

基于有限元分析的永磁同步电机转子偏心研究

程 颖

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月7日

摘 要

电机长期运行过程中, 转子动态偏心是极易发生的故障, 研究转子动偏心对电机特性的影响对电机状态监测至关重要。本文采用有限元分析方法, 利用COMSOL Multiphysics对不同偏心程度的永磁同步电机(PMSM)进行了电磁场分析, 系统探讨了转子偏心对电机电流和磁通密度等关键参数的影响。仿真结果显示, 随着偏心程度的增加, 定子电流的幅值显著增大。特别是在80%动态偏心情况下, 电流频谱不仅出现了明显的谐波分量, 还引入了特定的特征频率, 尤其是在基波频率的倍频处, 这些额外的谐波分量会导致电机的电磁噪声和振动加剧, 从而影响电机的稳定性和运行效率。同时, 气隙中某点x分量的磁通密度值也随偏心程度的增加而增大, 进一步验证了偏心对磁场分布的显著影响, 具有一定的参考价值。

关键词

永磁同步电机, 转子偏心, 有限元分析, 电流信号分析

Research on Rotor Eccentricity of PMSM Based on Finite Element Analysis

Ying Cheng

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 2nd, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

The dynamic eccentricity of the air gap is a very easy fault in the long running of the motor, so it is very important to study the influence of rotor eccentricity on the motor characteristics. In this paper, the electromagnetic field of permanent magnet synchronous motor (PMSM) with different degree of eccentricity was analyzed by using the finite element analysis method and COMSOL Multiphysics, and the influence of rotor eccentricity on the key parameters of the motor current and magnetic flux density was systematically discussed. The simulation results show that the amplitude

of stator current increases significantly with the increase of eccentricity. Especially in the case of 80% dynamic eccentricity, the current spectrum not only has obvious harmonic components, but also introduces specific characteristic frequencies, especially at the frequency doubling of the fundamental frequency, these additional harmonic components will lead to electromagnetic noise and vibration of the motor, thus affecting the stability and operation efficiency of the motor. At the same time, the x component of the air gap also increases with the increase of the degree of eccentricity, which further verifies the significant influence of eccentricity on the magnetic field distribution, and has certain reference value.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Rotor Eccentricity, Finite Element Analysis, Current Signal Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

永磁同步电机(PMSM)因其高效率、高功率密度和高效的控制方式,在工业驱动、电动汽车和风力发电等领域得到了广泛的应用。然而由于装配误差、机械磨损或者外部冲击等因素,PMSM在长期运行过程中容易发生转子偏心故障。这种偏心故障不仅会导致振动和噪声加剧[1],还会加剧轴承磨损,甚至缩短电机使用寿命,严重影响机电系统的可靠性和安全性。因此,深入研究转子偏心对永磁同步电机性能的影响具有重要的理论价值和实际意义。通过有限元分析等手段深入研究转子偏心现象,对于提高电机的设计水平和运行可靠性具有重要意义。张京军等人[2]针对开关磁阻电机转子静偏心问题用有限元方法建立了二维电机模型,研究静态偏心故障对开关磁阻电磁特性的影响。C. Klein等人通过改进的绕组函数法(MWFA)和有限元分析(FEA),研究了永磁同步电机静态偏心对电感的影响,为电机状态检测提供了依据[3]。Yaqian Cai等人在改进绕组函数法的基础上提出了分段绕组函数法(SWFM),主要研究静态偏心对电感平均值的影响,论文的不足之处为缺乏对动态偏心和混合偏心的研究[4]。谢颖等人利用有限元方法建立了各偏心状态下的有限元模型,分析了不同偏心程度所引发的不平衡磁拉力变化[5]。

现在的研究基于静态偏心的偏多,但是电机实际运行情况动偏心出现的频率较高,本文旨在基于有限元分析平台,开展永磁同步电机转子偏心状态下的电机电流信号分析(MCSA)。通过对多种偏心情况下的电机进行建模与仿真,揭示偏心度与电机性能指标间的内在联系,为提高永磁同步电机的运行可靠性和性能提供理论支持与实践指导。

2. 理论分析

2.1.1. 转子偏心理论介绍

转子偏心是永磁同步电机(PMSM)运行过程中一种常见的故障状态,是指转子几何中心与旋转中心之间存在空间的偏移,大致可分为静偏心(SE)、动偏心(DE)和混合偏心(ME)[6]。静态偏心是由于安装不当或者制造误差引起的固定偏移,其偏心位置在空间上保持不变;动态偏心是由于轴承磨损、轴弯曲或者负载不平衡等原因引起的,其旋转位置随着转子旋转而变化;混合偏心(ME)是静态偏心和动态偏心的综合体现,三种偏心类型的示意图如图1所示, O_s 、 O_r 、 O_Ω 分别为定子中心、转子中心和旋转中心,静

态偏心的研究价值有限，其影响相对单一且易于控制，所以本文主要研究更贴合实际的动偏心对电机定子电流特性的影响。

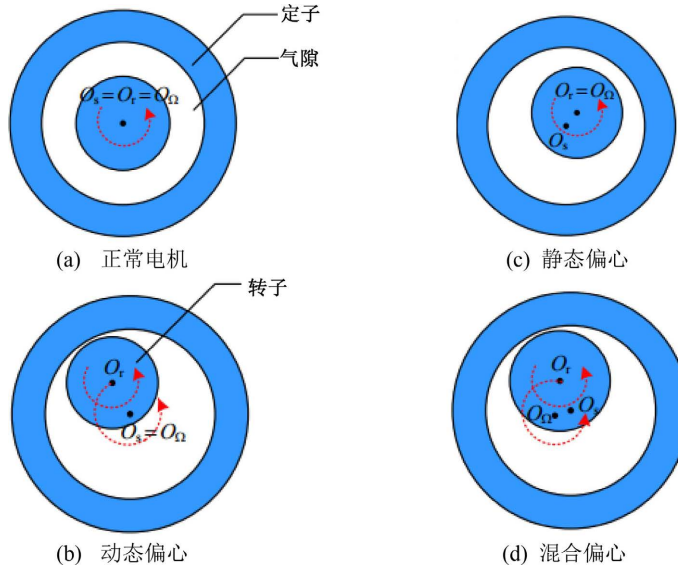


Figure 1. Diagram of different eccentric faults
图 1. 不同偏心故障示意图

任意状态下气隙长度随着圆周角分布[7]可表示为:

$$g(\theta) = g + g_{SE} \cos(\theta_{SE} - \theta) + g_{DE} \cos\left(\frac{\omega}{p}t - \theta\right) \quad (1)$$

式中, g 为健康电机圆周角的气隙, g_{SE} 为静偏心时电机气隙长度, g_{DE} 为动偏心时电机气隙长度, ω 为电角速度, p 为极对数, θ_{SE} 为静偏心方向角, θ 为电机气隙圆周角。如果电机处于健康状态, g_{SE} 、 g_{DE} 都为 0; 如果电机处于静偏心状态, g_{DE} 为 0 但是 g_{SE} 不为 0; 如果电机处于动偏心状态, g_{SE} 为 0 但是 g_{DE} 不为 0; 如果电机处于混合偏心状态, g_{SE} 、 g_{DE} 都不为 0 [8]。

电机气隙磁导可以表示为:

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu_0}{g(\theta, t)} \quad (2)$$

其中 μ_0 为真空磁导率。

将(2)式代入到(1)式可得动态偏心下的气隙磁导为:

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu_0}{g} \left[1 - \frac{g_{DE}}{g} \cos\left(\frac{\omega}{p}t - \theta\right) \right] \quad (3)$$

2.1.2. 电磁场理论介绍

在旋转机械的电磁场分析中, 通常使用麦克斯韦方程组来描述电磁场行为。电磁场分析主要基于安培定律和磁通量守恒定律, 安培定律描述了磁场强度 H 与电流密度 J 之间的关系, 其微分形式为:

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

在电磁场分析中, 通常引入矢势 A 来描述磁场 B , 矢势 A 的定义为:

$$B = \nabla \times A$$

(5)

根据矢势 A 和磁场 B 可以表示矢势的旋度，此外电场 E 与矢势 A 的关系可以通过法拉第电磁感应定律表示为：

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}$$

(6)

该公式表明，电场 E 是由矢势 A 随时间变化产生的。

磁通量守恒定律表明，磁场 B 是无散度的，磁场的磁力线总是闭合的，其公式表示为：

$$\nabla \cdot B = 0$$

(7)

3. COMSOL 建模方法

随着计算机仿真技术的迅猛发展及其在工程领域的广泛应用，多物理场耦合分析软件如 COMSOL Multiphysics 逐渐成为研究复杂系统的重要工具。COMSOL Multiphysics 作为一种多物理场耦合分析软件，为精确模拟电机内部复杂的电磁场、温度场及应力场提供了可能。基于 COMSOL 进行永磁同步电机转子偏心的研究，不仅可以从理论上揭示偏心状态下电机内部物理场的变化规律，还能为电机设计优化和故障诊断提供科学依据[9]。

3.1. 仿真模型建立

3.1.1. 电机模型建立及网格划分

永磁同步电机(PMSM)是一种高效能、高功率密度的电机，广泛应用于电动汽车、风力发电、航空航天等领域[10]，其主要由定子、转子、线圈绕组和气隙组成。定子是电机的静止部分，采用高磁导率的硅钢片叠压而成，这种材料选择主要是为了减少涡流损耗和磁滞损耗，从而提高电机的整体效率，三相绕组是嵌入在定子铁芯槽中的重要组件，通常由高强度铜线或铝线绕制而成，当电流通过绕组时，会在定子内部产生一个旋转磁场，这个旋转磁场与转子上的永磁体相互作用，使转子跟随定子磁场同步旋转，绕组的设计和布置对电机的电磁性能至关重要，直接影响电机的输出功率、效率和运行稳定性。转子是电机的旋转部分，由永磁体、转子铁芯和旋转轴组成，通常采用高性能稀土永磁材料(如钕铁硼)，以提供强大的磁场，转子铁芯同样由硅钢片叠压而成，具有高磁导率和低损耗特性，旋转轴通过轴承支撑，确保转子能够平稳且高效地旋转。气隙是定子与转子之间的间隙，影响电机的电磁性能和效率，气隙的存在使得定子产生的旋转磁场能够有效地作用于转子，推动其旋转。在 comsol 中对电机结构进行建模如图 2 所示，电机的基本参数如表 1 所示。

Table 1. Basic parameters of PMSM
表 1. 永磁同步电机基本参数

参数	数值
额定电压(V)	48
额定转速(rpm)	2825
反电动势常数(V/krpm)	10.47
转动惯量(gcm ²)	215.5
极对数	14
相数	3
定子外径(mm)	104
转子外径(mm)	55.6
气隙长度(mm)	0.5

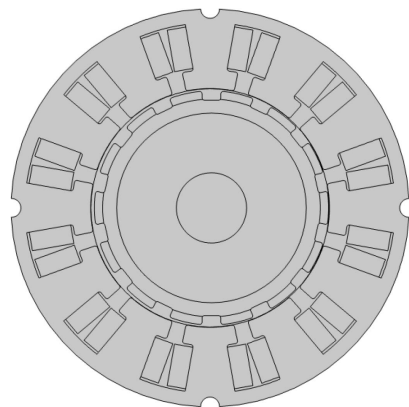


Figure 2. PMSM structure diagram
图 2. 永磁同步电机结构图

在对永磁同步电机进行电磁场仿真时，网格划分的质量决定了求解的精度和计算效率，为了解决求解时收敛性问题，将定子、转子和气隙的网格划分为不同的大小，特别是在气隙中采用了非常细密的网格划分，确保能够精确地模拟气隙中的磁场分布和变化，考虑到气隙区域的几何形状和物理特性，进一步在气隙的关键位置进行局部加密，以提高该区域的求解精度，同样在定子和转子结构中，越靠近气隙处网格划分的越细密如图 3 所示。

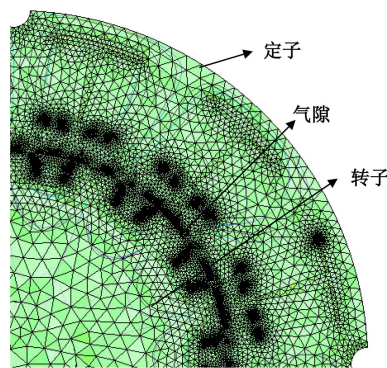


Figure 3. Motor meshing
图 3. 电机网格划分

3.1.2. 材料参数

为了准确描述电磁场性能，对电机材料属性进行详细的设置。电机周围包括气隙部分采用相对磁导率为 1 的空气材料；定子部分以及转子铁芯设置为 Soft Iron (With Losses)，并设置其 B-H 曲线，以准确反应铁芯材料的磁化特性和磁滞损耗；转子上的永磁体部分采用 N38 (Sintered NdFeB)材料，其剩余磁通密度模为 1.25 T，以表征永磁体的磁性能；绕组部分采用铜材料，其电导率为 $5.99 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，杨氏模量和泊松比分别设置为 110 GPa 和 0.35。通过上述材料属性的详细设置，确保了电机电磁场性能的准确模拟和分析。

3.1.3. 求解模型建立

仿真中采用动网格和旋转机械两个模块相互耦合的方法，在动网格中添加旋转域以模拟电机中转子的旋转并进行偏心设置，在旋转机械模块中给永磁体模块和定转子模块添加安培定律，进行了三相绕组

的设置并给每相绕组设置了反向电流。求解时采用瞬态求解器和参数化扫描相结合的方法，瞬态求解器能够模拟随时间变化的物理过程，捕捉系统在时间上的动态响应，时间步长为 0.00001 s，为了研究模型在不同偏心值下的响应，使用参数化扫描自动求解每个参数值对应的结果，经计算可得电机内部的磁场分布。

由图 4 可知，转子永磁体区域呈现出最高的磁通密度，其峰值接近 2.67 T，这表明永磁体是电机内部最强的磁场源，随着磁力线从永磁体向外扩展穿过气隙并进入定子铁芯，磁通密度逐渐减小，这一变化趋势在图中通过颜色渐变得到了直观的体现。图中的磁力线描绘了磁场方向和路径，磁力线从转子永磁体出发沿径向穿过气隙进入定子铁芯并在定子内部形成闭合回路，并且磁力线在气隙处的密集程度较高，表明此处磁场梯度较大，这对电机的电磁力矩产生有着重要影响。

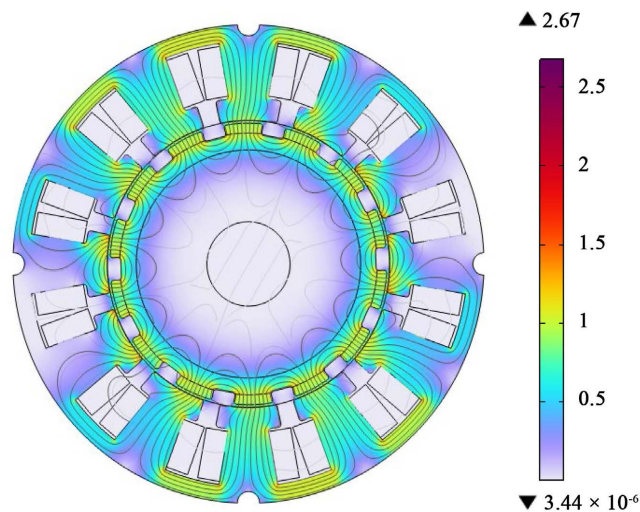


Figure 4. Magnetic flux density mode
图 4. 磁通密度模

3.2. 偏心结果分析

为了验证不同程度的动态偏心对电机的影响，分别在仿真中设置健康电机、动态偏心 40%、动态偏心 80%作为研究对象，电机电流结果如图 5 所示。研究发现，随着偏心程度的增加电流幅值也会增加，同一时刻无偏心时电流幅值为 17.838 A，40%偏心时电流幅值为 17.989 A，80%偏心时电流幅值为 18.428 A，这是因为电机转子偏心导致气隙长度在不同位置会发生变化，在某些位置气隙长度变小导致磁阻减小，磁通密度增加，在另一些位置气隙长度变化导致磁阻增大，磁通密度减小，这种不均匀的磁场分布会引起电流的波动。此外气隙长度的变化也会引起电机磁链改变，磁链的变化会导致感应电动势的变化，进而影响电流的大小和波形，当转子偏心程度较大时，磁链变化的幅度也越大，因此电流的波动也会更加明显。

图 6 展示了永磁同步电机在无偏心和 80%动态偏心情况下的电流频谱分析结果，在无偏心情况下，电机气隙均匀，电流频谱主要表现为基波分量(电机供电频率)以及整数倍频的谐波分量。这些谐波分量通常由电机的非线性特性(如磁饱和、齿槽效应)引起，但幅值相对较小，无偏心情况下的电流频谱较为平滑，谐波含量较低，表明电机运行状态良好，电磁分布均匀。80%动态偏心情况下电流频谱出现了明显的谐波分量并且还引入了相关的特征频率，尤其是在基波频率的倍频处，这些谐波分量会导致电机的电磁噪声和振动加剧，影响电机稳定性。

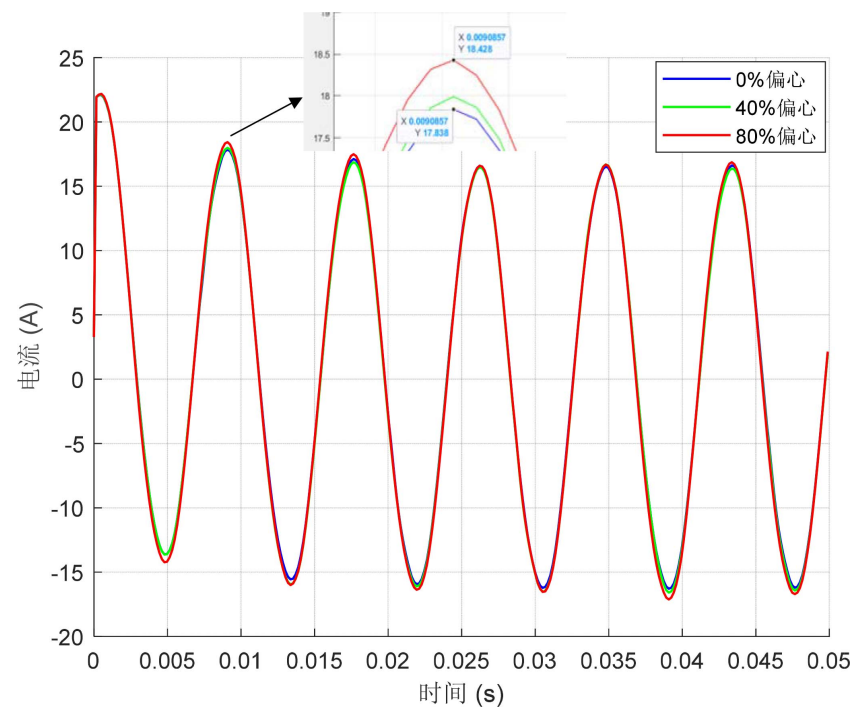


Figure 5. Time domain current waveform
图 5. 时域电流波形

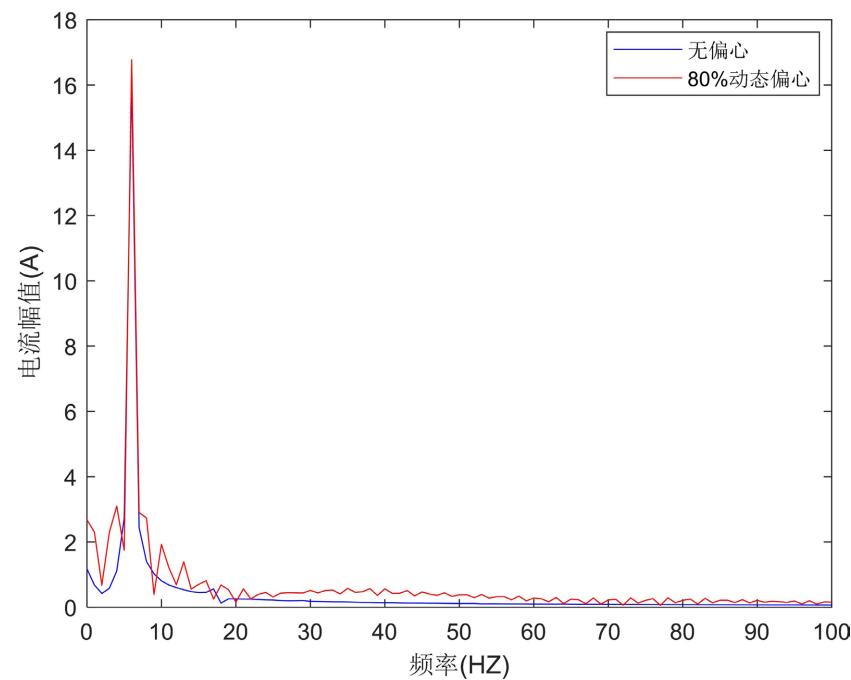


Figure 6. Frequency domain current waveform
图 6. 频域电流波形

在仿真中取气隙中的某点对其进行磁通密度分析，图 7 展示了不同偏心程度下 x 分量的磁通密度变化，展示了动偏心对永磁同步电机磁场分布的影响。在 0.017 s 时刻，无偏心、40%偏心和 80%偏心对应

的磁通密度值分别为 0.1739 T、0.1562 T、0.1319 T。在无偏心情况下，电机气隙均匀，磁通密度随时间变化较为平稳；在 40% 偏心情况下，电机的气隙长度出现不均匀分布，导致磁通密度随时间的变化出现明显的波动。与无偏心情况相比，40% 偏心下的磁通密度幅值显著增大，且波动频率增加；在 80% 偏心情况下，磁通密度的波动进一步加剧，幅值显著增大，且波动频率更高。这种剧烈的变化表明，偏心程度的增加导致气隙磁场分布更加不均匀，电磁力的不平衡进一步加剧，电机的振动和噪声问题更加严重。

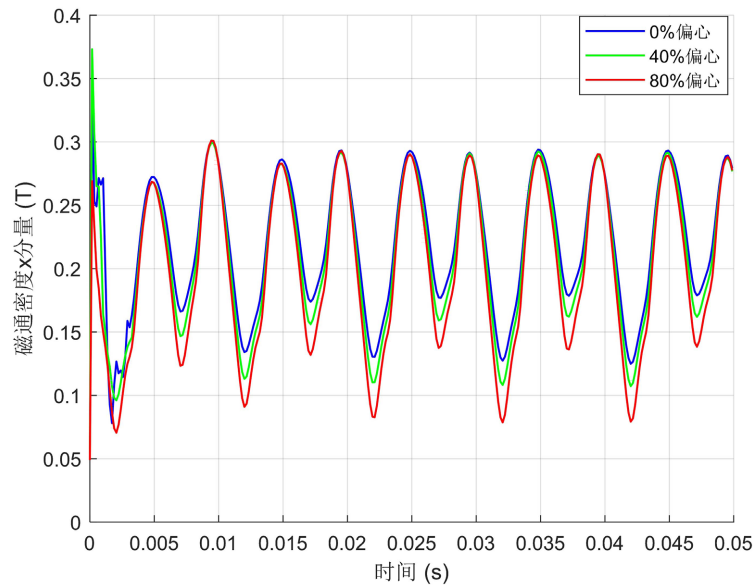


Figure 7. Time domain flux density x component
图 7. 时域磁通密度 x 分量

4. 结论

本文基于有限元分析方法，利用 COMSOL Multiphysics 软件对不同偏心程度的永磁同步电机进行电磁场分析，系统探究了转子偏心对电机电流等参数的影响。首先，本文对转子偏心现象进行了理论分析，阐述了电磁场的基本理论，包括安培定律、磁通量守恒以及矢势的应用。在此基础上，本文在 COMSOL Multiphysics 中对永磁同步电机进行了精确建模，包括几何模型的构建、边界条件的设置、网格划分以及求解器的配置，确保了仿真结果的准确性和可靠性。

研究重点聚焦于不同偏心程度对定子电流和磁通密度的影响，研究表明随着偏心程度的增加，定子电流的幅值显著增大，气隙中某点 x 分量的磁通密度值也越来越大，特别是在 80% 动态偏心情况下，电流频谱出现了明显的谐波分量并且还引入了相关的特征频率，尤其是在基波频率的倍频处，这些谐波分量会导致电机的电磁噪声和振动加剧，影响电机稳定性。

已有研究表明，动态偏心会导致电机气隙分布不均匀，进而引起电磁力波动和振动噪声增加，本文的贡献之处在于：对永磁同步电机动态偏心对电机电流和磁通密度的影响进行了详细分析，并且基于多物理场耦合分析方法具有可参考性。然而，未涉及混合偏心的研究是主要的不足之处。未来研究应结合混合偏心及偏心故障诊断方面进一步拓展，为电机设计与故障诊断提供支持。

参考文献

- [1] 程文杰, 卜婵, 肖玲, 等. 基于相对复数磁导的表贴式永磁电机气隙磁场解[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(12): 161-169.

-
- [2] 张京军, 邬占川, 张海军, 等. 静态偏心故障对开关磁阻电机电磁特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3347-3353.
 - [3] Klein, C., Palmieri, M., Nienhaus, M. and Grasso, E. (2022) Effect of Static Eccentricity on the Mean Values of the Inductances of PMSMs. 2022 *IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, 14-16 June 2022, 348-353. <https://doi.org/10.1109/melecon53508.2022.9843071>
 - [4] Cai, Y., Ni, R., Zhu, W. and Liu, Y. (2023) Modified Approach to Inductance Calculation of Variable Reluctance Resolver Based on Segmented Winding Function Method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **59**, 5900-5907. <https://doi.org/10.1109/tia.2023.3277818>
 - [5] 谢颖, 杨艳会, 蔡蔚, 等. 兆瓦级高速永磁同步电机偏心状态下电机性能及转子振动特性分析[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(9): 81-94.
 - [6] Haddad, R.Z. and Strangas, E.G. (2016) On the Accuracy of Fault Detection and Separation in Permanent Magnet Synchronous Machines Using MCSA/MVSA and LDA. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **31**, 924-934. <https://doi.org/10.1109/tec.2016.2558183>
 - [7] Tang, G., He, Y., Wan, S. and Xiang, L. (2014) Investigation on Stator Vibration Characteristics under Air-Gap Eccentricity and Rotor Short Circuit Composite Faults. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **36**, 511-522. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0072-4>
 - [8] 杭俊, 赖江龙, 邓家增, 等. 基于阶比分析的永磁同步电机偏心故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9733-9742.
 - [9] Bagheri, A., Ojaghi, M. and Bagheri, A. (2020) Air-Gap Eccentricity Fault Diagnosis and Estimation in Induction Motors Using Unscented Kalman Filter. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **30**, e12450. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12450>
 - [10] Liang, X., Zuo, M.J. and Feng, Z. (2018) Dynamic Modeling of Gearbox Faults: A Review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **98**, 852-876. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.024>