

非对称永磁体对屏蔽式永磁同步电机性能的影响

李 明^{1,2*}, 陈子淋¹, 段卫川¹, 伦淑娴¹

(1. 渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210;

2. 沈阳工业大学 特种电机与高压电器教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110000)

The Influence of Asymmetric Permanent Magnet on the Performance of Canned Permanent Magnet Synchronous Motors

Li Ming^{1,2*}, Chen Zilin¹, Duan Weichuan¹, Lun Shuxian¹

(1. School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China;

2. Key Laboratory of Special Machine and High Voltage Apparatus, Shenyang University of Technology, Shenyang 110000, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of large cogging torque, low motor efficiency and high torque ripple commonly found in canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM), this paper aims to analyze the influence of asymmetric permanent magnet structure on the performance of CPMSM. [Methods] Based on the arc-shaped permanent magnet commonly used in engineering, this paper adopted the geometric centerline of a single permanent magnet as the reference. The unilateral eccentric design of the permanent magnet was realized by offsetting the centers of its inner and outer diameters, and three asymmetric permanent magnet structures were proposed. The key motor performances of CPMSM with different permanent magnet structures, including air-gap flux density, induced electromotive force, unilateral magnetic pull of the can sleeve, demagnetization coefficient of permanent magnets, motor losses and operating efficiency, were systematically compared and analyzed under no-load and load conditions. [Results] The results showed that the three asymmetric permanent magnet structures shared basically the same performance variation trend. As the offset of the permanent magnet center increased, the amplitude of air-gap flux density decreased. The amplitudes of cogging torque and can loss decreased accordingly, and the motor

efficiency was improved. Without taking manufacturing difficulty and cost into account, the left-side asymmetric structure was the optimal scheme. The motor with this structure obtained the highest efficiency and power factor, the smallest drop in output torque, and the most prominent suppression effect on torque ripple. In addition, the unbalanced magnetic pull caused by the asymmetric permanent magnet exerted a negligible effect on the overall performance of the motor. Compared with the conventional optimization scheme of stator-tooth slotting, the proposed method suppressed cogging torque while maintaining favorable electromagnetic performance, and exhibited remarkable advantages. [Conclusion] The asymmetric permanent magnet structure proposed in this paper achieve remarkable performance in weakening cogging torque, suppressing torque ripple and improving the comprehensive performance of CPMSM. Although this structure brings a certain degree of magnetic-circuit unbalance, it does not alter the overall magnetic-circuit distribution characteristics of the motor, and the motor still maintain excellent electromagnetic performance. This study provides references for the optimal design of CPMSM.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; unilateral eccentric; asymmetric permanent magnet; motor performance

基金项目: 国家自然科学基金(62473061); 辽宁省博士科研启动基金(2025-BS-0809)

National Natural Science Foundation of China (62473061);
Doctoral Research Startup Foundation of Liaoning Province, China
(2025-BS-0809)

摘 要: [目的] 针对屏蔽式永磁同步电机(CPMSM)普遍存在齿槽转矩大、电机效率偏低以及转矩脉动大等问题, 本文旨在分析非对称永磁体结构对 CPMSM 性能的影响。

【方法】本文以工程常用弧型永磁体为基础,以单块永磁体几何中心线为基准,通过偏移永磁体内、外径圆心的方式实现永磁体单侧偏心结构设计,提出三种非对称永磁体结构。系统对比分析了不同永磁体结构的 CPMSM 在空载与负载工况下的气隙磁密、感应电动势、屏蔽套单侧磁拉力、永磁体退磁系数、电机损耗及运行效率等关键电机性能。**【结果】**结果表明,三种非对称永磁体结构的性能变化趋势基本一致:随着永磁体中心偏移量增大,气隙磁密幅值降低;齿槽转矩幅值与屏蔽套损耗随之同步减小,电机效率得到提升。在不考虑加工制造难度与成本的条件下,左侧非对称结构为最优方案,该结构电机效率与功率因数最高,输出转矩降幅最小,转矩脉动抑制效果最为显著。此外,非对称永磁体所引发的不平衡磁拉力对电机整体性能的影响可忽略。相较于传统定子齿开槽优化方案,所提方法在抑制齿槽转矩的同时可维持良好的电磁性能,具备显著优势。**【结论】**本文所提非对称永磁体结构在削弱齿槽转矩、抑制转矩脉动以及改善电机综合性能方面效果显著。该结构虽会带来一定程度的磁路不平衡,但不会改变电机整体磁路分布特征,电机依旧可以保持优良的电磁性能。本研究可为 CPMSM 的优化设计提供一定参考。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机;单侧偏心;非对称永磁体;电机性能

0 引言

近年来,真空泵作为一种常见设备,被广泛应用于半导体制造、化工、食品加工、以及医疗等领域^[1]。目前,真空泵用驱动电机主要为屏蔽式永磁同步电机(Canned Permanent Magnet Synchronous Motor, CPMSM)^[2-3]。与永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)相比,CPMSM 的主要结构区别在于其独特的屏蔽套设计。PMSM 的转子和定子直接暴露在空气中,而 CPMSM 的转子和定子均被一层屏蔽套包裹着^[4-5]。这种结构使得 CPMSM 在真空泵等对密封性要求较高的应用场景中表现出色,能够有效防止真空泄漏,同时提高电机的散热效率。

随着大力推动航空航天、船舶及新能源汽车等行业创新绿色发展,电机领域相关技术的要求不断提高,PMSM 逐渐向高转矩密度和节能的方向发展^[6]。由于 PMSM 的永磁体提供电机能量转换所需的磁场,因此其直接影响气隙磁密、感应电动势、齿槽转矩、输出转矩、转矩脉动和损耗等

电机性能^[7-11]。

国内外学者针对优化永磁体以提高电机性能展开了大量研究,优化主要聚焦于永磁体排列方式^[12-14]和永磁体形状^[15-16]。相较于永磁体排列方式的优化,永磁体形状会直接影响电机气隙磁密,通过调整磁极参数实现磁场分布的优化,对电机结构改动较小,无需改变定转子拓扑结构,可显著提升电机电磁性能并降低开发成本,因此本文主要从永磁体形状这一方面展开研究。文献[17]分析了矩形、倒角和圆角三种磁极结构对电机性能的影响,发现通过改变永磁体形状、减少永磁体用量可以改变电机气隙磁密分布、感应电动势波形和电机的定位力大小。文献[18]通过研究凸半圆形和凸梯形两种不等厚磁极,发现这两种磁极可以提高电机的空载感应电动势幅值且能降低谐波含量和齿槽转矩幅值。文献[19]提出一种永磁电机直角倒角方案,并设计了永磁体两端角度变量的参数范围,试验结果表明永磁体有倒角可降低齿槽转矩和转矩脉动,优化电机性能。文献[20]提出采用不同极弧系数组合的分段倾斜磁极设计可以有效削弱电机齿槽转矩,提高电机性能。文献[21]提出一种新型 PMSM,通过将永磁体形状设计为正弦波与三阶谐波的组合,实现了电机的高转矩密度和低转矩脉动。文献[22]提出一种斜边为弧形的三角形磁极结构,试验结果表明,与传统长方形磁极相比,斜边为弧形的三角形永磁体的电机齿槽转矩降低了 61.8%,且在永磁体体积相同的前提下电机性能也得到提升。文献[23]提出一种新型不对称永磁体结构,通过优化永磁体的形状和布局,有效降低了齿槽转矩,同时简化了电机结构。

综上所述,改变永磁体形状可以有效改善 PMSM 性能。然而,CPMSM 特有的屏蔽套结构通常由硬质金属合金制成,硬质合金不导磁但导电,因此其在旋转磁场的作用下存在涡流效应,对电机气隙磁密分布产生影响。目前永磁体形状对 CPMSM 性能的影响暂不明确,因此本文对非对称永磁体形状的 CPMSM 展开研究。

1 非对称永磁体模型

1.1 CPMSM 模型

本文以一台 1.5 kW 的 CPMSM 为研究对象,

其主要参数如表 1 所示。为了满足屏蔽式电机耐高温和耐高压的工作环境,本文所用的屏蔽套由具有高电阻率、不导磁以及高强度特点的硬质金属合金材料 SUS316 制作而成,其电导率为 $1.25 \times 10^6 \text{ S/m}$,相对磁导率为 1。

表 1 CPMSM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of CPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	9 000
气隙长度/mm	1
槽数	9
极数	6
永磁体外径/mm	23.25
永磁体内径/mm	19.25
永磁体厚度/mm	4
永磁体材料	N38UH
屏蔽套厚度/mm	0.5
屏蔽套材料	SUS316

根据表 1 的参数,建立如图 1 所示的二维有限元模型,用于分析 CPMSM 的磁场分布。为了简化分析过程,作出如下假设。

- (1) CPMSM 材料为各向同性;
- (2) 忽略电机的端部效应,向量磁位只有 Z 轴分量;
- (3) 除定子铁心和转子磁轭外,材料的磁导率和电导率都恒定;
- (4) 温度对材料电导率和磁导率的影响忽略不计。

尽管二维有限元分析本质上忽略了三维端部效应,但由于其计算效率高且在初步设计阶段具有可接受的精度,已被广泛应用于电机性能与损耗研究^[24]。二维有限元模型的控制方程和边界条件为^[25]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{dA_z}{dt} \\ A_z|_{\gamma} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_z 为磁矢位; μ 为磁导率; σ 为电导率; J_s 为电流密度; γ 为外边界条件。

1.2 非对称永磁体结构

目前,大多数电机所采用的永磁体结构如图

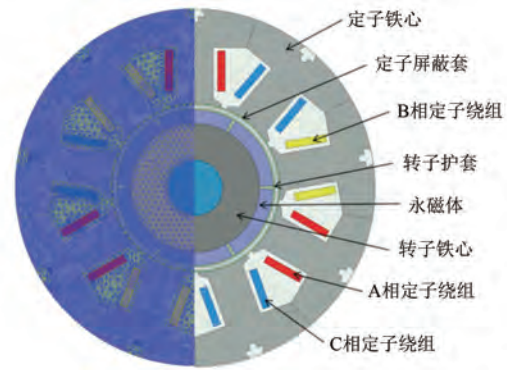


图 1 CPMSM 二维有限元模型

Fig. 1 Two-dimensional finite element model of CPMSM

2(a)所示。而现有研究中,学者们通常通过改变永磁体内外径的圆心研究永磁体几何结构对电机性能的影响,如文献[26]所提的面包型偏心磁极结构,如图 2(b)所示,该磁体结构仍为对称结构。面包型偏心磁极结构通过对永磁体内外径圆心进行同向偏心调整,使永磁体呈“面包型”并保持几何对称。本文设置 CPMSM-II 型永磁体参数具体为:永磁体外径圆心偏移量为 5 mm,内径圆心与转子轴心同心,永磁体最大厚度为 4 mm,永磁体内径为 19.25 mm,外径为 23.25 mm。

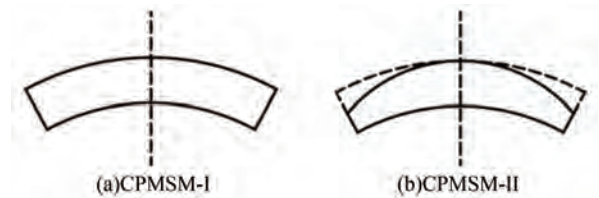


图 2 对称永磁体结构

Fig. 2 Symmetric permanent magnet structures

为研究非对称永磁体形状对 CPMSM 电磁性能的影响,本文以永磁体中心线为轴线,对永磁体进行单侧偏心来实现非对称,永磁体单侧偏心模型如图 3 所示。图中, O_0 、 R_0 分别为外弧的圆心、半径; O_1 、 R_1 分别为与电机转轴同心的内弧的圆心、半径; h'_m 为永磁体充磁方向的厚度,其随转子位置角 θ 的变化而变化; h_m 为永磁体充磁方向最大厚度; h 为圆心偏移量, $h = R_0 + h_m - R_1$,即永磁体内外半径差; δ' 为气隙径向长度,其随 θ 的变化而变化; δ 为未偏心侧电机气隙长度。

本文只研究永磁体正向偏心的情况,即永磁体的内弧长度小于外弧长度。

定义磁极表面不均系数 h_b 为

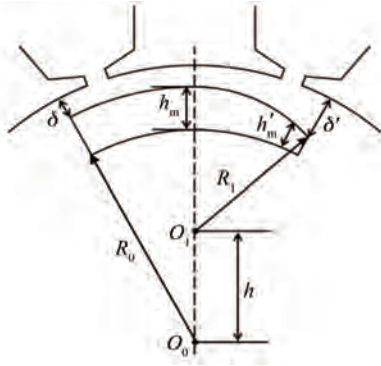


图 3 永磁体单侧偏心模型

Fig. 3 Unilateral eccentricity model of permanent magnet

$$h_b = \frac{R_1 + h_m}{R_0} = \frac{R_1 + h_m}{R_1 - h_m + h} \quad (2)$$

由式(2)可知,当 R_1 和 h_m 一定时, h_b 随 h 的增加单调递减。

当磁极不等厚时,气隙磁密的径向分量 $B'(\theta)$ 可表示为^[27]

$$B'(\theta) = B_r \frac{h'_m(\theta)}{h'_m(\theta) + \delta'(\theta)} = B_r \frac{h'_m(\theta)}{h_m + \delta(\theta)} = B'_r(\theta) \frac{h_m(\theta)}{h_m + \delta(\theta)} \quad (3)$$

$$B'_r(\theta) = \frac{h'_m(\theta)}{h_m} B_r \quad (4)$$

式中: B_r 为永磁体的剩磁。

根据图 3 所示的单侧偏心方法,本文以单个永磁体的中心线为基准,仅对永磁体的一侧进行偏移,设计了三种非对称永磁体结构。分别对单个永磁体左侧或右侧进行偏移,如图 4(a) 和 4

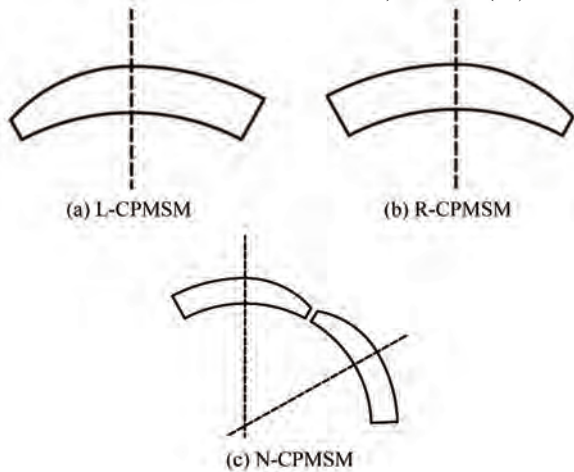


图 4 非对称永磁体结构

Fig. 4 Asymmetric permanent magnet structures

(b) 所示;对两相邻永磁体的其中一块向左偏移,另一块向右偏移,如图 4(c) 所示。

CPMSM-II 与本文所提三种非对称结构虽都涉及偏心概念,但二者的几何构型与磁路特征存在本质区别:CPMSM-II 为对称偏心,磁路对称分布;L-CPMSM、R-CPMSM 和 N-CPMSM 为非对称单侧偏心,磁路呈现局部非对称分布特征。本文系统研究非对称偏心对电机多维性能的影响。

2 非对称永磁体结构对 CPMSM 电磁性能的影响

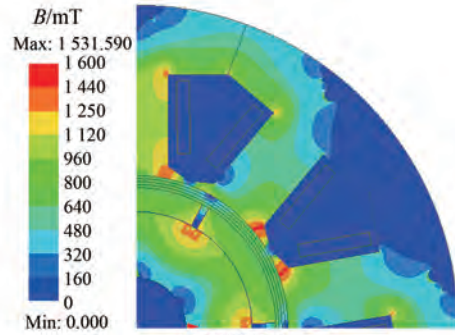
2.1 空载时非对称永磁体结构对 CPMSM 性能的影响

空载运行状态是研究电机性能的重要依据之一,是定子绕组在开路状态下电机的电磁特性,此时电机内的磁场仅由永磁体产生。在相同额定功率、额定转速、额定转子拓扑结构、永磁体材料及激励条件下,对两种对称结构 CPMSM-I、CPMSM-II 和三种非对称结构 L-CPMSM、R-CPMSM 及 N-CPMSM 的 CPMSM 空载特性进行对比分析。空载时的磁密分布如图 5 和图 6 所示。

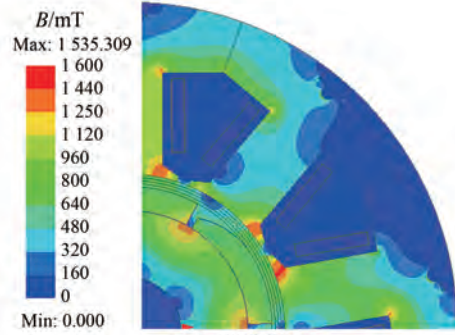
由图 5 可知,CPMSM-II 为对称结构,电机磁密分布较均匀,在定子轭部磁感应强度较大。由图 6 可知,当永磁体为非对称结构时,磁密分布不均匀性增加,永磁体相对薄的一侧的定子轭部磁密明显降低。三种非对称永磁体结构的磁密幅值最大值分布区域明显缩小。

为了进一步研究非对称永磁体结构对 CPMSM 空载特性的影响,分析了 $h = 1 \text{ mm}$ 时,电机空载运行的气隙磁密波形及谐波含量,结果如图 7 所示。气隙磁密波形的正弦畸变率如表 2 所示。

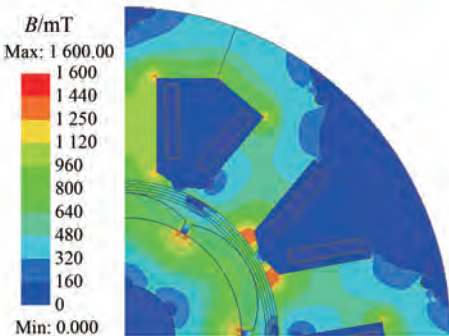
由图 7 所示,永磁体形状改变后气隙磁密波形相应发生波动,这是电机齿槽效应导致的;且各次谐波含量都有所降低,如 CPMSM-I 基波幅值为 0.877 3,而 L-CPMSM、R-CPMSM 及 N-CPMSM 的基波幅值分别为 0.867 4、0.867 4 和 0.867 3,分别降低了 1.13%、1.13% 和 1.14%。由表 2 可知,永磁体形状改变后,气隙磁密波形更接近正弦波。可见,非对称永磁体结构使 CPMSM 的气隙磁密



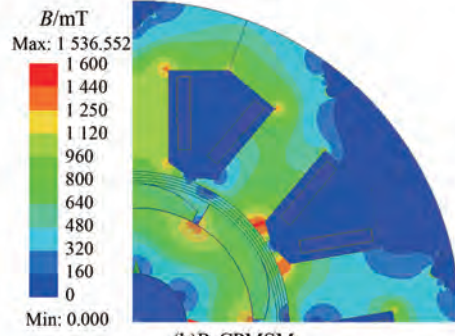
(a) CPMSM-I



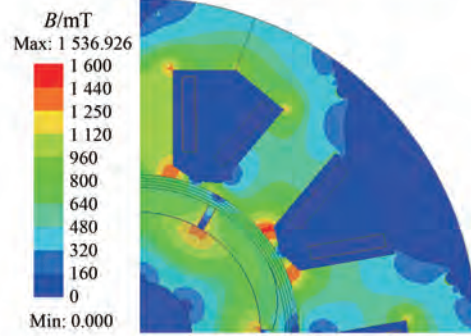
(a) L-CPMSM



(b) CPMSM-II



(b) R-CPMSM



(c) N-CPMSM

图5 空载时对称永磁体结构的CPMSM磁密分布

Fig. 5 Magnetic flux density distribution of CPMSM with symmetric permanent magnet structures under no-load condition

波形更接近正弦波,减少了高次谐波对电机运行稳定性的影响。

表2 空载时气隙磁密波形正弦畸变率

Tab. 2 Sine distortion rate of air-gap flux density waveforms under no-load condition

永磁体类型	正弦畸变率/%
CPMSM-I	26.00
CPMSM-II	24.06
L-CPMSM	25.09
R-CPMSM	25.10
N-CPMSM	25.16

空载时,不同偏移量 h 下的三种非对称永磁体结构的 CPMSM 气隙磁密波形及其谐波含量如图 8~图 10 所示。

由图 8~图 10 可知,当偏移量从 0 逐步增大至 10 mm 时,气隙磁密各次谐波含量逐渐降低,其中基波和三次谐波降幅较为明显,且波形正弦度得到改善。

尽管偏移量较大时气隙磁密波形正弦度较

图6 空载时非对称永磁体结构的CPMSM磁密分布

Fig. 6 Magnetic flux density distribution of CPMSM with asymmetric permanent magnet structures under no-load condition

好,但是基波幅值较小,直接影响电机的转矩密度和效率。综合考虑,本文选取最佳偏移量为 $h = 5$ mm,并以此为基础展开后续研究。

永磁体的形状直接影响气隙磁场,进而影响齿槽转矩^[28]。齿槽转矩是电机在无通电状态下,由于永磁体与定子齿槽之间的相互作用而产生的周期性转矩波动^[29]。这种转矩波动会导致电机的振动和噪声,从而影响电机运行平稳性。不同永磁体结构的 CPMSM 齿槽转矩如图 11 所示。

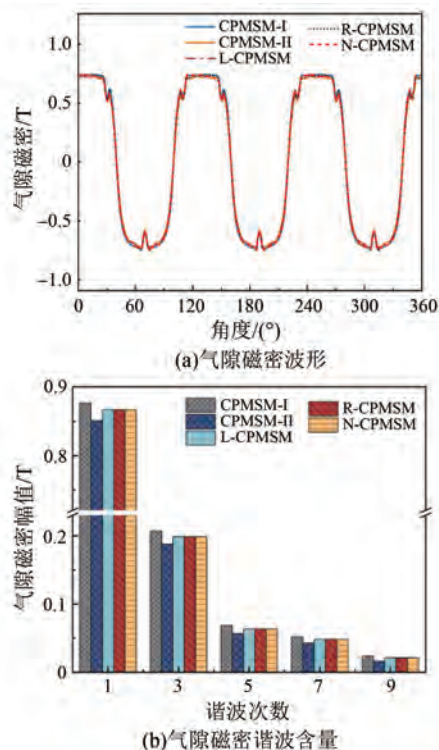


图 7 空载时气隙磁密波形及其谐波含量

Fig. 7 Air-gap flux density waveforms and their harmonic content under no-load condition

由图 11 可知,四种偏心结构的 CPMSM 齿槽转矩较永磁体无偏移时 (CPMSM-I) 均有所降低。L-CPMSM、R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构的齿槽转矩幅值分别为 $52.07 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 、 $36.37 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 和 $52.18 \text{ mN} \cdot \text{m}$, 相较于 CPMSM-I 结构的 $58.99 \text{ mN} \cdot \text{m}$, 分别降低了 11.73%、38.36% 和 11.54%。可见非对称永磁体形状中 R-CPMSM 结构的齿槽转矩幅值降低最明显。

此外,由图 11 可得当相邻永磁体不同侧永磁体外径圆心发生偏移时,N-CPMSM 齿槽转矩一个周期的机械角度发生了改变,等同于改变了电机的槽极组合。

2.2 输入电流恒定时非对称永磁体结构对 CPMSM 性能的影响

永磁体形状的改变会影响磁场分布,从而影响感应电动势。不同永磁体结构的 CPMSM 的感应电动势波形及其谐波含量如图 12 所示。

由图 12(a) 可知,四种偏心结构的 CPMSM 感应电动势幅值较永磁体无偏移时均有所降低。L-CPMSM、R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构的

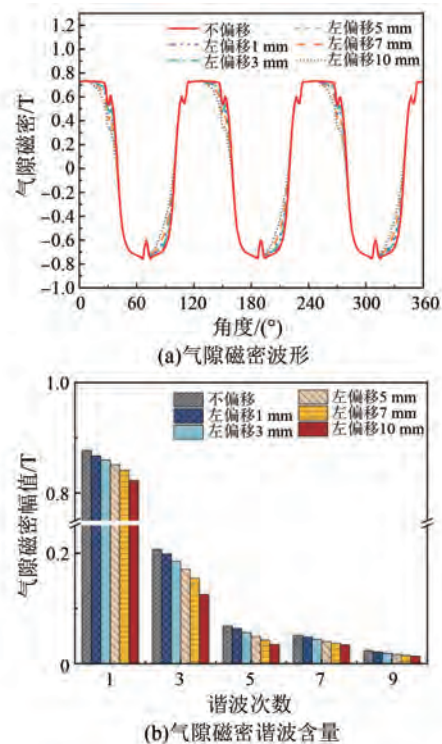


图 8 L-CPMSM 结构的 CPMSM 气隙磁密波形及其谐波含量

Fig. 8 Air-gap flux density waveforms and their harmonic content of CPMSM with L-CPMSM structure

感应电动势幅值分别为 127.71 V 、 136.30 V 和 134.91 V , 相较于 CPMSM-I 结构的 136.57 V , 分别降低了 6.49%、0.18% 和 1.22%。由图 12(b) 可知,四种偏心结构的 CPMSM 感应电动势各次谐波较永磁体无偏移时均有所降低,其中基波和 5 次谐波变化较为明显。R-CPMSM 结构的基波含量最高,所以 R-CPMSM 结构对改善感应电动势的效果最好,这是因为基波幅值决定了最大转矩和功率的输出能力。

在输入电流恒定时,不同永磁体结构的 CPMSM 输出转矩如图 13 所示。

由图 13 可知,四种偏心结构的 CPMSM 输出转矩较永磁体无偏移时均有所降低。L-CPMSM、R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构的输出转矩较 CPMSM-I 结构分别降低了 0.63%、1.26% 和 0.63%。结果表明,处于最佳偏移量时非对称永磁体结构对电机输出转矩影响较小。L-CPMSM 和 R-CPMSM 结构的转矩脉动较 CPMSM-I 结构分别减小了 1.76% 和 1.27%,但 N-CPMSM 结构的转矩脉动却增大了 0.32%。

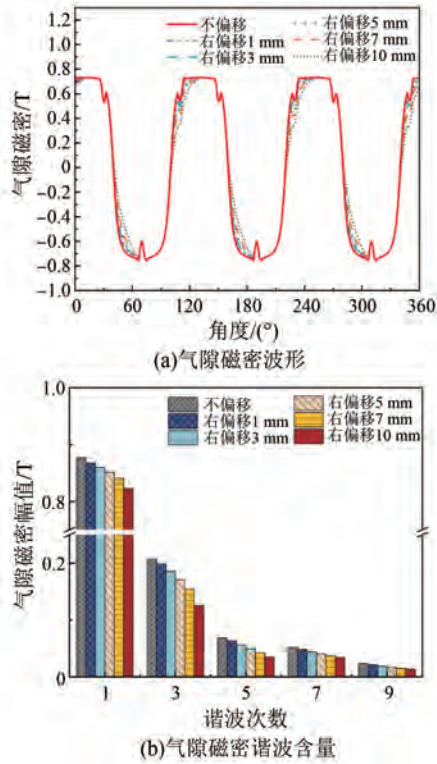


图9 R-CPMSM 结构的 CPMSM 气隙磁密波形及其谐波含量

Fig. 9 Air-gap flux density waveforms and their harmonic content of CPMSM with R-CPMSM structure

结合图 12(b) 与图 13 分析可得, 虽然 L-CPMSM 与 R-CPMSM 为几何对称结构, 但二者气隙磁密基波幅值存在显著差异。L-CPMSM 结构的基波含量较低, 转矩脉动较大, 证实了非对称偏心的方向性会影响磁通分布, 与文献[30]的研究结论一致。如图 6 所示, R-CPMSM 结构的磁通分布更为集中, 故其感应电动势基波幅值显著高于 L-CPMSM 结构。

此外, 永磁体非对称会导致磁路呈现非对称性, 因此本文在 2.5 倍额定负载工况下对不同永磁体结构的退磁进行了评估, 结果如图 14 所示。退磁系数作为外部磁场下磁稳定性的重要指标, 其数值随不可逆退磁程度加剧而降低。

由图 14 可知, 在 2.5 倍负载条件下, CPMSM-I 和 L-CPMSM 结构的退磁区域主要在 N 极右侧顶部, L-CPMSM 结构的退磁区域比 CPMSM-I 更广。CPMSM-II、R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构的退磁区域均集中于各极的右上侧。其中 R-CPMSM 结构的 N 极退磁最广且严重, 其次是 N-CPMSM

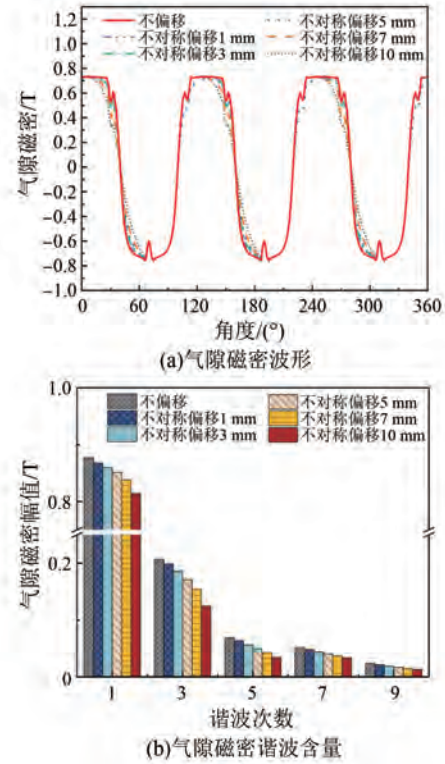


图10 N-CPMSM 结构的 CPMSM 气隙磁密波形及其谐波含量

Fig. 10 Air-gap flux density waveforms and their harmonic content of CPMSM with N-CPMSM structure

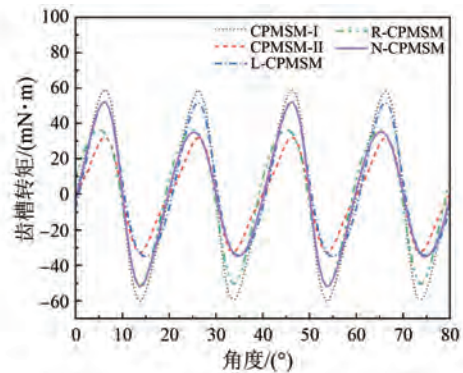


图11 $h=5\text{ mm}$ 时 CPMSM 齿槽转矩

Fig. 11 Cogging torque of CPMSM with $h=5\text{ mm}$

结构; 而 S 极的退磁在三种结构中表现一致。综上所述, 三种非对称结构中, L-CPMSM 结构的抗退磁能力最强, 其次依次是 N-CPMSM 和 R-CPMSM 结构。

非对称永磁体结构对定子屏蔽套单侧磁拉力的影响如图 15 所示。

由图 15 可知, 由于转子结构的整体对称性, 五种结构下定子所受的磁拉力沿圆周方向均呈现

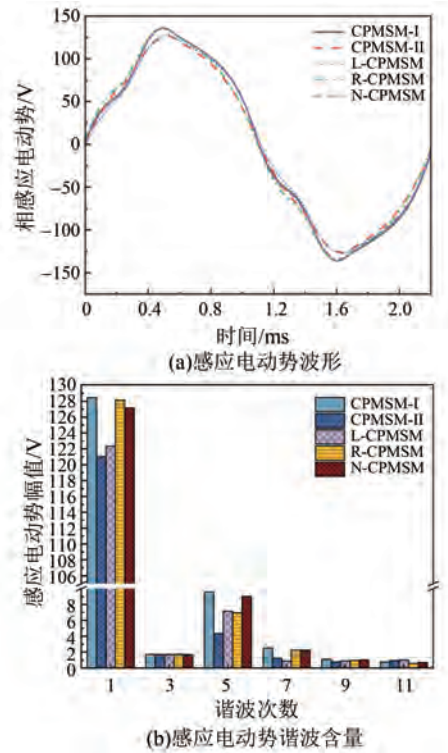


图 12 $h=5\text{ mm}$ 时 CPMSM 感应电动势

Fig. 12 Induced electromotive force of CPMSM with $h=5\text{ mm}$

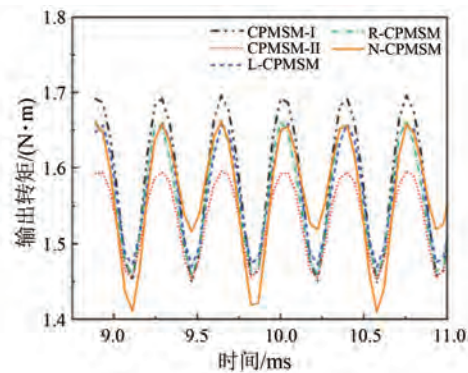


图 13 $h=5\text{ mm}$ 时 CPMSM 输出转矩

Fig. 13 Output torque of CPMSM with $h=5\text{ mm}$

周期性对称分布。这说明局部的几何不对称性并未破坏电机磁路的宏观磁平衡状态。然而与 CPMSM-I 结构相比,其他四种永磁体结构 N 极中心区域的定子屏蔽套磁拉力均显著增强,表明该区域存在磁通量集中效应。在非对称结构中,随着偏移侧厚度的减小,对应区域的磁拉力分布逐渐稀疏,且其方向逐渐朝向磁极中心。这揭示了磁阻率变化导致磁通量从高磁阻区域向低磁阻区域偏转的现象。综上所述,尽管非对称永磁结构

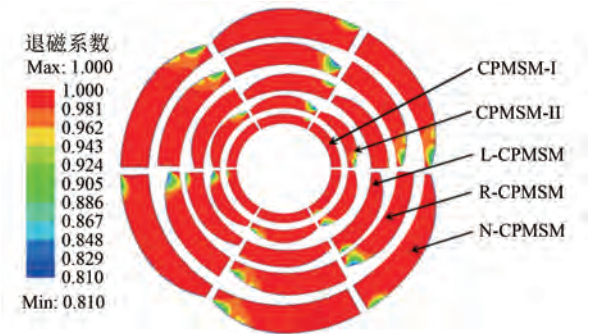


图 14 2.5 倍负载下 CPMSM 退磁系数

Fig. 14 Demagnetization coefficient of CPMSM under 2.5 times load

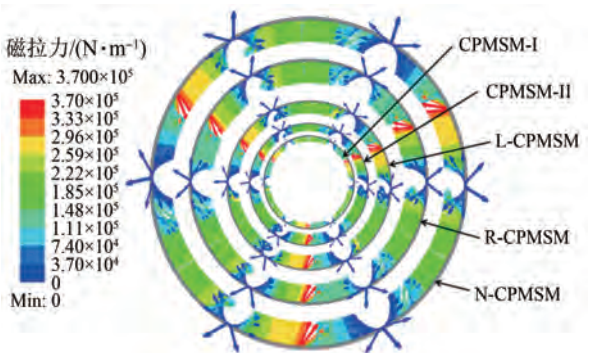


图 15 CPMSM 定子屏蔽套单侧磁拉力

Fig. 15 Unilateral magnetic pull force of CPMSM stator can sleeve

改变了气隙磁通密度的局部分布特征,但并未对电机整体磁力平衡产生显著影响。

2.3 输出功率恒定时非对称永磁体结构对 CPMSM 效率和功率因数的影响

输出功率恒定条件下不同永磁体结构的 CPMSM 损耗、效率和功率因数如表 3、表 4 所示。

表 3 $h=5\text{ mm}$ 时 CPMSM 损耗

Tab. 3 The loses of CPMSM with $h=5\text{ mm}$

永磁体结构	铜耗/W	铁耗/W	屏蔽套损耗/W
CPMSM-I	67.76	34.23	567.46
CPMSM-II	76.73	29.70	478.13
L-CPMSM	71.88	30.78	503.36
R-CPMSM	73.07	33.43	516.58
N-CPMSM	71.87	32.18	510.02

由表 3 可知,在输出功率保持恒定的条件下,电机铜耗显著增大;由于铜耗与输入电流平方成正比,因此可间接推断此时电机输入电流必然增大,同时铁耗和屏蔽套损耗则随之降低。其中 L-

CPMSM 结构降幅最为显著:铁耗下降 10.08%,屏蔽套损耗下降 11.30%;R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构降幅较小,铁耗分别下降 2.34% 和 5.99%,屏蔽套损耗分别下降 8.97% 和 10.12%。

表 4 $h=5\text{mm}$ 时 CPMSM 的效率和功率因数

Tab. 4 The efficiency and power factor of CPMSM with $h=5\text{mm}$

永磁体结构	效率/%	功率因数
CPMSM-I	69.33	0.95
CPMSM-II	75.30	0.91
L-CPMSM	72.96	0.97
R-CPMSM	71.43	0.88
N-CPMSM	72.27	0.92

由表 4 可知,输出功率恒定条件下,非对称永磁体结构有利于提高 CPMSM 的效率,相较于 CPMSM-I 结构,L-CPMSM、R-CPMSM 和 N-CPMSM 结构的效率分别提高了 3.63%、2.1% 和 2.94%;非对称永磁体结构对 CPMSM 功率因数的影响不大。

L-CPMSM 与 R-CPMSM 结构的性能差异源于偏心方向对磁通路径的调制作用不同。由图 6(a) 和图 6(b) 可知,L-CPMSM 结构的磁密分布更均匀,因此铁耗与屏蔽套损耗更低,效率更高;L-CPMSM 结构的气隙磁密波形更接近正弦波,使得电流与基波电动势的相位差减小,功率因数得到提升。而 R-CPMSM 结构的磁通分布集中于 N 极中心区域,一方面磁密均匀性较差,谐波含量增加,损耗上升;另一方面局部磁路饱和加剧,影响电流与基波电动势的相位匹配,功率因数降低。可见,非对称偏心的方向通过改变磁通分布的均匀性与气隙磁场的正弦性,对损耗、效率及功率因数产生影响。

综上,最优偏移量下的三种非对称永磁体结构的 CPMSM 性能都得到改善,其中 L-CPMSM 结构的改善效果最为明显。

将本文最佳非对称结构($h=5\text{mm}$ 时的 L-CPMSM)与文献[31]中定子齿开辅助槽的结构进行对比,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,尽管 L-CPMSM 结构的齿槽转矩高于定子齿开辅助槽结构,但 L-CPMSM 结构的感应电动势总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)为 6.09%,显著低于定子齿槽开槽结构的 10.48%,降幅达 41.9%。结果表明不对

称磁极设计在优化气隙磁场正弦特性方面更具优势。THD 越低,意味着气隙磁场中的谐波成分越少,波形更接近正弦波,电机运行更平稳、效率更高。并且,L-CPMSM 结构的效率也优于定子齿开辅助槽结构。

表 5 L-CPMSM 结构与定子齿开槽结构对比

Tab. 5 The comparison of L-CPMSM and CPMSM with stator-tooth slotting structure

参数名称	定子齿开槽结构	L-CPMSM
齿槽转矩峰值/($\text{mN}\cdot\text{m}$)	10.36	52.07
转矩脉动/%	5.97	5.78
感应电动势 THD/%	10.48	6.09
效率/%	70.16	72.96

3 试验验证

受非对称永磁体加工周期与成本限制,为验证所提有限元模型的有效性,本文先通过对称结构样机进行试验验证。根据表 1 参数搭建了一台 1.5 kW CPMSM-I 型样机及其测试平台,如图 16 所示。采用反拖法对样机空载反电动势进行测定,测量结果与仿真结果对比如图 17 所示。



图 16 样机测试平台

Fig. 16 Prototype test platform

由图 17 可知,仿真与试验误差小于 1.31%,证明了有限元模型的有效性以及计算方法的可靠性。非对称结构的样机试验将在后续工作中完成。

4 结语

本文以一台 1.5 kW 的 CPMSM 为基础,通过设计非对称永磁体偏心结构,研究非对称永磁体形状对 CPMSM 性能的影响,得出以下结论。

(1) 随偏心距 h 增大,气隙磁密谐波含量降

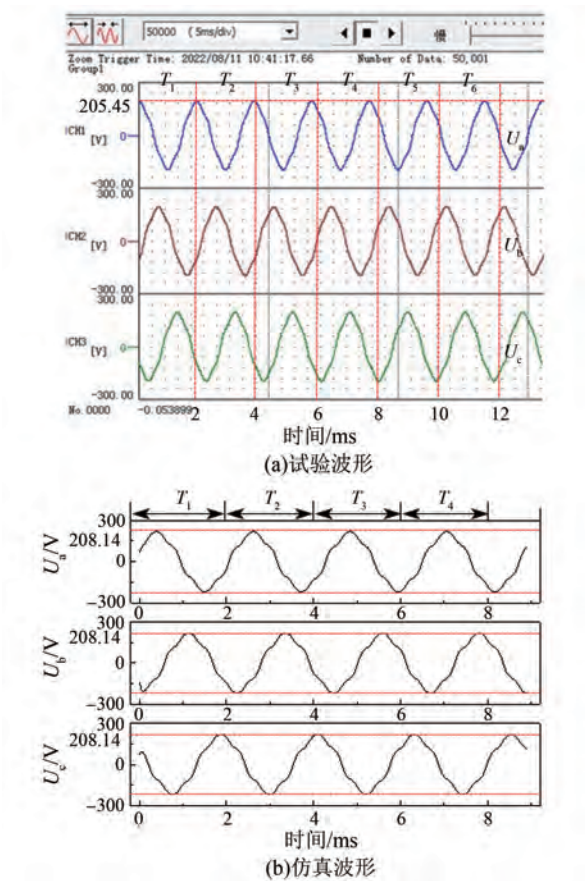


图 17 样机空载反电动势
Fig. 17 No-load back electromotive force of the prototype

低,波形正弦性得到改善。

(2)非对称永磁体结构能抑制齿槽转矩,R-CPMSM 结构降幅最大,为 38.36%,L-CPMSM、N-CPMSM 结构降幅分别为 11.73%、11.54%;L-CPMSM 结构的抗退磁能力最强,N-CPMSM 结构次之,R-CPMSM 结构最弱。

(3)非对称永磁体结构能降低屏蔽套损耗和铁耗。L-CPMSM 结构表现最优,屏蔽损耗下降 11.30%,铁耗下降 10.08%。且 L-CPMSM 结构的 THD 和效率优于定子齿开槽方案。

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、陈子淋进行了方案设计、试验研究、内

容总结与论文撰写,李明、陈子淋、伦淑娴和段卫川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, experiment study, content summary and paper writing were carried out by Li Ming and Chen Zilin. The manuscript was reviewed and revised by Li Ming, Chen Zilin, Lun Shuxian and Duan Weichuan. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

[1] 田士强,安辉,陆艳君,等. 真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 72-80.
Tian S Q, An H, Lu Y J, et al. Design and performance analysis of negative salient pole permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 72-80.

[2] 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.

[3] 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 Y. 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.

[4] Li M, Chen Z L, Mu H Q, et al. Synergistic optimization design method to improve the overload capacity and efficiency of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electronics, 2023, 12(22): 4631.

[5] 郑继鑫,李明,段卫川,等. 批量生产永磁体性能差异对屏蔽式永磁同步电机的影响[J]. 电机与控制应用, 2026, 53(2): 188-198.
Zheng J X, Li M, Duan W C, et al. Impact of batch-produced permanent magnet performance variations on

- canned permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2026, 53(2): 188-198.
- [6] 关涛,刘大猛,何永勇. 永磁轮毂电机技术发展综述[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(2): 378-396.
- Guan T, Liu D M, He Y Y. Review on development of permanent magnet in-wheel motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(2): 378-396.
- [7] Quoc V D, Cong T T. Design of a six-phase surface mounted permanent magnet synchronous motor with application to electric trucks [J]. *Archives of Electrical Engineering*, 2024, 272871744.
- [8] Lai C Y, Feng G T, Mukherjee K, et al. Torque ripple modeling and minimization for interior PMSM considering magnetic saturation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(3): 2417-2429.
- [9] Laskaris K I, Kladas A G. Permanent-magnet shape optimization effects on synchronous motor performance [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(9): 3776-3783.
- [10] Yu Z Y, Li Y, Jing Y T, et al. Analytical model for magnetic field calculation of SPMSM with chamfered pole considering iron core saturation [J]. *IET Electric Power Applications*, 2020, 14: 1856-1864.
- [11] Chikouche B L, Boughrara K, Ibtouen R. Permanent magnet shaping for cogging torque and torque ripple reduction of PMSM [J]. *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 37(6): 2232-2248.
- [12] 缪仲翠,苏乙,张磊,等. 梯形 Halbach 交替极无铁心永磁同步直线电机特性分析与优化设计[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(1): 164-176.
- Miao Z C, Su Y, Zhang L, et al. Characteristic analysis and optimization design of trapezoidal Halbach alternating pole coreless permanent magnet synchronous linear motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(1): 164-176.
- [13] 王晓远,尹春霞,李天元. 新型 Halbach 阵列盘式永磁电机的磁场解析[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(2): 21-31.
- Wang X Y, Yin C X, Li T Y. Magnetic field analysis for axial flux permanent magnet motor with novel Halbach array [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(2): 21-31.
- [14] 李玉凯,孟军,鲁植元,等. 两段式 Halbach 阵列永磁同步电机气隙磁场对比分析[J]. *微电机*, 2024, 57(9): 47-55.
- Li Y K, Meng J, Lu Z Y, et al. Comparative analysis of the air gap magnetic field of 2-segment Halbach array permanent-magnet motors [J]. *Micromotors*, 2024, 57(9): 47-55.
- [15] 胡锐,杜怿. 基于永磁形状的 BLDC 永磁电机转矩分析与优化[J]. *微电机*, 2022, 55(4): 20-25.
- Hu R, Du Y. Torque analysis and optimization of BLDC permanent magnet motor based on permanent magnet shape [J]. *Micromotors*, 2022, 55(4): 20-25.
- [16] Simón-Sempere V, Simón-Gómez A, Burgos-Payún M, et al. Optimisation of magnet shape for cogging torque reduction in axial-flux permanent-magnet motors [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 2825-2838.
- [17] 郭金钢,张博,唐家勇. 磁极结构对圆筒型直线发电机的性能影响[J]. *磁性材料及器件*, 2025, 56(1): 33-39.
- Guo J G, Zhang B, Tang J Y. Influence of magnetic pole structure on performance of tubular linear generator [J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2025, 56(1): 33-39.
- [18] 倪有源,王磊,王群京. 凸形不等厚磁极永磁电机建模与分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(11): 2406-2414.
- Ni Y Y, Wang L, Wang Q J. Modeling and analysis of permanent magnet machines with salient shape unequal thickness magnets [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(11): 2406-2414.
- [19] Zhu H Q, Xu Y. Permanent magnet parameter design and performance analysis of bearingless flux switching permanent magnet motor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5): 4153-4163.
- [20] 邢泽智,王秀和,赵文良. 基于不同极弧系数组合分段倾斜磁极的表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱措施研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5737-5748.
- Xing Z Z, Wang X H, Zhao W L. Research on reduction methods of cogging torque based on segmented skewing magnetic poles with different combinations of pole-arc coefficients in surface-

- mounted permanent magnet synchronous motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (16): 5737-5748.
- [21] Du Z S, Lipo T A. High torque density and low torque ripple shaped-magnet machines using sinusoidal plus third harmonic shaped magnets [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2601-2610.
- [22] Mirza A B, Junaid I, Adnan I, et al. Minimization of cogging torque in axial field flux switching machine using arc shaped triangular magnets [J]. IEEE Access, 2020, 8: 227193-227201.
- [23] 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: 3976.
- [24] Yu Q, Wang X S, Cheng Y H. Electromagnetic calculation and characteristic analysis of can effect of a canned permanent magnet motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 52 (12): 8108706.
- [25] 周舒昊, 李明. 时间谐波对永磁屏蔽电机损耗及效率特性的影响分析[J]. 微电机, 2023, 56(9): 4-8+13.
- Zhou S H, Li M. Analysis of influence time harmonic on loss and efficiency characteristic for canned permanent magnet motor [J]. Micromotors, 2023, 56(9): 4-8+13.
- [26] 何洲红. 面包型偏心磁极永磁电机磁极优化设计 [J]. 微电机, 2020, 53(8): 27-32.
- He Z H. Pole optimization design of bread-loaf eccentric magnetic pole permanent magnet motor [J]. Micromotors, 2020, 53(8): 27-32.
- [27] Qu B J, Yang Q X, Li Y J, et al. A novel surface inset permanent magnet synchronous motor for electric vehicles [J]. Symmetry, 2020, 12: 179.
- [28] Mirahki H, Moallem M, Ebrahimi M, et al. Combined on/off and conformal mapping method for magnet shape optimization of SPMSM [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12 (9): 1365-1370.
- [29] Shi J T, Zhu Z Q, Wu D, et al. Comparative study of synchronous machines having permanent magnets in stator [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 304-312.
- [30] Pei Y L, Chen T C, Chai F. Modeling and analysis of a novel distributed magnetic-pole permanent magnet planetary machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71 (12): 16212-16222.
- [31] 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.

收稿日期:2026-04-20

收到修改稿日期:2026-07-03

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,liming1@qmail.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@qmail.bhu.edu.cn。