

基于时间谐波电流影响的屏蔽式永磁同步电机 屏蔽套受迫形变特性研究

池 磊, 李 明*, 伦淑娴

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Research on Forced Deformation Characteristics of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Time Harmonic Current

CHI Lei, LI Ming*, LUN Shuxian

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

Abstract: [Objective] Canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) is widely used in high-demand industrial fields due to its excellent safety and tightness, and is mostly powered by frequency converter. However, the time harmonic current generated by the frequency converter will lead to electromagnetic disturbance inside the generator, change the coupling characteristics of multi-physical fields, and cause forced deformation of the shielding can. Long-term operation may lead to structural fatigue and even motor damage. Therefore, in-depth study of the influence of harmonic current on the electromagnetic force per unit length distribution and structural response of the can is of great significance for revealing the deformation mechanism, optimizing the motor design and improving the operational reliability. [Methods] In this paper, a 1.5 kW, 9 000 r/min CPMSM was taken as the object to carry out the joint simulation of electromagnetic field and structural field. Firstly, based on the electromagnetic field theory, the analytical formula of radial electromagnetic force considering time harmonic current was derived. Then, the simulation model of CPMSM was constructed. By applying harmonic currents with different parameters, the electromagnetic force per unit length on the inner side of the can was calculated, and the forced deformation response of the can of three stainless steel materials of SUS304, SUS316, SUS430 was analyzed. [Results] The simulation results showed that the

electromagnetic force per unit length increases with the increase of the amplitude of the time harmonic current, and the frequency of the electromagnetic force increases with the increase of the number of time harmonic current, but the amplitude was basically unchanged. There was a cosine relationship between the electromagnetic force per unit length and the phase angle, which has obvious modulation characteristics. Among them, SUS430 material had the largest electromagnetic force per unit length and deformation under the same excitation due to its high permeability.

[Conclusion] This study reveals the influence of time harmonic current on the electromagnetic force per unit length distribution of the motor and the forced deformation of the can. It provides a theoretical basis for motor structure optimization and harmonic suppression. It is of engineering significance to improve the operation stability, and also provides a reference for the design and material selection of the can.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; joint simulation; time harmonic current; electromagnetic force per unit length

摘 要:【目的】屏蔽式永磁同步电机 (CPMSM) 因其优异的安全性与密闭性, 被广泛应用于高要求的工业领域, 并多采用变频器供电。然而, 变频器产生的时间谐波电流会引发电机内部的电磁扰动, 改变多物理场的耦合特性, 使屏蔽套产生受迫形变, 长期运行可能导致结构疲劳甚至电机损坏。因此, 深入研究谐波电流对屏蔽套电磁力线密度分布及结构响应的影响, 对于揭示变形机理、优化电机设计、提升运行可靠性具有重要意义。【方法】本文以一台 1.5 kW、9 000 r/min 的 CPMSM 为研究对象, 开展电磁场与结构场联合仿真。首先, 基于电磁场理论推导考虑时间谐波电流

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)

的径向电磁力解析式,然后构建 CPMSM 的仿真模型,通过施加不同参数的谐波电流,对屏蔽套内侧电磁力线密度进行了计算,并分析屏蔽套采用 SUS304、SUS316 和 SUS430 三种不锈钢材料时的受迫形变响应。【结果】仿真结果表明:电磁力线密度随时间谐波电流幅值增加而增强,随时间谐波电流次数增加电磁力线密度频率升高但幅值基本不变;电磁力线密度与相位角之间呈余弦变化关系,具有明显调制特性;其中,SUS430 材料因磁导率较高,在相同激励下产生的电磁力线密度与形变量最大。【结论】本研究揭示了时间谐波电流对电机电磁力线密度分布及屏蔽套受迫形变的影响规律,为电机结构优化、谐波抑制提供理论依据,对提升电机运行稳定性有工程意义,也为屏蔽套设计与选材提供参考。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机;联合仿真;时间谐波电流;电磁力线密度

0 引言

屏蔽电泵凭借高功率密度、高效率、无泄漏和高可靠性等优点^[1-3],被广泛应用于化工、航天、医疗和核工业等对安全性要求极高的领域,是当前最具发展前景的电机类型之一。而屏蔽式永磁同步电机(Canned Permanent Magnet Synchronous Motor, CPMSM)则是屏蔽电泵的核心部件,电机性能的好坏直接影响到系统的安全运行^[4-6]。随着节能减排理念的不断深化,变频驱动技术因其显著的节能效果及优异的电机调速性能在工业领域得到广泛应用,但其非线性特性会引入 5 次、7 次等低频谐波电流,引发电机气隙磁场畸变和电磁力波动,进而导致屏蔽套受迫形变。而屏蔽套作为 CPMSM 的重要结构部件,其形变可能破坏磁场分布、削弱机械强度,甚至诱发电机故障^[7-9]。因此,系统研究变频供电下时间谐波对屏蔽套形变的作用机理,对于提升 CPMSM 的运行可靠性和实现高效节能目标具有重要的理论意义与工程价值。

目前,针对 CPMSM 的研究主要集中在电机等效电路的修正方法^[10-11]、不同屏蔽套材质时的涡流损耗分析^[12-13]、屏蔽套等效阻抗参数归算^[14]以及屏蔽电机流体损耗计算^[15-17]等几个主要方面。对于屏蔽电机的屏蔽套受迫形变,已有部分研究开展了有限元分析与理论探讨。文献[18-20]通过有限元法分析了不同屏蔽套材料

的形变特性,发现 SUS430 的受迫形变最小,且热应力作用下屏蔽套的形变主要集中在机壳端。文献[21-22]进一步研究了屏蔽套的变形轮廓和应力影响因素,指出其轮廓呈圆角沟槽状,且温度和转速的升高会显著加剧应力水平,尤其是铜材料。

已有研究针对 CPMSM 中屏蔽套在热应力作用下的变形规律开展了较为系统的分析,为屏蔽电机的结构优化设计与运行可靠性提供了重要的理论支撑。然而,对于变频器供电条件下时间谐波电流所引发的电磁力对屏蔽套形变的影响,尚缺乏深入探讨。考虑到时间谐波电流作为现代电机变频驱动系统中普遍存在且难以完全滤除的电磁扰动,其可能造成屏蔽套受迫形变,进一步影响电机的机械稳定性、结构安全性、运行效率及服役寿命。因此,深入开展基于谐波电流作用下的屏蔽套受迫形变分析,既具有重要的理论研究意义,也具备显著的工程应用价值。该研究将有助于揭示电磁-结构耦合效应下屏蔽电机屏蔽套的形变情况,为其结构设计优化、电磁兼容性提升以及极端工况下的运行安全保障提供可靠的理论依据和技术支撑。

本文首先从解析的角度推导得出定子屏蔽套所受的径向电磁激振力。然后利用有限元软件搭建电机的模型,求解出不同屏蔽套材料时定子屏蔽套的电磁力,并结合 Workbench 平台对比分析其屏蔽套受迫形变。本研究不仅为谐波抑制与屏蔽套优化设计提供了理论依据,还对提高 CPMSM 在实际应用中的性能与可靠性具有重要的参考价值。

1 定子屏蔽套电磁激振力解析分析

在 CPMSM 中,屏蔽套作为关键密封部件,长期处于复杂的电磁环境中,其所受电磁力对结构稳定性及整机可靠性具有重要影响。因此,有必要从电磁场的原理出发,构建适用于屏蔽电机结构特性的电磁力解析模型,为后续仿真与力学分析提供理论支撑。

考虑到屏蔽电机通常采用变频器供电,其气隙磁场由定子电枢磁场与永磁体磁场共同构成,两者的时空耦合作用将产生复杂的电磁力分布。其中,径向电磁力是引起屏蔽套受迫变形的主要来源。基于此,本文聚焦分析径向谐波电磁力的作用,不考虑切向电磁力的影响。为简化屏蔽套

电磁激振力分析过程,作出假设:

- (1) 屏蔽套内部的磁场满足叠加原理;
- (2) 忽略屏蔽套的端部影响,认为屏蔽套中的涡流在轴向无穷远处闭合;
- (3) 屏蔽套材料的透入深度远大于屏蔽套厚度,忽略屏蔽套内径向电流密度的不一致性。

采用简化麦克斯韦应力张量法,径向电磁力表达式为

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0}(b_r^2 - b_t^2) \approx \frac{1}{2\mu_0}b_r^2 \quad (1)$$

式中: b_r 、 b_t 分别为气隙磁通密度的径向分量、切向分量; μ_0 为真空磁导率。

b_r 包括空载时仅由转子永磁体产生的永磁磁场气隙磁通密度 B_{pm} , 和绕组通电后定子电枢产生的电枢反应磁场气隙磁通密度 B_s , 即:

$$b_r = B_{pm} + B_s \quad (2)$$

1.1 永磁磁场气隙磁通密度

电机空载磁场是由永磁体单独作用产生的,此时永磁磁场在气隙处产生的等效磁动势为

$$f_r(\theta, t) = \sum F_{\mu} \cos(\mu p \theta - \mu \omega t) \quad (3)$$

式中: F_{μ} 为 μ 次永磁谐波磁势幅值; $\mu = 2k_{\mu} + 1$ 为转子永磁磁场谐波次数, $k_{\mu} = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$; p 为电机极对数; θ 为机械角度; ω 为角速度; t 为时间变量。

以定子某一齿中心线为坐标原点,同时考虑定子开槽影响,则电机的等效气隙磁导为

$$\lambda(\theta, t) = \Lambda_0 + \sum \Lambda_k \cos(kZ\theta) \quad (4)$$

式中: Λ_0 为相对磁导函数的恒定分量; Λ_k 为第 k 次谐波磁导的幅值; Z 为定子槽数。

永磁磁场气隙磁通密度为

$$B_{pm} = f_r(\theta, t) \lambda(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\mu p \theta - \mu \omega t) \cdot \left[\Lambda_0 + \sum_k \Lambda_k \cos(kZ\theta) \right] \quad (5)$$

1.2 考虑电流谐波的电枢反应磁通密度

实际电机负载时,通常采用变频器供电,则电机电枢反应磁动势中应含有定子绕组基波电流产生的磁动势和 h 次时间谐波电流产生的磁动势两部分,即:

$$f_s(\theta, t) = f_v(\theta, t) + f_c(\theta, t) = \sum_{\nu} F_{\nu} \cos(\nu p \theta - \omega t + \theta_{\nu 1}) + \sum_{\nu} \sum_h F_{\nu h} \cos(\nu p \theta - h \omega t + \theta_{\nu 2}) \quad (6)$$

式中: f_v 为基波电流产生的磁动势; f_c 为时间谐波产生的谐波磁动势; F_{ν} 为基波电流产生的 ν 次谐波磁动势幅值, $\theta_{\nu 1}$ 为其对应的角度; $F_{\nu h}$ 为 h 次时间电流产生的 ν 次谐波磁动势幅值, $\theta_{\nu 2}$ 为其对应的角度; ν 为电枢反应磁场谐波次数; h 为谐波电流次数。

当 PMSM 中通入三相对称非正弦电流时,3 及 3 的倍数次谐波电流产生的空间基波磁动势为 0^[23]。在变频器驱动电路中采用对称的调制波形,因此不存在偶数次时间谐波电流^[24],则 $h = 6k_h + 1, k_h = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。同时,变频器输出的电压为双变量 $x = \omega_c t$ 及 $y = \omega t$ 控制的波形,其中包含了载波角频率 ω_c 和调制波角频率 ω 两种角频率。因此对电压进行二维傅里叶分解后其表达式中除了基波和基带谐波分量,还包含了载波谐波 $n\omega_c$ 和边带谐波分量 $n\omega_c \pm m\omega$ 。其中, n 为载波的索引变量, m 为调制波的索引变量, n, m 为奇偶互异的正整数。因此式(6)可改写为

$$f_s(\theta, t) = \sum_{\nu} F_{\nu} \cos(\nu p \theta - \omega t + \theta_{\nu 1}) + \sum_{\nu} \sum_h F_{\nu h} \cos(\nu p \theta - h \omega t + \theta_{\nu 21}) + \sum_{\nu} F_{\nu} \cos[\nu p \theta - (n\omega_c \pm m\omega)t + \theta_{\nu 22}] \quad (7)$$

式中: $\theta_{\nu 21}$ 为 h 次时间电流产生的 ν 次谐波磁动势对应的角度; $\theta_{\nu 22}$ 为载波电流产生的 ν 次谐波磁动势对应的角度。

变频器供电情况下电机电枢反应磁场气隙磁通密度可表示为

$$B_s = f_s(\theta, t) \lambda(\theta, t) = \left\{ \sum_{\nu} F_{\nu} \cos(\nu p \theta - \omega t + \theta_{\nu 1}) + \sum_{\nu} \sum_h F_{\nu h} \cos(\nu p \theta - h \omega t + \theta_{\nu 21}) + \sum_{\nu} F_{\nu} \cos[\nu p \theta - (n\omega_c \pm m\omega)t + \theta_{\nu 22}] \right\} \cdot \left[\Lambda_0 + \sum_k \Lambda_k \cos(kZ\theta) \right] \quad (8)$$

2 CPMSM 有限元模型及仿真分析

2.1 CPMSM 物理和数学模型

本文以一台 1.5 kW 三相 CPMSM 为研究对象,通过 Electromagnetics 与 Workbench 多物理场联合仿真,分析了电机在变频器供电情况下的定子屏蔽套受迫形变问题。电机主要参数如表 1 所示。

表 1 CPMSM 样机参数

Tab.1 Prototype parameters of the CPMSM

参数名称	参数值
额定频率/Hz	450
极数	6
定子屏蔽套厚度/mm	0.5
转子屏蔽套厚度/mm	0.5
定子外径/mm	107
转子外径/mm	49.5
额定功率/kW	1.5

样机选用 9 槽 6 极表贴式 CPMSM,其二维剖面图如图 1 所示。在进行电磁场分析时,为了降低电磁计算的复杂度,作出以下假设。

(1) 永磁电机材料为各向同性;

(2) 忽略电机的端部效应,向量磁位只有 Z 轴分量;

(3) 除了定子铁心和转子轭外,材料的磁导率和电导率都是恒定的;

(4) 温度对材料电导率和磁导率的影响忽略不计。

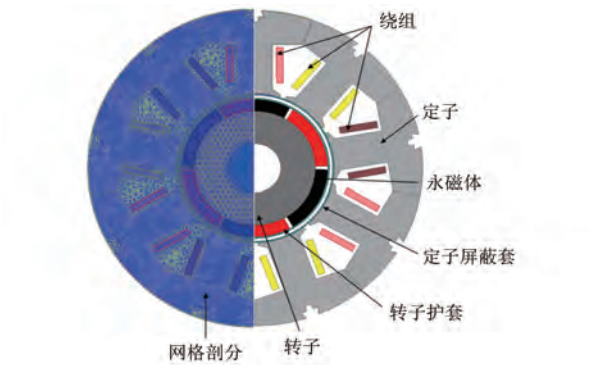


图 1 CPMSM 二维剖面图

Fig.1 2D cross-sectional diagram of the CPMSM

基于上述假设和电磁场分析理论,采用时步有限元法对样机进行了数值分析,得到不同时刻电机内的磁场分布规律,提取气隙磁通密度和屏蔽套电流密度的时间谐波和空间谐波。CPMSM 的瞬态电磁场数学模型可表示为

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -\mathbf{J}_c \\ \Gamma_1: \mathbf{A} = 0 \\ \Gamma_2: \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = -\mathbf{H}_t \end{cases} \quad (9)$$

式中: Ω 为求解区域; Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界; $\mathbf{H}_t$ 为磁场强度的切向分量; $\mathbf{J}_c$ 为源电流密度; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位。

2.2 激励以及屏蔽套材料设置

在有限元计算中,电流激励因效率高、收敛快而被采用。同时,受变频器供电特性影响,输出电流中 5 次和 7 次低次谐波成分尤为显著^[25]。因此,在分析变频器时间谐波电流对 CPMSM 性能的影响时,选取了 5 次与 7 次谐波进行研究。根据文献[26]的数据,5 次与 7 次谐波电流的有效值一般在基波电流的 5% 至 10% 之间。基于此,在有限元模型中设置了相应的谐波电流激励,具体参数如表 2 所示。

表 2 激励设置

Tab.2 Incentive settings

激励类型	Case
基波	1
基波+5%基波幅值的 5 次、7 次谐波	2,3
基波+10%基波幅值的 5 次、7 次谐波	4,5

在分析时间谐波电流对 CPMSM 屏蔽套受迫形变的影响时,除谐波的次数和幅值外,相位角同样不可忽视。谐波电流的相位角变化会显著影响其电磁力在时间和空间上的分布,进而导致定子齿尖及屏蔽套上产生不同的形变程度。所以本文对相位角在 -180° 至 180° 范围内的屏蔽套受迫形变进行了分析。

为进一步探究时间谐波电流的幅值和次数对定子屏蔽套受迫形变特性的影响,本文选取 SUS304、SUS316 和 SUS430 作为屏蔽套材料进行仿真计算,其电流如图 2 所示,其主要物理性能参数如表 3 所示。

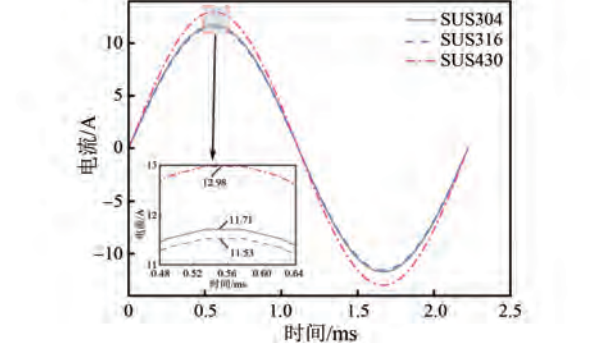


图 2 不同屏蔽套材料下的电流

Fig.2 Current under different shielding can materials

表 3 屏蔽套材料部分物理特性
 Tab.3 Partial physical properties of shielding
 can materials

参数名称	SUS304	SUS316	SUS430
电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.43×10^6	1.37×10^6	1.67×10^6
磁导率/($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)	1.008	1.008	600~1 100

以上述额定工况电流为基波电流,参考表 2 中的激励设置,分析变频器供电时产生的时间谐波电流对 CPMSM 屏蔽套受迫形变的影响。需要

说明的是,不同激励下电机的转速和仿真步长等设置一致。

2.3 定子屏蔽套电磁力单位长度密度数值计算

考虑到要分析 CPMSM 中屏蔽套的受迫形变,就要对定子屏蔽套所受电磁力单位长度密度(简称电磁力线密度,记为 f_m)进行计算。因此本文选取定子屏蔽套内表面作为观测区域,在 Case1 激励下屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 和 SUS430 时内侧 f_m 分布如图 3 所示。

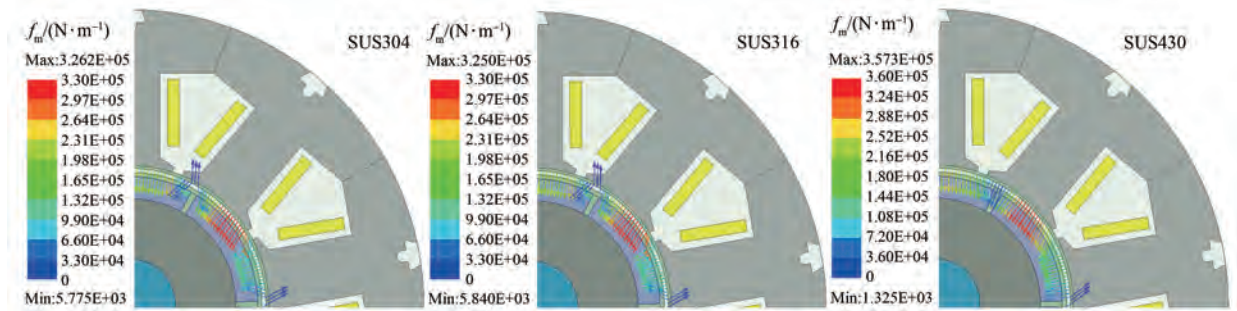


图 3 三种屏蔽套材料下 f_m

Fig.3 f_m under three shielding can materials

由图 3 可知,在 Case1 激励条件下,当屏蔽套材料为 SUS304、SUS316 和 SUS430 时,其内侧 f_m 幅值分别为 $3.26\times 10^5 \text{ N/m}$ 、 $3.25\times 10^5 \text{ N/m}$ 和 $3.57\times 10^5 \text{ N/m}$ 。其中,SUS430 的 f_m 较 SUS304 和 SUS316 分别增加了 6.38% 和 6.59%。

在保持相位角不变的条件下,改变谐波幅值和次数进行计算,仿真结果如图 4 所示。

由图 3 和图 4 的对比结果可知,在不同工况下,纯正弦电流激励下的 f_m 最小。此外,在相同谐波次数条件下,随着谐波幅值的增加,定子屏蔽套内侧的 f_m 呈上升趋势。当屏蔽套材料为 SUS304 时,激励条件由 Case1 变为 Case2, f_m 幅值由 $3.26\times 10^5 \text{ N/m}$ 增加至 $3.33\times 10^5 \text{ N/m}$,增幅为 2.15%;当激励条件进一步增加为 Case3, f_m 幅值增加至 $3.40\times 10^5 \text{ N/m}$,增幅为 4.29%。对于 SUS316 和 SUS430 材料,激励由 Case1 升至 Case2 时, f_m 幅值分别增长了 1.85% 和 1.12%;进一步升至 Case3 时, f_m 分别增长了 4.00% 和 1.96%。原因在于 f_m 与磁动势呈正比关系,当谐波幅值增加时,磁动势随之增强,从而导致 f_m 上升。然而,当谐波次数增加时,在幅值保持不变的前提下, f_m 基本保持恒定。为进一步验证该结论,以屏蔽套材料为

SUS304 为例,分别在 Case2 和 Case3 激励条件下对 CPMSM 的 f_m 进行了仿真,结果如图 5 所示。

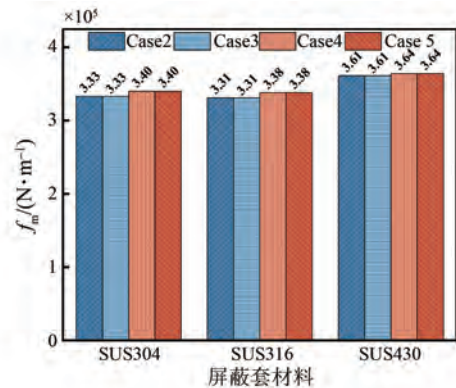


图 4 三种材料屏蔽套在不同工况时 f_m

Fig.4 f_m of shielding can made of three materials under different operating conditions

由图 5 可观察到,随着谐波次数的增加, f_m 的频率相应上升。在 Case2 激励条件下, f_m 的周期为 120.52° ,而 Case3 激励下缩短为 119.87° ,周期缩短了 0.54%,对应频率提升约 0.33%。这一变化主要源于 f_m 与磁通密度的平方成正比 ($f_m \propto B^2$),而磁通密度本身与电枢电流产生的磁动势直接相关。对于非正弦供电条件,高阶时间谐波

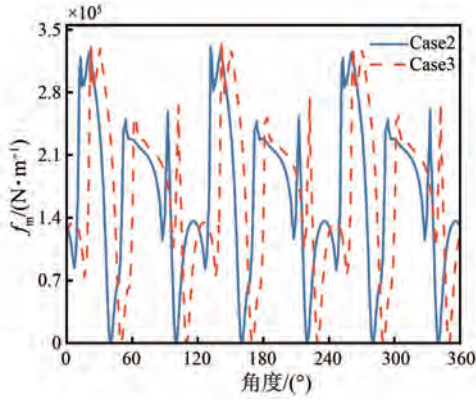


图 5 屏蔽套材料为 SUS304 时 f_m

Fig. 5 f_m when the shielding can material is SUS304

电流在空间中对较高的电磁场变化频率,其频率满足:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (10)$$

式中: n 为谐波次数; f_n 为第 n 次谐波对应的频率; f_1 为基波频率。

因此,随着谐波次数的增加,磁场变化速率加快,进而引起 f_m 频率的提升。

进一步地,在 Case2 激励条件下,分析谐波相位角对屏蔽套内侧电磁力的影响,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在谐波相位角从 -180° 变化至 $+180^\circ$ 的过程中,三种材料的屏蔽套所受 f_m 均呈现出余弦形式的波动,其变化趋势与式 (8) 推导一致。其中,当屏蔽套材料为 SUS304 时,随着相位角的角度变化, f_m 最高为 3.34×10^5 N/m; SUS316 和 SUS430 分别为 3.31×10^5 N/m 和 3.61×10^5 N/m。这一规律表明,谐波相位角对电磁激励力具有显著的调制作用,对电机的电磁响应特性具有关键影响。

从材料特性来看,SUS430 由于具有较高的磁

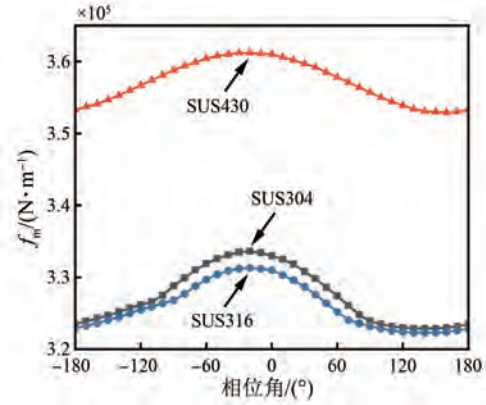


图 6 不同相位角时三种材料屏蔽套所受 f_m

Fig. 6 f_m on shielding can made of three materials at different phase angles

导率,在相同激励条件下表现出更为显著的电磁力响应,需在结构设计中重点考虑其磁响应引起的力学效应。

2.4 定子屏蔽套受迫形变分析

在完成电磁场仿真并获得定子屏蔽套内侧 f_m 后,将该 f_m 数据导入至 Ansys Workbench 平台所构建的结构有限元模型中,对屏蔽套的受迫形变进行分析。考虑到 f_m 是引起屏蔽套变形的主要因素,且 f_m 仅随着谐波幅值的增大而呈现上升趋势,因此本节选取 Case1、Case2 和 Case4 作为激励,对 SUS304、SUS316 和 SUS430 三种屏蔽套材料下的 CPMSM 进行仿真计算,并获得其定子屏蔽套受迫形变量,相关结果如图 7~9 所示。

由图 7~9 可知,不同工况下,纯正弦电流激励下的屏蔽套形变最小,且随着激励幅值的增大,屏蔽套的受迫形变量呈现出相应的增长趋势。

具体而言,当屏蔽套材料为 SUS304 时,激励条件由 Case1 到 Case2,屏蔽套的最大形变由 0.94 mm 增加至 0.98 mm,增幅为 4.26%;当激励

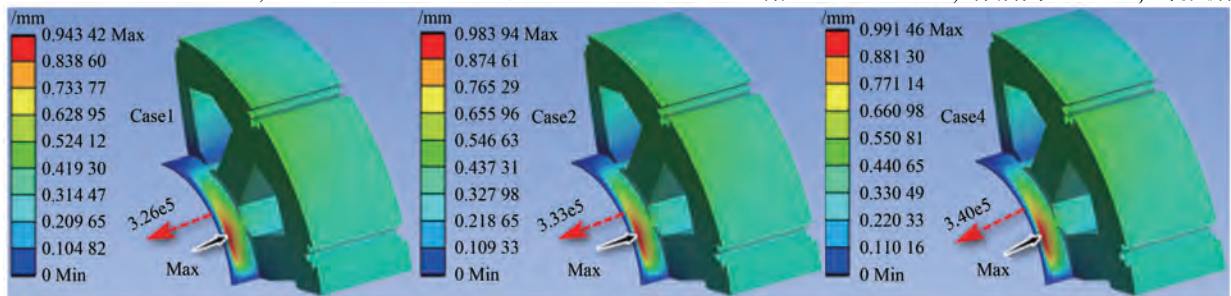


图 7 屏蔽套材料为 SUS304 时形变量

Fig. 7 Deformation when the shielding can material is SUS304

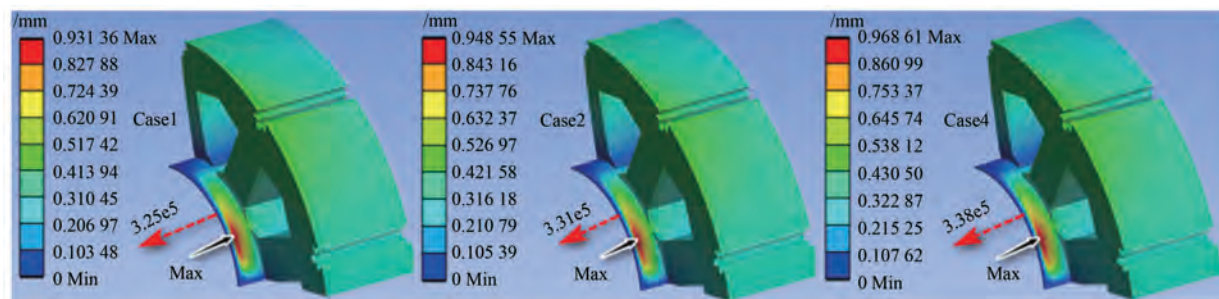


图 8 屏蔽套材料为 SUS316 时形变量
 Fig. 8 Deformation when the shielding can material is SUS316

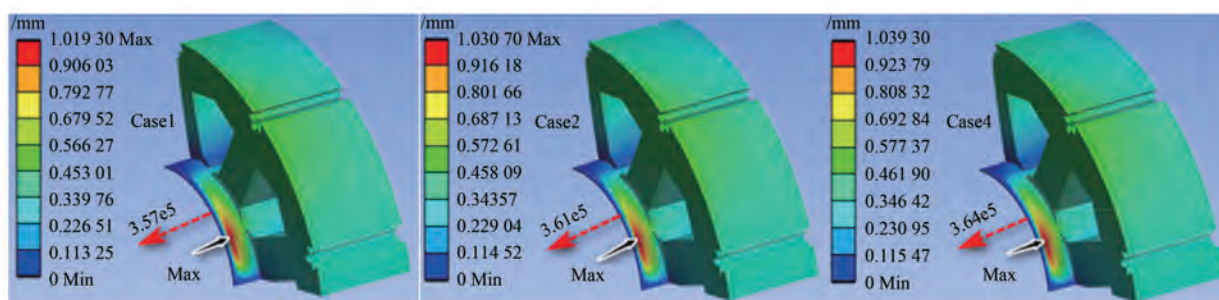


图 9 屏蔽套材料为 SUS430 时形变量
 Fig. 9 Deformation when the shielding can material is SUS430

进一步提升至 Case4,形变量从 0.94 mm 增至 0.99 mm,增幅为 5.32%。

当屏蔽套材料为 SUS316 时,从 Case1 到 Case2,最大形变由 0.93 mm 增至 0.95 mm,增幅为 2.15%;由 Case1 到 Case4,形变量从 0.93 mm 增至 0.97 mm,增幅为 4.30%。

对于 SUS40 材料,从 Case1 到 Case2,屏蔽套最大形变由 1.02 mm 增至 1.03 mm,增幅为 0.98%;当激励条件进一步提升至 Case4,形变达到 1.04 mm,较 Case1 增长 1.96%。

综合三种材料,屏蔽套的最大变形量为 1.04 mm,考虑到屏蔽套本身厚度仅为 0.50 mm,其变形程度已达到自身厚度的 208%,反映出较大的结构响应,在后续屏蔽套的设计与加工过程中应予以高度重视。

此外,由图 7~9 对比可知,当屏蔽套材料为 SUS430 时,屏蔽套形变量最大,这是由于高磁导率作用下产生更强的 f_m ,进而导致形变增大;屏蔽套材料为 SUS304 和 SUS316 时形变接近,这是因为其物理性能相近。

3 试验验证

为了验证本文计算结果的准确性,根据参数制

造了样机,并搭建了样机测试平台,如图 10 所示。

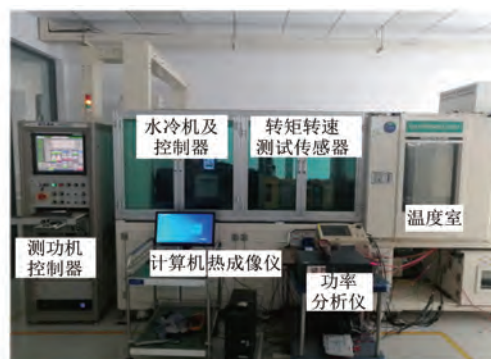


图 10 样机测试平台
 Fig. 10 Prototype test platform

利用样机试验平台,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 11 所示。

由图 11 可知,样机反电动势实测波形与仿真结果具有较好的一致性。实测样机空载反电动势有效值为 145.3 V,仿真计算值为 147.2 V,两者仅相差 1.31%。证明了有限元计算的有效性与准确性。

4 结语

本文以一台额定功率 1.5 kW、额定转速 9 000 r/min 的 CPMSM 为例,运用有限元法分析

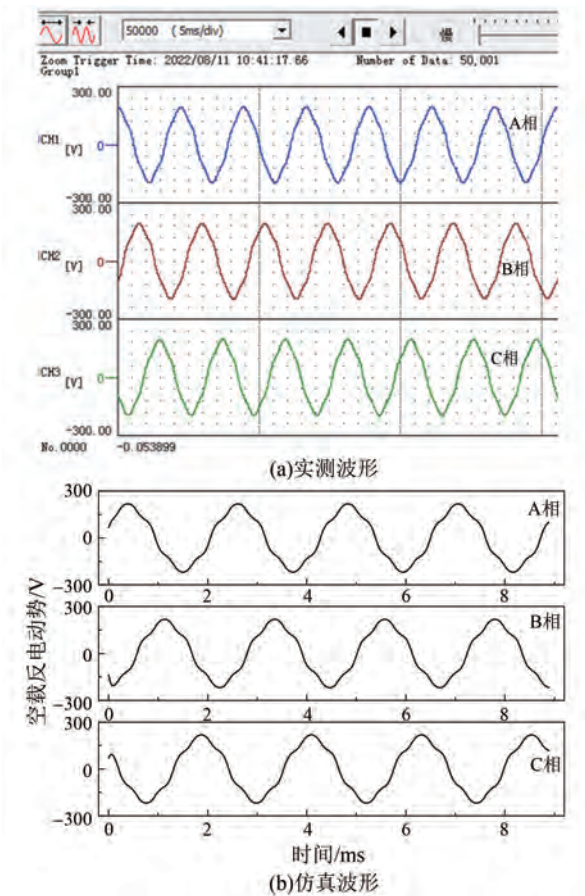


图 11 样机空载反电动势对比波形
Fig. 11 Comparison waveforms of no-load back electromotive force for the prototype

了谐波次数、幅值、相位角和不同屏蔽套材料对电机 f_m 和屏蔽套受迫形变的影响,得出以下结论。

额定工况时,随着谐波幅值的增加,屏蔽套内侧 f_m 呈现上升趋势;随着谐波次数的增加, f_m 的幅值基本不变,而 f_m 的频率相应上升;随着谐波相位角的变化, f_m 呈现余弦波动。

分析三种不同定子屏蔽套材料下电机的电磁力和屏蔽套受迫形变,可知定子屏蔽套材料为SUS430时,电机 f_m 和屏蔽套受迫形变量均最大。

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

池磊进行了仿真研究与论文撰写,李明进行

了数据分析与总结,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 simulation study and paper writing were conducted by Chi Lei. The data analysis and summary were performed by Li Ming. The paper was reviewed and 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] 余海洋, 胡岩, 曹力. 高速永磁屏蔽电机摩擦损耗分析与计算[J]. 微特电机, 2025, 53(3): 28-32.
YU H Y, HU Y, CAO L. Fluid flow analysis and friction loss calculation of high-speed permanent magnet shielded motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(3): 28-32.
[2] ZHANG W T, GAO H Y, XU Y X, et al. Review of high-frequency PWM acoustic noise suppression methods for PMSMs [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 10(3): 94-109.
[3] WANG C, ZHAO W X, TAO T, et al. High frequency harmonics dispersion for dual three-phase PMSM drives with random switching sequence [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 40(2): 1554-1565.
[4] 龚佳乐, 李明, 郑继鑫. 过载对屏蔽式永磁同步电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 412-421.
GONG J L, LI M, ZHENG J X. Effect of overload on performance of canned permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 412-421.
[5] 朱军, 李宜飞, 刘瞳亮, 等. 双重水循环航空泵用屏蔽电机研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 136-147.
ZHU J, LI Y F, LIU T L, et al. Research on shielded motors for dual water circulation aviation pumps [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 136-147.
[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] 韩继超, 宋显超, 吕向平, 等. 大功率屏蔽电动机变频启动与网电切换瞬态分析[J]. *大电机技术*, 2025, (4): 1-8.
- HAN J C, SONG X C, LYU X P, et al. Transient analysis of high-power shielded motor's frequency conversion startup and switching between the motor and grid power [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2025, (4): 1-8.
- [8] LU Y, MUSTAFA A, ABDULLAH R M, et al. The effects of water friction loss calculation on the thermal field of the canned motor [J]. *Processes*, 2019, 7(5): 256.
- [9] SMITH D J B, MECROW B C, ATKINSON G J, et al. Shear stress concentrations in permanent magnet rotor sleeves [C]// The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM, Rome, 2010.
- [10] EGGERS D, STEENTJES S, HAMEYER K. Advanced iron-loss estimation for nonlinear material behavior [J]. *IEEE Transactions on magnetics*, 2012, 48(11): 3021-3024.
- [11] GMYREK Z, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Estimation of iron losses in induction motors: Calculation method, results, and analysis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 57(1): 161-171.
- [12] 刘志珍, 朱常青, 励庆孚. 计算导体涡流分布的 FEM-IEM 混合数学模型[J]. *电工技术学报*, 2001, 16(6): 46-49.
- LIU Z Z, ZHU C Q, LI Q F. A hybrid FEM-IEM mathematical model for calculation of eddy current distribution in conductor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2001, 16(6): 46-49.
- [13] HAN T, WANG Y, SHEN J X. Analysis and experiment method of influence of retaining sleeve structures and materials on rotor eddy current loss in high-speed PM motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(5): 4889-4895.
- [14] ERGENE L T, SALON S J. Determining the equivalent circuit parameters of canned solid-rotor induction motors [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2005, 41(7): 2281-2286.
- [15] BURKHARDT Y, HUTH G, URSCHER S. Eddy current losses in PM canned motors [C]// The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM, Rome, 2010.
- [16] 梁艳萍, 于鸿浩, 边旭. 汽轮发电机三相突然短路故障转子动态电磁力计算[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(11): 91-96.
- LIANG Y P, YU H H, BIAN X. Calculation of dynamic electromagnetic force in the rotor of turbo generator after three-phase sudden short circuit fault [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(11): 91-96.
- [17] 谢世强, 杨嘉祥. 屏蔽电机定子屏蔽套损耗的计算与分析[J]. *防爆电机*, 2010, 45(3): 41-43+45.
- XIE S Q, YANG J X. Calculation and analysis on stator can losses of canned motor [J]. *Explosion-Proof Electric Machine*, 2010, 45(3): 41-43+45.
- [18] 安跃军, 殷福久, 王光玉, 等. 真空泵屏蔽电动机温度场与屏蔽套应力场分析[J]. *沈阳工业大学学报*, 2016, 38(2): 121-126.
- AN Y J, YIN F J, WANG G Y, et al. Analysis for temperature field and can stress field of vacuum pump canned motor [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2016, 38(2): 121-126.
- [19] DU J J, LI C J, ZHAO J, et al. Rotor rotor investigation of high-speed permanent magnet motor with roundness error and CFD-thermal distribution analysis [J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4606.
- [20] 曹建平. 耐腐蚀超洁净涡旋真空泵用屏蔽电动机设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- CAO J P. The design and analysis of canned motor used on ultra clean and corrosion-resistant scroll vacuum pump [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [21] 王升德, 姚振强, 沈洪. 屏蔽套形变对环形间隙轴向流阻的影响研究[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(17): 2017-2024.
- WANG S D, YAO Z Q, SHEN H. Investigation of influences of stator can deformations on axial flow resistance in annular gap flow [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(17): 2017-2024.
- [22] JIANG W B, ZHANG Y, XIONG D M, et al. Rotor sleeve analysis of high-speed PMSM consider eddy current loss and stress [C]// 2021 24th International

- Conference on Electrical Machines and Systems, Gyeongju, 2021.
- [23] SUN Y, LIN Y Q, WANG Y C, et al. Theory of symmetric winding distributions and a general method for winding MMF harmonic analysis [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(13): 2587-2597.
- [24] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. Fundamentals of Power Electronics [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.
- [25] 谭又博, 余小玲, 臧英, 等. 谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 542-553.
- TAN Y B, YU X L, ZANG Y, et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 542-553.
- [26] 张士强, 葛兴来, 左运, 等. 基于高阶扩展状态观测器的感应电机驱动系统逆变器死区效应在线补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1946-1958.
- ZHANG S Q, GE X L, ZUO Y, et al. An inverter dead-time on-line compensation method for induction motor drive system based on high-order extended state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1946-1958.
-
- 收稿日期:2025-08-01
收到修改稿日期:2025-08-26
作者简介:
池 磊(1999-),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机优化设计,cl2023008030@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,liming@qymai.bhu.edu.cn。