

移动机器人直驱电机电磁振动噪声 多目标优化算法与验证

吴华伟^{1,2}, 杜宇星^{1,2}, 张宁³, 刘凌⁴, 李蓓^{1,2}

(1. 湖北文理学院湖北隆中实验室, 441053, 湖北襄阳; 2. 湖北文理学院纯电动车动力系统设计与
测试湖北省重点实验室, 441053, 湖北襄阳; 3. 东南大学机械工程学院,
211189, 南京; 4. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对移动机器人轮式直驱电机运行中由电磁振动噪声引发的环境舒适性与定位感知干扰问题,提出了一种基于改进多目标蜉蝣算法(IMOMA)与参数扫描法(PSM)的协同优化策略。以外径为 355.6 mm 的外转子永磁同步轮式直驱电机为对象,通过定子开辅助槽、转子分段斜极的多目标结构优化设计,验证该策略的工程应用价值。通过引入双层轮盘选择与动态维度变换机制,增强 IMOMA 算法的全局搜索能力与 Pareto 前沿覆盖均匀性,结合 PSM 法构建辅助槽宽度、深度、旋转角度和分段斜极参数的多目标性能数据库,实现高效协同优化。基于多物理场耦合仿真模型验证优化方案的有效性,结果表明:优化后,机壳端盖振动加速度均值在转速为 600、1 200 r/min 时分别降低了 39.35、41.78 mm/s²;机壳-定子接触面与空气域 1 m 处的等效辐射功率分别减少 9.2、9.0 dB;噪声传播均匀性显著提升;当转速为 1 200 r/min 时,A 计权声压级降低 3.913 dB,噪声等级从 70 dB 级削弱至 60 dB 级,有效改善了噪声尖锐感与电机舒适性。该研究可为直驱电机低噪声设计提供理论依据。

关键词: 移动机器人;轮式直驱电机;电磁振动;改进多目标蜉蝣算法;噪声等级

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202610005 **文章编号:** 0253-987X(2026)10-0056-13

Multi-Objective Optimization Algorithm and Verification for Electromagnetic Vibration and Noise of Direct-Drive Motors in Mobile Robots

WU Huawei^{1,2}, DU Yuxing^{1,2}, ZHANG Ning³, LIU Ling⁴, LI Lang^{1,2}

(1. Hubei Longzhong Laboratory, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang, Hubei 441053, China; 2. Hubei Key
Laboratory of Pure Electric Vehicle Powertrain System Design and Test, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang,
Hubei 441053, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the issues of environmental comfort degradation and positioning interference caused by electromagnetic vibration and noise in wheel direct-drive motors of mobile robots during operation, a collaborative optimization strategy based on an improved multi-objective mayfly algorithm (IMOMA) and a parameter scanning method (PSM) was proposed. Taking an outer-rotor permanent magnet synchronous wheel direct-drive motor with an outer diameter of 355.6 mm as the research object, the engineering application value of this strategy was verified through the

收稿日期: 2025-12-16。

作者简介: 吴华伟(1979—),男,教授,硕士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助

项目(52472405)。

网络出版时间: 2026-03-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260302.1257.002>

multi-objective structural optimization design of auxiliary stator slots and a step-skewed rotor. By introducing a dual-layer roulette wheel selection and dynamic dimension transformation mechanism, the global search capability and the uniformity of Pareto front coverage of the IMOMA algorithm were enhanced. The approach combined with a PSM-constructed multi-objective performance database for auxiliary slot parameters (width, depth, rotation angle) and step-skewing parameters achieved efficient collaborative optimization. The effectiveness of the optimized solution was verified through a multi-physics coupled simulation model. The results show that the optimized motor exhibits the following: the average housing end-cap vibration acceleration was reduced by 39.35 mm/s^2 at 600 r/min and 41.78 mm/s^2 at 1 200 r/min; the equivalent radiated power was reduced by 9.2 dB at the stator-housing interface and by 9.0 dB at a distance of 1 m in the air domain; and noise propagation uniformity was significantly improved, with a 3.913 dB reduction in A-weighted sound pressure level at 1 200 r/min. This effectively lowered the noise level from the 70 dB range to the 60 dB range, mitigating noise harshness and enhancing motor comfort. This study provides a theoretical basis for the low-noise design of direct-drive motors.

Keywords: mobile robots; wheel direct-drive motor; electromagnetic vibration; improved multi-objective mayfly algorithm; noise level

近年来,移动机器人在仓储物流、园区运维与公共服务等场景快速普及,对底盘驱动系统提出了结构紧凑、低速大扭矩与快速响应、高效率与高可靠性以及近人体环境下低噪声运行等要求^[1-2]。为此,将驱动系统高度集成于车轮内部的轮式直驱电机(下文简称直驱电机),因省去机械传动链路、转动惯量小、能量路径短而受到广泛关注,可显著提升系统的动态品质与能效利用^[3-4]。然而,运行过程中的电磁致振和声辐射会引发壳体振动及离散谱噪声,既影响环境舒适性,又可能会干扰麦克风阵列同步定位与建图等感知模块,成为移动机器人静音化与系统集成关键瓶颈^[5]。围绕该问题,现有研究多从结构-电磁协同设计入手,通过定子齿形/开辅助槽、转子斜极(含分段斜极)和永磁体形状优化,重塑气隙磁密与电磁力波分布,并结合电流谐波抑制与调制策略进一步削弱离散谱线^[6-8]。

吴刚等^[9]基于田口法优化 8 极 12 槽永磁电机的极弧系数与辅助槽数,将齿槽转矩降低了 68.8%。梁建伟等^[10]通过定子齿开辅助槽,将 12 槽 10 极电机齿槽转矩最大降低了 91.8%。Xu 等^[11]提出辅助槽设计抑制内永磁电机转矩脉动,虽保持转矩幅值稳定,但缺乏误差分析。Yang 等^[12]引入 4 个辅助槽,将齿槽转矩减小了 69.5%,表明槽型与槽数量对低速力矩具有显著影响。

在复合优化方面,靖海宏等^[13]针对永磁同步电机电磁噪声问题,通过综合转子分段斜极、结构刚度

调整和抑制电流谐波,将电磁噪声降低了 3 dB(A) (dB(A)表示经过 A 计权网络修正的分贝单位),但未对优化方法的综合效能进行系统评价。高蒙真等^[14]提出一种基于能量法与傅里叶分解的转子多参数复合优化方法,通过响应面法对极弧系数、斜极角度和分段数进行协同设计,将五相永磁电机的齿槽转矩降低了 82.3%,但其优化结果仅限于静态工况。Yan 等^[15]建立了考虑磁极边缘效应的分段斜极转矩抑制模型,理论计算得到的基波分量降低了 76%,但未分析长期磁极退化影响。上述研究虽在单一参数优化上成效显著,但对多参数协同分析、动态工况适应性及长期稳定性的系统探讨仍显不足。

值得注意的是,新型电机结构设计为振动噪声优化提供了新路径。Choe 等^[16]提出一种新型表面永磁同步电机(N-SPMSM),将不对称磁体固定于转子表面,在降低结构复杂性和抑制电磁性能衰减方面表现优异。通过与环形表面永磁同步电机和分段斜极表面永磁同步电机对比,N-SPMSM 在齿槽转矩和反电动势方面与二者性能相当,且制造工艺复杂度降低了 23%,但在不同工况下的长期稳定性与实验数据仍缺系统支撑。由此可见,虽在辅助槽与分段斜极等结构优化上已取得进展,但动态多物理场耦合验证与多目标权衡仍是瓶颈。

面向移动机器人轮式直驱电机的电磁振动与噪声抑制研究亦显示出类似规律:通过辅助槽设计^[17]与分段斜极^[18]可显著削弱特定谐波分量^[19],但其

工程应用仍受限于传统方法对单变量迭代与静态工况的依赖^[20],导致多参数非线性耦合失衡,以及新型拓扑结构因缺乏动态多物理场验证而存在的长期稳定性争议^[21]。为此,本文的主要内容包括:提出改进多目标蜉蝣算法,引入动态维度优化与双层轮盘选择机制增强多参数协同能力;构建基于参数扫描法的辅助槽与分段斜极多参数性能数据库,支撑动态工况高效决策;设计融合智能算法的电机结构优化框架,通过电磁-结构-声场耦合模型探索电磁振动噪声抑制路径,为直驱电机噪声控制提供理论支撑。

1 问题描述

分段斜极设计通过调整斜极角度与段数优化磁通分布,增强平均转矩输出,并改善直驱电机在不同工况下的转矩稳定性^[22]。其改善转矩脉动的机理在于分段斜极通过优化极形分布与磁路对称性,减小磁阻波动,进而平滑转矩输出^[23]。然而,斜极角度与段数的组合对转矩性能具有显著影响,需通过多目标优化实现参数协同设计。因此,本文开展了以斜极段数和斜极角度为设计因子,以平均转矩 T_{avg} 和转矩脉动 T_{rip} 为响应的多目标优化问题研究。为进一步削减电磁振动噪声,在分段斜极的基础上引入定子齿双辅助槽设计,辅助槽参数包括深度、宽度和旋转角度,其中双辅助槽对称分布于定子齿部,以平衡磁通分布并削弱径向电磁力谐波。

基于上述分析,直驱电机结构优化问题可转化为一个多目标优化问题,其中自变量为辅助槽宽度

X_1 、辅助槽深度 X_2 、辅助槽旋转角度 X_3 、斜极角度 X_4 和斜极段数 X_5 ,因变量为平均转矩 Y_1 与转矩脉动 Y_2 。

为验证该多目标优化方法的工程适用性,以 18 槽 16 极内置式外转子永磁同步电机为研究对象,面向移动机器人轮式直驱应用。该电机采用分数槽拓扑,通过优化气隙磁密对称性与谐波抑制,可实现高功率密度、高效率 and 优良的低速大扭矩输出,适用于移动机器人底盘的轮式直驱系统。其结构拓扑如图 1 所示。

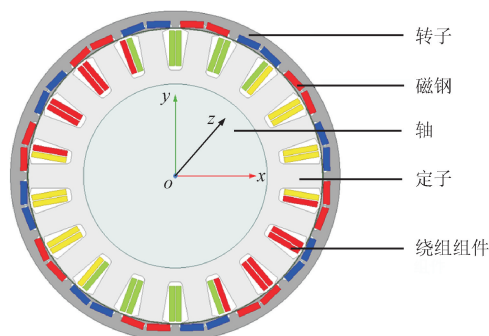


图 1 直驱电机结构拓扑

Fig. 1 Structural topology of direct-drive motor

电枢绕组方式为集中式绕组,三相绕组连接方式为 Y 型双层绕组,可有效保证电流和电压平衡,降低谐波影响,提供较大的起动转矩和提高功率密度。其具体布置方式如图 2 所示。图中,1~19 为定子绕组槽编号,U、V、W 为电机三相线首端,M1、M2、N1、N2、Z1、Z2 分别为 U、V、W 的末端。

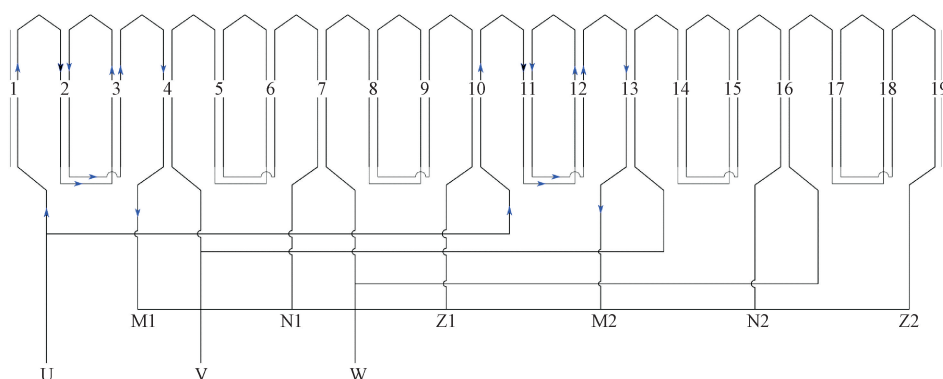


图 2 电枢绕组布置方式

Fig. 2 Arrangement of armature winding

直驱电机的主要设计参数如表 1 所示,其中硅钢片材料型号为 M250-35A,永磁材料型号为 N45UH。

定义转矩脉动为

$$T_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (1)$$

式中: T_{max} 、 T_{min} 分别为最大和最小转矩。

因此,本文设计的多目标函数模型可表示为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \\ \text{s. t. } 0.1 \text{ mm} \leq X_1 \leq 3.5 \text{ mm} \\ \quad 0.5 \text{ mm} \leq X_2 \leq 5.0 \text{ mm} \\ \quad 1^\circ \leq X_3 \leq 4^\circ; 1^\circ \leq X_4 \leq 5^\circ; 2 \leq X_5 \leq 5 \end{cases} \quad (2)$$

表 1 直驱电机设计参数

Table 1 Design parameters of direct-drive motor

参数	数值	参数	数值
额定转矩/(N·m)	180	峰值扭矩/(N·m)	500
额定功率/kW	10	峰值功率/kW	25
额定转速/(r·min ⁻¹)	530	最高转速/(r·min ⁻¹)	1 200
定子外径/mm	139.25	转子外径/mm	156.15
轴向长度/mm	60	气隙宽度/mm	0.75
极数 2	16	槽数	18

2 改进多目标蜉蝣算法

2.1 传统蜉蝣算法(MOMA)

传统蜉蝣算法(MOMA)^[24]模拟蜉蝣群体在交配季节的飞行与协作行为,通过全局探索与局部开发的动态平衡实现多目标优化,其核心流程如下。

2.1.1 种群初始化

随机生成雄性蜉蝣和雌性蜉蝣的初始位置,每个个体位置对应优化问题的解向量。

2.1.2 雄性蜉蝣运动

雄性个体根据历史最优位置和全局最优位置调整速度,若当前解被支配,则通过随机舞蹈系数更新位置。具体计算式如下

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + a_1 e^{-\beta r_p^2} (P_{ij} - x_{ij}^t) + a_2 e^{-\beta r_g^2} (G_j - x_{ij}^t) \quad (3)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + dr \quad (4)$$

式中: v_{ij}^t 为第 t 代蜉蝣 i 在 j 维中的速度; x_{ij}^t 为第 t 代雄性蜉蝣 i 在 j 维中的位置; a_1 、 a_2 为正吸引系数; P_{ij} 为蜉蝣个体 i 在 j 维中的最佳位置; G_j 为全局最优位置; β 为能见度因子; r_p 为当前位置与 P_{ij} 之间的距离; r_g 为当前位置与 G_j 之间的距离; d 为舞蹈系数; r 为 $[-1, 1]$ 中的随机数。

2.1.3 雌性蜉蝣运动

雌性蜉蝣的运动受到雄性蜉蝣的支配,若雄性蜉蝣优于雌性蜉蝣,则雌性蜉蝣速度更新如下

$$v_{ij}^{t+1} = gv_{ij}^t + a_2 e^{-\beta r_{mf}^2} (x_{ij}^t - y_{ij}^t) \quad (5)$$

否则,更新如下

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_f r \quad (6)$$

式中: y_{ij}^t 为第 t 代雌性蜉蝣 i 在 j 维中的位置; g 为惯性权重系数; r_{mf} 为雌、雄个体之间的距离; c_f 为随机飞行系数。

2.1.4 交配与后代生成

蜉蝣交配首先遵循最优父代和最优母代交配,第二优父代与第二优母代交配,以此类推的原则。交配过程模拟重新组合父本和母本的方案产生两个新方案的过程如下

$$O_1 = \mu X_m + (1 - \mu) X_f \quad (7)$$

$$O_2 = \mu X_f + (1 - \mu) X_m \quad (8)$$

式中: O_1 、 O_2 分别为交配产生的第 1、2 子代个体; X_m 为父本蜉蝣; X_f 为母本蜉蝣; μ 为 $[0, 1]$ 中的随机数。

2.2 改进多目标蜉蝣算法(IMOMA)

针对传统多目标蜉蝣算法在解多样性、收敛速度及高维问题适应性上的不足,提出基于双层轮盘选择与动态维度变换的后代变异机制。通过分层筛选策略,平衡全局探索与局部开发能力,避免种群过早陷入局部最优;引入动态维度交互机制,增强算法对复杂参数耦合问题的鲁棒性,确保搜索空间的高效覆盖。上述策略通过优化解的分布均匀性与 Pareto 前沿完整性,显著提升了多目标优化效能,为直驱电机电磁振动噪声抑制等工程问题提供理论支撑。图 3 展示了双层轮盘选择策略中,变异的后代与区间经过双层轮盘选择随机匹配,确定变异后代及该后代的变异区间。其中黑色箭头代表选择指针,白色箭头代表各层轮盘的旋转方向。

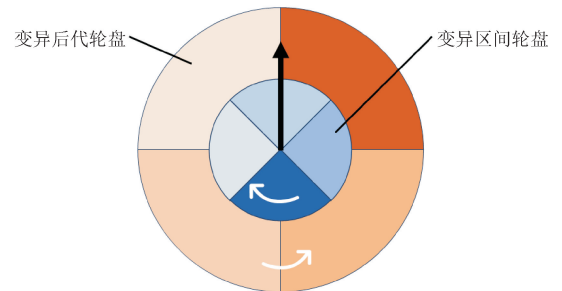


图 3 双层轮盘示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double-layer roulette

维度变化策略作用于全局最佳阶段。当种群的自适应值连续 5 代没有变化(或变化范围小于 10^{-3})时,会触发维度交换变化机制。维度变化规则如下:若种群维数为 D ,随机选取两个整数 p 和 q ,满足 $1 \leq p < q \leq D$,对全局最佳个体的第 $p \sim q$ 维进行对称交换。若新生成的个体适应值更优,则更新全局最佳个体,保留进化优势。其具体过程如图 4 所示。

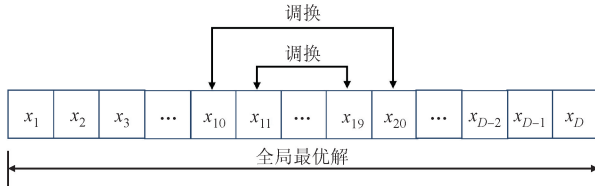


图 4 维度变换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dimensional transformation

2.3 考虑 Pareto 前沿

在多目标优化中, Pareto 前沿是由无法不牺牲某一目标前提下, 改善其他目标的解构成的最优解集。对于有 m 个目标函数的优化问题, 设定决策变量为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 目标函数为 $f_i(\mathbf{x}) (i = 1, 2, \dots, m)$ 。若不存在解 $\mathbf{x}$, 使得 $\mathbf{x}$ 在所有目标函数上的表现均不劣于 $\mathbf{x}^*$, 且至少在一个目标函数上严格优于 $\mathbf{x}^*$, 则解 $\mathbf{x}^*$ 就是 Pareto 最优解。形式化地, 解 $\mathbf{x}^*$ 是 Pareto 最优解的条件为

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x}^*) \quad (9)$$

且

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, m\}, f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{x}^*) \quad (10)$$

在多目标优化中, 若解 x_1 在所有目标上的表现均不劣于解 x_2 , 且至少在一个目标上严格优于解 x_2 , 则称解 x_1 支配解 x_2 , 记为 $x_1 < x_2$, 表达式为

$$f_i(x_1) \leq f_i(x_2), \forall i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

且

$$\exists j, f_j(x_1) < f_j(x_2) \quad (12)$$

若解 x_1 支配解 x_2 , 则解 x_2 在多目标优化问题中视为劣解, 而解 x_1 为优解。所有 Pareto 最优解 (非支配解) 构成的集合即为 Pareto 前沿 P , 其数学定义为

$$P = \{x \in \mathbf{R}^n \mid \forall y = x, f_i(y) > f_i(x), i = 1, 2, \dots, m\} \quad (13)$$

式中: P 为所有 Pareto 最优解集合。

Pareto 理论为多目标优化问题提供了理论支持, 使得多个目标之间能够采用 Pareto 最优解集进行有效描述。通过 Pareto 支配关系和 Pareto 前沿的构建, 可合理平衡多个目标, 从而得到一组最优解供决策者选择。将 Pareto 与蜉蝣算法结合, 得到多目标蜉蝣算法如图 5 所示。

2.4 IMOMA 求解器与参数扫描法 (PSM) 数据库

传统多目标建模方法因理论假设局限、目标定义主观性及冲突处理不足, 导致应用受限。本文提出基于 PSM 的求解模型, 可规避复杂理论依赖, 直

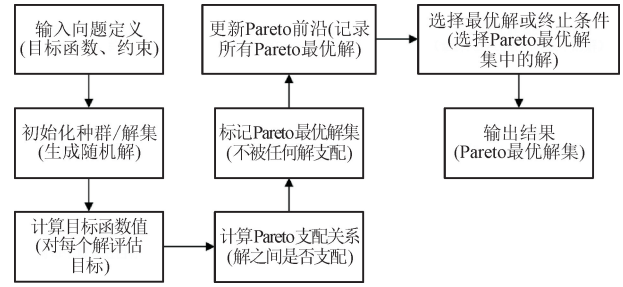


图 5 多目标蜉蝣算法流程图

Fig. 5 Multi-objective mayfly algorithm flow chart

接通过多维离散参数扫描生成如图 6 所示的高精度性能数据库, 输入 5 个变量即可输出目标响应。结合改进协同优化算法对数据库高效寻优, 输出 Pareto 最优解, 模型可靠性得到显著提升。

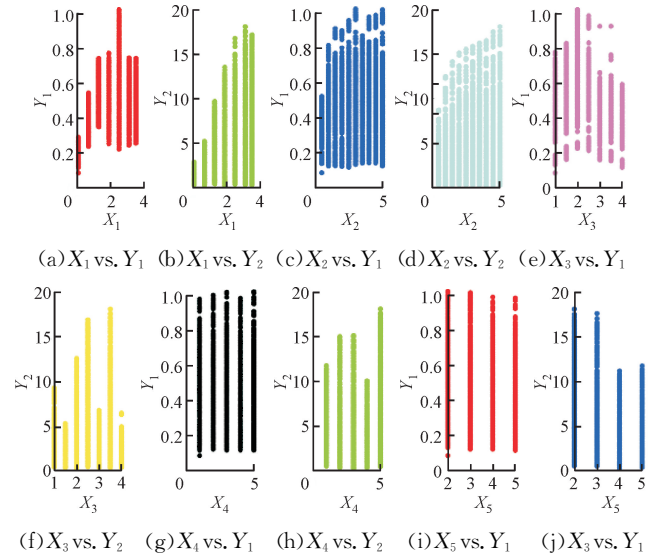


图 6 PSM 数据库可视化处理结果

Fig. 6 Results of visualization processing of PSM database

为验证 IMOMA 算法的优越性, 选取 8 组标准测试函数, 对比 IMOMA、MOMA 和多目标粒子群优化算法 (MOPSO)^[25] 3 种算法的优化性能, 从解集质量、收敛性和多样性 3 方面进行评估, 得到的结果如图 7 所示。由图可见, IMOMA 算法在解集质量、收敛性和多样性方面均显著优于对比算法。对于测试函数 1、4, IMOMA 算法的优化结果分布更均匀, 解集更接近 Pareto 前沿, 表现出更高的解集质量; 对于测试函数 3、6, IMOMA 算法体现出更强的全局搜索能力, 能够跳出局部最优, 获得更具竞争力的解。此外, IMOMA 算法在解决复杂多目标问题, 特别是高维目标函数时, 展现出更高的计算效率和稳定性。这主要得益于其引入多维优化策略, 通过精确的适应度评估机制, 有效引导算法在复杂解

空间中的搜索,避免过早收敛和解的重复。综上,IMOMA 算法在多目标优化问题中在解的质量、收敛性和多样性方面均优于 MOMA 和 MOPSO 算法,展现出更高的实际应用潜力。

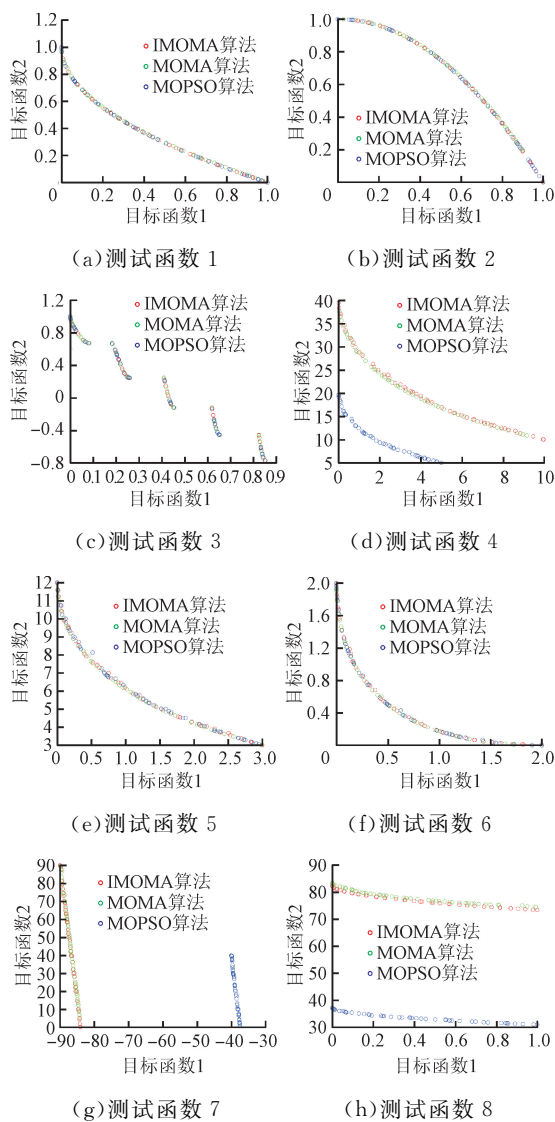


图 7 3 种算法下 8 组标准测试函数的对比结果

Fig. 7 Comparison results of eight sets of standard test functions under three algorithms

为验证 IMOMA 求解器的有效性,基于直驱电机参数扫描数据库,将其与 MOMA 和 MOPSO 算法进行对比分析,结果如图 8 和图 9 所示。从中可见,3 种算法分别生成 50 组 Pareto 前沿解集,其中 IMOMA 算法的解集分布更密集且逼近真实前沿,显著优于 MOMA 与 MOPSO 算法,验证了其双层轮盘与动态维度变换机制的有效性。通过权衡工程需求与 Pareto 解,确定最优参数组合为 $X_1 = 0.10 \text{ mm}$, $X_2 = 2.13 \text{ mm}$, $X_3 = 4^\circ$, $X_4 = 1.8^\circ$, $X_5 = 5$ 。

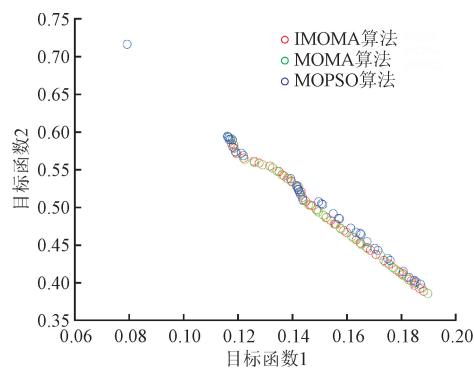


图 8 求解器寻优结果对比

Fig. 8 Comparison of optimization results obtained by solvers

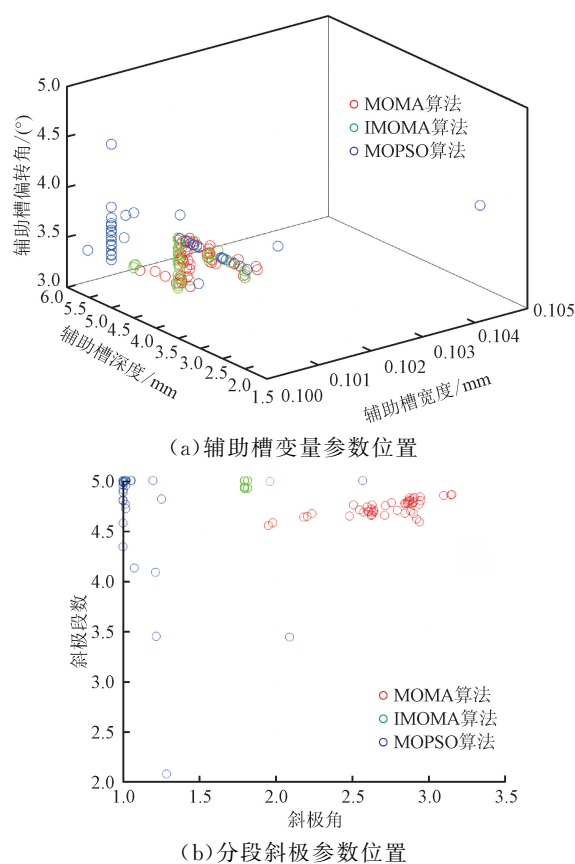


图 9 Pareto 参数变量位置

Fig. 9 Location of Pareto parameter variables

3 多物理场耦合电磁振动噪声仿真

仿真分析流程遵循递进逻辑。首先,通过电磁有限元模型验证确保仿真结果的可靠性,为后续分析奠定基础;其次,聚焦气隙处径向与切向电磁力的对比,明确振动噪声的物理来源;随后,构建多物理场耦合模型,模拟电磁-结构-声场交互作用下的噪声传播过程;最后,基于谐波域声场分析量化噪声削减效果,全面验证优化方案的有效性。

3.1 电磁有限元模型验证

为了验证有限元模型的准确性,采用优化前初始设计方案样机,在空载反拖工况下由测功机将其转速控制在 600~1 200 r/min,测得电机的反电动势基波幅值,并与有限元仿真模型预测值进行对比。实验测试平台如图 10 所示。

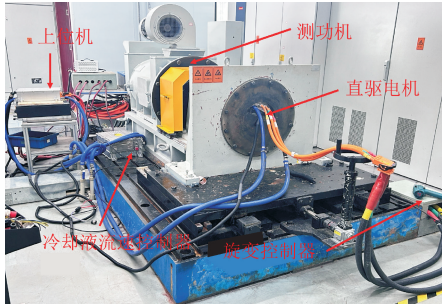


图 10 直驱电机反电动势测试实验平台

Fig. 10 Testing experimental platform for direct-drive motor back electromotive force

将待测电机安装于测功机台架,保持三相输入端开路。采用测功机拖动电机,在电机运行无异常条件下,转速范围设定为 600~1 200 r/min,转速间隔设定为 100 r/min。待转速稳定后,采用示波器连续采集输出端反电动势数据。通过外部动力源模拟空载工况,结合绕组切割磁感线产生电动势的物理机制,获取不同转速下的实测反电动势波形。

测试结果如表 2 所示。由表可知,仿真与实测得到的反电势幅值均随转速呈线性增长,符合理论规律,且两者最大误差为 3.08%,最小误差为 1.44%。600~1 000 r/min 低转速下,误差范围为 1.54%~3.08%;1 100~1 200 r/min 高转速下,误差范围为 1.44%~1.93%。这表明该模型在空载工况下具有较高可靠性,为后续多物理场耦合分析提供了有效支撑。

表 2 仿真与实验结果的对比

Table 2 Comparison between simulation and experimental results

转速/ (r · min ⁻¹)	仿真反电势 幅值/V	测试反电势 幅值/V	误差/%
600	102.6	104.2	1.54
700	119.7	123.5	3.08
800	136.9	141.1	2.98
900	154.0	158.6	2.90
1 000	171.1	176.0	2.78
1 100	188.2	191.9	1.93
1 200	205.3	208.3	1.44

3.2 气隙处径向和切向电磁力密度对比

由 Maxwell 方程推导出径向电磁力密度的表达式为

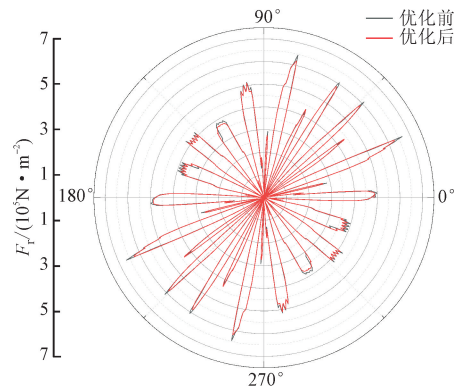
$$F_r(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2(\theta, t) - B_t^2(\theta, t)) \approx \frac{1}{2\mu_0}B_r^2(\theta, t) \quad (14)$$

式中: B_r 为径向气隙磁密; B_t 为切向气隙磁密; θ 为定子齿中心线与永磁体中心线之间的夹角; μ_0 为空气磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

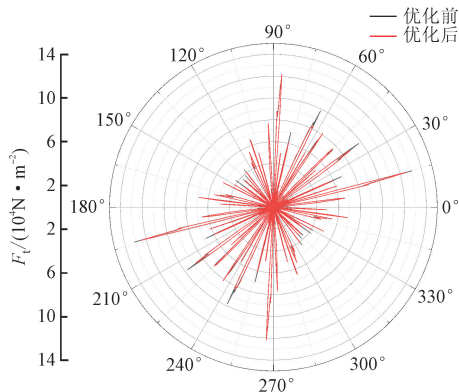
同理,可得切向电磁力密度表达式

$$F_t(\theta, t) = \frac{1}{\mu_0}B_r(\theta, t)B_t(\theta, t) \quad (15)$$

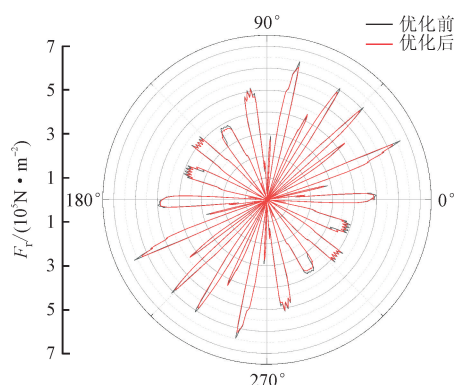
基于有限元仿真分析,对比了 600、1 200 r/min 空载工况下,直驱电机优化前、后的气隙电磁力密度特性,结果如图 11 和表 3 所示。从中可见,优化后的径向和切向电磁力密度幅值均显著降低,其中径向电磁力密度下降更为显著,在两种工况下均减少了 $570 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,远高于切向电磁力密度的减少量 11.28、 $49.8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。优化前,径向电磁力密度均值约为 $232 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,是切向力密度的数千倍,表明其才是引发电机振动的主导因素。仿真结果验证了优化策略对削弱电磁力谐波的有效性,为振动噪声抑制提供了理论依据。



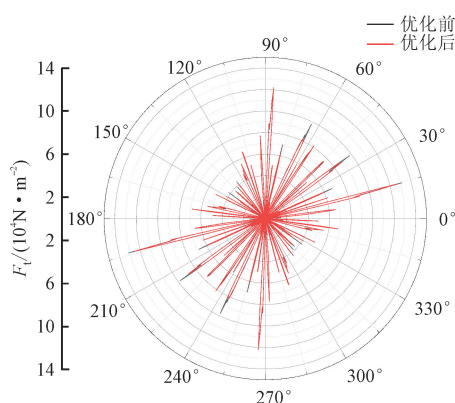
(a) 径向电磁力密度, 600 r/min



(b) 切向电磁力密度, 600 r/min



(c) 径向电磁力密度, 1 200 r/min



(d) 切向电磁力密度, 1 200 r/min

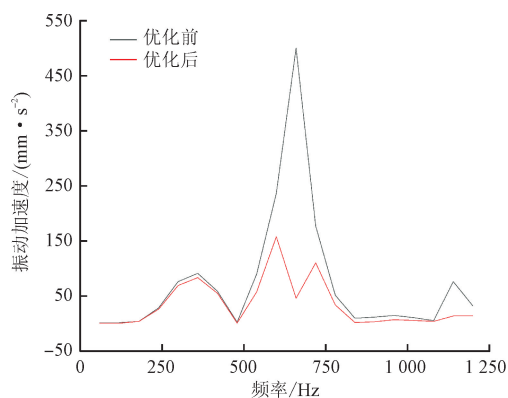
图 11 切向和径向电磁力密度波形分布的对比

Fig. 11 Comparison of waveform distribution of tangential and radial electromagnetic force density

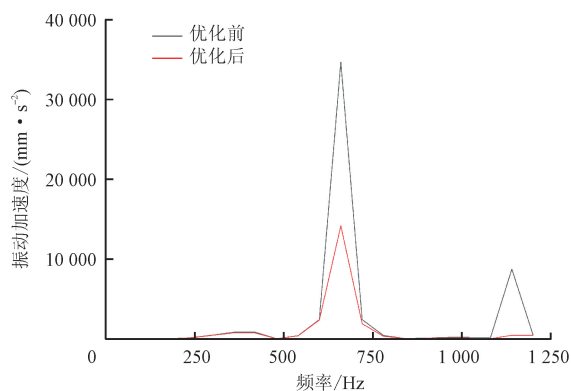
表 3 切向和径向电磁力均值的对比

Table 3 Comparison of mean values of tangential and radial electromagnetic forces

转速/(r·min ⁻¹)	电磁力密度/(N·m ⁻²)	优化前	优化后
600	径向	232 210	231 640
	切向	85.76	74.48
1 200	径向	232 170	231 600
	切向	105.07	55.27



(a) 机壳端盖, 600 r/min



(b) 机壳内侧, 600 r/min

3.3 多物理场耦合电磁振动噪声仿真

为了验证协同优化方法的抑振效果,构建涵盖电磁场、结构场和声场的多物理场耦合仿真模型,如图 12 所示。

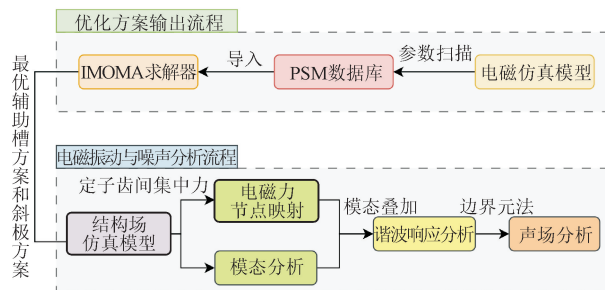


图 12 多物理场耦合仿真流程

Fig. 12 Flow chart of multi-physical field coupling simulation

基于参数扫描法对辅助槽和分段斜极的设计空间进行全参数分析,生成高精度性能数据库,并通过改进多目标蜉蝣算法快速寻优,获得最优结构参数。通过监测机壳端盖径向振动与内侧轴向振动的加速度响应,对比优化前、后的振动特性,结果如图 13 和表 4 所示。从中可见,在 600、1 200 r/min 空载工况下,优化后的机壳端盖与内侧振动加速度均值显著降低,其中机壳端盖分别减少了 39.35、41.78 mm/s²,内侧分别减少了 1 507.500、75.873 mm/s²。此外,第 5~13 阶和第 19~20 阶振动分量的降幅尤为显著,仅有少数低阶分量出现小幅波动。上述结果验证了优化方案在削弱电磁振动谐波和提升电机运行平稳性方面的有效性。

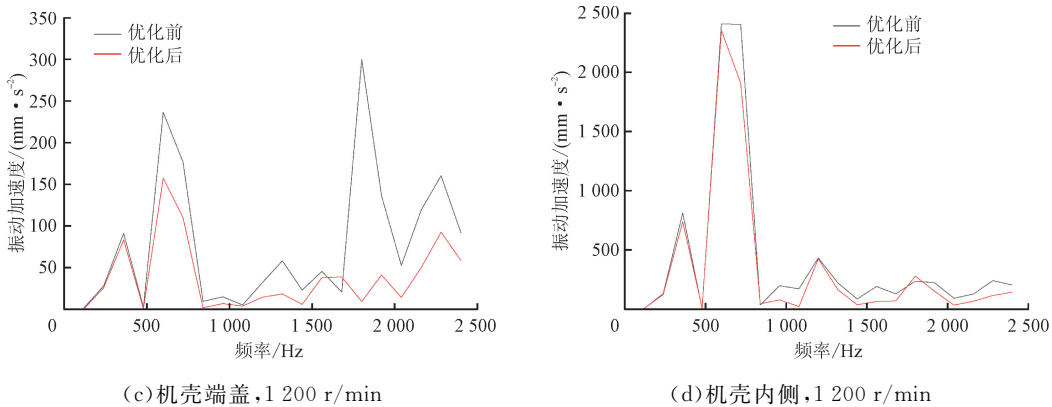


图 13 优化前、后机壳端盖与内侧振动特性的对比

Fig. 13 Comparison of vibration characteristics between the front and rear casing end caps and the inner side before and after optimization

表 4 不同阶数下的振动加速度减小量

Table 4 Reduction of vibration acceleration at different orders

阶数	振动加速度减小量/(mm·s ⁻²)			
	转速为 600 r/min		转速为 1 200 r/min	
	机壳端盖	机壳内侧	机壳端盖	机壳内侧
1	0.64	−0.57	1.11	−1.01
2	1.11	−1.01	2.39	7.14
3	0.01	0.64	8.00	74.19
4	2.39	7.14	1.95	−8.27
5	7.13	35.16	78.95	55.00
6	8.00	74.19	67.04	498.50
7	3.92	83.62	7.87	−9.95
8	1.95	−8.27	8.09	119.59
9	32.72	23.21	1.25	149.25
10	78.95	55.00	17.64	7.78
11	454.23	20 524.00	39.82	58.17
12	67.04	498.50	17.11	48.20
13	17.93	101.37	7.56	126.52
14	7.87	−9.95	−18.49	58.85
15	8.44	47.29	291.03	−41.97
16	8.09	119.59	95.33	71.15
17	5.11	135.22	38.61	59.00
18	1.25	149.25	69.32	60.82
19	62.69	8 307.33	67.91	124.69
20	17.64	7.78	33.29	59.81

3.4 谐波场和声场结果分析

采用等效辐射功率(ERP)估计从振动结构表面传播的辐射声功率量级,计算式为

$$P_{\text{ERP}} = \frac{1}{2} \delta C_{\rho} \sum_{i=1}^n A_i v_i^2 \tag{16}$$

式中: P_{ERP} 为等效辐射功率; δ 为辐射损耗因子;

C 为声速; ρ 为流体密度; A_i 为单元面积。

为了便于处理大范围数值并对其进行评价,需要对声功率 P_{ERP} 进行对数处理。定义声功率级 L_w 为测量得到的声功率与国际公认参考声功率的比值,表达式如下

$$L_w = 10 \lg(PP_{\text{ERP}}/R) \quad (17)$$

式中:用于计算的缩放因子 $P = 1.0$; R 为声功率参考值,取 1.0×10^{-12} W。

为了量化结构优化对电磁振动噪声的抑制效果,对比分析优化前、后机壳-定子接触面和空气域 1 m 处的等效辐射功率,结果如图 14~15 所示。

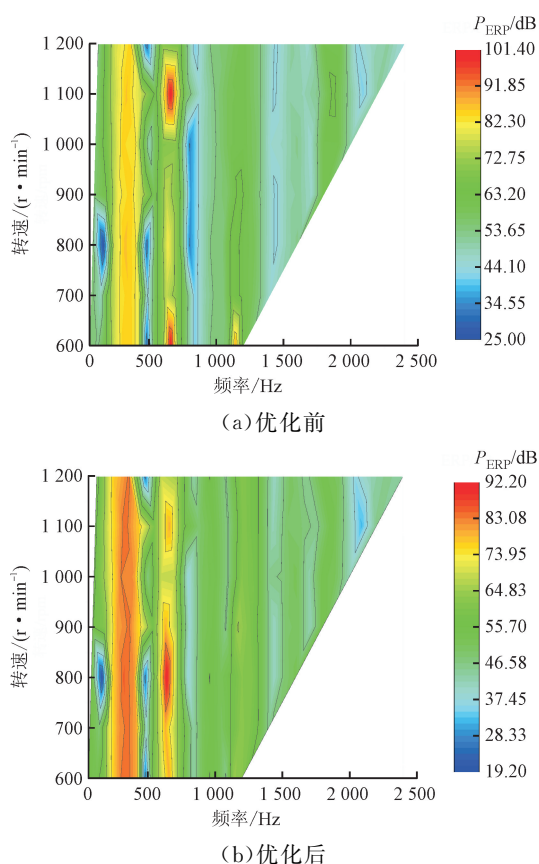
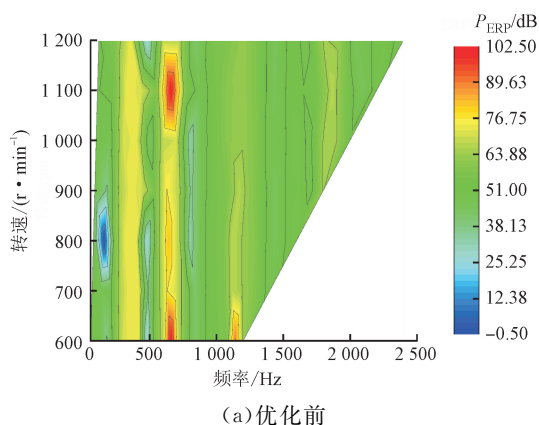
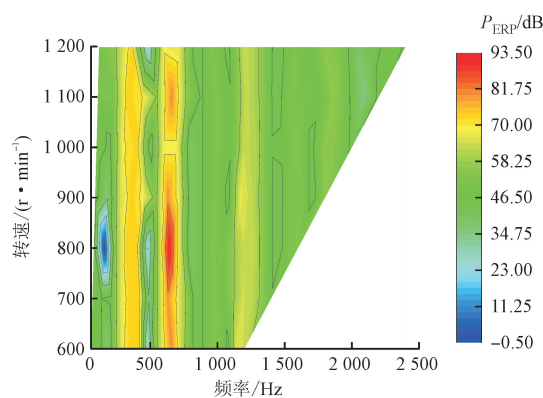


图 14 优化前、后接触面的等效辐射功率

Fig. 14 P_{ERP} of contact surface before and after optimization



(a) 优化前



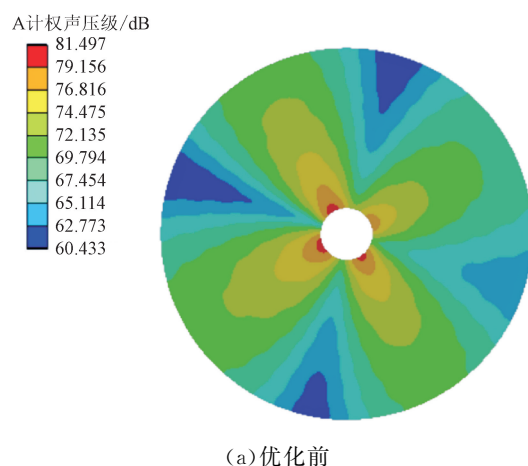
(b) 优化后

图 15 优化前、后空气域 1 m 处的等效辐射功率

Fig. 15 P_{ERP} at a distance of 1 meter from the air domain before and after optimization

由图 14、15 可见,接触面等效辐射功率峰值从 101.4 dB 降至 92.2 dB,降低了 9.2 dB;空气域等效辐射功率峰值从 102.5 dB 降至 93.5 dB,降低了 9.0 dB,且声压空间分布均匀性得到显著提升。这表明,IMOMA-PSM 协同优化策略通过削弱 5、6 阶电磁力谐波(降幅 62%)和优化机械阻抗匹配,实现了振动能量高效耗散与噪声辐射抑制,验证了多物理场耦合优化策略的有效性。

A 计权标准作为音频测量的核心权重曲线,基于人耳听觉特性对声压和频率进行加权修正,能够客观反映噪声的主观感知特性。基于空载工况下 600 r/min 转速开展仿真分析,得到优化前、后空气域 1 m 处的 A 计权声压级分布如图 16 所示。从中可见,优化后的声压级峰值降低了 0.328 dB,且声压级空间分布均匀性得到显著提升。这一特性表明,优化方案有效削弱了直驱电机噪声频谱中高频成分的能量集中现象,降低了噪声尖锐度,提升了直驱电机的声学舒适性。



(a) 优化前

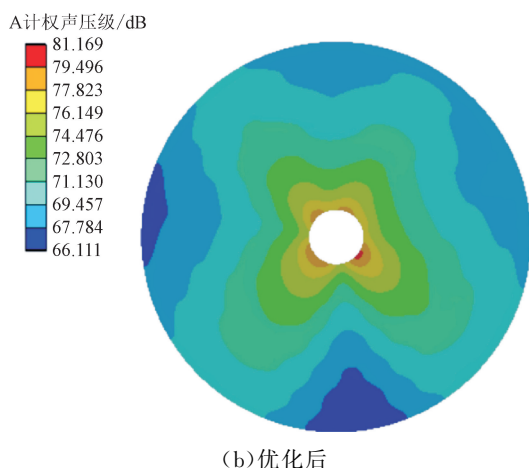


图 16 转速为 600 r/min 时优化前、后空气域 1 m 处的 A 计权声压级分布

Fig. 16 A-weighted distribution at a distance of 1 meter from the air domain before and after optimization with a rotational speed of 600 r/min

优化前、后空载工况下,转速为 1 200 r/min 时空气域 1 m 处的 A 计权分布如图 17 所示。

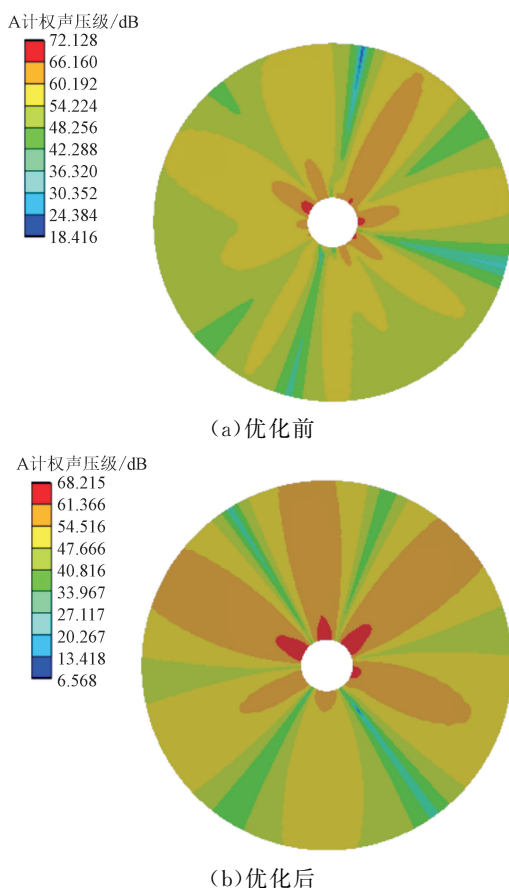


图 17 转速为 1 200 r/min 时优化前、后空气域 1 m 处的 A 计权声压级分布

Fig. 17 A-weighted distribution at a distance of 1 meter from the air domain before and after optimization with a rotational speed of 1 200 r/min

对比后可知,优化前的声压级峰值为 72.128 dB,优化后为 68.215 dB,有效降低了 3.913 dB。从空气域的传播可以看出,优化后的传播更加均匀;同时,在高转速下,噪声从 70 dB 级减小到 60 dB 级,直驱电机的电磁振动噪声得到明显改善。

4 结 论

本文提出了一种融合 IMOMA 与 PSM 的直驱电机多目标结构优化方法,以外径为 3 556 mm 的外转子永磁同步轮式直驱电机为研究对象,基于辅助槽和分段斜极,实现了电磁振动噪声的优化。研究得到以下主要结论。

(1) 基于双层轮盘与维度变化改进了蜉蝣算法,并结合 Pareto 理论设计了改进多目标蜉蝣算法求解器。通过 PSM 原理建立直驱电机辅助槽与分段斜极数据库,通过 IMOMA 求解对 PSM 数据库进行寻优,给出辅助槽和分段斜极方案的最佳参数为: $X_1 = 0.10$ mm, $X_2 = 2.13$ mm, $X_3 = 4^\circ$, $X_4 = 1.8^\circ$, $X_5 = 5$ 。

(2) 构建电磁场、结构场、谐波场和声场的多物理场耦合仿真模型,对比验证了优化前后的电磁振动噪声性能。结果表明:机壳与定子接触面处的等效辐射功率降低了 9.2 dB,空气域 1 m 处的等效辐射功率降低了 9.0 dB,电磁振动噪声性能得到有效改善;空气域中,A 计权声压级峰值在转速为 600 r/min 时减小了 0.328 dB,在 1 200 r/min 时减小了 3.913 dB,且优化后的噪声在空气域中传播更加均匀;最高转速下,噪声从 70 dB 级下降到 60 dB 级,声品质和运行平稳性得到明显改善。

研究结果为直驱电机减振降噪提供了理论依据与优化范式。后续将在此基础上开展样机实验验证,并进一步探索该协同优化策略在不同负载与复杂路况下的适应性,为移动机器人高性能驱动系统的正向设计提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 邓召学,秦瀚笙,罗晓亮,等. 轮毂电机倾斜偏心下的电动汽车动力学负效应 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 123-134.
Deng Zhaoxue, Qin Hansheng, Luo Xiaoliang, et al. Negative dynamic effect of electric vehicle under tilted eccentricity of hub motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 123-134.
- [2] 全力,逯智超,朱孝勇,等. 漏磁可控永磁轮毂电机变参数损耗分析与最小损耗控制 [J]. 中国电机工程

- 学报, 2025, 45(21): 8566-8578.
- Quan Li, Lu Zhichao, Zhu Xiaoyong, et al. Variable parameter loss analysis and loss minimization control of leakage flux controllable permanent magnet in-wheel motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(21): 8566-8578.
- [3] Divakaran A M, Gkanas E, Jewkes J, et al. 3D CFD modelling and experimental validation of conjugate heat transfer in wheel hub motors in micro-mobility vehicles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258(Part A): 124430.
- [4] 戈淳, 宋子为, 商嘉桐, 等. 轮毂电机轴承故障的 MIWF-2DCNN 诊断方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(9): 127-135.
- Ge Chun, Song Ziwei, Shang Jiatong, et al. MIWF-2DCNN diagnosis method for bearing fault of in-wheel motor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(9): 127-135.
- [5] Jiang Min, Zhu Xiaoyong, Xiang Zixuan, et al. Dual-sub-region rotor design of a permanent magnet hub motor with enhanced speed regulation and output torque for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(11): 13659-13669.
- [6] 王灿. 电动汽车永磁轮毂电机设计及齿槽转矩的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021: 13-15.
- [7] 付名禄. 基于有限元分析的永磁同步轮毂电机齿槽转矩研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021: 31-37.
- [8] 安忠良, 于浩泽. 轮毂电机振动噪声抑制措施 [J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(3): 103-108.
- An Zhongliang, Yu Haoze. Vibration and noise suppression measures for in-wheel motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(3): 103-108.
- [9] 吴刚, 吴超华, 刘文长, 等. 基于田口法的永磁电机齿槽转矩优化 [J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(5): 23-29.
- Wu Gang, Wu Chaohua, Liu Wenchang, et al. Research on cogging torque optimization of permanent magnet motor based on Taguchi method [J]. *Machine Design & Research*, 2024, 40(5): 23-29.
- [10] 梁建伟, 刘欢, 刘细平, 等. 定子齿开槽对六相电机齿槽转矩的影响 [J]. *机床与液压*, 2023, 51(9): 169-173.
- Liang Jianwei, Liu Huan, Liu Xiping, et al. Effect of stator tooth slotting on cogging torque of six-phase motor [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(9): 169-173.
- [11] Xu Meimei, Zhao Wenxiang, Ji Jinghua, et al. Auxiliary notching rotor design to minimize torque ripple for interior permanent magnet machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(10): 12051-12062.
- [12] Yang Zhimeng, Tian Shaopeng. Research on torque ripple suppression of in-wheel fractional slot permanent magnet synchronous motors based on auxiliary slots [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2835(1): 012030.
- [13] 靖海宏, 邓峰, 张旻, 等. 基于试验验证的永磁同步电机电磁噪声优化方法探究 [J]. *汽车技术*, 2023(10): 32-41.
- Jing Haihong, Deng Feng, Zhang Ni, et al. Exploration on electromagnetic noise optimization approaches of permanent magnet synchronous motor based on experimental verification [J]. *Automobile Technology*, 2023(10): 32-41.
- [14] 高蒙真, 杨向宇, 蒋思远, 等. 基于极弧系数和分段斜极选择的五相永磁电机齿槽转矩削弱方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8922-8935.
- Gao Mengzhen, Yang Xiangyu, Jiang Siyuan, et al. The method for reducing cogging torque by suitable selection of the pole-arc coefficient and rotor step skewing in five-phase permanent magnet motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8922-8935.
- [15] Yan Dong, Yan Yan, Cheng Yiqiu, et al. Research on cogging torque reduction method for permanent magnet synchronous motor accounting for the magnetic pole edge effect [J]. *IET Electric Power Applications*, 2024, 18(1): 64-75.
- [16] Choe J, Kwon H, Kim H, et al. Structural effects of asymmetric magnet shape on performance of surface permanent magnet synchronous motors [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 3976.
- [17] 于浩泽. 轮毂电机振动噪声研究及优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022: 33-41.
- [18] 杨定伟. 电动汽车永磁电机振动与噪声分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 71-78.
- [19] 侯俊剑, 张玉琦, 房占鹏, 等. 某轮毂电机振动噪声优化研究 [J]. *机械设计与制造*, 2023, 383(1): 86-90.
- Hou Junjian, Zhang Yuqi, Fang Zhanpeng, et al. Optimal research on vibration and noise of a hub motor [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023, 383(1): 86-90.
- [20] 杨烈. 轮毂电机噪声研究 [J]. *防爆电机*, 2023, 58(5): 35-38.
- Yang Lie. Noise research of wheel hub motors [J]. *Explosion-Proof Electric Machine*, 2023, 58(5): 35-38.
- [21] 黄超, 熊璐, 吴虎威, 等. 轮毂驱动用永磁同步电机

- 电磁振动噪声研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(S1): 302-308.
- Huang Chao, Xiong Lu, Wu Huwei, et al. Simulation and experimental analysis of electromagnetic vibration and noise for in-wheel-drive permanent magnetic synchronous electrical motor [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(S1): 302-308.
- [22] 孙云祥, 王贵勇, 王伟超, 等. 运用改进蜉蝣算法的增程式电动汽车能量管理策略研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43(8): 1437-1446.
- Sun Yunxiang, Wang Guiyong, Wang Weichao, et al. Research on energy management strategy of extended-range electric vehicle using improved mayfly algorithm [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(8): 1437-1446.
- [23] 盛文杰, 冯俊萍, 赵景波, 等. 电动汽车轮毂电机多物理场耦合特性分析研究综述 [J]. 常州工学院学报, 2024, 37(4): 25-31.
- Sheng Wenjie, Feng Junping, Zhao Jingbo, et al. A review of multi-physical field coupling characteristics analysis in electric vehicle hub motors [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2024, 37(4): 25-31.
- [24] Zervoudakis K, Tsafarakis S. A mayfly optimization algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 145: 106559.
- [25] Wang Dongshu, Tan Dapei, Liu Lei. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. Soft Computing, 2018, 22(2): 387-408.
- (编辑 李慧敏)