

内置式 Halbach 永磁同步电机的 参数敏感度分层优化设计

高峰阳¹, 高建宁¹, 李明明¹, 姚普², 宋志翔¹, 杨凯文¹, 高翊宇¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 730070, 兰州; 2. 西北工业大学自动化学院, 710072, 西安)

摘要: 针对内置式永磁同步电机齿槽转矩和转矩脉动大引起的振动噪声问题,提出一种转子开辅助槽的内置式 Halbach 永磁同步电机结构。首先,计算电机电磁转矩、气隙磁密、齿槽转矩的解析函数,并建立电机仿真模型。其次,利用参数敏感度和中心复合设计响应面相结合的分析方法对电机结构参数进行分层优化,两层分别采用最大最小蚁群算法和参数扫描法寻优。最后,将优化后的结构与相同永磁体体积的普通 V 型、倒三角型和倒三角开槽型 3 种电机的电磁性能进行对比。结果表明:所提出的内置式 Halbach 开槽型永磁同步电机在不损失电磁转矩的基础上,大幅度降低了齿槽转矩,抑制了转矩脉动,改善了气隙磁密和反电势波形的正弦度,有效提升了电机的电磁性能。

关键词: 内置式永磁同步电机;转子辅助槽;Halbach 永磁体;参数敏感度分层;响应面法

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205018 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0180-11



OSID 码

Optimization Design of Halbach Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Parameter Sensitivity Stratification

GAO Fengyang¹, GAO Jianning¹, LI Mingming¹, YAO Pu², SONG Zhixiang¹,
YANG Kaiwen¹, GAO Xuanyu¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To solve vibration and noise problems caused by large cogging torque and torque ripple of an interior permanent magnet synchronous motor, a Halbach interior permanent magnet synchronous motor with rotor auxiliary slots is proposed. First, the analytic functions of the motor's electromagnetic torque, air-gap flux density, and cogging torque are calculated, and the motor simulation model is established. Secondly, motor structure parameters are optimized hierarchically using the analysis method combining parameter sensitivity and central composite design response surface, and both layers are optimized by using the MAX-MIN ant system and parameter sweep respectively. Finally, the electromagnetic performance of the optimized structure is compared with that of ordinary V-type, inverted-triangular and inverted-triangular slotted motors with the same permanent magnet volume. The results show that the proposed motor can greatly reduce the cogging torque, suppress the torque ripple, and improve the air-gap flux density, sine back EMF, and the electromagnetic performance of the motor without loss of electromagnetic torque.

Keywords: interior permanent magnet synchronous motor; rotor auxiliary slots; Halbach permanent magnet; parameter sensitivity stratification; response surface method

内置式永磁同步电机(IPMSM)利用交、直轴磁阻不对称产生的磁阻转矩带来更高的功率密度,提高电机效率和弱磁扩速能力,被广泛用于电动汽车等领域^[1-3]。然而,IPMSM 存在齿槽转矩和转矩脉动大的缺点,引起电机的振动和噪声,导致电动汽车在运行中的平稳舒适度降低,还会造成轴承的磨损和整体绝缘能力的下降^[3-5]。

合理优化定转子结构、改变主磁极充磁方式可以减小齿槽转矩和转矩脉动。国内外学者从优化定子结构入手,提出定子斜槽和分数槽结构来削弱转矩脉动,但斜槽结构在生产时需要特殊的夹具,增加了绕线难度;当定子槽数为奇数^[2]采用分数槽结构时,电机将会产生不平衡磁拉力和较大的低阶力波。文献[6-7]提出定子齿开槽和两侧削角的结构,并比较了开槽形状、深度、宽度和不同削角类型对电机振动的改善效果,但没有分析结构改变对电磁性能的影响。从优化转子结构方面:文献[8]提出了“Machao”结构降低了电机的转矩脉动,但仅考虑了磁阻转矩对转矩脉动的影响。文献[9-10]采用转子开槽的结构来降低电机齿槽转矩,指出当辅助槽结构超出磁临界值时,齿槽转矩反而会增大,但此方法在降低齿槽转矩的同时会减小电磁转矩。文献[11]提出表贴式永磁同步电机部分分段 Halbach 结构,在抑制电机齿槽转矩方面起到了很好的效果,但此结构未能改善电机转矩脉动。文献[12-14]提出了转子分段斜极、永磁体和磁钢不同结构对电磁振动的影响情况,但优化分析均存在一定的局限性。

近年来,电机优化采用诸如粒子群优化算法、遗传算法^[15]、模拟退火算法等,以上算法全局搜索能力强且不会依赖于初始值,很好地解决了局部优化的难题,但单一算法未考虑参数间的影响权重,得到的优化值并不理想。文献[16]将遗传算法和模拟退火算法相结合,优化了双定子电机的永磁磁链,但算法耗时长优化效率较低。文献[17]将所需优化的结构参数进行敏感度分析,根据参数影响权重进行分层降维,不仅降低了参数间的交叉干扰,而且降维后的参数更加便于寻优,再结合多目标方法进行优化设计,证明参数敏感度分层法^[18],提高了电机优化效率。文献[19-21]利用响应面法(RSM)和多目标遗传算法对电机进行优化。RSM 法能用较少的数据拟合出多维曲面,准确地模拟出参数和目标之间

的定量关系缩小优化范围,但所用多目标遗传算法寻优复杂。文献[22]将蚁群算法引入到电机优化中,在寻优过程中具有较强的全局收敛和进化能力,凸显了蚁群算法的优越性。最大最小蚁群算法(MMAS)是一种启发式仿生类并行的改进型蚁群算法,相较于传统蚁群算法具有较强的鲁棒性。

为此,本文提出一种永磁体 Halbach 充磁同时转子开辅助槽的 IPMSM 结构。首先,计算电机数学模型,用有限元软件对电机模型验证。其次,将优化参数进行敏感度分层,通过 RSM 拟合多维曲面定位优化范围,利用 MMAS 算法和参数扫描法优化电机结构。最后,通过与普通 V 型、倒三角型和倒三角开槽型 3 种 IPMSM 的气隙磁密谐波畸变率(THD)、电磁转矩等参数进行对比,验证优化后电机的优越性。

1 电机解析模型

1.1 电机结构

Halbach 开槽型电机结构如图 1 所示,转子表面开 8 个半圆形辅助槽,每极永磁体由“V 型”和“一型”两部分组成,其中“V 型”永磁体采用平行充磁方式,“一型”永磁体分为 3 段,中间(1)区域采用平行充磁,两侧(2)和(3)区域采用 Halbach 充磁,充磁角度为 θ ,具体充磁方式如图 2 所示。

为计算得到解析模型的准确性,做出如下假设:

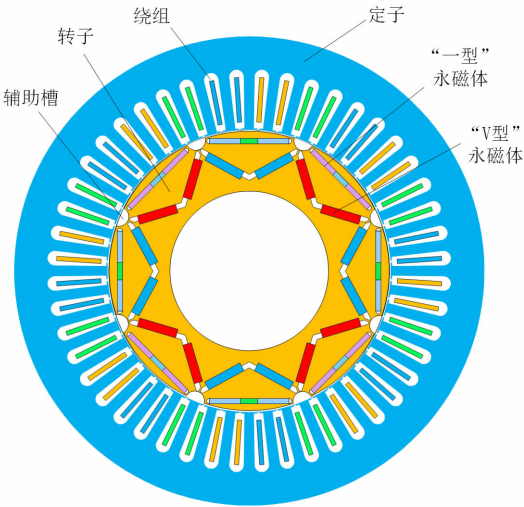


图 1 内置式 Halbach 电机结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of interior Halbach motor structure

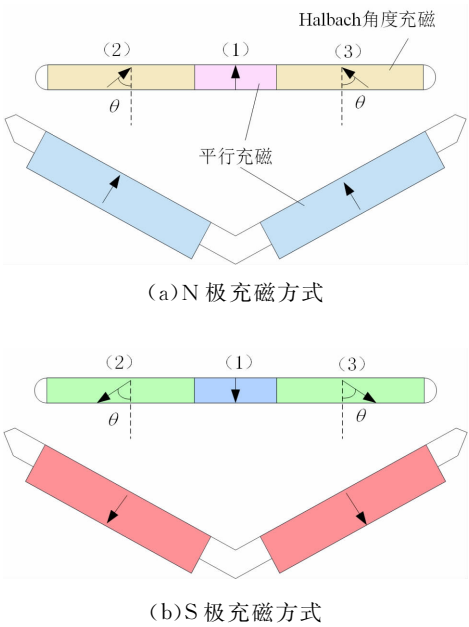


图 2 Halbach 永磁体一对极的充磁方式

Fig. 2 One-pole magnetizing method of Halbach permanent magnet

铁心磁导率无穷大且永磁体为实际磁导率;不考虑电机中的涡流、磁滞损耗;忽略局部饱和及漏磁现象;电机电流为三相对称正弦电流。

定转子空载条件下磁场分布如图 3 所示,其中左半圆为电机磁密云图分布情况,“一型”永磁体外侧边缘磁密值较大同时此处磁力线分布也较为密集,最大磁密为1.989 6 T;右半圆为磁力线分布,验证了磁路结构的合理性。

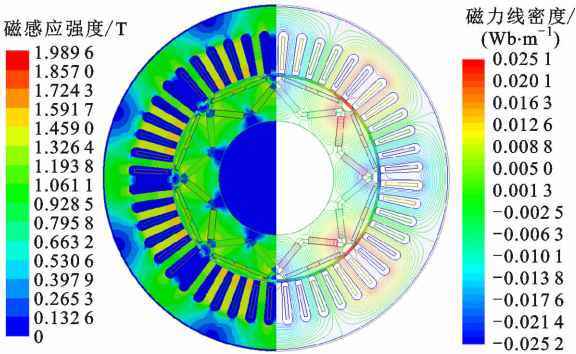


图 3 磁密云图与磁力线分布图

Fig. 3 Magnetic density cloud map and magnetic field line distribution map

1.2 电磁转矩

Halbach 开槽型 IPMSM 的相量图如图 4 所示。通过 dq 轴坐标变换,求得电机电压、电流、磁链和电磁转矩的 dq 轴分量

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\phi_q + R_1 i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\phi_d + R_1 i_q \\ i_d = i_s \sin\beta \\ i_q = i_s \cos\beta \\ \psi_d = L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_d 、 ϕ_q 为定子磁链直轴、交轴分量; L_d 、 L_q 为定子绕组直轴、交轴电感分量; u_d 、 u_q 为定子电压直轴、交轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流直轴、交轴分量; i_s 为定子电流在 dq 坐标下的有效值; β 为定子电流与 q 轴夹角; ω 、 R_1 为电角速度、定子相电阻。

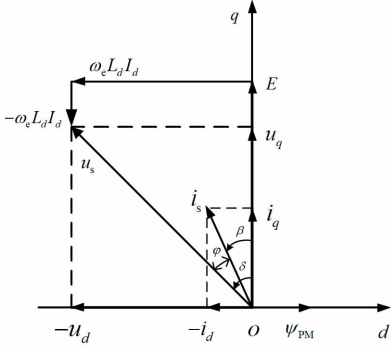


图 4 电机相量图

Fig. 4 Motor phasor diagram

电机的电磁转矩由永磁转矩和磁阻转矩两部分组成, P 为极对数, Ψ_{PM} 为永磁磁链, T_{em} 、 T_{pm} 、 T_{re} 分别为电磁转矩、永磁转矩、磁阻转矩

$$T_{pm} = \frac{3}{2} P \Psi_{PM} i_q \quad (2)$$

$$T_{re} = \frac{3}{2} P (L_d - L_q) i_d i_q \quad (3)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \Psi_{PM} i_q + \frac{3}{2} P (L_d - L_q) i_d i_q \quad (4)$$

1.3 气隙磁密

定子齿部磁压降

$$F_{\delta t} = \frac{B_{\delta t} \delta}{\mu_0} \quad (5)$$

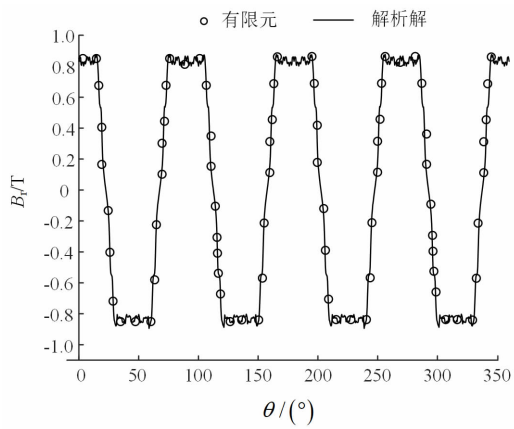
由于定子存在齿槽导致气隙不均匀,槽口处等效气隙增大,气隙磁导分布

$$\Lambda_1(\theta, \alpha) = \frac{\mu_0}{\delta_1(\theta, \alpha)} = \frac{B_{\delta t}(\theta, \alpha)}{F} \quad (6)$$

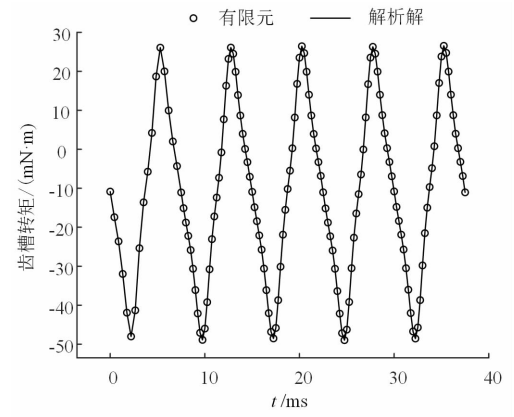
定子齿槽和转子相对位置如图 5 所示。

根据式(5)和式(6)可得 IPMSM 空载时气隙磁密

$$B_{rotor}(\theta, t) = \sum_{\gamma=1, 3, 5, \dots} F_{\gamma} \cos(\gamma p \theta - \gamma \omega t) \cdot$$



(a) 径向空载气隙磁密变化曲线



(b) 齿槽转矩变化曲线

图 7 有限元与解析解计算对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of finite element and analytical solution calculation

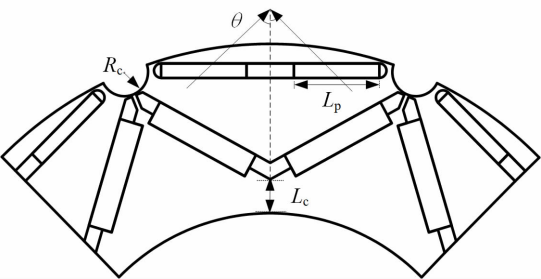


图 8 转子优化变量示意图

Fig. 8 Schematic diagram of rotor optimization variables

扰,造成仿真时间冗长和结果精度差的问题。为缩短仿真时间、提高优化精度,本文采用敏感度分层优化的方法,具体优化流程如图 9 所示。根据目标优化范围对 4 个参数进行敏感度分析,结果如图 10 所示。

根据参数敏感度分析可得: θ 和 R_c 对于齿槽转矩、电磁转矩和转矩脉动的灵敏度较高,故第一层优化变量选取 θ 和 R_c 参数,将齿槽转矩、电磁转矩和

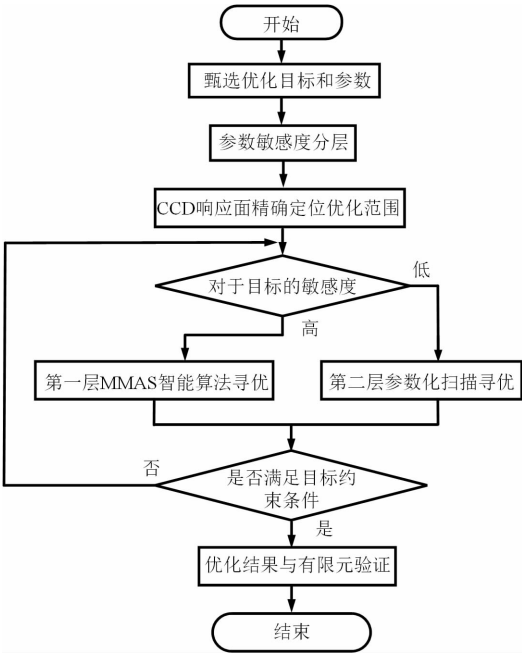


图 9 分层优化流程图

Fig. 9 Hierarchical optimization flowchart

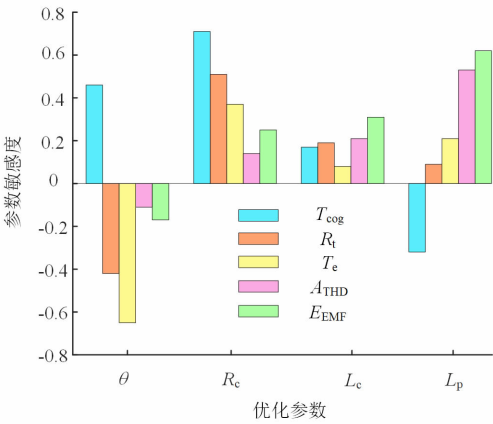


图 10 参数灵敏度分析

Fig. 10 Parameter sensitivity analysis

转矩脉动作为相应的优化目标,而反电势和空载 A_{THD} 两个优化目标受 L_p 和 L_c 参数的影响较大,故第二层优化变量选取 L_p 和 L_c 参数,反电势和空载 A_{THD} 作为待优化的目标。具体模型如下

$$\begin{cases} \text{minimize: } f_1(X_1) = (T_{\text{cog}}, R_t, T_e) \\ X_1 = (\theta, R_c) \\ \text{minimize: } f_2(X_2) = (A_{\text{THD}}, E_{\text{EMF}}) \\ X_2 = (L_p, L_c) \end{cases} \quad (13)$$

式中: X_1 和 $f_1(X_1)$ 分别为第一层优化变量和函数; X_2 和 $f_2(X_2)$ 分别为第二层优化变量和函数。

此优化将齿槽转矩和转矩脉动作为主要优化目标,各参数的约束条件如表 3 所示。

表 3 参数约束范围

Table 3 Parameter constraint range

优化层	参数变化范围	目标参数
第一层	$2\text{ mm}\leq R_c\leq 4.5\text{ mm}$ $25^\circ\leq\theta\leq 40^\circ$	T_{cog}
		R_t
		T_e
第二层	$5\text{ mm}\leq L_p\leq 18\text{ mm}$	A_{THD}
	$1\text{ mm}\leq L_c\leq 10\text{ mm}$	E_{EMF}

利用响应面法选取合理的设计试验,通过寻找各响应与因子之间的定量关系,得到使响应性能达到最佳时的参数组合;中心复合设计(CCD)通过二阶多项式拟合出多维曲面,在电机性能最优时定位得到参数范围,为下一步分层优化精确了优化区间,式(14)为响应面模型

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

(14)

式中: β_0 为常数; β_i 为一阶系数; β_{ii} 为二阶系数; β_{ij} 为二阶交互项系数; ϵ 为误差。

根据 CCD 中心复合响应面法利用少量数据,拟合得到第一、二层参数关于齿槽转矩的响应面模型如式(15)、式(16)所示

$$T_{\text{cog1}} = 230.76 - 49.84R_c - 5.39\theta + 0.58R_c\theta + 4.28R_c^2 + 0.06\theta^2$$

(15)

$$T_{\text{cog2}} = 335.61 - 26.97L_p - 86.9L_c + 0.67L_pL_c + 1.98L_p^2 + 0.158L_c^2$$

(16)

图 11、图 12 为 4 个参数关于齿槽转矩的响应面曲线,其中色谱的不同颜色表示所优化目标值的大小。从图中可以得出:随着 θ 和 L_c 的增大, T_{cog} 的幅值先减小后增大;随着 R_c 的增大和 L_p 值的减小,

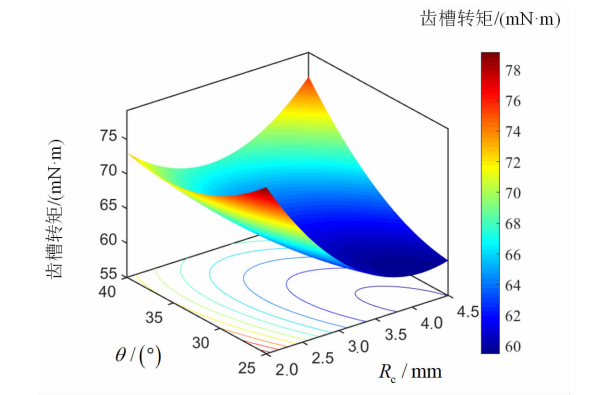


图 11 第一层参数齿槽转矩的响应面

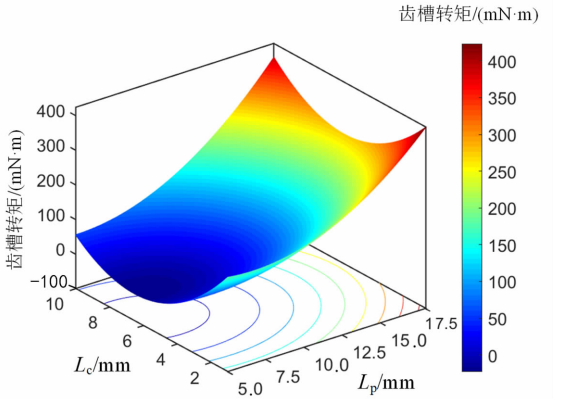


图 12 第二层参数齿槽转矩的响应面

Fig. 12 Response surface of the second layer parameter cogging torque

T_{cog} 的幅值呈递减趋势。

第一层参数关于转矩脉动的响应面模型函数如式(17)所示,式(18)为第二层参数关于反电势幅值的响应面模型

$$R_t = 166.19 + 0.51R_c - 0.11\theta - 0.009R_c\theta + 0.38R_c^2 - 0.004\theta^2$$

(17)

$$E_{\text{EMF}} = 238.79 + 19.1L_p - 3.33L_c - 0.048L_pL_c - 1.87L_p^2 + 0.345L_c^2$$

(18)

图 13、图 14 分别为参数转矩脉动和反电势的响应面曲线。

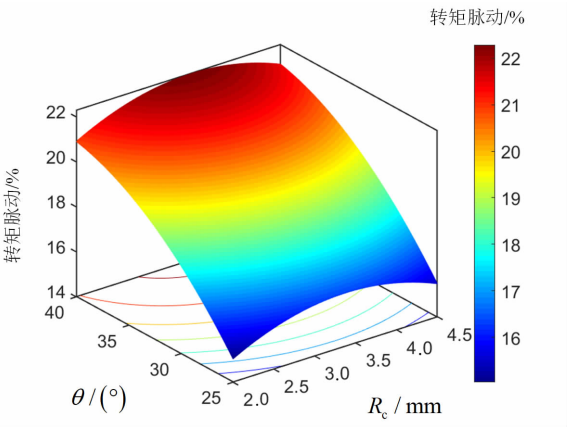


图 13 第一层参数转矩脉动的响应面

Fig. 13 Response surface of the first layer parameter torque ripple

由图 13 可以看出:随着 θ 的减小, T_e 呈递减趋势;随着 L_c 的增大, T_e 的值先增大后减小。从第二层参数关于反电势的响应面曲面图 14 分析可得,随着 L_p 的增大,反电势幅值不断增大;随着 L_c 的增大,反电势幅值先增大后减小。根据以上响应面曲

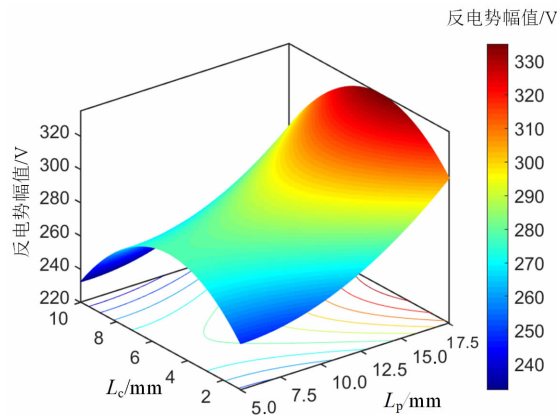


图 14 第二层参数反电势的响应面

Fig. 14 Response surface of the second layer parameter torque ripple

线可缩小参数的优化范围,其中 R_c 在 3.5~4.5 mm 的范围、 L_c 在 5~8 mm 的范围对电机性能影响较大。

2.3 第一层 MMAS 智能算法寻优

根据响应面曲线的优化范围,为得到第一层更精确的优化参数值,本文选用 MMAS 最大最小蚁群智能算法进行寻优,在计算中增加全局最优解的寻优频率,从而提高结果的精确度。MMAS 算法中,节点 i 到节点 j 转移的概率如下式所示

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s=a_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in a_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中: τ_{ij} 为信息素; η_{ij} 为启发因子,且 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$; a_k 为第 k 只蚂蚁下一步查询的节点。

MMAS 算法不会依赖初始线路的选择,有效防止搜索路径收敛于局部寻优中,将信息素的初值设置为算法上界,MMAS 算法结合响应面模型求得第一层参数最优解。优化前的参数值和 MMAS 算法求得结果如表 4 所示, θ 取 39.5° 、 R_c 取 4 mm。

表 4 MMAS 算法优化结果

Table 4 MMAS algorithm optimization results			
参数	优化前	MMAS 优化后	有限元验证
R_c/mm	2.5	4.0	4.0
$\theta/(^\circ)$	20.0	39.4	39.5
$T_{\text{cog}}/(\text{mN}\cdot\text{m})$	186.8	28.7	28.3
$R_t/\%$	14.1	11.7	11.7
$T_e/(\text{N}\cdot\text{m})$	155.0	162.1	161.9

将算法求得的最优解与有限元仿真优化值相比

较,两者的计算基本一致,表明构建的 CCD 响应面模型结合 MMAS 算法优化的可行性。齿槽转矩相比较优化前的 $186.8\text{ mN}\cdot\text{m}$,优化后降幅达 85%。

2.4 第二层参数扫描寻优

对于第二层 L_p 和 L_c 参数采用有限元参数化扫描寻优,根据判断准则函数来检验优化目标是否符合要求。判断准则函数为

$$\frac{f'_{\min}(x_i)}{f_{\min}(x_i)} \leqslant 1 \quad (20)$$

式中: $f'_{\min}(x_i)$ 为参数化扫描的最小值; $f_{\min}(x_i)$ 为第一层优化结果。

如图 15 和图 16 所示,分别对反电势幅值及空载 A_{THD} 值进行参数化扫描寻优,将参数的约束条件作为扫描范围,具体参数扫描优化结果如表 5 所示。

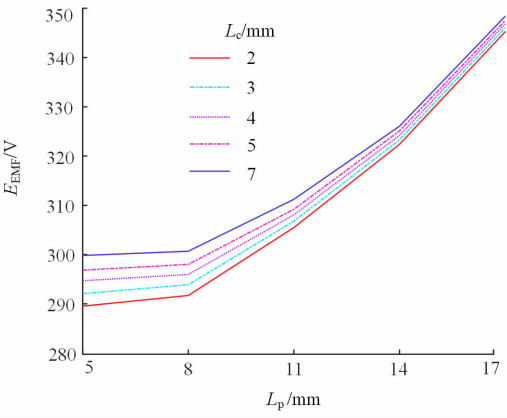


图 15 反电势幅值变化曲线

Fig. 15 Back EMF amplitude change curve

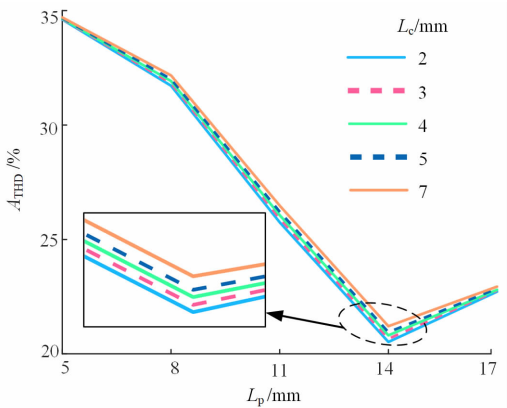


图 16 A_{THD} 变化曲线

Fig. 16 Air gap magnetic density THD change curve

随着 L_p 和 L_c 的增大,反电势幅值有大幅度的提升,故在 $L_p=18\text{ mm}$ 、 $L_c=7\text{ mm}$ 时,反电势幅值有最大值 348.3 V 。随着 L_p 的增大, A_{THD} 值先减小后增大,最小值在 $L_p=14\text{ mm}$,而随着 L_c 的增大,

A_{THD} 的变化趋势呈负相关且变化范围较小。在 $L_p=14\text{ mm}$, $L_c=2\text{ mm}$ 时, A_{THD} 取最小值 20.52% , 但依据评判标准函数及反电势幅值的变化趋势, 最终选择的参数值为 $L_p=18\text{ mm}$, $L_c=7\text{ mm}$, A_{THD} 为 22.94% 。

表 5 第二层参数优化结果

Table 5 The second layer parameter optimization results		
参数	优化前	优化后
L_c/mm	3.5	7.0
L_p/mm	10	18
$A_{\text{THD}}/\%$	29.7	22.9
E_{EMF}/V	325.0	348.3

3 电磁仿真对比分析

为了验证经过参数分层优化后电机电磁性能的有效性, 将所提出电机结构(d)与普通 V 型 IPMSM (a)、倒三角型 IPMSM (b) 以及倒三角开槽型 IPMSM (c) 这 3 种结构进行对比, 4 种电机结构的转子剖面如图 17 所示。同时, 为保证对比分析的可靠性, 在建模时 4 种电机结构参数一致, 永磁体用量基本相同, 并且对其他 3 种电机的参数进行相同方法的敏感度分层优化。

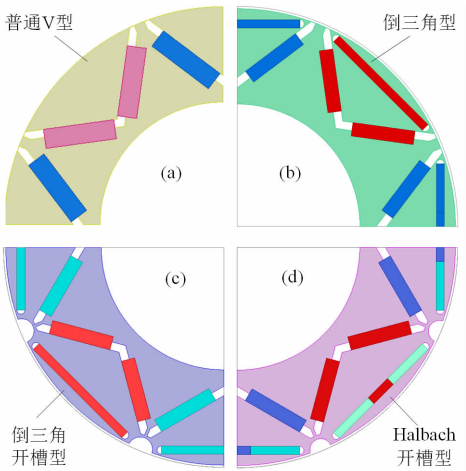


图 17 4 种结构电机的转子示意图

Fig. 17 Schematic diagram of the rotor of the four structure motors

对比 4 种电机结构的齿槽转矩、电磁转矩、空载反电势及其傅里叶分解和空载气隙磁密分布及其谐波分析, 通过以下曲线的直观对比, 得出了 4 种电机不同的电磁性能。图 18 为 1 个电角度内的齿槽转矩波形曲线, 齿槽转矩最大峰值为倒三角型 IPMSM 的 $722.1\text{ mN}\cdot\text{m}$, Halbach 开槽型 IPMSM

的齿槽转矩幅值为 $28.3\text{ mN}\cdot\text{m}$, 降幅达 96.08% , 极大地减小了 IPMSM 的齿槽转矩。

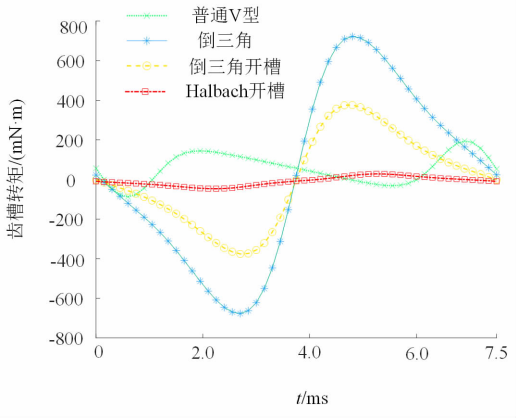


图 18 4 种结构的齿槽转矩对比

Fig. 18 Comparison of cogging torque of four structures

4 种结构的电磁转矩对比如图 19 所示。可以看出: Halbach 开槽型 IPMSM 电磁转矩脉动相较于倒三角型 IPMSM 的 13.7% , 下降到 9.8% , 下降率为 28.5% ; 优化后的 Halbach 开槽型结构不仅平均转矩增大, 而且其转矩脉动相比于其他 3 种电机有一定程度的下降, 从而使电机既符合转矩输出要求, 又能在运行时保证噪声更低、振动更小的平稳工况。

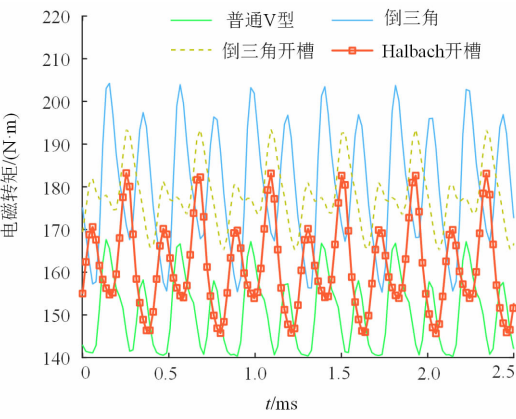


图 19 4 种结构的电磁转矩对比

Fig. 19 Comparison of electromagnetic torque of four structures

4 种结构的反电势和反电势谐波含量对比如图 20 和图 21 所示, Halbach 开槽型 IPMSM 的空载反电势幅值为 348.3 V , 3 次谐波降低了 43.7% , 11 次谐波降低了 91.5% , 5 次、7 次、9 次、13 次谐波幅值略有下降。反电势 THD 值 E_{THD} 从普通 V 型结构的 22.5% 下降到 Halbach 开槽型结构的 12.8% , 下降率为 43.1% 。虽然 Halbach 开槽型 IPMSM 的反电势幅值略有下降, 但其 E_{THD} 大幅度降低, 使反电势波形更接近于正弦波。

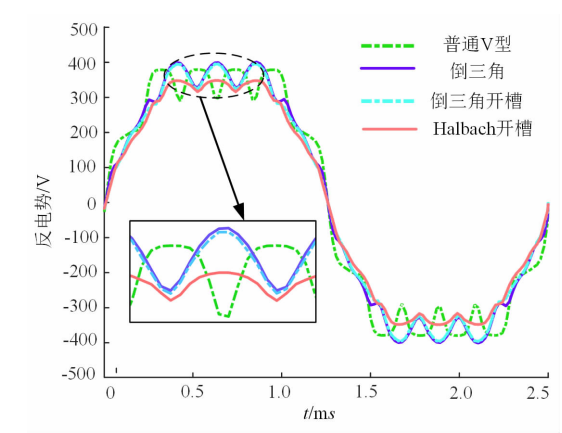


图 20 4 种结构的反电势对比
Fig. 20 Comparison of back EMF of four structures

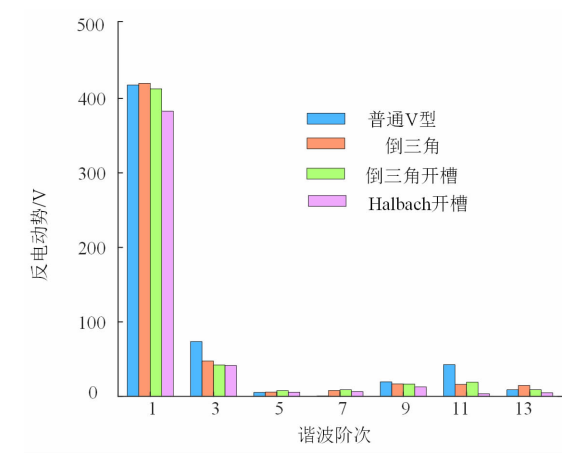


图 21 4 种结构的反电势谐波含量对比
Fig. 21 Comparison of EMF harmonics content of four structures

4 种电机的空载气隙磁密波形如图 22 所示。从图中可以看出, Halbach 开槽型结构的气隙磁密幅值略有降低且曲线更为平滑。

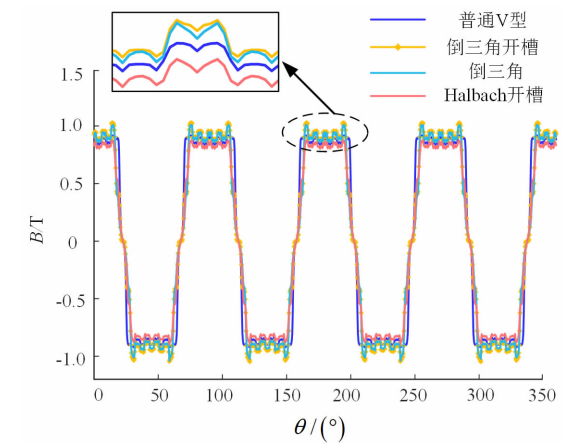


图 22 4 种结构的空载气隙磁密对比
Fig. 22 Comparison of no-load air gap magnetic density of four structures

4 种电机的气隙磁密谐波分解对比如图 23 所示。从图中可以看出, Halbach 开槽型结构的气隙磁密各次谐波均有降低, 其中 5 次、7 次谐波幅值降低了 74.1%、51.7%。同时, A_{THD} 值也从普通 V 型结构的 35.9% 下降到 24.5%, 降幅达 31.8%。

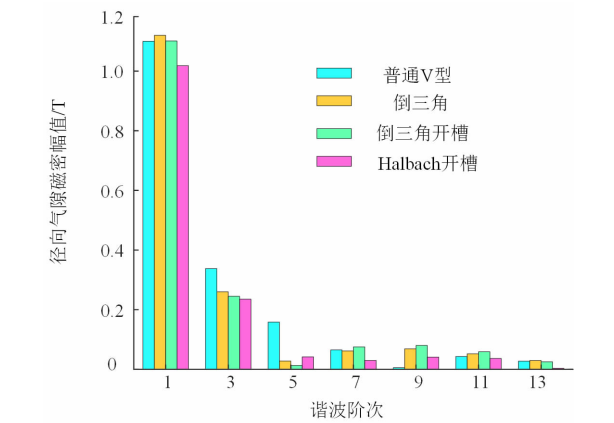


图 23 4 种电机的气隙磁密谐波分解对比
Fig. 23 Comparison of Harmonic Decomposition of air gap magnetic density of four motors

优化后 4 种结构的各项电磁性能对比分析如表 6 所示。

表 6 4 种结构的性能对比

Table 6 Performance comparison of the four structures				
参数	普通 V 型	倒三角型	倒三角开槽型	Halbach 开槽型
$T_{\text{cog}}/(\text{mN} \cdot \text{m})$	186.8	722.1	376.1	28.3
$T_e/(\text{N} \cdot \text{m})$	150.5	179.9	178.1	161.9
$R_t/\%$	9.1	13.7	7.8	9.8
E_{EMF}/V	379.4	400.9	395.6	348.3
$E_{\text{THD}}/\%$	22.5	14.5	13.5	12.8
$A_{\text{THD}}/\%$	35.9	26.1	25.5	22.9

Halbach 开槽型 IPMSM 这一特殊结构使其齿槽转矩峰值大幅度降低为 28.3 mN · m, 并且在电磁转矩均值没有下降的基础上, 其转矩脉动减小至 9.8%; 虽然反电势与空载气隙磁密幅值都略有下降, 但其 E_{THD} 由 22.5% 下降至 12.8%, 空载 A_{THD} 由 35.9% 下降至 24.5%; 同时, 反电势和气隙磁密的波形更接近正弦波。

4 结 论

(1) 所提出的 Halbach 充磁且转子开辅助槽的内置式永磁同步电机结构, 相较于普通 V 型 IPMSM, 齿槽转矩减少了 85%, 反电势谐波畸变率降低了

43%,气隙磁密谐波畸变率降低了36%;相较于倒三角型 IPMSM,转矩脉动降低了28%。

(2)所提出的电机参数敏感度分层优化方法,利用敏感度分析判断出电机参数对于齿槽转矩、转矩脉动等优化目标的影响权重,并根据敏感度对参数进行筛选与分层;结合 CCD 响应面法用较少数据拟合出多维曲面从而定位参数的优化范围,通过第一层 MMAS 算法和第二层参数扫描寻优,提高了优化效率,更为准确地得到电机的最优参数。

Halbach 开槽型 IPMSM 在没有增加永磁体成本的基础上,提升了电磁性能,降低电机重量从而提高了功率密度。同时,所提出的参数敏感度分层优化方法,对于其他类型复杂结构电机同样具有借鉴和参考价值。

参考文献:

- [1] 唐任远. 现代永磁电机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 王道涵, 彭晨, 王柄东, 等. 电动汽车新型转子内置式永磁同步电动机转矩脉动与电磁振动抑制研究 [J/OL]. 中国电机工程学报 [2022-01-25]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210537.
WANG Daohan, PENG Chen, WANG Bingdong, et al. Design and research on a novel interior permanent magnet machine with segmented rotor to mitigate torque ripple and electromagnetic vibration [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2022-01-25]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210537.
- [3] 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): 4919-4926, 4994.
WANG Xiaoyuan, HE Xiaoyu, GAO Peng. Research on electromagnetic vibration and noise reduction method of V type magnet rotor permanent magnet motor electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4919-4926, 4994.
- [4] ASEF P, PERPINA R B, LAPHORN A C. Optimal Pole number for magnetic noise reduction in variable-speed permanent magnet synchronous machines with fractional-slot concentrated windings [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 126-134.
- [5] 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): 5437-5445.
XIE Ying, LI Fei, LI Zhiwei, et al. Optimized design and research of vibration reduction with an interior permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5437-5445.
- [6] 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): 103-108.
ZHANG Ran, WANG Xiuhe, QIAO Dongwei, et al. Reduction of exciting force wave for permanent magnet motors by teeth notching [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 103-108.
- [7] 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): 45-52.
LI Yan, LI Shuangpeng, ZHOU Jiwei, et al. Weakening approach of the vibration and noise based on the stator tooth chamfering in PMSM with similar number of poles and slots [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 45-52.
- [8] TANG Chun, SOONG W L, JAHNS T M, et al. Analysis of iron loss in interior PM machines with distributed windings under deep field weakening [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3761-3772.
- [9] PUTRI A K, RICK S, FRANCK D, et al. Application of sinusoidal field pole in a permanent-magnet synchronous machine to improve the NVH behavior considering the MTPA and MTPV operation area [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2280-2288.
- [10] 倪有源, 崔征山, 王群京. 转子有辅助槽的表贴式永磁电机解析法建模与优化 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 65-71.
NI Youyuan, CUI Zhengshan, WANG Qunjing. Analytical modeling and optimization of a surface-mounted permanent magnet machine with auxiliary slots in rotor [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 65-71.
- [11] 高峰阳, 齐晓东, 李晓峰, 等. 部分分段 Halbach 永磁同步电机优化设计 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(4): 787-800.
GAO Fengyang, QI Xiaodong, LI Xiaofeng, et al. Optimization design of partially-segmented Halbach permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(4): 787-800.
- [12] CHU W Q, ZHU Z Q. Investigation of torque ripples in permanent magnet synchronous machines with skewing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3): 1211-1220.

- [13] 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 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4231-4238.
BAO Xiaohua, WU Changjiang, FANG Jinlong. Cogging torque reduction in surface-mounted permanent magnet synchronous motor by combining different permanent magnets in axial direction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4231-4238.
- [14] YANG Zhi, SHANG Fei, BROWN I P, et al. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 245-254.
- [15] CHEN Hao, LEE C H T. Parametric sensitivity analysis and design optimization of an interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2019, 7: 159918-159929.
- [16] KAMAL C, THYAGARAJAN T, SELVAKUMARI M, et al. Cogging torque minimization in brushless DC motor using PSO and GA based optimization [C] // 2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [17] ZHU Xiaoyong, HUANG Juan, QUAN Li, et al. Comprehensive sensitivity analysis and multiobjective optimization research of permanent magnet flux-intensifying motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2613-2627.
- [18] 陈云云, 朱孝勇, 全力, 等. 基于参数敏感度的双凸极永磁型双定子电机的优化设计和性能分析 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 160-168.
CHEN Yunyun, ZHU Xiaoyong, QUAN Li, et al. Parameter sensitivity optimization design and performance analysis of double-salient permanent-magnet double-stator machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 160-168.
- [19] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 磁极径向组合轴向磁场永磁电机转矩品质分析与优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1971-1983.
XU Lei, ZHU Xiaoyong, ZHANG Chao, et al. Torque quality analysis and optimization design of axial field machine with radial combined permanent magnet poles [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 1971-1983.
- [20] 曹永娟, 冯亮亮, 毛瑞, 等. 轴向磁场永磁记忆电机多目标分层优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1983-1992.
CAO Yongjuan, FENG Liangliang, MAO Rui, et al. Multi-objective stratified optimization design of axial-flux permanent magnet memory motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 1983-1992.
- [21] WU Shaopeng, HUANG Xiaojian, TIAN Chenchen, et al. Multi-physical field optimization analysis of high-speed permanent magnet synchronous motor based on NSGA-II algorithm [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [22] 谢颖, 李吉兴, 杨忠学, 等. 改进遗传蚁群算法及其在电机结构优化中的研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 64-70.
XIE Ying, LI Jixing, YANG Zhongxue, et al. Improved genetic ant colony algorithm and research on motor structure optimization [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(10): 64-70.
- [23] 杨玉波, 王秀和, 丁婷婷. 基于单一磁极宽度变化的内置式永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 41-45.
YANG Yubo, WANG Xiuhe, DING Tingting. Different pole-arc width combination for reducing cogging torque of interior-magnet PMSM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 41-45.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)