使用 Maxwell，工程师和研究人员可以在产品设计过程中预测和优化电磁设备的性能，从而缩短产品上市周期、降低成本并提高产品质量。

3.2 SRM 模型的建立

（1）对电机的参数要求

在实际开关磁阻电机设计过程中，根据特定需求和实际条件，通常会综合运用几种方法来确定基本参数。这些方法包括经验法、解析法^[6]、有限元分析法、优化算法以及实验方法。每种方法都有其优缺点，需要根据实际情况和资源选择合适的方法或方法组合，以实现电机设计的最佳性能。

为了达到实际曳引使用目的，本设计结合了曳引要求，确定以下基本参数作为电机设计的起点，从而进一步确定电机的基本尺寸^[7]。

表 3.1 电机基本尺寸表

项目	定子极数	转子级数	功率	转速
数值	12	8	7000W	1500rpm

（2）电机初始参数确定

设计 SRM 时，选择合适的主要尺寸对于实现所需的性能至关重要。理论研究和实际应用表明，电机与相同机座号的异步电机额定输出转矩相当，单位转子体积所产生的转矩略高于异步电机。因此，可采用“类比法”来决定电机的主要尺寸，即参照相近容量、额定转速的异步电机尺寸作为电机主要尺寸的初选值或参考值^[8]。

主要尺寸选择涉及几个关键参数，包括定子外径 D_s 、定子内径 D_{si} 、转子外径 D_r 、转子内径 D_{ri} 、轴向长度 L 、气隙 g 、定子极高 h_s 、定子轭厚 b_{sy} 、定子极弧 β_s 、转子极高 h_r 、转子轭厚 b_{ry} 、转子极弧 β_r 。在确定这些参数时，需要综合考虑电机的功率、转速、扭矩、效率和工作环境等性能要求。本文已经初始确定 12/8 外转子式，SRM 设计过程包含大量变量，作者结合经验公式法和工程学上的常识，下面将介绍剩余参数的确定方法。

轴向长度确定^[9]

$$\chi = \frac{L}{D_s} \approx \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p} \quad (3.1)$$

χ 为长径比

额定转矩与切向应力确定：

已知设计的 SRM 额定转速 1500rpm，故有额定转矩 T

$$T = \frac{P}{2\pi n} \quad (3.2)$$

切向应力 σ_{Ftan} :

$$\sigma_{Ftan} = \frac{2T}{\pi D^2 L} \quad (3.3)$$

气隙 g 、转子内径 D_{ri} 、定子外径 D_s :

气隙决定了电机的电磁转矩、输出功率等性能参数，同时择优选取电机的气隙会起到减小振动、风阻损耗和噪声的作用，结合实际情况和工程经验，本文 g 取 0.5mm，在设计样机阶段我们设占空比为 1，因此可确定转子内径 D_{ri} ，则定子外径 D_s 有如下公式

$$D_s = D_{ri} - 2g \quad (3.4)$$

极弧、轭高、轭厚:

极弧需要满足以下条件

$$\begin{cases} \beta_s \geq \frac{2\pi}{mN_r} \\ \beta_r \geq \frac{2\pi}{mN_r} \\ \beta_s + \beta_r \leq \frac{2\pi}{N_r} \end{cases} \quad (3.5)$$

由 12/8 外转子可确定

$$\begin{cases} \beta_r \geq \beta_s \geq \frac{\pi}{12} \\ \beta_s + \beta_r \leq \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (3.6)$$

确定极宽 b_{sp} 、 b_{rp} :

$$b_{sp} = D_s \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (3.7)$$

$$b_{rp} = D_{ri} \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \quad (3.8)$$

定子轭高 h_s 和转子轭高 h_r 在进行选取时，主要原则是防止在轭部铁心出现最大磁通密度时的过度饱和，保证电机正常工作，工程经验上的取值为:

$$h_s = (1.2 \sim 1.4) \frac{b_{sp}}{2} \quad (3.9)$$

$$h_r = (1.2 \sim 1.4) \frac{b_{rp}}{2} \quad (3.10)$$

加上考虑机械鲁棒性因素，还应满足以下关系:

$$\frac{b_{sp}}{2} \leq b_{sy} < b_{sp} \quad (3.11)$$

$$\frac{b_{sp}}{2} \leq b_{ry} < b_{sp} \quad (3.12)$$

转子外径 D_r 与定子内径 D_{si} :

$$D_r = D_S + 2(h_r + b_{ry} + g) \tag{3.13}$$

$$D_{si} = D_S - 2(h_s + b_{sy}) \tag{3.14}$$

表 3.2 样机确定的基本参数

转子外径（mm）	112	转子内径（mm）	80.5
定子外径（mm）	80	定子内径（mm）	40
转子极弧（°）	16	定子极弧（°）	15
转子极高（mm）	8	转子轭高（mm）	7.75
定子极高（mm）	11	定子轭高（mm）	9
气隙长度（mm）	0.25	铁芯叠长（mm）	64.4
叠压系数	0.96	每项绕组匝数	96
并联支路数	1		

选择合适的尺寸参数可以优化电机性能、减小损耗并提高可靠性。通常情况下，会在满足设计要求的同时，根据经验和仿真结果调整各参数，以实现最佳的性能和尺寸平衡。

3.3 电机建模与仿真

（1）建立模型

根据 SR 电机结构和电气上的对称性，中分线满足周期性边界条件，可取半个场域进行求解。然而，SR 电机的磁链 - 电流磁化曲线族是由多个转子位置下的磁化曲线组成的^[10]。由于本文设计采用外转子结构，而 Maxwell 中的 RMxp_{rt}^[11]中无法参数化建成模型，故此笔者借助 CAD 进行模型绘制（图 3.1），在引入 Maxwell 中，如图 3.2 所示，随后进行线圈绘制，给定激励，然后绘制求解边界，文中选用气球边界（Balloon bundary），在建立模型完成后，得到二维图，开始建立三维图（图 3.3），画出绕组（图 3.4），转子（图 3.5），定子（图 3.6）部分检查无误后，将模型进行仿真。

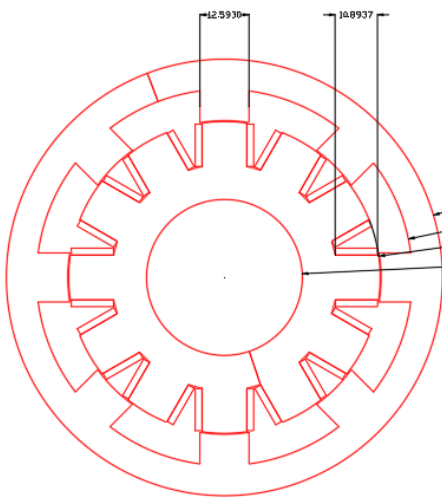


图 3.1 CAD 设计图

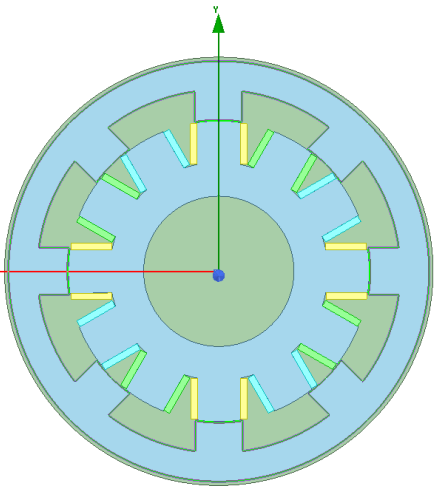


图 3.2 二维模型图

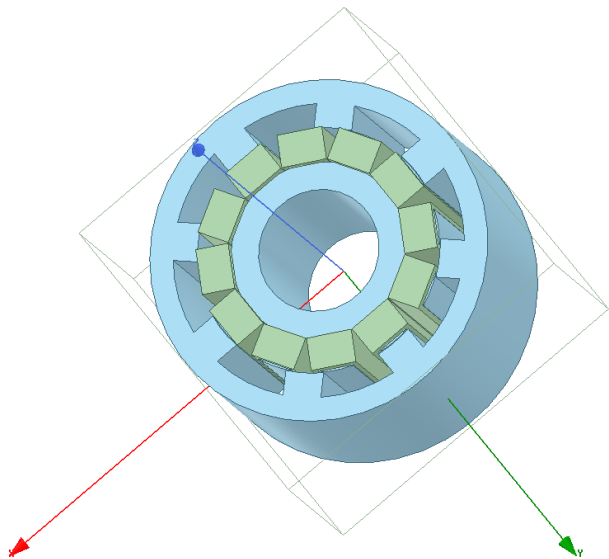


图 3.3 三维模型图

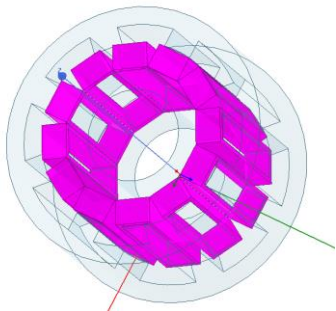


图 3.4 绕组

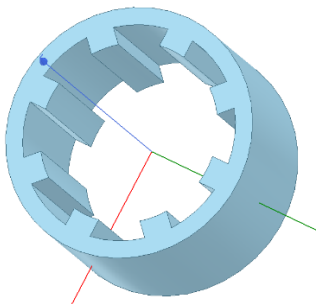


图 3.5 外转子

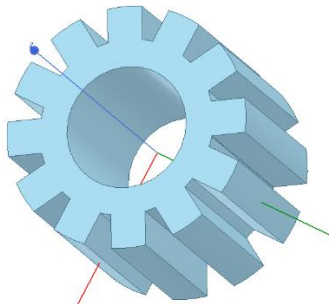


图 3.6 定子

(2) 材料选择

开关磁阻电机（SRM）的主要材料包括定子、转子、绕组和轴承等部件。通常，定子和转子的核心由高磁导率、低磁滞损耗和低涡流损耗的硅钢片（如电工钢）组成，以提高磁通量利用率和降低损耗。绕组通常采用优质铜导线作为导体，

以实现高导电性能和较低的铜损耗。轴承通常由钢制，具有良好的耐磨性和承载能力，以确保电机长期稳定运行。在一些高性能应用中，还可以考虑使用其他高性能磁材料和绕组材料，以进一步提高电机性能和效率。

本设计中采用 DW 系列的非晶硅钢，这种材料尤其适用于高效率和高性能的开关磁阻电机应用。相比于传统的硅钢片，DW310_35 材料的高磁导率（图 3.7）有助于提高磁通量的利用率，从而提高电机的扭矩产生能力。在不考虑成本的情况下，DW310_35 用作定子和转子的核心材料。可以有效地提高电机的磁通量利用率、降低损耗，并提高电机的输出性能。

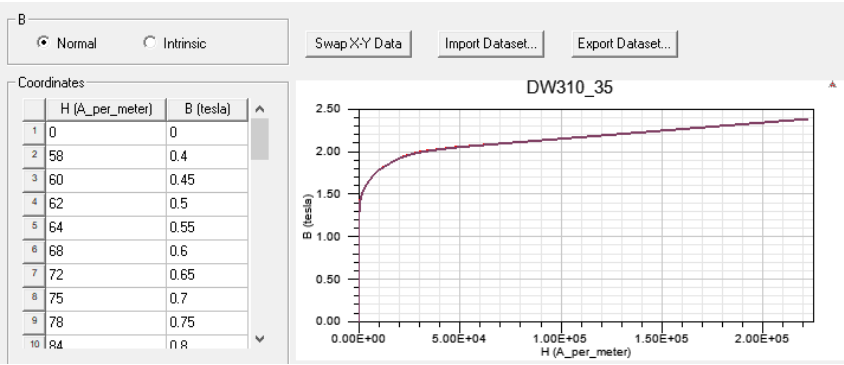


图 3.7 材料特性

（3）网格剖分

网格剖分的主要目的是将整个模型空间划分为较小的有限元。这些有限元将被用于构建求解电磁场的方程组。Maxwell 提供了多种类型的网格剖分方法，如四面体网格、六面体网格等。本模型中为了使仿真结果更加全面，采用了全域建模^[12]，并将气隙衔接处加以过密剖分处理，如下图

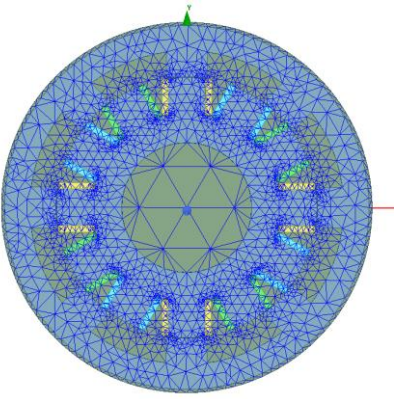


图 3.8 整体剖分图

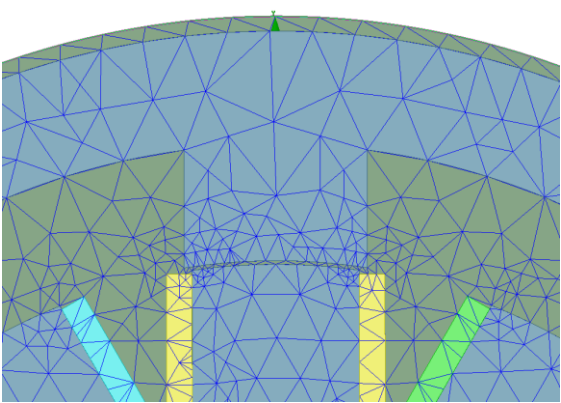


图 3.9 局部剖分图

通过有限元方法求解 Maxwell 方程，我们可以将连续的电磁场问题转化为离散

的线性或非线性方程组。网格剖分过程将模型空间划分为许多较小的有限元，从而在每个元素上近似地求解 Maxwell 方程。这将导致一个大的稀疏线性或非线性方程组，这些方程组描述了整个区域内的电场、磁场以及其他相关变量（例如电荷密度和电流密度）之间的关系。

（4）磁路仿真

在分析电动机等设备的磁路特性时，可以通过设定不同的定转子相对位置来研究磁路性能。本文采取三种定转子的相对位置来进行说明

完全对齐：在此状态下，定子和转子的磁极完全对齐，意味着相邻定子磁极和转子磁极之间的气隙距离最小。这种情况下，磁场强度最高，磁链密度最大。电机的转矩输出和效率在此状态下通常最大。

不完全对齐：在此状态下，定子和转子的磁极没有完全对齐。定子和转子磁极之间存在一定的角度偏差。这种状态下，磁场强度和磁链密度会略有减小，导致电机转矩和效率降低。

完全不对齐：在此状态下，定子和转子的磁极完全不对齐，即相邻定子磁极和转子磁极之间的气隙距离最大。这种情况下，磁场强度最低，磁链密度最小。电机的转矩输出和效率在此状态下通常最低。

在一相绕组通电的情况下，根据磁密云图，可以观察到在完全对齐位置（如图 3.10 所示）主磁通最大，定转子齿部磁场强度最强，在未完全对齐位置（如图 3.11 所示）磁场强度最强集中在极间端部，在不对齐位置（如图 3.12 所示）漏磁通最大，齿部磁场强度最低。根据磁力线图，可以观察到定转子齿部完全对齐时（如图 3.13 所示），平均磁通密度达到最大。随着转子转动，定转子经过未完全对齐对齐的临界位置（如图 3.14 所示），到达气隙磁场在定转子不对齐位置（如图 3.15 所示），平均磁通密度最小。

通过比较这三种状态下的仿真结果，可以了解定转子相对位置对磁路特性和电机性能的影响。这对于电机设计和控制策略的优化具有重要意义。

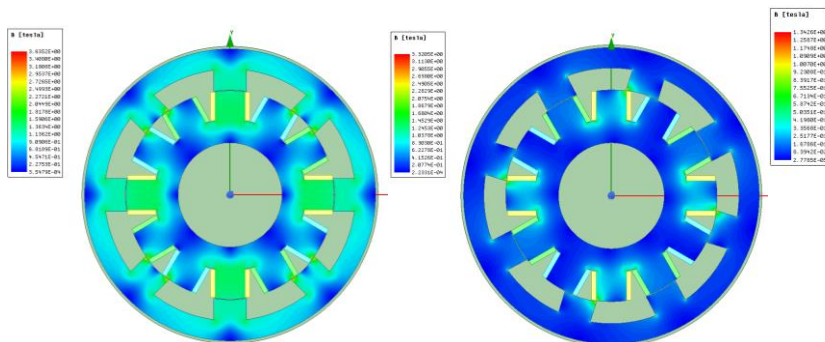


图 3.10 完全对齐位置

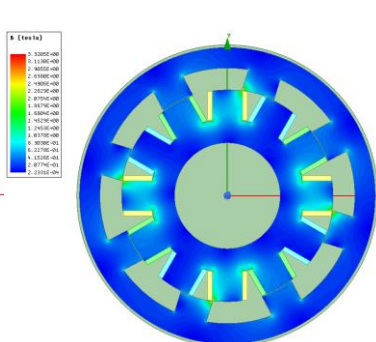


图 3.11 未完全对齐位置

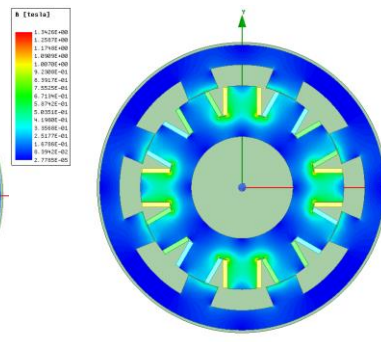


图 3.12 不对齐位置

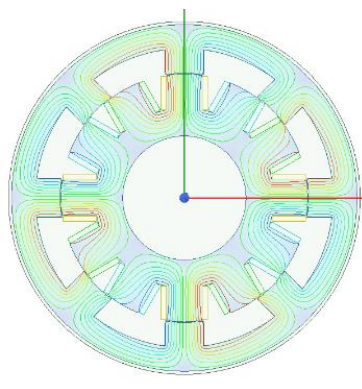


图 3.13 完全对齐位置

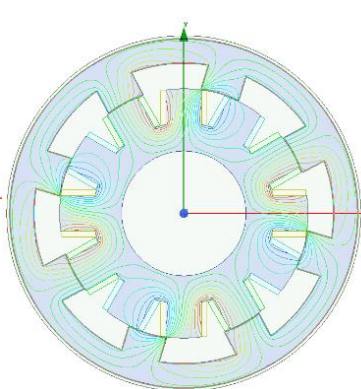


图 3.14 未完全对齐位置

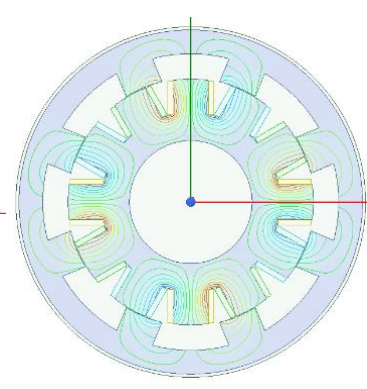


图 3.15 不对齐位置

通过给一相绕组通电，在三维图中选取了三个方向，俯视图（如图 3.16 所示），侧视图（如图 3.17 所示），主视图（如图 3.18 所示）可以观察到磁力线各个方向上分布情况，有效避免了二维设计上的缺陷，通过观察，基本符合样机磁场分布，在定转子完全对齐位置，主磁通为主，在临界位置，磁场强度全部集中在极间端部，总体来看在不同体积内磁场分布基本均匀，符合设计要求

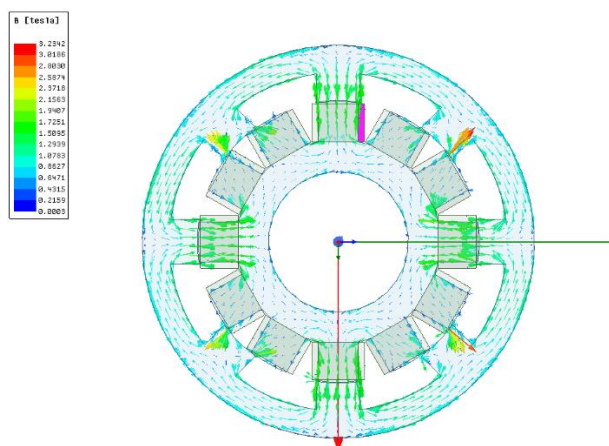


图 3.16 俯视图

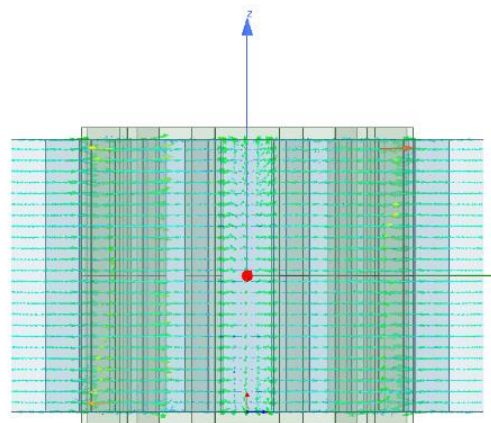


图 3.17 侧视图

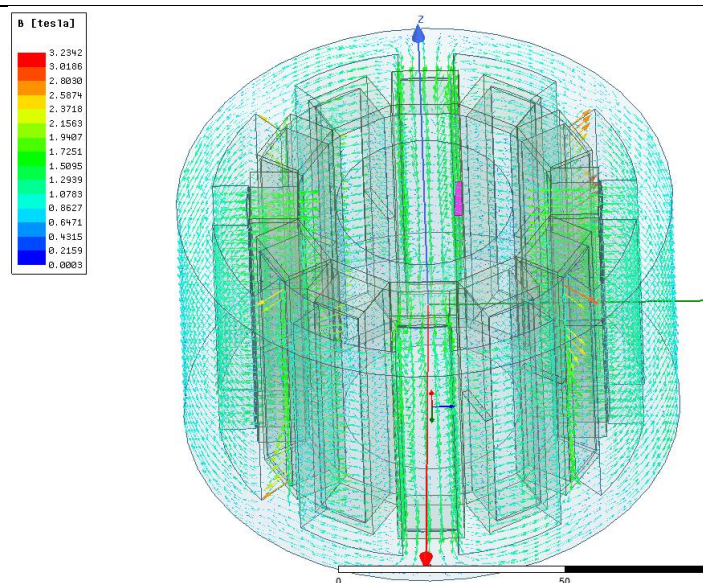


图 3.18 主视图

（5）静态仿真

在本设计中，结构是 12/8 的外转子开关磁阻电机，由电力电子器件轮换对三相绕组进行通电，本章节选用一相绕组通电，绕线方式参考于文献^[13]。具体研究对转矩、磁通量、电感的影响。

对于转矩，转子槽中心和定子中线对齐位置为零参考点。首先设定电流和转子角度为自变量，通过仿真结果（如图 3.19 所示），可以看出在 6° 位置时 SRM 获得的转矩是最大的，而随着电流的增大，相同角度下的转矩大小是线性增加的。电流注入角度决定了电流在电机磁路中的磁场分布，从而影响转矩产生。当电流注入角度与转子相对位置匹配时，可以使磁场线更集中地通过定子和转子的磁路，从而提高磁通量利用率，产生最大转矩。

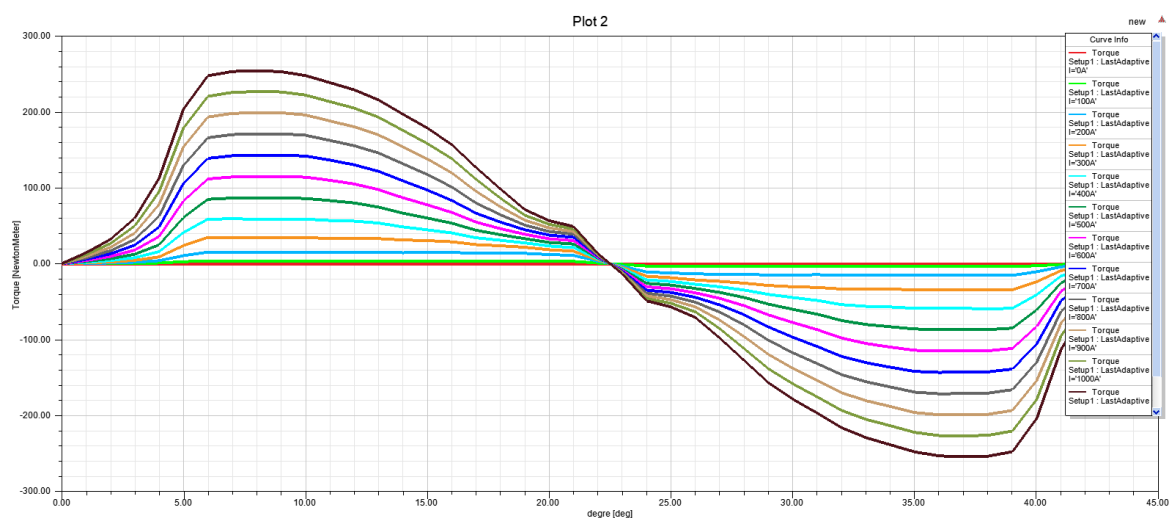


图 3.19 转矩与角度

对于磁通量，研究了不同角度下，其与电流的关系，可以看到 0~200A 时（如图 3.20 所示）磁通量呈线性增长，200A 达到饱和，过饱和后趋势减缓。电流的大小和方向直接决定了磁场线的强度和方向。电流越大，产生的磁场强度越高，穿越磁路的磁通量也就越大。因此，在电机设计中，为了实现更高的磁通量利用率和更大的转矩输出，通常需要使用较大的电流。然而，较大的电流同时也会导致较高的损耗和电机温升，从而影响电机效率和寿命。因此，需要在提供足够磁通量和保持高效运行之间找到一个平衡。

此外，磁通量受到电机磁路的影响。电机磁路包括定子、转子和气隙等部分，这些部分的结构和材料都会影响磁通量的传导。优化磁路结构，如定子和转子的极弧系数，可以改善磁通量分布和传导效率。同时，选择高性能的磁材料，如具有高磁导率和低损耗的硅钢，也有助于提高磁通量的利用率

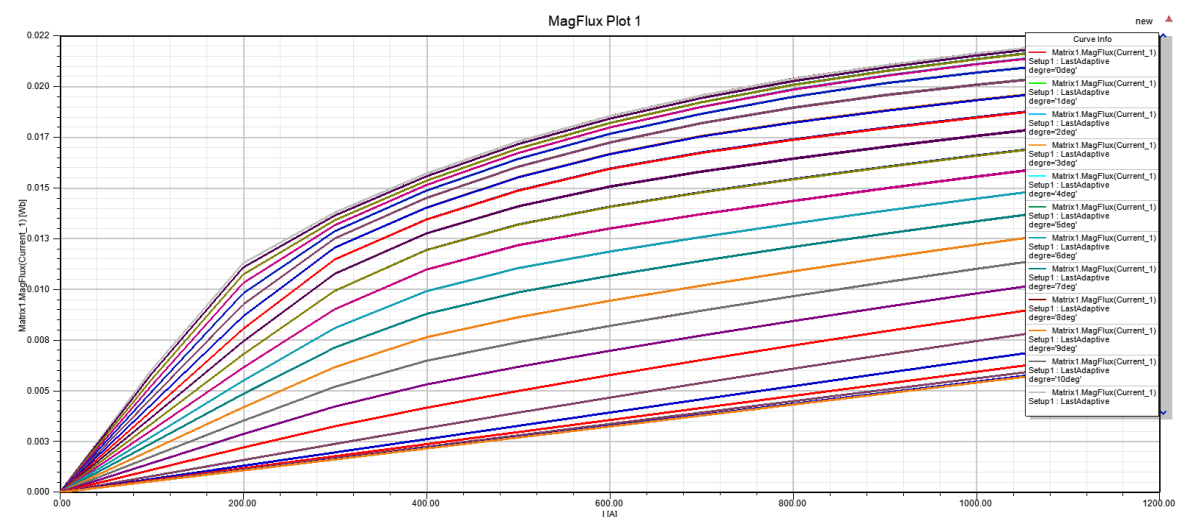


图 3.20 磁通量与电流

对于电感，我们研究不同电流下，各角度的电感曲线（如图 3.21 所示），可以看出从 0° 到 22.5° 转子由不对齐位置转向对齐，电流注入角增大，在 22.5° 定转子达到完全对齐的位置，获得的电感最大，22.5° 到 45° 转子槽顶和定子中线远离，电流注入角减小，电感逐渐减小。

可以分析出，电流注入角度与转子相对位置匹配时，可以使磁场线更集中地通过定子和转子的磁路，从而提高磁通量利用率。随着电流注入角度的变化，磁场线在定子和转子间的分布会发生变化，进而导致电感的变化。在实际运行中，为了实现最大转矩产生，需要根据转子位置调整电流注入角度。

在各电流下，不同角度对电感的影响主要体现在磁场强度和磁场分布的变化。为了实现最佳的输出性能和高效运行，需要充分考虑电流大小和电流注入角度之间的平衡。在设计和优化开关磁阻电机时，电感的控制和调整是实现高性能运行的关键因素之一。

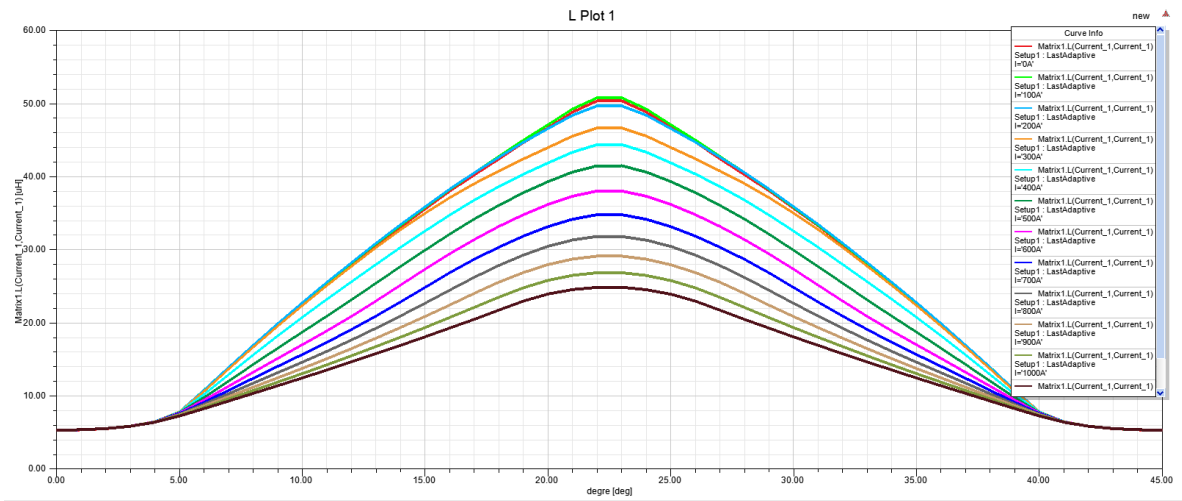


图 3.21 磁通量与电感

(6) 动态分析

在 Maxwell 瞬态场中，根据设计，给定转速 1500rpm，设定开断导通角，进行仿真，得到启动时刻的磁云图如下

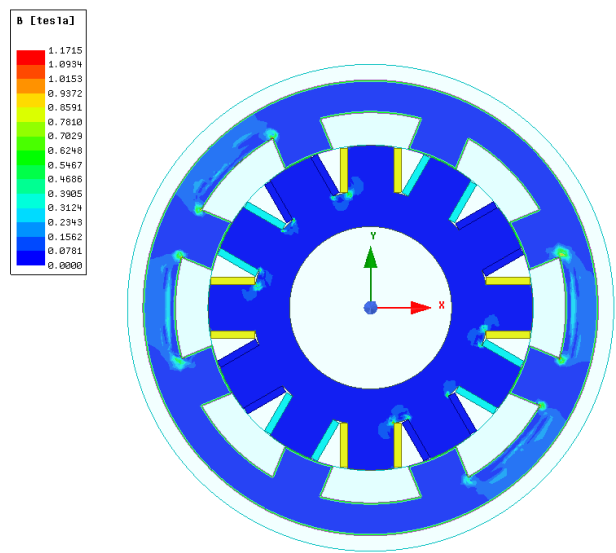


图 3.22 启动时刻（T=1ms）磁云图

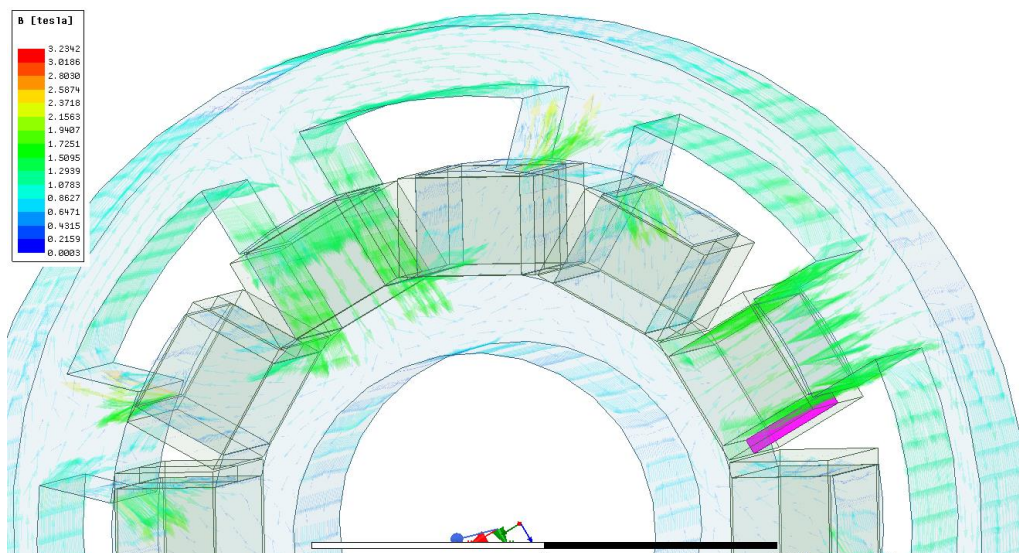


图 3.23 内部磁通量

启动时刻的磁密云图提供关于外转子开关磁阻电机（SRM）在启动阶段的磁场分布和变化的信息。图中直观地显示了电机在启动时刻的磁场分布情况，在绕组附近产生磁场（如图 3.23 所示），由于是开始阶段，铁芯内部磁筹处于磁化初期，磁场强度持续增强。磁通漏失方面，通过观察磁场线的走向，可以观察到磁通存在无法有效传递到转子的区域，后期可以进行针对优化。饱和情况，通过观察磁密云图中磁通密度的分布，未识别过磁饱和的区域。

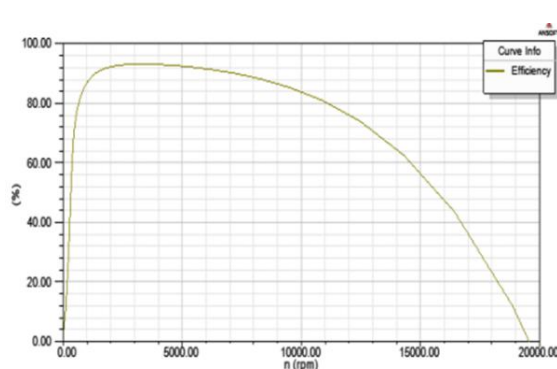


图 3.24 效率与速度

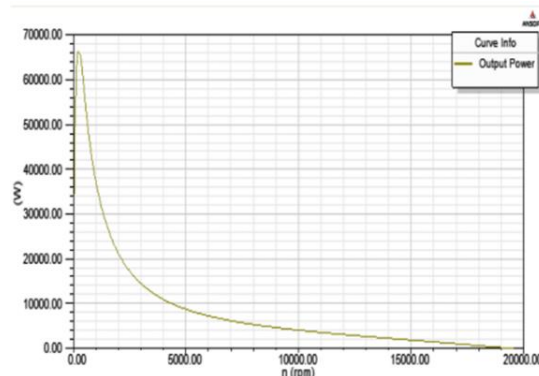


图 3.25 输出转矩与转速

图 3.23 显示了不同转速下的效率，在加速过程中效率较好保持在 85% 以上，不同的驱动行程效率保持在 80% 以上，

图 3.24 显示了开关磁阻电机的转矩与速度特性。应用斩波电流控制来限制启动电流，也可以限制请求电流。最初的扭矩是锁定的转子扭矩，在加速期内产生的扭矩为 350 Nm，因不同的负载转矩特性而不同.需要最大负载启动产生足够的扭矩来推动电梯。

（7）损耗分析

开关磁阻电机的损耗主要由铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗组成^[14]。以下是详细的损耗分析：

铜损耗：

铜损耗主要由定子线圈和转子线圈中的电阻产生。线圈中的电流经过导体时会产生焦耳热损耗。铜损耗与线圈的电阻、电流和匝数成正比。铜损耗的计算公式为：

$$P_{cu} = I^2 R \quad (3-15)$$

I 是线圈电流， R 是线圈电阻。为减小铜损耗，可以增加线圈的导体截面积以降低电阻，或使用高导电率材料制作线圈。

铁损耗：

铁损耗主要包括磁芯的磁滞损耗和涡流损耗，与铁心材料、频率和磁通密度有关。磁滞损耗由于磁芯在磁化和去磁过程中的能量损耗引起，涡流损耗则是由于铁芯内的涡流引起的。为降低铁损耗，可以选择高磁导率、低磁滞损耗的材料，并使用分段或薄片铁心结构以减小涡流损耗。

机械损耗：

机械损耗主要由轴承摩擦、轴封摩擦和风阻引起。机械损耗与转子转速、轴承和冷却系统的设计有关。为降低机械损耗，可以选择高性能轴承、优化冷却系统设计和减小结构阻力。

杂散损耗：

杂散损耗来自于各种非线性因素，如谐波损耗、交叉磁阻损耗、磁通漏失等。杂散损耗较难直接计算，通常可以通过测量和仿真方法进行评估。为降低杂散损耗，可以优化电机的几何结构、磁路设计和控制策略。

从仿真结果（如图 3.23 所示）可看出，损耗主要来自铁芯损耗，其他损耗可以忽略不计。

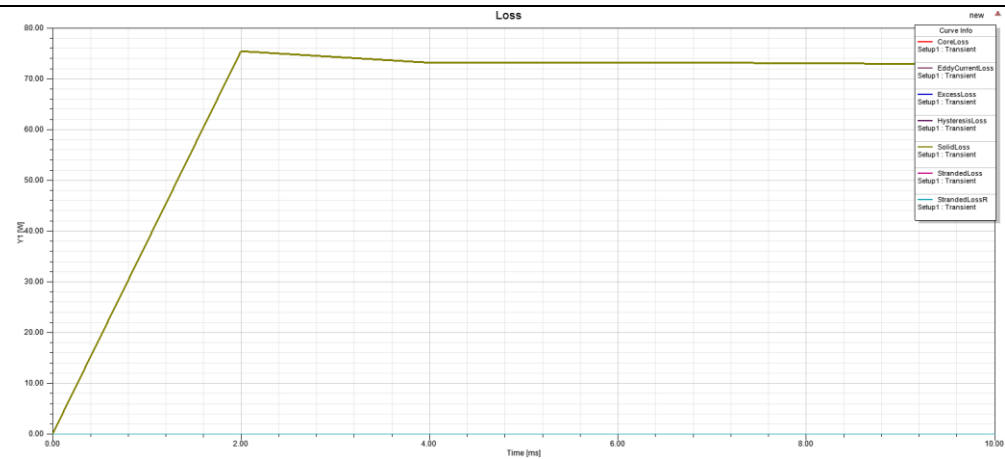


图 3.26 损耗

3.4 本章小结

本章首先从有限元仿真软件 Maxwell 入手,通过对上一章节的理论分析进行延伸,给出了样机设计的具体尺寸,并对模型进行绘制。接下来,通过对不同材料属性的分析,确定了最优的材料选择,并对模型进行了网格剖分。

在模型建立完成后,本研究首先进行了静态仿真,详细分析了转矩、磁通量和电感等性能参数。随后,在瞬态场中进行动态分析,深入研究了转速、转矩以及损耗等方面的表现。

通过本章的工作,我们成功地将理论分析与有限元仿真相结合,为后续的优化设计提供了可靠的基础。同时,本章所进行的详细分析与讨论也有助于我们更深入地理解电机设计中的关键参数,从而推动电机性能的进一步优化。

4 开关磁阻电机的优化设计

通过上章设计得到的数据，并未达到预计设计目的，本章将对电机的特定参数进行优化并添加极靴，从而提升总体性能。

4.1 Design expert 介绍

Design Expert 是一款由美国 Stat-Ease 公司开发的强大统计分析和实验设计软件，广泛应用于科研、工程、制造和质量控制领域。它为用户提供了一系列实验设计方法和统计分析工具，帮助用户在优化产品设计和工艺参数时提高效率、降低成本并确保质量。

其次，Design Expert 具有直观的用户界面和丰富的功能模块，可应对多种复杂问题。它支持因子设计（Factorial Design）、响应曲面法（Response Surface Methodology, RSM）、混合设计（Mixture Design）等多种实验设计方法，覆盖了从初步筛选影响因素到探索性和优化性实验的全过程。软件内置的图形工具可以方便地展示实验数据和分析结果，帮助用户快速洞察数据背后的信息。

最后，Design Expert 在实验设计和优化过程中发挥关键作用。首先，用户可以根据实际问题 and 需求选择合适的实验设计方法，设定自变量和因变量。随后，软件会生成相应的实验方案。在收集实验数据后，用户可以利用 Design Expert 进行数据分析，建立数学模型并评估模型的拟合度、显著性和预测能力。此外，软件提供了多种优化方法，允许用户在满足限制条件的前提下寻找最佳解。

4.2 优化算法介绍

（1）响应面法原理

响应面法（Response Surface Methodology, 简称 RSM）是一种统计和数学优化技术，广泛应用于科学研究和工程领域。RSM 的核心思想是通过一系列有计划的实验来研究多个因素对某一响应变量（如产量、效率、性能等）的影响，并找到使响应变量达到最佳值的因素组合。RSM 的主要目的是建立一个可靠的数学模型，描述因变量与自变量之间的关系，从而为优化问题提供解决方案。响应面法主要包括离散变量范围与响应值设计、数学回归模型的建立、模型拟合度分析、最优方案选取等内容^[13]，主要包含以下几个关键步骤：

实验设计：首先，根据研究问题和需求，选定相关因素（自变量）和响应变量（因变量）。接着，利用统计原理设计一系列有计划的实验，以收集足够的数据来建立数学

模型。常用的实验设计方法有：中心组合设计（CCD）、Box-Behnken 设计等。

数据收集：按照实验设计方案进行实验，收集每组实验的响应变量数据。在此过程中，应尽量保证实验条件的一致性和数据的准确性，以降低实验误差对模型精度的影响。

建立数学模型：利用回归分析技术，基于收集到的数据拟合一个数学模型。通常采用的模型形式有线性模型、二次模型和高阶模型等。拟合过程中需注意检验模型的显著性、拟合优度（如 R^2 ）和残差分析，以确保模型的可靠性和预测能力。

模型分析与优化：在建立数学模型后，可通过解析和数值方法寻找最优解。此外，可以利用图形展示方法（如等高线图、曲面图）直观地观察自变量与响应变量之间的关系，以及可能存在的最优区域。在满足限制条件的前提下，找到最优解以实现响应变量的最大化或最小化。

验证实验：对于找到的最优解，可进行验证实验来确认模型的准确性和实用性。若验证实验结果与模型预测一致，则证明模型具有良好的预测能力；否则，可能需要调整实验设计或改进模型。

响应面法的主要优点在于能够有效地处理多因素优化问题，尤其是在资源有限和实验成本高的场合。

（2）Box-Behnken Design（BBD）

BBD（Box-Behnken Design）是一种特殊的响应面设计方法，由 Box 和 Behnken 于 1960 年代提出，其主要特点是试验点位于三维空间的立方体表面，适用于中心组合试验设计。

在优化开关磁阻电机（SRM）的极弧系数和轭厚时，可以使用 BBD 设计方法。首先，确定两个自变量：定子和转子极弧系数（或者称为电机极弧）和轭厚。接下来，选择适当的试验范围和水平，如分别为定子和转子极弧系数选择 3 个水平（低、中、高），轭厚也选择 3 个水平。通过组合这些水平，构建 BBD 试验设计矩阵。

在实验中，根据试验设计矩阵进行实际电机性能测试，如扭矩、效率等。之后，使用响应面法建立自变量与响应变量之间的数学模型，通常采用二次回归方程。基于这个数学模型，可以通过求解极值，找到最优的极弧系数和轭厚组合，从而使得扭矩最大化、效率最优化等。

最后，使用实验验证所得到的最优设计参数。通过使用 BBD 设计和响应面法，可以系统地研究和优化开关磁阻电机的极弧系数和轭厚，从而实现高性能、高效率和

稳定运行的电机设计。

4.3 电机结构优化设计

在开关磁阻电机优化中，通常涉及多个方面，包括极弧系数、磁材料、结构设计、绕组设计、控制策略、散热设计以及噪音和振动控制，以实现高效、可靠且高性能的电机运行。本节选取定转子极弧系数，极型为主要优化目标，具体优化如图 4.1 所示。

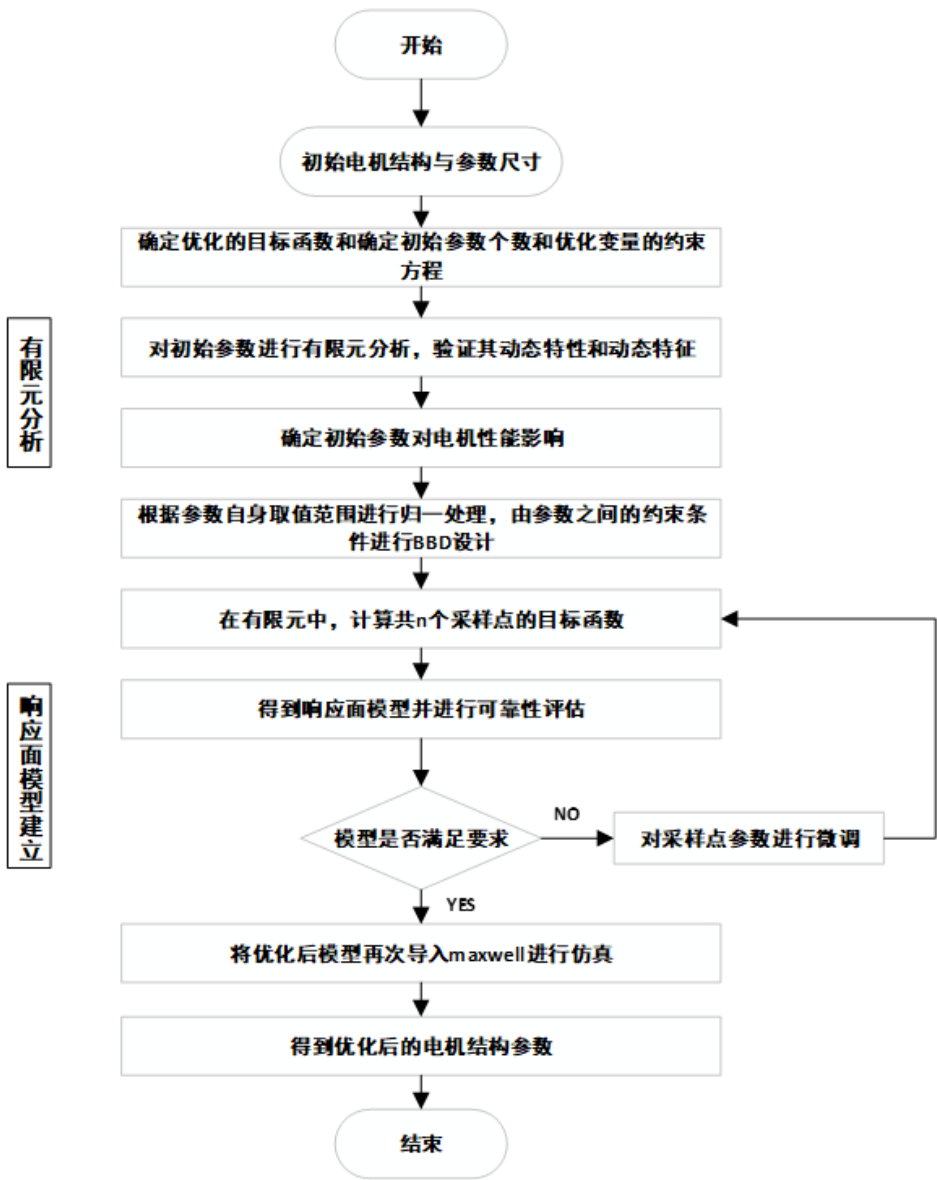


图 4.1 优化流程

(1) 电机参数优化分析

在实际应用中，优化定子和转子极弧系数的目标可能因应用场景和性能要求的不同而有所差异。例如，在高效率应用场景下，优化目标可能是最大化电机效率；而在高扭矩密度场景下，优化目标可能是实现最佳的扭矩密度。为了实现这些目标，研究

人员需要综合考虑磁通量、电感以及其他相关性能参数(如扭矩、效率、力矩波动等)，并利用合适的优化方法寻找最优解。本文设计的电机是作为电梯曳引用，故需要很大的扭矩，因此，选用极弧系数和特殊极型结构，来达成优化目的。

在开关磁阻电机中，定子极弧系数和转子极弧系数是指定子极和转子极的有效磁通截面与极距(极间角)之比。调整这两个参数可以改变磁通的分布和磁场线的走向，进而影响电机的磁通量和电感。在电机换相工作时，电机输出转矩无明显变化，而在转矩输出最大值区间内，电机输出转矩随定子极弧系数的增加明显下降，这是因为定子极弧系数的增加影响了电机相电流的幅值，而相电流幅值的降低导致了电机输出转矩的下降^[17]。

以下详细分析定子和转子极弧系数优化分析对磁通量和电感的影响：

磁通量：定子和转子极弧系数影响磁通量在电机内的分布和传导效率。合适的极弧系数可以使磁场线更集中地通过定子和转子的磁路，从而提高磁通量利用率。通常情况下，增加定子极弧系数可以提高磁通量，但过大的极弧系数可能导致磁通饱和现象。因此，在优化过程中，需要权衡定子和转子极弧系数，以实现磁通量的最佳利用。

电感：在开关磁阻电机中，电感是影响电机性能的重要参数。电感的变化直接影响转矩产生、力矩波动以及电机效率。定子和转子极弧系数对电感的影响主要体现在两个方面：一是电感的绝对值；二是电感波动。合适的极弧系数可以降低电感波动，减小转矩脉动，从而提高电机的平稳运行性能。同时，优化定子和转子极弧系数还可以提高电感的绝对值，增强磁场线的集中程度，从而提高转矩产生效率。

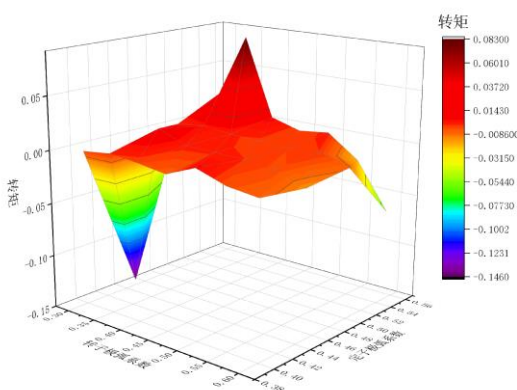


图 4.2 定转子极弧系数对磁通量的影响

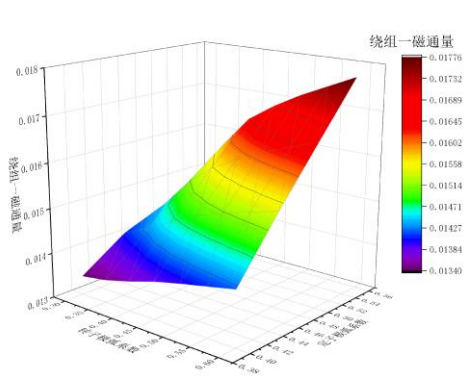


图 4.3 定转子极弧系数对转矩的影响

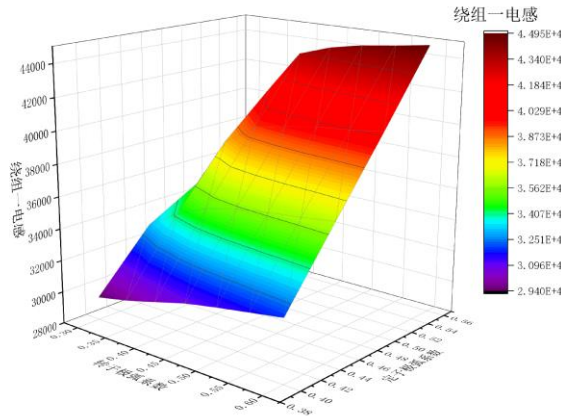


图 4.4 定转子极弧系数对电感的影响

由以上可以分析可以看出，定转子不同的极弧系数组合所产生的转矩是一个非线性系统，而其对磁通量和电感的影响是线性的，故此，我们着手讨论具体的定转子极弧系数和轭厚的取值问题，通过优化这三个参数，可以有效改善磁通量利用率和降低电感波动，从而提升电机的性能和效率。

(2) SRM 响应面模型建立

对于响应面模型建立，设计了以下步骤

(a)确定自变量和响应变量：

在这个优化问题中，有两个自变量：定子极弧系数 (β_s) 和转子极弧系数 (β_r)，以及轭厚 (h)。响应变量可以是扭矩、效率等与电机性能相关的指标。

(b)选择适当的试验范围和水平：

为定子和转子极弧系数以及轭厚选择适当的试验范围。例如，可以在实际操作范围内为每个参数选择 3 个水平（低、中、高）。

(c)构建 BBD 试验设计矩阵：

根据选择的水平组合，使用 **Box-Behnken** 设计方法构建试验设计矩阵。这个矩阵包含了在所有可能的参数组合下所需的实验次数。

(d)进行实际电机性能测试：

根据试验设计矩阵，通过实际电机性能测试来收集扭矩、效率等响应变量的数据。

(e)建立响应面模型：

使用二次回归分析方法拟合实验数据，建立定子极弧系数、转子极弧系数和轭厚与响应变量之间的数学模型。

(f)求解最优参数组合：

利用响应面模型求解最优参数组合，使得响应变量（如扭矩或效率）最大化或最优化。

(g)实验验证和微调：

将所得到的最优设计参数应用到电机设计中，并通过实验验证其性能。在实际应用中，可能需要对最优设计结果进行微调以适应实际生产条件和性能要求。

得到确定的优化参数如下

表 4.1 优化参数

序号	参数名	优化范围
1	定子极弧系数 (β_s)	0.4~0.7
2	转子极弧系数 (β_r)	0.3~0.6
3	定子轭厚 (mm)	4.5~13.5

在保持电机其他参数不变的情况下，通过定子极弧极弧系数、转子极弧极弧系数为自变量（X），通过多元线性回归建立基于电机的转矩为响应值（Y）的响应面模型。采用二阶响应面模型对电机的转矩脉动和效率进行拟合^[15]。

$$f(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

其中式中 β_0 ， β_i ， β_{ii} 为系数； ε 为拟合误差； x_i 分别为电机的定子和转子极弧 β_s ， β_r ，响应面模型可以用矩阵形式表示

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (4.2)$$

使用最小二乘法，求出回归系数

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4.3)$$

响应面模型可以表示成

$$\hat{y} = Xb \quad (4.4)$$

k 的取值对实验结果影响很大，在保证样本点数目前提下，又要确保样本点充满整个空间。在 k 的因素下， α 取值公式有

$$\alpha = 2^{\frac{k}{4}} \quad (4.5)$$

因为自变量取值范围不同，做如下编码处理

$$\xi_i = \frac{x_i - (x_{imax} + x_{imin})/2}{(x_{imax} - x_{imin})/2} \quad (4.6)$$

ξ_i 归一化变量， x_i 是定转子极弧系数

将计算后数据输入 Design expert，完成设计好的 13 组实验，记录结果如下图 4.5

所示

	Std	Run	Factor 1 A:定子极弧系数 %	Factor 2 B:转极弧系数 %	Factor 3 C:轭厚 mm	Response 1 转矩 N/M
	9	1	0.55	0.2	4.5	5.008
	8	2	0.8	0.4	13.5	13.5318
	10	3	0.55	0.6	4.5	1.9757
	5	4	0.3	0.4	4.5	12.5049
	17	5	0.55	0.4	9	9.6211
	1	6	0.3	0.2	9	13.0693
	11	7	0.55	0.2	13.5	5.6486
	2	8	0.8	0.2	9	0.0162
	7	9	0.3	0.4	13.5	6.2676
	3	10	0.3	0.6	9	10.3946
	12	11	0.55	0.6	13.5	3.188
	6	12	0.8	0.4	4.5	10.8626
	16	13	0.55	0.4	9	9.6211
	15	14	0.55	0.4	9	9.6211
	4	15	0.8	0.6	9	0.5412
	13	16	0.55	0.4	9	9.6211
	14	17	0.55	0.4	9	9.6211

图 4.5 试验后样本响应值

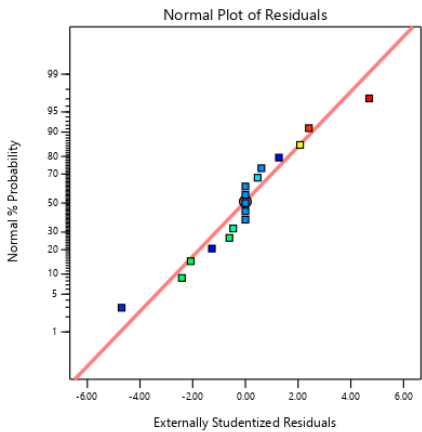


图 4.6 残差

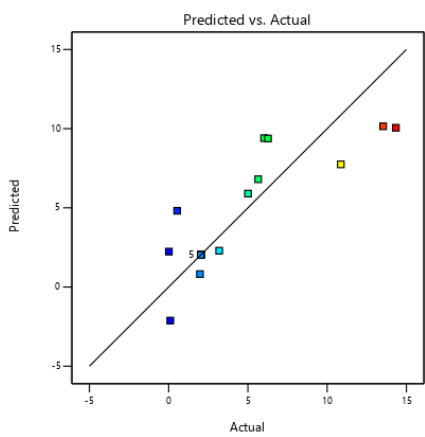


图 4.7 预测值和实际值

根据优化结果，模型分析显著，所有点残差(如图 4.6)近似分布在一条直线上，预测值(如图 4.7 所示)与实际值基本符合，由此确定定子极弧系数取 0.409755 转子极弧系数取 0.552671 轭厚取 8.90225 时，获得的转矩最大。

（3）极型优化

在本设计中，添加极靴会对电机的性能产生显著影响。详细如图所示，在添加 90° 楔形角的极靴后，磁通路径得到明显改善、磁阻显著降低以及磁通漏失大幅减小。

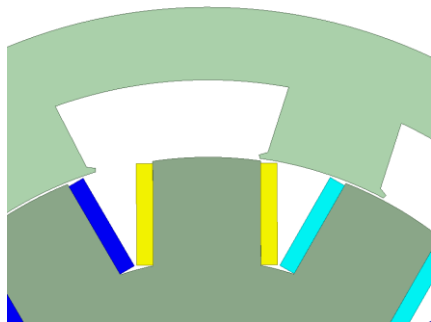


图 4.8 90° 楔形角极靴

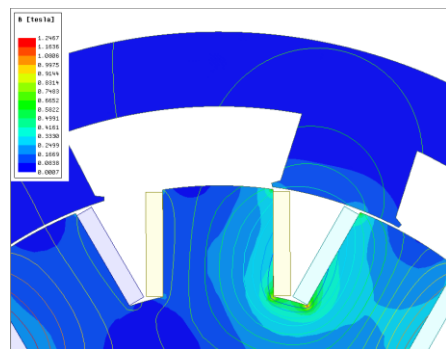


图 4.9 磁云图

在引入极靴后,电机在启动、运行及过载情况下的性能都将得到改进。具体来说,首先,由于改善了磁通路径,磁阻变化更加剧烈,从而提高了电机的输出转矩。这意味着在相同的输入功率条件下,采用极靴设计的 SRM 可以实现更高的扭矩密度和动力性能。其次,减小的磁通漏失有助于降低谐波损耗和磁场对周围环境的影响,进而提高了电机的工作效率和能效比。此外,更为均匀的磁场分布有助于降低铁损耗,从而降低电机的温升,提高其可靠性和使用寿命。再者,采用极靴后,转子在转动过程中的气隙磁场波动更加平稳,可以减轻机械振动和噪声,改善电机的整体运行稳定性。最后,引入极靴后,由于磁场变化更为明显,使得电机控制策略如磁场定向控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)等更易实现,进一步提升了 SRM 的动态性能。

综上所述,在本设计中,添加极靴对外转子开关磁阻电机的性能产生了积极影响,包括提高扭矩密度、工作效率、可靠性以及降低噪声、振动等方面,但同时也需要考虑增加的制造难度和成本。

4.4 本章小结

在样机建立的基础上,本研究详细阐述了如何利用 Design expert 软件进行响应面优化。经过优化计算,我们得到了一组数据,其中定子极弧系数、转子极弧系数和定子轭厚的不同组合可以实现转矩的最大化。此外,我们还引入了极靴设计,这有助于改善磁通路径并提高电机的输出转矩。

将优化结果应用于 Maxwell 软件中进行仿真分析,从而获得了最终的电机设计成果。这一成果不仅体现了高效性能,还展现了本研究在设计和优化方面的创新实践。

结束语

（1）SRM 作为曳引驱动系统的优势

综合上述设计，在分析现阶段电梯市场后，开关磁阻电机作为曳引驱动系统具有显著的优势，主要体现在高扭矩密度、宽速调节范围、强过载能力、简单结构和较低制造成本等方面。高扭矩密度意味着电机在较小体积和重量下能够提供更高的输出转矩，这对于曳引驱动系统而言具有很高的实用价值，因为它可以减小系统的总重量、节省空间并提高动力性能^[16]。宽速调节范围和强过载能力使得开关磁阻电机能够在各种工况下灵活调整输出，满足曳引驱动系统在启动、加速、制动等不同阶段的需求。简单的结构有利于提高电机的可靠性和维修性，降低维护成本，从而在运行过程中减少故障发生的概率。较低的制造成本则有助于降低曳引驱动系统的整体投资，提高经济效益。总之，开关磁阻电机作为曳引驱动系统具有主流永磁同步电机不具有的优势，表现为高性能、可靠性和经济性的平衡，为实际应用提供了一个具有竞争力的选择方案。

（2）课题展望

在电梯曳引应用领域，开关磁阻电机（SRM）具有巨大的潜力和发展前景。本设计中由于时间有限，有如下几个方面做的还不足，首先优化和三维方面，优化部分比较粗略，没有具体到所有参数，仿真和分析没有全部推广到三维层面，热分析、振动、噪声管理也缺乏设计和改善。其次，设计的电机在控制方面有所欠缺^[17]，控制电路搭建完成后可以结合传感器进行相应综合设计^[18]，并利用 DSP 或者 PLC 进行控制。最后，基于一种外励磁辅助 SRM，下一个学习阶段可以更深入的拓展与研究。未来的研究课题可以聚焦于针对电梯曳引的特点，对 SRM 进行专门的优化设计，包括改进磁路、提高材料利用率和引入新型结构，以提高性能、减小尺寸和重量、降低成本。同时，研究适用于电梯曳引系统的高效 SRM 控制策略，如磁场定向控制（FOC）、直接转矩控制（DTC）等，以实现精确的速度和转矩控制，满足电梯在不同工况下的需求。此外，还可以探索采用新型制造工艺和材料，提高电机的工作效率和可靠性，降低噪音和振动，以更好地适应电梯曳引系统的实际应用需求。

致 谢

论文到这一部分就结束了，也标志着大学四年圆满收尾。

再次向毕业设计期间，给予我帮助的老师，师兄表示感谢。

感谢指导老师扬州大学莫岳平教授，在电机本体设计上指引方向。

感谢班主任牛绿原老师，不辞辛苦，小到仿真数据，大到设计总体，都给予了我极大的帮助。

感谢扬州大学硕士何师兄和盛师兄，在软件方面细心讲解，带领我走进科研的大门。

落笔的这一刻，五味杂陈，回首细节历历在目，再次感谢一路走来老师指引的道路，感谢一路并肩的同学：

山川隐隐，良禽燕雀齐居，鸿鹄扶摇而上，华光旖旎，燕雀与林间行，茫与鱼虫。

九日之上，唯鸿鹄之所，燕雀非之至也，此皆自束言耳。孰谓雀无青云之志，燕不上达之心。元璋起于乱世，汉帝生于草莽，下平江，斩白蛇，资其身而立帝业，皆非生而富贵者也，恃他日勤之。九天之上岂无失路之人，屋室之内皆尽平莽之辈？肃宗厚照，不思上达而废于朝。嗟乎，人多怨无胸中之胜，家非良指，遂用听命。然众不知，顺成非成，逆成则服。夫英雄者，甘受寂寥，不畏败没，坚身自住，故事决而虑密，不为小利而失大宗。故燕雀无自为贫贱，以为鸿鹄之高不能至也。善为时，不视于己，动其道，立其身，可以代其之位而为鸿鹄者。

谨此，献予每一个步履不停的人。

参 考 文 献

- [1] 晏勇瑞. 例说曳引力与启动转矩对电梯曳引系统的影响[J]. 中国电梯, 2022, 33(24):39-42.
- [2] 方俊彬. 1.5kW 开关磁阻发电机设计及优化[D]. 湘潭大学, 2015.
- [3] Base H K, Krishnan R. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance[C]/Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Nagoya, Japan: IEEE, 2000.
- [4] 张敏杰. 开关磁阻电机优化设计与控制[D]. 上海交通大学, 2020. DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2020.000781.
- [5] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 机械工业出版社, 2000.
- [6] 陈晓云. 基于 Matlab/Simulink 的开关磁阻电机控制仿真及软件开发[D]. 济南大学, 2016.
- [7] 赵蕊. 基于 ANSYS 的开关磁阻电机优化设计[D]. 南京航空航天大学, 2020. DOI:10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.002061.
- [8] 吴建华, 詹琼华, 林金铭. 开关磁阻电机的前期设计[J]. 电工技术学报, 1995, 01:34-38.
- [9] Jokinen T, Hrabovcova V, Pyrhonen J. Design of rotating electrical machines[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [10] 尹俊. 开关磁阻电机效率与转矩脉动优化控制设计[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [11] 黄盼. 高速开关磁阻电机的分析设计[D]. 华中科技大学, 2016.
- [12] 梁永洲. 电动自行车用外转子开关磁阻电机优化设计[D]. 江西理工大学, 2021. DOI:10.27176/d.cnki.gnfyc.2021.000257.
- [13] 谷雨. 开关磁阻电机的电磁参数设计与研究[J]. 防爆电机, 2019, 54(06):5-8.
- [14] 王星. 开关磁阻电机损耗分析与优化设计[D]. 西安科技大学, 2016.
- [15] 杨国彬. 基于响应面法和遗传算法的开关磁阻电机优化设计[D]. 江西理工大学, 2019.
- [16] 陈东锁. 开关磁阻电机驱动系统的动态模型与仿真[D]. 太原理工大学, 2005.
- [17] 贺汝臣. 起重机用开关磁阻电机转矩脉动分析和振动研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2020.
- [18] 邓俊. 基于 DSP 的开关磁阻电机调速系统设计及在电梯曳引系统中的应用[D]. 华南理工大学, 2013.