

基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机磁场与极弧系数探究

黄禄财

广东 肇庆 526600

DOI:10.61369/WCEST.2025110013

摘 要： 本文围绕外转子同步电动机在工业风扇产品中的应用展开研究，探讨其结构特点、磁场建模与分析等。通过多种方法优化极弧系数，研究其对电机性能影响，经实例验证优化方案有效，还基于 LCC 模型分析节能收益与生产工艺可行性，指出极弧系数优化提升电机性能，未来该电机将朝高频化、集成化发展。

关 键 词： 外转子同步电动机；极弧系数；工业风扇

Research on Magnetic Field and Pole Arc Coefficient of Ec Permanent Magnet Variable Frequency External Rotor Synchronous Motor Based on Industrial Fan Products

Huang Lucai

Zhaoqing, Guangdong 526600

Abstract： This paper focuses on the application of outer rotor synchronous motor in industrial fan products, and discusses its structural characteristics, magnetic field modeling and analysis. Through a variety of methods to optimize the pole arc coefficient, its impact on the motor performance is studied. The example shows that the optimization scheme is effective. Based on the LCC model, the energy-saving benefits and the feasibility of production process are analyzed. It is pointed out that the pole arc coefficient optimization can improve the motor performance, and the motor will develop towards high frequency and integration in the future.

Keywords： external rotor synchronous motor; pole arc coefficient; industrial fan

引言

随着《工业能效提升行动计划（2023–2025 年）》的颁布，提升工业领域电机能效成为重要发展方向。外转子同步电动机因其独特结构特点，在工业风扇产品应用中优势明显。从拓扑与电磁布局到磁场特性、转动惯量等方面，都与工业风扇适配良好。对其在 EC 永磁变频形式下的研究，涵盖永磁体磁场建模、磁场模拟分析、气隙磁密谐波探究、转矩与损耗关系等。通过多种方法优化极弧系数，可提升电机性能。结合工业风扇实例验证及全生命周期成本分析，为产业化提供支撑，助力实现工业风扇高效稳定运行及能效提升目标。

一、EC 永磁变频外转子同步电动机基本原理

（一）外转子同步电动机的结构特点

外转子同步电动机具有独特的结构特点，对其在工业风扇产品中的应用起着关键作用。从拓扑结构看，其定子在内部，转子在外部，这种布局与传统电机相反，使得电机的散热和安装更为便捷，与工业风扇的紧凑设计需求相匹配。在电磁布局方面，永磁体置于外转子上，能有效利用空间，增强气隙磁场强度，提高电机效率。气隙磁场特性与机电能量转换机制紧密相关，合理的气隙设计可优化磁场分布，减少磁场损耗，提升能量转换效率。外

转子结构使得电机的转动惯量较大，这在工业风扇的稳定运行中具有优势，能保证风扇转速的平稳。这种结构特点使外转子同步电动机在工业风扇产品中展现出良好的适配性，为优化工业风扇性能提供了有力支撑^[1]。

（二）永磁体磁场生成与调控原理

在 EC 永磁变频外转子同步电动机中，永磁体磁场的生成与调控至关重要。基于麦克斯韦方程组和安培环路定律，可对永磁体励磁磁场进行数学建模^[2]。永磁体产生的磁场是电动机运行的基础，其通过自身的固有磁性，在电机气隙中形成一个相对稳定的磁场。极数和极弧参数显著影响着磁场的空间分布。不同的极数决定了磁

场周期变化的频率，进而影响电机的转速特性；极弧参数则关乎磁场在空间上的分布形态，合适的极弧系数能优化气隙磁场波形，使磁场分布更均匀，减少谐波含量，提高电机的性能和效率。通过精确调控极数与极弧参数，可以有效优化永磁体磁场，满足工业风扇产品对 EC 永磁变频外转子同步电动机的性能需求。

二、外转子电机磁场分布数值分析方法

（一）有限元电磁场仿真模型构建

在基于 ANSYS Maxwell 建立三维瞬态磁场模型时，对于磁钢阵列布置方式，需结合工业风扇产品用 EC 永磁变频外转子同步电动机的实际结构，合理确定磁钢在转子上的排列形式，确保能准确模拟实际磁场情况^[3]。考虑到材料具有非线性特性，需精确设置各部件材料的非线性参数，如铁磁材料的 B-H 曲线等，以更真实地反映磁场分布。针对运动边界条件，由于外转子电机的转子处于旋转状态，应正确设置旋转区域及旋转速度等参数，让模型能够有效模拟电机运行时的动态磁场变化，从而实现对于工业风扇产品的外转子电机磁场分布的准确数值分析。

（二）气隙磁密谐波特征解析

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机研究中，通过 FFT 频谱分析来深入探究气隙磁密谐波特征。对不同极弧系数下的气隙磁场进行分布规律的对比，极弧系数的改变会显著影响气隙磁密谐波的构成与幅值^[4]。通过精确分析可清晰得知，不同极弧系数下哪些谐波成分占主导，哪些谐波幅值较小。而气隙磁密谐波畸变率与转矩脉动存在紧密关联机制。谐波畸变率的大小直接影响着转矩脉动的幅度，较高的谐波畸变率通常会导致更大的转矩脉动，深入解析气隙磁密谐波特征，有助于进一步理解外转子电机的性能，为优化极弧系数，降低转矩脉动，提升工业风扇用外转子电机的运行稳定性提供关键依据。

三、极弧系数优化设计方法研究

（一）极弧系数对电机性能的影响规律

1. 电磁转矩生成效率分析

建立转矩 - 极弧系数关系数学模型是探究电磁转矩生成效率的重要基础。通过该模型，可深入分析定转子磁势谐波匹配度对平均转矩及波动率的影响特性。定转子磁势谐波匹配程度不同，会使电机电磁转矩生成效率产生差异。当匹配度处于理想状态时，电机能够高效地将电能转化为机械能，平均转矩较大且波动率较小，有效提升电机运行稳定性与性能。若匹配不佳，电磁转矩生成效率会降低，导致电机输出能力受限、运行稳定性变差。研究表明，极弧系数与定转子磁势谐波匹配度紧密相关^[5]，合理选择极弧系数，可优化定转子磁势谐波匹配，从而提高电磁转矩生成效率，为工业风扇产品所用的 EC 永磁变频外转子同步电动机性能提升提供有力支持。

2. 铁损与涡流损耗关联性

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机中，

极弧系数与铁损及涡流损耗紧密相关。极弧系数的变化会影响电机内部磁场分布，进而改变铁损与涡流损耗的大小^[6]。当极弧系数不同时，铁芯磁密分布均匀性有所差异，这种差异导致铁芯各部分所受磁场作用不同，铁损也随之变化。同时，谐波磁场因极弧系数改变而改变，其引发的附加损耗中包含涡流损耗。研究表明，极弧系数较小时，谐波磁场相对较大，涡流损耗也会相应增加，而铁损与涡流损耗在这种情况下相互影响，共同作用于电机性能。因此，深入探究极弧系数对铁损与涡流损耗关联性的影响，对于优化电机设计、提升电机性能具有重要意义。

（二）多目标优化设计方法

1. 响应面模型与参数敏感性

基于田口实验法，构建极弧系数与性能指标的响应面模型，能够有效分析极弧系数对工业风扇产品用 EC 永磁变频外转子同步电动机各项性能指标的影响。通过该模型，将极弧系数作为变量，与电动机的效率、功率因数、转矩脉动等性能指标建立起函数关系^[7]。在构建响应面模型过程中，运用统计学方法对实验数据进行拟合与分析，得到能准确反映变量与指标关系的数学表达式。基于此模型，进一步确定关键参数的敏感度排序。这有助于明确极弧系数以及其他相关参数对电机性能影响程度的大小，为极弧系数的优化设计提供依据，以便在多目标优化设计中，优先调整敏感度高的参数，从而更高效地提升电动机整体性能。

2. 遗传算法优化策略

在基于工业风扇产品的 EC 永磁变频外转子同步电动机磁场与极弧系数探究中，遗传算法优化策略有着重要应用。该策略针对转矩密度、效率、成本等多约束条件展开。通过遗传算法的编码、选择、交叉和变异操作，对极弧系数进行搜索。在编码阶段，将极弧系数的可能取值范围进行合理编码。选择过程基于适应度函数，使得较优的极弧系数编码有更高概率被选中。交叉和变异操作则引入新的极弧系数组合，扩大搜索空间。在这个过程中，不断评估每个极弧系数编码对应的电机性能指标，依据多约束条件下的适应度函数，逐步筛选出更优解，以在多约束条件下进行 Pareto 最优解筛选，最终确定工业风扇电机的极弧系数优选范围^[8]。

四、工业风扇应用实例验证

（一）典型产品技术指标分析

1. 250W 外转子电机设计参数

对于 250W 外转子电机，在设计时需综合考虑诸多参数。从极数来看，依据工业风扇的实际运行需求，通常会选取合适的极数，以保障电机具备稳定的转速与转矩输出特性，满足风扇不同工况的运转要求^[9]。气隙长度对电机性能影响显著，合适的气隙长度既能减少磁路磁阻，降低励磁电流，又能避免因气隙过小导致的装配困难及运行可靠性问题。永磁体尺寸方面，永磁体的长度、厚度等尺寸需精确设计，以确保产生足够且合理的磁场强度，为电机高效运行提供必要的磁场条件。原始极弧系数配置同样关键，它与电机的磁场分布、转矩脉动等性能紧密相关，合理

的原始极弧系数配置可优化电机的整体性能，减少能量损耗，提升工业风扇的运行效率与稳定性。

2. 性能测试基准要求

对于工业风扇应用实例验证中的典型产品技术指标分析，性能测试基准要求至关重要。额定转速应严格遵循相关强制性技术标准，这是确保工业风扇能提供合适风量和风压的基础。例如，不同应用场景对风扇转速需求不同，在大型车间通风场景，需较高转速来实现空气快速流通。能效等级也需满足标准，高效的电机能效不仅能降低能耗，还符合绿色发展理念。温升限制同样不容忽视，过高的温升可能影响电机寿命与性能。需通过严谨的测试，如依据特定环境温度与负载条件模拟实际运行，来验证产品是否达到额定转速、满足能效等级及控制温升在限制范围内^[10]。通过这样的性能测试基准要求，准确评估典型产品技术指标，为工业风扇的高效稳定运行提供保障。

（二）优化方案对比验证

1. 电磁性能仿真对比

在工业风扇应用实例验证的优化方案对比验证中，电磁性能仿真对比尤为关键。通过仿真，可清晰展示优化前后气隙磁密波形的不同。优化前，气隙磁密波形可能存在一定程度的畸变，影响电机性能；优化后，波形更加平滑，趋近理想状态，有助于提升电机效率。转矩 - 转速曲线方面，优化前，转矩在某些转速区间波动较大，稳定性欠佳；优化后，转矩曲线更为平稳，能为工业风扇提供更稳定动力。铁损分布上，优化前铁损可能集中在某些特定区域，增加能量损耗；优化后，铁损分布更加均匀合理，降低整体损耗。这些差异特征直观呈现了优化方案对工业风扇用 EC 永磁变频外转子同步电动机电磁性能的显著影响。

2. 样机实测数据验证

在工业风扇应用实例验证中，将优化后的 EC 永磁变频外转子同步电动机应用于实际工业风扇场景。通过在不同工况下运行工业风扇，收集风扇的风量、风压以及电机的运行参数等数据。针对优化方案对比验证，对多种不同极弧系数的设计方案进行比较。从磁场分布、电磁力等方面分析各方案的差异，结合电机性能指标，评估不同方案对工业风扇性能提升的效果。对于样机实测数据验证，利用负载试验台对装配好的样机进行测试。精确测量电流谐波畸变率、系统效率等关键指标，将这些实测数据与仿真模型计算得出的数据进行细致对比。若实测数据与仿真数据偏差在合理范围内，表明仿真模型具有较高准确性，为进一步优化

电机设计提供可靠依据。

（三）产业化应用效益评估

1. 能效提升经济性分析

基于 LCC 全生命周期成本模型来量化工业风扇应用中能效提升带来的节能收益。通过实际应用案例，计算工业风扇采用 EC 永磁变频外转子同步电动机前后的能耗差异。详细分析在不同运行时长、电价条件下，因能效提升所节省的电费开支。同时，考虑设备初始购置成本、维护成本等，对比传统电动机与 EC 永磁变频外转子同步电动机在全生命周期内的成本支出。若节能收益大于额外的购置与维护成本增加量，表明该技术在能效提升方面具备良好的经济性，能为企业带来实际的经济效益，有助于推动其在工业风扇产业化应用中的进一步推广。

2. 生产工艺可行性验证

在生产工艺可行性验证方面，需着重评估优化后的极弧参数对永磁体充磁工艺及转子冲片加工精度的技术要求。针对永磁体充磁工艺，优化后的极弧参数可能改变充磁方向与强度需求，需验证现有充磁设备能否满足新要求，以及充磁工艺的调整是否会引入额外成本与时间消耗。对于转子冲片加工精度，极弧参数的改变会影响冲片形状与尺寸精度，要考察当前加工设备能否达到新的精度标准，加工过程中误差控制难度是否在可接受范围，以及新精度要求是否会致使废品率上升。通过全面验证这些方面，确定基于优化极弧参数的工业风扇生产工艺是否切实可行，为产品产业化奠定坚实基础。

五、总结

极弧系数优化对提升外转子永磁电机综合性能效果显著。它有效改善了电机磁场分布，降低了谐波含量，进而提升了电机效率与功率因数，减少了转矩脉动，增强了运行稳定性。基于此，针对工业风扇产品的电磁设计，需综合考量电机性能、运行工况及节能要求等因素，制定科学合理的设计准则，以实现工业风扇高效、稳定运行。展望未来，随着电力电子技术与材料科学的进步，工业风扇所应用的 EC 永磁变频外转子同步电动机将朝着高频化、集成化方向发展。高频化可减小电机体积与重量，集成化则能提升系统可靠性与紧凑性，为工业风扇产品带来更广阔的发展空间与应用前景。

参考文献

[1] 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.
[2] 同博. 复合实心转子永磁同步电动机的参数计算与性能分析 [D]. 山东大学, 2021.
[3] 段石磊. 九相永磁同步电动机变频开环控制的研究 [D]. 青岛大学, 2021.
[4] 陈洪燕. 车窗永磁有刷直流电机的研究与优化设计 [D]. 重庆邮电大学, 2022.
[5] 徐炀. 外转子磁场调制永磁电机设计与转矩脉动削弱研究 [D]. 江苏大学, 2022.
[6] 张进. 双定子同极内嵌永磁磁标电机转子永磁体极弧系数优化 [J]. 微特电机, 2023, 51(10): 6-9.
[7] 刘娜, 钟成堡, 陈飞龙, 等. 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, 50(8): 15-18.
[8] 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.
[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.