

内置式永磁同步电机振动噪声分析与优化

陆海玲^{1*}, 乌 兰²

(1. 上海电器科学研究院, 上海 200063;
2. 中国质量认证中心有限公司, 北京 100070)

Vibration and Noise Analysis and Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors

LU Hailing^{1*}, WU Lan²

(1. Shanghai Electrical Science Research Institute, Shanghai 200063, China;
2. China Quality Certification Center Co., Ltd, Beijing 100070, China)

Abstract: [Objective] To effectively mitigate the vibration and noise of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) and enhance its operational stability and reliability, this study explores the method of optimizing IPMSM vibration and noise by altering the air gap length.

[Methods] An 8-pole 48-slot IPMSM applied in a wire drawing machine was selected as the research subject. The radial and tangential electromagnetic forces during motor operation were calculated and analyzed using the finite element method, and the force waves were subjected to two-dimensional Fourier decomposition to thoroughly investigate the order and frequency of the primary force waves. Based on this, modal analysis and vibration noise simulation analysis of the motor were conducted using Workbench, with a focus on comparing the vibration acceleration and a-weighted sound pressure level contour maps under different air gap lengths, revealed the variation patterns of vibration and noise characteristics. Taking into account the influence of the static eccentricity of the rotor on the radial electromagnetic force waves, the order changes of the radial electromagnetic force under the condition of a 2 mm eccentricity of the rotor were analyzed. [Results] The simulation results indicated that appropriately increasing the air gap length could reduce the motor's vibration and noise levels as well as the amplitude of cogging torque to a certain extent. At the same time, the increase in air gap inevitably weakened the main magnetic field strength, led to a decrease in the motor's output torque as the air gap increases. When the rotor was in a state of static eccentricity, it had an impact on the spatial order of the electromagnetic force, but it did not change the temporal order of the electromagnetic force. [Conclusion] In practical design, a comprehensive trade-off between noise reduction

and torque performance is required. Additionally, rotor eccentricity significantly impacts the electromagnetic vibration and noise of the motor, so it must be avoided during both manufacturing and operation.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor; electromagnetic vibration noise; radial electromagnetic force; air gap length; rotor eccentricity

摘 要: 【目的】为有效抑制内置式永磁同步电动机 (IPMSM) 的振动噪声, 提升其运行的平稳性及可靠性, 探讨了通过改变气隙长度优化 IPMSM 振动噪声的方法。【方法】本研究选取一台应用于拉丝机的 8 极 48 槽 IPMSM 作为研究对象。采用有限元法对电机运行时的径向电磁力和切向电磁力进行了计算与分析, 并对力波进行了二维傅里叶分解, 深入分析了其主要力波的阶次及频率。在此基础上, 运用 Workbench 开展了电机的模态分析及振动噪声仿真分析, 重点对比了不同气隙长度下电机的振动加速度及 A 加权声压级云图, 揭示了振动噪声特性的变化规律。考虑了转子静态偏心对径向电磁力波的影响, 分析了转子偏心距离 2 mm 条件下径向电磁力的阶次变化。【结果】仿真结果表明, 气隙长度适当增大可在一定程度上降低电机的振动噪声水平以及齿槽转矩的幅值; 同时, 气隙的增大不可避免地削弱了主磁场强度, 导致电机的输出转矩会随着气隙的增大而减小。转子静态偏心情况下会对电磁力的空间阶次产生影响, 但是不会改变电磁力的时间阶次。【结论】实际设计中需在降噪效果与转矩性能之间进行综合权衡, 且转子偏心对电机的电磁振动噪声的影响较大, 在电机制造和使用中避免转子偏心的情况。

关键词: 内置式永磁同步电机; 电磁振动噪声; 径向电磁力; 气隙长度; 转子偏心

0 引言

内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 的噪声问题日益受到关注,其来源主要分为三类:(1)空气动力学噪声:常见于高速电机或冷却风扇,多因风道阻塞或风扇设计不合理;(2)机械噪声:主要由轴承磨损或转子动平衡不良等转动部位摩擦、碰撞引起;(3)电磁噪声:源于定转子气隙不均、磁路设计不合理、电压不平衡或波形畸变导致的电磁场变化^[1-3]。

文献[4]通过有限元仿真,验证了负载下气隙径向电磁力是电机噪声的主因,为后续研究提供了理论依据。文献[5]分析了 PMSM 在不同绕组分布和不同极槽配合情况下的电磁噪声分布情况,研究表明低阶电磁力对振动噪声的影响较大。文献[6]针对 IPMSM 的磁钢层数以及极槽配合进行了分析,研究表明,2~3 层磁钢的 IPMSM 电磁噪声最小,8 极 48 槽极槽配合能有效避免共振。

为了抑制电机的电磁噪声,主要从控制策略和本体结构两方面着手。文献[7]分析了电机振动噪声受结构参数的影响,对电机定子槽开槽来实现电机振动噪声的减小;文献[8]通过在转子上设置两个对称辅助槽来降低电磁噪声;文献[9]利用正交法与非参数回归拟合响应面相结合的方法,对电机的径向电磁力波进行优化,从而降低电机表面振动加速度。本文从定转子气隙中径向电磁力的角度出发,通过改变气隙长度分析和抑制电磁噪声,探讨气隙长度对电机振动噪声的影响,并分析转子静态偏心对径向电磁力时间、空间阶次及幅值的影响,得出径向电磁力波的变化规律。

1 IPMSM 电磁分析

本文以一台 8 极 48 槽拉丝机专用的 IPMSM 为研究对象,电机基本参数如表 1 所示,运用 Maxwell 软件搭建电机的仿真模型。为了方便快速计算,采用 1/8 模型进行计算,图 1(a)为电机的截面示意图。本研究对气隙区域及定子齿部实施了高密度网格剖分^[7],以此提升计算精度,如图 1(b)所示。

表 1 IPMSM 基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the IPMSM

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000	功率/kW	10
定子外径/mm	290	定子内径/mm	205
极对数	4	定子槽数	48
铁心长度/mm	70	气隙长度/mm	0.9

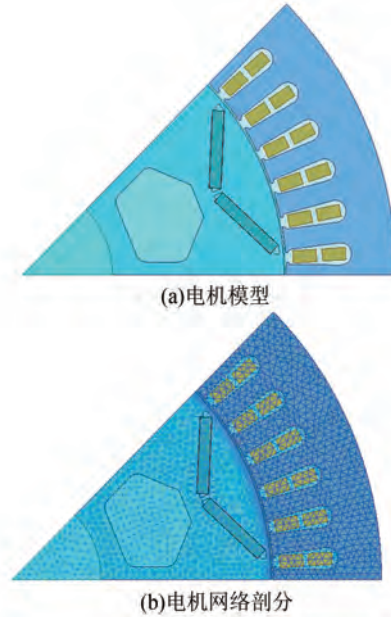


图 1 IPMSM 模型与网格剖分

Fig. 1 IPMSM model and meshing

1.1 IPMSM 电磁力分析

依据麦克斯韦应力张量理论,定子齿部所受电磁力可分解为径向分量和切向分量^[8],径向、切向电磁力 F_r 、 F_t 的表达式为

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (1)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} B_r \times B_t \quad (2)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为空气磁导率; B_r 、 B_t 分别为径向、切向磁通密度。

由于空气的磁导率远小于硅钢片,故忽略磁力线受空气的影响,可得气隙中的 B_t 成倍小于 B_r ,根据式(1)和式(2)可以推出切向电磁力 F_t 同样成倍小于径向电磁力 F_r 。因此,电磁振动噪声主要对气隙中的径向电磁力进行分析。

电机定转子气隙中的径向磁通密度由转子永磁磁场产生的磁通密度和定子电枢反应磁场产生

的磁通密度两部分谐波叠加构成, B_r 的表达式为

$$B_r = (B_{PM} + B_{arm})\lambda_a \quad (3)$$

$$B_{PM} = \sum_n B_{nm} \cos(np\theta - 2\pi n f_1 t + \beta_n) \quad (4)$$

$$B_{arm} = \sum_v B_{av} \cos(vp\theta - 2\pi s_v f_1 t + \beta_v) \quad (5)$$

$$\lambda_a = \lambda_0 + \sum_\mu \lambda_{a\mu} \cos(\mu Q_s \theta) \quad (6)$$

式中: B_{PM} 为转子永磁磁场产生的径向磁密; B_{arm} 为电枢反应磁场产生的径向磁密; m 为电机的相数; n 为永磁场空间谐波的次数; v 为电枢反应磁场谐波次数; p 为电机的极对数; θ 为电角度; Q_s 为电机槽数; μ 为齿谐波阶数; λ_a 为等效气隙磁导; B_{nm} 为第 n 次谐波的幅值; B_{av} 为第 v 次电枢反应谐波磁场的幅值; f_1 为基波频率; t 为时间; β_n 为第 n 次谐波的初始相位; s_v 为第 v 次电枢反应谐波磁场的转差; β_v 为第 v 次谐波的初始相位。

电机的每极每相槽数 q 可用式(7)表示:

$$q = \frac{Q_s}{2mp} \quad (7)$$

本研究选取 $p=4$ 、 $Q_s=48$, 代入式(7)得到 $q=2$, 电枢反应磁场谐波次数为

$$v = 2mk_1 \pm 1 \quad (8)$$

式中: $k_1=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ 。

永磁磁场谐波次数为

$$n = 2k_2 + 1 \quad (9)$$

式中: $k_2=0, 1, 2, 3 \dots$ 。

将式(3)~(5)代入式(2), 可以得到径向电磁力的来源、空间阶次和时间频率, 如表 2 所示。

表 2 径向电磁力的来源、空间阶次和时间频率

Tab. 2 Sources, spatial orders, and temporal frequencies of radial electromagnetic force

径向电磁力来源	空间阶次	时间频率
永磁磁场单独作用	$(n_1 \pm n_2)p$	$(n_1 \pm n_2)f_1$
电枢磁场单独作用	$(v_1 \pm v_2)p$	$(s_{v1} \pm s_{v2})f_1$
永磁磁场和电枢 磁场相互作用	$(n \pm v)p$	$(n \pm s_v)f_1$
永磁磁场和定子 开槽相互作用	$(n_1 \pm n_2)p \pm \mu Q_s$	$(n_1 \pm n_2)f_1$
电枢磁场和定子 开槽相互作用	$(v_1 \pm v_2)p \pm \mu Q_s$	$(s_{v1} \pm s_{v2})f_1$
永磁磁场、电枢磁场及 定子开槽相互作用	$(n \pm v)p \pm (\mu_1 \pm \mu_2)Q_s$	$(n \pm s_v)f_1$

基于上述分析, 确定了 8 极 48 槽电机中主要电磁力波的阶数、频率及其旋转方向(符号代表方向), 详细结果汇总如表 3 所示。

表 3 径向电磁力波阶次

Tab. 3 Radial electromagnetic force wave order

v	n				
	1	3	5	7	9
1	0/0	8/2	16/4	24/6	-16/8
	8/2	16/4	24/6	-16/8	-8/10
-5	24/0	-16/2	-8/4	0/6	8/8
	-16/2	-8/4	0/6	8/8	16/10
7	-24/0	-16/2	-8/4	0/6	8/8
	-16/2	-8/4	0/6	8/8	16/10
-11	0/0	8/2	16/4	24/6	-16/8
	8/2	16/4	-24/6	-16/8	-8/10
13	0/0	8/2	16/4	-24/6	-16/8
	8/2	16/4	24/6	-16/8	-8/10
-17	24/0	-16/0	-8/4	0/6	8/8
	16/2	8/4	0/6	8/8	16/10

1.2 电磁场有限元分析

利用 Maxwell 有限元仿真软件对电机气隙电磁力进行计算, 首先在 Fields Calculator 中输入 B_r 、 B_t 以及 F_r 、 F_t 的计算式, 随后在气隙区域内画一条圆周路径, 提取该路径上所有点在某一时刻的电磁力数据。有限元计算得到的径向、切向电磁力波形, 如图 2 与图 3 所示。

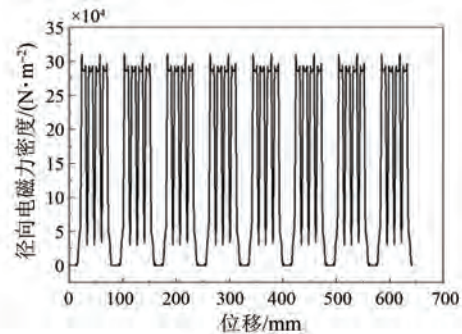


图 2 径向电磁力密度波形

Fig. 2 Radial electromagnetic force density waveform

由图 2、3 对比可知, 径向电磁力幅值显著高于切向分量, 符合理论分析。

仿真得到的电磁力时空分布如图 4 所示, 展示了圆周路径上所有点在所有时间的径向电磁力。利用 Matlab 对图 4 中的数据进行二维傅里叶分解, 结果如图 5 所示。

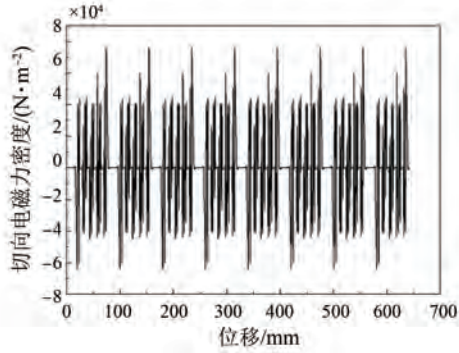


图3 切向电磁力密度波形

Fig. 3 Tangential electromagnetic force density waveform

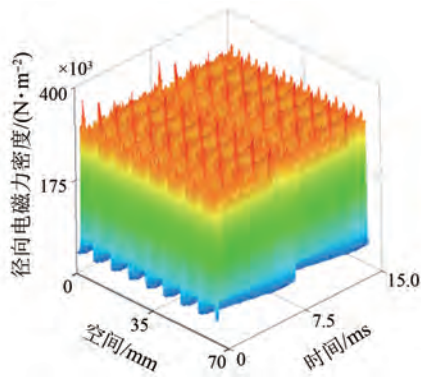


图4 径向电磁力密度时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of radial electromagnetic force density

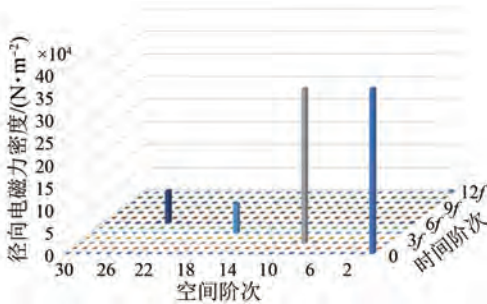


图5 径向电磁力密度二维傅里叶分解

Fig. 5 Two-dimensional Fourier decomposition of radial electromagnetic force density

由图5可知,电机径向电磁力密度的幅值在0阶、8阶、16阶及24阶的时候较大,均为电机极数的倍数,其对应的时间阶次则分别为基频的0倍、2倍、4倍和6倍,该结果与表3的理论分析一致。由于电机的电磁振动位移与空间阶次的4次方呈反比,所以主要分析8阶以下的电磁力。

2 电机模态分析

当电磁力的频率接近或与电机固有频率相等时,也会引起电机共振^[10-12],通过模态分析计算电机在低阶振型对应的固有频率,可为计算振动噪声提供参考。电磁振动噪声源于气隙磁场对定子齿部的作用,因此只需对定子铁心进行模态分析。定子铁心各阶模态振型及其对应的固有频率如图6所示。

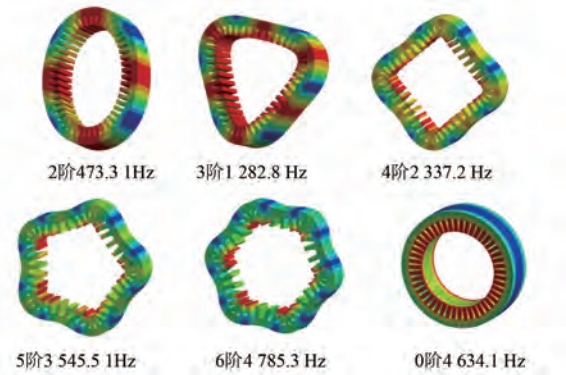


图6 定子结构模态振型图

Fig. 6 Modal shape diagram of stator structure

与表3的数据对比分析可得,电机的基波频率为66.67 Hz,径向电磁力对应的时间频率不在模态固有频率值附近,因此电机发生共振的风险极低。

3 多物理场耦合仿真分析

为了便于分析,采用电磁-结构-声场耦合的方法对振动噪声进行多物理场有限元计算^[13],提取定子齿部中的径向电磁力,在定子结构三维模型中将该力耦合到定子齿的内表面,进行谐响应分析^[14-16]。构建距离定子1.45 m的空气包声学模型^[17],并将定子表面振动加速度作为载荷,施加于定子与空气包的耦合界面,作为噪声分析的输入激励,实现了电磁激励到噪声辐射的完整建模,得出电机远场声压级云图。仿真分析的流程如图7所示。

对8极48槽IPMSM在额定转速1000 r/min下进行仿真,基波频率 $f_0 = 66.67$ Hz,得到定子外表面振动加速度如图8所示。

由图8可知,振动加速度的频率与径向电磁力波的频率在133.34 Hz ($2f$)、266.68 Hz ($4f$)、

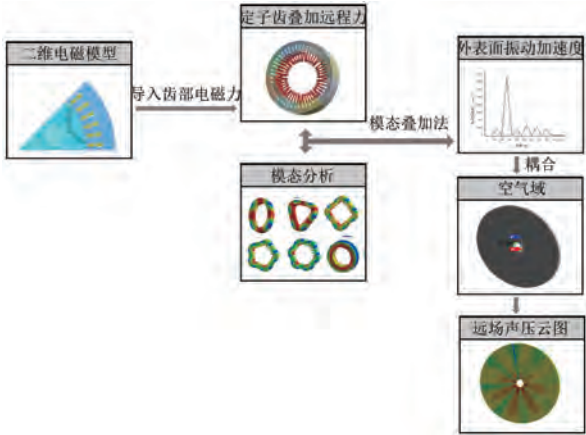


图 7 振动噪声耦合仿真模型
Fig. 7 Vibration-noise coupled simulation model

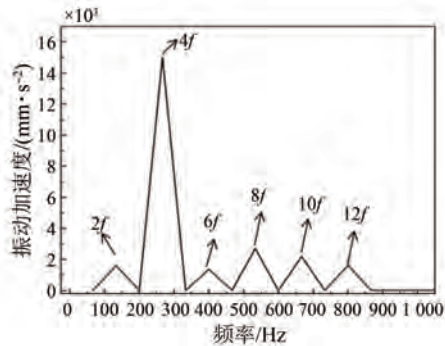


图 8 定子外表面振动加速度频谱图
Fig. 8 Vibration acceleration spectrum diagram of stator outer surface

400.02 Hz(6f)、633.36 Hz(8f)、666.7 Hz(10f) 和 800.04 Hz(12f) 处较大,均为基波频率的偶数倍,且振动加速度的峰值在四倍频处。结合表 3 和表 2,该振动主要由径向电磁力(8, 4f)引起,其源于永磁磁场 3p、5p 与电枢磁场 5p、7p 的相互作用。

将谐响应计算得到的定子外表面振动加速度作为激励源,加载到空气域模型的内表面,作为噪声源的输入,分析得到噪声 A 加权声压级云图,如图 9 所示,噪声的声压级最小为 8.99 dBA,且随着与电机的距离增大而减小。

4 气隙长度对振动噪声的影响

径向电磁力的幅值与气隙磁密的平方成正比,故可以通过改变电机的气隙长度来研究电机的振动噪声。本文所研究的 8 极 48 槽电机的原始气隙长度为 0.9 mm,取气隙长度的范围为 0.8~1.4 mm,步长 0.1 mm,共 7 个参数。不同气隙长

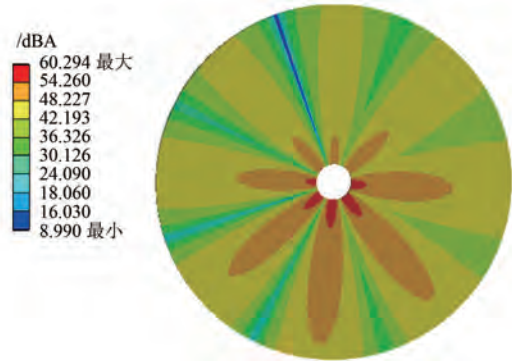


图 9 A 加权声压云图
Fig. 9 A-weighted sound pressure contour map

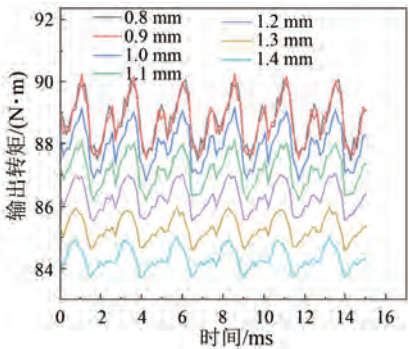


图 10 各气隙长度下的输出转矩波形
Fig. 10 Output torque waveforms under different air gap lengths

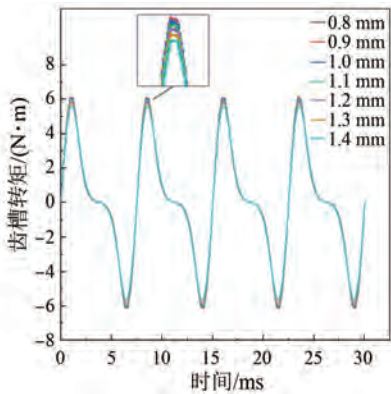


图 11 各气隙长度下的齿槽转矩波形
Fig. 11 Cogging torque waveforms under different air gap lengths

度下的输出转矩如图 10 所示,增大气隙长度会导致转矩有所降低。不同气隙长度的齿槽转矩分析结果如图 11 所示,电机的齿槽转矩随气隙长度的增大而减小。因此,增大气隙长度可有效抑制齿槽转矩但是会导致输出转矩降低^[18-20]。

径向电磁力随气隙长度变化的波形如图 12

所示。图中,随着气隙长度的增大,定子外表面的振动加速度在 4 倍频处越来越小,增大气隙长度可以有效减小振动。但随着气隙的增大,输出转矩也在急剧下降,所以需要综合考虑^[21-23]。经对比,当气隙长度为 1.0 mm 时,既能达到电机性能需求,又可有效减小振动噪声。

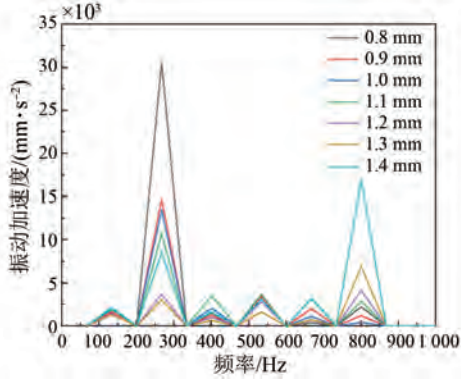


图 12 各气隙长度下的振动加速度频谱图

Fig. 12 Vibration acceleration frequency spectrum diagram at various air gap lengths

气隙长度增大 1.0 mm 时定子外部空气包的 A 加权声压云图如图 13 所示,1.45 m 处的声压级减小到 6.896 dBA。

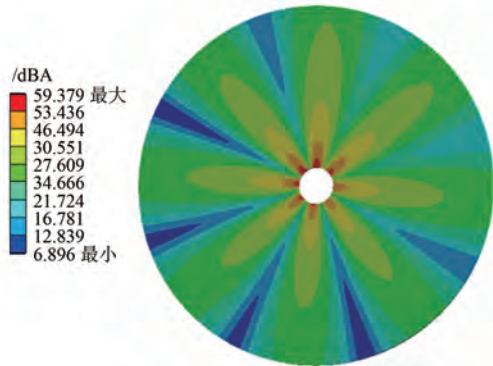


图 13 气隙长度 1.0 mm 下的 A 加权声压级云图

Fig. 13 A-weighted sound pressure level cloud map at an air gap length of 1.0 mm

5 转子偏心对振动噪声的影响

除了气隙长度,其均匀性对电磁噪声也有显著影响。转子偏心(多因加工或装配误差)是导致气隙不均的常见原因^[24-27]。静态偏心是指转子的中心与旋转中心重合,但是两者相对定子的几何中心偏移一定距离,如图 14 所示。图中, O_s 为定子的几何中心; O_R 为转子的几何中心; O_{R0}

为转子偏心的几何中心; θ 为转子的机械位置角度; δ 为气隙长度; $\delta(\theta)$ 为偏心后的气隙长度; δ_e 为偏心距离^[28]。

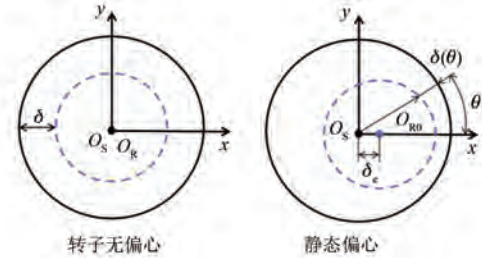


图 14 转子偏心示意图

Fig. 14 Schematic diagram of rotor static eccentricity

当 IPMSM 转子偏心时,气隙磁导的变化规律为

$$\Lambda = \Lambda_0 (1 + \varepsilon \cos \theta) \quad (10)$$

式中: Λ_0 为均匀气隙磁导; $\varepsilon = \delta_e / \delta$ 为偏心度。

静态偏心下的径向力波表达式为

$$P_{rSE} = \sum_{r,j} F_{r,j} \cos(r\theta + j\omega_{r,j}t + \varphi_{r,j}) \cdot (1 + \varepsilon \cos \theta)^2 \quad (11)$$

式中: r 为电磁径向力的空间阶次; j 为电磁径向力的频率; $F_{r,j}$ 为空间 r 阶、时间 j 阶的电磁力的幅值; $\varphi_{r,j}$ 为空间 r 阶、时间 j 阶的电磁力的相位角; $\omega_{r,j}$ 为角频率。

静态偏心会引入新的空间阶次:原有阶次不变,新增 ± 1 和 ± 2 的空间阶次,时间阶次保持恒定^[29-31]。

对转子静态偏心进行有限元仿真,得到径向电磁力的分布如图 15 所示。对其进行二维傅里叶分解,结果如图 16 所示。

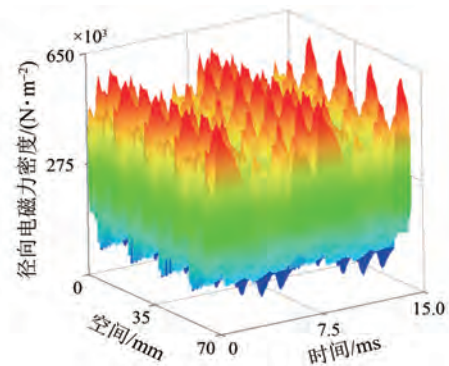


图 15 静态偏心下的径向电磁力密度时-空分布

Fig. 15 Spatiotemporal distribution of radial electromagnetic force density under static eccentricity

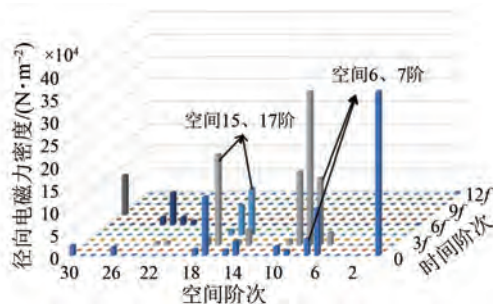


图 16 静态偏心下的径向电磁力密度二维傅里叶分解
Fig. 16 Two-dimensional Fourier decomposition of radial electromagnetic force density under static eccentricity

通过有限元仿真计算得到转子静态偏心且偏心距离 0.2 mm 时,径向电磁力波的阶次在原有 8 阶、16 阶、24 阶的情况下,增加了空间 6 阶、7 阶、15 阶和 17 阶等阶次,时间阶次不变。

将转子在静态偏心下的电磁力波作为激励源,加载到定子齿部,得到静态偏心下定子外表面的振动加速度,与未偏心下的振动加速度频谱进行对比,如图 17 所示。

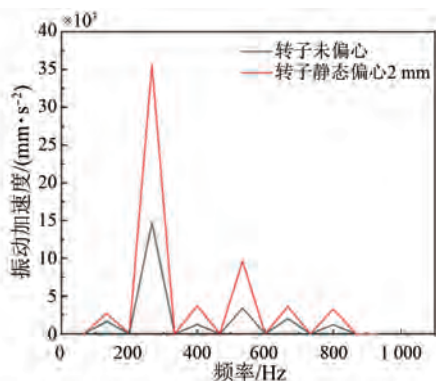


图 17 定子外表面振动加速度频谱对比图
Fig. 17 Comparison chart of vibration acceleration spectra on the outer surface of the stator

由图 17 可知,当转子静态偏心时,所有频率下的振动加速度都会增加,尤其是 2 倍频、4 倍频等偶数倍频的增加更明显,因而引起更大的振动噪声。

6 结语

本文以一台拉丝机用 8 极 48 槽 IPMSM 为研究对象,分析了气隙长度对转矩、齿槽转矩和定子表面振动加速度的影响,以及转子静态偏心对电磁力空间阶次与振动频谱的影响,为振动噪声的机理分析与优化提供新思路。结论如下。

(1) IPMSM 的径向电磁力幅值远大于切向电磁力幅值,是产生电磁振动噪声的主要激励。该电磁力的时间频率为基频偶数倍,空间阶次为极数的倍数。

(2) 增大气隙长度可有效抑制偶数倍频径向电磁力的幅值,进而降低定子表面振动加速度、降低噪声声压级;但会导致输出转矩下降。故设计时需权衡降噪需求与转矩性能。

(3) 转子静态偏心会在气隙中产生额外的电磁力,经二维傅里叶分析得到转子静态偏心仅对径向电磁力波的空间阶次及其幅值产生影响,会加剧电机的电磁振动和噪声,在电机制造和日常运行中应避免转子偏心的情况。

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

陆海玲进行了方案设计、内容总结与论文撰写,乌兰进行了试验研究、论文审核与修改。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 Lu Hailing. Wu Lan conducted experimental research, paper review, and revision. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 郑江,代颖,石坚. 车用永磁同步电机的电磁噪声特性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊1): 53-59.
ZHENG J, DAI Y, SHI J. Electromagnetic noise characteristics of permanent magnet synchronous motor applied in electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 53-59.
- [2] 刘鸣,景建方. 降低电机噪声的方法研究[J]. 船电技术, 2011, 31(12): 21-24.
LIU M, JING J F. Research on methods of reducing the motor noise [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2011, 31(12): 21-24.

- [3] 周传华,肖长春. 高压电机电磁噪声的分析及控制[J]. 防爆电机, 2009, 44(3): 54-56.
ZHOU C H, XIAO C C. Analysis and control of the electromagnetic noise of high-voltage motor [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2009, 44 (3): 54-56.
- [4] DELFA P L, HECQUET M, GILLON F. Radial pressure analysis in PMSM responsible for electromagnetic noise [C]// 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics, Compiegne, 2016.
- [5] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3214-3222.
- [6] 韩雪岩,张新刚,朱龙飞,等. 内置式多层磁钢永磁同步电机振动噪声抑制措施[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(8): 67-75.
HAN X Y, ZHANG X G, ZHU L F, et al. Measures to reduce vibration and noise of interior permanent magnet synchronous motor with multilayer permanent magnets [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(8): 67-75.
- [7] 宋昌杰. 永磁同步电机噪声分析及抑制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
SONG C J. Research on noise analysis and suppression methods of permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [8] FU Z X, ZHANG P, HUANG S R. Research on the vibration and noise of less rare-earth interior U permanent magnet synchronous machine [C]// 2024 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, 2014.
- [9] 刘方韬,张成新,庞悦. 永磁同步电机电磁振动噪声分析与优化[J]. 微特电机, 2024, 52(12): 27-32.
LIU F T, ZHANG C X, PANG Y. Analysis and optimization of electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(12): 27-32.
- [10] 王凯,孙海阳,张露锋,等. 永磁同步电机转子磁极优化技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7304-7317.
WANG K, SUN H Y, ZHANG L F, et al. An overview of rotor pole optimization techniques for permanent magnet synchronous machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (24): 7304-7317.
- [11] ZHANG Y Y, GENG H P, ZHOU J, et al. Analysis of electromagnetic force waves of solid cylindrical permanent magnet synchronous motors [C]// 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, 2018.
- [12] 杨天海,沈启平,钟宇,等. 定子无轭轴向磁通永磁电机电磁振动及噪声研究[J]. 微电机, 2025, 58(4): 34-41+46.
YANG T H, SHEN Q P, ZHONG Y, et al. Study of electromagnetic vibration and noise in stator yokeless and segmented armature axial flux permanent magnet motor [J]. Micromotors, 2025, 58(4): 34-41+46.
- [13] 申合彪,赵朝会,陆海玲,等. 不对称磁障对IPMSM电磁振动噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 71-76+83.
SHEN H B, ZHAO C H, LU H L, et al. Analysis of influence of asymmetric magnetic barrier on electromagnetic vibration noise of IPMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48 (10): 71-76+83.
- [14] 戚国阳,刘畅,王寅,等. 定子齿轭部附加气隙对轮辐式永磁同步电机声学性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 389-401.
QI G Y, LIU C, WANG Y, et al. Influence of additional air gap in stator tooth-yoke on the acoustic performance of spoke-type permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 389-401.
- [15] 高锋阳,岳文瀚,高建宁,等. 内置U型永磁电机电磁优化及振动噪声抑制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(4): 71-83.
GAO F Y, YUE W H, GAO J N, et al. Electromagnetic optimization and vibration noise suppression of interior U-type permanent magnet motor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(4): 71-83.
- [16] 杨顺吉,王天宝,炊军立,等. 基于场路耦合的永磁电机高频径向电磁力波分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 24-35.
YANG S J, WANG T B, CHUI J L, et al. High frequency radial electromagnetic force wave analysis

- of permanent magnet motor based on field-circuit coupling [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(2): 24-35.
- [17] 李全峰, 刘世昌. 运行工况下电动汽车内置式永磁同步电机振动噪声源识别[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(5): 194-199.
- LI Q F, LIU S C. Identification of vibration and noise sources for inserted permanent magnet synchronous motors of electric vehicles under operating conditions [J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(5): 194-199.
- [18] 贾梦凡, 于冰, 唐小春, 等. 基于转子辅助槽的 PMSM 电磁振动噪声削弱方法研究[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(3): 68-76.
- JIA M F, YU B, TANG X C, et al. Research on reduction method of PMSM electromagnetic vibration noise based on rotor auxiliary slots [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(3): 68-76.
- [19] 许龙飞, 马艳秋, 胡利民. 永磁同步电机注入谐波电流减小振动噪声的设计研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(9): 36-42.
- XU L F, MA Y Q, HU L M. Design and research on reducing vibration noise by injecting harmonic current into permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(9): 36-42.
- [20] 谢颖, 耿高旭, 蔡蔚, 等. 隔磁孔转子结构永磁同步电机效率与振动噪声优化设计[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2025-08-11. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242406>.
- XIE Y, GENG G X, CAI W, et al. Optimized design of a permanent magnet synchronous motor efficiency and vibration noise with magnetic hole rotor structure [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2025-08-11. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242406>.
- [21] 邱小华, 魏方睿, 李宗洋, 等. 定转子结构对集中绕组永磁电机中二倍频径向电磁力的影响分析[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(1): 132-141+155.
- QIU X H, WEI F R, LI Z Y, et al. Influence analysis of stator/rotor topologies on two-time frequency electromagnetic force in permanent magnet machines with concentrated windings [J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(1): 132-141+155.
- [22] 黄超, 熊璐, 吴虎威, 等. 轮毂驱动用永磁同步电机电磁振动噪声研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(增刊1): 302-308.
- HUANG C, XIONG L, WU H W, et al. Simulation and experimental analysis of electromagnetic vibration and noise for in-wheel-drive permanent magnetic synchronous electrical motor [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2024, 52(S1): 302-308.
- [23] 毛彦欣, 赵文祥. 径向磁通永磁同步电机电磁振动噪声综述[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(9): 3667-3685.
- MAO Y X, ZHAO W X. Overview of electromagnetic vibration and noise in radial-flux permanent magnet synchronous machine [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(9): 3667-3685.
- [24] 赵希栋, 王玉彬. 气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机的电磁振动分析[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(7): 732-742.
- ZHAO X D, WANG Y B. Electromagnetic vibration analysis of fractional-slot interior permanent magnet synchronous motor with air-gap eccentricity [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(7): 732-742.
- [25] 张婷婷, 孙维国, 葛梦, 等. 充磁方式对偏心状态下外转子永磁电机振动噪声影响分析[J]. *家电科技*, 2023, (增刊1): 174-180.
- ZHANG T T, SUN W G, GE M, et al. Influence of magnetization mode on vibration and noise of outer-rotor permanent magnet motor under eccentricity [J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2023, (S1): 174-180.
- [26] 左曙光, 张耀丹, 刘晓璇, 等. 转子偏心对永磁同步电机振动噪声的影响分析[J]. *机电一体化*, 2017, 23(6): 38-45+51.
- ZUO S G, ZHANG Y D, LIU X X, et al. Analysis on the vibration and noise of permanent magnet synchronous motor with rotor eccentricity [J]. *Mechatronics*, 2017, 23(6): 38-45+51.
- [27] 王广超, 韩清鹏, 朱瑞, 等. 动态气隙偏心下同步调相机转子振动研究[J]. *噪声与振动控制*, 2025, 45(4): 39-44.
- WANG G C, HAN Q P, ZHU R, et al. Rotor vibration of synchronous condenser under dynamic air gap eccentricity [J]. *Noise and Vibration Control*, 2025, 45(4): 39-44.

- [28] 张令伟, 郑金才, 姜建国, 等. 高速永磁电机转子偏心气隙磁场和电磁力研究分析[J]. 机电工程技术, 2025, 54(2): 159-164+174.
- ZHANG L W, ZHENG J C, JIANG J G, et al. Research and analysis of eccentric air gap magnetic field and electromagnetic force of rotor of high-speed permanent magnet motor [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(2): 159-164+174.
- [29] 卜凡, 郝珂庆, 胡博. 表贴式永磁电机转子偏心下齿槽转矩研究[J]. 微电机, 2024, 57(10): 26-31.
- BU F, CHI K Q, HU B. Research on slot torque of surface mounted permanent magnet motor under rotor eccentricity [J]. Micromotors, 2024, 57(10): 26-31.
- [30] 唐旭, 成豪杰, 马兆兴, 等. 转子偏心对永磁同步电动机电磁力特性的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 133-141.
- TANG X, CHENG H J, MA Z X, et al. Influence of rotor eccentricity on electromagnetic force characteristics of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(5): 133-141.
- [31] 苏国霞. 转子偏心对异步电机的影响分析[J]. 防爆电机, 2023, 58(5): 31-34.
- SU G X. Influence analysis of rotor eccentricity fault on induction motors [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2023, 58(5): 31-34.

收稿日期:2025-07-01

收到修改稿日期:2025-09-29

作者简介:

陆海玲(1995-), 女, 硕士, 研究方向为电机本体设计, 15262008780@163.com;

* 通信作者:陆海玲(1995-), 女, 硕士, 研究方向为电机本体设计, 15262008780@163.com。