

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

安忠良,于浩泽.
轮毂电机振动噪声抑制措施.
电机与控制应用,2022,49(3):103.



SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

轮毂电机振动噪声抑制措施

安忠良¹, 于浩泽²

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110020;

2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110020)

摘要: 外转子永磁同步电机作为轮毂电机较多地应用在电动汽车上, 但以轮毂电机为目标的振动噪声研究却较少。以一台额定功率为 10 kW、额定转速为 500 r/min 的轮毂电机为例, 通过构建轮毂电机的 2D 有限元模型, 对电机的径向电磁力密度和振动噪声特性进行有限元仿真计算。从极弧系数和定子齿上开辅助槽两个方面对外转子轮毂电机的振动噪声特性进行研究。仿真结果表明: 轮毂电机极弧系数为 0.72 左右时, 振动噪声特性较好; 在定子齿顶开设不对称的双辅助槽显著提升了电机的振动噪声特性。

关键词: 轮毂电机; 振动噪声; 极弧系数; 辅助槽

中图分类号: TM301 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0103-06

doi: 10.12177/emca.2021.197

Vibration and Noise Suppression Measures for In-Wheel Motors

AN Zhongliang¹, YU Haoze²

(1. National Rare Earth Permanent Magnet Motor Research Center, Shenyang University of Technology, Shenyang 110020, China;

2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110020, China)

Abstract: External rotor permanent magnet synchronous motor (PMSM) as in-wheel motor is widely used in electric vehicles, but there are few studies on in-wheel motor vibration and noise. An in-wheel motor with the rated power of 10 kW and the rated speed of 500 r/min is taken as an example to calculate the radial electromagnetic force density and vibration and noise characteristics of the motor in finite element simulation by constructing 2D finite element model of the in-wheel motor. The vibration and noise characteristics of the external rotor in-wheel motor are studied from pole arc coefficient and auxiliary slots on stator teeth. It is shown in simulation that the vibration and noise characteristics of the in-wheel motor are better when the pole arc coefficient is about 0.72 and double auxiliary slots are set on the stator teeth tip.

Key words: in-wheel motor; vibration and noise; pole arc coefficient; auxiliary slot

0 引言

汽车的噪声、振动、不平顺性被称为汽车的 NVH 特性, 是比较汽车工艺的一个综合性特性^[1]。

外转子永磁同步电机(PMSM)具有轮毂电机需要满足的效率高、占用空间低、质量小、功率密

度高和转矩密度大等特点, 成为电动汽车最主要的驱动装置^[2]。但也因车用电机体积小、转矩高, 电机径向电磁力密度高, 转速快, 电磁噪声大的缺点影响了汽车行驶的稳定性 and 乘客乘坐的舒适性。因此, 对电动汽车用电机的振动噪声研究必不可少。

电磁源、机械源和气动源是电机噪声的三大

收稿日期: 2021-11-29; 收到修改稿日期: 2022-01-28

作者简介: 安忠良(1975—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为永磁电机及其控制。

于浩泽(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机及其控制。

主要来源,对于低速直驱电机,电磁噪音是主要的噪声来源。目前各专家学者对电机电磁振动噪声的研究方法主要有解析法、有限元法和试验法^[3]。文献[4]建立了外转子轴向磁通轮内电机(AFWM)的电磁振动和噪声解析模型,可以在较宽的转速范围内快速有效地预测 AFWM 电机的电磁振动和噪声。文献[5]以一台外转子 PMSM 为例,通过对比不同相对磁导率的导磁材料、极弧系数、槽口宽度等变量结合有限元软件研究了这些变量对电机振动噪声的影响规律。文献[6]研究了考虑多普勒效应的外转子轮内电机(IWM)的电磁噪声特性,得出多普勒效应会在外转子电机的高频峰附近诱发额外的侧频分量的结论。文献[7]以优化电机电磁噪声、提升气隙磁密波形正弦度为目的,设计了无槽正弦绕组与双层转子方案。文献[8]对一台外转子轮毂电机进行仿真和噪声试验,发现割缝效应产生的电磁力对总体噪声的贡献最为显著。文献[9]以一台外转子高速电机为研究对象,进行了模态分析计算,得到了模态特性与振动特性,并用试验对模态仿真结果进行了验证。文献[10]不改变槽面积和定子外径,对定子槽进行优化,使定子固有频率增加以减少或消除结构共振的严重影响。

目前研究对电机的振动噪声产生的理论分析较多,但给出的抑制措施通常会牺牲电机的输出转矩,降低了电机的转矩密度,这是轮毂电机不能接受的^[11]。本文从极弧系数和定子齿上开辅助槽两个方面,在保证电机输出转矩的前提下,改善电机的振动噪声特性。

1 轮毂电机电磁分析

本文以一台额定功率为 10 kW 的轮毂电机为研究对象,其 2D 模型如图 1 所示,基本参数如表 1 所示,基于有限元法,仿真计算分析轮毂电机的电磁性能。

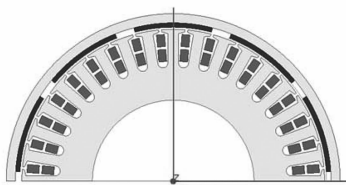


图 1 轮毂电机 2D 模型图

图 2 为不同极弧系数下,电机输出转矩和转矩波动的曲线。共对比了 0.60、0.66、0.72、0.78、0.84、0.90 共 6 组方案。原方案极弧系数为 0.78,输出转矩较低,转矩波动较大。

表 1 电机参数表

参数名称	参数值
额定功率/kW	10
额定转速/(r·min ⁻¹)	500
极数/槽数	10/36
最高转速/(r·min ⁻¹)	1 500
电机额定转矩/(N·m)	191

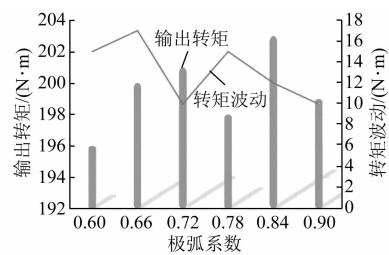


图 2 负载转矩随极弧系数变化曲线

分别对比单辅助槽、等宽双辅助槽、不等宽双辅助槽、等宽三辅助槽 4 种情况,择优选取电机输出转矩特性较好且电磁力波较小的方案。

1.1 径向电磁力分析

轮毂电机在转速较高或过载状态运行时,会产生更大的电磁噪声,这主要是因为电机内部的径向、切向电磁力。大量研究已证明,径向分量的幅值要远大于切向分量。因此在研究电机的振动噪声过程中,径向电磁力一直是研究的主要对象。图 3 为电磁力波示意图。

电机的径向电磁力密度表达式为^[12]

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_n^2 - B_t^2) \quad (1)$$

式中: f_r 为电机的径向力密度; μ_0 为真空磁导率; B_n 、 B_t 分别为电机气隙磁密的径向与切向分量。

气隙磁密切向分量极小,通常在研究中忽略切向分量的影响。

气隙磁通密度可拆分为:转子的永磁体磁密 B_R 和定子的电枢反应磁场 B_S ,忽略 B_t 的影响, $B_n = B_R + B_S$,式(1)可表示为

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_R - B_S) = \frac{1}{2\mu_0}B_R^2 + \frac{1}{2\mu_0}B_S^2 + \frac{1}{2\mu_0}B_R B_S \quad (2)$$

气隙磁导 λ 与磁动势 F 的乘积如下:

$$B = \lambda F \quad (3)$$

对应的定转子气隙磁动势与磁导如式(4)~式(6)所示:

$$F_R = \sum_{v_R} F_{R_m}^{v_R} \cos v_R(p\theta - \omega t) \quad (4)$$

$$F_s = \sum_{\mu} \sum_{v_s} F_{m\varphi}^{\mu, v_s} \cos(v_s p\theta - \mu\omega t + \varphi^{\mu, v_s}) \quad (5)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \sum_{k_z=1}^{\infty} \lambda_{k_z} \cos k_z Z\theta, k_z = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

式中: $v_R = 2k + 1$ 为永磁体谐波磁场次数; $F_{R_m}^{v_R}$ 为 v_R 次永磁体谐波磁动势幅值; p 为电机极对数; θ 为转子机械角度; ω 为定子基波电流角速度; t 为时间; μ 为绕组电流谐波次数, $\mu = 6k + 1 (k = 1, 2, 3, \dots)$; $F_{m\varphi}^{\mu, v_s}$ 为定子绕组产生的谐波磁动势幅值; $v_s = 2mk \pm 1$ 为电枢磁场谐波次数; $m = 3$ 为电机相数; φ^{μ, v_s} 为磁动势初相角; λ_0 为气隙平均磁导 k_z 为齿谐波阶数; Z 为电机槽数。

将式(3)~式(6)代入式(2)中,可归纳出 10 极 36 槽的永磁体磁场和定子绕组的电枢反应磁场产生的径向力波的阶数 $(v_R \pm v_s)p$, 频率为 $(v_R \pm 1)f, f = 41.67 \text{ Hz}$ 为电流基频, 如表 2 所示。

表 2 径向电磁力阶次及频率表

阶数	频率倍数	永磁体磁场谐波次数			
		1	3	5	7
定子	1	10/2f	20/4f	30/6f	40/8f
		0/0	10/2f	20/4f	30/6f
电枢	-5	20/2f	10/4f	0/6f	10/8f
		30/0	40/2f	50/4f	60/6f
反应	7	40/2f	50/4f	60/6f	70/8f
		30/0	20/2f	10/4f	0/6f

电机变形程度表达式可以简化为式(7):

$$A_r \propto \frac{P_r}{(r^2 - 1)^2} \quad (7)$$

式中: A_r 为电机的振动变形状态; P_r 为电磁力谐波幅值; r 表示电磁力波的阶数。

由式(7)可知,电磁力波空间分量的阶次越低,对电机的电磁噪声的影响越大,同时阶次对振动的影响要大于幅值,越是低阶越应关注。

1.2 电机电磁有限元分析

图 3 为电机额定负载状况下,径向电磁力密

度(简称为 F_{rad} ,下同)的时空波形图,对其进行傅里叶分解,得到不同时空状态下,分量的幅值,如图 4 所示。从图 4 可以看出,对其分布规律大体与表 2 的预测一致,且 $(0, 4f)$ 、 $(10, 4f)$ 、 $(10, 6f)$ 等在图中标注的分量幅值较高。在 1.1 节中已经说明阶次对电机振动噪声的影响更大,一般只需关注低阶次高幅值的 F_{rad} 。

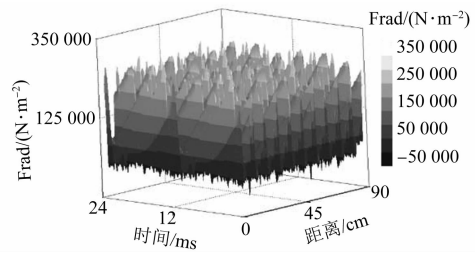


图 3 负载状态下径向电磁力密度波形图

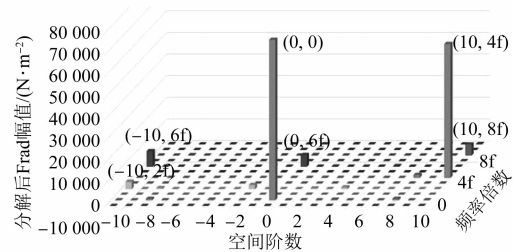


图 4 负载径向电磁力密度时空分解图

图 5 为不同极弧系数下, F_{rad} 幅值的对比。可以看出,极弧系数为 0.72 时, F_{rad} 的幅值低于电机原设计方案,由 $99\,500 \text{ N/m}^2$ 降低到了 $98\,800 \text{ N/m}^2$, 降比幅度为 4.5%。

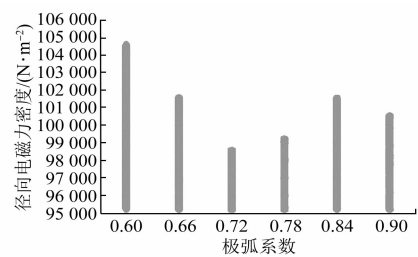


图 5 不同极弧系数的 F_{rad} 幅值对比

定子齿顶开辅助槽会使外转子 PMSM 磁场变化,辅助槽的尺寸会影响电机的输出转矩特性和振动噪声特性。将辅助槽的尺寸和定子槽开口大小做对比,探究其对外转子 PMSM 的振动噪声特性影响。图 6 为四种辅助槽方案的 2D 模型。

首先对比单辅助槽方案,控制槽口深度与电枢槽口深度都为 1.5 mm,扫描辅助槽的宽度。根

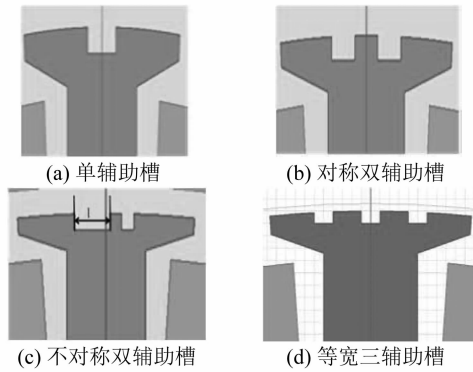


图6 4种辅助槽2D模型示意图

据槽口宽度 2.5 mm,扫描范围为 2.5~7.5 mm,步长为 1.25 mm。表3为不同槽口宽度下,Frad的幅值对比。从表3中可以看出,辅助槽宽度为 6.25 mm时,径向电磁力波幅值最低,为 1 956 N/m²。这是由于辅助槽增加了电机齿槽转矩的周期数,也变相增加了电磁力波的周期数,使得傅里叶分解后的低阶幅值降低。

表3 不同槽口宽度对比

辅助槽宽度/mm	2阶 Frad/(N·m ⁻²)
1.25	2 023
2.50	2 145
3.75	2 066
5.00	2 154
6.25	1 956
7.50	1 980

进一步研究外转子 PMSM 的振动噪声优化问题。针对两种双辅助槽,深度同样设置为 1.5 mm,与电枢槽深度一致。等宽双辅助槽中,一个辅助槽的宽度范围为 1~4 mm,步长为 0.5 mm。表4为等宽双辅助槽方案2阶 Frad的对比。从表4可以看出,一个辅助槽为 3 mm的情况下,傅里叶分解后的2阶 Frad幅值最小,为 1 953 N/m²。

表4 等宽双辅助槽对比

辅助槽宽度/mm	2阶 Frad幅值/(N·m ⁻²)
1.0	2 164
1.5	2 235
2.0	2 198
2.5	2 076
3.0	1 953
3.5	2 188
4.0	2 041

在保证双辅助槽宽度之和为 6 mm 的情况下,对不对称双辅助槽进行仿真分析。将图片右侧的辅助槽宽度作为参数化扫描对象 1 mm,则另一侧为(6-1) mm,保证宽度之和为 6 mm。表5为不等宽双辅助槽傅里叶分解后的2阶 Frad对比。从表5可以看出,右侧槽宽度为 1.5 mm,左侧槽宽度为 4.5 mm的2阶 Frad幅值最低,为 1 897 N/m²。

表5 等宽双辅助槽对比

辅助槽宽度/mm	2阶 Frad幅值/(N·m ⁻²)
1.0	1 925
1.5	1 897
2.0	1 973
2.5	2 077
3.0	2 058
3.5	2 049
4.0	2 122
4.5	2 199
5.0	2 008

最后对比等宽三辅助槽的情况,分别对比了槽宽为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 和 2.5 mm 4种情况,表6为傅里叶分解后2阶 Frad的幅值对比。从表6可以看出,辅助槽宽度为 1.5 mm时,傅里叶分解后的2阶 Frad幅值最低,为 2 046 N/m²。

表6 等宽三辅助槽对比

辅助槽宽度/mm	2阶 Frad幅值/(N·m ⁻²)
1.0	2 323
1.5	2 046
2.0	2 153
2.5	2 056

综合对比了4种辅助槽方案,选取槽宽分别为 1.5、4.5 mm 的不对称双辅助槽,再综合极弧系数为 0.72 的方案,对电机进行优化仿真。图7为电机综合优化前后的负载输出转矩曲线对比。从图7中可以看出,综合优化后,平均转矩为

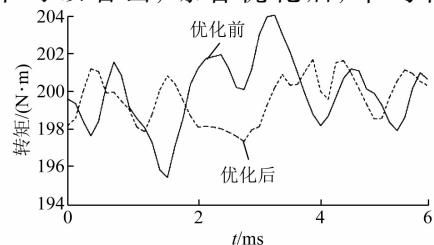


图7 综合优化前后输出转矩曲线对比

199.6 N·m, 转矩脉动比率降低至 1.2%。优化提升了电机的性能与稳定性。

2 轮毂电机模态分析

对电机的结构进行模态分析是判断电机能否在运行状态下发生共振的重要方式。本文针对外转子 PMSM 的特殊性, 对外转子 PMSM 的永磁体、转子轭部和外壳进行模态仿真计算。图 8 为电机模态前 4 阶的振型云图。表 7 为不同阶次模态下的固有频率。

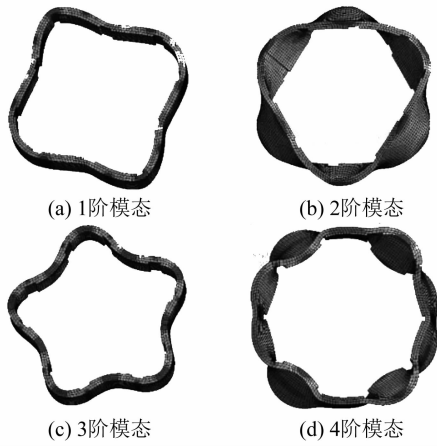


图 8 前 4 阶模态振型云图

表 7 模态固有频率表

阶数	频率/Hz
1	1 548
2	2 034
3	2 961
4	3 605

模态计算结果表明: 该外转子 PMSM 模型固有频率较高, 与低次电磁力波的时间分量对应频率进行对比, 并无较为接近的频率段。说明本文所研究的外转子 PMSM 不会与高幅值的低次电磁力波产生共振。

3 轮毂电机振动分析

将 Maxwell 中计算好的径向电磁力密度作为激励源与 Workbench 中的谐响应模块进行耦合分析, 将激励源作用在永磁体上。谐响应模块中的模型如图 9 所示。

在振动响应中, 振动幅值与激振力波幅值成正比, 低次谐波的幅值较大容易引起振动。但是



图 9 轮毂电机谐响应模块模型

当特定阶激振力波的频率与对应模态的固有频率相接近时, 即使力波幅值很小也会引起较大的振动响应。额定负载状态下的优化前后振动加速度曲线对比如图 10 所示。在 375 Hz、583 Hz 和 916 Hz 的位置出现了波峰, 预计噪声曲线波峰会出现在该频率附近。可以看出, 优化后, 峰值振动加速度由 7.66 m/s^2 降为 5.45 m/s^2 , 降低了 28%, 可见优化后对电机外壳的振动达到了抑制作用。

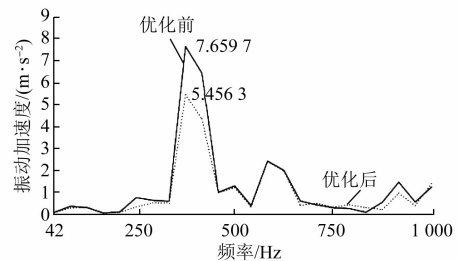


图 10 优化前后振动加速度对比

4 轮毂电机噪声分析

对电机的声场进行仿真。电机侧面作为径向电磁力作用的主要传播方向, 应着重观察。做一个圆环状空气域, 额定负载状态下的声场仿真结果如图 11 所示。在声场中取一观测点, 该点的优化前后声压级曲线对比如图 12 所示。额定负载状态下, 噪声峰值主要出现在 375 Hz、583 Hz 和 916 Hz 附近, 与前文中的预测保持一致。从图 12

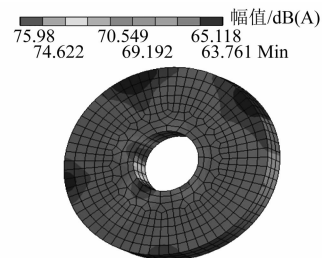


图 11 噪声场云图

可以看出,优化后,电机的噪声下降,且待重点关注频率处的噪声下降明显,峰值噪声从 65.5 dB(A)下降到 54.2 dB(A),降幅为原来的 17%,优化效果明显。

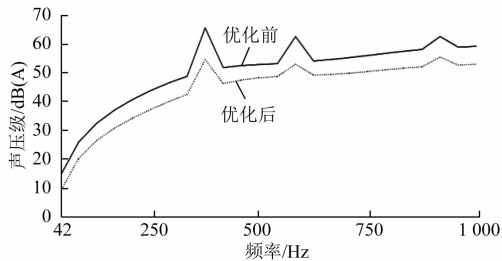


图 12 优化前后噪声曲线对比

5 结 语

本文分析了一台 10 kW 的轮毂电机的振动噪声特性,从电机的径向电磁力入手,以极弧系数和在定子齿上开设辅助槽为目标,基于有限元仿真软件计算了电机负载状态下的电磁振动噪声,并得到了如下结论:

(1) 外转子电机极弧系数的改变导致径向电磁力幅值先减小后增大,但是增加的幅度越来越慢。在定子齿表面开设辅助槽可以增加电机齿槽转矩的周期数,进而达到削弱 2 阶 Frad 的效果。采用不对称的双辅助槽可以保证电机输出转矩不被牺牲,有效抑制了转矩脉动,同时对电机的振动噪声抑制效果最佳。

(2) 综合优化后,本文研究的轮毂电机输出转矩提升,优化后的平均转矩为 199.6 N·m,转矩脉动比率降低至 1.2%;振动噪声特性得到明显抑制,峰值振动加速度由 7.66 m/s² 降为 5.45 m/s²,降低了 28%;峰值噪声从 65.5 dB(A)下降到 54.2 dB(A),降幅为原来的 17%,优化效果明显。

本文研究针对轮毂电机电磁噪声的综合仿真,能在电机设计的初始阶段计算电机的振动噪声特性,对于减少轮毂电机的研发时间,改善电动汽车的 NVH 特性有一定的帮助。

【参 考 文 献】

[1] 肖阳,宋金元,屈仁浩,等. 变频谐波对电机振动噪声特性的影响规律[J]. 电工技术学报,2021,36(12): 2607.

[2] LI H, LIU D, JIANG L, et al. Self-synchronization theory of dual motor driven vibration system with two-stage vibration isolation frame [J]. Applied Mathematics and Mechanics,2015,36(2): 265.

[3] 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(z1): 53.

[4] DENG W Z, ZUO S G. Analytical modeling of the electromagnetic vibration and noise for an external-rotor axial-flux in-wheel motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(3): 1991.

[5] 周璞. 电机电磁激励特性及结构振动响应分析研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2018.

[6] LIN F, ZUO S G, DENG W Z, et al. Modeling and analysis of acoustic noise in external rotor in-wheel motor considering doppler effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(6): 4524.

[7] 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.

[8] ZUO S G, LIN F, WU X D. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,62(10): 6204.

[9] 刘凯,张炳义,冯桂宏. 基于电枢齿偏移法双面转子永磁同步电机振动噪声特性的研究[J]. 电工技术学报,2021,36(S1): 95.

[10] JAFARBOLAND M, FARAHABADI H B. Optimum design of the stator parameters for noise and vibration reduction in BLDC motor [J]. IET Electric Power Applications,2018,12(9): 1297.

[11] 王晓远,贺晓钰,高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16): 4919.

[12] DONG Q C, LIU X T, QI H Z, et al. Analysis and evaluation of electromagnetic vibration and noise in permanent magnet synchronous motor with rotor step skewing[J]. Science China Technological Sciences, 2019,62(5): 839.