
分类号：TP273

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220320108

题 目 电动汽车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率研究

英文并列

题 目 High Efficiency Study of Built-in Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles in Wide Speed Range

学 生 姓 名： 杨云飞

校 内 导 师： 陈其工（教授）

校 外 导 师： 许兴林（高级工程师）

专业学位类别： 电子信息（085400）

研究方向(领域)： 控制工程

论文答辩日期： 2025 年 05 月 11 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：杨云飞

日期：2025 年 05 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

杨云飞

指导教师签名：

陈

日期： 2025 年 05 月 20 日

日期： 2025 年 05 月 20 日

电动汽车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率研究

摘 要

新能源汽车驱动电机技术的快速发展推动了电机效率和性能的持续提升，但仍面临低转矩脉动和宽转速区间内高效率等关键问题。为解决这些挑战，本文提出了一种基于扁线绕组的双层永磁体内置式永磁同步电机设计，并对其进行了定子和转子结构优化研究，在保证低转矩脉动的同时，使电机在宽转速范围内具有更高的效率。

首先，根据电机的设计指标和基本电磁方程，建立了电机的二维模型。在研究过程中，重点分析了绕组尺寸和层数对电机性能的影响。通过深入探讨绕组涡流损耗、齿槽转矩及转矩脉动的变化规律，结合仿真数据，确定了绕组的最优尺寸和层数配置。研究表明，合理设计绕组尺寸和层数可以降低涡流损耗和转矩脉动，提高电机的综合性能。其次，针对转子结构，设计了一种具有外表面弧形槽的创新方案。通过田口法对转子外侧弧长、内侧弧长和槽深等关键参数进行了精确优化。优化结果显示，该设计有效提升了气隙磁密波形的正弦度，大幅降低了空载反电动势的谐波含量，改善了电机运行的电磁性能。此外，采用分段斜极方法进一步优化转矩特性。在对分段数和斜极角度进行详细仿真分析后，确定了最优配置方案。该方法显著减少了转矩脉动，使电机在运行过程中更加平稳。最后，基于优化后的电机模型进行效率 Map 图的仿真分析。结果表明，优化设计后的电机在效率达到 96% 以上的高效区间占比高达 70.16%，相比优化前提高了 2.3%。同时，

该电机在宽广的转速范围内依然能够保持较高的效率，充分满足了新能源汽车驱动电机的性能要求。特别是在低转速和高转速区间，优化后的电机保持了较高的效率，避免了传统电机在这些区间效率较低的缺点。电机在不同工况下的效率波动较小，进一步证明了优化设计的优越性。

综上所述，优化后的电机在效率 Map 图仿真中显示出显著的性能提升，特别是在宽广的转速范围内保持了较高的效率，充分满足了新能源汽车驱动电机的性能需求。该设计方案合理且具有较强的实用性，为新能源汽车行业提供了有效的电机设计参考。

关键词：内置式永磁同步电机，扁线绕组，转子辅助槽，转子分段斜极，田口法

High Efficiency Study of Built-in Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles in Wide Speed Range

ABSTRACT

The rapid development of new energy vehicle drive motor technology has driven the continuous improvement of motor efficiency and performance, but it still faces key issues such as low torque pulsation and high efficiency over a wide speed range. To address these challenges, this paper proposes a double-layer permanent magnet built-in permanent magnet synchronous motor design based on flat-wire windings, and carries out a stator and rotor structure optimisation study, which ensures low torque pulsation and at the same time enables the motor to have higher efficiency over a wide speed range.

Firstly, a two-dimensional model of the motor was established according to the design index of the motor and the basic electromagnetic equations. In the research process, the influence of the winding size and the number of layers on the performance of the motor is analysed in focus. Through in-depth exploration of the variation rules of winding eddy current loss, cogging torque and torque pulsation, combined with simulation data, the optimal size of the winding and the number of layers configuration are determined. The study shows that the reasonable design of winding size and number of layers can reduce the eddy current loss and torque pulsation, and improve the comprehensive performance of the motor. Secondly, for the rotor structure, an innovative solution with curved slots on the outer

surface was designed. Key parameters such as rotor outer arc length, inner arc length and slot depth were precisely optimised by Taguchi method. The optimisation results show that the design effectively enhances the sinusoidality of the air-gap magnetic density waveform, significantly reduces the harmonic content of the no-load reverse electromotive force, and improves the electromagnetic performance of the motor operation. In addition, the segmented skewed pole method is used to further optimise the torque characteristics. After a detailed simulation analysis of the number of segments and the slant pole angle, the optimal configuration was determined. This method significantly reduces the torque pulsation and makes the motor smoother during operation. Finally, the simulation analysis of the efficiency Map diagram is carried out based on the optimised motor model. The results show that the optimised design of the motor has a high percentage of 70.16% in the high-efficiency zone where the efficiency reaches 96% or more, which is an improvement of 2.3% compared with the pre-optimisation period. At the same time, the motor is still able to maintain high efficiency in a wide speed range, which fully meets the performance requirements of new energy vehicle drive motors. In particular, the optimised motor maintains high efficiency in the low and high speed ranges, avoiding the drawbacks of traditional motors with lower efficiency in these ranges. The efficiency fluctuation of the motor under different working conditions is small, which further proves the superiority of the optimised design.

In summary, the optimised motor shows significant performance improvement in the efficiency Map diagram simulation, especially in maintaining high efficiency over a wide speed range, which fully meets the performance requirements of new energy vehicle drive motors. The design scheme is reasonable and highly practical, providing an effective motor

design reference for the new energy vehicle industry.

Yang Yun Fei (Electronic and Information Engineering)

Supervised by Professor Chen Qi Gong

KEY WORDS: built-in permanent magnet synchronous motor, flat wire winding, rotor auxiliary slots, rotor segmented helical poles, taguchi method

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 本课题的研究背景及意义.....	1
1.2 扁线绕组技术的设计应用及国内外研究现状.....	3
1.3 内置式永磁同步电机转子拓扑结构的国内外研究现状.....	6
1.4 本文结构安排.....	10
第 2 章 车用永磁同步电机基本理论及设计基础.....	15
2.1 内置式永磁同步电机的运行原理与定子绕组形式.....	15
2.2 车用内置式永磁同步电机的性能要求.....	17
2.2.1 内置式永磁同步电机的 d-q 轴数学模型	18
2.2.2 控制策略.....	19
2.3 转子结构选择内嵌式永磁体设计.....	22
2.4 本章小结.....	23
第 3 章 V 型与双 V 型永磁同步电机性能及损耗分析.....	24
3.1 电机性能分析及对比.....	24
3.1.1 空载性能分析.....	24
3.1.2 负载性能分析.....	26
3.2 电机损耗及效率 Map 分析对比	28
3.2.1 电机损耗仿真分析.....	29
3.2.2 电机效率 Map 图仿真分析	32
3.3 电机设计需求与仿真数据对比确定双 V 型转子设计.....	33
3.4 本章小结.....	34
第 4 章 车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率优化.....	35
4.1 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的设计指标.....	35

4.1.1 电机性能指标与结构参数.....	35
4.1.2 电机材料的选择.....	36
4.2 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的定子优化.....	37
4.2.1 扁线绕组尺寸优化.....	38
4.2.2 定子绕组层数的选择.....	40
4.3 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的转子优化.....	42
4.3.1 转子表面辅助槽的设计与优化.....	42
4.3.2 分段数与斜极角度的选择.....	46
4.4 本章小结.....	47
第 5 章 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机性能分析.....	48
5.1 各电机模型的齿槽转矩和输出转矩对比.....	48
5.2 宽广的转速范围内保持高效率.....	49
5.2.1 电机优化前后性能参数对比.....	52
5.2.2 宽转速范围内对应的效率对比.....	53
5.3 本章小结.....	54
第 6 章 总结与展望.....	55
6.1 全文总结.....	55
6.2 工作展望.....	56
参考文献.....	57
攻读学位期间发表的学术论文.....	63
致谢.....	64

第 1 章 绪论

1.1 本课题的研究背景及意义

随着社会的发展和工业的进步，人类对能源的需求持续增长。然而，由于化石燃料的不可再生性及其对环境的负面影响，节能减排的理念逐渐成为共识^[1]。在此背景下，电动汽车因其能够有效减少化石能源消耗和碳排放，被视为实现低碳转型的重要途径之一。电动汽车以其零排放、高效率和低噪声的特点，相较于传统燃油汽车展现出显著的优势，因正逐渐赢得公众的广泛喜爱^[2]。同时，电动汽车也成为各国学术研究和政府政策的重点支持对象。为促进电动汽车产业的蓬勃发展，我国政府实施了一系列扶持政策，为这一领域的成长与产业构建注入了强劲动力。此外，作为世界领先的汽车制造与消费国，我国拥有健全的产业链和巨大的市场规模，为电动汽车的迅速崛起提供了坚实支撑，并明确了发展方向^[3]。能源短缺问题正日益成为全球共同面临的挑战。在现代工业生产中，电机作为能量转换的核心装置，消耗了大量能源。因此，通过改进电机结构、优化性能以及提升效率，不仅能够有效促进节能环保，还能降低生产成本，助力国民经济的发展^[4]。

作为电动汽车的关键组件，电机的性能对车辆的动力输出和驾驶感受有着决定性影响^[5]。鉴于电动汽车运行环境的多样性，驱动电机需具备以下关键特性：快速的动态响应、在低速时保持恒定扭矩的能力以及良好的过载性能。这些性能要求对于提升电动汽车的整体性能至关重要^[6]。对于电动汽车用内置式永磁同步电机的性能要求如下：

高功率密度、小型化：电动汽车对驱动电机的体积和重量有着严格限制，需在紧凑、轻便的设计基础上实现更高的功率输出。因此，电机必须具备高功率密度的特性，以满足电动汽车对性能的高标准需求^[7]。与工业电机相比，电动汽车对电机的高功率密度、小型化和轻量化提出了更高的标准。

宽转速范围：电动汽车运行速度范围较广，既要在城市环境中实现低速行驶，

又需在高速公路上保持高效运行。因此，驱动电机必须具备宽广的调速范围，以确保在各种驾驶场景下都能提供稳定且高效的动力输出^[8]。

转矩特性：在车辆起步和低速运行时，电机需具备高扭矩输出能力；而在高速行驶时，电机则需维持恒定的功率输出，以确保车辆能够稳定巡航^[9]。

高效率：由于汽车运行工况复杂，电机需在宽广的转速范围内保持高转换效率^[10]，以提升续航能力。

永磁同步电机凭借其结构简洁、耐用性强、调速性能优异以及高效能等特点，在各类电机中表现卓越，成为汽车厂商的优先选择。我国稀土资源储量全球领先，这为永磁同步电机的研发与应用提供了显著的成本竞争力^[11]。然而，由于车载空间限制以及电动汽车续航能力要求的提升，内置式永磁同步电机在实现宽转速范围内的高效率 and 低转矩脉动方面仍需克服技术难题。

为了优化电机的功率密度与效率，扁线电机成为技术发展的必然方向。这种电机采用矩形截面的扁线替代传统圆线作为定子绕组，并将绕组设计成发卡形状，插入定子槽后焊接端部。与传统的圆铜线绕组电机相比，扁线电机在散热性能、端部尺寸、槽满率和功率密度等方面表现更优^[12]，不仅有助于实现电机的小型化和轻量化，还能在宽转速范围内保持更高的效率。因此，扁线绕组技术在新能源汽车领域得到了广泛应用。

对于内置式永磁同步电机来说，双层 V 型永磁体^[13,14]较单层 V 型永磁体相比，主要有以下几个方面的优势：

1. 磁场强度与功率输出：由于采用双层结构，磁体的数量增加，能够提供更强的磁场强度，从而提高电机的输出功率。双层设计增加了每个转子单元的有效磁通量，提升了电机的功率密度和效率。

2. 磁场分布与功率密度：双层设计优化了磁场的分布，能有效减少磁场的不均匀性，提供更加平稳和均匀的磁力矩输出。这种均匀的磁场有助于降低电机的振动和噪音，提升电机运行的稳定性。同时能够提供更强的磁场，电机的功率密度较高。在相同体积下，双层 V 型永磁体能够输出更多的功率，适合需要高功率密度的应用场景，特别是电动汽车驱动电机。

3. 过载能力与抗退磁性能：双层永磁体设计使得电机在高负载下能更有效

地维持高效运行，具有更强的过载能力。由于磁场强度较大，电机在面对高负荷时的性能更稳定，可靠性也得到提升^[15]。双层设计增强了永磁体的抗退磁性能，能够有效抵抗高温和强负载对永磁体的影响，减少退磁的风险，从而提升电机的使用寿命和长期稳定性。

1.2 扁线绕组技术的设计应用及国内外研究现状

发卡绕组（Hairpin Winding）是一种采用矩形截面导线的绕组技术，因其形状也被称为扁线绕组。它广泛应用于高效电机（如电动汽车驱动电机）中，具有高槽满率、低损耗和优异的散热性能。扁线绕组最常见的安装方式是插入式安装，即将成型后的扁线逐根插入定子槽中，扁线绕组结构如图 1-1 所示。

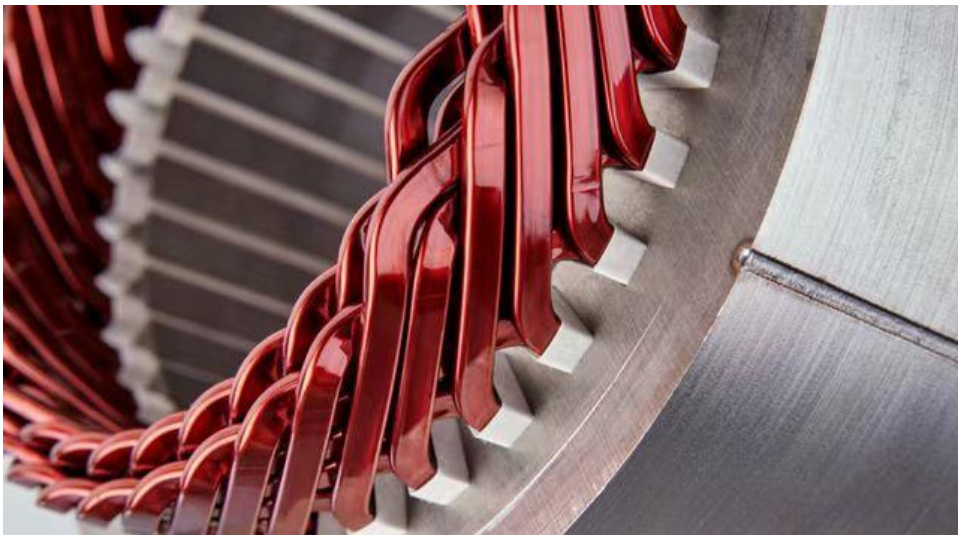


图 1-1 扁线绕组结构图

发卡电机采用扁线绕组技术，其槽内铜线排列整齐，槽满率显著高于传统圆铜线电机。这种设计使得电机在功率密度、效率和散热性能等方面实现了显著提升，具备传统圆铜线电机无法比拟的优势。具体而言，发卡绕组电机的主要优点包括：

高槽满率：扁线绕组能够更紧密地填充定子槽，减少无效空间，提高导电截面积，从而降低电阻和铜损。

高效率：由于电阻损耗降低，电机整体效率得到显著提升，特别适用于高电流应用场景。

优异散热性能：扁线与定子槽接触面积更大，热量传导更高效，有效降低温升，延长电机寿命。

高功率密度：在相同体积下，发卡电机能够承载更大电流，输出更高功率，满足对体积和重量要求严格的应用需求。

在电动汽车发展初期，传统圆线电机是主流技术，但其效率、功率密度和散热性能存在局限。随着新型绝缘材料（如耐高温聚酰亚胺）和高效导电材料（如高纯度铜扁线）的开发，技术不断突破；在 2010-2015 年中，特斯拉在其 Model S 和 Model X 车型中率先采用扁线电机技术，展示了扁线电机在效率、功率密度和散热性能方面的显著优势。此外，随着特斯拉的成功和全球电动汽车市场的快速扩张，在 2015-2020 年期间，特斯拉作为新能源车企中的龙头企业，旗下新一代 Model Y 搭载首款 10 层扁线电机，如下图 1-2 所示，再次将扁线绕组技术推到一个全新的高度；紧接着知名车企如宝马、通用和日产均引入扁线电机。

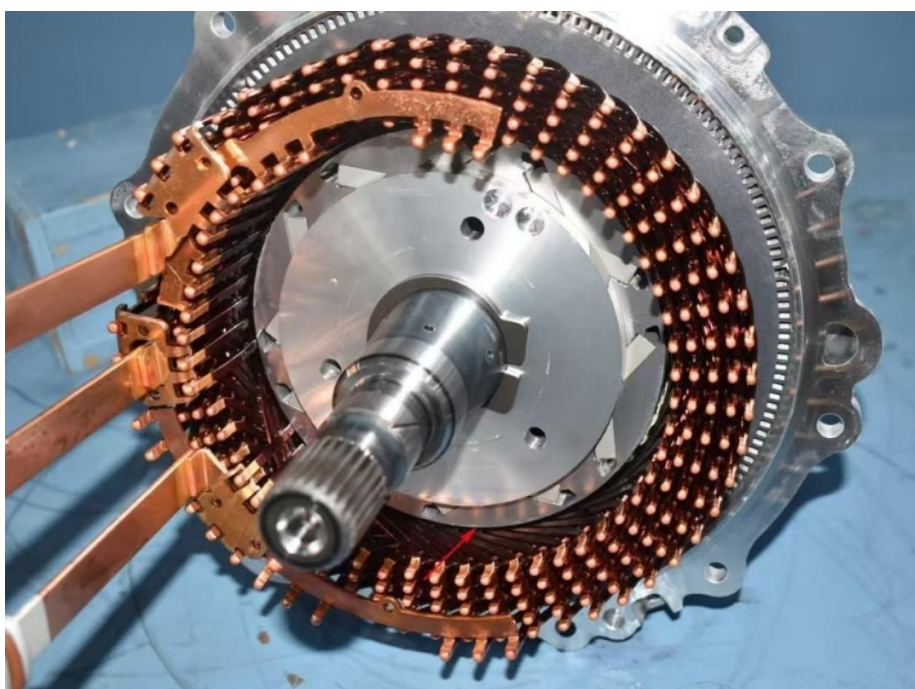


图 1-2 特斯拉 10 层扁线绕组

中国的新能源车企比亚迪在其高端电动车型（如汉 EV）中采用扁线绕组技术，提升了车辆的动力性和续航里程。目前，特斯拉和比亚迪在其电动汽车驱动电机中采用的扁线绕组层数各有特点，主要基于其电机性能目标、应用场景和技术路线。特斯拉采用 4 层扁线设计，在功率密度和效率之间取得了良好平衡，可

以满足高性能、长续航和高可靠性的需求。如图 1-3 所示，比亚迪在高端电动车型中采用了 6 层设计，提高了槽满率，增加了功率密度，适合高扭矩输出。可以更好地满足对高功率密度和高性能的追求。未来，随着材料、工艺和智能化技术的更新迭代，扁线电机将在新能源汽车驱动电机邻域发挥不可替代的作用。



图 1-3 比亚迪 6 层扁线电机

新能源汽车驱动电机大多采用 4 层或 6 层扁线绕组，这两种层数在性能、制造工艺和成本之间取得了较好的平衡。层数越多，散热路径越复杂，需结合冷却系统（如油冷或水冷）进行优化。但随着制造工艺的进步，8 层及以上扁线设计会在高端车型中应用。

文献[16]研究了电动汽车用扁线永磁电机的高频交流铜耗问题，提出了复合半解析法计算交流铜耗，并通过实验验证了其准确性。同时，探讨了通过调整定子绕组和铁芯参数来抑制高频交流铜耗的方法，发现不等截面导体的长宽最佳对比对抑制高频交流铜耗效果显著。研究为提升扁线电机效率和热安全性提供了有效解决方案。

文献[17]提出了一种铜铝混合扁线绕组结构，通过将槽口处两层铜导体替换为铝包铜导体，有效降低了高频交流损耗，同时对直流损耗影响较小。建立了单槽交流损耗的解析模型，并采用有限元冻结磁导率法考虑永磁磁场影响，验证了

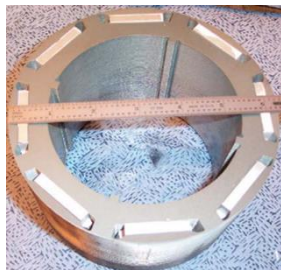
模型的准确性。计算结果表明,最高频率时整机交流损耗下降 16.3%,低频时与全铜扁线相当。

文献[18]通过对电动汽车用扁线绕组永磁同步电机的设计与优化研究,发现扁线绕组端部结构复杂、涡流损耗较大的情况。为此,给出了优化定子槽口拓扑、增加绕组层数、导体分股等抑制涡流损耗的举措,并借助有限元法证实了其有效性。同时,建立了电机损耗模型,计算了全域效率 Map 图,并在 CLTC-P 工况下对比了传统发卡绕组与槽口分股发卡绕组的效率特性,验证了分股绕组在实际工程应用中的合理性。

文献[19]研究了电动汽车用扁线永磁同步电机的损耗、冷却系统设计及温度场分析。设计了一台 40kW 扁线永磁同步电机,通过有限元仿真分析了其空载和负载性能,探究了转速、导体宽厚比及槽口宽度对交流铜耗的影响。优化设计了冷却系统,采用计算流体力学方法仿真温度场,结果表明扁线电机在额定和峰值工况下的温升低于圆线电机,冷却效果更优。

1.3 内置式永磁同步电机转子拓扑结构的国内外研究现状

现今内置式永磁同步电机已被大多新能源车企选用并作为驱动电机,这是因为永磁体内嵌到转子内部中使得电机的调速与过载能力更强^[20]。同时,内置式设计不仅能利用永磁转矩和磁阻转矩,提升电机的功率和转矩密度;而且永磁体位置可灵活设计,优化磁场分布,进一步提升性能;此外该设计在弱磁控制下表现更好,适合电动汽车宽转速范围的应用。国内外的汽车厂商相继研发了不同的内嵌式永磁体转子结构的永磁同步电机,自 1997 年以来,丰田公司逐步推出了四代普锐斯(Prius)新能源汽车,发布时间分别为 1997 年、2004 年、2010 年和 2015 年。这四代车型均使用了内置式永磁同步电机作为动力驱动装置,然而其永磁体转子设计经历了多次技术升级。最初的第一代采用了“一”字型布局,随后的第二代和第三代则优化为“V”字型设计,而到了第四代,结构进一步发展为“V+一”型组合^[21]。转子拓扑结构如图 1-4 所示,随着转子设计的持续优化,电机的功率密度得到了显著提升,从而推动了车辆整体性能的不断进步。



第一代转子



第二代转子



第三代转子



第四代转子

图 1-4 丰田 Prius 驱动电机转子结构演变图



图 1-5 特斯拉 V 型转子结构图

特斯拉车企从 2017 年开始在其部分驱动电机中采用转子 V 型结构，如图 1-5 所示，主要应用于 Model 3 和 Model Y。V 型结构提高了磁阻转矩，提升了电机效率，优化了磁场分布，增强了功率输出。比亚迪公司从 2021 年开始在其部分高端新能源汽车电机中采用双 V 型转子结构，如图 1-6 所示。小米汽车从 2023 年开始在其新能源汽车电机中采用双 V 型转子结构。双 V 型结构进一步优化磁场分布，减少谐波损耗，提高电机的功率密度和效率，延长续航里程；降低噪音和振动，改善电机运行平稳性，即优化 NVH 性能。



图 1-6 比亚迪双 V 型转子结构图

对于内置式永磁同步电机转子结构的研究除永磁体放置方式及尺寸优化、其层数和转子开辅助槽外，还主要集中于电机的宽转速范围内高效率、齿槽转矩、转矩脉动、永磁体用量等优化目标。

文献[22]研究了转子拓扑结构对内置式永磁同步电机（IPMSM）电磁性能及振动噪声的影响。以 8 极 48 槽电机为例，对比了单层和双层永磁体转子的有限元模型，分析了交直流电感、转矩波动、空载反电势及径向电磁力密度等参数。结果表明，在永磁体用量相同的情况下，双层永磁体转子结构在电磁特性和振动噪声表现上优于单层永磁体转子。

文献[23]研究了车用双 V 型内置式永磁同步电机的电磁设计与转矩性能优化。通过 Maxwell 有限元仿真分析了电机的静态和瞬态性能，验证了设计合理性。针对转矩性能优化，提出了一种新型辅助槽开槽方式，并采用粒子群算法联合仿真优化，有效降低了齿槽转矩和转矩脉动，提高了平均转矩。此外，设计了线性自抗扰电流环控制器，通过联合仿真验证了其提高电机转矩性能的可行性。

文献[24]研究了电动汽车用内置式永磁同步电机的电磁设计与振动噪声优化。通过有限元法验证了初步电磁设计的合理性，并优化了定子齿顶圆弧偏移距离和永磁体拓扑结构，有效降低了转矩脉动、径向电磁力和齿槽转矩。模态和谐

响应分析表明,优化后电机等效辐射功率级和声压级显著降低,振动噪声得到明显改善。

文献[25]提出了一种新型 ∇ +U 型三层转子结构,降低了永磁体加工难度和气隙磁密谐波含量。通过优化永磁体极弧系数和隔磁磁桥设计,提升了电机的高速运行能力和弱磁性能。研究表明, ∇ +U 型结构在降低铁芯损耗、永磁体涡流损耗和转矩脉动方面表现优异,且高效区更宽。最后,加工了 48kW 样机,对仿真结果的准确性予以了验证。

文献[26]通过分析电机运行原理和数学模型,优化了转子结构设计,利用 Maxwell 软件和遗传算法对 V 型、U 型、双 V 型等五种转子拓扑结构进行多目标优化。对比分析了优化后电机的空载特性、转矩特性、调速性能和效率分布,总结了各结构的适用场合。最终,制造了 V 型结构样机并通过实验验证了有限元优化仿真的准确性。

文献[27]系统研究了永磁同步电机的基本理论、定子绕组形式、转子磁极结构及优化设计。分析了电机运行原理、数学模型和控制策略,探讨了极对数、裂比及绕组形式对电机性能的影响,优化设计了五种典型转子磁极结构。针对一款 30kW 电动车用电机,提出了分数槽单双层混合绕组和 V 一型转子磁极结构的优化方案,验证了其在提升功率密度、减小体积和降低成本方面的有效性。

文献[28]设计了一台纯电动汽车用内置式永磁同步电机,并通过有限元分析和多目标优化解决了电机振动过大的问题。首先确定了电机性能参数和结构设计,利用 Ansys Maxwell 2D 进行有限元分析,发现反电势、转矩和齿槽转矩不满足要求。随后通过参数化建模和 EA 算法优化转子结构,结合转子斜极二次优化,显著降低了转矩脉动,提升了电机的运行平稳性。最后通过实验验证了优化结果的可靠性,振动加速度显著降低,转矩测试误差小于 5%。

文献[29]针对内置式永磁同步电机转矩脉动和振动噪声问题展开研究。通过有限元仿真分析了电机磁密谐波和径向电磁力分布,提出了定子齿顶圆弧偏移的减振结构设计,并结合响应曲面法和田口法进行多目标优化,优化了永磁体厚度、隔磁桥宽度等参数,提升了平均输出转矩并降低了转矩脉动。通过电磁振动和噪声谐响应分析,验证了优化方案有效减小了电机振动和噪声,改善了电机运行稳

定性和噪声性能。

文献[30]研究了一款 80kW 电动汽车用双 V 型永磁同步电动机,通过 ANSYS Maxwell 软件仿真其性能并与 V 型永磁同步电动机进行对比,验证了双 V 型结构在峰值扭矩和调速能力上的优势。采用 Taguchi 方法优化永磁体参数,结合响应面法优化隔磁桥设计,减少了漏磁并提升了峰值扭矩。最终设计方案通过实验验证,优化后的电机在输出转矩和效率上均满足设计要求,性能显著提升。

1.4 本文结构安排

本文致力于电动汽车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率优化。通过系统学习电机设计课程,深入研读国内外的文献,对永磁同步电机的设计理论、控制策略及效率优化方法进行了全面梳理。本文的主要研究内容如下:

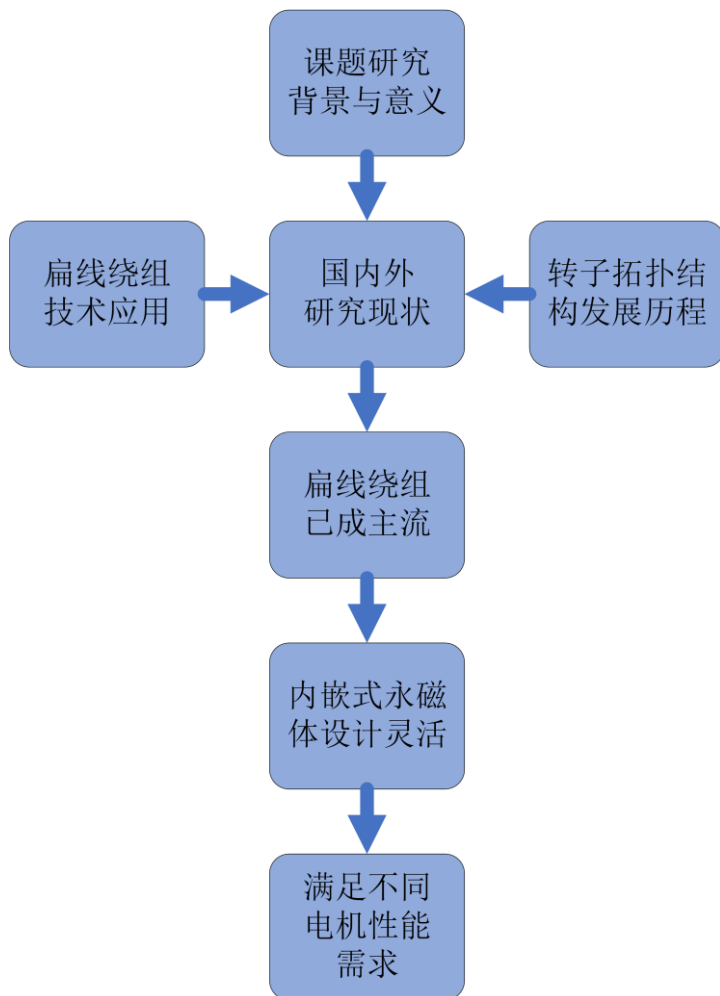


图 1-7 第一章内容顺序逻辑图

第1章：讲述了本课题的研究背景与意义，并对国内外的研究现状进行了归纳。分别介绍了扁线绕组技术的设计应用和转子拓扑结构的发展历程，发现扁线绕组已成为目前新能源车企主流选择，内嵌式永磁体放置方式灵活多变，可以满足不同车用驱动电机的性能需求。

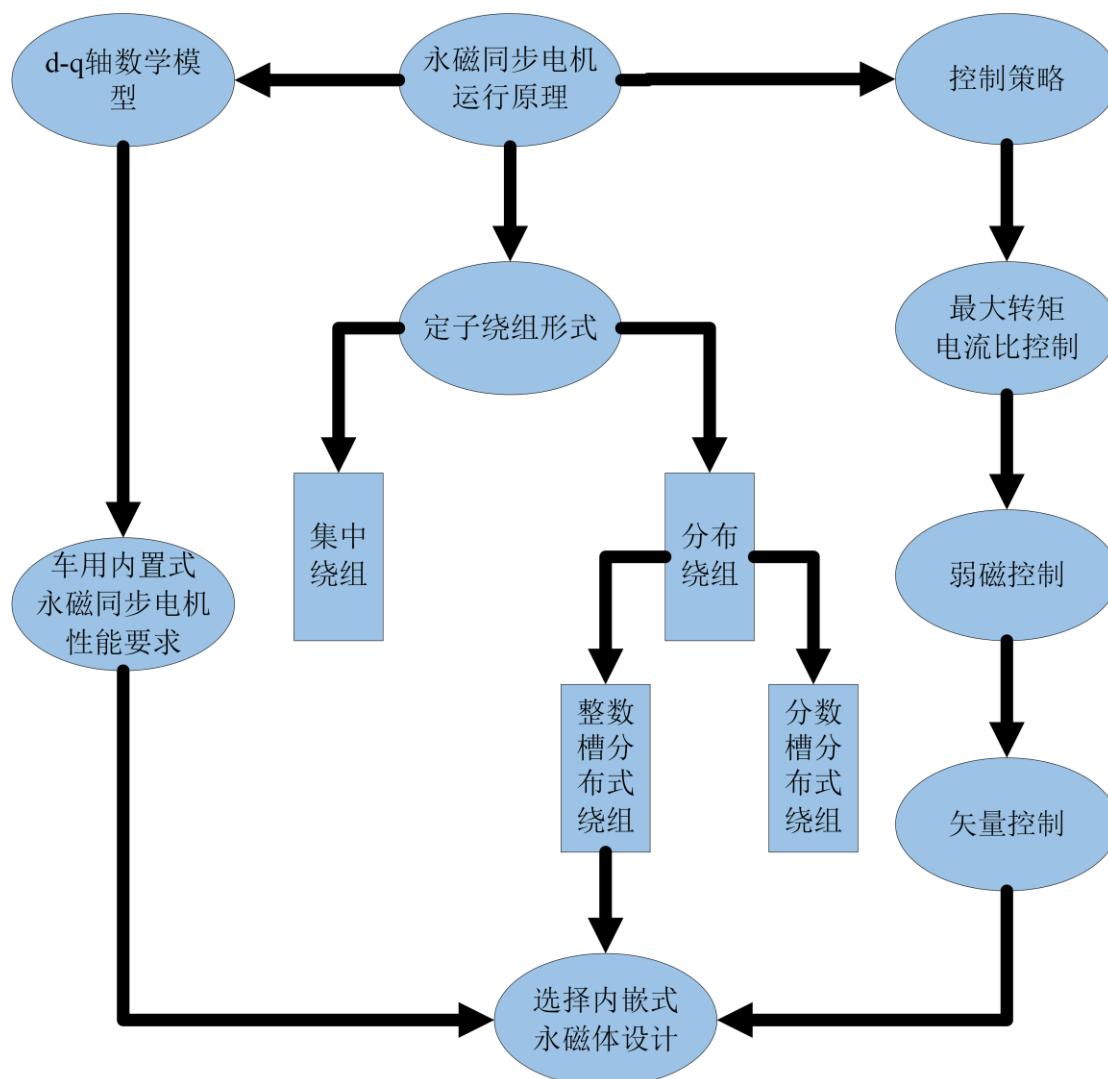


图 1-8 第二章逻辑结构图

第2章：如图1-8所示，首先介绍了车用内置式永磁同步电机的运行原理和定子绕组形式，重点对比整理了整数槽分布绕组和分数槽分布绕组在电机性能、制造工艺及成本等方面的优缺点。其次，详细地阐述了车载内置式永磁同步电机在 $d-q$ 轴坐标系下的数学模型及控制策略。结合当前新能源车用电机对低转矩脉动、宽转速范围内保持高效率和高响应速度的性能要求，最终确定采用内嵌式转子结构设计，以满足所设计电机在宽速域高效率 and 低转矩脉动性能指标的要求。

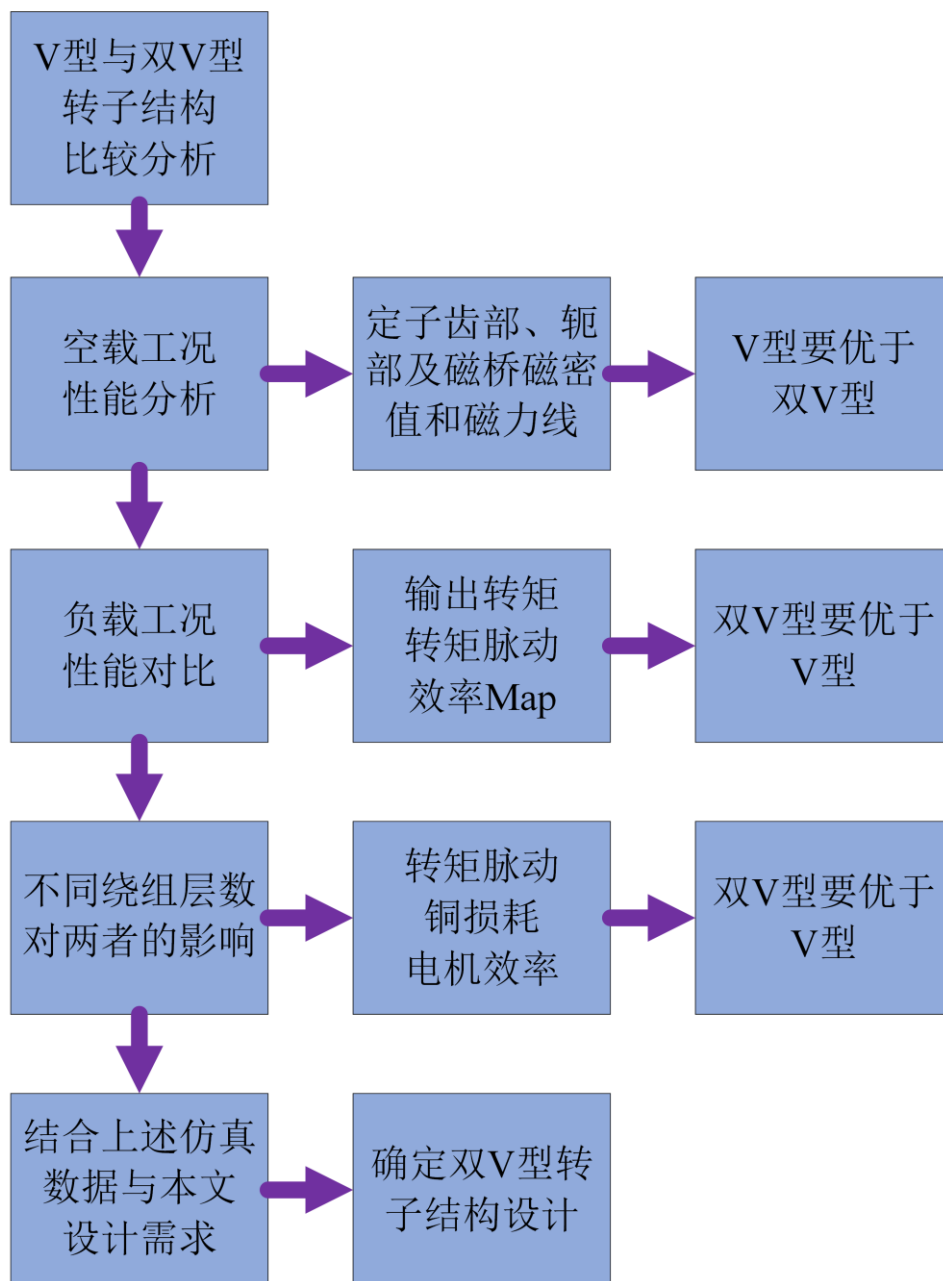


图 1-9 第三章选用双 V 型转子结构理由逻辑图

第 3 章：本章对 V 型、双 V 型两种主要的内置式永磁同步电机转子结构进行了系统的比较与分析。如图 1-9 所示，首先从空载和负载工况下分析两者的气隙磁密分布图和磁力线，揭示了其在电磁性能上的差异。其次从不同电流值、永磁体分段数和绕组层数研究了其对电机转矩脉动、损耗及效率的影响。最后，通过对比两者结构的电机效率 Map 图以及仿真数据结果，综合考虑多项性能指标后，确定双 V 型转子结构更适合满足所设计电机在宽速域高效率及低转矩脉动等方面的设计要求。

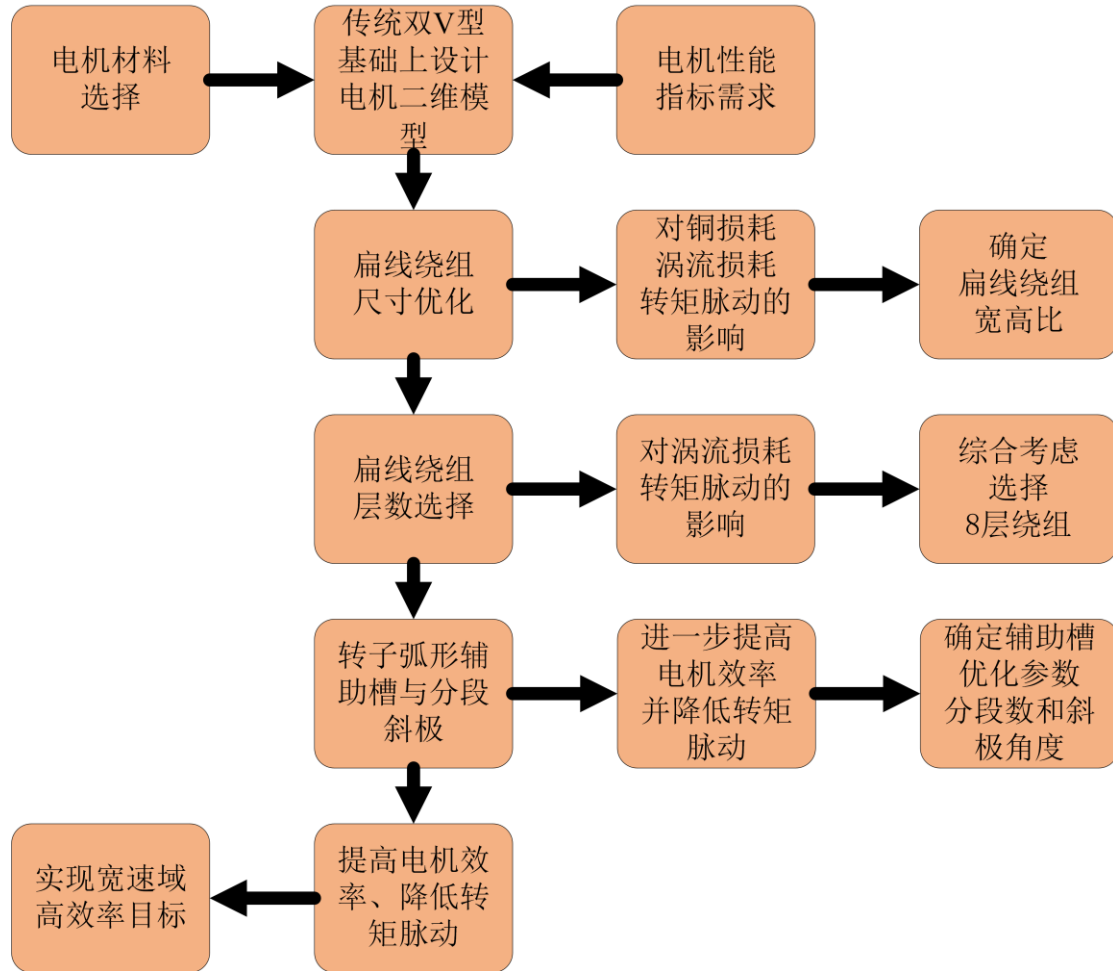


图 1-10 第四章工作安排逻辑结构图

第 4 章:依据本文确定的扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的设计指标,再将本文设计的双 V 型内置式永磁同步电机不断改进优化,并与传统双 V 型内置式永磁同步电机进行比较。先对定子部分的绕组尺寸和层数进行了优化,研究了其对铜损耗、涡流损耗、转矩脉动和电机效率的影响。转子表面辅助槽设计与分段斜极技术的协同优化,前者降低了齿槽转矩,改善了气隙磁密的正弦性,削弱了反电动势的谐波分量;后者显著降低了转矩脉动。通过电机模型的不断更新优化,电机性能逐步提升。

第 5 章:通过各电机模型优化前后的性能对比分析,如图 1-11 所示。先是输出转矩和转矩脉动的比较,虽电机的输出转矩略微减小但转矩脉动降至 1.55%,降低了 11.4%。在效率 Map 分析后,该电机在效率高于 96%的高效区间占比达 70.16%,较传统双层 V 型内置式永磁电机提升 2.3%,并能在宽广转速范围内保持高效率。

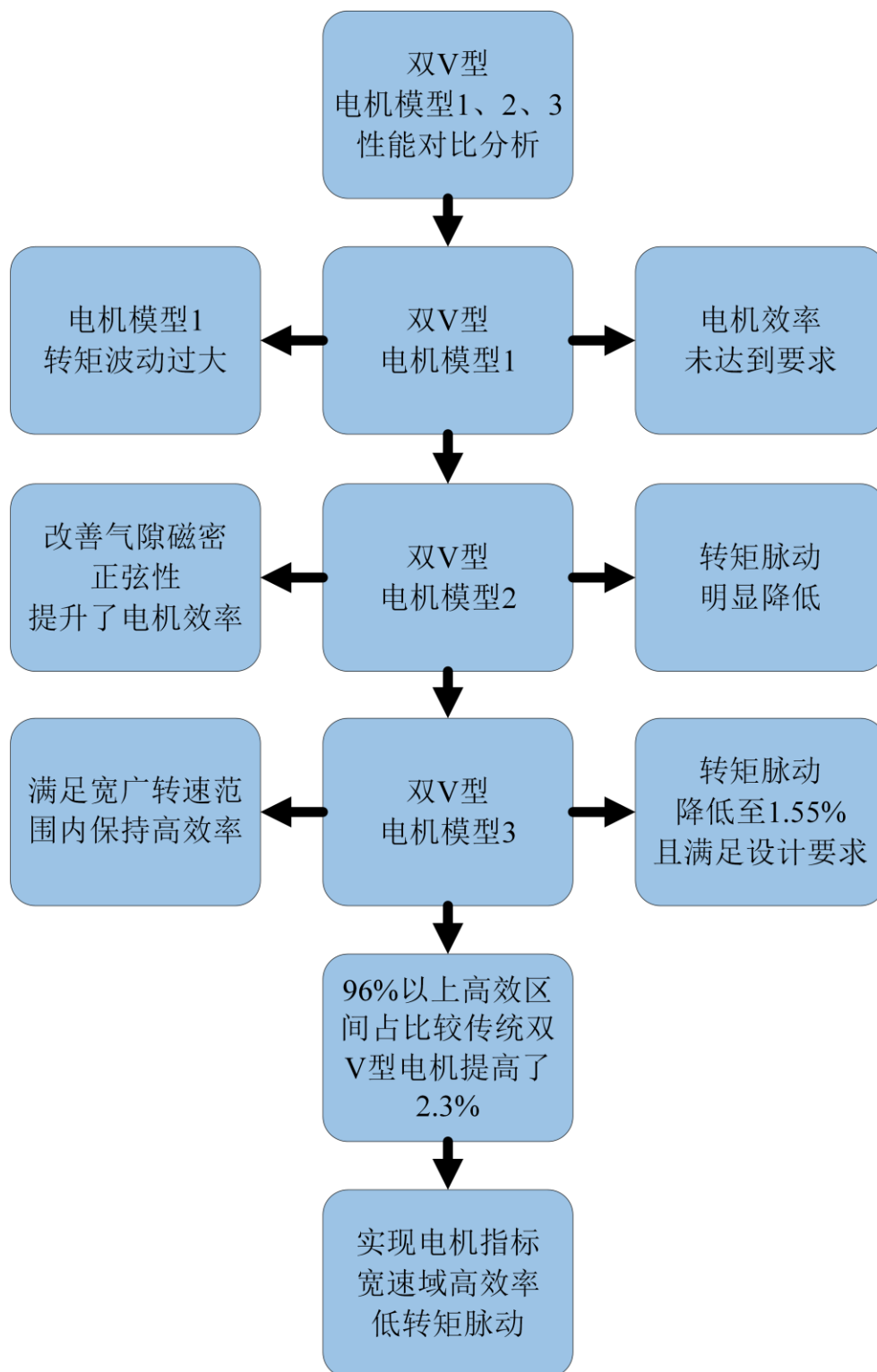


图 1-11 第五章三种电机模型性能分析顺序结构图

第 6 章：对全文进行了总结，并客观分析了研究中存在的局限性。在结论部分，重点指出了驱动电机效率优化、热管理以及成本控制等方面的研究不足，以及对未来新能源车用驱动电机可以继续深入的工作进行了展望。

第2章 车用永磁同步电机基本理论及设计基础

为了更好地设计与优化新能源车用电机，理解永磁同步电机的基本原理及其电磁参数的关系是电机设计与优化的关键。本章详细探讨了永磁同步电机的结构、运行机制、矢量关系与数学模型，并分析了常用的控制方法。此外，还介绍了一种考虑永磁磁链变化的交直轴电感计算方式。

2.1 内置式永磁同步电机的运行原理与定子绕组形式

电机是一种利用磁场实现机电能量转换的装置，其气隙磁场可通过电励磁或永磁体励磁两种方式产生。内置式永磁同步电机（IPMSM）的运行原理基于电磁相互作用和同步运行机制，内置式永磁同步电机的转子内部嵌入了永磁体，永磁体产生恒定的励磁磁场^[31]。当定子的三相绕组通入对称的三相交流电时，会在气隙中产生一个旋转磁场，其转速由电源频率和电机极对数决定；于是定子绕组产生的旋转磁场与转子永磁体产生的磁场在气隙中相互作用，由于磁场之间存在磁拉力，转子会试图跟随定子旋转磁场的运动，从而实现同步运行，即为同步转速。

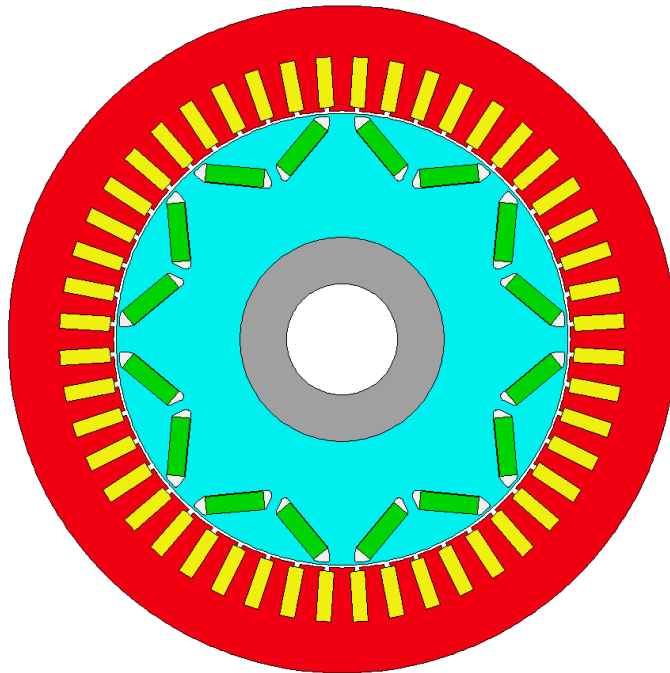


图 2-1 新能源车用内置式永磁同步电机结构图

内置式永磁同步电机的电磁转矩由两部分组成：永磁转矩和磁阻转矩。其中

磁阻转矩的产生是由于转子结构的凸极效应（d 轴和 q 轴磁路不对称），当定子磁场与转子磁场不完全对称时，此时会出现额外的转矩分量，即磁阻转矩^[32]。以一款新能源汽车内置式永磁同步电机为例，其定、转子结构如下图 2-1 所示。

集中绕组和分布绕组是电机定子绕组的两种主要形式，区别在于线圈的布置方式。集中绕组是将每个线圈绕在一个定子齿上，线圈之间不重叠；其主要应用于低功率、低成本、高速运行、空间受限以及对谐波要求不高的场合。分布绕组则是把每个线圈分布在多个定子齿上，线圈之间有重叠。其多应用于中高功率电机、新能源车辆、风力发电机、高精度伺服电机和航空电机的场景中。在新能源汽车驱动电机中，集中绕组和分布绕组的主要区别如表 2-1 所示。从表中可以看出，分布绕组更适用于高效率、低转矩脉动的新能源汽车行业中。

表 2-1 两种定子绕组形式优、劣势比较

对比项	集中绕组	分布绕组
电磁性能	谐波含量较高，磁动势波形较差	谐波含量较低，磁动势波形更接近正弦
转矩脉动	转矩脉动较大，可能导致噪声和振动	转矩脉动较小，运行更平稳
损耗	铁损较大，损耗相对较高	铁损较低，提高电机效率
绕组损耗	端部绕组较短，铜损较小	端部绕组较长，铜损较大
槽满率	高，绕组更紧凑，提高功率密度	相对较低，受槽结构限制
散热性能	铜损较小，散热要求较低	端部较长，散热可能较困难
制造成本	结构简单，造价低	工艺复杂，制造难度和造价较高

整数槽分布绕组的主要优势在于低转矩脉动、高效率、适合高速运行、电磁噪声低，特别适用于高效驱动电机、混动电机和高速电机。虽然分数槽分布绕组在扁线绕组与自动化生产的配合下，能进一步优化效率，未来可能成为定子绕组主流形式；但整数槽分布绕组在对稳定性、效率和高速性能要求较高的场景中依然具有不可替代的优势。

由表 2-2 可以得出，在某些电机性能方面，整数槽分布绕组和分数槽分布绕组这两者既有优势，也有各自的缺点。考虑到转矩脉动、稳定性和高效电机设计这三个性能指标，整数槽分布绕组明显优于分数槽分布绕组。

表 2-2 分布绕组的整数槽与分数槽对比

对比项	整数槽分布绕组（ISDW）	分数槽分布绕组（FSDW）
电磁噪声（NVH）	更低，噪声小	低，但略高于 ISDW
转矩脉动	更低，运行平稳	低，但仍高于 ISDW
功率密度	适中，但可优化设计提高	高，适用于紧凑型设计
槽满率	稍低（但可优化提高）	高（适合扁线绕组）
电机效率	在高速（>12000 rpm）时， 更高效率且更具优势	在低、中速，FSDW 因端部短、铜损低，效率更高，但 ISDW 也较接近。

2.2 车用内置式永磁同步电机的性能要求

本文所设计的内置式永磁同步电机专为电动汽车应用而研发。电动汽车的核心使命在于高效、平稳地载人或运输货物，并具备满足特定续航需求的能力。因此，电机不仅要提供稳定可靠的动力输出，还需适应各种复杂的道路与行驶工况，确保车辆在不同环境下均能保持优异的性能与驾驶体验。故以下为本文设计的内置式永磁同步电机性能要求：

- （1） 高功率密度与高效率，需要在有限的体积和重量下提供较高的功率输出（如 60kW 及以上）。需要高效率（通常>95%），以降低能耗并延长续航里程。
- （2） 宽广的工作速域与高扭矩输出，电机应具备较宽的速域，能够在低速时提供高扭矩输出，确保在城市起步和爬坡时具备充足的动力，同时在高速行驶时维持高功率输出。
- （3） 强大的可靠性与耐久性，电机设计必须满足长时间运行的可靠性要求，能够适应高温、高湿及频繁启停的工作环境，同时具备较长的使用寿命。

(4) 优化电磁设计与 NVH 性能, 采用优化的磁路设计, 降低铁损、铜损和涡流损耗, 提高电机效率。降低振动与噪声, 减少齿槽转矩脉动和电磁噪声, 提高驾乘舒适性。

(5) 出色的热管理与冷却能力, 电机应配备高效的冷却系统, 能够有效散热, 防止过热对性能造成影响, 从而保证在长时间高负荷运行下的稳定性与耐久性。

本文设计的内置式永磁同步电机用于电动汽车, 旨在实现高效、稳定的动力输出, 满足多样化路况与续航需求。电机需具备高功率密度、高效率、宽速域和高扭矩, 适应起步、爬坡及高速行驶, 并具备良好的可靠性与耐久性。为实现精确控制, 设计中需引入 d-q 轴数学模型与控制策略, 实现电流与转矩的解耦控制, 提升响应速度与运行效率。该模型为矢量控制、MTPA 和弱磁控制等高性能策略提供理论支撑, 有助于实现电机高效稳定运行。下面将从 d-q 轴数学模型和控制策略两个角度分析 IPMSM 的优势及选择原因。

2.2.1 内置式永磁同步电机的 d-q 轴数学模型

分析 d-q 轴数学模型是研究 IPMSM 电磁特性、控制策略和优化设计的基础, 一是通过 Park 变换, 将三相静止坐标系转换为 d-q 轴同步旋转坐标系, 将三相变量简化为直流量, 使电机控制更直观。二是在 d-q 坐标系下, 电机的电压方程、磁链方程和转矩方程都能以数学形式清晰表达, 为控制算法的实现提供理论基础^[33]。在同步旋转坐标系 d-q 轴下, IPMSM 的数学模型可由电压、磁链和转矩方程描述如下:

在同步旋转坐标系 d-q 轴下, 其定子绕组电压方程为:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad (2-1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \lambda_f \quad (2-2)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d-q 轴定子电压, R_s 为定子电阻, i_d 、 i_q 为 d-q 轴电流, L_d 、 L_q 为 d-q 轴电感, λ_f 为永磁体磁链, ω 为电机的同步角速度。

定子绕组的 d-q 轴磁链方程为：

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \quad (2-3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2-4)$$

其中：d 轴磁链 λ_d 由 d 轴电流 i_d 及永磁体磁链 λ_f 共同决定，q 轴磁链 λ_q 轴电流 i_q 及 q 轴电感 L_q 决定。由于内置式永磁体结构，d 轴磁链包含永磁体磁链项 λ_f ，这意味着 d 轴主要用于控制磁通，而 q 轴主要用于控制转矩输出；双 V 型结构影响了 d-q 轴电感，尤其使得 L_d 和 L_q 之差增大，提高了磁阻转矩的占比。

双 V 型 IPMSM 的电磁转矩由永磁转矩（由永磁体磁链产生）和磁阻转矩由 L_d-L_q 产生，其电磁转矩方程为：

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \quad (2-5)$$

式中： T_e 为电磁转矩， p 为极对数， $\lambda_f i_q$ 为永磁转矩， $(L_d - L_q) i_d i_q$ 为磁阻转矩。

由于双 V 结构提高了 $L_d - L_q$ 差值，因此磁阻转矩占比增大，使得双 V 型 IPMSM 具有更高的功率密度和弱磁能力。通过适当控制 i_d ，可以优化永磁转矩与磁阻转矩的配合，提高整体效率。

综上所述，我们可以得出双 V 型 IPMSM 磁阻转矩占比提高，这是因为 $L_d > L_q$ ，磁阻转矩贡献更大，提高了电机的功率密度和转矩输出能力。 L_d 增大后，弱磁控制时所需的 i_d 电流更小，使电机能在更高转速下高效运行，即增强了弱磁能力。低速时采用最大转矩/电流比控制（MTPA），充分利用磁阻转矩，提高效率；高速时采用弱磁控制（FWC），扩展最高车速。最后，双 V 结构减少了磁通泄漏，使磁链 λ_f 充分作用于 q 轴，提高整体效率，即提高永磁体利用率。

2.2.2 控制策略

内置式双 V 型永磁同步电机（Double-V IPMSM）结合最大转矩/电流比控制（MTPA）、弱磁控制（FWC）和矢量控制（FOC）三个控制策略的原因，主要是为了实现高效率、广泛的运行范围、平稳的转矩输出和快速响应能力，同时

克服电机设计中的磁场不对称性和复杂性。下面详细分析这三种控制策略在 Double-V IPMSM 中的作用，并通过公式来说明。

最大转矩/电流比控制策略的目的是在低速和中速运行区间使电机达到最大转矩输出，并同时保持最小的电流消耗^[34]。由于电机的转矩与电流成正比，因此最小电流消耗能有效减少电机的铜损（电阻损耗），提高效率。对于内置式双 V 型永磁同步电机，结合上式（2-5）要实现 MTPA 控制，必须通过选择合适的 i_d 和 i_q 的值来最优化电流比，从而在最小电流下获得最大转矩。MTPA 的最优条件是使得转矩输出对电流的依赖最小化。

在 MTPA 下， i_d 和 i_q 的关系可以通过对转矩方程进行优化得到：

$$i_d = \frac{-\lambda_f}{2(L_d - L_q)} \quad (2-6)$$

通过优化 i_d 和 i_q ，可以使得在电流一定的情况下，输出转矩最大，进而降低铜耗，提升电机效率。MTPA 控制能在低速工况下最大化电机的转矩输出，并最小化电流消耗，达到高效率运行，特别适用于电动车启动和加速的低速区。

弱磁控制策略的目的是在电机高速运行时，减少气隙磁通量 λ_f ，使电机的反电动势降低，从而扩展电机的最高转速，避免电机反电动势过大导致的过载，确保电机在高速下的稳定性。在高速运行时，电机的反电动势与转速成正比。为了提高电机的最高转速，需要减小 d 轴的电流（即弱磁），从而降低气隙磁通量。弱磁控制通过控制 d 轴电流 i_d 来实现^[35]。

新能源车用内置式永磁同步电机由逆变器供电，其端电压可以表示为：

$$u_s = \sqrt{(R_s i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_s i_q + \omega L_d i_d + \omega \lambda_f)^2} \quad (2-7)$$

设端电压 u_s 、电流 i_s 的极限值为 u_{lim} 、 i_{lim} ，忽略定子绕组压降可得：

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{lim} \quad (2-8)$$

$$u_s = \omega \sqrt{(L_d i_d + \lambda_f)^2 + (L_q i_q)^2} \leq u_{lim} \quad (2-9)$$

由式 (2-9) 可知, 电机的端电压与转速成正比, 在端电压值达到额定电压值后, 想继续提高转速需要通过弱磁控制来实现。电机的转速 r 、 $r_{\max}$ 分别为:

$$r = \frac{u_{\lim}}{p \sqrt{(L_d i_d + \lambda_f)^2 + (L_q i_q)^2}} \quad (2-10)$$

$$r_{\max} = \frac{u_{\lim}}{p (\lambda_f - L_d i_{\lim})} \quad (2-11)$$

由式 (2-10) 和式 (2-11) 可以看出, 若要提高电机的弱磁调速能力, 可通过增大直轴电感 L_d 或减小永磁体磁链 λ_f 实现。

结合上述公式 (2-5), 弱磁控制的核心思想是当转速增大时, 通过调节 i_d 为负值, 以降低转子气隙磁通量 λ_f , 进而减小反电动势, 扩展电机的高速运行范围。根据电机反电动势的公式:

$$E = k_e \cdot \omega_r \cdot \lambda_f \quad (2-12)$$

式中: k_e 是电机常数, ω_r 是电机转速, λ_f 是永磁体的磁链。当 i_d 为负值时, 磁链 λ_f 会减小, 那么反电动势 E 会降低, 使电机可以达到更高的转速。特别是在电动汽车高速行驶时, 弱磁控制可以有效扩展电机的转速范围, 电机可以在不超出逆变器电压范围的情况下达到更高的车速, 提升电动汽车的性能。

矢量控制 (或称为磁场定向控制, FOC) 是一种解耦控制技术, 用于将电机的转矩和磁通量控制相互独立。通过矢量控制, 可以让电机像直流电机一样工作, 简化控制难度, 提高动态响应和稳定性。在矢量控制中, 电机的 d 轴和 q 轴电流 i_d 和 i_q 被独立控制^[36]。转矩和磁链 ψ_f 分别通过 d 轴和 q 轴电流来控制, 其关系如下所示:

$$T_e = p [\psi_f i_d + i_d i_q (L_d - L_q)] \quad (2-13)$$

通过解耦控制, 可以分别调节 i_d 和 i_q , 使得 i_d 控制磁链, 避免产生过多的磁链损耗; i_q 控制转矩, 优化输出转矩。

矢量控制通过实时监控转速和负载情况，解耦控制使得系统能够独立调节 i_d 和 i_q ，并进行快速响应，从而优化转矩输出并提高电机效率。可以将电机的控制问题分解为两个独立的控制问题： i_d 控制磁链和 i_q 控制转矩，大大简化了控制算法，提高了电机响应速度和稳定性。使电机的动态性能、起动和加速性能更好，并确保电机在变化的工作条件下保持高效稳定。

2.3 转子结构选择内嵌式永磁体设计

在内置式永磁同步电机（IPMSM）中，转子采用内嵌式永磁体结构是为了优化电机的性能、提高运行效率，并实现精确控制。结合上述的 d-q 轴数学模型和控制策略，以下将详细分析内嵌式永磁体设计的选用理由及在电机性能提升中的关键作用。

1. 内嵌式永磁体设计的原理：内嵌式永磁同步电机（IPMSM）的转子结构设计中，永磁体嵌入到转子铁心内部，而不是附着在转子表面。内嵌式设计相比表面式永磁体（SPMSM）有着更为复杂的磁场分布，且能有效改善电机的性能。这种设计可以有效减少外部磁场干扰、减小高频损耗并优化磁场的稳定性。

2. 基于 d-q 轴数学模型的内嵌式永磁体设计分析：对于内嵌式永磁同步电机，d 轴和 q 轴的磁链分布和电流响应会受到转子永磁体设计的影响。d 轴磁链：内嵌式永磁体的磁场方向与 d 轴对齐，因此永磁体对 d 轴的磁链贡献更为显著。在这种设计下，永磁体能提供较稳定的磁场，减少由气隙磁阻变化引起的磁链波动，使得电机的 d 轴磁链保持较高的稳定性，有助于精确控制电流。q 轴磁链：q 轴的磁场则与转速方向垂直，主要负责产生电机的转矩。内嵌式永磁体通过均匀的磁场分布，使得 q 轴的磁链分布更均匀，有助于提升电机转矩的平稳性，特别是在低速高负载时，内嵌式设计可以减少由于高转速下磁场不均匀引发的噪声和振动。

3. 基于控制策略的内嵌式永磁体结构分析：矢量控制（FOC）：矢量控制通过解耦控制电机的 d 轴电流和 q 轴电流，使得转矩控制和磁场定向控制相互独立，能高效地调节电机的转矩和速度。内嵌式永磁体设计有助于提高 d 轴和 q 轴

磁链的稳定性,优化电机在低速、高负载下的性能表现。直接转矩控制(DTC): DTC 通过直接控制电机的转矩和磁通,提供比矢量控制更快速的动态响应。内嵌式设计的永磁体能够保证在转速变化时电机的转矩输出更为平稳,提高 DTC 控制策略下的效率和响应速度。

4. 内嵌式永磁体的自身优势:一是转矩密度的提高。由于永磁体的磁场在转子内部,电机的气隙磁阻较低,磁通的穿透能力更强,能够在相同体积下产生更大的转矩。二是减少谐波影响。与表面式永磁体设计相比,内嵌式设计能有效减少由永磁体的表面形状引起的磁场不均匀性,从而减少谐波的产生。三是改善高转速性能。由于永磁体被嵌入转子内部,电机的表面不再暴露出强烈的磁场,使得电机在高速运行时不会产生较大外部磁场干扰或磁力不均匀的问题,提高了转速响应能力。四是增强热管理能力。转子铁芯的散热性能较好,有助于提高电机的热管理能力。与表面式永磁体相比,内嵌式设计能够更有效地避免由于表面永磁体因高温而发生退磁现象。

2.4 本章小结

本章主要介绍了新能源车用内置式永磁同步电机的运行原理,并详细分析了两种绕组形式的优缺点。在此基础上,确定了定子结构采用扁线绕组与整数槽分布绕组的方案。此外,本章还讲解了现今国内外车企对电动汽车用内置式永磁同步电机性能方面的要求,并从电机的 $d-q$ 轴数学模型以及控制策略的角度展开的,深入分析了内嵌式永磁体的转子结构设计。通过对该结构的优势进行系统分析,最终将其确立为转子设计方案。

第 3 章 V 型与双 V 型永磁同步电机性能及损耗分析

在第 2 章的基础上，确定采用内置式永磁体的转子设计方案。目前，众多国内外车企普遍采用 V 型、双 V 型这两种转子设计，因此，在保证其它条件相同的情况下，本章对这两种转子设计方案进行了建模，并通过仿真数据对比分析，评估哪种方案更符合本项目的设计思路，并能够满足电机的性能指标。通过这一分析，我们最终得出最佳的转子设计方案，以确保电机在不同工况下具备良好的性能表现。

3.1 电机性能分析及对比

V 型与双 V 型内置式永磁同步电机的电磁性能比较，旨在帮助设计者全面评估这两种转子设计在不同工况下的表现，涵盖转矩输出、效率、热管理、噪声控制、制造成本等多个关键指标^[37-40]。通过对这两种设计的深入比较，能够更清晰地了解各自的优势与局限，从而做出最合适的选择，以确保电动汽车在电机性能、可靠性、效率和舒适性方面达到最佳平衡。

3.1.1 空载性能分析

比较 V 型和双 V 型内置式永磁同步电机的空载磁密分布，主要是为了评估磁场利用率、优化磁路设计、减少铁耗和温升，以及验证设计方案的合理性。永磁同步电机的定子齿部、定子轭部及磁桥区域的磁通密度分布对电机的整体性能具有显著影响力。定子齿部作为绕组的承载部位，其磁密不宜过高，否则可能导致齿部铁损加剧与局部饱和现象，从而对电机效率与性能产生负面影响。定子轭部作为连接各个定子齿的过渡区，其磁密亦应控制在适宜范围内，以防止过度饱和及由此引发的额外损耗。磁桥作为永磁体磁通传输的通道，其磁密值的设定需兼顾电机的整体性能与材料利用率。设计时既要考虑磁通的有效传递，又要确保结构的稳定性。

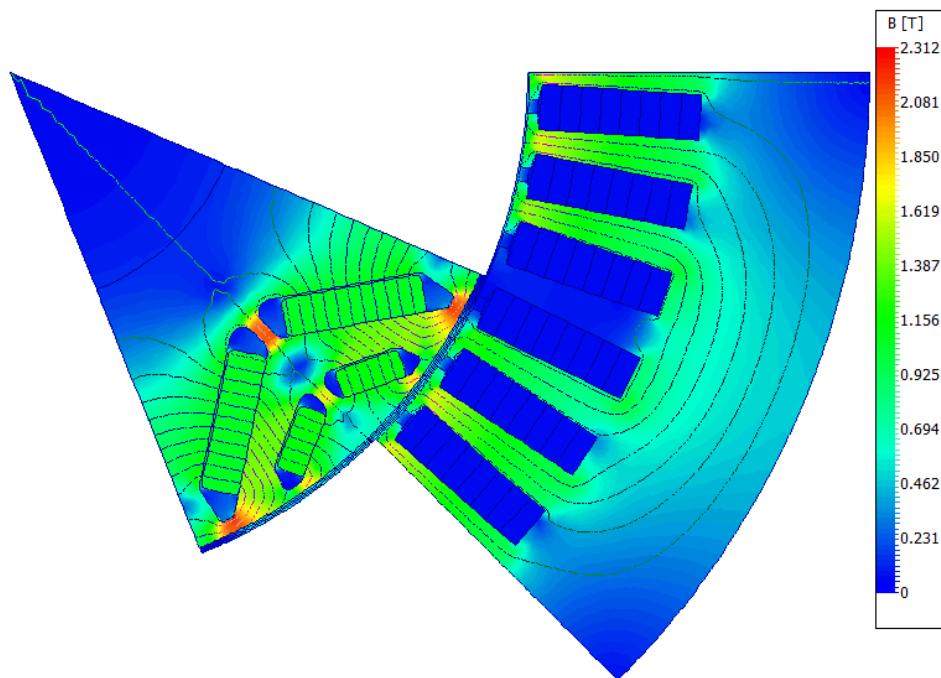


图 3-1 双 V 型电机空载磁密分布图

在电机空载状态下，双 V 型内置式永磁同步电机磁密分布的仿真结果如图 3-1 所示。可以看出，其定子齿部与轭部的磁通密度均不高且在适宜范围内，磁桥磁密设计是一个关键参数，直接影响电机的性能、效率和可靠性。一般设计在 1.5T 到 2.2T 之间较为合适，图中显示其数值在 2.05T 左右。

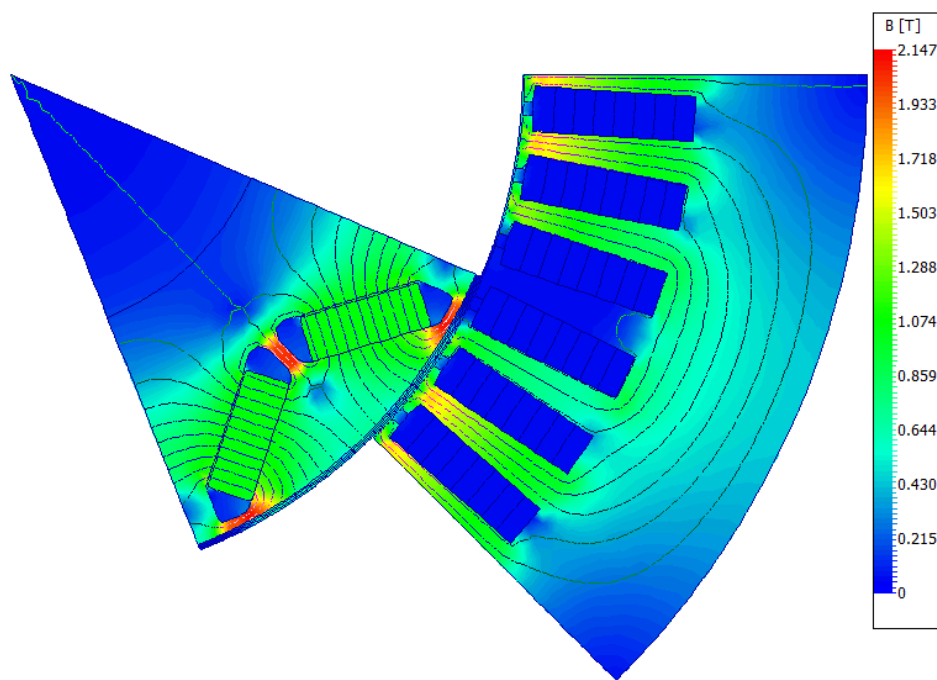


图 3-2 V 型电机空载磁密分布图

V 型内置式永磁同步电机磁密分布仿真结果如图 3-2 所示。从仿真数据可以

看出，其定子齿部与轭部的磁密强度分别为 1.56T、0.64T，同时磁桥区域磁密达到 2.14T。相比之下，双 V 型转子设计的定子齿部和轭部磁密强度分别为 1.33T、0.61T，其磁密值均高于双 V 型转子设计。

根据上述两种转子设计仿真数据，V 型设计要优于双 V 型设计。但 V 型设计的磁桥磁密达到 2.14T，接近或超过硅钢片的饱和磁密（通常为 2.0T~2.2T），不仅导致局部磁路饱和，增加温升。而且较高的磁密也会导致定子齿部和轭部的铁耗增加，特别是在高频或高速运行时，这会影响电机的效率。双 V 型转子设计的磁力线分布更加均匀，特别是在高速或高负载条件下，这将有助于减少铁耗和温升进而具有更高的效率。

3.1.2 负载性能分析

在新能源汽车中，输出转矩之所以如此重要。其一，直接影响车辆的加速性能。较大的输出转矩能够使汽车在短时间内迅速提升速度，满足用户对于快速起步和超车的需求。其二，决定了车辆的爬坡能力。在面对陡峭的坡度，强大的输出转矩能确保车辆顺利爬坡。其三，关乎车辆的负载能力。在运送货物或搭载乘客，能够承受更多的重量和负荷。在相同输入功率情况下，两种转子设计的输出转矩对比如图 3-3 所示：

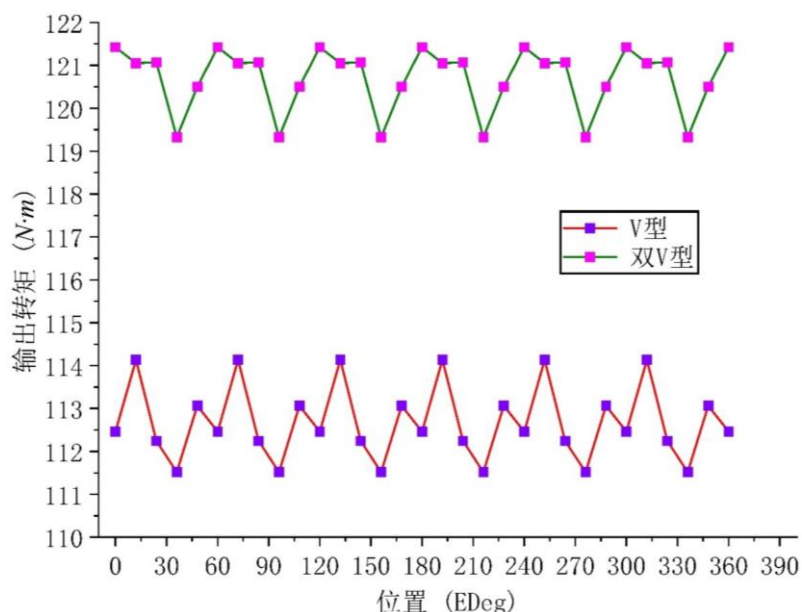


图 3-3 V 型、双 V 型电机输出转矩比较

从图中可以看出，双 V 型的输出转矩明显高于 V 型。这是因为双 V 型电机的磁路结构相对更为复杂，在磁路设计更具有优势，能够更有效地利用磁场，从而在一定程度上提高电机的输出转矩能力。同时，利用如下的计算公式可计算出两者的转矩脉动，其转矩脉动公式为：

$$T_r = \frac{T_{\max} - T_{\text{avg}}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中： T_r 为转矩脉动， $T_{\max}$ 为输出转矩最大值， T_{avg} 为输出转矩平均值。图 3-3 中转子均采用分段斜极设计，分段数为 3，斜极角度为 6°；计算得出 V 型转矩脉动为 2.316%，但双 V 型仅为 1.748%。

通过转矩性能的仿真分析表明，双 V 型转子结构在输出转矩和转矩脉动两方面均显著优于传统 V 型结构。使电机的运行平稳性和控制精度得到进一步提升。

低转矩脉动是一项重要的性能指标，较大的转矩脉动会导致车辆在行驶过程中产生抖动，会影响车辆的驾驶舒适性。不稳定的转矩输出会使车辆在加速、减速和转向等操作时难以精确控制，进而影响车辆的操控性能。此外，低转矩脉动有助于提高电机的效率^[41]。使电机在更优化的工作点运行，减少能量损耗，延长车辆的续航里程。上节仅分析了三段斜极方案，接下来将从不同分段数和斜极角度充分考虑两种转子结构所对应的转矩脉动。如下图 3-4 所示。

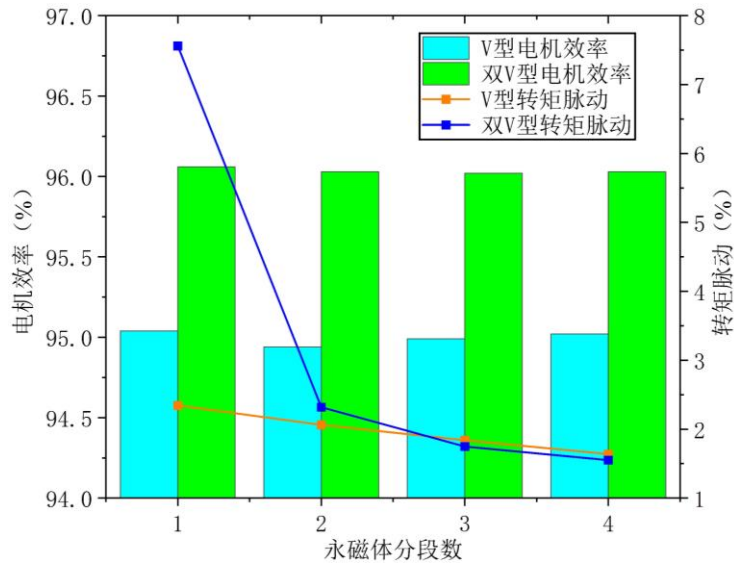


图 3-4 V 型、双 V 型电机的转矩脉动与效率对比图

从图 3-4 中可以观察到,随着分段数的增加,V 型和双 V 型电机的转矩脉动均呈现持续下降趋势,这与转子分段斜极理论的分析结果一致。通过仿真对比进一步发现,在分段数为 3 和 4 时,双 V 型转子结构的转矩脉动均低于 V 型转子设计,且其数值处于较为理想的水平。此外,再从电机效率的角度来看,无论分段数如何变化,双 V 型结构的电机效率始终高于 V 型结构,其效率提升范围在 1.06%至 1.14%之间。

3.2 电机损耗及效率 Map 分析对比

电机损耗直接影响电机效率,比较两种结构在负载下的损耗有助于评估其能效,选择更节能的设计^[42]。在不考虑机械损耗的情况下,比较的电机损耗通常包括以下三个方面:

1. 铁芯损耗:涵盖磁滞损耗以及涡流损耗,此二者与电机铁芯所用材料、磁场变化的频率等存在关联。
2. 绕组铜损耗:当电流流经电机绕组时形成的电阻性损耗,其和电流的大小以及绕组电阻紧密相关。
3. 永磁体涡流损耗:因磁场发生变化于永磁体内部产生涡流导致的损耗。

V 型、双 V 型两种内置式永磁同步电机的定子绕组均采用扁线绕组设计。为探究绕组层数对电机性能的影响,决定采取改变绕组层数的方式,对两种电机的性能及效率进行仿真对比分析。基于仿真数据的综合评估,进一步判断出哪种转子结构设计在性能与效率方面更具优势。

不同结构的损耗特性影响控制策略,了解这些差异有助于优化控制算法,提升动态响应和稳定性,指导控制策略优化。

通过电机效率 Map 图的仿真对比,可以更清晰、直观地分析出 V 型和双 V 型转子结构在不同转速和负载工况下的效率分布情况。通过对比两种转子结构在宽广转速范围内的效率变化趋势,可以深入了解其不同工况下的能效特性,从而更准确地评估两种设计在宽速域下的效率表现。这种对比为判断哪种转子结构更符合宽速域高效率需求提供了重要依据。

3.2.1 电机损耗仿真分析

在直流母线电压为 400V，永磁体分段数选择 3 和斜极角度为 6 的条件下，对 V 型和双 V 型内置式永磁同步电机进行了仿真分析。两种电机均采用 8 极 48 槽的定子结构，通过调节定子绕组电流有效值的大小，系统研究了电机铁芯损耗、绕组铜耗、永磁体总损耗和电机效率这四个关键性能参数的变换规律。

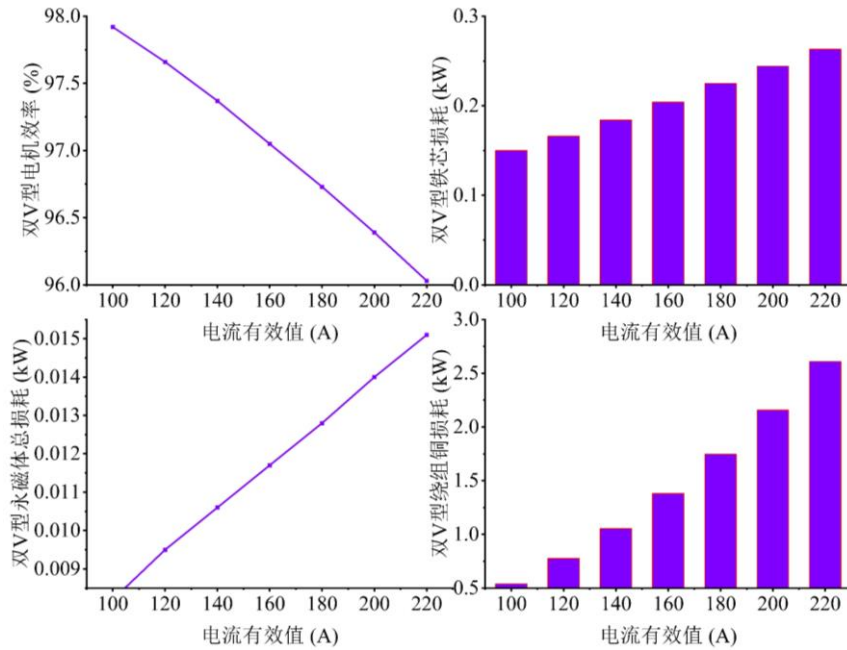


图 3-5 双 V 型转子设计在不同电流值下的电机损耗及效率分析

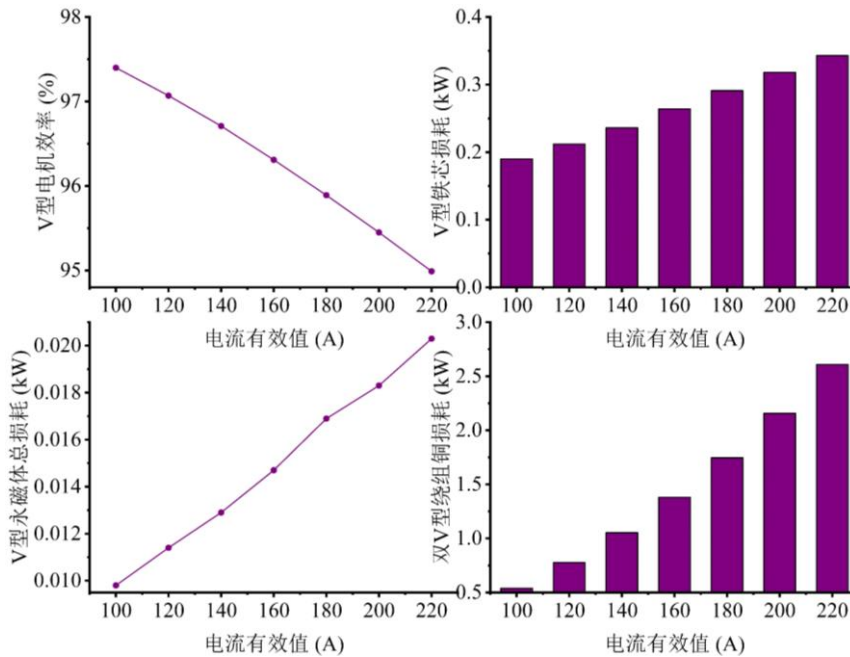


图 3-6 单 V 型转子设计在不同电流值下的电机损耗及效率分析

由图 3-5 和图 3-6 可以得出,随着电流值的逐步增大,双 V 型转子结构设计的各项性能参数均优于 V 型转子结构。第一,V 型转子结构的铁芯损耗比双 V 型高出 27%至 30%;第二,V 型转子结构的绕组铜损耗比双 V 型高出 8.0%至 8.2%;第三,V 型转子结构的永磁体总损耗比双 V 型也要高出 19.5%至 34.4%;最后,双 V 型转子结构的电机效率比 V 型高出 0.53%至 1.1%。综上所述,双 V 型转子结构在铁芯损耗、绕组铜损耗、永磁体损耗以及电机效率方面均表现出较为明显的优势,进一步验证了其设计的优越性。

扁线绕组层数对内置式永磁同步电机的绕组铜耗、铁芯损耗、转矩脉动和电机效率这些性能参数影响最为显著^[43]。为探究绕组层数对不同转子结构电机性能的影响差异,以 V 型和双 V 型两种转子结构为对象,通过对比分析绕组层数变化对其性能参数的影响程度,进一步评估两种转子结构对绕组层数变化的敏感度,从而确定哪种转子结构在绕组层数变化时性能波动最小,鲁棒性更强。

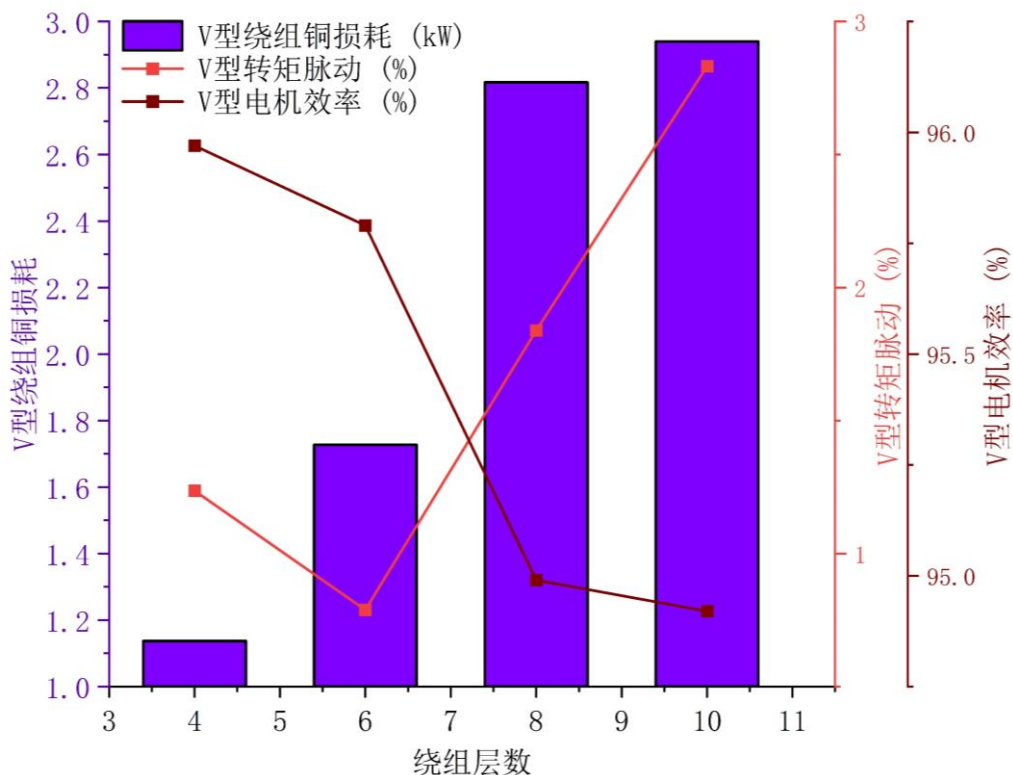


图 3-7 绕组层数对 V 型电机的转矩脉动、铜损耗和效率的影响

从图 3-7 可以得出,对于 V 型转子结构的内置式永磁同步电机,随着绕组层数的增加,其铜损耗逐渐升高。虽多层绕组可以提高槽满率,但同时也增加了导体的总长度和接触电阻,导致铜损耗显著上升。转矩脉动则呈现先减小后增大的

趋势：在绕组层数较少时，增加层数可以优化气隙磁场的分布，减少磁场谐波，从而降低转矩脉动；当绕组层数过多时，磁场分布可能因绕组排列过于复杂而变得不均匀，导致气隙磁场谐波增加，进而加剧转矩脉动。电机效率逐渐下降，多层绕组虽然可以提高功率密度，但其带来的铜损耗和铁损耗的增加往往超过功率密度的提升效果，最终导致整体效率下降。

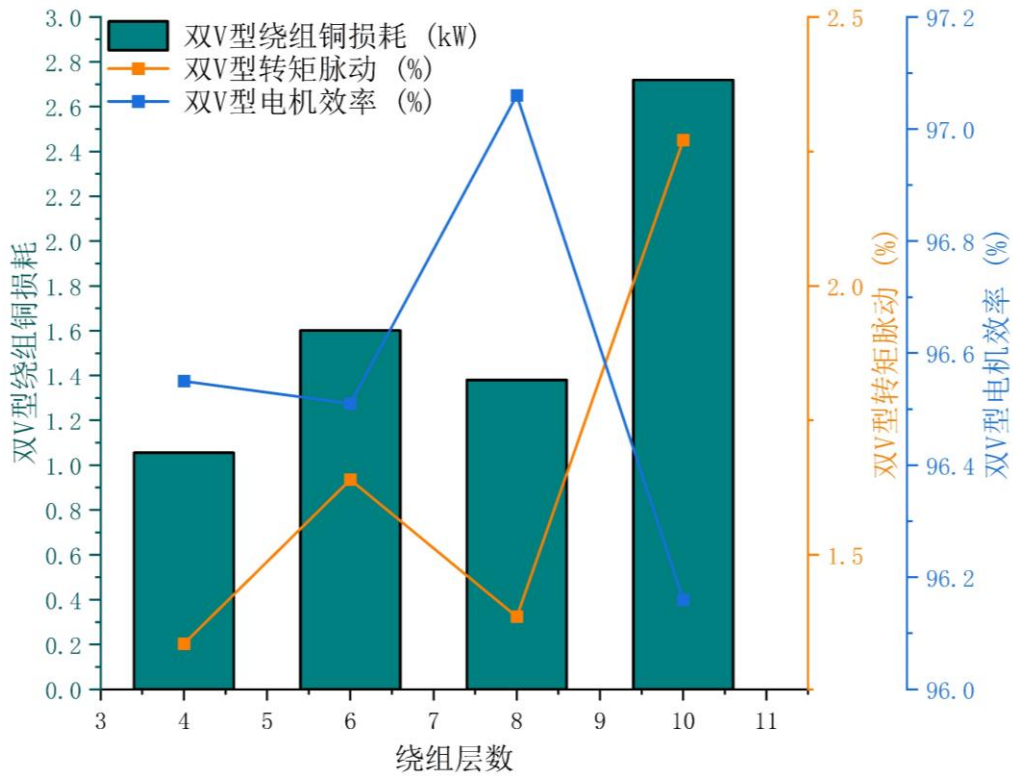


图 3-8 绕组层数对 V 型电机的转矩脉动、铜损耗和效率的影响

从图 3-8 可以看出，对于双 V 型转子结构的内置式永磁同步电机来说，随着绕组层数的改变，其绕组铜损耗和转矩脉动先增大后减小再增大，电机效率先减小后增大再急剧减小。绕组层数较少时，单层匝数少，导体长度短，电阻小，铜损低。但绕组分布不均，磁动势畸变严重，转矩脉动大，影响电机稳定性，额外损耗增加，效率较低。适当增加层数可提高填充率，缓解电阻增长，提高铜利用率，降低铜损，同时优化磁链分布，减少转矩脉动，提升运行稳定性和效率。层数过多时，绝缘层增多，槽满率接近极限，散热性能下降，电阻显著上升，导致铜损再次增大。同时，等效电感增大，使电流响应变慢，转矩脉动回升，焦耳损耗加剧，最终效率急剧下降。

通过比较发现，无论扁线层数如何变化，双 V 型转子电机的效率均高于 V

型电机，提升幅度为 0.60%至 1.28%。相比之下，V 型电机的铜损耗和铁芯损耗分别比双 V 型高出 7.77%至 8.13%和 27.8%至 30.4%。在转矩脉动方面，当绕组层数为 4 层和 6 层时，双 V 型转子设计的转矩脉动均高于 V 型转子设计；但当绕组层数为 8 层和 10 层时，双 V 型的转矩脉动均低于 V 型。不过，双 V 型转子电机在绕组层数为 8 时表现最佳，既达到了最高效率，转矩脉动也仅为 1.385%。综合评估，双 V 型转子结构设计要优于 V 型转子。

3.2.2 电机效率 Map 图仿真分析

新能源汽车在低速、中速和高速工况下的效率区间具有重要研究意义，电机需在不同的工作点和转速范围内保持高效运行^[44]。电机的工作效率与其设计结构密切相关，因此，通过对比 V 型与双 V 型的电机效率 Map 表现，如图 3-9 和图 3-10 所示。可以帮助我们了解其在实际工作中的性能差异。

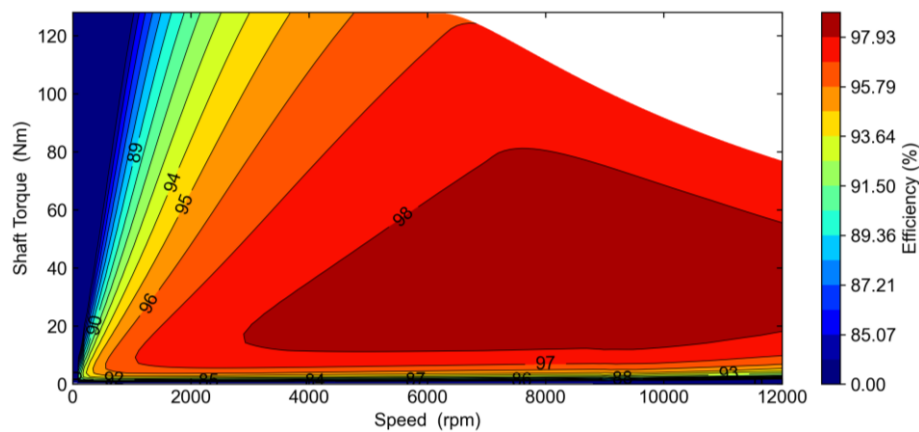


图 3-9 双 V 型转子结构的电机效率 Map

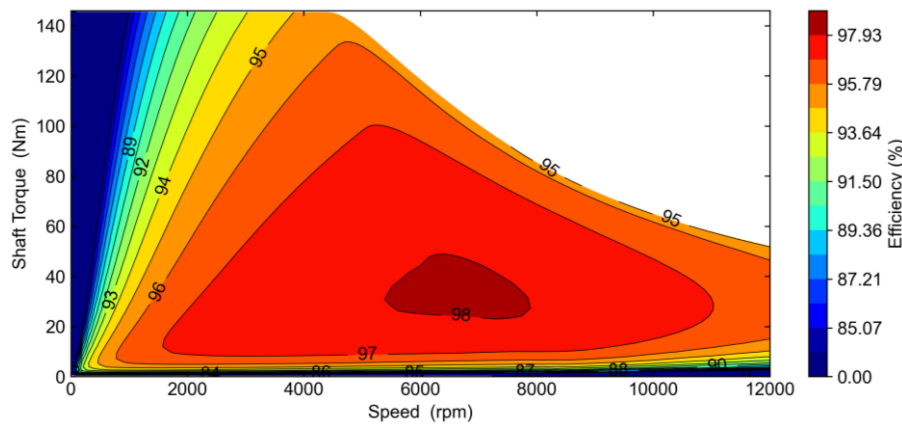


图 3-10 V 型转子结构的电机效率 Map

通过图 3-9 和图 3-10 可以明显看出，在宽广的转速范围内，双 V 型电机所

对应的效率要高于 V 型电机。在直流母线电压、电流密度和扁线绕组尺寸相同的条件下,采用 V 型的转子结构的电机,效率在 96%以上的工作点占比为 62.95%,而采用双 V 型转子设计的电机,效率在 96%以上的工作点占比为 74.72%,较 V 型电机提升了 18.70%。这表明双 V 型电机在宽转速范围内具有更高的效率优势。

3.3 电机设计需求与仿真数据对比确定双 V 型转子设计

结合小型 V 型内置式电动汽车用驱动电机性能参数,本文设计的扁线绕组双层 V 型内置式永磁同步电机设计需求如下表所示。

根据表 3-1 的电机设计需求,再结合 V 型和双 V 型两种转子结构的仿真数据对比。从气隙磁密云图、负载工况下的输出转矩、转矩脉动、绕组铜损耗、铁芯损耗和宽转速范围内效率等方面进行综合性能分析,结果表明双 V 型转子结构在各项性能指标上均优于 V 型转子。

表 3-1 本文设计内置式永磁同步电机的性能需求

参数	小型 V 型电机	本文设计目标	备注
电机类型	内置式永磁同步电机	扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机	采用扁线绕组和双层 V 型结构,优化功率密度和效率。
额定功率	55kW	60kW	提升功率输出,满足更高性能需求。
峰值扭矩	180N·m	200N·m	提高扭矩输出,增强低速加速性能。
效率 96% 以上	占比 65%	占比 75%	通过优化设计,提升宽转速范围内的高效工作点占比。
转矩脉动	较低	进一步降低	采用双层 V 型结构和辅助槽设计,显著降低转矩脉动。
转速范围	宽转速范围	更宽的转速范围	优化设计以适应更广泛的转速区间,提升高速性能。
功率密度	适中	更高	通过扁线绕组和优化磁路设计,提高功率密度。
适用场景	城市短途	城市及高速	兼顾城市驾驶经济性和高速性能,满足多样化需求。

尽管双 V 型转子在工艺复杂度上有所增加,但其在效率、损耗和宽转速范围内高效率方面的提升,能够更好地满足新能源汽车对高效率、低损耗和高稳定性的需求。因此,本文设计的扁线绕组双层 V 型内置式永磁同步电机采用双 V

型转子结构，以实现更优的综合性能。

3.4 本章小结

为了得出 V 型、双 V 型转子设计对内置式永磁同步电机性能的影响，首先对两者的空载气隙磁密云图进行了分析。结果表明，双 V 型电机的磁力线分布更为均匀，有助于减少铁芯损耗和温升，从而提升电机效率。其次，进一步分析了两者的输出转矩、不同永磁体分段数下的电机效率、转矩脉动情况，此外，还考察了不同电流值对绕组铜损耗、铁芯损耗、永磁体总损耗以及电机效率的影响，并分析了绕组层数对转矩脉动、电机效率和绕组铜损耗的影响。通过对比 V 型和双 V 型电机的效率 Map 图，研究显示，在宽广的转速范围内，双 V 型具有更高的效率优势。最后，结合本文设计的扁线绕组双层 V 型内置式永磁同步电机的设计需求与 V 型、双 V 型两种转子结构的仿真数据对比，综合考虑后选择采用双 V 型转子结构作为内置式永磁同步电机的设计方案。

第 4 章 车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率优化

新能源车用内置式永磁同步电机在近年来的高速发展中,推动了电动汽车技术的持续进步。随着双 V 型转子结构的广泛应用,电机在高效能和动力性能方面取得了显著提升。然而,在宽转速范围内,如何同时保证高效率 and 低转矩脉动仍然是一个亟待解决的问题^[45-49]。为了优化这一问题,设计了一种基于扁线绕组的双层 V 型永磁体内置式永磁同步电机。

4.1 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的设计指标

4.1.1 电机性能指标与结构参数

为了适应电动汽车对空间的严格要求,我们对电机的定子和转子尺寸参数进行了优化调整。通过合理修改电机的尺寸设计,最大化利用有限的空间,同时确保电机的性能和效率达到最佳状态。电机的主要性能指标和结构参数数据已更新,具体内容如下表 4-1 所示。

表 4-1 电机性能指标与结构参数

性能指标	数值	结构参数	数值
额定功率/kW	60	定子外径/mm	180
额定转速/(r/min)	5500	定子外径/mm	108.8
额定转矩/(N·m)	105	极数/槽数	8/48
转矩脉动/%	<3	铁芯长度/mm	100
效率/%	96	气隙长度/mm	0.8

本文设计的内置式永磁同步电机借鉴了小型 V 型车用永磁同步电机的技术优势。其具备高效率、低能量损耗的特点,有助于提升整车续航能力。同时,其高度集成化设计不仅占用空间小、重量轻,还优化了整车布局。此外,该电机在低速与高速区间均能保持较高效率,兼顾城市通勤与高速行驶的需求。此基础上,本设计采用扁线绕组技术,以提高铜线填充率、降低损耗并增强散热性能^[50]。进一步优化方向包括减少转矩脉动,以提升运行平稳性,同时在更宽的转速范围内

提高电机效率，从而增强整体性能。

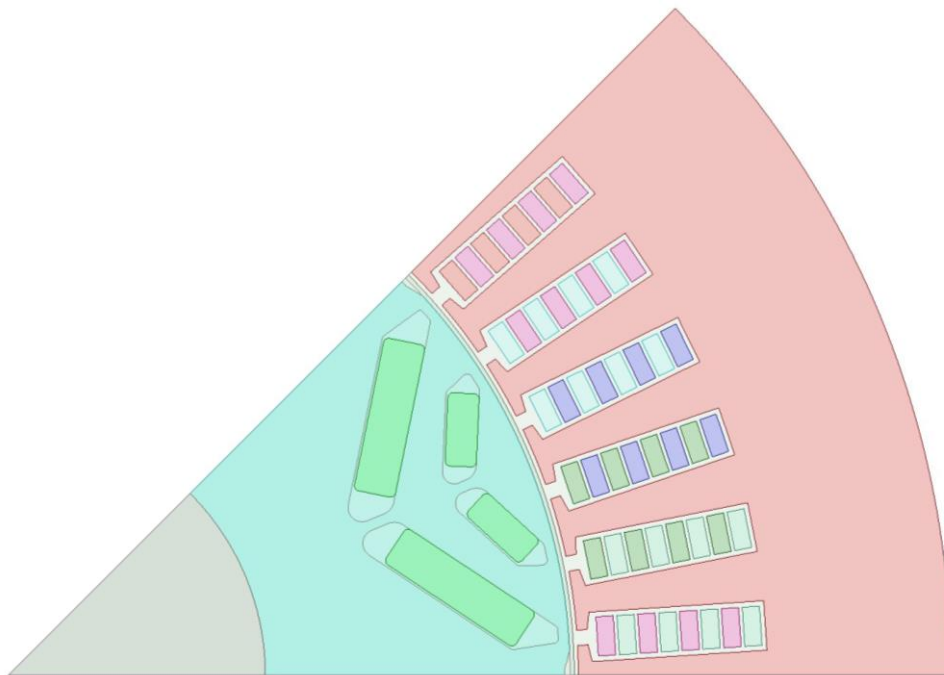


图 4-1 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机二维模型

本文设计的二维 Maxwell 内置式永磁同步电机模型如图 4-1 所示。定子绕组采用扁线绕组，主要具有两个优势：一是能够在相同的空间内填充更多的导体，从而提升电机的功率输出，达到更高的功率密度；二是有助于优化气隙磁场分布，降低谐波成分，从而提高电机的运行平稳性和精度。

此外，转子采用内置双层 V 型结构，可有效降低转矩脉动，提升电机在不同工况下的平稳性。该设计通过优化磁场分布，减少了转矩波动，并扩展了电机的调速范围，使其在宽转速范围内保持高效率。

4.1.2 电机材料的选择

参考当前主流电动汽车用内置式永磁同步电机的材料选择，并结合本文电机设计的性能需求。本文电机选用的材料如下表 4-2 所示。通过选用钕铁硼永磁体、低损耗硅钢片、铜扁线绕组以及铝合金结构材料等，该电机在材料选择上充分考虑了高性能、轻量化、散热效率以及成本效益等因素，同时，聚酰亚胺绝缘材料和混合陶瓷轴承的选用进一步提升了电机的高温可靠性和耐久性，以满足电动汽车对高效率、高功率密度和高可靠性的要求。

表 4-2 本文电机材料选择

部件	选用材料	特性	选择原因
永磁体	钕铁硼/N42UH	高磁能积、高矫顽力，提供强磁场	满足高功率密度和高效率需求。
定子铁芯	无取向硅钢片/M250-35A	磁导率高、铁损低	降低铁损，提高电机效率。
转子铁芯	无取向硅钢片/M250-35A	磁导率高、铁损低	与定子铁芯材料一致，确保磁路一致。
绝缘材料	聚酰亚胺/Kapton	耐高温、绝缘性能优异，机械强度高	确保扁线绕组在高频和高功率下的绝缘可靠性。
外壳和端盖	铝合金/6063-T5	轻量化、强度高、散热性好	减轻电机重量，提升散热效率。
轴承	混合陶瓷/Si3N4	耐高温、寿命长	适应电机高速运转和高温环境。
绕组	铜扁线/C1100	导电性好、电阻低、损耗小，填充率高	提升槽满率，适合高功率应用。
冷却管道	铝合金/6061-T6	散热性好、重量轻	优化散热设计，成本适中。

4.2 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的定子优化

在传统双 V 型内置式永磁同步电机的基础上，优化定子设计以提升整体性能。定子采用矩形槽结构，并合理设定齿宽尺寸，以改善电磁性能和机械强度。引入扁线绕组，相较于传统圆线绕组，具备更高的导体填充率，可降低绕组电阻，减少铜损，提高效率^[50-52]。同时，其紧密排列结构增强散热能力，降低温升，提升电机的可靠性和寿命。此外，该设计优化电磁特性，减少漏磁损耗，使磁通分布更均匀，从而降低转矩脉动，提升运行平稳性。综合而言，结合扁线绕组的双 V 型电机在功率密度、效率及稳定性方面均表现优异，适用于高性能新能源汽车应用^[53-55]。

4.2.1 扁线绕组尺寸优化

内置式永磁同步电机定子损耗通常包括铜损耗和铁芯损耗。其中铜损耗 P_{cu} 是由绕组电阻产生的能量损耗，电阻大小跟导体的截面积成反比；故扁线绕组截面积应尽可能大些，但也要考虑到定子槽型的大小。

$$p_{cu} = K_{cu} I^2 R \quad (4-1)$$

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (4-2)$$

式中： K_{cu} 是铜损耗系数； I 是绕组线电流； R 是绕组电阻； ρ 是铜的电阻率； L 是绕组长度； S 是绕组截面积。

铁心损耗中的总涡流损耗包括定子绕组中的涡流损耗 P_w 和定子铁芯中的涡流损耗 P_{core} 。前者是集肤效应与邻近效应使得电流主要沿导体表面流动，导体中心电流密度低；导体电阻变大并产生环流，即增加了涡流损耗。

$$P_w = K_e f^2 B_w d_w^2 V_w \quad (4-3)$$

式中： K_e 是涡流损耗系数； f 是电机工作频率； B_w 是绕组中的最大磁通密度； d_w 是扁线绕组高度； V_w 是扁线绕组体积。

$$V_w = n l S \quad (4-4)$$

其中扁线绕组体积 V_w 是由导线层数 n 、长度 l 和单根扁线的截面积 S 三者相乘而来的。

后者是铁芯中的涡流损耗。这个涡流来源是复杂的，但定子绕组中的电流是其中一个重要因素。利用式(4-5)麦克斯韦方程解释了电流的分布决定了涡流强度。假设绕组电流为 I ，磁场强度 H 在铁芯中的幅值如式(4-6)所示。

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ J = \sigma E \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\begin{cases} H = \frac{I}{w_c} \\ \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} \end{cases} \quad (4-6)$$

式中： J 为涡流密度； μ 为导磁率； σ 为电导率； ω 为角频率； δ 为趋肤深度。当 $\delta < h_c$ 时，电流主要集中在导体表面，导致磁场变化剧烈，从而增加了涡流损耗^[56]。综上所述，所以要精确的优化扁线绕组的尺寸。

为深入研究扁线绕组尺寸对绕组涡流损耗的影响，如图 4-2 所示。本文引入一个关键参数——扁线绕组横截面中宽度 w_c 与高度 h_c 的比值，称之为绕组宽高比。

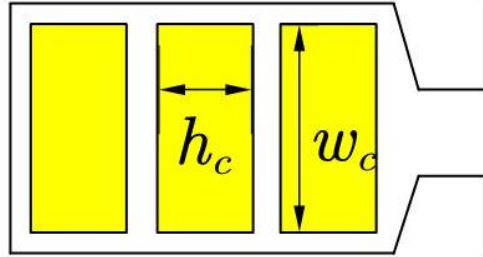


图 4-2 扁线绕组结构示意图

在改变绕组宽度与高度时，保持槽满率恒定，并且确保扁线和槽绝缘厚度不变，即定子槽宽和槽深随宽高比变化。该方法在确保绕组填充一致性和槽绝缘稳定性的同时，可单独分析宽高比对涡流损耗的影响，为扁线绕组设计提供了更精确的指导依据。

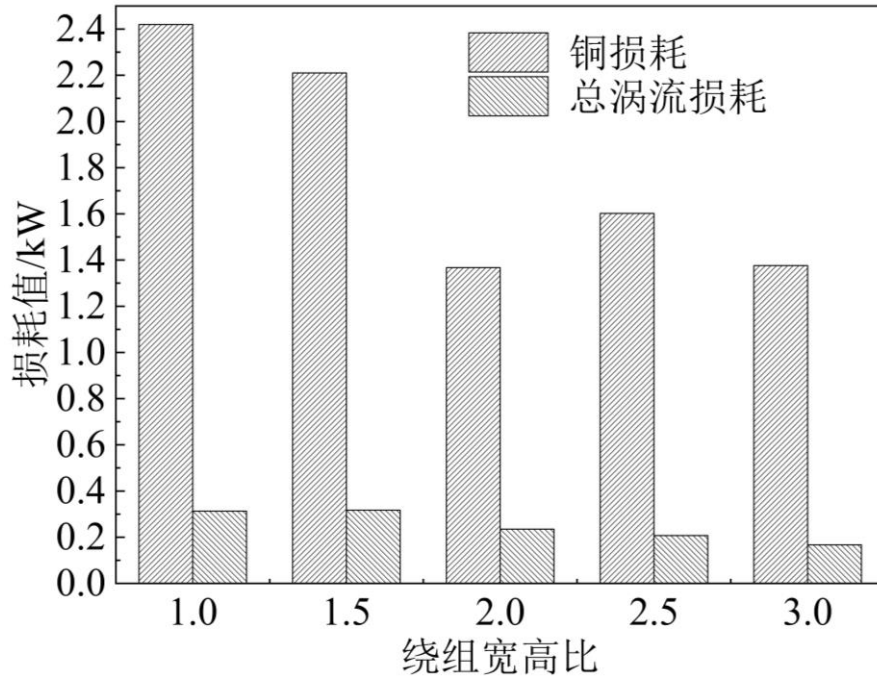


图 4-3 扁线宽高比对铜损耗和涡流损耗的影响

图 4-3 显示，随着宽高比增加，导线展平使槽满率提升，电流路径优化，导线总电阻减小，铜损耗逐渐降低。然而，当宽高比达到约 2.5 时，绕组尺寸引起

电流密度增大，导致铜损耗略有上升。涡流损耗则随导线厚度减小而显著降低，因为内部环流被有效抑制。

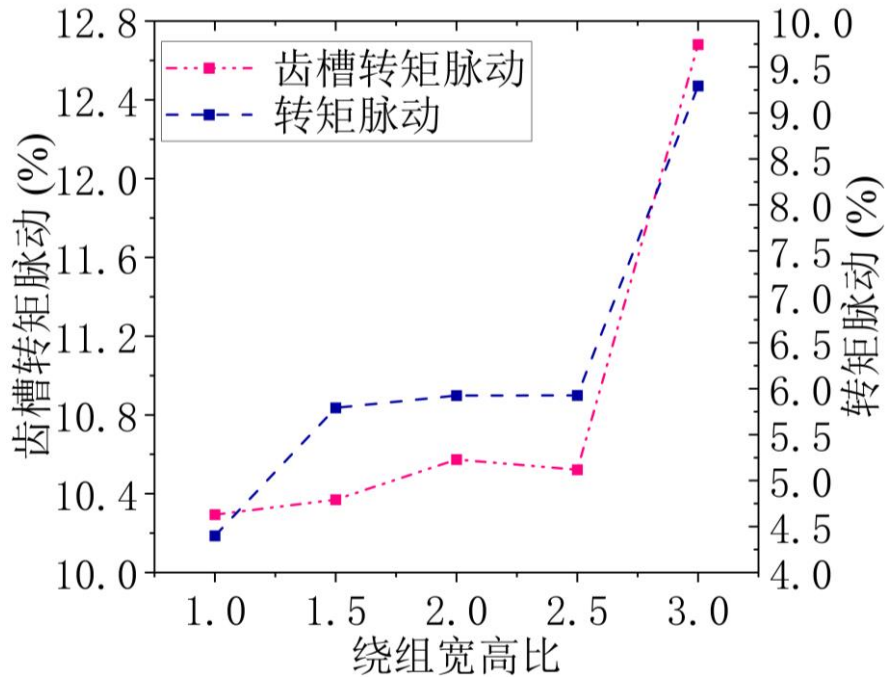


图 4-4 绕组宽高比对转矩脉动的影响

如图 4-4 所示，当绕组宽高比在 1.5 至 2.5 之间时，齿槽转矩脉动和转矩脉动变化较小，且在可接受范围内。但宽高比过大，导体展平导致槽内磁通分布不均，局部磁密波动增大，产生更多空间谐波，与转子磁场作用后显著提高齿槽转矩和转矩脉动。故选择宽高比为 2.0 最为合适。

鉴于对制造工艺难度和综合性能的衡量，扁线绕组的宽度选择 3.75mm，其高度为 1.65mm。即扁线绕组截面积为 6.2mm^2 。

4.2.2 定子绕组层数的选择

在内置式永磁同步电机的设计中，绕组层数的选择对电机性能具有重要影响。奇数层绕组结构由于其固有的不对称性，会导致磁场分布不对称，增加谐波分量，影响运行平稳性和效率，并带来额外的转矩脉动和噪声^[57-59]。相比之下，偶数层绕组可避免这些问题，并在制造工艺上更便于布线和连接，提高生产效率，降低制造难度。

因此，在永磁同步电机的设计中，采用偶数层绕组结构是一种更为优化的选

择。这种选择不仅能够提升电机的电磁性能,还能简化制造工艺,提高生产效益,是一种兼顾性能与制造可行性的设计方案。

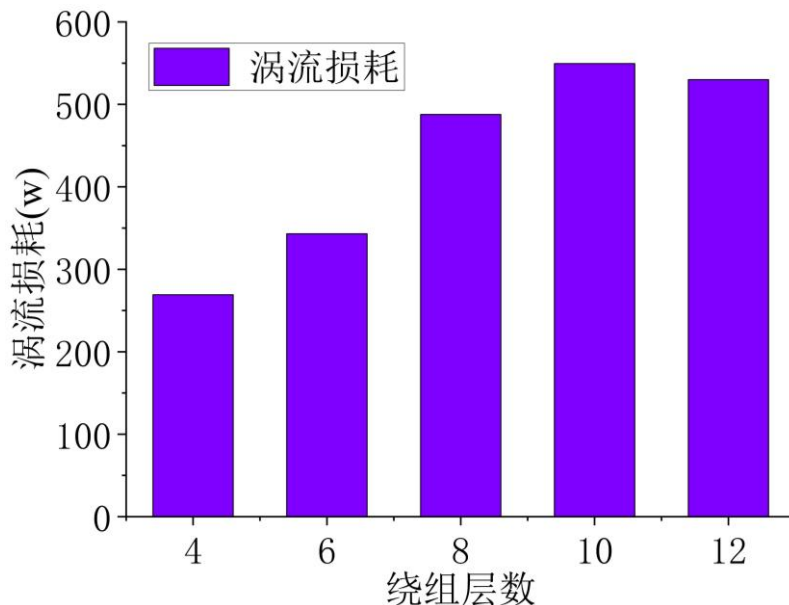


图 4-5 绕组层数对涡流损耗的影响

图 4-5 所示为相同输入功率情况下,绕组层数改变对总涡流损耗的关系。在扁线绕组层数初期增加时,导体间接触面积扩大,涡流回路增多,导致涡流损耗增强。随着层数进一步增加,绕组结构更复杂,各层间磁场相互作用抵消增强,同时电流分布更均匀,涡流密度降低。此外,层数增加提高了绕组的等效电阻,抑制了涡流流动。因此,涡流损耗在达到一定层数后开始减少。

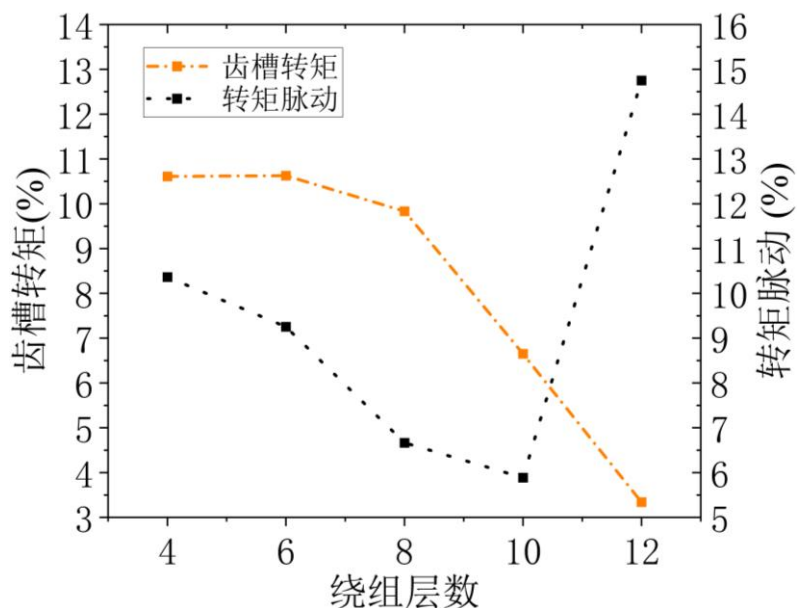


图 4-6 绕组层数对转矩脉动和齿槽转矩的影响

由图 4-6 可以看出,随着扁线绕组层数增加,转矩脉动起初减小而后增大,

而齿槽转矩一直降低。初期,层数增加使绕组分布更均匀,磁场趋于理想,谐波减少,转矩脉动降低。但层数过多时,绕组互感差异和电磁干扰增强,磁场不均匀,谐波上升,导致转矩脉动增大。同时,绕组层数增加增强了对磁场的调制作用,削弱齿槽效应,从而减少齿槽转矩脉动。

综合考虑宽速域内高效率 and 转矩脉动两项性能指标,以及电机尺寸和生产成本的影响,最终确定采用 8 层绕组设计。并将该设计方案的模型记为电机 1。

4.3 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机的转子优化

近年来,随着定子扁线绕组技术的成熟与广泛应用,电机设计在工艺约束下趋于稳定。受成本控制及生产线改造限制的影响,国内外企业普遍保持电机主要尺寸、定子结构及关键材料的不变,尤其是在电机尺寸方面,并未进行大幅调整。

在这一背景下,尽管定子结构的创新空间有限,但转子结构设计仍具较大灵活性。为了在保持电机尺寸不变、定子结构难以突破的前提下进一步优化性能,分段斜极与开辅助槽设计相继被提出并成功应用,为电机性能提升提供了新的思路。

4.3.1 转子表面辅助槽的设计与优化

本文在转子表面相邻永磁体之间开弧形辅助槽,结构如图 4-7 所示。对于永磁同步电机来说,通常期望气隙磁场呈正弦波形分布;空载反电动势接近正弦波,以提升电机性能。因此,为实现气隙磁场优化目的,削弱反电动势谐波分量;进而提升效率、降低转矩脉动^[60,61]。故在电机 1 的基础上引入辅助槽的构想。

转子表面开设弧形辅助槽的约束条件主要包括工艺和电磁性能两方面。一是工艺约束:辅助槽深度 A 受转子冲片叠压工艺限制,过深会降低机械强度;弧长 B 和 C 的尺寸需保证相邻永磁体间磁桥宽度不小于 1.2mm,以避免磁路局部饱和。二是电磁性能约束:需满足空载反电动势 THD 小于 5%且输出转矩不低于 120N·m 的设计指标。此外,辅助槽的引入应有助于降低转矩脉动和谐波含量,同时提升气隙磁密正弦性和电机效率^[62-66]。

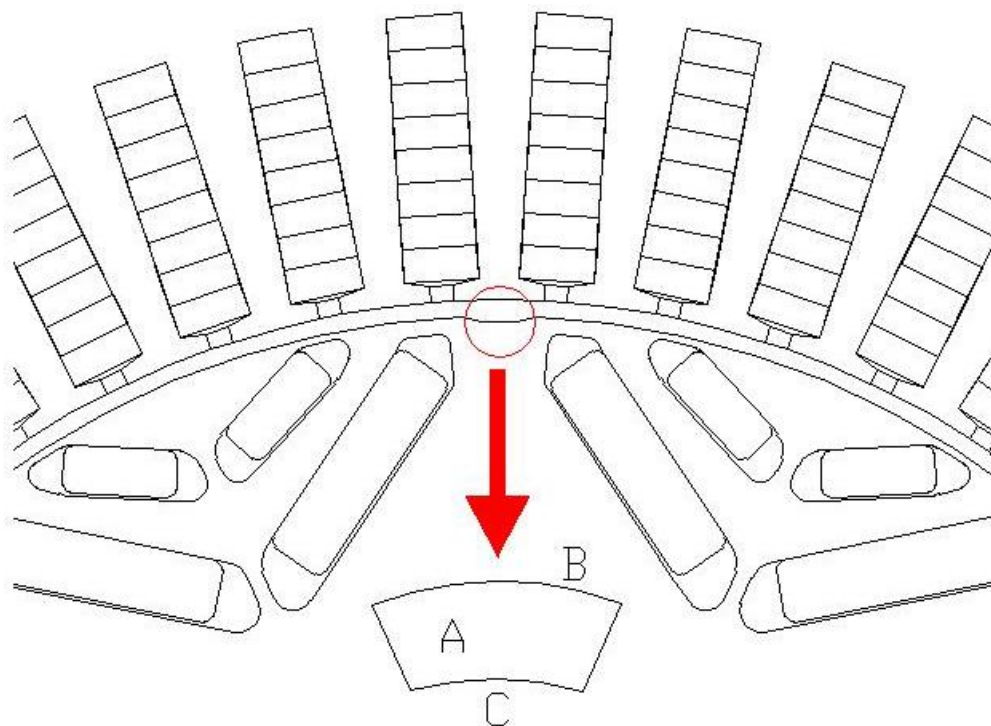


图 4-7 转子表面开辅助槽示意图

在双层永磁体相邻的部分开设辅助槽，定义辅助槽深度为 A ，外侧弧长为 B ，内侧弧长为 C 。利用田口算法，以上述三者为优化因子，对其参数修改优化。其优化因子及各水平值如表 4-3 所示。

表 4-3 优化因子及各水平值

参数	水平 1	水平 2	水平 3
A/mm	0.3	0.4	0.5
B/mm	15	20	25
C/mm	5	10	15

田口法是一种通过优化设计参数，最大化产品性能稳定性并最小化成本的质量工程方法^[67,68]。其显著特点是利用正交实验设计减少试验次数，通过正交表筛选实验条件并安排实验，进行局部优化。该方法以最少的资源实现最佳参数组合，实现高效的优化过程。

田口法在电机设计中的应用能够有效优化性能、降低成本并提高设计的鲁棒性。通过系统化的实验设计和参数优化，田口法帮助工程师在复杂的多变量环境中找到最佳设计方案，尤其适用于电动汽车电机等高性能、高可靠性要求的领域。其科学化的优化流程显著提高了电机效率、功率密度和运行稳定性，为电机设计

提供了高效、精准的技术支持。

转矩脉动是输出转矩和平均转矩之间的差值,通常通过转矩波形的峰值与平均值的差来表示。

$$T_r = \frac{T_{\max} - T_{\text{avg}}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (4-7)$$

式中: T_r 为转矩脉动; $T_{\max}$ 为输出转矩最大值; T_{avg} 为输出转矩平均值。

如表 4-4 所示,在额定工况下,将电机转矩 T_a 与转矩脉动 T_r 作为优化目标,通过田口法建立 $L_9(3^3)$ 实验矩阵。相比传统方法单参数调整需通过有限元分析进行多达 27 次实验才能得出结论,田口法通过正交实验设计将实验次数缩减至 9 次,大幅优化实验流程。

表 4-4 实验矩阵及仿真分析结果

实验 次数	实验矩阵			$T_a/(N \cdot m)$	$T_r/\%$
	A	B	C		
1	1	1	1	122.29	9.62
2	1	2	2	122.25	9.68
3	1	3	3	122.19	11.53
4	2	1	2	122.27	7.95
5	2	2	3	122.21	9.22
6	2	3	1	122.21	9.80
7	3	1	3	122.28	7.46
8	3	2	1	122.23	7.56
9	3	3	2	122.16	9.23

为更深入地探究各优化变量对目标的作用,还需对正交矩阵展开平均值分析。如计算切口深度 A 在水平 1 下转矩脉动 T_r 的平均值,同理可计算出其它因子在各水平值下的性能指标平均值;如下式所示。

$$T_r(A_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_r(i) \quad (4-8)$$

式中: $T_r(i)$ 表示第 i 次实验时转矩脉动的值; $T_r(A_1)$ 为因子 A 在水平 1 下转矩脉

动的平均值。其结果如表 4-5 所示。

表 4-5 各变量在不同水平下各优化目标的平均值

变量	水平	$T_a/(N \cdot m)$	$T_r/\%$
A	1	122.24	10.28
	2	122.23	8.99
	3	122.22	8.08
B	1	122.28	8.34
	2	122.23	8.82
	3	122.19	10.19
C	1	122.24	8.99
	2	122.23	8.95
	3	122.23	9.40

据各性能指标的平均值和各因子在不同水平下优化目标的平均值,可通过下式计算各优化因子对各优化目标的影响比例。

$$SS = 3 \sum_{i=1}^3 [m(X_i) - m(x)]^2 \quad (4-9)$$

式中： $m(X_i)$ 为表 4-5 中因子 X 在水平 i 下某一项性能指标下的平均值； $m(x)$ 为某一项性能指标总和再求平均值。其比重计算结果如表 4-6 所示。

表 4-6 各优化因子对性能指标的影响及所占比重

变量	S_{T_a}		S_{T_r}	
	值	比重(%)	值	比重(%)
A	0.0006	4.55	7.332	55.4
B	0.0123	93.18	5.530	41.78
C	0.0003	2.27	0.372	2.82
总计	0.0132	100	13.235	100

由表 4-6 可以看出,外侧弧长 B 对电机转矩 T_a 的影响最大,即其值越大,电机的转矩越大。影响转矩脉动 T_r 的关键因素是因子 A 和因子 B,前者越大后者越小,则电机的转矩脉动越小。

本次辅助槽设计的主要目标是削弱转矩脉动，对电机转矩的要求较低。根据仿真数据，确定优化因子与相应水平值的最佳组合为 A(3)、B(2)与 C(1)。此时电机的输出转矩为 $122.23N \cdot m$ ，转矩脉动为 7.56%，将相邻永磁体之间开辅助槽的该电机模型命名为电机 2。

4.3.2 分段数与斜极角度的选择

研究表明，辅助槽设计可改善气隙磁密正弦性，优化磁场分布均匀性，减少谐波分量，降低铜损和铁损；同时该设计兼具提升效率和降低转矩脉动的双重优势，尽管该设计目前主要应用于高端车型，但随着产业链完善和自动化产线技术成熟，其成本有望大幅下降。因此，本文将分段斜极与辅助槽相结合，进一步优化电机效率及转矩性能。

在转子分段斜极理论中，分段数越多，斜极效果越明显^[69,70]。故在电机 2 的基础上，进一步研究不同的分段数和斜极角度对各转矩的影响，分段数与斜极角度如表 4-7 所示。

表 4-7 不同分段数与斜极角度下的各转矩性能

分段数量	斜极角度($^{\circ}$)	齿槽转矩($N \cdot m$)	转矩脉动(%)
0	0	1.649	7.56
2	3.75	0.392	3.52
3	6	0.325	1.75
4	7.5	0.287	1.55

从表 4-7 可以看出，齿槽转矩和转矩脉动随分段数和斜极角度的增大而下降，具体而言，当分段数从 2 段增加到 4 段时，齿槽转矩降低了约 27%，转矩脉动减少了约 56%；同时，斜极角度从 0° 增大到 7.5° 时，齿槽转矩进一步降低了约 82%，转矩脉动减少了约 79%。这种改善主要归因于分段斜极结构有效削弱了气隙磁场的谐波分量，从而降低了转矩波动。但分段数增加会显著增加工艺难度。需综合考虑分段数对输出转矩和转矩脉动的影响，以平衡性能与加工工艺的要求。

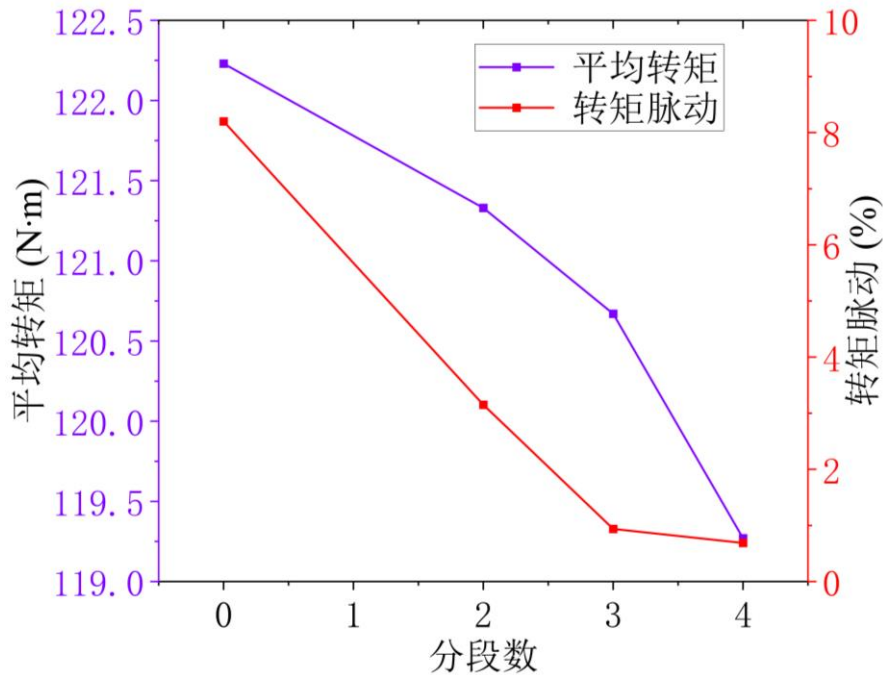


图 4-8 分段数对转矩脉动及电机转矩的影响

如图 8 所示,随着分段数增加,平均转矩逐渐减小且幅值并没有损失太多;但转矩脉动数值得到显著降低。当分段数为 4 段、斜极角度为 7.5 时,转矩脉动降至 1.55%。因此,本设计选取分段数为 4,将该模型记为电机 3。

4.4 本章小结

本章研究针对传统双 V 型内置式永磁同步电机,在此基础上进行优化。在确保双 V 型内置式永磁同步电机具备更低的转矩脉动,并在宽转速范围内具有更高的效率,在这一性能需求下,确定了电机的性能指标和结构参数。进一步优化扁线绕组的宽高比,分析其对绕组铜损耗、涡流损耗及转矩脉动的影响,从而确定了最优绕组尺寸。同时,研究扁线绕组层数对涡流损耗的影响,并评估其对齿槽转矩和转矩脉动的影响,最终确定了采用 8 层绕组设计。

为了改善气隙磁密的正弦性,转子表面开弧形辅助槽,利用田口算法对槽深 A、外侧弧长 B 和内侧弧长 C 变量因子进行了精确优化,将电机的输出转矩和转矩脉动作为优化目标。仿真分析确定了优化因子与相应水平值的最佳组合。此外,研究不同转子分段数和斜极角度对齿槽转矩、输出转矩及转矩脉动的影响,最后选择分段数为 4,斜极角度为 6 的方案。

第 5 章 扁线绕组双 V 型内置式永磁同步电机性能分析

在第四章中，通过对电机 1、电机 2 和电机 3 三者模型的建立，进行了全面的仿真分析，并获取了各电机的输出转矩和齿槽转矩波形。为了进一步优化双 V 型内置式永磁同步电机的性能，对其进行不断优化，并对比分析优化前后的转矩脉动特性。此外，对各电机进行了效率 Map 仿真，以评估优化后的电机模型在宽速域范围内的效率表现，从而判断其是否具备更高的效率。

5.1 各电机模型的齿槽转矩和输出转矩对比

对电机 1、电机 2 和电机 3 三者模型进行仿真后，并得到其输出转矩和齿槽转矩波形如下图所示。

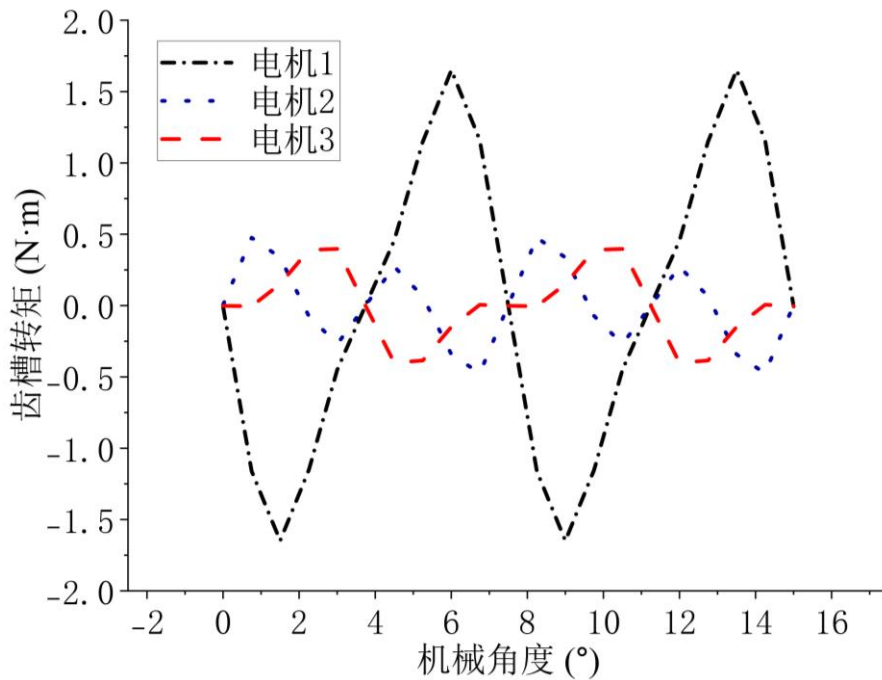


图 5-1 各电机模型的齿槽转矩对比

从图 5-1 可见，通过转子辅助槽的设计与优化后，电机 2 的齿槽转矩较电机 1 得到了显著削弱。进一步采用转子分段斜极技术后，电机 3 的齿槽转矩较电机 2 降低了 17%。实验数据表明，转子辅助槽与转子分段斜极技术的协同应用可有效抑制齿槽转矩。研究显示，转子表面开设辅助槽的设计不仅可以改善气隙磁密的正弦性，而且还能够削减齿槽转矩来实现转矩脉动的有效抑制。

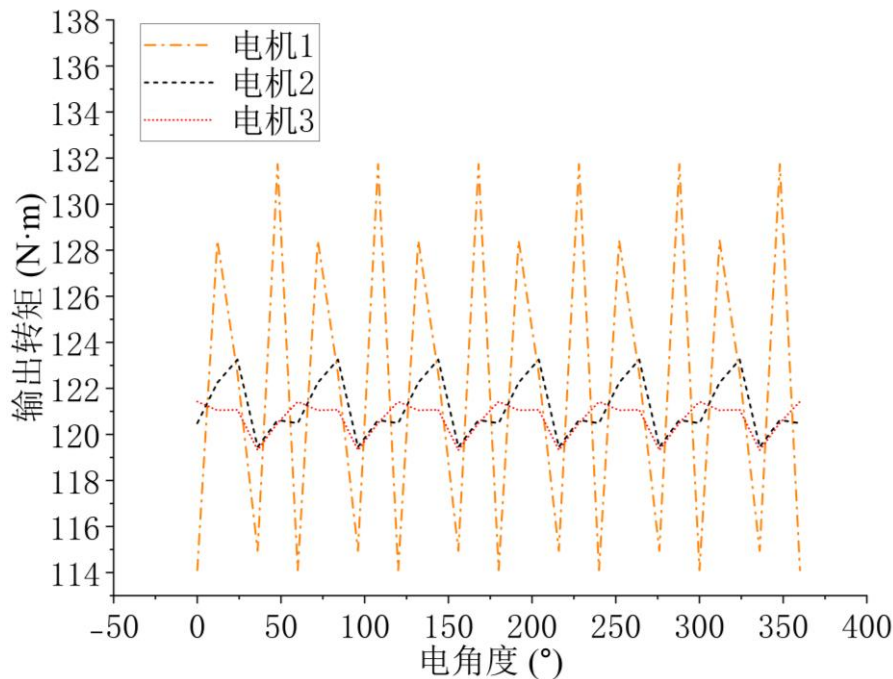


图 5-2 各电机模型的输出转矩对比

从图 5-2 可知，采用优化设计后的电机输出转矩更加平稳，即转矩脉动显著降低。其中，分段斜极降技术不仅降低了齿槽转矩并使电机的转矩脉动得到有效抑制。尽管电机 1 具有较高的输出转矩，但其转矩脉动过大，不利于电动汽车的快速起步、超车、精准控制、车辆平稳性、噪声抑制和续航里程。通过引入转子表面辅助槽设计，电机 2 的输出转矩虽略有下降，但其转矩脉动仍未能满足新能源汽车驱动电机的性能需求。再经过转子经过分段斜极技术后，电机 3 在输出转矩仅较电机 2 降低了 1.6% 的情况下，实现了转矩脉动的显著改善，这一优化设计有效提升了电机的综合性能。

5.2 宽广的转速范围内保持高效率

内置式永磁同步电机在宽广转速范围内保持高效率的理论依据主要基于三方面因素。其一，嵌入式磁钢结构具备良好的磁链调节能力，高速区可通过弱磁控制降低反电动势，避免逆变器过压，同时减小铁耗，该部分已在第二章公式推导中予以说明；其二，本文通过分析定子部分的扁线绕组宽高比及层数对绕组铜损耗和涡流损耗的影响。结果显示，当绕组宽高比为 2、层数为 8 时，铜损耗最小，涡流损耗降低了 6.2%；这部分已在第四章做了大量研究并得到验证。其三，

气隙长度小可降低磁阻，提升效率，但过小易加剧磁场畸变，增大转矩脉动；定子槽深增加会减少谐波，降低转矩脉动，但绕组电阻增大，效率下降；槽宽增大可降低铜损、提高效率，但磁路饱和风险增加，可能引发谐波波动。三者需权衡：气隙优化平衡效率与脉动，槽深侧重平滑磁场，槽宽侧重降低损耗，综合设计决定电机性能。故在电机模型 3 的基础上，继续研究气隙长度、定子槽深和定子槽宽对电机效率及转矩脉动的影响。

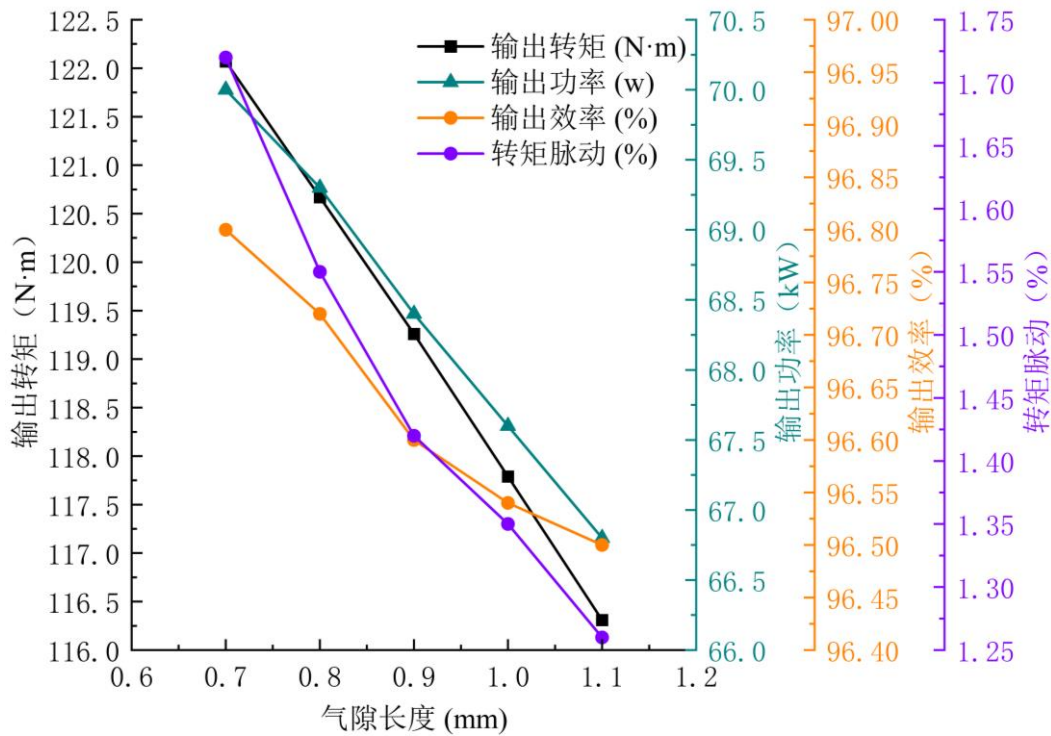


图 5-3 额定工况下气隙长度对电机性能影响曲线

根据图 5-3 数据可知，气隙长度对电机性能参数的影响呈现显著规律性。当气隙长度从 0.7 mm 增至 1.1 mm 时，输出转矩与输出功率均呈单调递减趋势，最大值分别出现在初始气隙处（122.07 N·m/70 kW），最小值则对应最大气隙（116.31 N·m/66.8 kW），降幅达 5.3%和 6.4%。值得注意的是，输出效率与转矩脉动的变化呈现非线性特征：效率在 0.7-1.1 mm 区间从 96.8%快速下降至 96.4%；而转矩脉动则在 0.7-1.0 mm 范围内持续下降至 1.35%，之后在 1.1 mm 处小幅回落至 1.30%。基于额定工况下电机需满足输出功率大于 65kW、输出转矩大于 120N·m 的设计指标，并在保证进一步降低转矩脉动的前提下，电机效率也要维持在 96.5%以上的要求，故综合考虑电机效率和组装工艺难度，选定 0.8mm 气隙长度可在保证转矩脉动稳定在 1.55%。

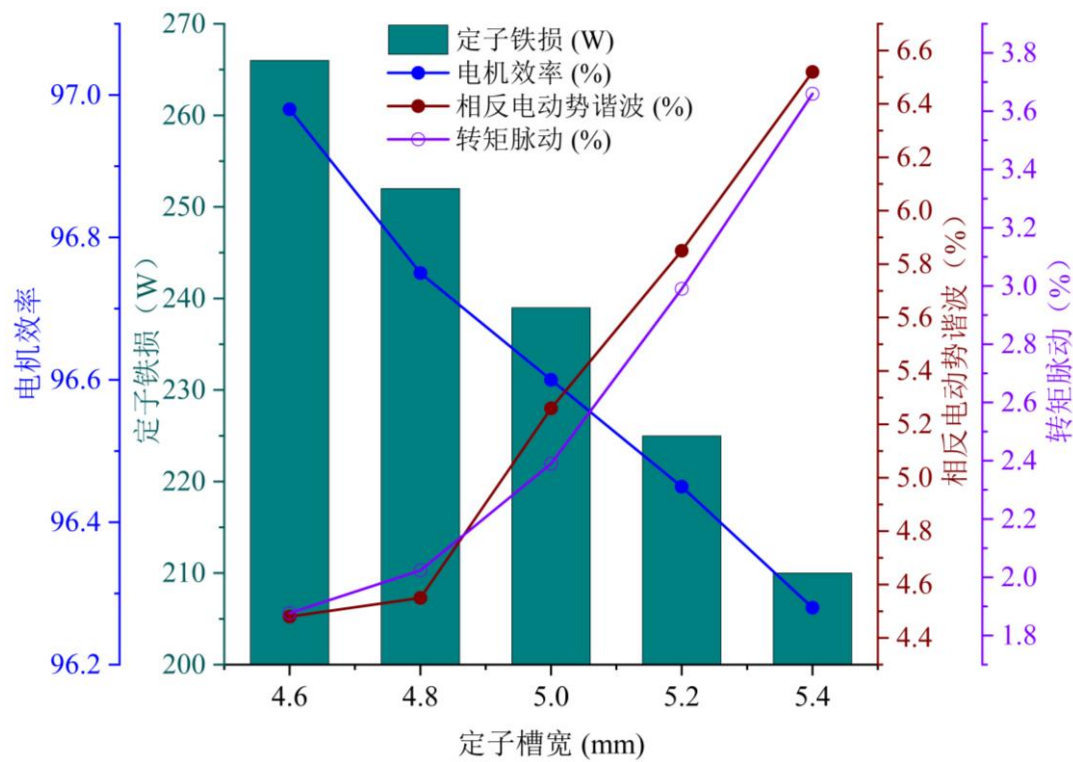


图 5-4 额定工况下定子槽宽对电机性能影响曲线

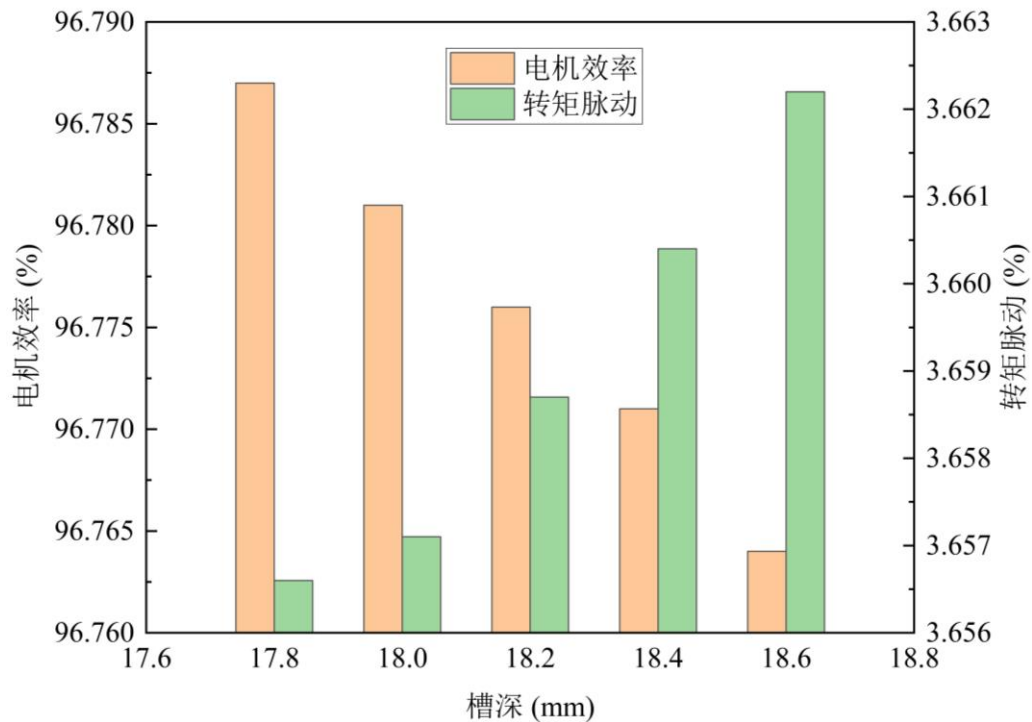


图 5-5 额定工况下定子槽深对电机效率和转矩脉动影响柱状图

仿真数据如图 5-4 所示，定子槽宽对电机性能存在显著影响。随着槽宽从 4.6mm 增至 5.4mm，定子铁损由 268W 线性递减至 210W，反映出磁通密度优化的空间。电机效率呈现非线性衰减趋势，在 4.6mm 时达到峰值 96.98%，5.4mm

时降至 96.28%。相反电动势谐波(THD)与转矩脉动呈正相关增长,分别在 5.4mm 时达到 6.52%和 3.66%,表明槽宽增大会加剧电磁干扰和转矩波动。综合考虑电机效率、THD 和转矩脉动,选择定子槽宽为 4.7mm 时较为合适。

通过仿真数据分析了不同槽深对电机性能的影响,如图 5-5 所示,重点考察了效率与转矩脉动的变化趋势。实验结果表明,随着槽深从 17.8 mm 逐步增加至 18.6 mm,电机效率和转矩脉动呈现出明显不同的变化特性。具体来看,电机效率在槽深为 17.8 mm 时达到峰值 96.787%,之后随着槽深的继续增加略有下降;而转矩脉动则表现出随槽深增加而单调上升的趋势,在 18.6 mm 时达到最大值 3.662%。这一现象反映出槽深对电机性能具有显著影响,且存在效率与转矩品质之间的权衡关系。因此,在电机设计和实际应用中,应综合权衡槽深对效率与转矩脉动的影响,选取兼顾二者性能的合理槽深参数。

5.2.1 电机优化前后性能参数对比

依据表 4-1 所制定的电机性能指标,在电机模型 3 的基础上进一步精细优化气隙长度、定子槽深和槽宽。结合图 5-3、图 5-4 和图 5-5 的仿真数据,最终确定气隙长度为 0.8mm,定子槽深和槽宽分别为 18mm 和 4.75mm,在此参数组合下对电机进行再次仿真,以验证其是否满足本文设计的双 V 型内置式永磁同步电机的基本性能要求。

表 5-1 优化前后性能参数对比

性能参数	电机 1	电机 2	电机 3
输出转矩/(N·m)	122.37	122.23	120.67
转矩脉动/%	14.38	7.56	1.55
齿槽转矩/(N·m)	1.651	0.392	0.325
相反电动势 THD	7.82%	6.64%	4.55%

从表 5-1 可以看出,随着电机模型的优化,其性能参数呈现出明显的改善趋势。从电机 1 到电机 2,输出转矩的平稳性得到提升,转矩脉动显著减小;从电机 2 到电机 3,齿槽转矩进一步降低,同时转矩脉动得到更有效的抑制。此外,优化后的电机反电动势波形畸变率明显下降,表明反电动势的正弦性得到了显著

改善。最终优化结果达到预期目标，并完全满足电机的基本性能要求。

5.2.2 宽转速范围内对应的效率对比

电机的高效运行不仅能够相同电量下输出更多有效功率，延长续航里程，其较低能耗直接降低了电动汽车的使用成本。对于个人用户而言，故每次充电的行驶里程增加，充电次数减少，充电费用降低。

在第四章的基础上，通过优化定子部分的损耗，研究结果表明，当绕组宽高比为 2、绕组层数为 8 时，铜损最小，且相比传统双 V 型结构，涡流损耗降低了 6.2%。本章进一步考虑了气隙长度、定子槽深及槽宽对电机效率与转矩脉动的影响，这为电机在宽转速范围内保持高效率提供了理论支持。结合第四章的研究成果与本章的仿真结果，在对关键参数进一步精细化调整后，分析电机的效率 Map 图及高效区间占比，验证所提出优化策略是否有效提升了整体效率，并实现了在更宽转速范围内的效率提升。

车用内置式永磁同步电机的运行工况颇为复杂，在设计时需考虑电机处于不同工况下的效率。通过有限元软件来计算电机在各种不同转速时的损耗，进而绘制出电机在不同工况下的效率 Map，如图 5-6 所示。

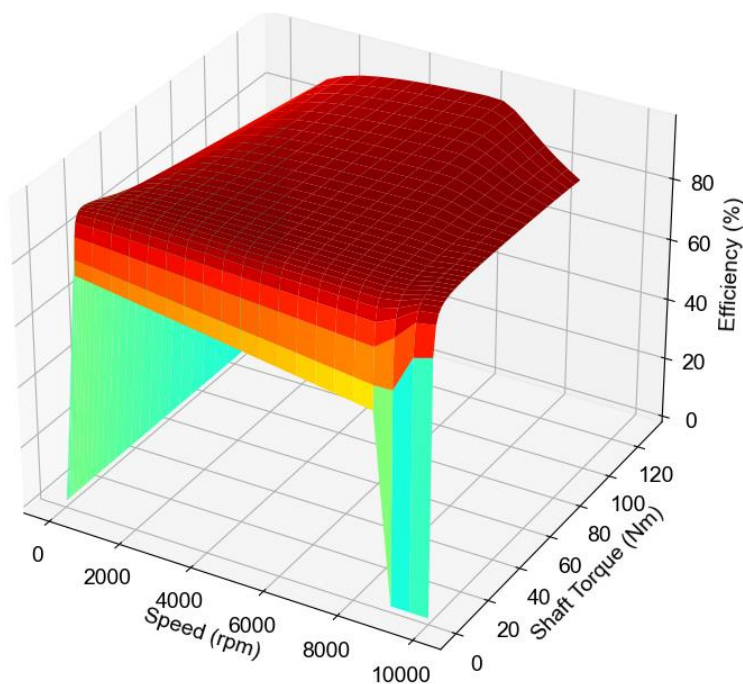


图 5-6 电机模型 3 的效率 Map

如图 5-4 所示为电机 3 的效率 Map，红色区域表示电机的高效运行区间，且该电机的高效区间占据了较大比例。

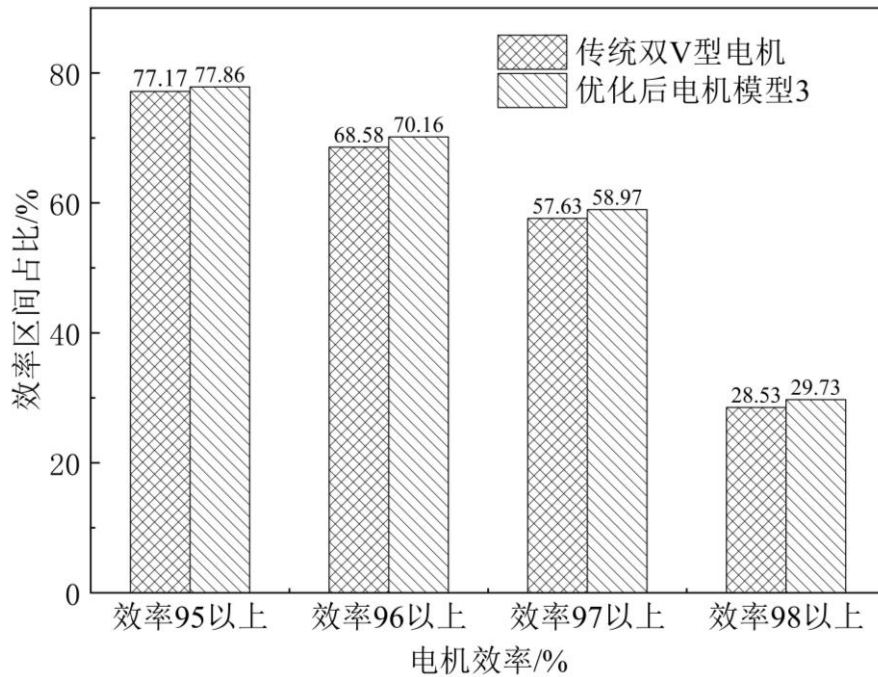


图 5-7 传统双 V 型电机与电机模型 3 的高效工作区间对比

从图 5-6 和图 5-7 中可以看出，在额定工作点处电机的最高效率达到 96.51%，符合电机额定工作点的效率要求；其中效率在 97% 以上的工作点占比为 58.97%，效率在 96% 以上的工作点占比为 70.16%；表明电机在较大的转速范围内持续保持高效率。满足新能源汽车电机从低速到高速的高效率要求。

5.3 本章小结

本章采用转子表面弧形辅助槽设计和分段斜极技术，在保证电机输出转矩满足额定转矩的同时，有效降低了齿槽转矩和转矩脉动。此外转子辅助槽设计不仅能抑制转矩脉动，还可改善气隙磁密的正弦性，使磁场分布更均匀，减少谐波分量，降低铜损耗和铁损，提升了电机效率。

与传统的内置式双 V 型电机模型相比，本文设计的双 V 型电动汽车用内置式永磁同步电机，转矩脉动削弱至 1.55% 并降低了 11.4%；电机效率在 96% 以上的高效区间占比达 70.16%，较传统电机模型设计提高 2.3%；且在宽广转速范围内能保持此高效率。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

本文对电动汽车用内置式永磁同步电机的宽速域高效率进行了研究。首先，在学习并了解车用永磁同步电机的运行原理和定子绕组形式的基础上，结合当前内置式永磁同步电机的性能要求，分析了内置式永磁同步电机的 $d-q$ 轴数学模型及主流控制策略，认识到内置式永磁同步电机的性能优势，并确定采用内嵌式永磁体转子结构设计。

内嵌式永磁体放置方式主要分为 V 型和双 V 型两种转子构型，且已在工程实际中被广泛应用。通过对比分析电机在空载和负载工况下的气隙磁密分布，发现双 V 型转子结构的磁力线分布更均匀，有助于降低铁耗和温升，在提升电机效率方面具有优势。进一步研究了不同电流值和扁线绕组层数对两种转子结构的电机损耗、转矩脉动及效率的影响，并通过电机效率 Map 对比分析，证实双 V 型转子设计在宽速域范围内具有更高的效率优势。

在确定选择双 V 型转子结构后，依据本文设计的电动汽车用内置式永磁同步电机的设计指标，对电机的定子部分进行了优化。首先开展扁线绕组尺寸优化，通过改变绕组宽高比，分析其对绕组铜损耗、涡流损耗和转矩脉动的影响，同时研究了扁线层数对涡流损耗和转矩脉动的作用机制。随后对转子结构进行优化设计，通过在转子表面开设弧形辅助槽，有效降低了转矩脉动，改善了气隙磁密的正弦性，削弱了反电动势的谐波分量，进而提升了电机效率。进一步对转子分段斜极优化，当分段数为 4，斜极角度为 7.5 度时，转矩脉动降至 1.55%。

最后将优化前后的各电机模型进行对比，结果表明：相较于电机 1，电机 2 的齿槽转矩得到减小；与电机 2 相比，虽电机 3 的输出转矩略微损失，但转矩脉动得到显著抑制并降低了 11.4%。效率 Map 分析显示，优化后的电机 3 模型在效率高于 96% 的高效区间占比达 70.16%，较传统双 V 型内置式永磁同步电机提升 2.3%，并能在宽广的转速范围内保持高效率。该设计方案有效降低了转矩脉动，满足了电机高效低耗的设计需求。

6.2 工作展望

针对文中不足，未来研究将着重提高电机效率，持续更新电机模型，优化定子槽口及转子双层永磁体参数，并解决电机散热问题。

定子槽型与扁线绕组尺寸的配合还需进一步优化，不仅要利于自动化生产线的装配，而且还要考虑槽满率、铜损耗和铁芯损耗的问题。

扁线绕组与分布式短距绕组的设计未来可能成为内置式永磁同步电机的主流选择。其中分布短距绕组能有效减少气隙磁密中的谐波分量，降低电机转矩脉动；同时使磁场分布更接近正弦波，提高电机运行平稳性；且该设计更适合宽速域运行。若自动化嵌线技术成熟，生产效率会显著提高，这种设计成本有望大幅降低。

未来的工作中，我们会持续深入学习电机的控制策略。新能源车用驱动电机的设计离不开硬件电路的优化，两者相辅相成、缺一不可。

后续我们要继续钻研电力电子领域中的功率变换电路和制动能量回收电路，以加深对硬件电路的理解与调试。最后电驱和电机两者结合学习，通过控制器中的程序代码来导通、关断硬件电路中的功率开关，使功率电路中梯形波更加接近正弦波，以便实现对电机的高效驱动，确保电机平稳、顺畅且高效地运转，进而提升整个新能源汽车驱动系统的性能。

参考文献

- [1] 叶巍.新能源汽车发展现状与未来趋势[J].时代汽车,2024,(19):128-130.
- [2] 张捷,杨帆,陈彦廷,等.“双碳”背景下新能源汽车发展及销售策略研究[J].商场现代化,2025,(01):54-56.
- [3] 谢锐波.关于电动汽车技术发展趋势及前景分析[J].中国战略新兴产业,2017,(16):47-48.
- [4] 杜芳.浅析我国纯电动及插电式混动汽车技术发展前景[J].汽车维修技师,2024,(14):33-35.
- [5] 何万青.永磁同步电机在新能源车上的应用[J].时代汽车,2023,(01):106-108.
- [6] 刘莹,靳媛媛.电动汽车用永磁同步电动机设计[J].工业设计,2017,(12):110-111.
- [7] 郭昊天,曹鑫,潘家龙,等.高功率密度永磁同步电机多物理场设计与优化[J].微特电机,2024,52(04):16-21+27.
- [8] 梁栋,陶健,陈星.车用高功率密度电机扩速拓矩研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2025,39(01):140-147.
- [9] 金石,刘迎,顾家伟,等.低速大转矩永磁同步电机矢量控制研究[J].大电机技术,2023,(02):8-14+34.
- [10] 方昊虹.电动汽车用高效率低转矩脉动永磁同步电机设计[D].安徽工程大学,2024.
- [11] Sariful M I ,Mazharul C ,Amina S , et al. Multiload Point Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines for High-Performance Variable-Speed Drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57 (1): 427-436.
- [12] 马科,韩常青,张志敏,等.电动汽车用扁线绕组电机发展研究[J].汽车实用技术,2022,47(04):144-148.
- [13] 安忠良,罗文,孙宁,等.双层 V 型双三相永磁同步电机的电感计算与转子结构优化[J].微电机,2021,54(10):23-27.
- [14] 佟文明,杨先凯,鹿吉文,等.双层永磁体结构高速永磁电机转子涡流损耗解析模型[J].电工技术学报,2024,39(20):6293-6304.

- [15] 刘鸿.电动汽车驱动电机抗退磁优化设计[D].南京信息工程大学,2023.
- [16] 胡昊波.电动汽车用扁线永磁电机交流铜耗计算与分析研究[D].华中科技大学,2022.
- [17] 史涔澈,聂涵婧,邱建琪,等.永磁同步电机铜铝混合扁线绕组交流损耗计算[J].电机与控制学报,2024,28(12):1-11.
- [18] 杜凯扬.电动汽车用发卡绕组永磁电机绕组设计及效率分析[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [19] 喻荣志.电动汽车用扁线永磁同步电机损耗计算与温度场分析[D].沈阳工业大学,2024.
- [20] Niu L ,Zhang M . The optimal design and research of interior permanent magnet synchronous motors for electric vehicle applications [J]. The Journal of Engineering, 2023.
- [21] 李厚宇.发卡绕组双层内置式永磁同步电机的设计与分析[D].哈尔滨理工大学,2022.
- [22] 谢颖,辛尉,蔡蔚,等.内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构的电磁性能及电磁振动噪声分析[J].电机与控制学报,2023,27(01):110-119.
- [23] 薛菲.车用双 V 型内置式永磁同步电机的电磁设计与转矩性能优化[D].上海电机学院,2023.
- [24] 辛国栋.电动汽车用内置式永磁电机设计[D].沈阳工业大学,2024.
- [25] 胡耀华.电动汽车用内置式永磁同步电机的研究[D].南京航空航天大学,2017.
- [26] 胡文鸾.不同转子拓扑结构内置式永磁同步电机性能优化的研究[D].北京交通大学,2019.
- [27] 项渝.永磁同步电机结构分析与优化设计[D].华中科技大学,2020.
- [28] 裴泽健.车用内置式永磁同步电机的设计与振动优化研究[D].吉林大学,2024.
- [29] 袁超.内置式永磁同步电机转矩性能及电磁振动优化设计[D].哈尔滨理工大学,2022.
- [30] 宾林湘粤.电动汽车用双V型永磁同步电动机的分析与设计[D].广东工业大学,2021.

- [31] 王秀和.永磁同步电机[M].机械工业出版社:202208.664.
- [32] 符荣,窦满峰.电动汽车驱动用内置式永磁同步电机直交轴电感参数计算与实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11):30-37.
- [33] Elhaj A, Alzayed M, Chaoui H. Direct voltage MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor driven electric vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2025, 156: 106197.
- [34] Qu X ,Wang Q ,Peng C , et al. Novel deadbeat direct torque and flux control for interior permanent magnet synchronous motor [J]. Electrical Engineering, 2024, 107 (2): 1607-1616.
- [35] 刘军杰,吴静波,郭志军,等.纯电动汽车用内置式永磁同步电机弱磁控制策略综述[J].微电机,2022,55(07):107-112.
- [36] Elhaj A ,Alzayed M ,Chaoui H . Direct voltage MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor driven electric vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2025, 156 106197-106197.
- [37] 李吉程,王爱元,王成敏,等.内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构对电机性能的影响分析[J].电机与控制应用,2024,51(02):103-112.
- [38] 翟凤晨,于慎波,何庆桡.V 型内置式永磁同步电机空载气隙磁场解析计算[J].电机与控制学报,2023,27(09):73-81.
- [39] 庞亮,赵朝会,申合彪,等.双 V 型 IPMSM 辅助槽对齿槽转矩的影响[J].噪声与振动控制,2022,42(05):49-53+84.
- [40] 宋腾飞,刘慧娟,张振洋,等.车用永磁同步电机拓扑结构优化与实验研究[J].电机与控制学报,2019,23(06):44-53.
- [41] Hyungkwan J ,Hyunwoo K ,HuaiCong L , et al. Investigation on the Torque Ripple Reduction Method of a Hybrid Electric Vehicle Motor [J]. Energies, 2021, 14 (5): 1413-1413.
- [42] 杨泓奕.车用永磁同步电机损耗最小化控制研究[D].浙江大学,2023.
- [43] 过铠煜.电动汽车用扁线永磁同步电机设计与转矩性能优化分析[D].南昌大学,2023.

- [44] 王红.永磁同步电机效率优化控制研究[D].中北大学,2022.
- [45] Sun Y ,Zhao Z ,Zhang Q .Design and Analysis of a Low Torque Ripple Permanent Magnet Synchronous Machine for Flywheel Energy Storage Systems[J].Energies,2024,17(24):6337-6337.
- [46] 王力新,王晓远,高鹏,等.电动汽车用内置式永磁同步电机转矩脉动分析及抑制[J].电工技术学报,2024,39(20):6386-6396.
- [47] Qureshi I ,Sharma V .Wide Speed Range and Torque Control of IPMSM with MTPA-MTPV Field Weakening Control[J].Arabian Journal for Science and Engineering,2023,(prepublish):1-16.
- [48] 叶嘉,李媛,孙嘉男.低转矩脉动永磁同步伺服电机多目标优化设计[J].船舶工程,2021,43(S2):70-73.
- [49] Yong K ,Mingyao L ,Lun J .A Novel High Power Density Permanent-Magnet Synchronous Machine With Wide Speed Range[J].IEEE Transactions on Magnetics,2020,56(2):1-6.
- [50] 鞠孝伟,张凤阁,程远,等.车用驱动电机扁线绕组关键问题研究综述[J].中国电机工程学报,2024,44(15):6181-6199.
- [51] 李晓华,褚福源,章李烽,等.车用扁铜线永磁同步电机绕组损耗优化方法[J].微电机,2022,55(04):14-19+52.
- [52] Liang P, Chao-Hui Z, He-Biao S, et al. Effect of Double V-type Auxiliary Groove on the Cogging Torque of IPMSM[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(5): 49.
- [53] 周宁,吴华伟,李智,等.基于磁热耦合扁线电机温升计算及影响因素分析[J].微电机,2024,57(05):39-45.
- [54] Yecui Y ,Lin C ,Hongjuan R , et al. Accurate Equivalent Modeling and Thermal Analtsis of Stator Slot of Flat Wire Motor [J]. International Journal of Automotive Technology, 2024, 25 (3): 575-593.
- [55] 杜凯扬.电动汽车用发卡绕组永磁电机绕组设计及效率分析[D].哈尔滨理工大学,2023.

- [56] 王晓光,尹浩,余仁伟.轴向磁通无铁心永磁电机多层矩形扁线绕组涡流损耗解析计算及优化[J].电工技术学报,2023,38(12):3130-3140.
- [57] Wang H, Ju X, Zhang F. Calculation and Analysis of AC Loss in Variable-section Hairpin Windings for Traction Motors of Electric Vehicles[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2024: 1040-1045.
- [58] 刘福贵,杨凯,赵志刚,等.不同层数集中绕组永磁电机转子损耗研究[J].微电机,2019,52(10):12-17.
- [59] Yu Q, Gao J, Li C, et al. Multi-objective Optimization Design of High Power Density Embedded V-Type Permanent Magnet Synchronous Motor[C]//2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2023: 1-5.
- [60] 谢颖,何自豪,蔡蔚,等.车用发卡式绕组永磁同步电机的设计与优化[J].电机与控制学报,2021,25(12):36-45.
- [61] 孙承旭,李琦,范涛,等.车用双层内嵌式永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J].兵工学报,2021,42(10):2251-2259.
- [62] 陈鑫,李国丽,钱喆,等.转子开辅助槽削弱双层内置式永磁同步电机转矩脉动[J].微电机,2020,53(10):1-4+16.
- [63] 马成虎,徐余法,孙明伦,等.基于磁极分块与转子开槽削弱永磁电机齿槽转矩[J].微电机,2022,55(02):42-45.
- [64] Peng C, Wang D, Wang B, et al. Torque ripple and electromagnetic vibration suppression in permanent magnet synchronous motor using segmented rotor with different pole widths[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 1-5.
- [65] 申合彪,赵朝会,陆海玲,等.对称转子辅助槽对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J].微电机,2021,54(07):50-54.
- [66] 安治国,刘高朋,高尉.转子辅助槽对 IPM 性能的影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(04):123-127.
- [67] 张玉峰,高文韬,史乔宁,等.基于改进迭代田口法的双余度永磁同步电机优化设计[J].电工技术学报,2023,38(10):2637-2647+2685.

- [68] 陈爽,张志,李佳星,等.田口法在永磁同步电机多目标优化设计的应用[J].微电机,2021,54(07):17-22.
- [69] Peng C, Wang D, Feng Z, et al. A new segmented rotor to mitigate torque ripple and electromagnetic vibration of interior permanent magnet machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(2): 1367-1377.
- [70] 金孟加,费伟中,沈建新.转子分段斜极的永磁同步电机轴向磁力的研究(英文)[J].电工技术学报,2013,28(11):19-27.

攻读学位期间发表的学术论文

- 1、 杨云飞,陈其工,崔丹妮,严宇婷.车用双 V 型永磁同步电机宽速域高效率研究[J].微电机,2025.

致谢

自 2017 年踏入社会参加工作，至 2022 年重返校园读研。在这三年的求学生活中，首先，我要衷心感谢我的导师陈其工教授。您的严谨教学、学识渊博和对学生严厉且负责的态度让我受益终身。您培养学生的方式是值得肯定的，无论是在学校，还是在企业，对一个问题刨根问底，认真地去思考问题，培养自身的学习能力；再去把问题一个个的解决。这对于毕业后的学生去企业参加工作是非常有好处的。导师在三年里对我的帮助很大，磨炼我的意志，使我明白深入学习需持之以恒并静下心来，让我成为一个有韧性的人。三年的读研经历让我在各方面进一步成长，也慢慢理解了工作期间遇到的技术问题，让做技术的我更加具有信心和责任心，成为一个有担当的人。在此向我的导师致以真诚的谢意！

感谢我的好朋友庄鹏，在考研和读研期间，他给予我极大的帮助。每当我对问题想不明白、无从下手的时候，他总是耐心开导我，并解答我在学习上遇到的疑问。同时，我还要感谢我的弟弟李家伟。在我求学期间给了我很多照顾，尤其是在研究生考试当天，气温骤降至零下七、八度，正是他亲自送我去考场，才让我能够顺利完成考试。可以说，没有我弟弟的帮助，就没有今天的我。

此外，我要感谢与我一起学习的同学们和实验室的同仁们。你们在我研究学习过程中给予的帮助和支持，使我在遇到困难时能够坚持下去，一起讨论问题，让我的研究思路开阔明朗，研究成果得以丰富和完善。

最后，深深感谢我的父母，家人们的支持是我坚持下去的动力。正是他们的鼓励、理解、信任与关爱，才能使我走到今天，父母无私的爱是我在人生道路上不断前进的最大帮助。

回想过去的上班生活，现在的学习时光，很多人帮助过我，我也一直铭记于心。我一直相信如果事与愿违，要么是自己努力不够，要么是自己没用心，要么是另有安排。即便经受再多的人生磨难，我还是没有忘记自己的初心。

再次真诚地感谢导师、朋友、同学以及所有帮助过我的人！