

基于转子辅助槽的车用永磁同步电机振动噪声优化

刘皖秋¹, 代颖¹, 叶飞^{2,3}, 孙涛¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 201900;

2. 苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215000;

3. 上海众联能创新能源科技股份有限公司, 上海 200438)

摘要: 车用永磁同步电机(PMSM)的电磁噪声是新能源汽车噪声的主要来源,直接影响整车的振动噪声特性。作用于电机定子结构的低阶径向电磁力是电机电磁噪声的主要原因,以1台额定功率35 kW的新能源车用PMSM为研究对象,提出一种转子外缘开辅助槽的优化方案以降低电机的振动噪声,通过对辅助槽的多个参数进行多变量寻优确定最优的参数值。采用有限元法对采用辅助槽前后的电机进行振动噪声的仿真对比,最后通过样机的振动噪声试验验证了理论研究的正确性,实测样机通过转子开辅助槽的优化方案使电机振动加速度幅值降低了2g,噪声降低了4 dB。

关键词: 永磁同步电机; 振动噪声; 电磁力波; 辅助槽

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0076-06

doi: 10.12177/emca.2020.035

Optimization of Vibration and Noise of Vehicle Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Auxiliary Slot of Rotor

LIU Wanqiu¹, DAI Ying¹, YE Fei^{2,3}, SUN Tao¹

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 201900, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China;

3. Sina New Chance New Energy Technology Corp., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: The electromagnetic noise of permanent magnet synchronous motor (PMSM) for vehicles is the main source of new energy vehicle noise, which directly affects the vibration and noise characteristics of the vehicle. The low-order radial electromagnetic force acting on the stator structure of the motor is the main reason for the electromagnetic noise of the motor. Taking a PMSM for new energy vehicle with a rated power of 35 kW as the research object, an optimization method with auxiliary slots on the outer edge of the rotor is proposed to reduce the vibration and noise of the motor. The optimal parameter values are determined by multivariate optimization of multiple parameters of the auxiliary slot. The finite element method is used to compare the vibration and noise of the motor with and without the auxiliary slots. Finally, the correctness of the method is verified by the vibration and noise experiment of the prototype. Through the optimization of the rotor with auxiliary slots, the amplitude of the motor vibration acceleration is reduced by 2g and the noise is reduced by 4 dB.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); vibration and noise; electromagnetic force wave; auxiliary slot

收稿日期: 2020-03-12; 收到修改稿日期: 2020-04-14

作者简介: 刘皖秋(1994—),女,硕士研究生,研究方向为电机的电磁设计及振动噪声。

代颖(1980—),女,副教授,研究方向为电机的振动噪声分析,电动汽车牵引电机设计。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、效率高、调速范围宽等特点,已广泛应用于新能源汽车领域^[1-2]。随着新能源汽车的快速推广,驱动电机的振动噪声问题是汽车电机设计过程中的难点之一,直接影响新能源汽车的舒适性、安全性和可靠性^[3-4]。

如何降低电机的振动噪声是汽车电机设计的热点之一。文献[5]通过对转子隔磁桥进行优化将电机噪声降低了23%,但是针对不同电机其转子强度有可能达不到要求。文献[6]提出转子斜极的优化方案,能够有效抑制由齿谐波引起的电磁噪声,但斜极的制造工艺较为复杂。文献[7]通过改变电机的极槽配合,降低了电机的振动噪声。文献[8]研究了转子不同辅助槽对电机齿槽转矩的影响,但是没有研究对电机振动噪声的影响。

本文以1台额定功率35 kW的新能源汽车用PMSM为研究对象,研究降低电机振动噪声的优化方案。在不改变既定的极槽配合和降低成本的前提下,提出一种转子外缘开辅助槽的优化方案,对辅助槽的多个参数进行多变量寻优确定最优参数。建立优化前后的电机模型,采用有限元方法对2个电机模型进行振动噪声的仿真对比,最后通过样机的振动噪声试验进行验证。试验结果证实转子开辅助槽的优化方案可使电机振动加速度幅值降低了大约2g(g 为重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$),噪声降低了4 dB,有效降低了电机的振动噪声。

1 电磁分析

1.1 PMSM 参数

本文所研究的PMSM主要应用于新能源汽车,其2D仿真模型如图1所示。内置式PMSM主要参数如表1所示。

1.2 径向电磁力分析

电机运行时,气隙中的基波磁场和各次谐波磁场相互作用产生随时间和空间变化的径向电磁力波,作用在定子铁心上,使电机结构产生电磁振动,向周围辐射噪声,是电机产生电磁振动噪声的根本原因^[9-10]。

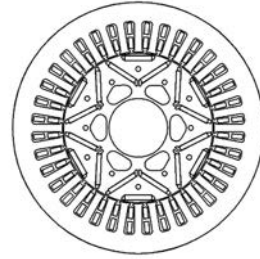


图1 PMSM 2D 仿真模型

表1 内置式PMSM主要参数

参数名称	参数值
额定功率、峰值功率/kW	35、70
额定转速、峰值转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3 000、8 000
极数、槽数	6/36
控制器直流电压/V	350
冷却方式	水冷

基于麦克斯韦定律得到PMSM单位面积气隙的径向电磁力的瞬时值^[11]:

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

式中: $P_r(\theta, t)$ 为作用在定子铁心内表面单位面积上的径向电磁力密度; θ 为空间角度; t 为时间; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{ H/m}$; $b_t(\theta, t)$ 为切向气隙磁密; $b_r(\theta, t)$ 为径向气隙磁密。

由于铁磁材料的相对磁导率远远大于气隙的磁导率,气隙中大部分磁力线近似垂直于铁磁材料和空气的交界面,切向的气隙磁密远远小于径向磁密,故忽略不计,则径向电磁力可简化为

$$P_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (2)$$

PMSM的气隙磁密由永磁体产生的磁场和电枢绕组产生的磁场两者相互作用而成^[12-13]。其中,永磁体磁场产生的磁势谐波次数为

$$\mu = 2m + 1, m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

三相定子绕组的谐波次数为

$$v = 6n + 1, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

电机电枢磁场的 v 次谐波和主极磁场的 μ 次谐波相互作用,产生电磁力波的阶数为

$$r = (v \pm \mu)p \quad (5)$$

径向电磁力波的频率为

$$F = (\mu \pm 1)f_1 = [(2m + 1) \pm 1]f_1 = \begin{cases} 2(m + 1)f_1 \\ 2mf_1 \end{cases}, m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

式中: f_1 为电网频率。

由式(6)可知,同步电机的径向电磁力波的频率为电网频率的整数倍。

本文的新能源车用 PMSM 为 6 极 36 槽,按照式(3)~式(6)计算得到电磁力波表,如表 2 所示。电机存在 0、6、12 等 $2kp$ 阶次的电磁力,其中 $v = -11, +13$ 是定子的一阶齿谐波。PMSM 负载时的电磁噪声的主要成分是一阶齿谐波 $v = -11, +13$ 和主极磁场极对数与定子槽数最接近的 2 个谐波 $\mu = 11$ 和 $\mu = 13$ 相互作用所产生的^[14]。由表 2 可知,定子电枢反应基波磁势产生的 11、13 次齿谐波与转子永磁磁场中的 11、13 次齿谐波相互作用产生电磁力,二者空间极对数相等,合成 0 阶电磁力,由式(6)计算得到该 0 阶电磁力频率为 $12f$,幅值较大的低阶电磁力对电机振动噪声的影响最大。因此,0 阶 12 倍频电磁力对 6 极 36 槽 PMSM 振动噪声影响较大。

表 2 PMSM 电磁力波表

$\mu \backslash v$	1	-5	7	-11	13
1	0				
3	6	6			
5		0	6		
7		6	0		
9			6	6	
11				0	6
13				6	0

2 转子结构优化

关于目前降低电机的电磁噪声的方法主要有^[15]:(1)定子斜槽或转子斜极;(2)适当增大气隙长度;(3)优化定转子结构。考虑到电机制造的成本和工艺问题,本文提出一种在转子外缘开辅助槽的优化方案,如图 2 所示。为了防止不对称辅助槽引入谐波及动平衡问题,在关于 d 轴的对称位置开 2 个辅助槽。不规则的气隙结构会改变气隙磁密的谐波含量,进而改变径向电磁力的力波幅值,在前人的基础上,进一步研究了转子开槽对电机振动噪声的影响。

考虑到辅助槽参数的数量问题以及参数优化的计算量,按照参数尽可能少的原则,选择三角形辅助槽进行研究,其参数只有 3 个:深度 d 、张角 θ

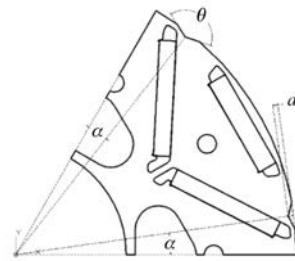


图 2 转子辅助槽参数示意图

和位置角 α ,后续可以继续研究不同辅助槽形状的影响。由前文可知,径向电磁力是电机噪声的主要因素,电磁力又与径向气隙磁密的平方成正比,且转矩脉动对电机的电磁振动噪声具有一定影响,因此本文对辅助槽的深度 d 、张角 θ 和位置角 α 进行参数化分析,对比电机的径向气隙磁密基波幅值和谐波畸变率含量(THD)、电机输出转矩和转矩脉动等电磁性能。综合考虑,在保证电机性能的前提下,选择最优参数作为最终的电机转子开槽优化方案^[16-17]。

为了防止转子外缘开的辅助槽和磁钢槽过于接近,影响电机转子的强度,确定电机辅助槽的深度参数 d 的范围为 0.6~1.6 mm,辅助槽的张角 θ 范围为 $110^\circ \sim 160^\circ$,单边辅助槽与 d 轴之间的位置角 α 为 $7^\circ \sim 13^\circ$ 。采取双变量同时变化的研究方法进行多变量的参数分析,图 3 所示为控制辅助槽位置角不变,辅助槽张角和深度对电机性能的影响曲面图;图 4 所示为控制辅助槽张角不变,位置角和辅助槽深度对电机性能的影响曲面图。

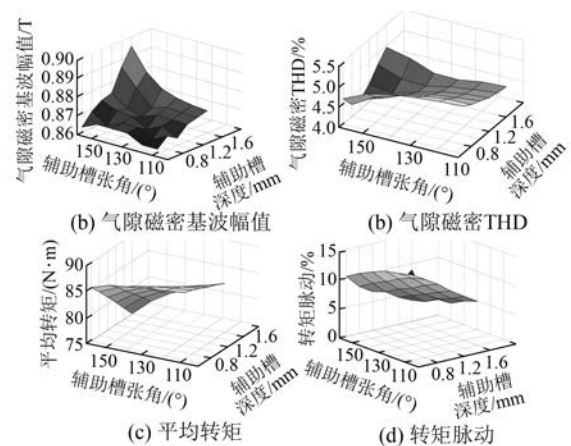


图 3 辅助槽张角和深度对电机性能的影响

随着辅助槽深度、张角和位置角的变化,电机的各性能曲线也随之变化,按照气隙磁密基波幅

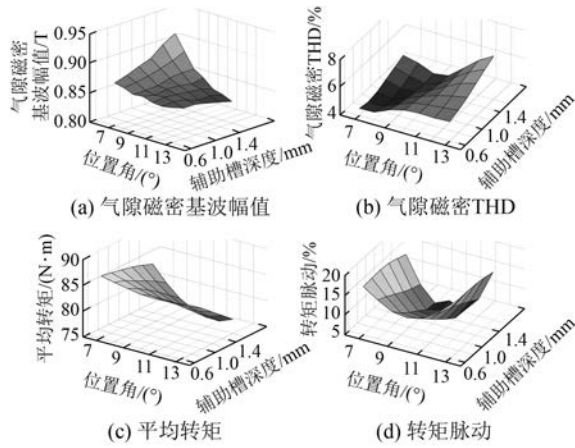


图4 辅助槽位置角和深度对电机性能的影响

值和平均转矩尽可能大,谐波畸变率和转矩脉动尽可能小的原则选择辅助槽的最优参数,根据图3和图4的变化规律,最终选择辅助槽的深度 d 为1.2 mm,张角 θ 为 135° ,位置角 α 为 8° 。

3 优化前后电机的性能分析

建立开辅助槽前后的电机模型,基于 Maxwell 有限元仿真软件对 2 种电机模型进行电磁仿真分析,得到电机优化前后的性能曲线如图 5 所示。

电机转子未开槽时,气隙磁密两侧存在明显的尖峰,将其所处的空间角度对应到转子上,发现转子所开辅助槽的位置正好位于气隙磁密的 2 个尖峰处,能够明显有效削弱空载气隙磁密波峰两侧的尖峰值,增加波形正弦性,其各次谐波幅值均有一定程度的减小,一阶齿谐波 11、13 次谐波幅值降低。电机输出转矩的平均值略有降低,但依然能够达到电机的设计要求,但转矩脉动降低了 34%,有利于改善电磁噪声。对电机的径向电磁力波进行谐波分析,0 阶电磁力幅值减小,理论上能够有效降低电机的电磁噪声。

4 电机振动噪声分析

4.1 振动噪声仿真分析

电机在峰值功率峰值转速工况时,低阶电磁力的幅值较大,对电机振动噪声的影响较大。使用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对峰值工况下的电机进行振动噪声仿真分析,得到电机的仿真结果如图 6 所示。

优化前,电机在 4 800 Hz ($12f$) 时,谐响应振动

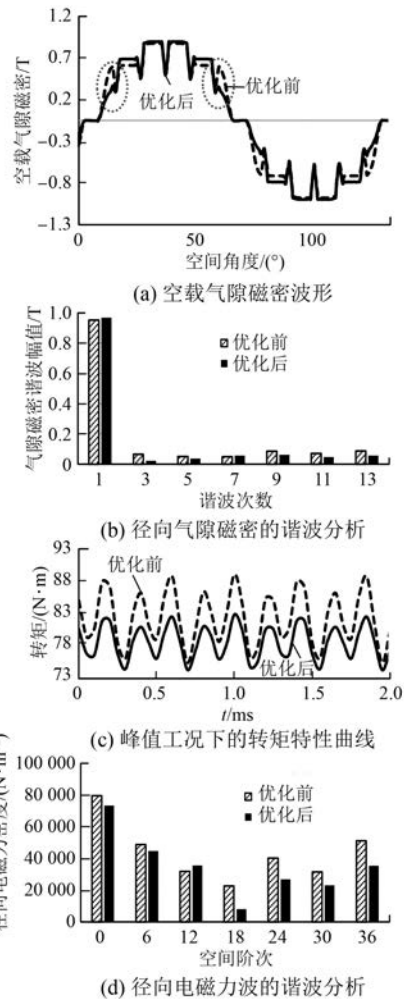


图5 优化前后电机的电磁性能曲线对比

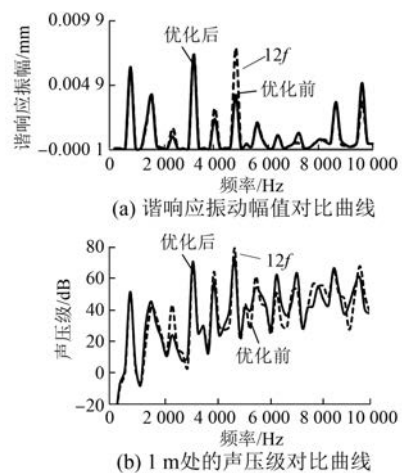


图6 振动噪声仿真结果

幅值较大,对应频率的声压级值较为突出,这是由一阶齿谐波 11、13 次谐波引起的。优化后,电机在

4 800 Hz 时的振动幅值显著降低,声压级值相应的减小,在整个频率范围内,声压级差值不明显,分布较为均匀。由声压级求和公式计算可得,电机的噪声由优化前的 80.37 dB 降低至优化后的 76.14 dB。

基于单转速电磁噪声分析的前提下,对优化前后的电机进行多转速瀑布图分析,得到电机峰值工况下的多转速瀑布图结果如图 7 所示。

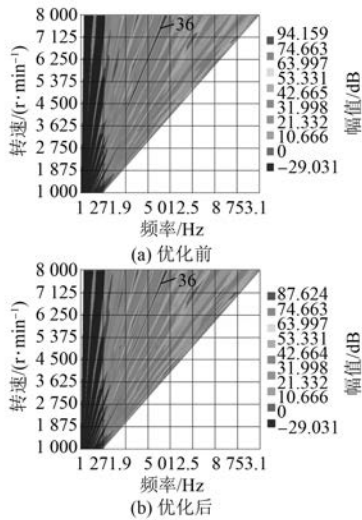


图 7 电机峰值功率下的瀑布图

图 7 展示了距离电机上方 1 m 处电机噪音的阶次与电机转速和频率的关系,由图 7 可知,本文车用 PMSM 的 36 阶次噪声值较大,极对数为 3,该阶次噪声的频率为 $12f$,与电机的一阶齿谐波密切相关,由 0 阶 $12f$ 电磁力波引起的电磁噪声最大,与前文理论分析一致,且优化后,36 阶次噪声的最高值降低,证明了转子开槽可以有效降低电机噪声。

4.2 样机振动噪声试验

为了验证振动噪声仿真的准确性,分别对优化前后的 2 台样机进行 1 m 声压级测试,2 台样机外观一致,一台转子未开辅助槽,另一台转子外缘开辅助槽,其转子结构如图 8 所示。

对 2 台样机进行振动测试时,在电机的上方 (Top)、左方 (Left)、右方 (Right) 和前方 (Rear) 距离电机表面 1 m 处的位置处各布置一个传声器,测试出各点的声压级;距离电机 0.1 m 的位置布置 1 个传声器,用于测量电机的近场噪声;在电机的端盖位置、底部和机身位置各布置一个传感器,用于测试电机振动大小,具体设置如图 9 所示。

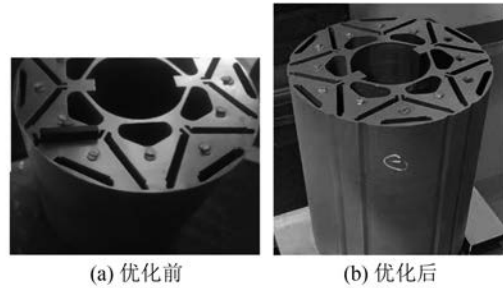


图 8 2 台样机转子结构

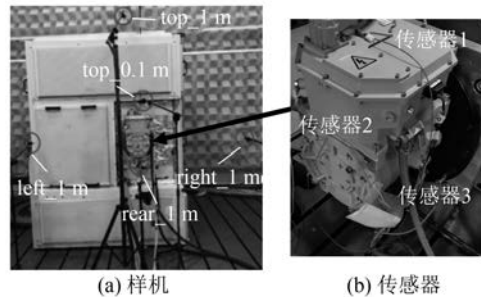


图 9 样机振动噪声测试点示意图

距离电机上方 1 m (Top_1 m) 处的实测瀑布图如图 10 所示。图 10 与图 7 的仿真结果基本一致,由 11、13 次齿谐波引起的 36 阶次噪声在电机电磁噪声中贡献量较大,与前文仿真分析和理论分析一致。通过转子开辅助槽,优化电机的气隙磁密,降低 11 次和 13 次谐波,减小 $12f$ 时的振动幅值和噪声值,使得电机 36 阶次的噪声降低,进而降低电机的整体振动噪声。

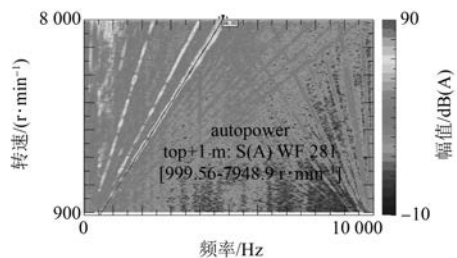


图 10 样机噪声实测瀑布图

将采用辅助槽优化前后的 2 台样机进行从 100~8 000 r/min 的升速运行,测试得到瞬态工况下的电机振动测试结果如图 11 所示。电机 1 m 平均声压级的测试结果如图 12 所示。

由图 11 可知,电机 3 个方向的振动幅度均有一定程度的降低,振动加速度大约降低了 2g,证

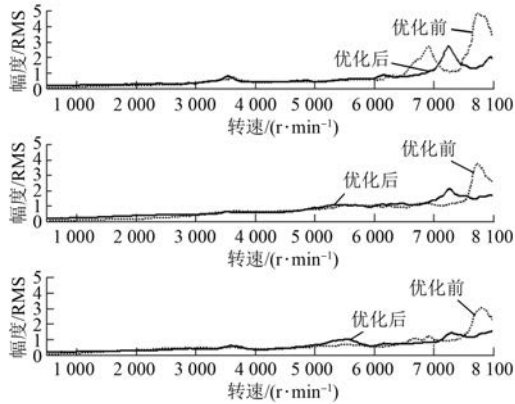


图 11 电机的振动测试结果

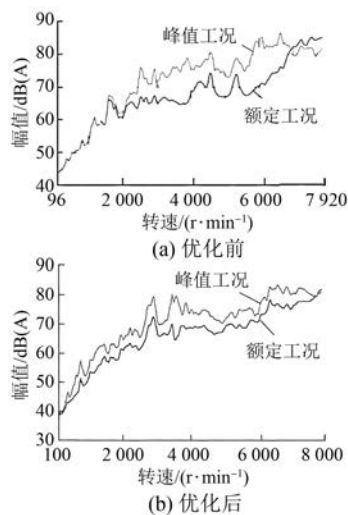


图 12 瞬态工况下 1 m 平均声压级

实了电机转子的辅助槽的优化方案能够有效降低电机振动。由图 12 可知,峰值工况下,电机处于弱磁阶段,磁场畸变严重,导致噪声降低程度与额定工况下相比并不明显。但电机峰值工况下运行时,由声压级求和式可以算出采用辅助槽优化方案后的样机整体噪声由优化之前的 86 dB 降低为 82 dB,大约降低了 4 dB,与仿真结果的趋势一致,验证了噪声仿真的可行性以及转子外缘开辅助槽优化方案的有效性。

5 结 语

本文以 1 台额定功率 35 kW 的 6 极 36 槽车用 PMSM 为研究对象,提出一种转子外缘开辅助槽的优化方案,研究了转子辅助槽对电机振动噪

声特性的影响,得到的结论如下:

(1) 辅助槽位置、张角和深度参数对电机性能影响较大,通过多变量寻优分析发现辅助槽的位置角约为 8° ,辅助槽张角约为 135° ,辅助槽深度约为 1.2 mm 时,电机性能较好,这个位置恰好对应到电机气隙磁密尖峰处的空间角度,有利于改善气隙磁密波形,在今后的电机优化中可以利用这个方法进行电机谐波优化。

(2) 6 极 36 槽电机的 36 阶次噪声较大,主要是由 0 阶 12 倍频电磁力引起的。该结论适用于整数槽 PMSM。通过优化电机气隙磁密的正弦性,减小 11、13 次谐波,降低转矩脉动,降低 0 阶电磁力幅值,降低电机的振动幅值,削弱 36 阶次噪声,从而达到降低电机振动噪声的目的。

(3) 通过对开辅助槽前后的 2 台样机进行振动噪声测试,测试结果表明采取转子开辅助槽优化方案的样机振动加速度的幅值减小了大约 2g,噪声降低了大约 4 dB,证实了转子开辅助槽的优化方案可以有效降低电机的振动噪声。

【参 考 文 献】

- [1] 代颖,乔金秋,郑江,等.电动汽车牵引用永磁同步电机的多物理场分析[J].电机与控制应用,2016,43(5): 73.
- [2] FODOREAN D, HUSAR C, IRIMIA C. Noise and vibration behavior evaluation of DC motor and PMSM in electric traction application[C]//2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016.
- [3] LA DELFA P, HECQUET M, GILLON F, et al. Analysis of radial force harmonics in PMSM responsible for electromagnetic noise [C]//2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] DONG Q, LIU X, QI H, 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.

(下转第 109 页)