

分布励磁正弦型电励磁双凸极电机多目标优化

蒋思远^{1,2}, 牛俊恒¹, 王继永¹, 艾立旺^{1,2}, 肖磊^{1,2}, 许孝卓^{1,2}

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室, 河南 焦作 454003)

摘要: 正弦型电励磁双凸极电机具有结构简单、磁场调节便捷、转矩脉动小等特点, 能够在极端条件下可靠运行。本文提出一种基于参数敏感度分析的多元回归方程和多目标遗传算法的电机结构参数优化方法, 旨在解决正弦型电励磁双凸极电机因非线性特征导致的传统优化方法难以准确快速地建立结构参数与优化目标之间关系的问题。以一台 12/10 分布励磁正弦型电励磁双凸极电机为研究对象, 通过“简化结构参数的敏感性分析法”探究结构参数变化对优化目标的影响, 结合响应面法拟合得到电机优化变量和优化目标之间的回归模型, 并通过归一化构建评价函数和遗传算法取得最优值。有限元仿真结果显示, 优化后电机的反电势基波幅值提升了 14.94%, 定位力和反谐波畸变率分别降低了 89.25% 和 17.5%。实验测试进一步验证了设计参数优化的有效性。

关键词: 正弦型; 敏感度分析; 简化结构参数; 多元回归方程; 多目标遗传; 评价函数

DOI: 10.15938/j.emc.2025.12.012

中图分类号: TM302

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2025)12-0135-12

Multi-objective optimization of sinusoidal doubly salient electro-magnetic machine with distributed magnetomotive forces

JIANG Siyuan^{1,2}, NIU Junheng¹, WANG Jiyong¹, AI Liwang^{1,2},
XIAO Lei^{1,2}, XU Xiaozhuo^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The sinusoidal doubly salient electro-magnetic machine has the characteristics of simple structure, convenient magnetic field adjustment and small torque ripple. It can operate reliably under extreme conditions. A method for optimizing motor structure parameters was proposed based on parameter sensitivity analysis, which combines multiple regression equation and multi-objective genetic algorithm. The purpose is to solve the problem that the traditional optimization method of sinusoidal doubly salient electro-magnetic motor is difficult to establish the relationship between structural parameters and optimization objectives accurately and quickly due to the nonlinear characteristics. Taking the 12/10 sinusoidal doubly salient electro-magnetic machine with distributed magnetomotive forces as the research object, influence

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(52177039, 52307050); 河南省科技攻关项目(252102241054); 河南省自然科学基金项目(252300423398, 252300421870); 河南理工大学博士基金(B2024-23, B2025-35)

作者简介: 蒋思远(1992—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为特种电机的设计与控制技术;

牛俊恒(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机优化设计;

王继永(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机优化设计;

艾立旺(1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电磁直驱装备、超导磁悬浮;

肖磊(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机振动分析;

许孝卓(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计与智能控制、直线电机系统及其应用。

通信作者: 许孝卓

of structural parameter changes on the optimization objectives was explored by “sensitivity analysis method of simplified structural parameters”. Combined with the response surface method, the regression model between the motor optimization variables and the optimization objectives was obtained. Then, the optimal value is obtained by the single objective genetic algorithm and the normalized evaluation function. The finite element experimental results show that the back electromotive force of the optimized motor is increased by 14.94%, and cogging torque and total harmonic distortion are reduced by 89.25% and 17.5%. The experimental test further proves effectiveness of the design parameter optimization.

Keywords: sinusoidal pattern; sensitivity analysis; simplify structural parameters; multiple regression equations; multi-objective genetic; evaluation functions

0 引言

20 世纪 90 年代,永磁双凸极电机被提出^[1]。在此基础上许多学者又提出电励磁双凸极电机和混合励磁双凸极电机并进行研究。其中电励磁双凸极电机(doubly salient electro-magnetic machine, DSEM)具有结构简单,磁场易于调节,高温高速运行能力强,功率密度高等优点,在航空航天、风力发电、船舶等领域具有良好的应用前景^[2-6]。

传统的 DSEM 在运行过程中,其反向电动势通常表现出不理想的方波特性。这种反电动势的不对称性会进一步放大 DSEM 的转矩波动,因此限制了其在高精度驱动和伺服控制领域的应用^[7-9]。为了减少输出转矩的波动,可以通过设计正弦型 DSEM 并对交流电机实施矢量控制。采用带斜槽或转子斜极设计的 DSEM 能够使产生的反电动势更接近正弦波形,但是由于传统 DSEM 的正负反电动势之间间隔过于接近,导致反电动势存在明显的失真,斜槽或斜极 DSEM 产生的反电动势波形正弦度并不高^[10]。本文所设计的是一种分布励磁正弦型电励磁双凸极电机(sinusoidal doubly salient electro-magnetic machine with distributed magnetomotive forces, SDSEM-DF),采用正弦驱动使其转矩脉动变小,在高性能伺服驱动、航空领域中有很大的使用价值。但由于 SDSEM-DF 特殊的结构形式和磁路饱和效应造成的严重非线性因素,优化电机参数达到最佳性能不容易实现。

电机的本体优化是一个强耦合、非线性、多目标的问题^[11-15]。文献[16]提出一种辅助插槽的电机,使用该槽可以在旋转和偏转方向有效降低齿槽转矩的幅值。文献[17]提出 3 种多定子齿分布的 DSEM,并采用有限元和遗传算法相结合的方法开展了 3 种电机的多目标优化设计,证明了电机的设

计和优化方法是有效的,但电机的优化参数较多,结构相对复杂。文献[18]提出在转子上增加磁阻结构,该结构通过影响转子内部磁通路径来改善电机的气隙磁通密度波形,从而使电机反电势波形更加趋于正弦化。文献[19]提出一种全局优化和有限元法结合的方法,可以快速找出最优的电机结构。这可以在构建响应面模型时缩短计算时间。文献[20]分别采用单解析法和二维有限元法对不对称定子极电机的平均转矩和空载反电势进行优化设计。但是,文中没有给出针对不同结构变量采用不同优化算法的选择依据,优化方法的分配过程中主观性较强。文献[21-22]利用粒子群算法对电机进行优化,得到了全局最优取值。但粒子群算法属于随机搜索算法,容易陷入局部最优解。文献[23]基于响应面法对双凸极永磁型双定子电机进行优化设计研究,通过将结构参数分组,有效地解决了参数间的相互作用问题。然而,该方法在每次分析中仅能针对 2 个相关的结构参数进行优化,当涉及多个关键尺寸参数的优化时,全面考虑这些参数之间的相互作用变得较为复杂。

以上是对不同电机在结构和优化方法上的阐述,由于所提 SDSEM-DF 其特有的方波反电势相位调制正弦型方法中各个结果参数之间相互耦合,相互影响,再加上其特有的双凸极结构带来的非线性特征,上述方法并不能完全适用于 SDSEM-DF。

本文提出一种基于参数敏感度分析的多元回归方程和多目标遗传算法的电机结构参数优化方法。首先介绍电机结构及转矩特性,分析主要结构参数变化对反电势基波幅值(E_{AMP})、定位力(T_{cog})和谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)的影响。然后采用简化结构参数的敏感性分析法,将不敏感参数固定,选择敏感参数进行响应曲面分析。其次拟合得到电机优化变量和优化目标之间的多元回归

方程式。再次通过遗传算法选优结合归一化处理选取了参数最优值,之后对优化前后电机性能对比分析。最后使用小样机验证大样机的方法^[24],制作除功率等级不一样其他指标与实际一致的样机,验证优化方法的可行性。

1 电机的结构参数及转矩特性

1.1 结构参数

本文以 12/10 的正弦型电励磁双凸极电机为研究对象,其主要由凸极结构的转子、定子以及定子内的电枢绕组和励磁绕组四部分组成。图 1 给出了 SDSEM-DF 模型,图 2 和表 1 给出了结构参数,包括转子齿高 H_3 、定子齿高 H_4 、转子轭高 H_1 、转子齿宽 W_1 、转子齿厚 L 、定子齿宽 W_2 、定子轭高 H_2 和转子、定子内径和外径 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 。

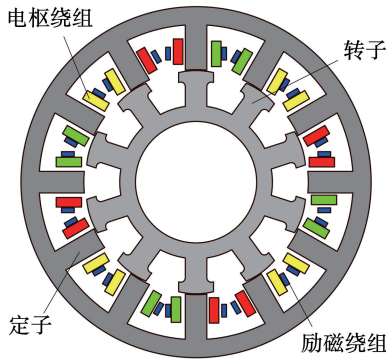


图 1 SDSEM-DF 结构

Fig. 1 Structure of SDSEM-DF

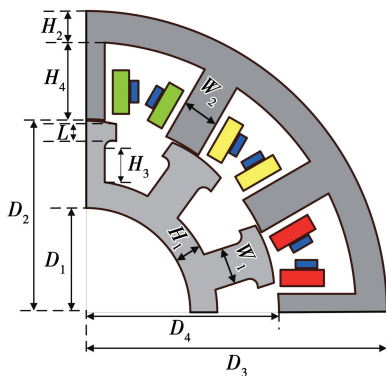


图 2 SDSEM-DF 基本参数

Fig. 2 Basic parameters of SDSEM-DF

1.2 正弦型 DSEM 转矩特性

正弦型 DSEM 在电动运行中,相绕组匝链的磁链包括励磁磁链和电枢反应磁链,磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{af} \\ \psi_{bf} \\ \psi_{cf} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ψ 、 L 和 I 分别为磁链矩阵、电感矩阵和电流矩阵;等式前一项为电枢反应磁链,后一项为励磁磁链。通过功率平衡原理可得电机的转矩方程为

$$T_e = \left[\left(\frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta_r} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta_r} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta_r} \right) + \left(i_a i_b \frac{dL_{ba}}{d\theta_r} + i_a i_c \frac{dL_{ca}}{d\theta_r} + i_b i_c \frac{dL_{cb}}{d\theta_r} \right) \right] + \left(i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta_r} + i_b i_f \frac{dL_{bf}}{d\theta_r} + i_c i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta_r} \right) \quad (2)$$

式中 θ_r 为转子位置电角度。

表 1 SDSEM-DF 尺寸参数

Table 1 Size parameters of SDSEM-DF

参数	数值
转子内径 D_1 /mm	27
转子外径 D_2 /mm	33.4
转子齿宽 W_1 /mm	8
转子齿厚 L /mm	6
转子轭高 H_1 /mm	7
定子轭高 H_2 /mm	8
定子外径 D_3 /mm	78
定子内径 D_4 /mm	50
定子齿宽 W_2 /mm	7
斜极角度 $S/(\circ)$	7
气隙/mm	0.4

从图 3 可以看出,SDSEM-DF 的电枢绕组自感(如图中的 L_a)和各相电枢绕组之间的互感(如图中的 L_{ab})随转子位置角的变化小,励磁绕组与电枢绕组之间的互感(如图中的 L_{af})随转子位置变化呈正弦变化。根据式(2),正弦型 DSEM 的平均转矩主要由励磁和电枢绕组之间的互感产生,其三相信成励磁转矩公式为

$$T_e = i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta_r} + i_b i_f \frac{dL_{bf}}{d\theta_r} + i_c i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta_r} \quad (3)$$

正弦型 DSEM 的定子上有励磁和电枢绕组,因此需要根据转子定子的位置来确定磁链的大小,即 d 轴和 q 轴的位置。当转子齿中心到定子齿中心的时候,此时的 A 相绕组的磁链为最大值,此时位置为 d 轴,当电机转子齿旋转到超前 d 轴 90° ,A 相磁链为 0,此时为 q 轴。确定正弦型 DSEM 转子旋转

坐标系 dq 轴位置后,通过 Clark 变换和 Park 变换将定子静止坐标系上的正弦型 DSEM 数学模型转换到转子旋转坐标系上。采用幅值不变约束时,坐标变换公式表示为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - 2\pi/3) & \cos(\theta_e + 2\pi/3) \\ -\sin\theta_e & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 v 为电枢绕组的电流、电感或磁链等变量。

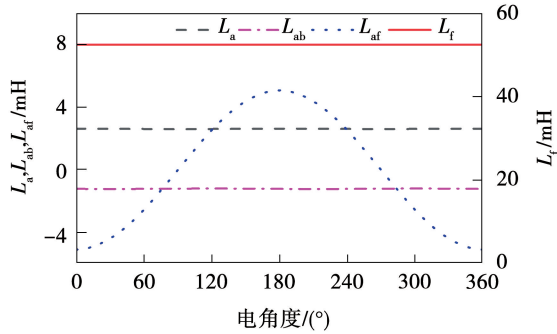


图3 SDSEM-DF 电感曲线

Fig. 3 Inductance curve of SDSEM-DF

当采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略时,三相合成励磁转矩公式可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p_r i_f i_q L_{pf} \cos\theta_m \quad (5)$$

式中: p_r 为转子极数; i_f 为励磁电流; i_q 为电枢绕组交轴分量; L_{pf} 为三相绕组与励磁绕组的互感; θ_m 为励磁绕组与电枢绕组的互感的初相角。

本文的优化目标从改善反电势畸变出发,通过分析其原因对电机进行优化^[8]。从相位调制出发抑制反电势畸变,从而使转矩脉动减小。本文以 E_{AMP} 、 T_{cog} 和 THD 为优化目标,通过优化使反电势更加正弦,定位力矩更小,转矩脉动更小。

由于 SDSEM-DF 的电枢绕组和励磁绕组均在一个定子槽内,造成了槽内结构复杂面积紧张,因此需要对槽面积进行约束。通过对槽面积的约束,为下文选取定子齿宽范围提供参考。每个槽的约束条件为

$$50\% \leq \frac{S_a + S_f}{S_p} \times 100\% \leq 60\% \quad (6)$$

式中: S_p 为定子槽面积; S_a 为电枢绕组在一个槽内的

总面积; S_f 为励磁绕组在一个槽内的总面积。同时也考虑了绕组的电流密度不宜过大,对电枢和励磁绕组电流密度也进行了限制:

$$J_a = \frac{I_a}{S_a} \leq 6 \text{ A/mm}^2; \quad (7)$$

$$J_f = \frac{I_f}{S_f} \leq 6 \text{ A/mm}^2. \quad (8)$$

式中: J_a 为电枢绕组的电流密度; J_f 为励磁绕组的电流密度; I_a 为电枢电流; I_f 为励磁电流。

1.3 设计参数对优化目标的影响

斜极结构有利于减小转矩脉动,使传统 DSEM 反电势的波形也趋于正弦化^[10],但由于传统 DSEM 的结构特点,单纯的斜极会使反电势发生畸变^[8]。本文根据相位调制原理,通过将转子各分段感应的反电势合成,形成正弦波的反电势。在该设计下,需要利用当偶数相 DSEM 转子的极弧系数为 0.5 时的一相电感增大而另一相电感相应减小的互补现象。由于这种互补性,在不影响励磁磁导的情况下,通过调整定子极弧的参数,来改变反电势的宽度。故在进行优化参数选取时,对正弦型 DSEM 的转子齿宽 W_1 、转子轭高 H_1 、转子齿厚 L 、斜极角度 S 和定子齿宽 W_2 五个设计参数进行分析,分析单个参数变化对电机不同目标的影响,并为下文敏感性分析确定参数取值范围。

对电机的 5 个设计变量选择合适的变化区间进行有限元仿真,初始范围如表 2 所示,结果如图 4 所示。从图中可以看出,电机的定子齿宽和斜极角度对目标影响比较大,其中转子齿宽对 THD 影响也较大,其他 2 个电机结构参数对目标的影响较小。随着定子齿宽的增加有助于 E_{AMP} 的提高, T_{cog} 和 THD 出现先减小后增大的趋势;随着斜极角度的增加使 E_{AMP} 减小, THD 先增大后减小, T_{cog} 呈现先减小后增大的趋势。由于考虑电机的硬度,设计的电机转子轭高不易做的很薄,因此轭部处于磁不饱可状态,对反电势影响较小。

表2 关键参数初始变化范围

Table 2 Initial variation range of key parameters

参数	初始范围
W_1/mm	[5, 8]
$S/(\circ)$	[5, 11]
W_2/mm	[5, 11]
H_1/mm	[6, 9]
L/mm	[2, 8]

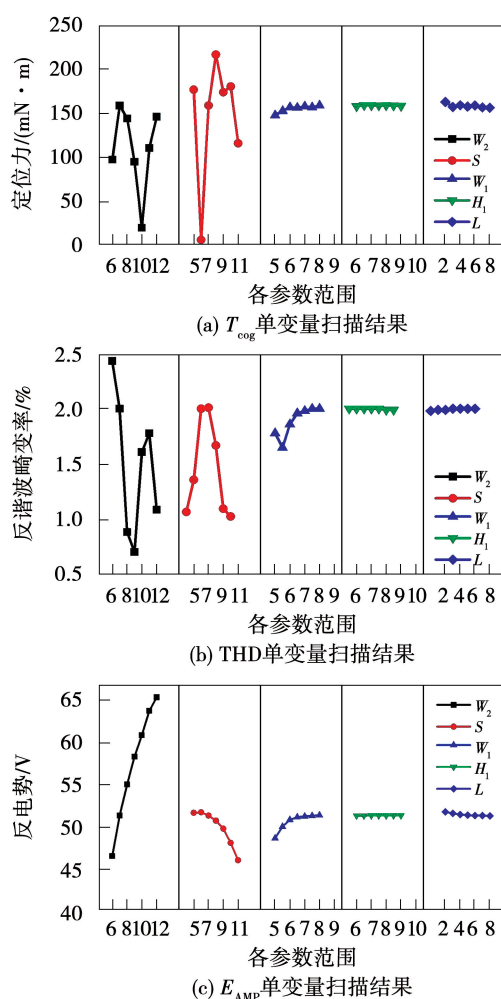


图 4 各变量对优化目标的影响程度

Fig. 4 Influence degree of each variable on the optimization goal

2 简化结构参数敏感性分析

影响 SDSEM-DF 反电势基波幅值、定位力和谐波畸变率的参数有很多,为了降低优化问题的维度和提高优化效率,本文使用田口法对电机结构参数进行敏感性分析,选择其中对优化目标影响较大的作为优化变量。对电机结构参数 W_1 、 L 、 H_1 、 W_2 、 S 进

行田口正交实验,然后通过信噪比和方差分析,选择影响比较显著的结构参数作为进一步缩小样本空间的敏感变量。

建立 $L_{25}(5^5)$ 的正交实验表,选择适当的变化范围。用 Maxwell 软件仿真出每组实验的 E_{AMP} 、THD 和 T_{cog} ,结果如表 3 所示。并对正交实验得到的数据进行信噪比分析和方差分析,分别如图 5 和图 6 所示。

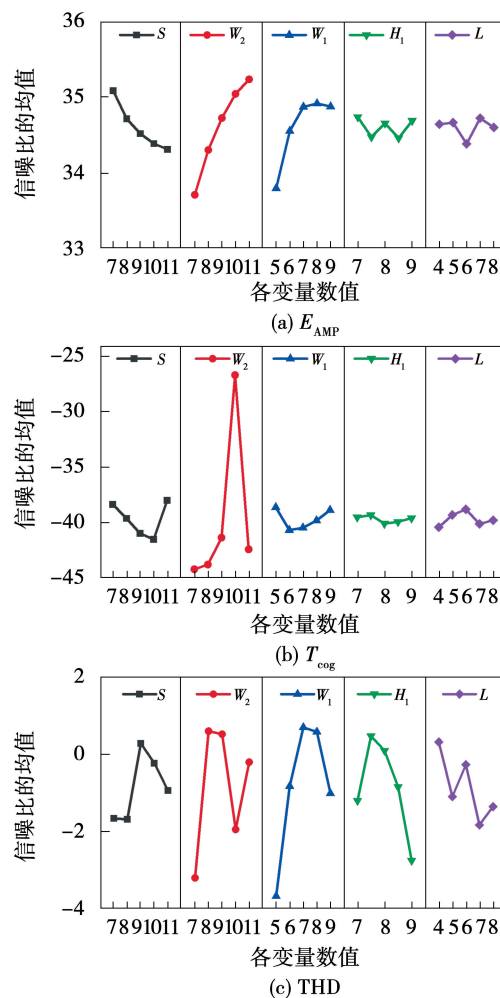


图 5 各目标信噪比分析

Fig. 5 Signal-to-noise ratio analysis of each target

表 3 正交表及有限元仿真结果

Table 3 Orthogonal table and finite element simulation results

序号	$S/(\circ)$	W_2/mm	W_1/mm	H_1/mm	L/mm	E_{AMP}/V	$T_{\text{cog}}/(\text{mN} \cdot \text{m})$	THD/%
1	7	7	5	7	4	48.433	145.803	1.77
2	7	8	6	7.5	5	53.686	139.042	0.67
3	7	9	7	8	6	57.932	95.097	0.77
...	...	...	...	...	...	...	...	...
23	11	9	6	7	8	52.469	95.077	1.28
24	11	8	5	9	7	46.634	107.251	1.92
25	11	11	8	8	5	59.569	122.718	0.72

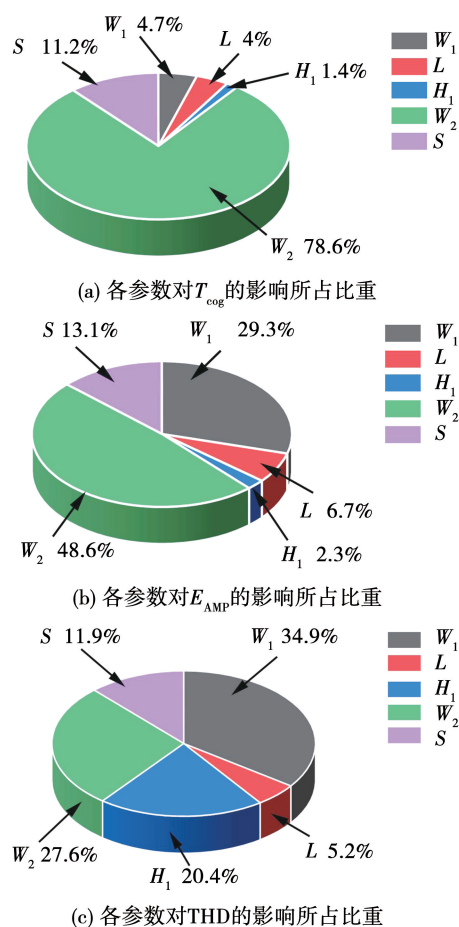


图6 参数对优化目标影响的比重

Fig. 6 Proportion of influence of parameters on the optimization objective

方差可判断各参数的改变对该性能指标的影响所占的比重。在信噪比分析时通常“望大”是希望该性能越大越好,“望小”则相反,本文对 E_{AMP} 进行望大,对THD和 T_{cog} 进行望小。从信噪比主效应图的结果中可知,在 E_{AMP} 分析上,电机的 S 、 W_1 和 W_2 对电机特性的敏感性更大。在 T_{cog} 分析中 W_2 对电机特性的影响明显大于其他4个变量。在THD分析中, W_2 、 W_1 、 H_1 对电机特性的敏感程度比 S 、 L 大。其中 H_1 对 E_{AMP} 和 T_{cog} 的影响均较小,因此综合以上分析将 W_1 、 W_2 和 S 作为对优化目标敏感的结构参数。这样从原本的5组结构参数构成的参数建模样本 5^5 组减少到 5^3 组。这种方式显著减少了建模过程中所需的有限元仿真数据量,简化了样本空间,从而提升了整体的建模效率。这种方法的优势在于满足了在个性化定制中进行快速优化的需求,使得设计过程更加高效和灵活。因此根据图5、图6的分析结果,选取敏感性不大的2个结构参数进行确定,即 $H_1 = 7.5 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$ 。

3 构建多元回归方程

响应面分析法(response surface methodology, RSM),是利用合理的试验设计方法并通过实验得到一定数据,采用多元二次回归方程来拟合变量与响应值之间的函数关系,通过对回归方程的分析来寻求最优参数,解决多变量问题的一种统计方法。本文中涉及3个影响因素,采用Box-Behnken设计,选择上文挑选出来的优化变量,每个变量取3个水平值,分别为优化变量优化区间的中心值“0”,上限值“1”和下限值“-1”,表4为各优化变量水平值。其中从图5、图6中可以得知敏感参数进一步选取的范围。

表4 优化变量水平值

Table 4 Optimization variable level value

参数	数值		
	-1	0	1
W_2/mm	8	9	10
$S/(\circ)$	8	9	10
W_1/mm	5	6	7

根据Box-Behnken的设计原则,建立正交实验矩阵,3个变量一共需要做15组实验,对每组实验进行有限元分析,仿真结果如表5所示。

表5 响应面正交仿真结果

Table 5 Response surface orthogonal simulation results

序号	W_2/mm	$S/(\circ)$	W_1/mm	E_{AMP}/V	$T_{\text{cog}}/(\text{mN} \cdot \text{m})$	THD/%
1	9	9	6	54.268	131.525	1.27
2	9	10	7	54.97	143.37	0.85
3	9	8	7	57.023	127.655	0.80
...	...	...	...	...	...	...
13	8	8	6	53.121	188.783	0.76
14	9	8	5	50.482	123.126	0.65
15	10	9	5	49.57	25.144	0.90

利用多元二次回归方程来拟合优化变量和优化目标之间的关系。(由于遗传算法适合算最小值,所以在反电势基波幅值前加一个负号进行运算)通用的二阶回归方程式为:

$$E_{\text{AMP}} = -(8.7 + 0.26W_2 - 0.57S + 9.9W_1 - 0.357W_2^2 - 0.129S^2 - 1.402W_1^2 + 0.095W_2S + 1.137W_2W_1 - 0.011SW_1); \quad (9)$$

$$T_{\text{cog}} = -1458 + 530.6W_2 - 194.6S + 130.5W_1 - 34.92W_2^2 + 6.98S^2 - 6.39W_1^2 + 7.24W_2S -$$

$$6.88W_2W_1 + 1.13SW; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{THD} = & -0.2074 - 0.0158W_2 + 0.0605S + \\ & 0.00477W_1 + 0.000612W_2^2 - 0.001787S^2 - \\ & 0.001438W_1^2 - 0.001625W_2S + \\ & 0.003225W_2W_1 - 0.001975SW。 \quad (11) \end{aligned}$$

4 多目标遗传算法寻优

4.1 基于 MATLAB 遗传算法寻优

SDSEM-DF 由于各参数之间存在耦合作用,造成各优化目标无法同时达到最优值,仅在各优化目标之间进行权衡,使其尽可能的达到最理想的效果,但是 3 个目标之间存在数量级因此进行归一化处理。本文首先对单个目标寻优,然后将归一化评价函数作为遗传算法的函数,最终得到综合的最优结果。其中适应度值越小,说明模型越接近以评价函数进行预测的值。

$$Y_{\min}(x) = \sqrt{\frac{[Y_1(x) - \hat{Y}_1]^2}{\hat{Y}_1} + \frac{[Y_2(x) - \hat{Y}_2]^2}{\hat{Y}_2} + \frac{[Y_3(x) - \hat{Y}_3]^2}{\hat{Y}_3}}。 \quad (12)$$

式中: $Y_i(x)$ 是预测值; $\hat{Y}_i$ 是真实值; $Y_{\min}(x)$ 是适应度值。

通过遗传算法对所得的 3 个回归方程分别进行计算,得到如图 7 所示的结果。当 $W_2 = 10 \text{ mm}$ 、 $S = 8.187^\circ$ 、 $W_1 = 7 \text{ mm}$ 时,定位力取得最小值 $6.946 \text{ mN} \cdot \text{m}$; 当 $W_2 = 10 \text{ mm}$ 、 $S = 8^\circ$ 、 $W_1 = 7 \text{ mm}$ 时,反电势基波幅值的相反数最小 -59.08 V ; 当 $W_2 = 8 \text{ mm}$ 、 $S = 8^\circ$ 、 $W_1 = 7 \text{ mm}$ 时,谐波畸变率取得最小 0.393% 。

三者之间不能同时达到最优结果,需要构建评价函数后,代入 MATLAB 软件求综合最理想情况的值。从结果中可以看出适应度值为 0.157 ,结果如图 8 所示。即 $W_2 = 10 \text{ mm}$ 、 $S = 8.119^\circ$ 、 $W_1 = 7 \text{ mm}$ 。为了样机加工方便,此处取 $S = 8^\circ$ 。

通过对电机使用常见的优化算法,得到了不同方法的最优结果,如表 6 所示。从表中可以看出本

文提出方法要比其他几种好。

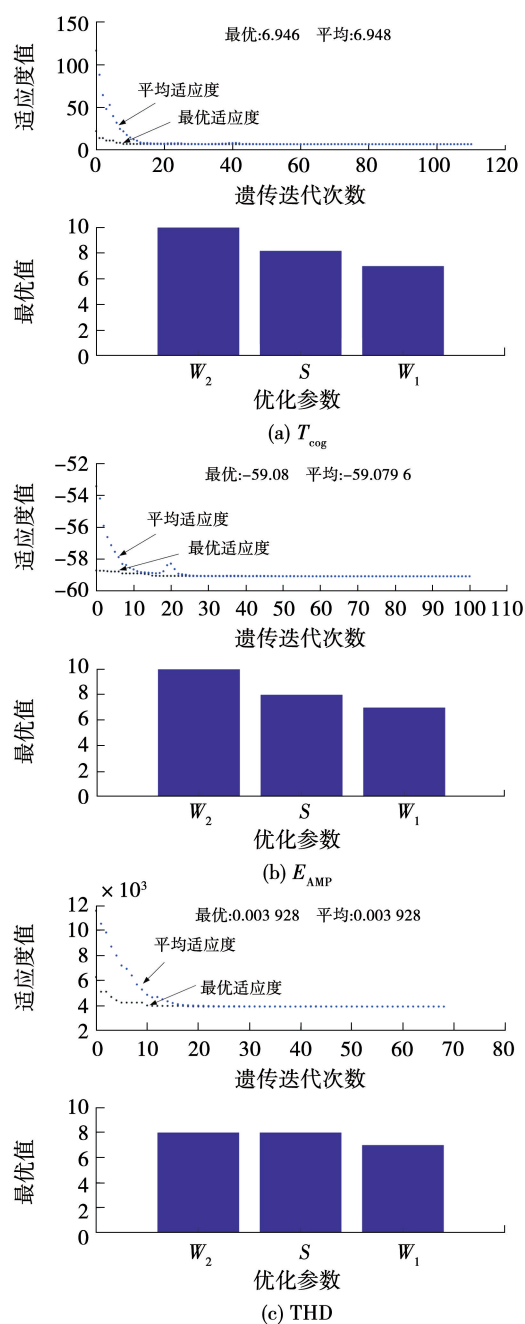


图 7 遗传算法单目标优化结果

Fig. 7 Single objective optimization results of genetic algorithm

表 6 不同优化算法结果对比

Table 6 Comparison of results of different optimization algorithms

优化方法	$S/(\circ)$	W_2/mm	W_1/mm	E_{AMP}/V	$T_{\text{cog}}/(\text{mN} \cdot \text{m})$	THD/%
田口法 ^[25]	11	10	8	56.332	21.73	1.73
响应面法 ^[26]	9	10	6	58.178	18.12	1.68
ELM + NSGA - II ^[27]	8.028	9.993	6.103	56.822	19.65	1.65
本文方法	8.187	10	7	59.004	17.07	1.65

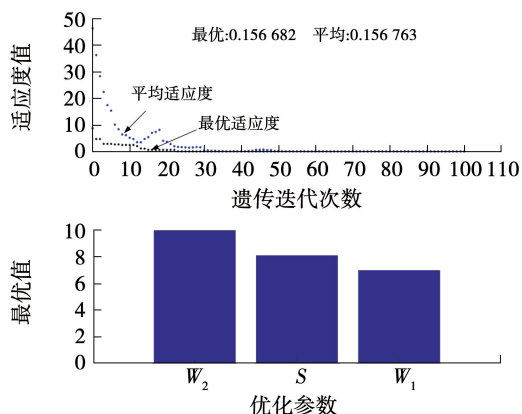


图8 遗传算法综合优化结果

Fig. 8 Comprehensive optimization results of genetic algorithm

4.2 优化前后对比分析

优化前后对比分析如图9所示,设置电机额定转速 $1\,500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,励磁电流 7.5 A ,SDSEM-DF 优化前后定位力峰值分别是 $158.74\text{ mN} \cdot \text{m}$ 、 $17.067\text{ mN} \cdot \text{m}$,降低了 89.25% ;反谐波畸变率分别是 2% 、 1.65% ,降低了 17.5% ;反电势基波幅值分别是 51.337 V 、 59.004 V ,提高了 14.94% 。从图9可以看出优化后定位力大幅度减小,反电势也有略微增大,波形也更加趋于正弦化,从图9(c)可以看出基波幅值有所提升,之后的谐波次数较优化前有所减小。以下是对上述效果产生原因的分析。

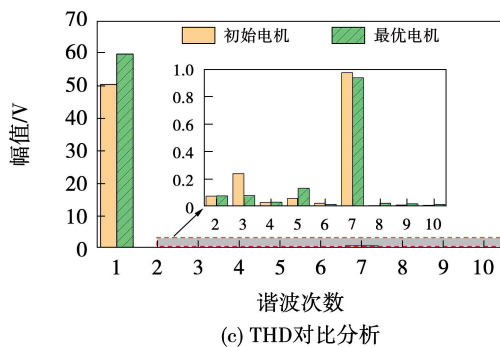
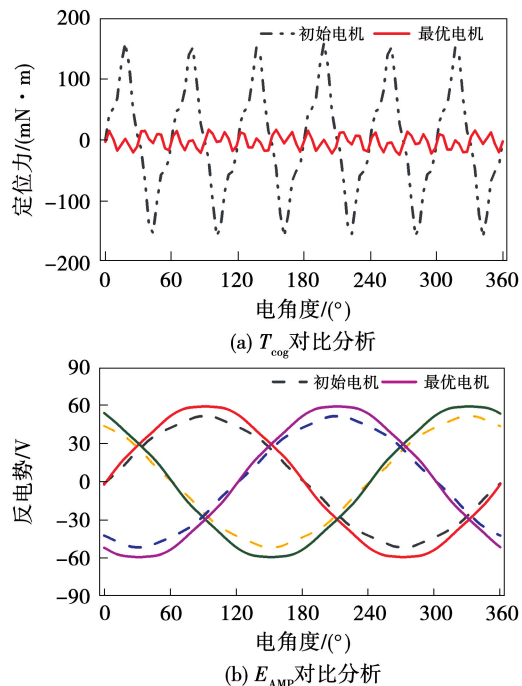


图9 优化前后对比分析

Fig. 9 Comparative analysis before and after optimization

从结构上看,优化后转子的轭高增大,使得转子轭部的磁饱和程度下降,使电机的反电势增加,但由于初始值时转子轭部并没有出现磁饱和现象,因此反电势的提升并不是很明显。结合单变量扫描来看定子齿宽的增大也有利于反电势的提升和定位力的下降。此外优化后的电机也增加了斜极角度,这有利于进一步提高电机的性能。

对优化后的电机进行仿真,在正弦驱动下DSEM的三相电流波形和输出转矩如图10所示,并对比了优化前后的转矩脉动如图11所示。

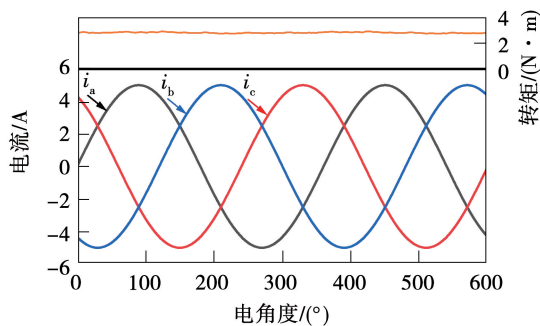


图10 SDSEM-DF 转矩仿真分析

Fig. 10 SDSEM-DF torque simulation analysis

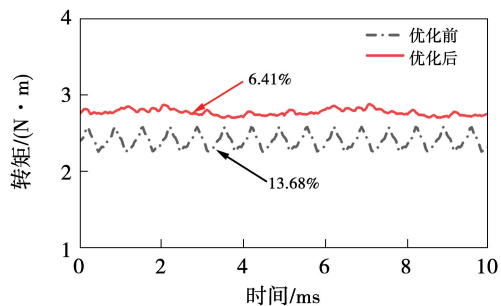


图11 优化前后转矩及转矩脉动对比分析

Fig. 11 Comparative analysis of torque and torque ripple before and after optimization

从图 11 中可以看出优化后的输出转矩脉动明显减小,由下式计算得输出转矩的脉动为 6.41%:

$$T_{\text{ripple}} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{av}}} \quad (13)$$

式中: T_{ripple} 为转矩脉动; T_{max} 、 T_{min} 分别为输出转矩的峰值和谷值; T_{av} 为输出转矩的平均值。

5 正弦化 DSEM 样机测试

5.1 实验平台

为了验证本文理论分析的准确性和优化设计的有效性,根据优化所得的最优结果加工电机,其定子、转子结构如图 12(a)、图 12(b) 所示。电机定子、转子所用的材料均是 DW-310 硅钢,定子槽内分布着电枢绕组和励磁绕组,电机整体呈现对称结构。

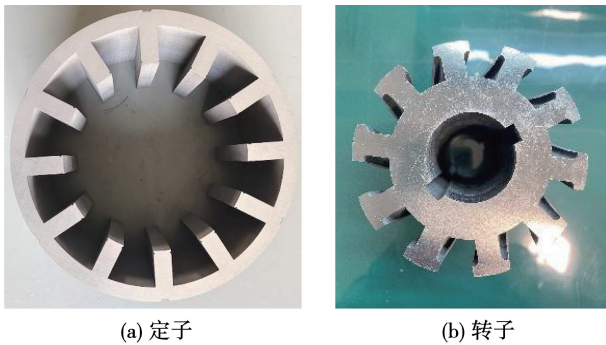


图 12 定子、转子实物图

Fig. 12 Stator and rotor physical diagram

为验证所提设计方法的可行性和仿真实验分析的正确性,搭建如图 13 所示的实验平台。实验平台由一台 270 V DC、500 W 的 SDSEM-DF、一台 PMSM、转矩观测器、具备调节功能的多档位电阻负载箱、用于数据采集和电机驱动电路以及用于监测信号波形变化的示波器等部件共同构成。其中,样机的励磁绕组接在直流电源上,转轴通过联轴器和转矩观测器与 PMSM 相连。PMSM 的三相绕组连接在智能功率模块的驱动电路上与电阻负载箱相连,则可以通过调节电阻负载箱的挡位,将所需的负载转矩施加到 SDSEM-DF 上。

样机在 $1\,500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下运行,通过示波器得到的数据与优化仿真后的数据进行对比分析,图 14 为 A 相反电势对比,从图中可以看出制作出的样机的反电势呈现正弦波并且波形在波峰和波谷

处较为平滑,与优化后的电机的反电势波形基本吻合。由有限元仿真结果可得, $1\,500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下优化后电机的 E_{AMP} 为 59.004 V。由实验测得电机的 E_{AMP} 为 56.919 V。样机实验结果与仿真结果之间的误差小于 4%,说明有限元仿真和实验测量结果比较吻合。

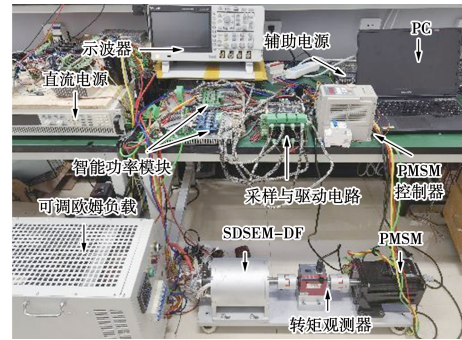


图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

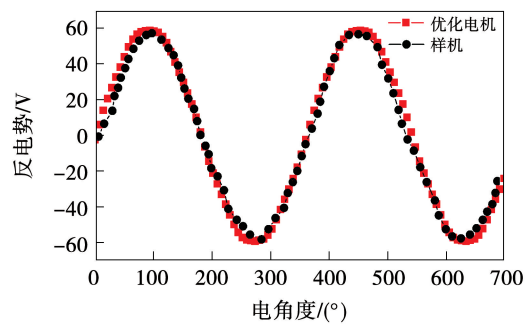


图 14 反电势对比分析

Fig. 14 Comparative analysis of back EMF

5.2 稳态实验

给样机通入幅值为 5 A 频率不同的三相交流电,使电机分别以 500 、 $1\,000$ 、 $1\,500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速运行,结果如图 15 所示。从图 15 可以看出电机转速平稳波动较小,表明电机具有较好的稳态性能。

5.3 加速实验

首先使样机以 $500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 启动,等电机运行稳定后通过转速调节器使其从 $500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $1\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,实验结果如图 16 所示。从图中可知加速过程历时 0.8 s,且转速到达 $1\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 仍稳定运行,转矩也相应变大。这是因为本文搭建的实验平台为 SDSEM-DF 和 PMSM 对拖平台,PMSM 通过整流桥和电阻箱相连提供负载转矩,转

速提高后,PMSM 阻转矩相应增加。

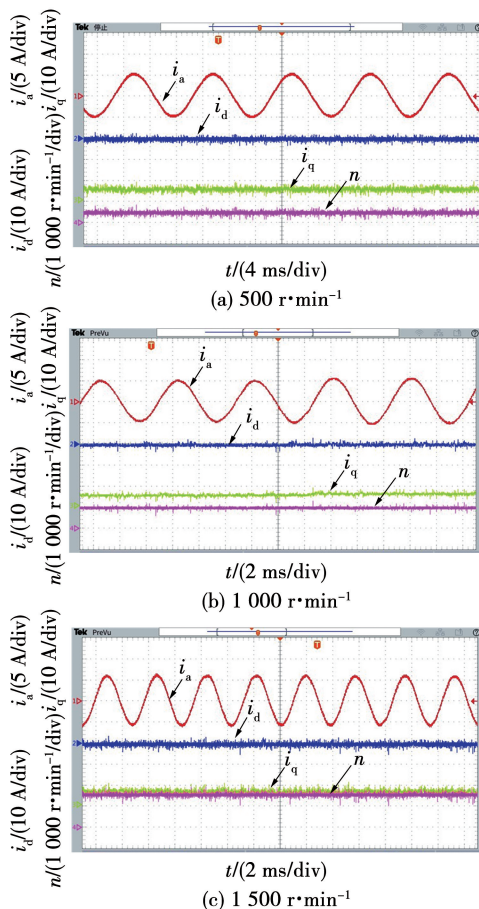


图 15 稳态实验结果

Fig. 15 Steady-state experimental results

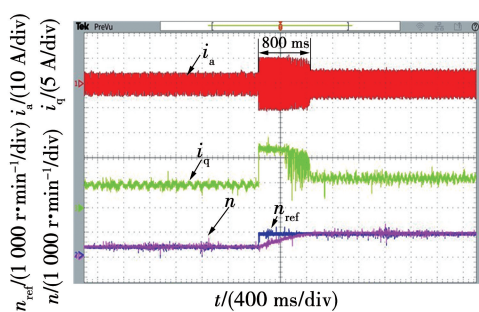


图 16 加速阶段分析

Fig. 16 Analysis of acceleration phase

5.4 减速实验

同样对样机进行减速实验,图 17 是电机转速从 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 到 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的波形。从图中可以看出在通过转速调节器作用后,经过 0.96 s 转速稳定到给定的 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。这说明电机在减速过程中表现出良好的动态特性。

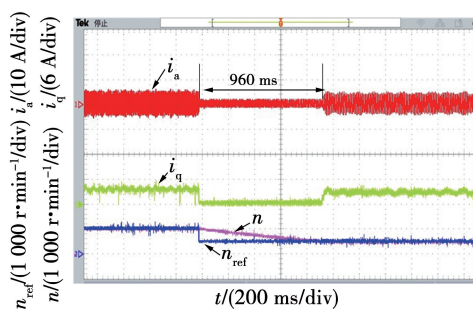


图 17 减速阶段分析

Fig. 17 Analysis of deceleration phase

6 结论

本文针对 SDSEM-DF 电机的复杂结构,提出了基于建立多元回归方程和多目标遗传算法相协调的优化设计方法,即在复杂电机结构尺寸参数中,筛选出对电机优化目标影响最大的关键结构尺寸参数。本文的结论如下:

1) 对于 SDSEM-DF 存在结构变量复杂和各个参数对电机特性的影响程度不同,引出一种“简化结构参数的敏感性分析法”,得到对优化目标影响较大的变量,从而满足电机优化的要求。

2) 本文提出的电机优化算法可以避免常规有限元分析中所面临的随着优化目标和结构参数的增加,需要进行的仿真次数呈指数级增长,导致耗时较长的问题。该方法能够有效地实现高效快速建立电机优化模型的目标。

3) 提出以提高 E_{AMP} ,降低 T_{cog} 和 THD 的多目标协同优化方法并在约束条件下利用遗传算法对目标函数进行寻优。

4) 通过有限元分析计算电机的各项电磁性能,优化后电机的 E_{AMP} 提升了 14.94% , T_{cog} 和 THD 谐波畸变率分别降低了 89.25% 和 17.5% 。根据样机的实测数据与本文所提多目标优化结果进行对比,达到了增加 E_{AMP} 的同时可以降低 T_{cog} 和 THD 的目的,表明所提的优化设计方法和理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] RAUCH S E, JOHNSON L J. Design principles of flux-switch alternators[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III Power Apparatus and Systems, 1955, 74(3): 1261.
- [2] ZHOU Xingwei, ZHOU Bo, WEI Jiadan. A novel position-sensor-

- less startup method for DSEM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 6101.
- [3] WANG Kaimiao, ZHOU Bo, ZHOU Xingwei, et al. The output voltage control strategy for DSEG with controlled rectification based on conduction angle estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(5): 3350.
- [4] XIONG Li, GE Hongjuan, ZHOU Bo, et al. Torque ripple reduction strategy for doubly salient electromagnetic machine based on current given function[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 7486.
- [5] JIANG Siyuan, ZHOU Bo, HUANG Xuzhen, et al. 3-D global thermal analysis of DSEM considering the temperature difference between excitation and armature coils[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 11931.
- [6] 虞诗佳, 张卓然, 顾相培, 等. 航空电励磁双凸极电机单/双层绕组下的发电性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9330.
- YU Shijia, ZHANG Zhuoran, GU Xiangpei, et al. Research on generation performance of single-layer and double-layer winding doubly salient electro-magnet machine for aircraft application[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9330.
- [7] 孙林楠, 张卓然, 于立, 等. 定子分布励磁双凸极无刷直流发电机电磁特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6218.
- SUN Linnan, ZHANG Zhuoran, YU Li, et al. Analysis of electromagnetic performance of doubly salient brushless DC generator with distributed field magnetomotive forces[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6218.
- [8] 蒋思远, 周波, 黄旭珍, 等. 不同励磁方式的电励磁双凸极电机正弦化设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1598.
- JIANG Siyuan, ZHOU Bo, HUANG Xuzhen, et al. Sinusoidal design and analysis of doubly salient electro-magnetic machine with two different excitation modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1598.
- [9] 叶赛, 周波, 蒋思远, 等. 电励磁双凸极电机九状态转矩闭环控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6441.
- YE Sai, ZHOU Bo, JIANG Siyuan, et al. Research on nine-state torque closed-loop control strategy of doubly salient electro-magnetic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6441.
- [10] 袁彪. 电动汽车用双凸极轮毂电机最佳斜槽角度的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [11] ZHANG Yufeng, GAO Wentao, SHI Qiaoning, et al. Optimization design of dual-redundancy permanent magnet synchronous motor based on improved iterations taguchi method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 10(38): 2637.
- [12] ZHANG Chi, CHEN Feixue, QIU Shuheng, et al. A low detent force DS-PMSLM based on the modulation of cogging and end forces[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 721.
- [13] ZHANG Zhiheng, WANG Peixin, HUA Wei, et al. Comprehensive investigation and evaluation of cogging torque suppression techniques of flux-switching permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 3894.
- [14] ZHOU Weiru, XIE Zonghong. Multi-objective optimization of motor sealing performance: numerical and experimental approach[J]. Materials, 2025, 18(9): 2064.
- [15] HOFFER Alvaro E, PETROV Ilya, PYRHONEN Juha J, et al. Analysis of a tooth-coil winding permanent-magnet synchronous machine with an unequal teeth width[J]. IEEE Access, 2020, 8: 71512.
- [16] LI Zheng, YU Xuze, WANG Xueting, et al. Optimization and analysis of cogging torque of permanent magnet spherical motor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1.
- [17] JIANG Tingting, ZHAO Wenxiang, XU Liang, et al. Investigation into multitoothed distribution design for magnetless doubly salient machine[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2787.
- [18] WU Shengnan, PANG Xiaowen, TONG Wenming, et al. Design of rotor magnetic barrier structure of built-in permanent magnet motor based on taguchi method[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(2): 193.
- [19] LIU Xiaoyu, FU Weinong, NIU Shuangxia. Optimal structure design of permanent magnet motors based on a general pattern of rotor topologies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1.
- [20] XU Wei, ZHANG Yishu, DU Guanghui, et al. Design and analysis of a hybridly excited asymmetric stator pole doubly salient machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2600.
- [21] 李哲, 郑玲, 杨威, 等. 开关磁阻电机转矩脉动及结构优化设计研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(6): 11.
- LI Zhe, ZHENG Ling, YANG Wei, et al. Research on torque ripple and structure optimization of switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(6): 11.
- [22] 乔路宽, 张炳义, 李岩, 等. 基于改进粒子群优化算法的外转子永磁同步电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 81.
- QIAO Lukuan, ZHANG Bingyi, LI Yan, et al. Multi-objective optimization design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 81.
- [23] 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.
- 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.
- [24] 李京泽, 吴新振, 陈春涛. 基于磁极分块的永磁电机气隙磁场解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6390.
- LI Jingze, WU Xinzen, CHEN Chuntao. Analytical calculation of air gap magnetic field for permanent magnet machines based on pole partition processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6390.
- [25] GAO Xiangyun, MENG Xiaoli, SHEN Ao, et al. Multi-objective optimization design of hybrid excitation doubly salient motor based on Taguchi method[C]//ICPE 2023 – ECCE Asia, May 22, 2023, Jeju Island, Korea, Republic of. 2023: 2968.
- [26] 高锋阳, 高建宁, 李明明, 等. 内置式 Halbach 永磁同步电机的参数敏感度分层优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 180.
- GAO Fengyang, GAO Jianning, LI Mingming, et al. Optimization design of Halbach interior permanent magnet synchronous motor based on parameter sensitivity stratification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 180.
- [27] 洪佳琪, 季宇, 卢琴芬. 基于代理模型的不对称极永磁电机优化设计[J]. 微特电机, 2024, 52(8): 14.
- HONG Jiaqi, JI Yu, LU Qinfen. Optimization design of asymmetric-pole permanent magnet motors based on a surrogate model[J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(8): 14.
- (编辑:刘琳琳)