

电动汽车驱动用分数槽永磁同步电机电磁噪声优化

白学森

(厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 分数槽永磁同步电机因存在较低阶次的径向电磁力, 导致其电磁噪声较大。基于理论分析、Optislang 多目标优化平台与 Ansys 多物理场有限元分析平台, 对一台电动汽车驱动用 8 极 36 槽永磁同步电机的电磁噪声进行分析和优化。电机的电磁噪声主要是由作用于定子齿上的径向电磁力波使定子铁心振动变形引起, 在定子齿顶开辅助槽并对其齿槽参数进行优化, 以削弱径向电磁力。建立电机的二维有限元模型, 利用 Optislang 对不同工况下的定子辅助槽及齿槽参数进行多目标优化, 计算得到 Pareto 前沿并从中找到相对最优解。对比分析电机优化前后定子齿部的径向电磁力, 将其映射到所对应的三维结构上, 利用 Ansys 计算得到电机优化前后的电磁噪声, 并通过样机的噪声试验验证了仿真结果的有效性。

关键词: 分数槽永磁同步电机; 电磁噪声; 多目标优化; Pareto 前沿

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)06-0060-06

doi: 10.12177/emca.2022.032

Electromagnetic Noise Optimization of Fractional-Slot Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle

BAI Xuesen

(Xiamen King Long United Automotive Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, China)

Abstract: The fractional-slot permanent magnet synchronous motor has high electromagnetic noise due to its lower order radial electromagnetic force. Based on theoretical analysis, Optislang multi-objective optimization platform and Ansys multi-physics-field finite element analysis platform, the electromagnetic noise of an 8-pole 36-slot permanent magnet synchronous motor for electric vehicle is analyzed and optimized. The electromagnetic noise of the motor is mainly caused by the vibration deformation of the stator core caused by the radial electromagnetic force acting on the stator teeth. The radial electromagnetic force is weakened by opening the auxiliary slots on the stator teeth and optimizing the slot parameters. The 2D finite element model of the motor is established, and the parameters of stator auxiliary slots on the stator teeth under different working conditions are optimized by Optislang, the Pareto front is calculated and the relative optimal solution is found. The radial electromagnetic forces of the stator teeth before and after the motor optimization are compared and analyzed, mapped to the corresponding 3D structure, and the electromagnetic noises before and after the motor optimization is calculated by Ansys. The effectiveness of the simulation results is verified by the prototype noise test.

Key words: fractional-slot permanent magnet synchronous motor; electromagnetic noise; multi-objective optimization; Pareto front

0 引言

分数槽永磁同步电机因齿槽转矩低、转矩脉

动小、恒功率运行区域的磁阻转矩占比高等优点被广泛用作新能源电动汽车的驱动电机^[1-3]。但由于分数槽永磁同步电机中含有较低阶数的径向

收稿日期: 2022-03-30; 收到修改稿日期: 2022-05-19

作者简介: 白学森(1982—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为新能源汽车动力系统集成及相关部件设计开发。

电磁力波,导致其电磁噪声水平高于一般的整数槽配合电机,因此研究阶次较低的径向电磁力波对抑制电机的电磁噪声至关重要^[4-6]。

永磁同步电机的电磁噪声问题一直是电动汽车驱动电机技术领域研究热点,其不仅关系到电机的性能,还会影响到整车的运行能力。电机的电磁噪声主要由定子齿部的径向电磁力引起,可通过优化定子齿槽结构来削弱定子齿部受到的径向电磁力,降低电磁噪声。文献[7]提出一种定子齿顶偏移的结构来削弱定子齿部受到的径向电磁力,并通过试验对比验证了该研究方法的正确性。文献[8]利用定子齿削角的方法对近极槽表贴式永磁同步电机的振动噪声进行了研究,有效降低了电磁噪声。文献[5]通过在定子齿上开辅助槽的方法改变电机的极槽配合来削弱对分数槽永磁同步电机空载电磁振动和噪声起主要作用的激振力波。文献[9]基于多目标遗传算法对电机的定转子冲片进行定向优化,分析了转矩脉动、输出转矩和齿槽转矩对电机振动噪声的影响。文献[10]通过多项式拟合的关键系数对结构参数进行敏感性分析、筛选和分级优化,以达到既抑制电机的振动噪声又不降低电机输出性能的目的。文献[11]利用粒子群多目标优化算法对经过向量拟合得到的永磁同步电机结构参数的回归方程进行寻优,实现电机效率和噪声的优化。

本文以一款电动汽车驱动用 8 极 36 槽内置式永磁同步电机为例,通过分析定子齿部受到的主要阶次径向电磁力波的特性,提出一种基于 Pareto 前沿对定子齿顶开辅助槽的齿槽参数多目标优化的方法。通过对定子齿顶辅助槽及齿槽参数的优化,找到所受径向电磁力最小的相对最优解,降低电机的电磁噪声。

1 电机有限元分析

1.1 电机二维有限元模型及主要性能参数

本文研究的电动汽车驱动用 8 极 36 槽内置式永磁同步电机的二维有限元模型如图 1 所示,电机的主要性能参数见表 1。

1.2 径向电磁力分析

电机的电磁噪声主要由作用于定子铁心内表面的径向电磁力使定子铁心振动变形引起的^[12-13]。首先对电机定子齿部受到的径向电磁

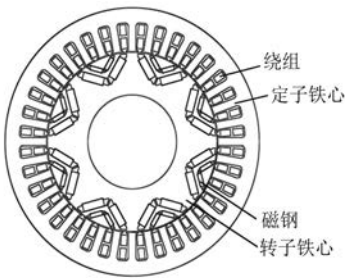


图 1 电机二维有限元模型

表 1 电机主要性能参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	540	定子外径/mm	190
峰值功率/kW	120	额定功率/kW	65
峰值转矩/(N·m)	368	额定转矩/(N·m)	112
峰值转速/(r·min ⁻¹)	12 500	额定转速/(r·min ⁻¹)	5 550
冷却方式	水冷	水温/℃	65

力进行分析,根据麦克斯韦张量法得到径向电磁力的解析表达式为

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_t^2) \tag{1}$$

式中: p_r 为 r 阶径向电磁力波幅值; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m; B_r 为径向气隙磁密; B_t 为切向气隙磁密,由于切向气隙磁密远小于径向气隙磁密,通常忽略不计。

电机的径向气隙磁密由气隙磁势和气隙磁导相乘得到,可由下式表示:

$$B_r = f\Lambda = (f_r + f_s)\Lambda \tag{2}$$

式中: f 为气隙磁势; f_r 为转子磁势; f_s 为定子磁势; Λ 为气隙磁导。

电机在空载时,转子永磁体在气隙中产生的磁势为转子磁势;电机在负载时,转子磁势和三相绕组产生的定子磁势相加得到气隙磁势,可以表示为

$$\begin{aligned} f_r &= \sum F_\mu \cos(\mu\omega t - \omega p\theta) \tag{3} \\ f_s &= \begin{cases} \sum F_\nu \cos(\omega t - \nu p\theta), \nu = 6k + 1 \\ \sum F_\nu \cos(\omega t + \nu p\theta), \nu = 6k - 1 \end{cases} \tag{4} \end{aligned}$$

式中: F_μ 为永磁体 μ 次谐波磁势的幅值, $\mu=1,3,5,\cdots$; ω 为转子旋转的电角频率; p 为永磁体的极对数; θ 为圆周位置角; F_ν 为 ν 次谐波磁势的幅值; k 为正整数。

不考虑转子偏心的影响,且假设转子表面光滑的情况下,气隙磁导由不变磁导和定子开槽引起的气隙磁导两部分组成,可表示为

$$\Lambda = \Lambda_0 + \sum \Lambda_k \cos(kZ\theta)$$
 (5)

式中: Λ_0 为气隙的不变磁导; Λ_k 为定子开槽引起的气隙磁导; Z 为定子槽数。

电机的气隙磁导与定子槽数有关,通过增加定子槽数能够改善气隙磁导的分布。根据式(1)~式(6)得到径向电磁力的表达式为

$$F_r = \sum_r p_r \cos(\omega_r t - r\theta + \varphi_r)$$
 (6)

式中: r 为电磁力波阶数; ω_r 为 r 阶电磁力波的旋转角频率; p_r 为 r 阶径向电磁力波幅值; θ 为圆周角位置; φ_r 为相位角。

本文通过在定子齿顶开槽辅助槽的方法来改变电机的极槽配合,降低因定子开槽引起的齿谐波,并通过 Optislang 多目标优化平台对定子辅助槽和齿槽的结构参数进行多目标优化,找到对应电磁力波最小的一组相对最优解,以削弱较低阶次的电磁力波对电磁噪声的影响,从而达到降噪的目的。

对于 8 极 36 槽配合的永磁同步电机来说,电磁力波阶数与整数槽配合电机的基本相同,但由于分数槽配合,引入了阶次更低的 4 阶电磁力波,即电机的极对数 $p^{[12]}$ 。由于定子铁心动态形变的振幅近似与电磁力波阶次的 4 次方成反比,低阶次的电磁力波更容易引起较大的振动噪声,所以本文主要关注低阶次的电磁力波^[5]。表 2 中列出了对电机优化前额定转速下空载和负载两种工况下的电磁力波时空分离得到的 0 阶和 4 阶主要的电磁力谐波分量,其中 f_1 为电机额定转速时的机械转频。

表 2 优化前 8 极 36 槽电机径向电磁力谐波分量

谐波	电磁力波阶次			
	0 阶		4 阶	
	空载	负载	空载	负载
$4f_1$	0.009	0.016	0.046	0.356
$8f_1$	0.116	0.118	0.711	7.573
$16f_1$	0.017	0.063	0.212	0.790
$24f_1$	0.031	0.777	0.265	0.720
$32f_1$	0.031	0.130	5.654	13.955
$40f_1$	0.052	0.070	5.454	8.594
$48f_1$	0.014	0.471	0.418	0.738
$72f_1$	0.253	1.505	0.149	0.193

从表 2 可以看出,负载工况的电磁力密度幅值高于空载工况。对于空间阶次为 0 的电磁力波,72 倍频时的电磁力密度幅值最大,其次是 8 倍频和 24 倍频;对于 4 阶次的电磁力波,32 倍频时的电磁力密度幅值最大,且电机负载时的电磁力密度幅值为 13.955 kN/m²,应该注意该谐波对电磁噪声带来的影响。

2 结构优化设计

2.1 定子辅助槽及齿槽参数

在满足电机主要性能参数的基础上,对定子齿上开辅助槽的齿槽参数进行优化,削弱径向电磁力的同时优化电机的输出转矩,以达到降低电磁噪声的目的,电机的定子辅助槽及齿槽的结构参数如图 2 所示。

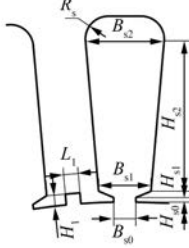


图 2 定子辅助槽及齿槽结构参数

在转子冲片结构确定的情况下,建立定子齿槽的参数化模型,并将不同运行工况下的有限元模型均设置成相同的优化参数,以实现定子冲片结构的完全统一,本文定子齿槽及齿顶的辅助槽的初始参数及其参数的范围如表 3 所示。

表 3 电机定子齿槽初始值及优化参数范围 mm

定子齿槽参数	初始值	优化参数范围
B_{s0}	1.5	1~3
B_{s1}	5.0	3~6
B_{s2}	8.2	6~10
H_{s0}	0.3	0~1
H_{s1}	0.6	0.1~1.5
H_{s2}	16.0	15~18
R_s	2.0	0.1~4
H_1	0	0.1~3
L_1	0	0.1~3

本文的定子槽型选为平底槽,根据槽型结构

合理选择优化参数的范围,以保证定子冲片的参数化模型不会出错。

2.2 Optislang 多目标优化

将不同工况下的二维有限元模型设置好定子辅助槽、定子齿槽的优化参数和目标函数,然后通过确定性试验设计(DOE)的方法对优化参数进行敏感性分析,检测对径向电磁力影响较大的重要参数及目标函数间是否存在冲突,再进行多目标优化;在满足优化参数范围、目标函数和约束条件的情况下获取相对最优解^[14-15]。

大多数实际的优化问题包含多个设计变量和优化目标,将其转化为设计变量 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T$ 与等式约束 $h_k(\boldsymbol{x})$ 和不等式约束 $g_j(\boldsymbol{x})$ 间的多目标优化问题。既满足变量范围又满足约束条件的可行解构成了 n 维设计空间,可以表示为

优化目标:
$$f_m(\boldsymbol{x}), m=1,2,\cdots,M \tag{7}$$

约束及参数范围:
$$\begin{cases} g_j(\boldsymbol{x}) \geq 0, j=1,2,\cdots,J \\ h_k(\boldsymbol{x}) = 0, k=1,2,\cdots,K \\ x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(R)}, i=1,2,\cdots,n \end{cases} \tag{8}$$

式中: $f_m(\boldsymbol{x})$ 为目标函数; $g_j(\boldsymbol{x})$ 为不等式约束; $h_k(\boldsymbol{x})$ 为等式约束; x_i 为变量,其中 $x_i^{(L)}$ 为变量范围的左边界, $x_i^{(R)}$ 为变量范围的右边界。

设计空间内的每个设计变量 x ,映射到 M 维目标空间均能得到一个点,该点对应一个解向量 $\boldsymbol{z}=(z_1,z_2,\cdots,z_M)^T$ 。在目标准则互斥的情况下,并不存在唯一解,所以需要优化目标之间的妥协,以寻找最佳平衡解。如果一个解不被任何其他解所支配,则目标空间中的对应点为 Pareto 最优解,所有 Pareto 最优解构成 Pareto 前沿^[10]。

利用上述优化算法能够得到电机不同运行工况下的 Pareto 前沿,图 3 中的黑点为满足三个谐

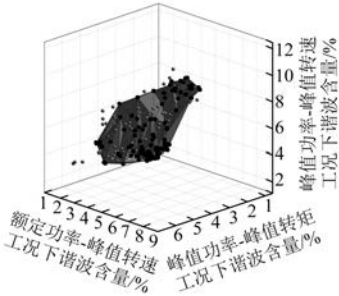


图 3 不同工况下优化目标的 Pareto 前沿

波含量约束的最优解,每个黑点对应一组设计变量值,通过权衡不同电机工况下的目标函数,电机定子齿槽及辅助槽优化后的参数见表 4。

表 4 电机定子齿槽优化后参数 mm

齿槽参数	优化值	齿槽参数	优化值
B_{s0}	1.8	H_{s2}	16.5
B_{s1}	5.7	R_s	2.5
B_{s2}	8.6	H_1	1.8
H_{s0}	0.5	L_1	0.7
H_{s1}	0.7	—	—

3 优化后性能分析

3.1 电磁力分析

电机优化前后 4 阶径向电磁力不同频率倍数下的电磁力密度对比,如图 4 所示。由图 4 可见,电机优化后的 4 阶径向电磁力波不同谐波频率下的径向电磁力密度均得到了削弱,尤其是 32 倍频的谐波幅值,从优化前的 13.95 kN/m^2 降低到 4.99 kN/m^2 ,其次是 40 倍频,表明该方法能够有效削弱电磁力。

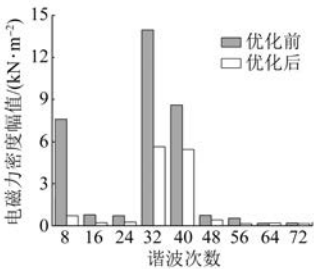


图 4 4 阶径向电磁力频谱分析

3.2 电机输出转矩分析

电机优化前后,额定工况下的转矩输出对比如图 5 所示。由图 5 可见,优化后电机输出转矩的平均值为 $121.5\text{ N}\cdot\text{m}$,比优化前电机输出转矩的平均值小 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$,在满足电流限制内均满足

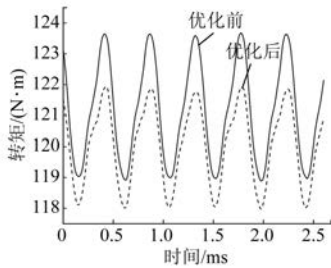


图 5 优化前后电机转矩对比

电机的额定转矩要求。同时,电机的转矩脉动也得到了优化,降低了 16.3%。

3.3 模态分析

利用有限元方法计算得到定子的低阶模态振型,如图 6 所示。电机在优化前后,二者定子各阶模态下的固有频率相差甚微,所以只列出了电机优化前的低阶模态振型及固有频率。当电磁力谐波的频率等于或者接近电机的固有频率时,电机将发生共振现象,使电机的振动噪声加剧,所以研究电机模态是为了考虑对应固有频率下电机是否会产生共振^[16-18]。



图 6 电机定子低阶模态振型

3.4 电磁噪声分析

本文 8 极 36 槽永磁同步电机采用转子 V 型分段斜极的方式来削弱齿谐波。将二维有限元模型计算得到的不同工况下的电磁力分别加载到对应的分段定子铁心上,如图 7 所示。利用模态叠加原理对谐波响应进行分析,再将谐波响应的计算结果导入到 Harmonic Acoustics 模块,对电磁噪声进行计算,得到电机优化前后的声场结果^[19-20]。

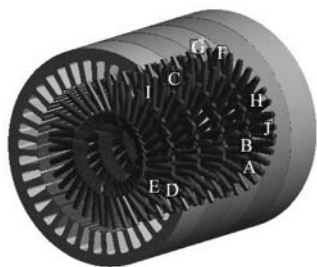


图 7 电机分析谐波响应

图 8 为电机优化前后空载工况下的电磁噪声对比。其中,图 8(a)为电机转速 10 000 r/min 时,不同谐波频率所对应电磁噪声的分布情况;图 8

(b)为电机不同转速下的 32 倍谐波频率所对应电磁噪声的分布情况。由图 8 可见,电机的声功率在极数的整数倍谐波频率附近出现波峰,且在转速 10 000 r/min 时,32 倍频的声功率达到最大,优化前的最大声功率为 102.7 dB,优化后的最大声功率为 98.8 dB,减小了 3.9 dB。在 10 000 r/min 转速下,32 倍谐波频率为 5 333.3 Hz,与电机 4 阶模态的固有频率相近,导致电机的振动噪声增大,所以在电机设计过程中要考虑共振对电磁振动噪声产生的影响,尽量避开共振频率点。

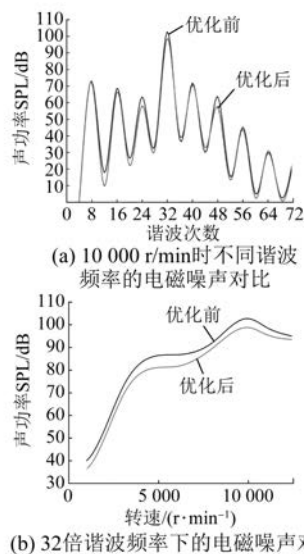


图 8 电机优化前后电磁噪声对比

4 试验验证

为了验证仿真计算的准确性,对优化后的样机进行噪声试验,结果如图 9 所示。由图 9 可见,在整个电机的运行区间,32 阶次电磁噪声最为明显,且随着转速的增加而变大,电机的转速范围在 9 500~11 000 r/min 时噪声问题最为突出,最大声功率为 98.0 dB,与仿真结果相差较小。该结果与上述电磁力分析和模态分析相一致,电机转速在 10 000 r/min 附近时,32 倍谐波频率与电机 4 阶模

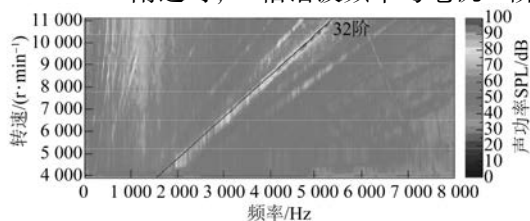


图 9 样机试验测得的噪声瀑布图

态的固有频率相接近,导致电磁噪声增大。

5 结 语

本文以一台电动汽车驱动用 8 极 36 槽内置式永磁同步电机为例,提出一种基于 Pareto 前沿对定子齿顶辅助槽及齿槽参数的多目标优化方法,削弱定子齿部受到的径向电磁力引起定子铁心振动变形而产生的电磁噪声,对电机优化前后的电磁力、电磁转矩等方面进行了对比分析,并对优化后的样机进行了试验验证,得到以下结论:

(1) 8 极 36 槽配合电机引入了阶次更低的电磁力,其对电磁噪声的影响更大,通过定子齿顶开辅助槽,改变电机的极槽配合,不仅削弱定子齿部受到的径向电磁力,而且降低了转矩脉动。

(2) 在高速工况下,32 倍谐波频率与 4 阶模态的固有频率相接近,导致电机的电磁噪声加剧,与样机的试验验证结果相一致,所以在电机设计的过程中应尽量避免低阶模态的固有频率,以免发生共振。

(3) 通过对定子辅助槽及齿槽参数的多目标优化,电机优化后的电磁噪声较优化前降低了 3.9 dB,对优化后的电机方案进行试验验证,实际值与仿真值贴近,证明了该优化方法的有效性。

【参 考 文 献】

- [1] ZHOU C X, HUANG X Y, LI Z K, et al. Design consideration of fractional slot concentrated winding interior permanent magnet synchronous motor for EV and HEV applications [J]. IEEE Access, 2021, 9: 64116.
- [2] EL-REFAIE A M. Fractional-slot concentrated windings synchronous permanent magnet machines: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2010, 57(1): 107.
- [3] RICK S, PUTRI A K, FRANCK D, et al. Hybrid acoustic model of electric vehicles: force excitation in permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2979.
- [4] ZUO S G, LIN U, WU X D. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6204.
- [5] 张冉,王秀和,乔东伟,等. 基于辅助槽的永磁电机激振力波削弱方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 103.
- [6] 杨浩东,陈阳生. 分数槽永磁同步电机电磁振动的分析与抑制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 83.
- [7] 谢颖,李飞,黎志伟,等. 内置永磁同步电机减振设计与研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5437.
- [8] 李岩,李双鹏,周吉威,等. 基于定子齿削角的近极槽永磁同步电机振动噪声削弱方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 45.
- [9] 张耀,杜荣法,赵新超,等. 基于多目标遗传算法的电机噪声优化 [J]. 微特电机, 2020, 48(4): 21.
- [10] 罗玉涛,卢若皓. 基于结构参数分级优化的电机电磁噪声抑制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(9): 56.
- [11] 王明星,王爱元,李轶华,等. 一种改善电机性能的多目标优化方法 [J]. 微特电机, 2019, 47(1): 41.
- [12] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [13] 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.
- [14] 刘国海,王艳阳,陈前. 非对称 V 型内置式永磁同步电机的多目标优化设计 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 385.
- [15] SHI J C, QIAN C, YU Y. Evolutionary multi-objective optimization made faster by sequential decomposition [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation, San Sebastian, 2017: 2488.
- [16] 李晓华,黄苏融,张琪. 电动汽车用永磁同步电机定子结构固有频率分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2383.
- [17] LIN F, ZUO S, DENG W, et al. Modeling and analysis of electromagnetic force, vibration, and noise in permanent-magnet synchronous motor considering current harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7455.
- [18] 兰华. 永磁同步电机的电磁力波与电磁振动研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [19] 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.
- [20] JANG I S, HAM S H, KIM W H, et al. Method for analyzing vibrations due to electromagnetic force in electric motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 297.