

# 气隙非均匀分布的内置式永磁同步电机 振动噪声分析

王 巍<sup>1\*</sup>, 裴 堉<sup>1</sup>, 魏钰桀<sup>1</sup>, 宋志环<sup>2</sup>, 李 明<sup>1</sup>

(1. 渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121000;

2. 华域汽车电动系统有限公司, 上海 201200)

## Analysis of Vibration and Noise of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-Uniform Air Gap Distribution

WANG Wei<sup>1\*</sup>, PEI Yu<sup>1</sup>, WEI Yujie<sup>1</sup>, SONG Zhihuan<sup>2</sup>, LI Ming<sup>1</sup>

(1. College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China;

2. Huayu Automotive Electric Drive System Co., Ltd, Shanghai 201200, China)

**Abstract:** [Objective] Electromagnetic vibration characteristics are a core performance indicator of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for electric vehicles, directly determining their operational stability and playing a key role in noise control. Current research primarily focuses on the electromagnetic vibration features of IPMSM under normal operating conditions, while insufficient attention has been paid to the significant impact of stator and rotor deformations in practical scenarios. [Methods] This study focused on the air gap deformation caused by stator deformation and rotor mechanical stress deformation. The air gap permeance function after deformation was derived, and the expression of radial electromagnetic force for IPMSM under non-uniform air gap conditions was subsequently derived. Finite element simulations were conducted for validation. Finally, the difference in equivalent radiated power level on the motor housing surface before and after air gap deformation was calculated to clarify the variation patterns of vibration and noise. [Results] The simulation results demonstrated that: force waves of  $(n \pm m)p \pm k_s$  orders ( $k_s = 1, 2, 3, \dots, 8$ ) were introduced by stator inner circular deformation through magnetic permeance modulation, depending on different deformation wave numbers.  $(n \pm m \pm 2k)p$ -order force waves were generated by rotor mechanical deformation via the same modulation mechanism, and the amplitudes of inherent

force waves were amplified. The low-order force waves modulated by stator deformation were found to easily couple with low-order structural modes at low rotational speeds, leading to non-negligible vibration noise. The inherent electromagnetic force wave amplitude was increased by rotor mechanical deformation at high speeds, leading to aggravated vibration. [Conclusion] This study reveals the correlation mechanism between stator/rotor deformation and electromagnetic vibration in IPMSM, providing a theoretical basis for the optimization of flux barriers and low-order modal decoupling under high-speed operating conditions.

**Key words:** electromagnetic vibration; interior permanent magnet synchronous motor; air gap deformation; vibration and noise

**摘要:** 【目的】电磁振动特性是车用内置式永磁同步电机(IPMSM)的核心性能指标,直接决定其运行稳定性,并对噪声控制效果起关键作用。现有研究多集中于IPMSM正常运行状态下的电磁振动特征,却未充分关注实际工况中定子与转子形变对电磁振动的显著影响。【方法】本文围绕定子形变及转子机械应力形变引起的气隙形变,通过推导形变后的气隙磁导函数,进而推导气隙不均匀状态下IPMSM的径向电磁力表达式,并通过有限元仿真验证。最后计算气隙形变前后机壳表面等效辐射功率级的差异以明确振动噪声的变化规律。【结果】仿真结果表明:定子内圆形变会按不同形变波数通过磁导调制引入 $(n \pm m)p \pm k_s$  ( $k_s = 1, 2, 3, \dots, 8$ )阶次的力波,转子机械形变通过磁导调制产生 $(n \pm m \pm 2k)p$ 阶次的力波,并增大固有力波的幅值。定子内圆形变调制出的低阶力波容易在低速下与低阶模态耦合,产生不可忽视的振动噪声;转子机

**基金项目:** 辽宁省博士科研启动基金计划项目 (2025-BS-0809)

Doctoral Scientific Research Foundation Program of Liaoning Province (2025-BS-0809)

械形变在高转速下会增大固有力波幅值,从而加剧振动。

**【结论】**本文揭示了 IPMSM 定/转子形变与电磁振动的关联机制,为高转速工况下的隔磁桥优化、低阶模态解耦等设计提供了理论依据。

**关键词:** 电磁振动; 内置式永磁同步电机; 气隙形变; 振动噪声

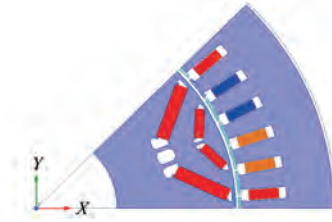


图 1 样机拓扑示意图

Fig. 1 Prototype topology schematic diagram

## 0 引言

高速化与高功率密度是永磁电机发展的核心方向。内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 因高效、宽调速等优势,成为高速驱动的首选方案,但高速工况下电磁振动与噪声问题仍是关键瓶颈<sup>[1-4]</sup>。现有研究多聚焦于理想气隙,存在一定的局限。目前对于气隙非均匀分布的研究主要聚焦于偏心情况下电机的电磁振动问题,相继有学者进行了深入探讨<sup>[5-14]</sup>。另外有学者采用转子或定子齿开槽及修型等方式削弱某电磁力谐波幅值,以降低 IPMSM 的振动噪声<sup>[15-19]</sup>。

从气隙形变看,定子内圆由于过盈配合呈多波数形变,高速下转子机械应力会导致转子表面呈径向梯度式凸起,二者均破坏气隙均匀性。这种非均匀气隙会放大原有电磁力谐波幅值,并可能催生新谐波。文献[20]针对轮毂电机研究指出,定子椭圆形变引发 $(2p \pm 2, 2f)$ 、 $(2p \pm 4, 2f)$ 阶径向电磁力波,转子形变引发 $(2p, 2f)$ 阶附加谐波,二者皆会在不同程度上增大电磁振动噪声。此外,气隙非均匀分布引发的特定阶次附加电磁力在空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 策略下与逆变器边带电流耦合,进一步放大高频振动<sup>[21]</sup>。

IPMSM 的非均匀气隙对电磁振动影响的研究成果较少,针对这一问题,本文基于永磁同步电动机,重点研究 IPMSM 的气隙形变和振动特性。

## 1 气隙形变下电磁激励的理论分析

样机拓扑图和基本参数分别如图 1 和表 1 所示。

根据文献[22]研究可知,径向磁通密度远大于切向磁通密度,本文忽略切向磁通密度。基于

麦克斯韦应力张量公式推导电磁力波,如式(1)所示:

$$p(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

$$B(\theta, t) = F(\theta, t) \cdot \lambda(\theta) = F(\theta, t) \cdot \lambda_0 \cdot \Lambda(\theta) \quad (2)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  为空气磁导率; $B(\theta, t)$  为径向气隙磁通密度; $F(\theta, t)$  为气隙磁动势; $\lambda_0 = \frac{\mu_0}{\delta_0 k_c}$  为平均气隙磁导, $\delta_0$  为无形变时的平均气隙长度, $k_c$  为卡特系数; $\Lambda(\theta) = \frac{\lambda(\theta)}{\lambda_0}$  为比磁导。

表 1 样机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the prototype

参数名称	参数值
额定功率/kW	85
额定转矩/(N·m)	160
额定电压/V	270
最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	17 000
极/槽数	8/48
定子内径/mm	150
转子外径/mm	147.6
槽口宽度/mm	1.5
气隙长度/mm	1.2

### 1.1 定子内圆形变后电磁力波解析推导

热套工艺中,由于定子铁心通常由硅钢片叠压而成,其整体刚度分布不均,存在齿槽结构、叠压接缝等,与机壳过盈配合后,在径向力作用下会发生非均匀形变。用三坐标测量机测量定子铁心内圆过盈配合后的实际轮廓,如图 2 所示。对定子内径数据进行傅里叶分解发现,其变形主要由 1、2、3、6 和 8 波数的形变构成。

定子内径沿周向存在  $k_s$  次周期性形变,气隙

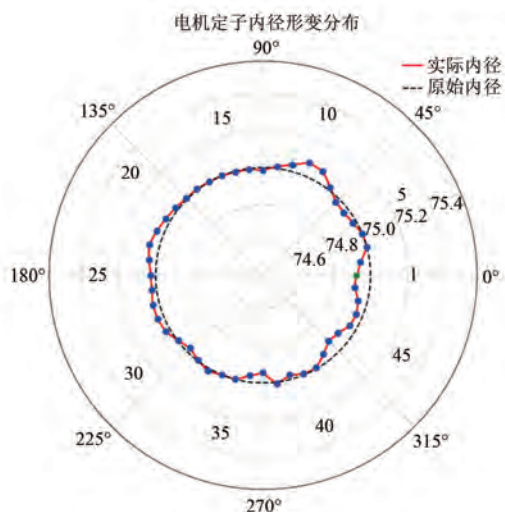


图2 实测定子内径轮廓示意图

Fig.2 Measured stator inner diameter profile schematic diagram

长度的空间分布为

$$\delta_s(\theta) = \delta_0 [1 + \varepsilon_s \cos(k_s \theta)] \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_s \ll 1$  为定子形变相对幅值;  $k_s = 1, 2, 3 \dots 8$  为形变波数;  $\theta$  为机械角度。

将  $\lambda = \frac{\mu_0}{\delta}$  代入式(3)并按泰勒级数展开,保留1阶小项,因此气隙磁导表达式为

$$\lambda_s(\theta) = \frac{\mu_0}{\delta_0 [1 + \varepsilon_s \cos(k_s \theta)]} \approx \lambda_0 [1 - \varepsilon_s \cos(k_s \theta)] \quad (4)$$

结合比磁导定义,可得定子形变的比磁导为

$$\Lambda_s(\theta) = 1 - \varepsilon_s \cos(k_s \theta) \quad (5)$$

三相对称电流激励下的定子电枢磁动势、永磁磁动势分别为

$$F_s(\theta, t) = \sum_n F_{sn} \cos(np\theta - h\omega t) \quad (6)$$

$$F_r(\theta, t) = \sum_m F_{rm} \cos(mp\theta - m\omega t) \quad (7)$$

式中:  $h$  为电流谐波的次数;  $n, m$  分别为定子、转子谐波次数;  $F_{sn}, F_{rm}$  分别为定子  $n$  次、转子  $m$  次谐波磁动势幅值,  $n = 1, 5, 7 \dots, m = 1, 3, 5 \dots$ ;  $m\omega$  为转子  $m$  次谐波磁动势的电角频率,  $\omega$  为电角速度;  $p$  为极对数。

总气隙磁动势叠加为

$$F_0(\theta, t) = F_s(\theta, t) + F_r(\theta, t) = \sum_n F_{sn} \cos(np\theta - h\omega t) + \sum_m F_{rm} \cos(mp\theta - m\omega t) \quad (8)$$

将式(8)代入  $B = F \cdot \lambda_0 \cdot \Lambda$ , 可得气隙磁通密度为

$$B_s(\theta, t) = B_0(\theta, t) + \Delta B_s(\theta, t) \quad (9)$$

式中:  $B_0(\theta, t)$  为未形变时的基本磁密;  $\Delta B_s(\theta, t)$  为附加磁密。

将  $B_s(\theta, t)$  展开为

$$\begin{aligned} B_s(\theta, t) &= B_{0s}(\theta, t) + \Delta B_s(\theta, t) = \\ &\lambda_0 \sum_{n=1,5,7\dots} F_{sn} \cos(np\theta - h\omega t) + \\ &\lambda_0 \sum_{m=1,3,5\dots} F_{rm} \cos(mp\theta - m\omega t) - \\ &\frac{\lambda_0 \varepsilon_s}{2} \sum_{n=1,5,7\dots} F_{sn} \{ \cos[(np + k_s)\theta - h\omega t] + \\ &\quad \cos[(np - k_s)\theta - h\omega t] \} - \\ &\frac{\lambda_0 \varepsilon_s}{2} \sum_{m=1,3,5\dots} F_{rm} \{ \cos[(mp + k_s)\theta - m\omega t] + \\ &\quad \cos[(mp - k_s)\theta - m\omega t] \} \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入式(1),总电磁力波可表示为固有力波与附加力波的叠加,如式(11)所示:

$$p_s(\theta, t) = p_0(\theta, t) + \Delta p_s(\theta, t) \quad (11)$$

$$\Delta p_s(\theta, t) = -\frac{\lambda_0^2 \varepsilon_s}{4\mu_0} \times$$

$$\left\{ \sum_{n,m} F_{sn} F_{rm} \{ \cos[(n+m)p\theta + k_s\theta - (h+m)\omega t] + \cos[(n-m)p\theta - k_s\theta + (m-h)\omega t] + \cos[(n+m)p\theta - k_s\theta - (h+m)\omega t] + \cos[(n-m)p\theta + k_s\theta + (m-h)\omega t] \} \right\} \quad (12)$$

根据上述推导结果可知,定子内圆形变会按不同形变波数,通过磁导调制引入  $(n \pm m)p \pm k_s$  阶次力波,易调制出低阶次电磁力,需重点关注附加力波频率接近共振点的场景。

## 1.2 转子机械形变后电磁力波推导

车用 PMSM 在高速运行时,转子承受巨大的离心力、电磁力及热应力,易产生复杂的机械形变<sup>[23-24]</sup>。转子表面形变主要由两个近似平顶波的曲线叠加而成,分别对应两层磁钢中间隔磁桥上的应力集中区域以及极靴的辐射状变形,如图3所示。

根据图3转子表面形变数据,将转子侧气隙形变等效成两个方波叠加,则:

$$\Delta\delta(\theta) = \begin{cases} \delta_0 \varepsilon_1, & \theta \in \left[ -\frac{\pi}{2p}, -\Delta\theta \right] \cup \left[ \Delta\theta, \frac{\pi}{2p} \right] \\ \delta_0 \varepsilon_2, & \theta \in [-\Delta\theta, \Delta\theta] \end{cases} \quad (13)$$

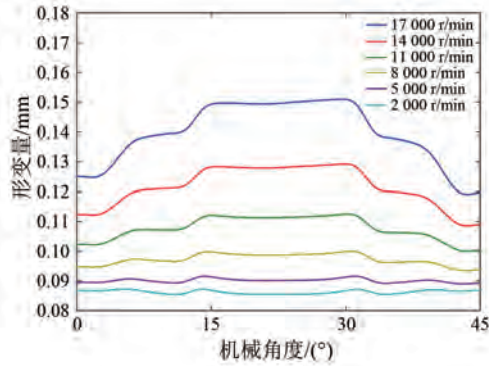


图 3 转子表面形变分布曲线

Fig. 3 Rotor surface deformation distribution curves

式中:  $\Delta\delta(\theta)$  为形变量;  $\Delta\theta$  为极中心凸起部分半宽度;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  分别为第一、二段凸起相对形变量。

转子侧气隙形变为偶函数形式, 其傅里叶级数展开为余弦级数, 如式 (14) 所示:

$$\Delta\delta(\theta) = \delta_0 \varepsilon_1 + \frac{2p\delta_0 \Delta\theta}{\pi} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\delta_0}{\pi} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sin(2pk\Delta\theta) \cos[2pk(\theta - \omega_m t)] \quad (14)$$

转子表面形变气隙磁导为

$$\lambda_r(\theta) = \lambda_0 \left\{ 1 + \varepsilon_1 + \frac{2p\Delta\theta}{\pi} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\pi k} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sin(2pk\Delta\theta) \cos[2pk(\theta - \omega_m t)] \right\} \quad (15)$$

式中:  $\omega_m$  为机械角速度。

为简化式 (15), 令  $D_{k_r} = \frac{2}{\pi k} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sin(2pk\Delta\theta)$ 、

$C_{k_r} = 1 + \varepsilon_1 + \frac{2p\Delta\theta}{\pi} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ , 则磁通密度合成为

$$B_r(\theta, t) = [F_s(\theta, t) + F_r(\theta, t)] \cdot \lambda_r(\theta) = B_0(\theta, t) + \Delta B_r(\theta, t) \quad (16)$$

将  $B_r(\theta, t)$  展开为

$$B_r(\theta, t) = B_{0r}(\theta, t) + \Delta B_r(\theta, t) = \lambda_0 C_{k_r} \sum_{n=1,5,7,\dots} F_{sn} \cos(np\theta - h\omega t) + \lambda_0 C_{k_r} \sum_{m=1,3,5,\dots} F_{rm} \cos(mp\theta - m\omega t) +$$

$$\frac{\lambda_0}{2} D_{k_r} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1,5,7,\dots} F_{sn} \{ \cos[(np + 2pk)\theta - (h\omega + 2pk\omega_m)t] + \cos[(np - 2pk)\theta - (m\omega - 2pk\omega_m)t] \} +$$

$$\frac{\lambda_0}{2} D_{k_r} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1,3,5,\dots} F_{rm} \{ \cos[(mp + 2pk)\theta - (h\omega + 2pk\omega_m)t] + \cos[(mp - 2pk)\theta - (m\omega - 2pk\omega_m)t] \} \quad (17)$$

附加力波核心成分为

$$\Delta p_{s-r} = \frac{\lambda_0^2}{4\mu_0} \left\{ D_{k_r} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n,m} F_{sn} F_{rm} \{ \cos[(n+m+2k)p\theta - (h+m+2k)\omega t] + \cos[(n-m-2k)p\theta + (m-h-2k)\omega t] + \cos[(n+m-2k)p\theta - (h+m-2k)\omega t] + \cos[(n-m+2k)p\theta + (m-h+2k)\omega t] \} \right\} \quad (18)$$

根据上述推导结果可知: 转子机械形变通过磁导调制产生  $(n \pm m \pm 2k)p$  阶次的力波, 且因转子表面凸起会减小气隙磁导, 使固有力波幅值增大。

综上所述, 定子内圆形变引入的附加力波成分及转子机械形变导致固有力波幅值增大, 可能引起电机振动噪声的畸变。

## 2 气隙形变下径向力波的有限元计算

### 2.1 定子侧气隙形变对电磁力波的影响

为了研究电磁力波时空谐波随气隙形变变化的一般性规律, 本文将定子内圆根据形变波数进行参数化重构, 可以得到不同气隙形变下主要电磁力波谐波成分的变化趋势。定子内圆 1 波数形变时的定子各齿内径图如图 4 所示, 其椭圆最大形变量为 0.24 mm, 近似为平均气隙长度的 20%, 其余各波数形变不再赘述。

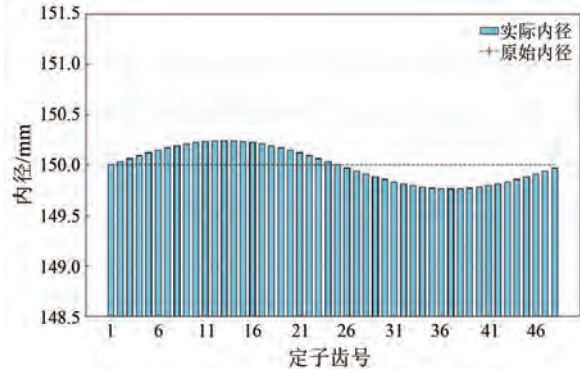


图 4 定子内圆 1 波数形变的定子内径尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stator inner diameter with 1-wave-number deformation

在电磁场仿真的前处理中,暂未考虑驱动器和控制方式引入的谐波影响,各电机模型采用理想的三相对称正弦激励源,不同运行工况条件对应的电压角不同。

通过对比不同气隙状态下电磁力波的时空谐波频谱,可以分析气隙形变对电磁力波时空谐波的影响。3 000 r/min、90 N·m 工况下,不同定子内圆按不同波数形变时径向电磁力波的波形分布、谐波分布分别如图 5、6 所示。

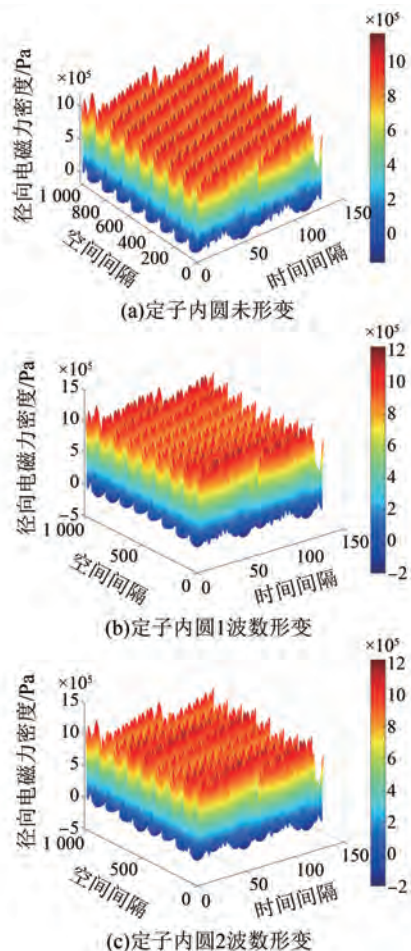


图 5 不同定子内圆形变下径向电磁力波三维分布

Fig. 5 3D distribution of radial electromagnetic force waves under different stator inner diameter deformations

由图 5 可知,8 极 48 槽永磁同步驱动电机的径向电磁力波在气隙未形变时呈 8 个周期的空间分布;而气隙发生形变时,三维电磁力波的波形中引入对应的周期性。由此可得,气隙形变的不同波数会改变电磁力波的周期性,并调制出对应空间阶次的电磁力波。

由图 6 可知,气隙未形变时径向电磁力波主

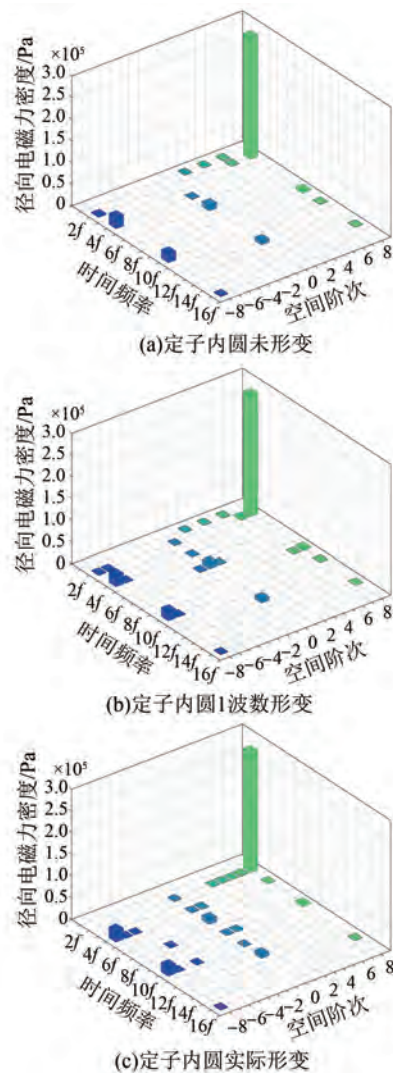


图 6 不同定子内圆形变下径向电磁力波谐波分布

Fig. 6 Harmonic distribution of radial electromagnetic force waves under different stator inner diameter deformations

要分布在空间 0 阶和 $\pm 8$ 阶,其中主要的电磁力波成分有 $(0, 6f)$ 、 $(0, 12f)$ 、 $(8, 2f)$ 、 $(-8, 4f)$ 和 $(-8, 10f)$ 。气隙 1 波数形变时,除了上述主要力波外,还增加了 $\pm 1$ 阶和 $\pm 7$ 阶的电磁力波成分,验证了气隙形变改变电磁力波的周期性的推论。气隙按实际形变时,调制出空间 $+1$ 、 $-5$ 、 $-7$ 阶径向电磁力。由此可得,气隙按不同波数形变后会因其改变了空间周期性而调制出空间 $(n \pm m)p \pm k_s$ 阶次的电磁力,固有力波幅值没有明显变化。

## 2.2 转子侧气隙形变对电磁力的影响

计算 16 000 r/min 工况下的电磁力变化。由

于转子形变在每一极上基本一致,因此转子形变不会改变电磁力波的周期性,不会调制出低阶的电磁力。因此对于转子侧形变导致的电磁力变化,主要关注其空间 0 阶电磁力的幅值变化及趋势。

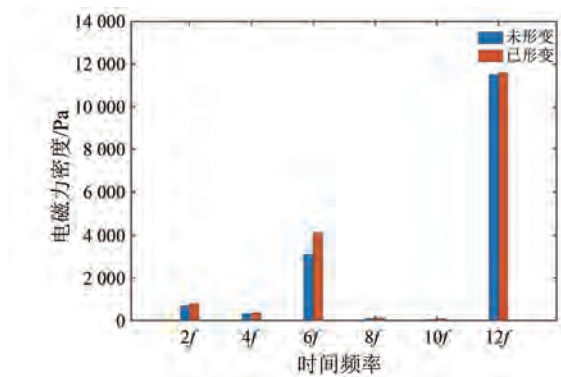


图 7 转子侧气隙形变前后电磁力波幅值对比  
Fig. 7 Comparison of electromagnetic force wave amplitudes before and after rotor-side air gap deformation

由图 7 可知,转子侧气隙形变导致气隙磁导增大,进而使电磁力中主要分量(0, 6f)和(0, 12f)的幅值显著提升。其中,(0, 6f)分量幅值由 3 157 Pa 增大至 4 130 Pa,(0, 12f)分量幅值由 11 494 Pa 增大至 12 924 Pa。

综合来看,附加力波成分对定子形变的敏感性远远大于转子形变;与之相反,(0, 6f)、(0, 12f)等固有力波成分则对转子形变的敏感性更高。在上述两种情况下,理论分析结果与有限元分析结果的一致性良好。

### 3 气隙形变下振噪响应分析

#### 3.1 定子侧气隙形变下振噪响应分析

为了准确得到 IPMSM 的振动特性,需要利用有限元仿真软件进行计算。基于定子结构场精确模型和电磁激励源的研究,采用等效节点力将电磁激励施加到定子齿表面,利用谐响应分析来仿真计算电机在不同运行工况下机壳表面的等效辐射功率级(Equivalent Radiated Power Level, ERPL)。重点对比分析不同气隙状态下振动特性的变化规律,并研究不同电磁激励对电机振动的作用效果。3 000 r/min 工况下 ERPL 图如图 8 所示,定子内圆 2 波数形变时模态参与因子热力图如图 9 所示。

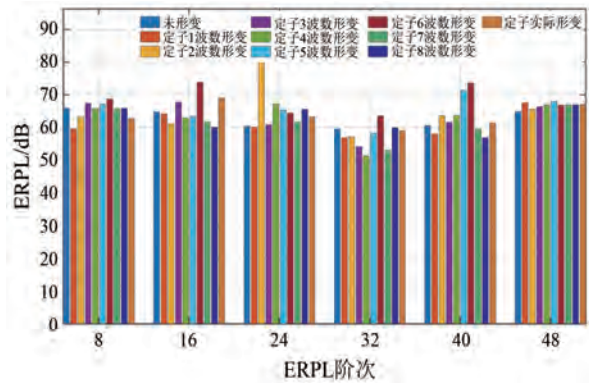


图 8 3 000 r/min 工况下 ERPL  
Fig. 8 ERPL at 3 000 r/min operating condition

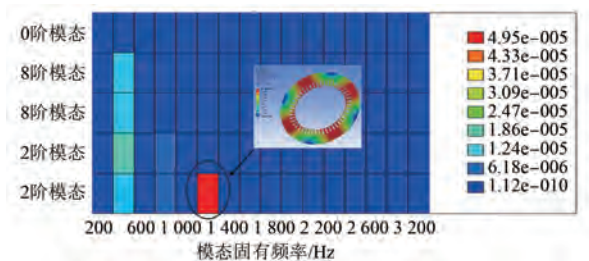


图 9 定子内圆 2 波数形变时模态参与因子热力图  
Fig. 9 Heatmap of modal participation factors under 2-wave-number deformation of stator inner diameter

由图 8、9 计算结果可知:3 000 r/min 工况下,定子内径轮廓未形变时对振动起主要贡献的模态阶次为 2 阶、8 阶和 0 阶。3 000 r/min 工况下,定子内圆 2 波数形变时由于增大了空间 2 阶电磁力,在 1 200 Hz 时 2 阶模态的贡献度明显增大,使得 ERPL 增加了 19 dB。定子实际形变包含多波数形变,其 ERPL 变化趋势与单独波数形变的变化趋势一致,但因其形变量不同使得变化幅度不同。

表 2 气隙形变下的 ERPL 变化

Tab. 2 ERPL variation under air gap deformation

耦合模态	转速/ (r · min <sup>-1</sup> )	形变波数	ERPL 阶次	ERPL 增幅/dB
2 阶 1 044 Hz	3 000	2 波数形变	24	19.908
3 阶 2 376 Hz	7 000	3 波数形变	24	25.638
4 阶 4 906 Hz	7 000	4 波数形变	40	10.478

不同波数形变下 ERPL 增幅较为明显的转速及耦合模态如表 2 所示。由表 2 可知,由于定子内圆形变在固有力波附近调制出附加力波成分,此类附加力波成分只能在低于呼吸模态频率时引

起显著振动噪声。此外由于气隙形变调制造成的固有力波谐波分量的减小,可能会降低某些阶次的振动噪声。

### 3.2 转子侧气隙形变下振响应分析

16 000 r/min 工况下时形变前后的 ERPL 对比如图 10 所示。由于转子形变后的各电磁力谐波幅值增大,16 000 r/min 工况下呼吸模态对应频率附近 ERPL 由 108.25 dB 增大至 112.21 dB,且由于 16 000 r/min 工况下转子表面形变程度更加剧烈,电磁力幅值增幅更大导致 ERPL 的增幅也更加明显。

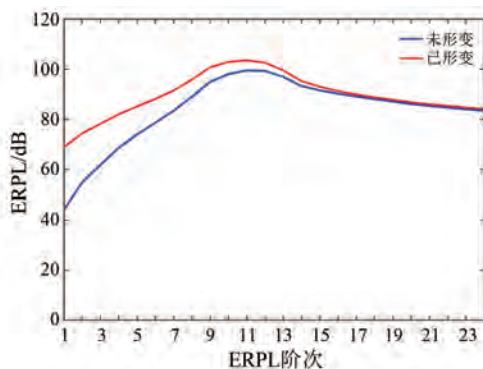


图 10 16 000 r/min 工况下转子形变前后 ERPL 对比  
Fig. 10 Comparison of ERPL before and after rotor deformation at 16 000 r/min operating condition

## 4 结语

本文详细分析了气隙形变及其对 IPMSM 径向电磁力密度及振动噪声的影响。主要结论如下。

(1) 定子内圆会因过盈配合呈多波数形变,转子机械应力会导致转子表面呈径向梯度式凸起。

(2) 定子内圆形变会按不同形变波数通过磁导调制引入  $(n \pm m)p \pm k_s$  ( $k_s = 1, 2, 3 \dots 8$ ) 阶次的力波,转子机械形变通过磁导调制产生  $(n \pm m \pm 2k)p$  阶次的力波,并增大固有力波的幅值,且通过电磁有限元仿真验证了理论推导结果。

(3) IPMSM 样机的 ERPL 仿真结果表明,定子与转子形变对振动噪声的影响机制存在显著差异:定子内圆形变调制出的低阶力波容易在低转速下与低阶模态耦合,产生不可忽视的振动噪声;转子机械形变在高转速情况下会增大固有力波的幅值,从而加剧振动。两者均需在电机设计中针

对性优化。

### 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

王巍、裴培进行了方案设计、内容总结与论文撰写,魏钰桀、宋志环、李明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 Wang Wei and Pei Yu. The manuscript was revised by Wei Yujie, Song Zhihuan and Li Ming. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] 颀浩浩, 吴杞康, 鲍久圣, 等. 新能源汽车驱动电机技术现状及混合励磁研究进展[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 36-51.  
Xie H H, Wu Q K, Bao J S, et al. Current status of new energy vehicle drive motor technology and research progress on hybrid excitation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 36-51.
- [ 2 ] Soresini F, Barri D, Ballo F, et al. Noise and vibration modeling of permanent magnet synchronous motors: A review [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 8728-8745.
- [ 3 ] Wu Z P, Song C L, Deng W Z. Radial electromagnetic force and vibroacoustic mechanism analysis of integer slot permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(6): 13568-13578.
- [ 4 ] Zhu S D, Zhao W X, Ji J H, et al. Generation mechanism and suppression measure of electromagnetic vibration in permanent magnet synchronous machine: A review [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 9513-9528.

- [ 5 ] Zhu Z Q, Wu L J, Mohd Jamil M L. Influence of pole and slot number combinations on cogging torque in permanent-magnet machines with static and rotating eccentricities [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(5): 3265-3277.
- [ 6 ] 周明杰, 骆皓, 高阳, 等. 分数槽集中绕组单转子感应电机偏心故障分析[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(3): 305-314.
- Zhou M J, Luo H, Gao Y, et al. Fault analysis of single-rotor induction motor with fractional slot concentrated winding [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(3): 305-314.
- [ 7 ] 赵哲, 林浩然, 熊端锋, 等. 气隙偏心对车用永磁同步电机噪声特性的影响分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(12): 32-41.
- Zhao Z H, Lin H R, Xiong D F, et al. Analysis of the influence of air gap eccentricity on the noise characteristics of permanent magnet synchronous motors for vehicles [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(12): 32-41.
- [ 8 ] Qian Z, Qi L X, Li G L, et al. Analysis of vibration and noise in electric drive system under resolver and motor rotor coupling eccentricity [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 10(1): 1827-1836.
- [ 9 ] Wang D H, Wang X J, Wang B D, et al. Dynamic eccentricity impact on electromagnetic vibration and acoustic noise of interior permanent magnet synchronous motors with different numbers of parallel branches [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(1): 3337-3348.
- [ 10 ] Deng W Z, Zuo S G, Chen W, et al. Comparison of eccentricity impact on electromagnetic forces in internal-and external-rotor permanent magnet synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 8(1): 1242-1254.
- [ 11 ] Bang T K, Shin K H, Lee J I, et al. Electro-mechanical characteristics analysis and experimental study of PMSM according to rotor eccentricity [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 58(2): 1-5.
- [ 12 ] Qiu H B, Yuan C W, Lian Z X, et al. Influence of rotor eccentricity on electromagnetic vibration in toroidal-wound high-speed permanent magnet generators [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(4): 6317-6326.
- [ 13 ] Wei Q, Zeng D P, Sun Z P, et al. An improved conformal mapping method for electromagnetic vibration analysis in PMSMs with rotor eccentricity [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(8): 5204305.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Zhang Y G, Yang Y B, Gu Z Y, et al. Multi-objective optimization for noise reduction of IPMSM based on non-uniform air gap [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 48819-48829.
- [ 16 ] Wan X B, Yang S, Li Y C, et al. Minimization of cogging torque for V-type IPMSM by the asymmetric auxiliary slots on the rotor [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 89428-89436.
- [ 17 ] 杨公德, 陈宗孝, 林明耀. 基于气隙磁通密度谐波相位调节的分数槽集中绕组 PMSM 不平衡磁拉力抑制[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(22): 7179-7192.
- Yang G D, Chen Z X, Lin M Y. Suppression of unbalanced magnetic pull in fractional-slot concentrated-winding PMSM based on phase regulation of air-gap flux density harmonics [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(22): 7179-7192.
- [ 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 ] 倪玉铭, 胡岩, 刘泽宇, 等. 永磁辅助同步磁阻电机的电磁分析及振动噪声优化[J]. *微特电机*, 2022, 50(2): 8-13.
- Ni Y M, Hu Y, Liu Z Y, et al. Electromagnetic analysis and vibration noise optimization of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [J].

- Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(2): 8-13.
- [20] Li Y, Chai F, Song Z X, et al. Analysis of vibrations in interior permanent magnet synchronous motors considering air-gap deformation [ J ]. Energies, 2017, 10(9): 1259.
- [21] Wang C Q, Wang D H, Nie J, et al. Electromagnetic vibration of PMSM with dual stator teeth of different width fed by voltage source inverter [ C ]// 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, China, 2023; 5297-5301.
- [22] Min S G, Sarlioglu B. Modeling and investigation on electromagnetic noise in PM motors with single- and double-layer concentrated winding for EV and HEV application [ J ]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 292-302.
- [23] 王妹. 内置式永磁同步电机的电磁振动源分析及减振方法研究[ D ]. 天津: 天津大学, 2021.  
Wang S. Analysis of electromagnetic vibration sources and research on vibration reduction methods for interior permanent magnet synchronous motors [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [24] 李义. 内置式永磁同步轮毂电机的气隙形变及振动特性研究[ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
Li Y. Research on air gap deformation and vibration characteristics of interior permanent magnet in-wheel motors [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- 
- 收稿日期:2025-12-17  
收到修改稿日期:2026-01-19  
作者简介:  
王 巍(1976—),女,博士,副教授,研究方向为特种电机噪声抑制技术,wangwei@qymail.bhu.edu.cn;  
\* 通信作者:王 巍(1976—),女,博士,副教授,研究方向为特种电机噪声抑制技术,wangwei@qymail.bhu.edu.cn。