

气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机的 电磁振动分析

赵希栋, 王玉彬*

[中国石油大学(华东) 石大山新能源学院, 山东 青岛 266580]

Electromagnetic Vibration Analysis of Fractional-Slot Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Air-Gap Eccentricity

ZHAO Xidong, WANG Yubin*

[College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract: [**Objective**] To effectively suppress the electromagnetic vibration and noise generated during the operation of permanent magnet synchronous motors and enhance their silent performance to meet the application requirements of electric vehicles, precision equipment, etc. A fractional-slot interior permanent magnet synchronous motor with air-gap eccentricity with a rated power of 2 kW is taken as the research object in this paper. And its electromagnetic vibration characteristics and optimization methods are systematically analyzed. [**Methods**] Firstly, through electromagnetic analytical calculations and two-dimensional transient field finite element analysis, the improvement effects of the eccentric rotor on radial electromagnetic force waves at key orders and resulting vibrations were evaluated from the motor design perspective. Secondly, a field-circuit coupled co-simulation model was established to comparatively analyze electromagnetic vibration characteristics under proportional integral control, maximum torque per ampere control and model predictive current control strategies. Finally, a vibration test platform for the prototype was constructed to obtain the spectral characteristics of the vibration acceleration of the prototype under different control strategies and verify the reliability of the simulation model. [**Results**] The research results showed that with the eccentric rotor structure, the amplitudes of the radial electromagnetic force waves at key orders such as the 2nd and 4th orders of the motor decreased, weakening the vibration response concentrated near the modal frequency of the 2nd order. Among them, the peak value of the vibration acceleration under the rated load decreased by 47.9%. [**Conclusion**] Rotor eccentricity design can effectively reduce

the risk of structural resonance. Model predictive current control can better suppress the additional vibration caused by current harmonics. This study provides an effective reference for the optimization of electromagnetic vibration and noise of motors.

Key words: electromagnetic vibration; permanent magnet synchronous motor; current harmonic; rotor eccentricity

摘要: [**目的**] 为有效抑制永磁同步电机运行中产生的电磁振动和噪声,提升其静音性能以满足电动汽车、精密设备等应用需要。本文以一台额定功率 2 kW 的气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机为研究对象,并对其电磁振动特性及优化方法进行了系统分析。[**方法**] 首先,通过电磁解析计算和二维瞬态场有限元分析,从电机本体角度评估偏心转子结构对关键阶次的径向电磁力波及其引发的电磁振动的改善效果;其次,建立场路耦合联合仿真分析模型,对比研究比例积分控制、最大转矩电流比控制和模型预测电流控制策略下的电磁振动特性;最后,搭建样机振动测试平台,得到样机在不同控制策略下的振动加速度频谱特性,验证仿真模型的可靠性。[**结果**] 研究表明,偏心转子结构下,电机二阶、四阶等关键阶次的径向电磁力波幅值降低,使得集中在二阶模态频率附近的振动响应得到削弱,其中额定负载下的振动加速度峰值降低了 47.9%。[**结论**] 转子偏心设计可以有效降低结构共振风险,模型预测电流控制能够更好地抑制电流谐波带来的额外振动。本研究为电机的电磁振动和噪声优化提供了有效参考。

关键词: 电磁振动; 永磁同步电机; 电流谐波; 转子偏心

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet

基金项目: 国家自然科学基金 (52477070)

National Natural Science Foundation of China (52477070)

Synchronous Motor, PMSM) 因其效率高、可靠性高以及转矩输出能力强等优点, 被广泛应用于新能源汽车、工业自动化与航空航天等多个领域^[1-2]。随着应用领域的拓展和性能要求的提高, 电磁振动已成为衡量电机性能的重要指标。

近年来, 国内外学者对 PMSM 的振动噪声问题进行了大量研究, 并取得了一定的成果。文献[3]指出 PMSM 定子的径向电磁力是引起电磁振动的主要原因。文献[4]指出由共振引发的电磁振动与电磁力波的振幅成正比, 与对应空间阶次的四次方成反比。因此, 应着重关注幅值较高且空间阶次低的电磁力谐波分量。文献[5]采用多物理场耦合模型对一台 48 槽 8 极 PMSM 在全负荷工况下的电磁噪声进行了分析。对于整数槽电机, 一般认为空间阶次为 0 阶的电磁力谐波对振动影响最大^[6-7], 但整数槽电机的最低非零阶模态频率往往较高, 容易接近开关频率, 进而导致共振发生。因此, 需要格外注意固有频率与开关频率的隔离^[8]。对于分数槽电机, 较低的齿槽转矩与较少的磁密谐波含量能够在一定程度上降低噪声, 然而, 由于极槽配合等原因, 采用分数槽结构会产生高幅值的低阶电磁力谐波, 进而引发低阶模态处的共振^[9]。因此, 对于具有分数槽结构的电机, 对其低阶电磁力谐波进行有效控制很有必要。

目前, 一般从本体结构或电机控制方法两方面对电机的振动噪声进行抑制^[10-11]。在本体结构方面, 文献[12]通过对一台分数槽 PMSM 的转子磁极形状进行优化设计, 有效降低了电机在重载工况下的振动。文献[13]提出了一种带有表面微槽的转子设计, 在该结构下形成的非均匀气隙能够显著降低空载反电动势谐波及振动噪声。文献[14]基于一种改进的子域解析法对两种特殊磁钢结构的表贴式永磁电机气隙磁场进行解析, 结果表明偏心式磁极结构能够有效提高反电动势的正弦度, 优化径向电磁力谐波分布, 进而改善电机的振动及噪声。但从成本控制、加工难度及应用灵活性等方面考虑, 偏心式磁极结构仍存在改进空间。为减小转矩脉动, 提高电机功率密度, 同时解决传统偏心式磁极经济适用性不高等问题, 文献[15]设计了一台在转子上应用偏心设计的 PMSM, 通过优化偏心距、永磁体夹角等参数, 有效提高了电机气隙磁密正弦度, 但并未对其

在振动方面的表现进行研究。在控制方法方面, 文献[16]指出无传感器控制中使用的高频注入信号会与基频相互作用产生额外的电磁振动, 严重影响电机的振动性能。文献[17]通过对比分析空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 与多种间断 PWM 对边带振动的影响情况, 发现由 PWM 策略带来的边带电流谐波是产生边带振动的主要原因。文献[18]利用自抗扰控制结合随机开关频率 PWM, 对整数槽电机的边带振动进行了有效控制。文献[19]为解决由于气隙磁密正弦度不佳等因素产生的 5 次、7 次谐波电流, 采用谐波电流注入法来抵消已有的低次谐波转矩脉动并降低了电机噪声, 但该方法也会导致电机电流波形畸变与运行效率降低等问题。文献[20]通过在最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制中加入谐振调节器, 降低了整数槽电机在 4 倍、6 倍频处的振动加速度。然而对于不同控制策略下分数槽 PMSM 的电磁振动问题, 尚未有文献进行充分的分析。

针对气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机 (Fractional-Slot Interior PMSM with Air-Gap Eccentricity, AGE-FSIPMSM) 的电磁振动问题, 本文首先分析了偏心转子结构对主要径向电磁力谐波的抑制效果, 并进一步探讨了在比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制、MTPA 控制和模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 策略下, 电机径向电磁力谐波的变化情况。其次, 为明确电磁力谐波频率与固有模态频率是否存在共振, 采用有限元计算结合约束模态试验验证的方法, 获得样机准确的模态参数。最后, 利用多物理场联合仿真分析方法, 得出电机在频域上的振动加速度分布情况, 并通过振动试验进行验证。多物理场耦合振动分析流程如图 1 所示。

1 偏心电机径向电磁力波分析

偏心式转子结构如图 2(a) 所示, 与传统嵌入式 PMSM 转子保持恒定气隙长度 δ_0 不同, 该结构在永磁体单极距范围内, 将转子外圆圆心由原点 O 偏移至 O' , 这种几何偏心结构形成了非均匀气隙, OO' 即为衡量气隙非均匀程度的偏心距。图 2(b) 为偏心电机的拓扑结构, 其主要参数如表 1 所示。

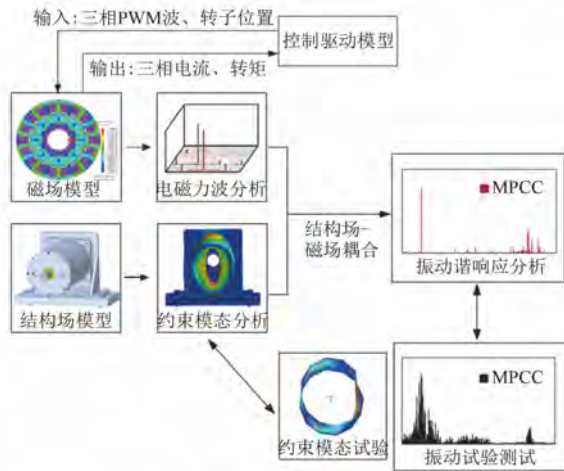


图1 多物理场耦合振动分析流程

Fig.1 Multi-physics field coupled vibration analysis process

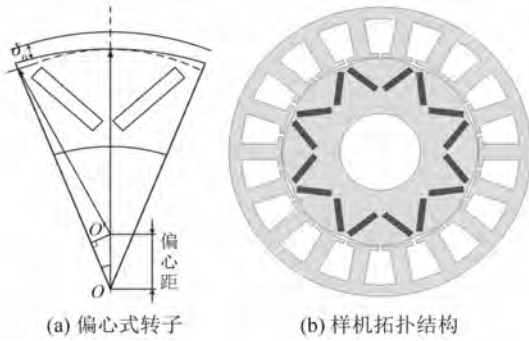


图2 偏心式转子结构

Fig.2 Eccentric rotor structure

表1 电机主要参数

Tab.1 Main parameters of motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	2 000	定子外径/mm	150
额定电流/A	10	定子内径/mm	98
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000	转子外径/mm	97
额定频率/Hz	66.67	转子内径/mm	40
轴向长度/mm	150	偏心距/mm	12
极数	8	槽数	18

根据麦克斯韦应力张量法,同时考虑到电机切向电磁力对振动的影响远小于径向电磁力^[21]。因此在忽略切向电磁力后,偏心电机的电磁力波 P_r 表达式可简化为

$$P_r(\theta, t) = \frac{[B_r(\theta, t)]^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; θ 为电机气隙圆周上的空间角度; B_r 为径向气隙磁密。

当定子绕组中通入正弦电流时,电机的气隙磁密由永磁体产生的磁动势和电枢磁场产生的磁动势共同作用产生。在经典磁势磁导法的基础上考虑偏心结构的影响,此时偏心电机的径向气隙磁密可以表示为

$$B_r(\theta, t) = \Lambda_s(\theta) \Lambda_r(\theta) [f_{mr}(\theta, t) + f_{ar}(\theta, t)] \quad (2)$$

式中: $\Lambda_s(\theta)$ 为考虑定子齿槽效应的相对气隙偏心磁导函数; $\Lambda_r(\theta)$ 为表征气隙变化影响的气隙磁导函数; $f_{mr}(\theta, t)$ 、 $f_{ar}(\theta, t)$ 分别为永磁体磁场、电枢磁场产生的磁动势。 $\Lambda_s(\theta)$ 、 $\Lambda_r(\theta)$ 、 $f_{mr}(\theta, t)$ 和 $f_{ar}(\theta, t)$ 的表达式分别为

$$\Lambda_s(\theta) = \Lambda_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k \cos(kZ\theta) \quad (3)$$

$$\Lambda_r(\theta) = \Lambda_{r0} + \sum_{j=1}^{\infty} \Lambda_j \cos(2jp\theta) \quad (4)$$

$$f_{mr}(\theta, t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} F_{mn} \cos(np\theta - n\omega t) \quad (5)$$

$$f_{ar}(\theta, t) = \sum_{v=1,5,7}^{+\infty} F_{av} \cos(vp\theta \pm \omega t) \quad (6)$$

式中: Λ_{s0} 、 Λ_{r0} 分别为相对气隙磁导、气隙偏心的恒定分量; Λ_k 为 k 次相对气隙磁导谐波分量; Z 为电机定子齿数; Λ_j 为 j 次气隙偏心磁导谐波分量; p 为极对数; F_{mn} 为 n 次永磁磁动势幅值; ω 为角速度; F_{av} 为 v 次电枢磁动势幅值。

将式(3)~式(6)代入式(2)后再代入式(1), 可得 AGE-FSIPMSM 的径向电磁力波解析式:

$$P_r = \frac{[B_r(\theta, t)]^2}{2\mu_0} = \frac{\{\Lambda_s(\theta) \cdot \Lambda_r(\theta) \cdot [f_{mr}(\theta, t) + f_{ar}(\theta, t)]\}^2}{2\mu_0} =$$

$$\frac{1}{2\mu_0} \left[\Lambda_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k \cos(kZ\theta) \right]^2 \cdot \left[\Lambda_{r0} + \sum_{j=1}^{\infty} \Lambda_j \cos(2jp\theta) \right]^2 \cdot$$

$$\left[\sum_{n=1,3,5}^{\infty} F_{mn} \cos(np\theta - n\omega t) + \sum_{v=1,5,7}^{+\infty} F_{av} \cos(vp\theta \pm \omega t) \right]^2 =$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2\mu_0} \left\{ \Lambda_{s0}^2 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_k \Lambda_{s0} \cos(kZ\theta) + \frac{1}{2} \sum_{k_1=1}^{\infty} \Lambda_{k_1} \sum_{k_2=1}^{\infty} \Lambda_{k_2} \{ \cos[(k_1 + k_2)Z\theta] + \cos[(k_1 - k_2)Z\theta] \} \right\} \cdot \\
& \left\{ \Lambda_{r0}^2 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} \Lambda_j \Lambda_{r0} \cos(2jp\theta) + \frac{1}{2} \sum_{j_1=1}^{\infty} \Lambda_{j_1} \sum_{j_2=1}^{\infty} \Lambda_{j_2} \{ \cos[2(j_1 + j_2)p\theta] + \cos[2(j_1 - j_2)p\theta] \} \right\} \cdot \\
& \left\{ \frac{1}{2} \sum_{n_1=1,3,5}^{\infty} F_{mn_1} \sum_{n_2=1,3,5}^{\infty} F_{mn_2} \{ \cos[(n_1 + n_2)p\theta - (n_1 + n_2)\omega t] + \cos[(n_1 - n_2)p\theta - (n_1 - n_2)\omega t] \} + \right. \\
& \sum_{n=1,3,5}^{\infty} F_{mn} \sum_{v=1,5,7,\dots}^{\infty} F_{av} \{ \cos[(n + v)p\theta - (n \pm 1)\omega t] + \cos[(n - v)p\theta - (n \pm 1)\omega t] \} + \\
& \left. \frac{1}{2} \sum_{v_1=1,5,7,\dots}^{\infty} F_{av_1} \sum_{v_2=1,5,7,\dots}^{\infty} F_{av_2} \{ \cos[(v_1 + v_2)p\theta - (1 \pm 1)\omega t] + \cos[(v_1 - v_2)p\theta - (1 \pm 1)\omega t] \} \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

对式(7)进行分类整理,得到 AGE-FSIPMSM 的径向电磁力波特性如表 2 所示。

表 2 AGE-FSIPMSM 的径向电磁力波特性

Tab. 2 Characteristics of radial electromagnetic force wave of AGE-FSIPMSM

来源	阶次	频率
永磁体磁场	$(n_1 \pm n_2)p$	
永磁体磁场与气隙偏心	$(n_1 \pm n_2 \pm 2j)p, (n_1 \pm n_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p$	
永磁体磁场与开槽	$(n_1 \pm n_2)p \pm kZ, (n_1 \pm n_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$	$(n_1 \pm n_2)f$
永磁体磁场、气隙偏心与开槽	$(n_1 \pm n_2 \pm 2j)p \pm kZ, (n_1 \pm n_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm kZ, (n_1 \pm n_2 \pm 2j)p \pm (k_1 \pm k_2)Z, (n_1 \pm n_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$	
电枢磁场	$(v_1 \pm v_2)p$	
电枢磁场与气隙偏心	$(v_1 \pm v_2 \pm 2j)p, (v_1 \pm v_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p$	
电枢磁场与开槽	$(v_1 \pm v_2)p \pm kZ, (v_1 \pm v_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$	$0, 2f$
电枢磁场、气隙偏心与开槽	$(v_1 \pm v_2 \pm 2j)p \pm kZ, (v_1 \pm v_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm kZ, (v_1 \pm v_2 \pm 2j)p \pm (k_1 \pm k_2)Z, (v_1 \pm v_2 \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$	
永磁体磁场与电枢磁场	$(n \pm v)p$	
永磁体磁场、电枢磁场与气隙偏心	$(n \pm v \pm 2j)p, (n \pm v \pm 2j_1 \pm 2j_2)p$	
永磁体磁场、电枢磁场与开槽	$(n \pm v)p \pm (k_1 \pm k_2)Z, (n \pm v)p \pm kZ$	$(n \pm 1)f$
永磁体磁场、电枢磁场、气隙偏心与开槽	$(n \pm v \pm 2j)p \pm kZ, (n \pm v \pm 2j)p \pm (k_1 \pm k_2)Z, (n \pm v \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm kZ, (n \pm v \pm 2j_1 \pm 2j_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$	

由表 2 可知,偏心转子结构通过周期性磁导调制作用,使得径向电磁力波在空间分布上呈现出了新的阶次特征,而对应的谐波频率在时域中保持不变。这种新的特征通过分散电磁力波在空间上的能量分布,避免了单一高幅值谐波与结构固有模态的频率匹配,从而达到抑制电磁振动的目的。

为了更直观地观察偏心转子结构对径向电磁力波的影响,分别建立应用偏心转子与常规转子的二维磁场有限元模型进行仿真分析。两种转子结构下的径向电磁力波频谱分析结果如图 3 所示,图中以(倍基频,空间阶次)的形式表示各谐

波分量。

由图 3 可知,应用偏心转子后的电机各阶径向电磁力谐波得到明显削弱。其中谐波幅值最高的 2 倍频 8 次谐波其幅值降低了 16.4%,其他倍频处的主要电磁力谐波如 4 倍频 16 次、6 倍频 24 次其幅值分别降低了 69.55% 和 59.89%。样机为 18 槽 8 极的分数槽结构,在电磁振动中发挥主要影响作用的最低非零阶径向电磁力空间谐波阶次为二阶。因此对两种转子结构下的二阶电磁力波进行频谱分析,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,相较于常规转子结构,采用偏心转子结构的电机其二阶电磁力波中谐波含量整体

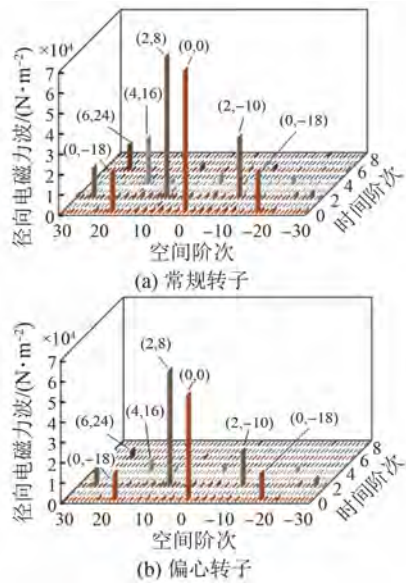


图3 不同转子下的径向电磁力波频谱对比
Fig.3 Comparison of radial electromagnetic force wave spectrum with different rotors

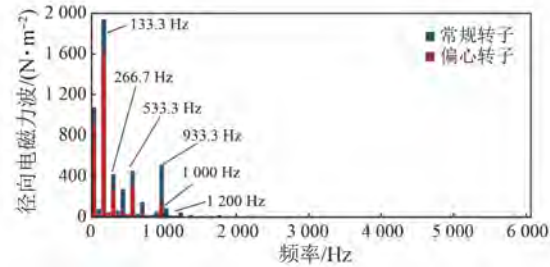


图4 二阶径向电磁力波频谱
Fig.4 Second-order radial electromagnetic force wave spectrum

降低,其中 933.3 Hz 处的下降幅度最为明显,谐波含量降低了 69.09%。当电磁力谐波频率与模态阶次对应的频率接近时,即便是低幅值谐波也可能由于共振效应而引发明显的振动问题^[22-23]。

2 电机模态与振动特性分析

模态分析能够获得电机的固有频率以及模态振型,并据此评估固有频率附近是否存在可能引发共振的电磁力谐波分量,进而为电机的减振设计提供依据^[24]。图 5 为样机三维结构有限元模型,该模型充分考虑了定子铁心与绕组的材料参数在不同方向上的各向异性,对模型各部件材料参数的设置如表 3 所示。同时,由于转子部件对模态分析结果产生的干扰极小,因此只需要进行一次模态分析即可。

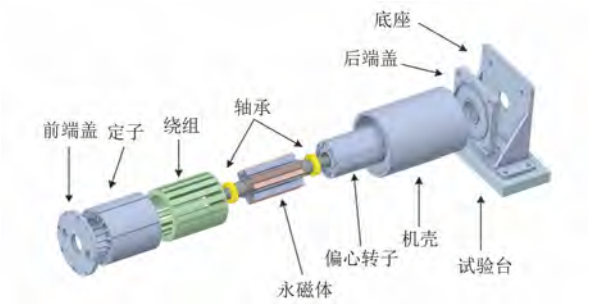


图5 样机三维结构有限元模型
Fig.5 Finite element model of three-dimensional structure of the prototype

表3 材料参数

参数名称	剪切模量/GPa	杨氏模量/GPa	密度/Pa	泊松比
绕组	$G_{xz} = G_{yz} = 0.4$ 、 $G_{xy} = 0.2$	$E_x = E_y = 0.95$ 、 $E_z = 0.14$	6 800	0.3
定、转子铁心	$G_{xz} = G_{yz} = 10$ 、 $G_{xy} = 50$	$E_x = E_y = 175$ 、 $E_z = 145$	7 520	0.28
机壳	$G = 26.69$	$E = 71$	2 770	0.33
永磁体	$G = 64.5$	$E = 160$	7 400	0.24

在实际运行中电机始终处于约束状态,底座由螺栓固定在试验台上,这种状态会导致电机的模态参数发生变化^[25]。因此,为获取更准确的固有模态频率,在有限元模型中对底座上的螺栓孔施加无位移固定约束,进行约束模态分析。同时,利用约束模态试验验证有限元模型的准确性。模态试验平台如图 6 所示,将电机安装在试验台上,采用锤击法进行测试。



图6 模态试验平台
Fig.6 Modal test platform

模态试验结果如图 7 所示。整机模态试验与有限元仿真结果对比如表 4 所示。

由表 4 可知,模态试验结果与仿真结果之间的误差均在±3%以内,表明所建立的有限元模型具有较高的可靠性,能够准确预测电机的实际模态参数。

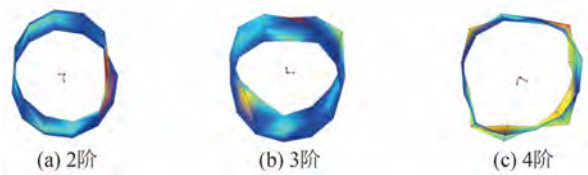


图 7 模态试验结果

Fig. 7 Results of modal test

表 4 模态试验与有限元仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of modal test results and finite element results

阶数	模态试验/Hz	有限元仿真/Hz	误差/%
2 阶	1 501.5	1 460.7	2.71
3 阶	2 908.5	2 972.8	-2.39
4 阶	4 898.9	4 884.1	0.3

建立耦合电磁场与结构场的有限元模型。将磁场仿真中获取的电磁力数据以节点力的形式加载到结构场的定子齿表面网格中,合理设置分析参数后进行振动谱响应分析。

理想正弦电流下电机应用不同转子的振动加速度频谱对比如图 8 所示。由图 8 可知,振动峰值主要集中在样机二阶模态频率处,由该频率附近的二阶电磁力引起,且采用偏心结构后该频率下的电磁振动明显降低,下降幅度约为 47.9%。仿真结果证明了偏心结构在控制电磁振动方面的优越性。

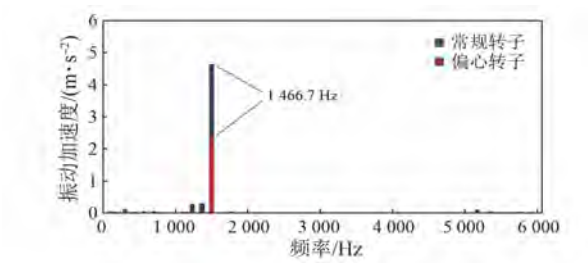


图 8 两种转子下电机振动加速度频谱对比

Fig. 8 Comparison of motor vibration acceleration spectrum with two rotors

3 考虑控制策略影响的样机振动分析

本文采用经典的 PMSM 矢量控制策略进行分析^[26-27],包括 MPCC、PI 控制以及 MTPA 控制等。进一步考虑当采用不同控制策略时,电流谐波变化对电机径向电磁力及电磁振动特性的影响,并将其与正弦电流供电下的电机运行状态进行对比。

为了有效模拟电机在实际逆变器供电下的运行状态,采用电磁场与控制电路联合仿真的计算方法^[28],由 Simulink 中搭建的控制电路提供磁场有限元分析中的激励。图 9 为联合控制电路与磁场有限元分析的仿真控制模型,其中磁场与控制电路仿真中的计算步长必须设置一致。图 9 中, ω_m 为转子机械角速度; θ_e 为转子电角度; i_{abc} 为三相电流; θ_d 为每两个计算步长间的转子机械角度差,以位移的形式作为转速反馈量输入磁场有限元计算中。

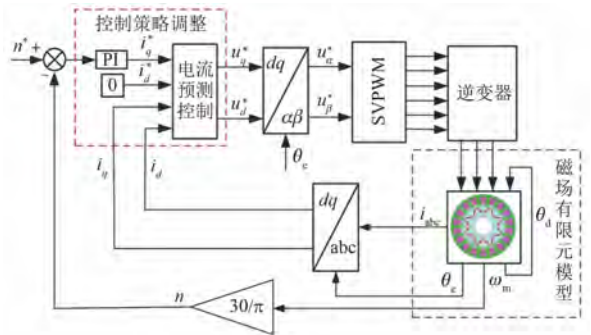


图 9 联合仿真控制模型

Fig. 9 Co-simulation control model

利用 Simulink 对控制策略进行调整,控制电路的开关频率均设定为 10 kHz,转速为 1 000 r/min,负载为 12 N·m。电机在不同控制策略下的 A 相电流波形如图 10 所示。

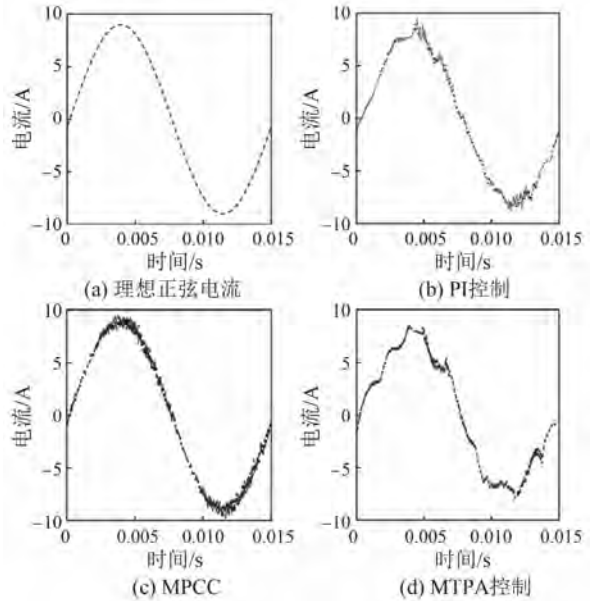


图 10 不同控制策略下的 A 相电流波形

Fig. 10 Current waveforms of phase A under different control strategies

由图 10 可知,三种控制策略下 A 相电流波形均出现不同程度的畸变,谐波含量较为丰富。由于电流谐波是影响电机振动及噪声的重要因素^[29],对图 10 中三种非正弦波形进行频谱分析,以明确电流谐波的分布特性。电流谐波频谱对比结果如图 11 所示,其中 f_1 为电机的运行频率。

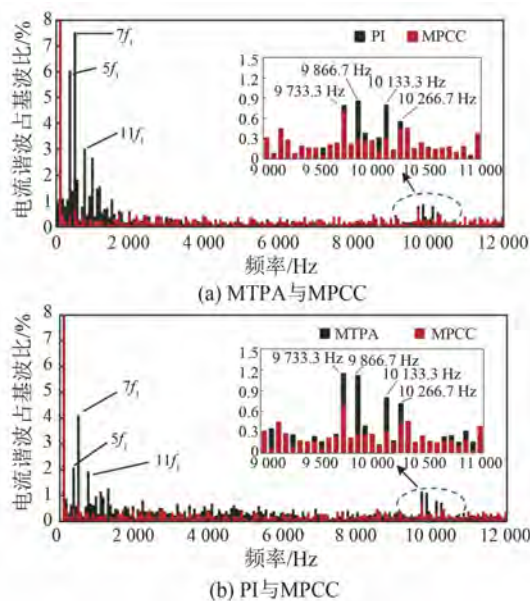


图 11 不同控制策略下的电流谐波频谱对比

Fig. 11 Comparison of current harmonic spectrum under different control strategies

由图 11 可知,由于 MPCC 策略本身具有高精度的电流控制及快速的电流动态响应等特点,电机由 MPCC 策略驱动时,不论是以 5 次、7 次和 11 次谐波为代表的低阶电流谐波分量,还是位于开关频率附近的高频谐波分量,其谐波含量均低于 MTPA 控制和 PI 控制策略。

同样考虑最低非零阶电磁力在振动噪声中的主导地位,图 12 为通过联合仿真得到的不同控制策略下的电机二阶径向电磁力波频谱对比结果。

由图 12 可知,考虑逆变器供电影响后,电流谐波导致径向电磁力谐波幅值发生不同程度的变化。其中,266.67 Hz 与 933.3 Hz 频率下的谐波分量明显下降,而 533.3 Hz、1 133.33 Hz 处谐波分量则有所升高。同时 1 133.33 Hz 也是二阶模态频率附近幅值最高的电磁力频率。在开关频率附近,谐波峰值主要集中在 9 533.3~10 333.3 Hz 范围内,此时 MTPA 控制策略下的电磁力谐波幅值明显高于其他策略。

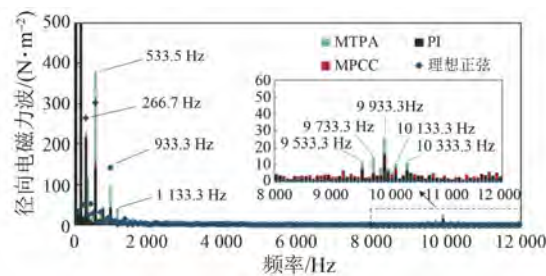


图 12 不同控制策略下的二阶径向电磁力波频谱对比

Fig. 12 Comparison of second-order radial electromagnetic force wave spectrum under different control strategies

综合上述分析可知,当采用 MPCC 策略时,电机在主要频率范围内的最低非零阶电磁力谐波含量抑制效果更为出色。

同样地,将不同控制策略下的径向电磁力波数据以节点力的形式加载到结构场模型中,得到振动加速度频谱对比结果如图 13 所示。

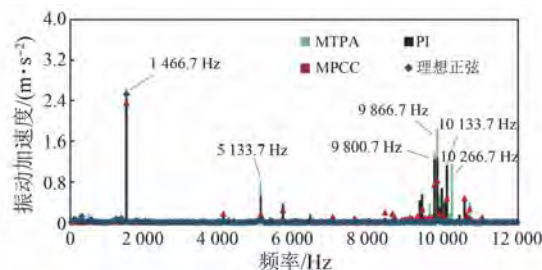


图 13 不同控制策略下振动加速度频谱对比

Fig. 13 Comparison of vibration acceleration spectrum under different control strategies

由图 13 可知,四种工况下的二阶模态频率附近的振动加速度,峰值最低的 MPCC 工况相比于最高的 MTPA 降低了 11.2%。加入控制策略后的三种工况均在四阶模态频率附近出现了新的振动峰值,这是因为逆变器供电带来的电流谐波引起了四阶模态附近的共振。而在开关频率附近,采用 MPCC 策略的振动加速度整体上明显低于 PI 控制与 MTPA 控制策略,符合前文不同控制策略下的二阶电磁力波频谱分析结果。

4 振动试验

为验证有限元分析的正确性,搭建了基于 Matlab 的测试平台进行振动试验。振动信号采集点均匀布置在电机机壳表面,通过多通道信号采集仪获取各采集点的振动加速度数据,并对不同位置的数据进行综合分析,从而准确反映样机的

整体振动特性,振动试验平台如图 14 所示。

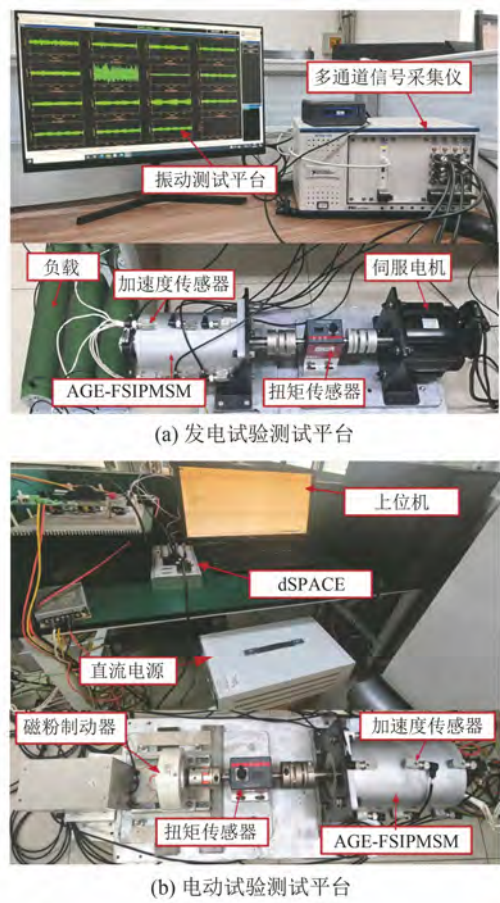


图 14 振动试验平台

Fig. 14 Vibration test platform

振动测试中,以伺服电机驱动电机实现发电状态运行,测得绕组中通入正弦电流时的电机振动加速度;以逆变器驱动电机实现电动状态运行,并在上位机中调整所用的控制策略,分析在不同控制策略下电机的振动特性。

正弦电流供电和不同控制策略下逆变器供电的实测振动频谱对比结果如图 15 所示。

由图 15 可知,正弦电流供电时的振动峰值主要集中在二阶模态频率附近,而逆变器供电时在二阶、四阶模态频率与开关频率附近均出现若干振动峰值。

相较于 PI 控制和 MTPA 控制策略,MPCC 策略下振动加速度明显降低。二阶模态频率处平均振动峰值分别降低 25% 和 6.1%,四阶模态频率处平均振动峰值分别降低 46.7% 和 37.5%,开关频率处平均振动峰值分别降低 34.3% 和 44.1%。

图 16 为 MPCC 策略下样机试验与仿真的振

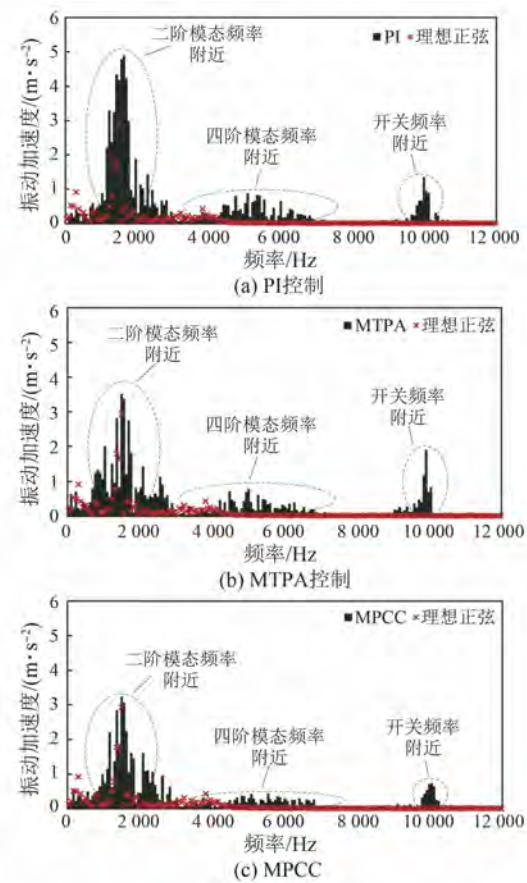


图 15 正弦电流供电和逆变器供电下的
实测振动频谱对比

Fig. 15 Comparison of measured vibration spectrum under sinusoidal current supply and inverter supply

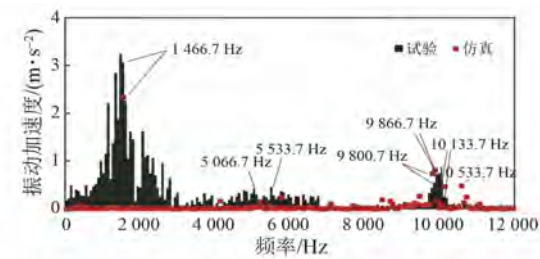


图 16 MPCC 下试验与仿真振动频谱对比

Fig. 16 Comparison of experimental and simulated vibration spectrum under MPCC

动频谱对比结果。

由图 16 可知,在样机试验中主要频率附近的振动加速度波动范围较大,但其变化趋势与仿真基本吻合,验证了本文所提有限元方法的正确性。

5 结语

本文主要针对 AGE-FSIPMSM 的电磁振动问

题进行研究。采用多物理场联合仿真的计算方法,系统分析了偏心转子结构及不同控制策略对电机最低非零阶径向电磁力谐波的影响,最终通过样机试验验证了仿真得到的振动加速度数据的可靠性。主要结论如下。

(1) 转子偏心结构下,电机二阶、四阶等关键阶次的径向电磁力波幅值降低,使得集中在二阶模态频率附近的振动响应得到削弱,其中额定负载下的振动加速度峰值降低了47.9%。

(2) 逆变器供电下的绕组电流中存在部分谐波分量,其中低频电流谐波主要影响由低阶模态引起的电磁振动的大小,而开关频率附近的电流谐波则会使电机新增边带振动。相较于PI控制和MTPA控制策略,MPCC策略在抑制由电流谐波引起的额外振动方面表现更为优越。

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

赵希栋进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,赵希栋、王玉彬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 Zhao Xidong. The manuscript was reviewed and revised by Zhao Xidong, WangYubin. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] BALLO F, GOBBI M, MASTINU G, et al. Noise and vibration of permanent magnet synchronous electric motors: A simplified analytical model [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2486-2496.
- [2] 刘栋良, 詹成根, 屈峰, 等. 无人机17 kW电机振动噪声分析与巡航转速下尖端噪声优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1749-1763.

- LIU D L, ZHAN C G, QU F, et al. Vibration noise analysis and tip noise optimization of unmanned aerial vehicle 17 kW motor at cruise speed [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1749-1763.
- [3] 陈少先, 丁树业, 申淑锋, 等. 船舶用表贴式永磁同步电机的电磁振动分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1275-1286+1298.
- CHEN S X, DING S Y, SHEN S F, et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration of surface mounted permanent magnet synchronous motor for ships [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1275-1286+1298.
- [4] DENG W Z, ZUO S G. Electromagnetic vibration and noise of the permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles: An overview [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 59-70.
- [5] 苏辉, 张立军, 孟德建, 等. 车用永磁同步电机电磁振动噪声仿真和试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(12): 136-142+214.
- SU H, ZHANG L J, MENG D J, et al. Simulation and experimental analysis of electromagnetic vibration and noise for vehicle permanent magnetic synchronous electrical motors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12): 36-142+214.
- [6] 吕长朋, 李明勇, 陈辉. 永磁电机零阶径向力引起的齿槽频次振动[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6778-6787.
- LYU C P, LI M Y, CHEN H. Cogging frequency vibration of permanent magnet motor caused by zeroth-order radial magnetic forces [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6778-6787.
- [7] 刘皖秋, 代颖, 叶飞, 等. 基于转子辅助槽的车用永磁同步电机振动噪声优化[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 76-81+109.
- LIU W Q, DAI Y, YE F, et al. Optimization of vibration and noise of vehicle permanent magnet synchronous motor based on auxiliary slot of rotor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(6): 76-81+109.
- [8] 李晓华, 赵容健, 田晓彤, 等. 逆变器供电对电动汽车内置式永磁同步电机振动噪声特性影响研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4455-4464.
- LI X H, ZHAO R J, TIAN X T, et al. Study on vibration and noise characteristics of interior

- permanent magnet synchronous machine for electric vehicles by inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (21): 4455-4464.
- [9] 杨超锐. 分数槽集中绕组永磁同步电机电磁振动分析与抑制[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
YANG C R. Analysis and suppression of electromagnetic vibration for fractional-slot concentrated winding permanent magnet synchronous motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [10] 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.
- [11] SHEN Q P, CHENG J, GUO D, et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration noise of fractional-slot concentrated-windings interior PMSMs [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 5270-5281.
- [12] ZHAO W X, ZHU S D, JI J H, et al. Analysis and reduction of electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings PM machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (4): 3357-3367.
- [13] 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.
- [14] 赵士豪, 陈进华, 张驰, 等. 不均匀气隙表贴式永磁同步电机磁场解析计算[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3502-3513.
ZHAO S H, CHEN J H, ZHANG C, et al. Analytical calculation of magnetic field of permanent magnet synchronous motor with uneven air gap structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3502-3513.
- [15] WANG J, WANG Y B. Electromagnetic torque analysis and structure optimization of interior permanent magnet synchronous machine with air-gap eccentricity [J]. Energies, 2023, 16 (4): 1665-1681.
- [16] XU S, WANG D H, WANG B D, et al. Sideband electromagnetic vibrations in interior PMSM with high frequency pulsating injection sensorless control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39 (3): 1919-1929.
- [17] QIU Z Z, HUANG X, MA K, et al. Sideband vibro-acoustic responses and improvements with different pulse width modulation strategies in permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 7098-7108.
- [18] LI Q F, LIU S C, FANG W D, et al. Sideband vibration suppression of interior permanent magnet synchronous motors for electric vehicles under multiple operating conditions [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 322-335.
- [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] 马志林, 高梦迪, 刘从虎, 等. 内置式永磁同步电机低噪声控制策略研究[J]. 控制工程, 2022, 29 (1): 83-90.
MA Z L, GAO M D, LIU C H, et al. Research on low noise control strategy of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Control Engineering of China, 2022, 29(1): 83-90.
- [21] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
CHEN Y J, ZHU Z Q, YING S C. Analysis and Control of Motor Noise [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987.
- [22] 李阳, 王天宝, 王海燕, 等. 车用永磁同步电机的电磁噪声分析与抑制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 86-94.
LI Y, WANG T B, WANG H Y, et al. Analysis and suppression of electromagnetic noise of vehicle permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 86-94.
- [23] 白学森. 电动汽车驱动用分数槽永磁同步电机电磁噪声优化[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 60-65.
BAI X S. Electromagnetic noise optimization of

- fractional-slot permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(6): 60-65.
- [24] 李吉程, 王爱元, 王成敏, 等. 内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构对电机性能的影响分析[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 103-112.
- LI J C, WANG A Y, WANG C M, et al. Analysis of the influence of different rotor topology structures on the performance of interior permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 103-112.
- [25] SHEN Q P, CHENG J, GUO D et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration noise of fractional-slot concentrated-windings interior PMSMs [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024, 10(3): 5270-5281.
- [26] 谷鑫, 鲁金月, 王志强, 等. 基于无差拍电流预测控制的永磁同步电机谐波电流抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(24): 6345-6356.
- GU X, LU J Y, WANG Z Q, et al. Harmonic current suppression strategy for permanent magnet synchronous motor based on deadbeat current prediction control [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(24): 6345-6356.
- [27] HAN Z X, LIU J L. Comparative analysis of vibration and noise in IPMSM considering the effect of MTPA control algorithms for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(6): 6850-6862.
- [28] 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.
- [29] WU S N, TONG W M, LI W J, et al. Electromagnetic vibration analysis of high-speed permanent magnet synchronous machines with amorphous metal stator cores considering current harmonics [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(12): 10156-10167.

收稿日期:2025-01-23

收到修改稿日期:2025-03-18

作者简介:

赵希栋(1999-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机的电磁噪声分析,17554260831@163.com;

*通信作者:王玉彬(1974-),男,博士,教授,研究方向为特种电机设计及其控制,wangyubin@upc.edu.cn。