

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.013

一种永磁同步电机齿槽转矩削弱方法

王长城, 郭辉, 孙裴, 刘宁宁, 王岩松, 秦一菲

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对永磁同步电机存在的齿槽转矩问题,提出一种电机结构优化的方法削弱齿槽转矩。基于能量法和傅里叶分解法对齿槽转矩进行了解析,确定永磁体厚度和定子槽口宽度作为设计变量优化电机结构。对比优化前后齿槽转矩及其谐波,结果显示所提出的电机结构优化方法能够有效降低12次,24次及36次谐波幅值,且优化之后的峰-峰值仅为优化之前的7.99%。通过比较优化前后电机稳态运行时的电磁转矩,验证了所提出的结构优化方法能够有效改善电机输出转矩特性。

关键词:永磁同步电机;齿槽转矩;能量法;傅里叶分解法;永磁体厚度;槽口宽度
中图分类号:TM341 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)06-0062-05

Method for Reducing Cogging Torque of Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Changcheng, GUO Hui, SUN Pei, LIU Ningning, WANG Yansong, QIN Yifei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A method of motor structure optimization was proposed for reducing cogging torque of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The cogging torque was analyzed based on the energy method and Fourier decomposition method. Then, the thickness of the permanent magnet and the width of the stator slot opening were selected as the design variables to optimize motor structure. Comparing origin and optimized cogging torque and its harmonics, the results show that the proposed motor structure optimization method can effectively reduce the 12th, 24th, and 36th harmonic amplitudes, and the peak-to-peak value after optimization is only 7.99% of that before optimization. By comparing the electromagnetic torque during steady-state operation of origin and optimized motor, it is verified that the proposed structure optimization method can effectively improve the motor output torque characteristics.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; cogging torque; energy method; Fourier decomposition method; permanent magnet thickness; slot opening width

永磁同步电机在汽车、数控机床和微电子等领域应用广泛,具有结构简单可靠、体积小、功率密度高、动态性能良好,且在宽运行范围保持高效率等优点^[1-3]。永磁磁场与开槽铁芯之间相互作用产生的齿槽转矩会导致电机转矩波动,进而影响电机的控制精度,增大电机振动噪声,是永磁同步电机设计中必须重点考虑的问题^[4]。

齿槽转矩可以通过对电机本体结构优化设计来抑

制,当前提出的用以削弱永磁电机的齿槽转矩的方法有多种^[5-7]。现有永磁同步电机齿槽转矩的削弱措施主要分为2类:①改变电枢参数,包括斜槽、辅助槽、分数槽、槽口偏移、槽口宽度以及改变电枢齿形状等^[8-10];②改变永磁体磁极参数,表面式永磁同步电机主要包括斜极、改变极弧系数和极弧系数组合等^[11-12],内置式永磁同步电机主要包括改变极弧系数、转子铁芯外表面开槽和改变转子外表面形状

收稿日期:2018-04-14;修回日期:2018-08-15

基金项目:国家自然科学基金(51675324);上海市自然科学基金(14ZR1418600)。

第一作者简介:王长城(1991),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机振动噪声。通信作者:郭辉(1981),男,山东曹县人,博士,副教授,主要研究方向为车辆振动噪声控制、智能压电机构设计。E-mail:hgsues@163.com

等^[13-14]。方法①中,斜槽、辅助槽、分数槽和槽口偏移使电枢结构复杂,实际加工困难;改变槽口宽度和电枢齿形状使电机的输出转矩减小,降低了电机性能。方法②中,斜极、改变极弧系数和极弧系数组合需要对永磁体进行特殊加工,造成永磁材料的浪费;转子铁芯开槽、改变转子外表面形状使结构复杂化,加工难度大。基于此,课题组提出以永磁体厚度、定子槽口宽度为设计变量优化电机结构削弱永磁同步电机齿槽转矩的方法,旨在不增加电机结构复杂度的情况下,既能削弱永磁同步电机齿槽转矩,又能改善电机稳态运行时的电磁转矩。

1 齿槽转矩解析

齿槽转矩是永磁电机不通电时永磁体和铁芯之间相互作用产生的转矩,是电机内部磁共能 W 相对于位置角 α 的负导数,即

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中: T_{cog} 为永磁电机齿槽转矩; W 为电机内部磁共能; α 为齿中心线与相应的永磁磁极中心线之间的夹角。

为便于研究,做以下假设^[15]:①电枢铁芯的磁导率无穷大,即 $\mu_{\text{Fe}} = \infty$;②永磁材料的磁导率与空气相同。由此,永磁电机内的磁场能量有

$$W \approx W_{\text{airgap}} + W_{\text{PM}} \quad (2)$$

式中: W_{airgap} 为气隙磁场能量; W_{PM} 为永磁体磁场能量。

当定转子相对位置发生变化时,在转子铁芯内部永磁体内的能量可以认为不变化,因而不产生齿槽转矩,只考虑产生齿槽转矩的气隙内磁场能量^{[11]147},即

$$W \approx W_{\text{airgap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dV \quad (3)$$

式中: B 为气隙磁密; V 为气隙体积; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

气隙磁密 B 沿电枢表面的分布可近似表示为

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \quad (4)$$

式中: θ 为转子位置角; $B_r(\theta)$ 为永磁体产生的磁密沿圆周的分布; $\delta(\theta, \alpha)$ 为气隙长度; $h_m(\theta)$ 为沿圆周不同位置的永磁体厚度。

则公式(3)可以表达为

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) \left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 dV \quad (5)$$

若永磁电机磁极分布均匀,可以得到 $B_r^2(\theta)$ 在 $[-\pi/2p, \pi/2p]$ 的傅里叶展开式,即

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{rn} \cos(2np\theta) \quad (6)$$

式中: $B_{r0} = \alpha_p B_r^2$; $B_{rn} = \frac{2}{n\pi} B_r^2 \sin(n\alpha_p \pi)$; α_p 为永磁磁极的极弧系数; B_r 为永磁体剩磁密度; B_{r0}, B_{rn} 为 $B_r^2(\theta)$ 的傅里叶分解系数; p 为极对数。

在 $[-\pi/z, \pi/z]$ 内对相对气隙磁导平方 $\left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2$ 进行傅里叶展开,即

$$\left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos nz(\theta + \alpha) \quad (7)$$

式中: G_0, G_n 为相对气隙磁导平方的傅里叶分解系数, $G_0 = \left(\frac{h_m}{h_m + \delta} \right)^2$, $G_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \left(\frac{h_m}{h_m + \delta} \right)^2 \sin(n\pi - \frac{nz\theta_s}{2})$; z 为定子槽数; δ 为等效气隙长度; h_m 为永磁体充磁方向厚度; θ_s 为定子槽口宽度对应的弧度值。

不考虑斜槽时,利用三角函数在 $[0, 2\pi]$ 内积分的特点,将公式(5)~(7)代入到公式(1)得到齿槽转矩

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_{\text{Fe}}}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n (N_p) B_r \frac{nz}{2p} \sin(nz\alpha) \quad (8)$$

式中: L_{Fe} 为电枢铁芯的轴向长度; R_1 为电枢外半径; R_2 为定子轭内半径; n 是使 $\frac{nz}{2p}$ 为整数的整数; $N_p = \frac{2p}{h(z, 2p)}$, $h(\cdot)$ 为取最大公约数符号。

分析公式(7)和公式(8)可知,在不考虑极弧系数 α_p , 气隙长度 $\delta(\theta, \alpha)$, 电枢铁芯长度 L_{Fe} , 电枢外半径 R_1 , 定子轭内半径 R_2 对齿槽转矩影响的情况下,且当永磁体材料、定子槽数 z 和极对数 p 一定时,齿槽转矩主要受永磁体厚度 h_m 和定子槽口宽度 θ_s 影响。因此,课题组从电机结构优化方面入手,研究分析永磁体厚度和定子槽口宽度对齿槽转矩的削弱作用。

2 齿槽转矩削弱

永磁同步电机齿槽转矩削弱是复杂的约束非线性优化设计问题,故课题组应用遗传算法对永磁同步电机本体结构进行优化设计,进而削弱齿槽转矩^[16]。

课题组选取齿槽转矩 T_{cog} 和气隙磁密 B 为目标函数,永磁体厚度和定子槽口宽度为优化设计变量,则得到永磁同步电机结构优化的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{x \in D} T_{\text{max}}(X); \\ & \min_{x \in D} \text{abs}(T_{\text{min}}(X)), X \in R^2; \\ & \max_{x \in D} B_{\text{max}}(X); \\ & D = \{X | (x_1 \in [2, 3], x_2 \in [0, 4])\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： T_{max} ， T_{min} 分别为齿槽转矩的最大值和最小值； $abs()$ 为取绝对值符号； B_{max} 为气隙磁密最大值； x_1 ， x_2 分别为永磁体厚度和定子槽口宽度。

课题组以一台4极24槽内置式永磁同步电机为研究对象，以有限元法计算齿槽转矩，并应用遗传算法优化结构以削弱齿槽转矩。表1所示为电机模型参数，图1所示为所研究电机1/4结构图。

表1 内置式永磁同步电机结构参数
Table 1 Structural parameters of interior permanent magnet synchronous motor

定子外径/mm	定子内径/mm	转速/(r·min ⁻¹)	转子外径/mm	转子内径/mm	电枢铁芯长度/mm
112	56	1 800	55	6	60
气隙长度/mm	永磁体厚度/mm	永磁体宽度/mm	永磁体极数	定子槽数	定子槽口宽度/mm
0.5	2.5	21.81	4	24	2

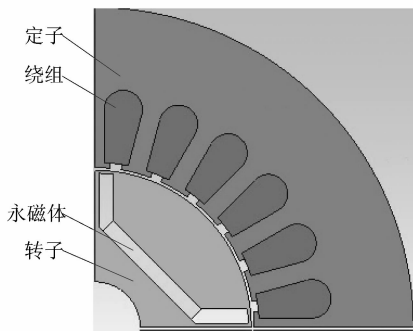


图1 内置式永磁同步电机1/4结构
Figure 1 1/4 structure of interior permanent magnet synchronous motor

图2所示是采用有限元法计算得到的电机齿槽转矩和定子绕组通电后稳态运行的电磁转矩，图3所示为齿槽转矩和电磁转矩功率谱。由图2可知，电机通电稳态运行时，齿槽转矩幅值接近稳态电磁转矩的8%，电磁转矩波形受齿槽转矩影响很大；由图3可知，稳态运行时电磁转矩的主要谐波成分为6次，12次，24次和36次谐波，其中12次谐波和24次谐波幅值最大；同时，齿槽转矩的主要谐波成分为12次，24次和36次谐波。

为分析永磁体厚度和定子槽口宽度对永磁同步电机齿槽转矩的影响规律，计算不同永磁体厚度、定子槽口宽度的齿槽转矩，气隙磁密以及齿槽转矩功率谱，结果如图4~7所示。由图4和图5可见，齿槽转矩、气隙磁密分别与永磁体厚度呈非线性负相关关系和线性

正相关关系，齿槽转矩、气隙磁密与定子槽口宽度呈正相关关系。由图6和图7可见，永磁体厚度的增加主要降低齿槽转矩的12次，24次和36次谐波幅值，定子槽口宽度的减小主要降低齿槽转矩12次谐波幅值。

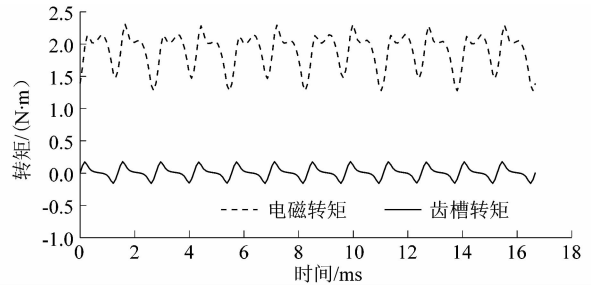


图2 电机齿槽转矩与电磁转矩波形
Figure 2 Cogging torque and electromagnetic torque of motors

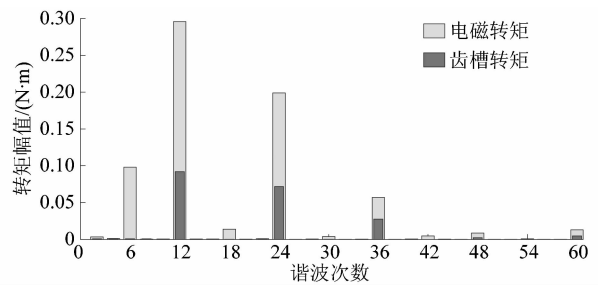


图3 齿槽转矩与电磁转矩谐波功率谱
Figure 3 Harmonic power spectrum of cogging torque and electromagnetic torque

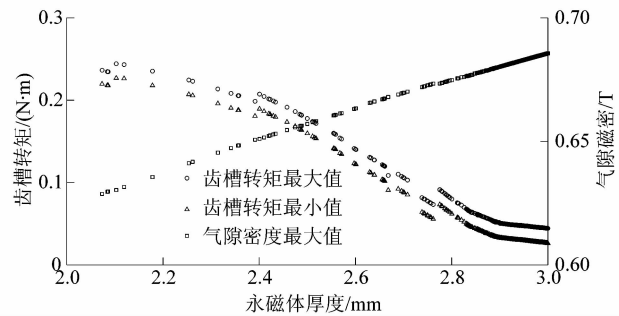


图4 齿槽转矩与气隙磁密随永磁体厚度变化情况
Figure 4 Changes of cogging torque and air gap magnetic density with permanent magnet thickness

为削弱永磁同步电机齿槽转矩，且不降低电机性能，以公式(9)为数学模型优化电机结构，图8和图9分别为结构优化前后齿槽转矩波形、结构优化后齿槽转矩与电磁转矩波形。由图8和图9可见，经结构优化之后，齿槽转矩峰-峰值由0.338 N·m降至0.027 N·m，仅为原始值的7.99%，齿槽转矩所占电磁转矩最大值仅为1.2%。

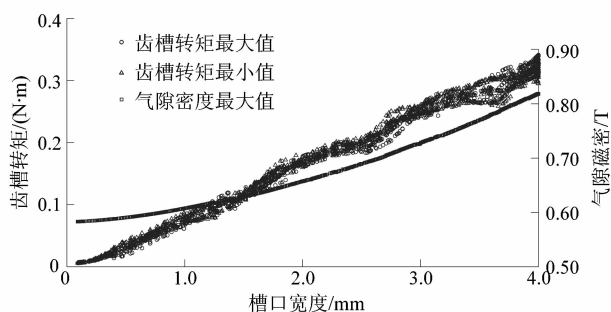


图5 齿槽转矩与气隙磁密随定子槽口宽度变化情况
Figure 5 Changes of cogging torque and air gap magnetic density with slot opening width

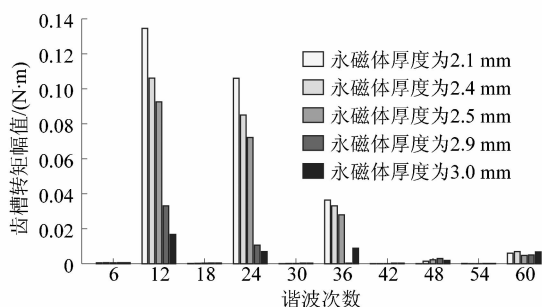


图6 不同永磁体厚度齿槽转矩谐波功率谱
Figure 6 Harmonic power spectrum of cogging torque with different permanent magnet thickness

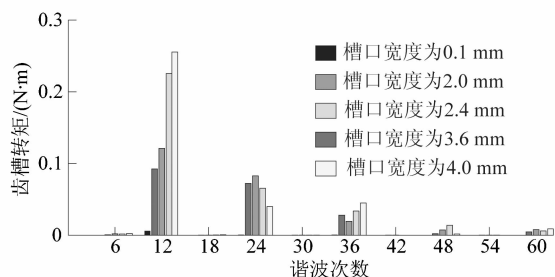


图7 不同定子槽口宽度齿槽转矩谐波功率谱
Figure 7 Harmonic power spectrum of cogging torque with different slot opening width

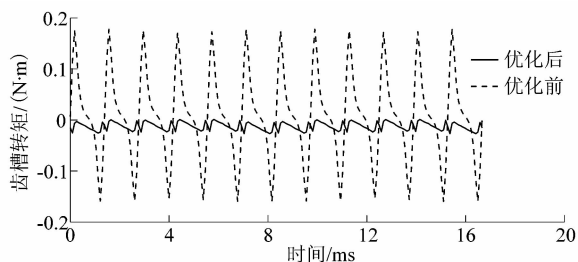


图8 结构优化前后齿槽转矩波形
Figure 8 Cogging torque waveform of origin and optimized structure

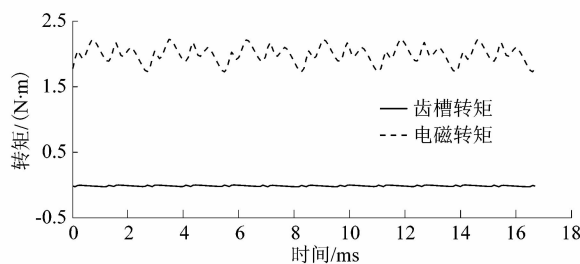


图9 结构优化后齿槽转矩与电磁转矩波形
Figure 9 Cogging torque and electromagnetic torque waveform after structure optimization

由以上分析可知,增加永磁体厚度主要降低齿槽转矩12次,24次和36次谐波幅值,减小定子槽口宽度主要降低齿槽转矩12次谐波幅值;对永磁体厚度和定子槽口宽度优化之后,所研究永磁同步电机齿槽转矩被有效削弱,峰-峰值仅为原始值的7.99%,齿槽转矩所占电磁转矩最大值也仅为1.2%。

3 结构优化对电机性能的影响

为了研究永磁同步电机齿槽转矩削弱措施对电机性能的影响,课题组利用有限元法计算并比较了结构优化前后气隙磁密波形以及电机通电稳态运行时的电磁转矩。

图10和图11分别为结构优化前后气隙磁密波形、电磁转矩波形。表2所示为课题组所研究永磁同步电机齿槽转矩削弱前后电机结构参数及电机性能对比。由图10可见,电机结构优化前后气隙磁密幅值略微下降0.041 T,变化微小;由表2可见,永磁同步电机削弱齿槽转矩后,电磁转矩纹波率由54.31%降至24.83%,电磁转矩平均值由1.894 N·m上升为1.994 N·m。

由以上分析可知,课题组提出的永磁同步电机齿槽转矩削弱方法,既能有效降低齿槽转矩,又能提高电机性能且不增加电机实际加工难度。

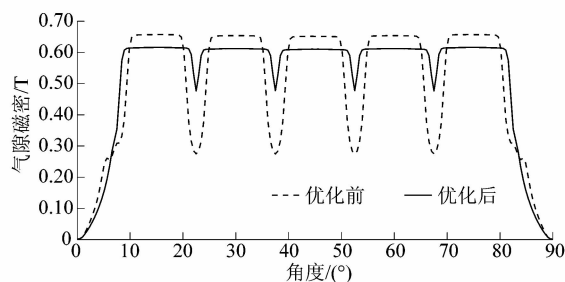


图10 结构优化前后气隙磁密波形
Figure 10 Air gap magnetic density waveform of origin and optimized structure

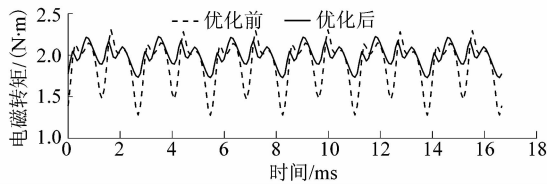


图 11 结构优化前后电磁转矩波形

Figure 11 Electromagnetic torque waveform of origin and optimized structure

表 2 结构优化前后电机性能及参数对比

Table 2 Comparison of motor performance and parameters of origin and optimized structure

	永磁体厚度/mm	定子槽口宽度/mm	齿槽转矩最大值/ (N·m)	齿槽转矩最小值/mm
优化前	2.50	2.00	0.178	-0.160
优化后	2.95	0.52	0.001	-0.027

	气隙磁密最大值/T	齿槽转矩与电磁转矩比值/%	电磁转矩平均值/ (N·m)	电磁转矩纹波率/%
优化前	0.657	8.0	1.894	54.31
优化后	0.616	1.2	1.994	24.83

4 结论

课题组通过对永磁同步电机齿槽转矩的解析,得到齿槽转矩的影响因素,进而采用以永磁体厚度和定子槽口宽度为设计变量优化永磁同步电机本体结构的方法削弱齿槽转矩。主要得到如下结论:

1) 永磁体厚度、定子槽口宽度通过影响气隙相对磁导进而影响齿槽转矩。

2) 齿槽转矩与永磁体厚度呈非线性负相关关系,增加永磁体厚度主要削弱齿槽转矩 12 次,24 次和 36 次谐波幅值;齿槽转矩与定子槽口宽度呈线性正相关关系,减小定子槽口宽度主要降低齿槽转矩 12 次谐波幅值。

3) 文中提出的永磁体厚度和定子槽口宽度结构优化方法能够有效削弱永磁同步电机的齿槽转矩,齿槽转矩峰-峰值仅为优化前的 7.99%,稳态运行时所占电磁转矩比值由 8.0% 降至 1.2%;稳态运行时的电磁转矩平均值由 1.894 N·m 上升为 1.994 N·m,电磁转矩纹波率由 54.31% 降至 24.83%。

参考文献:

[1] HUANG Xuzhen. Winding temperature field model considering void

ratio and temperature rise of a permanent-magnet synchronous motor with high current density [J]. IEEE transactions on industrial electronics,2017,64(3):2168-2177.

[2] 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):53-59.

[3] 鲍晓华,吴长江,方金龙. 轴向永磁体组合削弱表贴式永磁同步电机齿槽转矩的方法研究[EB/OL]. (2018-03-05)[2018-04-02]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/11.2188.TM.20180305.1436.029.html>.

[4] 唐旭,王秀和,田蒙蒙,等. 基于改变定子齿槽参数的异步起动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 电工技术学报,2016,31(23):1-8.

[5] ASHABANI M,MOHAMED Y A. Multiobjective shape optimization of segmented pole permanent-magnet synchronous machines with improved torque characteristics [J]. IEEE transactions on magnetics mag,2011,47(4):795-804.

[6] FANG Hongwei,WANG Dan. A novel design method of permanent magnet synchronous generator from perspective of permanent magnet material saving[J]. IEEE transactions on energy conversion,2017,32(1):48-54.

[7] 唐旭,王秀和,孙树敏,等. 异步起动永磁同步电动机齿槽转矩的解析分析和削弱措施研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1395-1403.

[8] ZHU Z Q,RUANGSINCHAIWANICH S,ISHAK D,et al. Analysis of cogging torque in brushless machines having nonuniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets [J]. IEEE transactions on magnetics,2005,41(10):3910-3912.

[9] WANG Daohan,WANG Xiuhe,QIAO Dongwei, et al. Reducing cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors by nonuniformly distributed teeth method [J]. IEEE transactions on magnetics,2011,47(9):2231-2239.

[10] 刘婷. 基于重复单元削弱永磁风力发电机齿槽转矩[J]. 电工技术学报,2011,26(12):43-48.

[11] 王秀和,杨玉波,丁婷婷,等. 基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):146-149.

[12] 杨玉波,王秀和,丁婷婷,等. 极弧系数组合优化的永磁电机齿槽转矩削弱方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):7-11.

[13] KANG G H,SON Y D,KIM G T, et al. A novel cogging torque reduction method for interior-type permanent-magnet motor [J]. IEEE transactions on industry applications,2009,45(1):161-167.

[14] 上官璇峰,李正修,蒋思远. 转子槽参数对开槽实芯转子永磁电机的影响[J]. 机电工程,2017,34(11):1293-1298.

[15] 宋伟,王秀和,杨玉波. 削弱永磁电机齿槽转矩的一种新方法[J]. 电机与控制学报,2004,8(3):214-217.

[16] 于力. 基于遗传算法的中小型同步电机优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2007:18.