

批量生产永磁体性能差异对屏蔽式 永磁同步电机的影响

郑继鑫, 李明*, 段卫川, 伦淑娴

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Impact of Batch-Produced Permanent Magnet Performance Variations on Canned Permanent Magnet Synchronous Motors

ZHENG Jixin, LI Ming*, DUAN Weichuan, LUN Shuxian

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

Abstract: [Objective] The canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) is widely used in critical fields such as chemical processing, nuclear power, and medical applications due to its high power density, superior efficiency, and excellent dynamic performance. However, research on the impact of batch-produced permanent magnet performance variations on long-term motor stability remains insufficient. Therefore, this study aims to analyze the influence of permanent magnet variations on CPMSM performance and reveal its multi-physics field coupling mechanisms. [Methods] Firstly, a load backs electromotive force-based real-time detection method for permanent magnet magnetic properties was proposed, enabling dynamic post-assembly monitoring without additional sensors. Then, the influence of permanent magnet performance variations on CPMSM electromagnetic fields, temperature distribution, and shield-can thermal stress/deformation was analyzed using finite element models. Finally, experimental validation of the proposed method was subsequently conducted. [Results] The results demonstrated that when compared with the N30-grade, the motor with N38-grade permanent magnets exhibited a 2.56% difference in power factor, a 1.76% difference in efficiency, a 5 °C difference in winding temperature, and a 5.82 °C difference in casing temperature. [Conclusion] A decline in the magnetic performance of permanent magnets leads to nonlinear deterioration in motor performance metrics,

and the performance difference is solely related to the quantity of permanent magnets, independent of their distribution. This study provides theoretical references for the optimized design of CPMSM, the evaluation of permanent magnet deviation impacts, and the enhancement of reliability in harsh environments.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; batch-produced permanent magnet performance variation; back electromotive force; multi-physics field coupling mechanism

摘要: [目的] 屏蔽式永磁同步电机 (CPMSM) 因其高功率密度、高效率 and 动态性能优异等特点, 被广泛应用于化工、核能及医疗等关键领域。然而, 批量生产永磁体性能差异对电机长期稳定性的影响研究不足。因此, 本文旨在分析永磁体差异对 CPMSM 性能的影响, 并揭示其多物理场耦合机理。[方法] 首先, 提出一种基于负载反电动势的永磁体磁性能实时检测方法, 无需额外传感器即可实现装机后动态监测。然后, 利用有限元模型分析了永磁体性能差异对 CPMSM 电磁场、温度场和屏蔽套热应力及其形变的影响。最后, 通过试验验证所提方法的性能。[结果] 结果表明, 永磁体等级为 N38 的电机与 N30 相比, 功率因数相差 2.56%, 效率相差 1.76%, 绕组温度相差 5 °C, 机壳温度相差 5.82 °C。[结论] 永磁体磁性能下降会导致电机指标非线性恶化, 且性能差异仅与永磁体数量相关, 与分布无关。该研究为 CPMSM 的优化设计、永磁体偏差影响评估及严苛环境下的可靠性提升提供了理论参考。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机; 批量生成永磁体性能差异; 反电动势; 多物理场耦合机理

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

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

0 引言

屏蔽式永磁同步电机 (Canned Permanent

Magnet Synchronous Motor, CPMSM) 因其具有高功率密度、高效率和快速动态响应等优点, 已成为化工、核工业和医疗等领域流体输送的核心动力装置, 尤其在易燃、易爆或腐蚀性介质的安全输送中不可或缺^[1-3]。罐装式 CPMSM 结构示意图如图 1 所示。

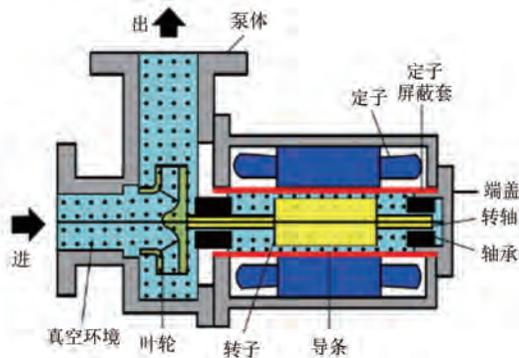


图 1 CPMSM 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CPMSM structure

CPMSM 的定子外壳通常由高强度不锈钢制成, 通过过盈压装和激光焊接实现密封, 隔离腐蚀性液体。在批量生产过程中, 永磁体剩磁和矫顽力的变化^[4]会降低电磁性能, 通过电磁-热-机械多物理场耦合引发异常温升、加剧机械变形, 威胁运行安全和使用寿命^[5-6]。因此, 系统地研究永磁体变化对 CPMSM 多物理场性能的影响, 既可提高理论基础的可靠性, 又能优化设计和制造。

现有研究主要聚焦永磁体几何参数(尺寸/形状)与电磁性能的关联性。文献[7-10]通过优化平均转矩和降低转矩脉动来增强电磁特性。文献[11]研究了永磁体分段对涡流损耗的抑制作用。文献[12]比较了不同永磁材料之间的电磁特性差异。现有研究已深入探讨气隙长度、极槽配合等参数对电磁性能的影响^[13-15], 但多基于永磁体均匀性的理想假设, 对批量生产中的性能变化关注不足。文献[16-20]提出了永磁体退磁的电磁分析方法, 但并未涉及热场与应力场之间的耦合效应。文献[21]建立了一个多物理场模型, 但并未量化性能变化对各个物理场的单独贡献。

目前关于永磁体尺寸和性能的研究主要针对永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), 涉及 CPMSM 的研究较少。与传统 PMSM 相比, CPMSM 的金属外壳在旋转磁场的作用下会产生显著的涡流效应, 这不仅降低了

CPMSM 的效率, 还会通过电磁-热-应力耦合效应导致屏蔽套形变, 影响气隙均匀性和运行稳定性。

为解决上述问题, 本文系统地研究了批量生产永磁体性能差异对 CPMSM 多物理场性能的影响程度。首先提出一种基于反电动势的实时监测方法, 用于评估磁性能, 其能够在无需额外传感器的情况下实现动态监测, 为跟踪性能退化提供了有效手段。其次, 建立了耦合的电磁-热-机械多物理场模型, 通过有限元方法分析了永磁体变化对 CPMSM 电磁场、温度场和屏蔽套热应力及其形变的影响, 并得出了相应的运行模式。本研究揭示了永磁体性能变化对 CPMSM 多物理场性能的影响机制, 并量化了其对于电机性能的差异程度, 为优化设计及严苛环境下的可靠性提升提供了理论支撑与工程指导。

1 基于反电动势测量的永磁体性能变化检测方法

永磁体性能检测方法主要包括高斯计测量和搜索线圈技术^[22]。高斯计测量只能在装配前进行, 无法评估装配对永磁体性能的影响, 而搜索线圈技术则存在降低电机性能和增加成本等缺点^[23]。因此, 本文提出了一种基于感应电动势的永磁体性能变化的检测方法, 该方法无需额外组件即可实时监测。

感应电动势直接影响电机的效率、转矩特性、噪声以及整体运行质量^[24], 其计算式为

$$E = 4.44/K_w N K_\phi \frac{b_m B_r A_m \times 10^{-4}}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中: E 为感应电动势; f 为电频率; K_w 为绕组因子; N 为定子绕组中每相的串联匝数; K_ϕ 为气隙磁场的波形系数; b_m 为永磁体的工作点; B_r 为剩磁通密度; A_m 为磁路的横截面积; σ_0 为漏磁系数。

由式(1)可知, CPMSM 的电动势 E 与永磁体的剩磁通密度 B_r 成正比, 因此通过测量电动势可以确定永磁体性能的变化。

对于罐装式 CPMSM, 定子电压方程计算式为^[25]

$$U = -E + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2)$$

式中: U 为电机定子相电压; I_1 为定子相电流; R_1 为定子相电阻; X_1 为同步电抗。

根据式(2)测量瞬时定子绕组电压和电流,可以得到实时反电动势,结合式(1),可以检测永磁体的磁性能。

2 批量生产永磁体性能差异对 CPMSM 多物理场性能的影响

为了分析批量生产永磁体性能差异对 CPMSM 的电磁场、温度场和屏蔽套热应力及其形变的影响,本研究采用单向耦合多物理场计算方

法。CPMSM 多物理场仿真计算流程如图 2 所示。

图 2 中,首先建立二维电磁场的有限元模型,以分析 CPMSM 的损耗和电磁性能。然后,利用第一步计算得到的损耗作为热源,构建三维温度场模型进行瞬态热分析。最后,将电磁结果和热数据应用于应力模型,以评估 CPMSM 屏蔽套的形变情况。该多物理场耦合模型考虑了电磁力和温度场对屏蔽套形变的综合作用,能够全面评估永磁体性能变化时电机的性能。

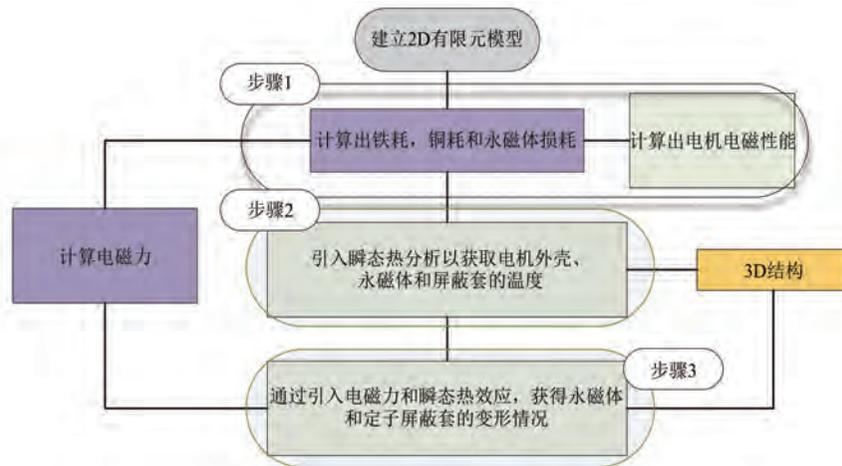


图 2 多物理场仿真流程图

Fig. 2 Multi-physics field simulation flowchart

使用二维有限元模型计算电磁场时,有限元公式化和边界约束可表示为^[26-27]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{dA_z}{dt} \\ A_z|_r = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_z 为磁矢位; ν 为磁阻率; σ 为电导率; J_s 为电流密度; r 为外边界。

本文以一台额定功率为 1.5 kW、额定转速为 9 000 r/min 的 CPMSM 作为研究对象,分析了永磁体性能差异对电机电磁场、温度场及屏蔽套形变的影响。该电机的主要参数如表 1 所示。

根据表 1 中的参数建立了一个二维电磁场计算模型,如图 3 所示。此外,还构建了电机的温度场和应力分析模型,如图 4 所示。

2.1 批量生产的永磁体性能差异对 CPMSM 电磁性能的影响

在分析永磁体性能差异对电机性能影响时,本文考虑了永磁体性能差异程度和存在性能差异的永磁体的分布这两种情况对 CPMSM 性能的

影响。

表 1 CPMSM 的主要参数

Tab. 1 Key parameters of the CPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
相数	3
极数	6
定子槽数	9
屏蔽套厚度/mm	0.5
屏蔽套材料	SUS316
额定频率/Hz	450
定子外径/mm	107
转子外径/mm	46.5

2.1.1 批量生产永磁体的性能差异程度对电机电磁性能的影响

在该研究中,采用标么值的形式描述永磁体磁性能的差异程度,永磁体剩磁差异标么值定义为

$$B_r^* = \frac{B_{rv}}{B_{sv}} \quad (4)$$

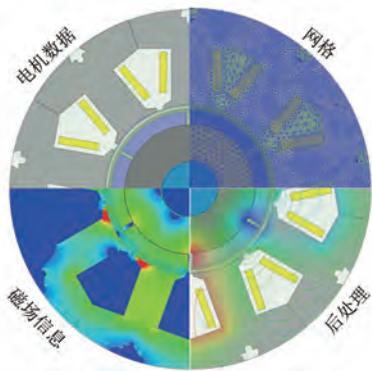


图 3 CPMSM 的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of CPMSM

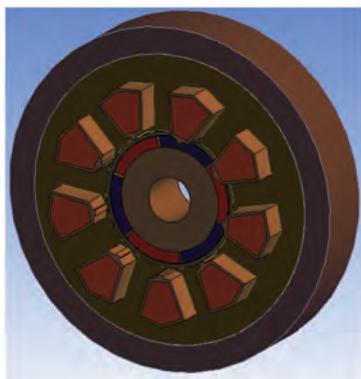


图 4 CPMSM 的温度场和应力计算模型

Fig. 4 Temperature field and stress calculation model of CPMSM

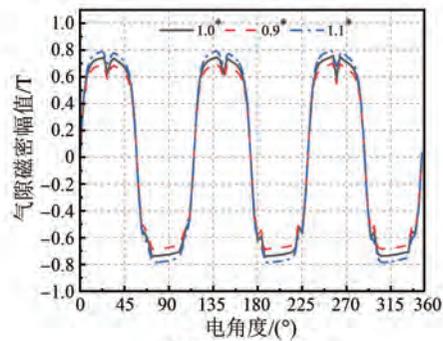
式中: B_{rv} 为永磁体剩磁的实际值; B_{sv} 为永磁体剩磁的标称值。

本文将剩磁差异统一设定为 $\pm 10\%$, 覆盖运输、高温退磁及早期老化等全寿命最坏工况, 并预留安全裕度, 以此作为试验边界, 分析电机极限可靠性。

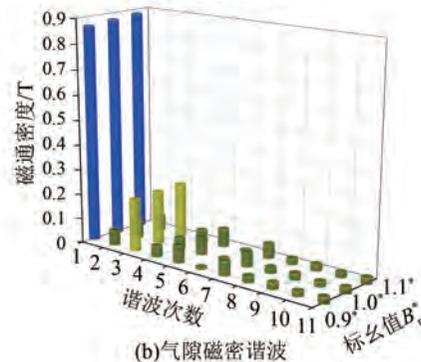
剩磁差异标幺值定义为: 剩磁下降 10% 时, 标幺值 B_r^* 为 0.9; 剩磁无差异时, 标幺值 B_r^* 为 1; 剩磁上升 10% 时, 标幺值 B_r^* 为 1.1。

CPMSM 气隙磁密的大小及其谐波含量会直接影响电机的转矩输出、效率和温度等性能指标。首先利用电磁场二维有限元计算模型分析了永磁体磁性能存在差异时对电机气隙磁密分布的影响, 结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 气隙磁密幅值随着永磁体磁性能下降而降低。永磁体剩磁差异标幺值 B_r^* 为 0.9、1.0、1.1 时, 气隙磁密幅值分别为 0.70 T、0.76 T 和 0.81 T。与 $B_r^* = 1.0$ 相比, 当 $B_r^* = 0.9$ 时



(a) 气隙磁密波形



(b) 气隙磁密谐波

图 5 永磁体性能差异对电机气隙磁密影响

Fig. 5 Impact of permanent magnet performance variations on air-gap magnetic flux density

气隙磁密降低了 6.30%; 当 $B_r^* = 1.1$ 时, 气隙磁密增加了 6%, 气隙磁密变化不一致是因为磁密增加引起饱和所致。由图 5(b) 可知, 永磁体磁性能变化并不会导致谐波成分改变。

永磁体磁性能差异对电机空载感应电动势的影响结果如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 当 $B_r^* = 1.0$ 时, 感应电动势幅值为 113.59 V; 当 $B_r^* = 0.9$ 时, 感应电动势幅值为 105.52 V, 与 $B_r^* = 1.0$ 时相比下降了 7.10%; 当 $B_r^* = 1.1$ 时, 感应电动势幅值为 120.79 V, 与 $B_r^* = 1.0$ 时相比下降了 6.34%。由图 6(b) 可知, 电动势谐波主要为 5 次、7 次谐波, 这与气隙磁密中主要谐波成分一致。

电机的损耗直接影响电机的效率和发热, 故进一步探讨永磁体性能差异对 CPMSM 损耗的影响是有必要的。利用有限元模型分析了永磁体磁性能差异对电机铁耗和永磁体涡流损耗的影响, 结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着永磁体磁性能的下降, 电机铁耗和永磁体涡流损耗均减小。当 $B_r^* = 1.0$ 时, 电机铁耗为 30.96 W, 永磁体涡流损耗为

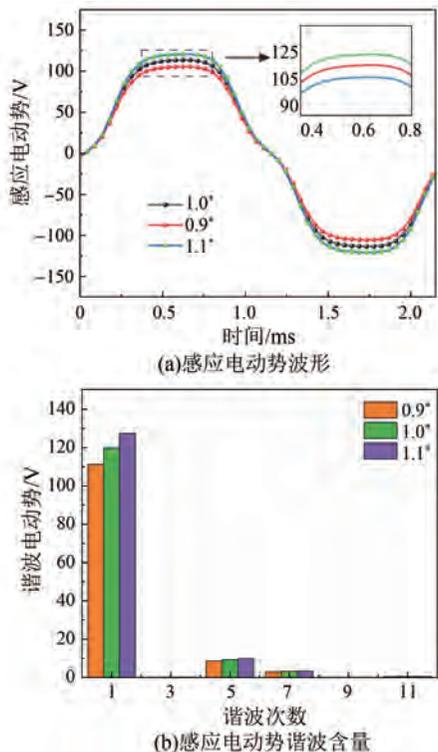


图6 永磁体性能差异对CPMSM空载感应电动势的影响

Fig. 6 Impact of permanent magnet performance variations on no-load induced EMF of CPMSM

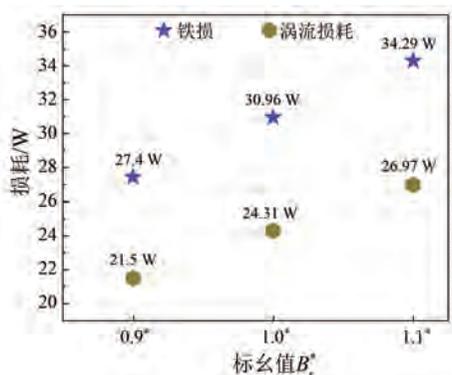


图7 永磁体性能变化对CPMSM铁损和涡流损耗的影响

Fig. 7 Impact of permanent magnet performance variations on iron loss and eddy current loss of CPMSM

24.31 W。当 $B_r^* = 0.9$ 时,电机铁耗和永磁体损耗分别下降至 27.4 W 和 21.5 W,与 $B_r^* = 1.0$ 时相比分别下降了 11.50% 和 11.56%。当 $B_r^* = 1.1$ 时,电机铁耗和永磁体损耗分别增加至 34.29 W 和 26.97 W,与 $B_r^* = 1.0$ 时相比分别增加了 10.76% 和 10.94%。

永磁体磁性可能存在差异时对电机转矩性能的影响结果如图 8 所示。

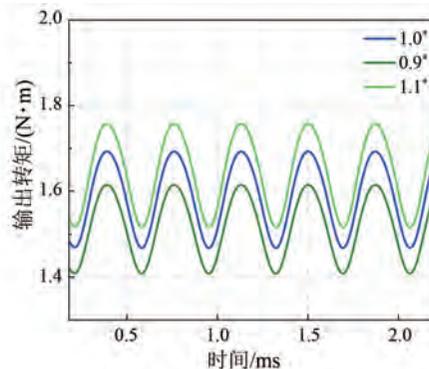


图8 永磁体性能差异对CPMSM转矩的影响

Fig. 8 Impact of permanent magnet performance variations on torque of CPMSM

由图 8 可知,当 $B_r^* = 1.0$ 时,电机输出转矩平均值为 $1.59 \text{ N}\cdot\text{m}$;当 $B_r^* = 0.9$ 时,电机输出转矩平均值为 $1.52 \text{ N}\cdot\text{m}$,与 $B_r^* = 1.0$ 时相比降低了 4.40%;当 $B_r^* = 1.1$ 时,电机输出转矩平均值为 $1.66 \text{ N}\cdot\text{m}$,与 $B_r^* = 1.0$ 时相比增加了 4.40%。

2.1.2 性能差异的永磁体的分布对电机电磁场及电磁性能的影响

为平衡计算成本与精度,本文采用整数块×极限幅度的方法,量化永磁体性能差异的分布对CPMSM电磁场及性能的最大影响范围。为简化分析,假设 $B_r^* = 0.9$,且对每块永磁体进行编号,永磁体编号及存在性能差异的永磁体分布情况分别如图 9 和表 2 所示。

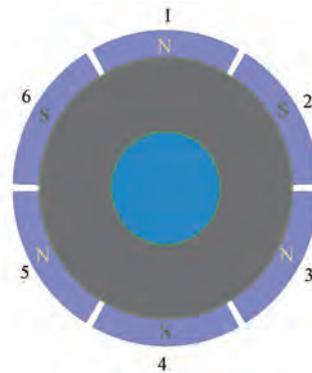


图9 永磁体编号

Fig. 9 Permanent magnet number

首先,利用电磁场有限元计算模型分析存在性能差异的永磁体的分布对空载感应电动势的影响,结果如图 10 所示。

表 2 存在性能差异的永磁体的分布情况

Tab. 2 Distribution of permanent magnets with performance variations

案例	差异永磁体分布情况
1	1
2	1, 2
3	1, 3
4	1, 4
5	1, 2, 3
6	1, 2, 4
7	1, 2, 3, 4
8	1, 2, 3, 5
9	1, 2, 3, 4, 5
10	1, 2, 3, 4, 5, 6

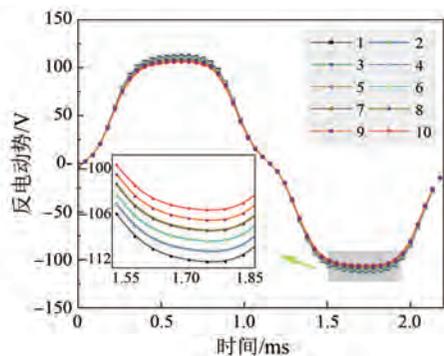


图 10 存在性能差异的永磁体的分布对空载感应电动势的影响

Fig. 10 Impact of permanent magnets with performance variations on no-load induced EMF

由图 10 可知,随着磁性能下降、永磁体块数的增加,电机的空载感应电动势逐渐降低。当存在性能差异的永磁体块数相同时,空载感应电动势大小也相同,与存在性能差异的永磁体的分布位置无关。当只有一块永磁体性能存在差异时的感应电动势为 112.29 V,当六块永磁体都存在差异时的感应电动势为 105.82 V,降低了 5.76%。

2.2 永磁体性能差异对电机温度场的影响

在分析电磁场的基础上,还分析了批量生产永磁体性能差异程度及分布对 CPMSM 温度场的影响。对 CPMSM 温度场进行计算时,假设环境温度为 25 °C^[28-29]。

2.2.1 批量生产永磁体性能差异程度对电机温度场的影响

首先利用温度计算模型分析了永磁体性能差异程度对电机整体温度及绕组温度、永磁体温度

的影响,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,当 $B_r^* = 1.0$ 时,电机的最高温度为绕组端部的 104.43 °C,永磁体最高温度为 83.28 °C。当 $B_r^* = 0.9$ 时,绕组端部温度为 101.86 °C,永磁体温度为 78.47 °C,与 $B_r^* = 1.0$ 时情况相比,温度分别降低了 2.46% 和 5.77%。当 $B_r^* = 1.1$ 时,绕组端部温度为 107.0 °C,永磁体温度为 88.07 °C,与 $B_r^* = 1.0$ 时相比,温度分别增加了 2.46% 和 5.75%。

2.2.2 性能差异的永磁体的分布对电机温度场的影响

分析性能差异的永磁体的分布情况对电机温度分布的影响,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,随着磁性能下降、永磁体块数增加,电机各部件的温度都逐渐下降。当存在性能差异的永磁体块数相同时,电机各部件温度变化不大,这说明电机温度与存在性能差异的永磁体的分布位置无关。

2.3 批量生产永磁体性能差异对定子护套应力和形变的影响

屏蔽套热应力和形变分析是 CPMSM 设计、制造和运维的核心环节,直接影响电机的电磁性能、机械可靠性及安全性。因此,需要分析批量生产永磁体性能差异程度及分布对 CPMSM 屏蔽套热应力和形变的影响。

以电磁场和温度场的计算结果为载荷激励,求解电磁力和热应力共同作用下定子屏蔽套的形变。参考弹性力学相关知识,热应力计算的有限元方程^[30]可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \beta t \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \beta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的应变; E 为物体弹性模量; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的正应力; μ 为泊松比; β 为线性膨胀系数; t 为温度变化量。

永磁体磁性能存在差异时,对定子屏蔽套形变的影响如图 12 所示。

由图 12 可知,当 $B_r^* = 1.0$ 时,定子罐套的最

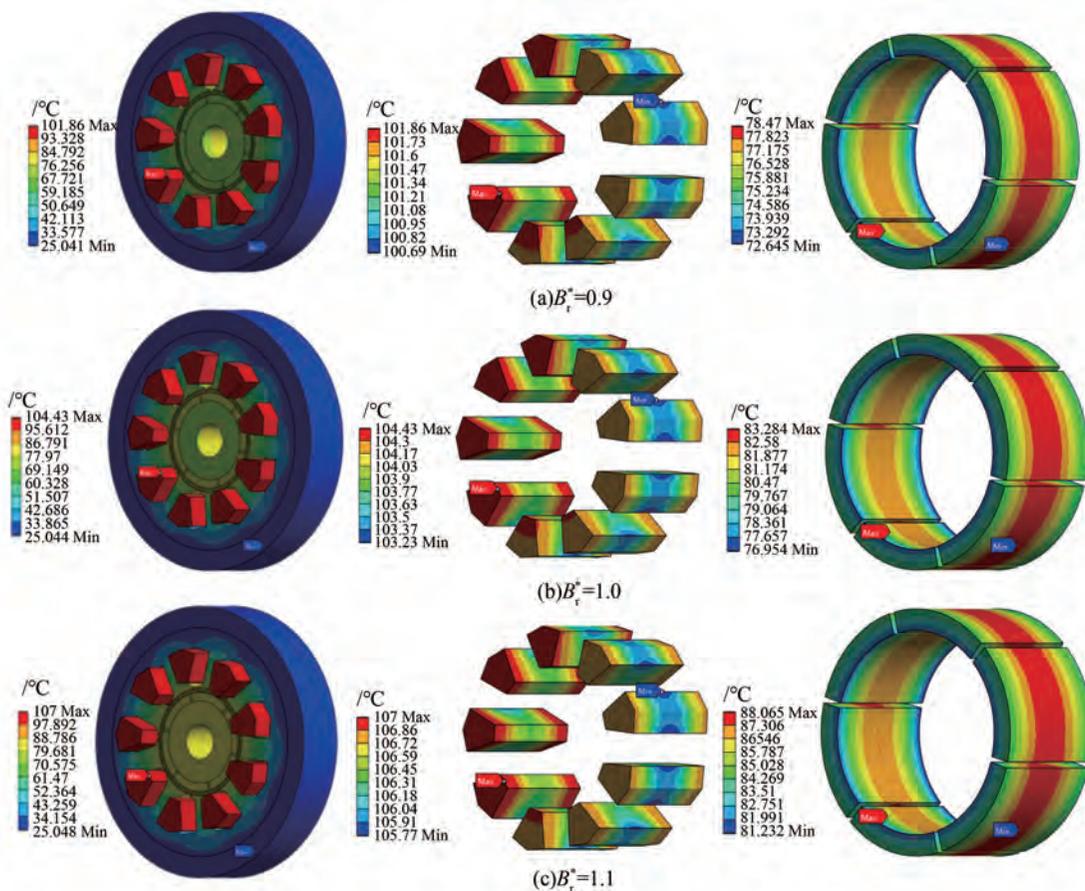


图 11 永磁体性能差异程度对电机温度分布影响

Fig. 11 Influence of permanent magnet property variations on motor temperature distribution

表 3 存在性能差异永磁体分布对电机温度场的影响

Tab. 3 Impact of permanent magnets with performance variations distribution on motor temperature field

案例	永磁体温度/°C	机壳温度/°C	绕组端部温度/°C
1	85.70	32.40	103.98
2	83.21	32.72	103.56
3	83.24	32.73	103.52
4	83.61	32.72	103.56
5	81.10	32.94	103.13
6	80.60	32.94	103.13
7	78.66	33.26	102.71
8	78.64	33.30	102.68
9	77.05	33.49	102.28
10	77.02	33.66	101.86

大形变为 8.64×10^{-7} m。当 $B_r^* = 0.9$ 时,定子罐套的形变减小到 7.9×10^{-7} m,表明随着永磁体磁性

能的下降,罐套形变减小。此外,所有罐套形变均符合气隙公差要求。

3 试验验证

为了验证上述分析结果,根据表 1 中的参数制造了两种永磁体转子#1、#2,如图 13 所示;并搭建了电机测试平台,如图 14 所示。转子#1使用的永磁体等级为 N38,对应的剩磁为 1.22 T,转子永磁体采用块状结构;转子#2使用的永磁体等级为 N30,对应的剩磁为 1.10 T,转子永磁体采用环形结构。为确保试验对比的有效性,两种转子的永磁体尺寸参数严格保持一致,仅磁性能存在差异。

图 14 展示了原型测试平台,其中包括转矩和转速测试仪、测功机、功率分析仪、温度测试仪和温度计。利用该平台,在确保电机输出功率相同的条件下,对#1和#2电机的电磁性能和温度进行测试,结果如表 4 所示。

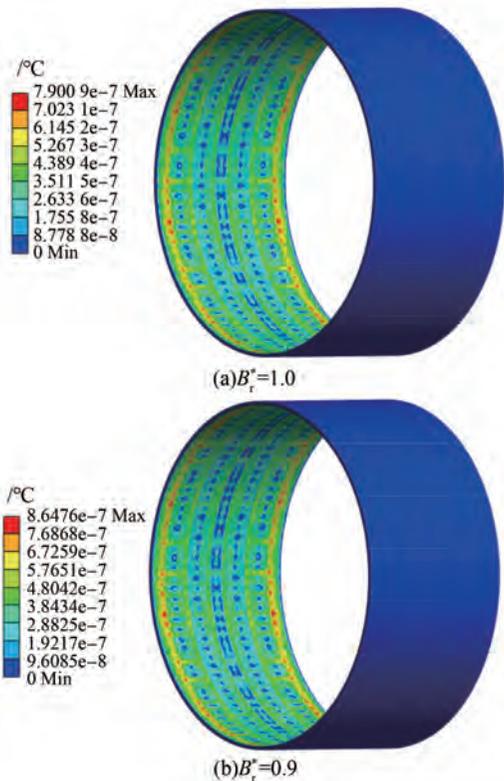


图 12 永磁体性能差异对定子屏蔽套形变影响
Fig. 12 Impact of permanent magnet performance variations on stator shield-can deformation

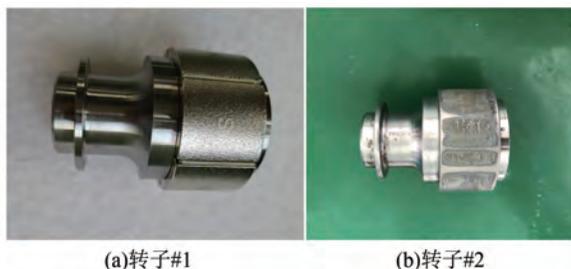


图 13 两种永磁体转子
Fig. 13 Two types of permanent magnet rotors

表 4 转子#1 与转子#2 性能对比

Tab. 4 Performance comparison between rotor #1 and rotor #2

性能指标	转子#1	转子#2	误差/%
功率因数	0.78	0.76	2.56
效率/%	68.0	69.2	1.76
输出功率/kW	1.50	1.49	-
绕组温度/°C	92.8	97.9	5.50
机壳温度/°C	36.1	38.2	5.82

由表 4 可知,在电机输出功率保持不变的条

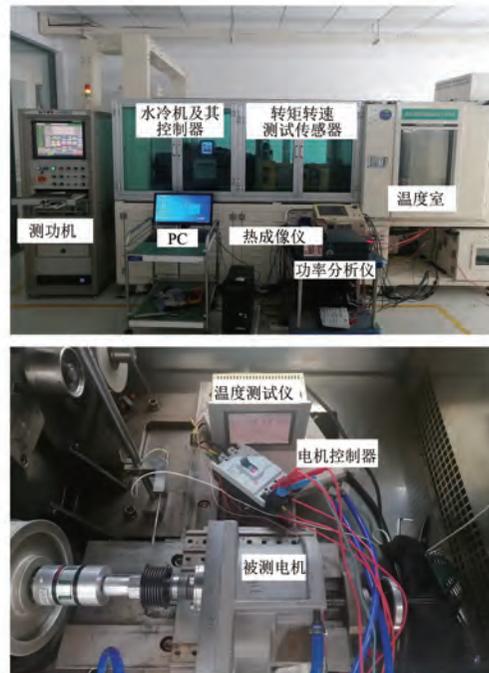


图 14 测试平台

Fig. 14 The test platform

件下,#2 电机的功率因数与#1 电机相比几乎没有变化,仅降低了 2.56%,但其电机效率提高了 1.2 个百分点。这是因为永磁体磁性能的降低导致 CPMSM 的铁损和屏蔽损耗减少。为了保持相同的电机输出功率,电流增加导致了铜损增加,而在 CPMSM 损耗中,屏蔽损耗所占比例比铜损更大,从而导致电机效率提高。这与之前的研究结果一致。此外,从表 4 还可以看出,与#1 电机相比,#2 电机的绕组温度增加了 5.5%,这是铜损增加导致的;而外壳温度几乎没有变化,这是由于电机外壳采用了强制水冷。

此外,需要指出的是,尽管本文通过有限元分析和一些试验验证了批量生产的永磁体性能差异对 CPMSM 多物理场性能的影响,但仅针对剩磁差异为 10% 的典型工况进行了测试和验证,未能涵盖更广泛的永磁体性能变化范围。这一局限性需要在后续研究中通过更系统的试验设计加以改进。

4 结语

本文深入分析了批量生产的永磁体性能差异及其分布对 CPMSM 多物理场性能的影响,主要结论如下。

(1) 当永磁体的剩磁降低 10% 时,气隙磁密

的幅值降低了 6.30%,空载反电动势降低了 7.10%,铁损和涡流损耗减少了 11.50%,输出转矩下降了 4.40%。电磁参数表现出非线性变化;温度场和反电动势仅与性能不同的永磁体数量有关,而与其空间分布无关。

(2)永磁体剩磁降低 10%会使定子屏蔽套的最大热形变减少 8.5%。此外,试验还证实了剩磁降低 10%会使 CPMSM 的效率提高 1.2 个百分点。

(3)永磁体等级为 N38 的电机与 N30 相比,功率因数相差 2.56%,效率相差 1.76%,绕组温度相差 5℃,机壳温度相差 5.82℃。

需要指出的是,本文仅考虑了剩磁的变化,而忽略了矫顽力等其他参数的影响。未来将探讨多个参数的耦合效应。

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

郑继鑫、李明进行了方案设计、内容总结与论文撰写,郑继鑫、段卫川进行了试验研究,郑继鑫、李明、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 Zheng Jixin and Li Ming. The experiment was conducted by Zheng Jixin and Duan Weichuan. The manuscript was revised by Zheng Jixin, Li Ming and Lun Shuxian. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] Vlachou V I, Sakkas G K, Xintaropoulos F P, et al. Overview on permanent magnet motor trends and developments [J]. *Energies*, 2024, 17(2): 538.
- [2] Liu J P, Li X L, Yan B, et al. Electromagnetic performance analysis of a field-modulated permanent magnet motor using improved hybrid subdomain method [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(3): 1753-1766.
- [3] 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.

[4] Mohammad R S, Mohammad A J K, Jamshid K, et al. Split-tooth flux reversal motor assisted with yoke and slot PMs [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(5): 10769-10784.

[5] 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.

[6] 穆海琦,周舒昊,于添昊,等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 113-122.

Mu H Q, Zhou S H, Yu T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 113-122.

[7] 侯云鹤,程祥,张炳义. 基于槽极比选择的切向永磁同步电机永磁体涡流损耗抑制措施[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(5): 100-110.

Hou Y H, Cheng X, Zhang B Y. Measures to suppress eddy current loss in permanent magnets of tangential permanent magnet synchronous motors based on slot-pole ratio selection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 100-110.

[8] Xu Y M, Xu Z Y, Cao H P, et al. Torque ripple suppression of synchronous reluctance motors for electric vehicles based on rotor improvement design [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 9(3): 4328-4338.

[9] 李渊,王旭平,白崑儒,等. 基于转子形状优化设计的三次谐波注入式三相 IPMSM 气隙磁场优化[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(6): 57-62.

Li Y, Wang X P, Bai Y R, et al. Optimization of air-gap magnetic field of five-phase IPMSM with third harmonic injection based on rotor shape optimization design [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(6): 57-62.

- [10] 刘福贵, 杨凯, 赵志刚, 等. 分数槽集中绕组表贴式永磁同步电机转子损耗[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(2): 52-56+71.
Liu F G, Yang K, Zhao Z G, et al. Rotor loss of surface permanent magnet synchronous motor with fractional slot concentrated windings [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(2): 52-56+71.
- [11] 郑军强, 赵文祥, 吉敬华, 等. 分数槽集中绕组永磁电机低谐波设计方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 272-280.
Zheng J Q, Zhao W X, Ji J H, et al. Review on design methods of low harmonics of fractional-slot concentrated-windings permanent-magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 272-280.
- [12] Yamazaki K, Shina M, Kanou Y, et al. Effect of eddy current loss reduction by segmentation of magnets in synchronous motors; Difference between interior and surface types [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4756-4759.
- [13] Woo J H, Bang T K, Lee H K, et al. Electromagnetic characteristic analysis of high-speed motors with rare-earth and ferrite permanent magnets considering current harmonics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 57(2): 1-5.
- [14] Liu Z Q, Zhang G Y, Du G H. An Investigation into the pole-slot ratio and optimization of a low-speed and high-torque permanent magnet motor [J]. Applied Sciences, 2024, 14(10): 3983.
- [15] 匡建雨, 骆皓, 孙春阳, 等. 分数槽集中绕组极对数谐波抑制方案对比研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 110-122.
Kuang J Y, Luo H, Sun C Y, et al. Comparison study on pole pair harmonic suppression schemes in fractional slot concentrated windings [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 110-122.
- [16] Zou L, Zhou Y P, Wei Y Y, et al. Analysis of air gap length by radial electromagnetic force in interior permanent magnet synchronous motor considering flux-weakening control [C]// 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems, Gyeongju, Korea, Republic of, 2021: 1311-1316.
- [17] He W, Hang J, Ding S C, et al. Robust diagnosis of partial demagnetization fault in PMSMs using radial air-gap flux density under complex working conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12001-12010.
- [18] Li Z X, Yang G L, Fan Y M, et al. Irreversible demagnetization mechanism of permanent magnets during electromagnetic buffering [J]. Defence Technology, 2021, 17(3): 763-774.
- [19] Zhang Y, McLoone S, Cao W P. Electromagnetic loss modeling and demagnetization analysis for high speed permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 54(3): 1-5.
- [20] Baranski M, Szlag W, Lyskawinski W. Experimental and simulation studies of partial demagnetization process of permanent magnets in electric motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3137-3145.
- [21] Wang D W, Yang W, Yang J F, et al. Research on electromagnetic vibration characteristics of a permanent magnet synchronous motor based on multi-physical field coupling [J]. Energies, 2023, 16(9): 3916.
- [22] 张闯, 张伟, 刘鑫. 核磁共振分析仪用永磁体的无源匀场方法[J]. 大科技, 2017(29): 250.
Zhang C, Zhang W, Liu X. Passive shimming method of permanent magnet for nuclear magnetic resonance analyzer [J]. Super Science, 2017(29): 250.
- [23] 杨丹, 刘素羽, 张昊, 等. 基于永磁体和线圈复合结构的磁性粒子成像零磁场研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(2): 335-345.
Yang D, Liu S Y, Zhang H, et al. Research on the zero magnetic field of magnetic particle imaging based on the composite structure of permanent magnets and coils [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 335-345.
- [24] Tian M M, Karimi H R, Li Y Y, et al. Calculation of no-load induced electromotive force of pole changing line-start permanent magnet synchronous motor [J]. IET Electric Power Applications, 2023, 17(8): 1030-1040.
- [25] Shi Z, Sun X D, Yang Z B, et al. Design optimization of a spoke-type axial-flux PM machine for in-wheel drive operation [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 10(2): 3770-3781.
- [26] 陈子淋, 李明, 王蓉, 等. 定子齿开槽对屏蔽式永

- 磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 432-441.
- Chen Z L, Li M, Wang R, et al. Effect of stator tooth slotting on cogging torque of canned permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(4): 432-441.
- [27] Tang H Y, Li W L, Wu Z G. Influence of inverter open circuit fault on multiple physical quantities in the PMSM [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 38(1): 901-916.
- [28] Feng G D, Lai C Y, Li W L, et al. Efficient permanent magnet temperature modeling and estimation for dual three-phase PMSM considering inverter nonlinearity [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(7): 7328-7340.
- [29] Zhang H Q, Xiao D. Steady-state efficiency optimization method for PMSM considering current distribution and iron loss resistance [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(12): 4924-4928.
- [30] 秦鑫, 安跃军, 张志恒, 等. 化工泵用新型复合鼠笼结构屏蔽电机驱动性能及多物理场分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 53-59.
- Qin X, An Y J, Zhang Z H, et al. Driving performance and multiphysics analysis of new composite squirrel cage structure canned motor for chemical pumps [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(5): 53-59.
-
- 收稿日期:2025-07-07
收到修改稿日期:2025-09-09
作者简介:
郑继鑫(2000—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,zjx2023008029@bhu.edu.cn;
* 通信作者: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,liming1@qy-mail.bhu.edu.cn。