

# 基于正弦气隙磁密设计的 PMCM 性能优化

李明, 穆海琦, 伦淑娴\*

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

## Performance Optimization of Permanent Magnet Canned Motors Based on Sinusoidal Air Gap Flux Density Design

LI Ming, MU Haiqi, LUN Shuxian\*

(School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

**Abstract:** [Objective] Permanent magnet canned motor (PMCM) are widely used in petroleum, chemical, and nuclear industries due to their unique advantages. However, during operation, PMCM exhibit significant can losses, resulting in relatively low overall efficiency. This limitation substantially restricts their broader adoption and application, hindering technological progress and equipment upgrades in related industries. To address these challenges, this paper proposes an innovative sinusoidal air-gap magnetic flux density design method. [Methods] Through in-depth research and theoretical analysis, this study conducted a comprehensive optimization design of the permanent magnet parameters for a 1.5 kW PMCM using the proposed method, determining the optimal magnet dimensions. Additionally, finite element analysis was systematically employed to compare and analyze the performance of the PMCM before and after optimization. [Results] The research results demonstrated that the proposed design method can effectively reduce harmonic content in the air-gap magnetic flux density, significantly improving motor performance. After optimization, the motor losses were reduced by 30.44%, efficiency was increased by 8.87%, and the maximum operating temperature was lowered by 8.36%. [Conclusion] This research provides theoretical support for the widespread application of PMCM, facilitating the development of efficient and reliable motor equipment, thereby creating significant economic and social benefits.

**Key words:** permanent magnet canned motor; sinusoidal air

gap flux density; optimized design; can losses

**摘要:**【目的】永磁屏蔽电机(PMCM)凭借其独特的优势被广泛地应用于石油、化工以及核工业等领域。然而,PMCM 在运行过程中,存在较大的屏蔽套损耗,导致其整体效率较低,这在很大程度上限制了其进一步的推广与应用,阻碍了相关产业的技术进步和设备升级。针对上述问题,本文提出了一种创新性的正弦气隙磁密设计方法。【方法】通过深入研究和理论分析,利用该方法对一台额定功率为 1.5 kW 的 PMCM 的永磁体参数进行了细致且全面的优化设计,并确定了最优的永磁体尺寸参数。同时,本文还运用有限元法对优化前后的 PMCM 性能进行了系统而详细的比较分析。【结果】研究表明,该设计方法能够有效地降低气隙磁密中的谐波含量,极大地提升了电机的运行性能。优化后的电机损耗降低了 30.44%,效率提高了 8.87%;电机最高温度降低了 8.36%。【结论】该研究为 PMCM 的广泛应用提供了理论支撑,将助力高效可靠电机设备的发展,创造显著的经济和社会效益。

**关键词:** 永磁屏蔽电机;正弦气隙磁密;优化设计;屏蔽套损耗

## 0 引言

随着全球能源危机的加剧和环保意识的提高,高效、节能的电机系统在现代工业中扮演着越来越重要的角色<sup>[1-2]</sup>。永磁屏蔽电机(Permanent Magnet Canned Motor, PMCM)因其高效率、高功率密度和良好的控制性能,被广泛应用于石油、化工、芯片制造以及核工业等领域<sup>[3-6]</sup>。然而,由于屏蔽套损耗的存在,导致 PMCM 相对于传统永磁同步电机效率较低,影响其进一步发展。

基金项目:辽宁省教育厅一般项目(LJ212410167024);国家自然科学基金(62473061)

General Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJ212410167024); National Natural Science Foundation of China (62473061)

针对 PMCM 屏蔽套损耗抑制和效率提高的问题,科研人员开展了大量工作,并取得了显著进展。文献[7]采用解析算法对 PMCM 的屏蔽套损耗和温度进行计算,并采用热网络模型,准确预测了屏蔽套的温度分布。文献[8]提出了两种屏蔽套优化策略,并通过有限元软件分析了不同优化方案对屏蔽套损耗的抑制效果,得出屏蔽套的分段和分层都会降低屏蔽套涡流损耗。文献[9]采用叠加法将电机端部的环流损耗和涡流损耗分离,同时提出一种新的环流损耗抑制方法,通过温度场验证了优化结构的有益效果。文献[10]提出了一种通过将屏蔽套分割为相互绝缘的多个部分来减少屏蔽套损耗的有效方法,并通过有限元仿真进行了验证。文献[11]采用方波驱动和正弦波驱动两种不同的控制策略对 PMCM 的性能进行分析,结果表明方波驱动时电机效率更高,采用正弦波驱动时,电机的转矩脉动较小。

然而上述研究仅针对抑制基波磁场引起的屏蔽套损耗,对谐波引起的损耗研究较少<sup>[12]</sup>。文献[13]提出了一种基于功率守恒定律获得 PMCM 屏蔽套损耗的方法。该方法不仅考虑了屏蔽套谐波损耗,也考虑了逆变器时间谐波对屏蔽套损耗的影响。与有限元法相比,该方法不依赖电流波形,能快速准确地给出电机的最优控制参数等。文献[14]采用混合算法计算了不同工况下定子和转子屏蔽套的表面磁通密度和涡流损耗。文献[15]对典型工况下的转子和定子的屏蔽套损耗进行了详细的计算,并通过有限元验证。电机考虑的总损耗包括铜损、铁损和屏蔽套损耗。在各工况下,屏蔽套损耗均来自于基波,其次是3次谐波。研究表明,屏蔽套损耗最大,且随转子转速和相电流的增加而急剧增加,其中基波和3次谐波几乎占全部损耗。

上述研究表明,由谐波引起的屏蔽损耗在总屏蔽套损耗中占有一定比例,因此本文提出了一种正弦气隙磁密的设计方法,通过抑制屏蔽谐波损耗来提升 PMCM 的效率。首先介绍了所提的正弦气隙磁密设计方法,其次建立电机模型并对优化结果进行分析,然后将所提方法应用于电机整体设计,并对电机性能进行对比分析,最后得出结论。

## 1 正弦气隙磁密设计方法

为了保证电机气隙磁密的正弦度,抑制气隙磁密中的谐波含量,本文提出了一种正弦气隙磁密设计方法,如图1所示,通过优化永磁体尺寸参数使得电机的气隙磁密沿圆周方向呈现正弦分布的特征。

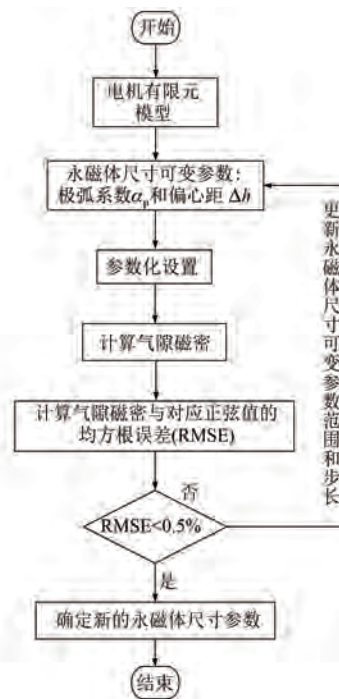


图1 正弦气隙磁密设计方法计算流程

Fig. 1 Calculation process of sinusoidal air gap flux density design method

由图1可知,将均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为判断指标,其表达式为<sup>[16]</sup>

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (1)$$

式中: $n$ 为样本数量; $y_i$ 、 $y'_i$ 分别为期望输出值、实际输出值; $i$ 为值的个数。

若 RMSE 大于 0.5%,更新永磁体尺寸可变参数范围和步长;若 RMSE 小于 0.5%,确定新的永磁体尺寸参数。

## 2 电机模型建立

本文以一台 1.5 kW 的 PMCM 为研究对象,开展正弦气隙磁密设计方法有效性的验证。

### 2.1 电机基本参数及有限元模型

初始设计一台三相 6 极 9 槽的 PMCM,额定

功率为 1.5 kW, 额定转速为 9 000 r/min, 电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 PMCM 基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the PMCM

| 参数名称                          | 参数值   |
|-------------------------------|-------|
| 额定功率/kW                       | 1.5   |
| 额定电压/V                        | 200   |
| 定子外径/mm                       | 107   |
| 定子内径/mm                       | 49.5  |
| 额定转速/(r · min <sup>-1</sup> ) | 9 000 |
| 屏蔽套厚度/mm                      | 0.5   |
| 极弧系数 $\alpha_p$               | 0.95  |
| 偏心距 $\Delta h$ /mm            | 0     |

根据表 1 参数建立了如图 2 所示的电机有限元参数化计算模型。以极弧系数  $\alpha_p$  和偏心距  $\Delta h$  为优化变量, 进行参数化建模。 $\alpha_p$  的变化区间为 0.75 ~ 1, 步长为 0.1;  $\Delta h$  的变化区间为 0 ~ 13.5 mm, 步长为 0.05 mm。其中,  $\alpha_p$  计算式为<sup>[17]</sup>

$$\alpha_p = \frac{w_p}{\tau_p} \quad (2)$$

式中:  $\tau_p$  为磁极极距;  $w_p$  为永磁体极弧宽度。

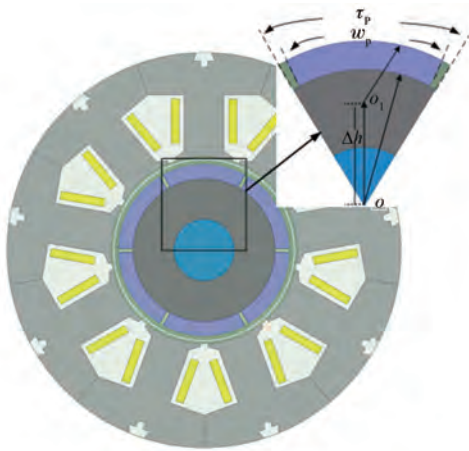


图 2 PMCM 有限元参数化计算模型

Fig. 2 The finite element parametric model of the PMCM

由参数变化区间和步长可知, 需要计算 728 个组合, 参数化计算得到的气隙磁密曲线如图 3 所示。

## 2.2 优化结果

将图 3 中各组气隙磁密值与正弦函数值进行 RMSE 计算, 得出当  $\alpha_p$  为 0.83、 $\Delta h$  为 9.5 mm 时, RMSE 最小, 为 0.34%, 因此得到了新的永磁体尺

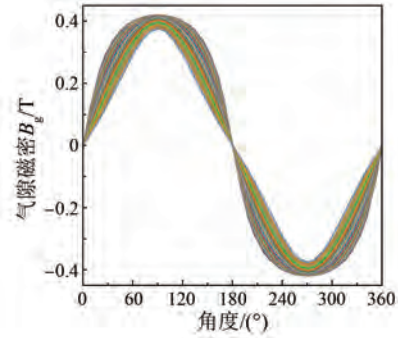


图 3 参数化计算得到的气隙磁密曲线

Fig. 3 Air gap flux density curves obtained by parametric calculation

寸参数, 结果如表 2 所示。

表 2 优化结果

Tab. 2 Optimal results

| 参数名称 | 极弧系数 $\alpha_p$ | 偏心距 $\Delta h$ /mm |
|------|-----------------|--------------------|
| 初始设计 | 0.95            | 0                  |
| 优化设计 | 0.83            | 9.5                |

为了验证优化后气隙磁密的正弦度, 将优化后的气隙磁密和标准正弦曲线进行对比, 结果如图 4 所示。

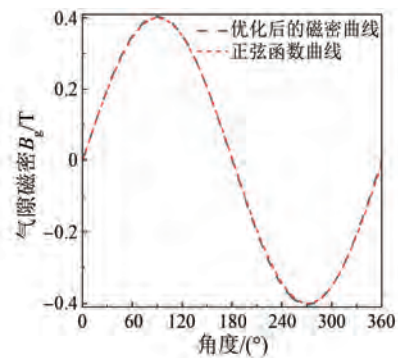


图 4 气隙磁密曲线与正弦曲线对比

Fig. 4 Comparison of air gap flux density curve and sine curve

由图 4 可知, 优化后的气隙磁密曲线与正弦函数曲线十分吻合, 证明本文提出的正弦气隙磁密设计方法的有效性。此外, 还需要对优化前后的电机性能进行对比分析。

## 3 电机性能对比分析

### 3.1 气隙磁密谐波对比分析

在电机中, 气隙磁密的强度对电机的性能和效率具有重要影响<sup>[18-19]</sup>。因此, 对气隙磁密进行

分析对于理解电机的性能特征、控制和优化具有重要意义<sup>[20-21]</sup>。

为了证明提出方法的正确性和有效性,本文还引入了响应面法<sup>[22-23]</sup>、遗传算法来优化模型<sup>[24-26]</sup>。响应面法流程如图 5 所示。

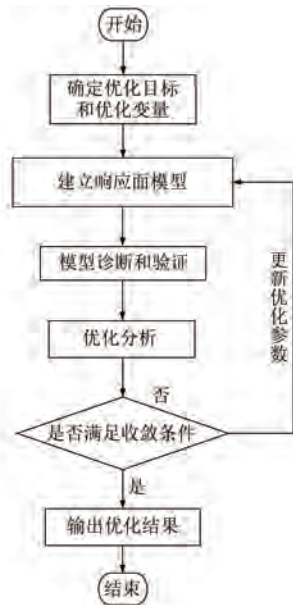


图 5 响应面法流程图

Fig. 5 Response surface method flow chart

将采用本文所提方法、响应面优化方法获得的气隙磁密波形与初始设计的气隙磁密波形进行比较,结果如图 6 所示。

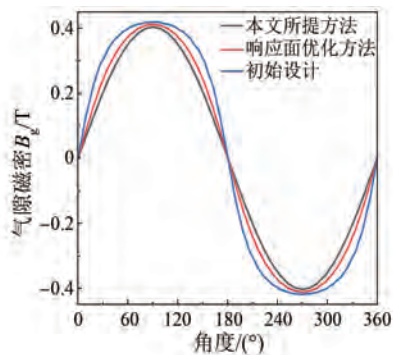


图 6 气隙磁密曲线

Fig. 6 Air gap flux density curves

由图 6 可知,采用本文方法与响应面优化方法得到的气隙磁密曲线相似,本文所提方法对应的气隙磁密幅值为 0.404 T,响应面优化方法为 0.412 T,相差 1.98%。此外,从图 6 可知,相较于初始设计,优化方案的气隙磁密幅值虽从 0.42 T 微降至 0.40 T,但其波形正弦度显著提升,谐波畸

变率降低约 15%。由表 2 可知,气隙磁密幅值降低是因为永磁体用量减少。

对图 6 中气隙磁密进行傅里叶分解,如图 7 所示。

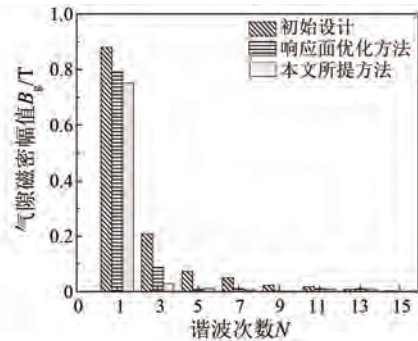


图 7 气隙磁密谐波幅值

Fig. 7 Air gap flux density harmonic amplitude

由图 7 可知,采用本文所提方法后,气隙磁密基波幅值有所降低。此外,该方法能够有效抑制 5 次、7 次谐波,有助于降低谐波损耗。

### 3.2 损耗对比分析

本文分析的 PMCM 在运行过程中主要产生铜损、铁耗、屏蔽套损耗和永磁体涡流损耗<sup>[27-29]</sup>。电机各部分损耗的对比结果如图 8 所示。

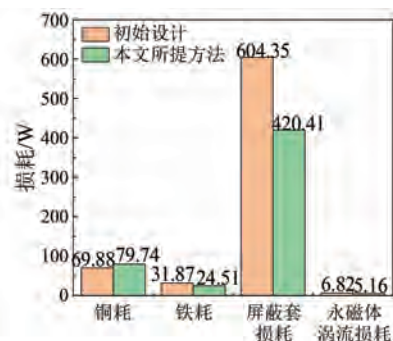


图 8 损耗对比

Fig. 8 Loss comparison

由图 8 可知,本文所提方法对应的铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗相比于初始设计,分别增加 14.1%、降低 23.09%、降低 24.34%。

由于气隙磁密幅值的降低以及谐波次数的减少,导致铁耗降低,而永磁体用量的减少导致涡流损耗降低。由图 8 可知,本文所提方法对应的屏蔽套损耗比初始设计的屏蔽套损耗降低了 30.44%,这种变化与铁耗降低的原因相同。

### 3.3 效率、功率因数对比分析

对优化前后电机效率和功率因数进行了对

比,结果如图 9 所示。

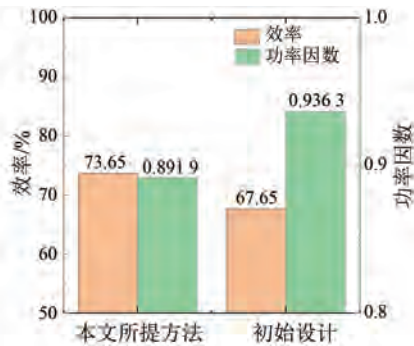


图 9 效率、功率因数对比

Fig. 9 Comparison of the efficiency and power factor

由图 9 可知,本文所提方法得到的效率相比初始设计得到的效率提高了 8.87%。这是因为使用本文所提方法对应的电机永磁体中的涡流损耗、屏蔽套损耗和铁心损耗均低于初始设计,占 PMCM 总损耗的比例较大,因此效率得到了提高<sup>[30]</sup>。此外,本文所提方法对应的功率因数比初始设计降低了 4.74%,这可能与永磁体用量的减少有关。

### 3.4 电机温度对比分析

对优化前后整个电机及其各个部件的温度场分布进行了对比,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,初始设计电机的最高整体温度为 91.96 °C,而本文所提方法的最高整体温度降低到 84.27 °C;初始设计下电机绕组绝缘最高温度为 91.96 °C,而本文所提方法绕组绝缘最高温度降至 84.27 °C;初始设计下电机内永磁体最高温度为 72.44 °C,而本文所提方法永磁体最高温度降低至 68.5 °C。这种降低归因于铁损、屏蔽套损耗和永磁体涡流损耗的降低。

## 4 结语

本文以提高 PMCM 的效率和降低谐波损耗为目标,提出了一种正弦气隙磁密设计方法。该方法通过优化极弧系数  $\alpha_p$  和偏心距  $\Delta h$ ,实现了气隙磁密的正弦分布,有效降低了屏蔽套损耗,提高了电机效率。结果表明,优化后的电机损耗降低了 30.44%,效率提高了 8.87%;电机最高温度降低了 8.36%。本研究可为 PMCM 的高效设计提供有力支撑。

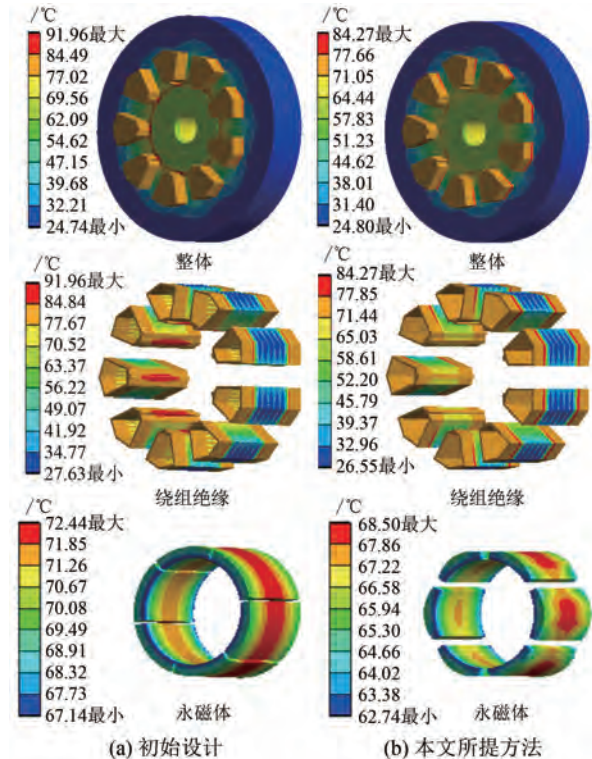


图 10 温度对比

Fig. 10 Temperature comparison

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

李明和穆海琦进行了方案设计、内容总结与论文撰写,穆海琦进行了试验研究,李明和伦淑娴参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Li Ming and Mu Haiqi. The experiment was conducted by Mu Haiqi. The manuscript was revised by Li Ming and Lun Shuxian. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

### 参考文献

[ 1 ] SAIDUR R. A review on electrical motors energy use and energy savings [ J ]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 877-898.

- [ 2 ] XU Z C, PAN R Q. Effects of intelligent manufacturing on the high-quality development of manufacturing industry: The mediating role of green technology innovation [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 26145.
- [ 3 ] LI D T, HE Z L, SUN S Z, et al. Dynamic characteristics modelling and analysis for dry screw vacuum pumps [J]. *Vacuum*, 2022, 198: 110868.
- [ 4 ] DU L X, LIU X P, FU J S, et al. Design and optimization of reverse salient permanent magnet synchronous motor based on controllable leakage flux [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2021, 5(2): 163-173.
- [ 5 ] 秦雪飞, 沈建新, ROBERT N, 等. 高速永磁同步电机在多物理场和变流器约束下的设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(7): 1618-1633.  
QIN X F, SHEN J X, ROBERT N, et al. Design of high-speed PMCM considering multi-physics fields and power converter constraints [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(7): 1618-1633.
- [ 6 ] 池磊, 李明, 王蓉. 变频器时间谐波电流对永磁屏蔽电机性能影响分析[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(1): 74-83.  
CHI L, LI M, WANG R. Analysis of the influence of inverter time harmonic current on the performance of permanent magnet shielded motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 74-83.
- [ 7 ] GAO L L, LIU H, NIU Q. Analytical model for no-load magnetic field, can losses, and temperature of permanent magnet canned motor [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 74816-74827.
- [ 8 ] LI Q W, WANG Z, LI X F. Calculation and analysis of eddy current loss in high temperature permanent magnet canned motor [C]// 2024 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems, Guangzhou, 2024.
- [ 9 ] GAO L L, WANG S M, LI J J. Research on end structure losses and its suppression method of high-speed canned induction motor [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 49913-49923.
- [ 10 ] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [ 11 ] HUANG Y, JIANG L, NI Y Y, et al. Research on electromagnetic performance of the permanent magnet canned motor under different control strategies [C]// 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications, Singapore, 2022.
- [ 12 ] LI M, AN Y J, ZHANG Z, et al. Effect of time harmonic current considering load condition on performance of canned induction motor [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2021, 66(3): 369-385.
- [ 13 ] LI M, AN Y J, HOU Q, et al. A novel method for obtaining can loss of canned permanent magnet synchronous motor under non-sinusoidal excitation [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2024, 19: 475-483.
- [ 14 ] 梁艳萍, 张广超, 高莲莲, 等. 核主泵驱动电动机屏蔽套涡流损耗混合算法研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(5): 1015-1023.  
LIANG Y P, ZHANG G C, GAO L L, et al. Research on hybrid algorithm of can losses in double canned induction motor for nuclear pump [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(5): 1015-1023.
- [ 15 ] YU Q, WANG X S, CHENG Y H. Electromagnetic modeling and analysis of can effect of a canned induction electrical machine [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, 31(4): 1471-1478.
- [ 16 ] 李耀华, 周逸凡, 赵承辉, 等. 表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制系统[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(1): 1-7.  
LI Y H, ZHOU Y F, ZHAO C H, et al. Deadbeat stator flux and torque control system of surface permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(1): 1-7.
- [ 17 ] JIANG S M, PARK H I, CHOI J Y, et al. Magnet pole shape design of permanent magnet machine for minimization of torque ripple based on electromagnetic field theory [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10): 3586-3589.
- [ 18 ] SCUILLER F. Magnet shape optimization to reduce pulsating torque for a five-phase permanent-magnet low-speed machine [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 50(4): 1-9.
- [ 19 ] 丁锦, 姜文刚. 基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50

- (8): 66-72.
- DING J, JIANG W G. Design optimization of permanent magnet synchronous motor based on Latin hypercube algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 66-72.
- [20] XU L, SUN Z M, ZHAO W X. Stator core loss analysis and suppression of permanent magnet vernier machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12155-12167.
- [21] FANG L, LI D W, QU R H. Torque improvement of vernier permanent magnet machine with larger rotor pole pairs than stator teeth number [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(12): 12648-12659.
- [22] HUANG X Y, LI F F, LI Y J, et al. Optimization of melting performance of a heat storage tank under rotation conditions; Based on Taguchi design and response surface method [J]. *Energy*, 2023, 271: 127100.
- [23] 乔路宽, 张炳义, 李岩, 等. 基于改进粒子群优化算法的外转子永磁同步电机的多目标优化设计 [J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(3): 81-87+94.
- QIAO L K, ZHANG B Y, LI Y, et al. Multi-objective optimization design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(3): 81-87+94.
- [24] MENG H J, ZHANG S P, ZHANG W, et al. Optimizing actual PID control for walking quadruped soft robots using genetic algorithms [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 25946.
- [25] 王浩宇, 李荣, 张杰. 初级分段不连续型直线电机定位力分析与参数优化 [J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(5): 61-71.
- WANG H Y, LI R, ZHANG J. Detent force analysis and parameter optimization of primary segmented discontinuous linear motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 61-71.
- [26] WANG Z W, LI X, LI Q X. Calculation and analysis of eddy current loss in the shielding can of high temperature permanent magnet canned motor [C]// 2024 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems, Guangzhou, 2024.
- [27] 赵南南, 党贯恒, 周鹏飞. 基于多目标遗传算法的永磁同步电机振动噪声分析与优化 [J]. *大电机技术*, 2024, (5): 24-31+45.
- ZHAO N N, DANG G H, ZHOU P F. Analysis and optimization of vibration noise of permanent magnet synchronous motor based on multi-objective genetic algorithm [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2024, (5): 24-31+45.
- [28] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究 [J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(4): 90-101.
- YU T H, LI M, LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(4): 90-101.
- [29] BO K, CHEN J Q, JIANG Y P, et al. Numerical analysis of 40 MW HTS motor electromagnetic characteristics for ship electric propulsion [J]. *Scientific Reports*, 2024, 13: 20261.
- [30] 高莲莲. 兆瓦级双屏蔽感应电动机屏蔽套电磁与热问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- GAO L L. Research on problems of electromagnetic and thermal for cans in megawatt double canned induction motors [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.

收稿日期:2025-02-27

收到修改稿日期:2025-05-12

作者简介:

李明(1987-),男,博士,副教授,研究方向为特种电机设计及控制技术,lm\_dq@bhu.edu.cn;

\*通信作者:伦淑娴(1972-),女,博士,教授,研究方向为非线性系统的控制、智能控制和电机故障诊断等,lunshuxian@qmail.bhu.edu.cn。