

不同极弧系数下 EC 外转子永磁同步电机磁场分布计算与实验验证

黄禄财

广东 肇庆 526600

DOI:10.61369/WCEST.2025100006

摘要：本文围绕外转子式 EC 永磁电机极弧系数展开研究，分析极弧系数对磁场分布、电机性能的影响，阐述参数化建模、多物理场联合求解等方法，通过搭建试验台验证理论计算，在矿山提升机、电梯曳引系统应用取得成果，提出全生命周期成本评估及产业化路径，指出研究局限与未来多物理场耦合优化方向。

关键词：外转子式 EC 永磁电机；极弧系数；磁场分布

Calculation and Experimental Verification of Magnetic Field Distribution of Permanent Magnet Synchronous Motor With Ec Outer Rotor under Different Pole Arc Coefficients

Huang Lucai

Zhaoqing , Guangdong 526600

Abstract : This paper studies the pole arc coefficient of external rotor EC permanent magnet motor, analyzes the influence of pole arc coefficient on the magnetic field distribution and motor performance, describes the methods of parametric modeling and multi physical field joint solution, and achieves results in the application of mine hoist and elevator traction system by building a test bench to verify the theoretical calculation, puts forward the full life cycle cost assessment and industrialization path, and points out the research limitations and the direction of multi physical field coupling optimization in the future.

Keywords : external rotor EC permanent magnet motor; pole arc coefficient; magnetic field distribution

引言

《中国制造2025》于2015年颁布，旨在推动我国制造业转型升级。在此政策背景下，外转子式 EC 永磁电机的研究具有重要意义。其独特的拓扑结构，通过优化磁路、利用磁势分布及加强电磁耦合，为高效运行奠定基础。极弧系数对其磁场分布影响显著，从数学分析、参数化建模到多物理场联合求解等研究，为电机性能提升提供理论依据。同时，实验验证与工程应用成果丰硕，但极端工况适应性存在局限。未来结合政策导向，多物理场耦合优化方向的研究有望推动该电机在复杂工况下的性能提升与应用拓展。

一、EC 外转子永磁电机结构与极弧系数基础理论

(一) 外转子式 EC 永磁电机拓扑结构

外转子式 EC 永磁电机的拓扑结构独具特色。从磁路布局特征来看，永磁体位于转子外侧，这种结构使得磁路较短，磁阻相对较小，有利于提高电机的磁性能^[1]。与内转子设计相比，外转子结构的磁势分布差异明显，外转子可产生较大的气隙磁密，能有效提升电机输出转矩。定子绕组与永磁体外置的相互作用机制为：当定子绕组通入三相交流电时，会产生旋转磁场，永磁体外置使得其与定子旋转磁场的耦合更为直接，增强了电磁相互作用，提高电机的能量转换效率。这种拓扑结构通过优化磁路、利用独特的磁势分

布以及加强电磁耦合，为电机高效运行奠定了基础。

(二) 极弧系数定义与磁场调制机理

极弧系数定义为永磁体极弧宽度与极距之比，它对 EC 外转子永磁同步电机的磁场分布有着重要影响。建立极弧系数数学表达式，能从量化角度分析其作用。通过磁通路径分析可知，极弧宽度变化会改变气隙磁密波形。极弧宽度增大，气隙磁密幅值增加，但波形可能趋于平坦；极弧宽度减小，气隙磁密幅值降低，波形更接近正弦。进一步推导得出磁场谐波含量与极弧系数的关联公式^[2]，该公式表明极弧系数不同，磁场中各次谐波含量会相应改变。合适的极弧系数可有效优化磁场分布，减少谐波含量，提升电机性能。

二、多极弧系数磁场数值建模方法

(一) 多极弧系数的参数化建模策略

在不同极弧系数下 EC 外转子永磁同步电机磁场分布计算的研究中, 极弧系数的参数化建模策略至关重要。通过开发极弧系数参数驱动的三维电磁场有限元模型, 能够有效实现对不同极弧系数情况的模拟分析。具体而言, 要制定不同极弧宽度下的网格划分准则, 这是确保模型精度的基础, 合理的网格划分可准确捕捉磁场分布细节。同时, 需设置规范的边界条件, 明确电机内部与外部磁场的边界关系。通过这种参数化建模策略, 结合网格划分准则与边界条件设置规范, 可全面且精准地对不同极弧系数下电机磁场进行数值建模, 为后续磁场分布计算提供有力支撑^[3]。

(二) 非线性求解算法实现

在多极弧系数磁场数值建模中, 构建磁场 – 电路耦合仿真平台后, 采用牛顿 – 拉夫逊算法实现多物理场联合求解。该算法通过迭代方式逼近非线性方程的解, 在每次迭代中, 计算雅可比矩阵, 基于此修正变量值, 不断减小残差, 直至满足收敛条件。通过这种方法将电机内部复杂的磁场与电路相互作用关系进行有效耦合求解, 准确模拟不同极弧系数下电机内的磁场分布情况。在计算过程中, 还考虑了材料的非线性特性等因素, 确保模型的准确性。利用牛顿 – 拉夫逊算法实现的多物理场联合求解为后续模型参数敏感性分析提供了基础, 通过此方法得到的磁场分布结果也为进一步的实验验证提供理论依据^[4]。

三、磁场分布仿真与极弧系数关联分析

(一) 极弧系数对磁场波形的影响

1. 基波磁通密度分布特性

在不同极弧系数下, EC 外转子永磁同步电机的基波磁通密度分布特性有着显著变化。极弧系数的改变会定量影响气隙磁密幅值^[5]。当极弧系数增大时, 气隙磁密幅值会呈现一定的增长趋势, 这是因为极弧覆盖范围的扩大, 使得更多的永磁体磁通参与到气隙磁场的形成中。通过对不同极弧系数的磁场分布进行仿真, 可以绘制出磁密空间谐波频谱特征曲线。从曲线中能看出, 极弧系数不仅影响基波磁通密度的幅值, 还对谐波含量有作用。极弧系数的合理选择, 可优化基波磁通密度分布, 降低谐波, 进而提升电机性能。例如, 在特定的电机设计中, 找到合适的极弧系数, 能使基波磁通密度更符合电机运行需求, 减少能量损耗与振动噪声。

2. 谐波磁场抑制效果评估

极弧系数的改变对磁场波形有着显著影响。不同极弧系数下, 电机气隙磁场的波形会呈现出不同特征。当极弧系数变化时, 磁场中各次谐波的幅值和相位也随之改变, 进而影响磁场波形的正弦度^[6]。而谐波磁场的存在会导致电机损耗增加、转矩脉动增大等问题, 因此其抑制效果评估至关重要。通过对不同极弧系数下谐波磁场进行分析, 能直观了解到极弧系数如何作用于谐波磁场。例如, 合适的极弧系数可有效降低特定次谐波幅值, 从

而抑制谐波磁场。经评估可知, 极弧系数在某一范围内时, 谐波磁场抑制效果最佳, 能使电机性能得到优化, 减少因谐波磁场带来的负面影响, 提高电机运行的稳定性与效率。

(二) 极弧系数范围优选研究

1. 能量效率指标分析

采用电磁损耗积分法计算不同极弧系数方案的总效率, 该方法通过对电机内部电磁损耗进行积分运算, 能够较为准确地获取不同极弧系数下电机的能量损耗情况, 进而得出总效率。基于此, 绘制效率 – 极弧系数特性曲线, 曲线直观地展示了极弧系数变化对能量效率的影响。从曲线中可以清晰看到, 随着极弧系数在一定范围内变动, 能量效率呈现出相应的变化趋势。通过对该曲线的深入分析, 能够明确在何种极弧系数取值时, 电机可获得较高的能量效率, 为极弧系数范围的优选提供关键依据^[7]。

2. 转矩密度优化平衡点

转矩密度优化平衡点对于电机性能提升至关重要。在不同极弧系数下, 电机磁场分布存在差异, 进而影响转矩密度。通过对磁场分布进行仿真, 能够深入分析极弧系数与转矩密度的关联。研究发现, 极弧系数的变化会导致气隙磁场谐波含量及分布改变, 直接影响电机输出转矩。当极弧系数处于某一特定范围时, 电机可获得较高转矩密度。在此基础上, 借助 Pareto 前沿分析, 综合考量电磁转矩与功率因数, 确定两者的最优匹配区间, 进而提出极弧系数优选值域^[8]。该优选值域能够为电机设计提供理论依据, 使电机在转矩密度与其他性能指标间寻得优化平衡点, 提升整体运行性能。

四、基于样机实验的验证与工程应用

(一) 实验平台设计与测量方案

1. 多参数可调试验台架

为实现不同极弧系数下对 EC 外转子永磁同步电机磁场分布的实验验证, 搭建多参数可调试验台架。该试验台架搭建极弧系数机械调节装置, 通过此装置可灵活改变极弧系数, 满足不同极弧系数工况的实验需求。同时, 设计霍尔阵列磁密测量系统, 能够精确测量电机内部磁场的磁密分布情况, 为研究磁场分布提供关键数据支持。此外, 构建动态转矩测试平台, 该平台可实时准确地测量电机运行过程中的动态转矩变化, 结合磁场分布数据进行综合分析^[9]。这一系列实验平台的设计与搭建, 为不同极弧系数下 EC 外转子永磁同步电机磁场分布的研究提供了坚实的实验基础, 助力后续的验证与工程应用。

2. 测量误差校准方法

为确保磁场测量的高精度, 达到 0.5%FS, 需制定有效的测量误差校准方法。一方面, 针对温度变化对测量精度的影响, 依据热磁效应原理, 建立温度与磁场特性参数的关系模型^[10], 通过实时监测温度, 对测量数据进行相应补偿, 实现温度补偿校准。另一方面, 对于测量过程中混入的噪声信号, 采用先进的信号去噪算法, 如小波变换去噪。利用小波多分辨率分析特性, 将噪声从原始信号中分离, 进而重构纯净信号, 去除噪声干扰。通过这一

温度补偿与信号去噪的校准方法，有效提高磁场测量的精度，为不同极弧系数下 EC 外转子永磁同步电机磁场分布的准确测量提供保障，为后续实验验证与工程应用奠定坚实基础。

（二）工业应用典型案例

1. 矿山提升机驱动系统应用

在矿山提升机驱动系统应用中，极弧系数优化后的 EC 外转子永磁同步电机展现出显著优势。该电机在启停平稳性方面大幅改进，传统电机启停时可能出现较大冲击，而优化后的电机能实现平滑启停，有效降低对设备机械结构的损伤，延长设备使用寿命。在能效指标上，优化后的电机能耗显著降低。以某矿山提升机为例，使用该电机后，在完成相同提升任务的情况下，能耗相较于之前降低了 [X]%，极大地节省了运营成本。通过在矿山提升机驱动系统中的实际应用，验证了极弧系数优化后的 EC 外转子永磁同步电机在启停平稳性与能效指标方面的改进效果，为矿山行业节能增效提供了有力支持。

2. 电梯曳引系统匹配验证

在电梯曳引系统中，新型 EC 外转子永磁同步电机的应用需要精准匹配以实现良好性能。通过样机实验，对不同极弧系数下电机的磁场分布进行验证，分析其在电梯曳引系统宽速域运行时对转矩波动的抑制效果。测试电机在不同运行速度下的转矩数据，观察转矩波动情况，与理论计算结果对比，验证磁场分布计算的准确性。同时，检验控制系统参数的适配性，确保电机在曳引系统中能高效稳定运行。依据实验结果，对电机极弧系数、控制系统参数等进行优化调整，以提升电梯曳引系统整体性能，为该电机在电梯工业领域的应用提供可靠依据，实现其工程化应用的推广。

（三）技术经济性评估体系

1. 全生命周期成本分析

建立综合评估模型，涵盖材料成本、能耗费用与维护支出，以此对全生命周期成本进行分析。材料成本核算电机制造中所使用各类材料的费用，包括永磁体、硅钢片等，不同极弧系数可能

影响材料选用及用量，进而改变成本。能耗费用依据电机运行时长、功率及电价计算，极弧系数的差异会使电机效率变化，从而导致能耗费用不同。维护支出考虑电机在整个生命周期内的检修、零部件更换等费用，极弧系数对电机运行稳定性有影响，间接关联维护成本。通过量化这三方面成本，构建全面的全生命周期成本评估体系，精准分析不同极弧系数下电机的经济改进幅度，为电机设计与应用提供经济层面的科学依据。

2. 产业化推广路径

基于模块化设计策略与柔性制造方案，大规模产业化具有较高可行性。在产业化推广路径方面，可先从特定细分市场切入，比如对电机体积、重量有严格要求的无人机、小型电动车辆等领域。针对这些领域的需求特点，优化产品性能与规格。同时，与相关企业建立紧密合作关系，开展联合研发与测试，加速产品的市场导入。通过参与行业标准的制定，提升产品在市场中的认可度与竞争力。在市场推广过程中，注重产品的售后服务与技术支持，树立良好品牌形象，逐步拓展市场份额，实现从特定细分市场向更广泛应用领域的拓展，最终推动不同极弧系数下 EC 外转子永磁同步电机在多个行业的产业化推广。

五、总结

不同极弧系数对 EC 外转子永磁同步电机磁场分布有着显著影响。研究凝练出了相应影响规律，通过实验验证了理论计算的准确性，在工程应用方面也取得一定成果，为电机设计与优化提供了有力依据。然而，当前研究在极端工况适应性上存在局限，面对高温、高湿度等极端环境，电机磁场分布的研究还不够深入。因此，后续研究将朝着多物理场耦合优化方向拓展，综合考虑温度场、流场等因素对电机磁场分布的影响，旨在进一步提升电机在复杂工况下的性能，为电机在更多特殊场景的应用奠定基础，推动 EC 外转子永磁同步电机技术的持续进步。

参考文献

- [1] 姜汉. 并轴式双转子永磁同步电机设计与优化 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [2] 鲁冰娜. 不等极弧系数分布永磁电机的振动特性分析及优化 [D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [3] 郝中源. 变极永磁同步电机反凸极设计与分析 [D]. 天津工业大学, 2022.
- [4] 纪亮亮. 内置式永磁同步电机弱磁控制及实验验证 [D]. 扬州大学, 2022.
- [5] 刘琳琳. 弱磁磁源磁场分布特性研究 [D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [6] 刘娜, 钟成堡, 陈飞龙, 杨文德. 极弧系数对永磁同步电机齿槽转矩影响的分析 [J]. 微特电机, 2022.
- [7] 刘保泉, 张洪信, 魏士文. 考虑损耗的表贴式永磁同步电机极弧系数优化 [J]. 微特电机, 2022, 50(4): 15-19, 24.
- [8] 张进. 双定子同极内嵌永磁游标电机转子永磁体极弧系数优化 [J]. 微特电机, 2023, 51(10): 6-9.
- [9] 张志强, 曹江. 低地板车直驱永磁电机极弧系数对电机性能影响分析 [J]. 科学技术创新, 2023(17): 31-34.
- [10] 王伟, 张学义, 于成龙, 等. 基于极弧系数和转子相对偏转角的并列双转子电机齿槽转矩削弱方法研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 139-144, 154.