

基于响应面法的轴向混合励磁双凸极航空发电机优化设计



马昕晨¹, 陈志辉¹, 赵雅周²

1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

2. 北京曙光航空电气有限责任公司, 北京 100020

摘要:混合励磁双凸极电机具有结构简单、功率密度高的特点,适用于航空电源系统。本文首先简要介绍了一种新型轴向混合励磁双凸极电机的结构特点,搭建电机有限元模型,确定电机初始设计参数,并根据磁链最大原则,通过田口正交优化方法,筛选出关键结构尺寸参数;然后采用中心复合设计试验,在设计空间内建立响应面模型;最后利用自适应遗传算法基于响应面模型进行全局最优解求解。有限元分析结果表明,优化后的电机磁链及反电势均有所提高,表明该优化方法的正确性。

关键词:混合励磁双凸极电机;田口正交优化方法;中心复合设计试验;响应面模型;自适应遗传算法

中图分类号:TM352

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.10.010

在270V高压直流电源系统中,双凸极电机由于具有结构简单坚固、使用安全、适用于高速运行等优点,逐渐成为飞机的启动/发电机首选的电机种类之一,近年来也逐渐受到国内外电机领域学者的广泛关注和研究^[1]。双凸极电机包括开关磁阻电机、永磁双凸极电机、电励磁双凸极电机和混合励磁双凸极电机。其中,混合励磁双凸极电机结合了永磁双凸极电机和电励磁双凸极电机的优点,既有永磁励磁可供独立发电,又有电励磁扩大调节气隙磁场范围,功率密度高,控制简单,容错性高,在航空航天、电动汽车、风力发电等领域都具有潜在的应用前景^[2]。

混合励磁双凸极电机同时采用永磁励磁与电励磁,电机结构相对复杂,因此如何优化电机结构以获取更高的功率密度和效率是电机设计过程中需要解决的问题之一。参考文献[3]针对新型双转子混合励磁电机,建立电机有限元求解模型,通过分析电机内的电磁场,得出最优结构及参数;参考文献[4]选取电机转矩、效率作为目标函数,定转子极弧、永磁体尺寸4个变量为优化变量,使用多目标量子进化算法,对混合励磁开关磁阻电机进行多目标优化设计;参考文献[5]针对混合励磁双定子磁悬浮开关磁阻电机,以平

均转矩/体积比与平均悬浮力/体积比作为优化目标,通过单变量分析法研究结构参数对优化目标的影响,将影响优化目标的主要参数作为优化参数,再采样遗传算法寻优。

本文对一台新型轴向混合励磁双凸极发电机(AHEDSM)进行优化设计和分析,以提高电机输出功率为目的,将磁链作为电机优化目标,通过分析电机数学模型,将对磁链有影响的结构参数作为初始优化参数,采用田口正交试验设计筛选出对磁链影响最大的关键结构尺寸参数,响应面法建立电机优化模型,再与自适应遗传算法相结合获得最佳变量优化组合,最后用有限元法验证所得结果的正确性^[6-7]。

1 电机结构设计

图1为AHEDSM电机结构,包含双定子铁芯、双转子铁芯、内外导磁体、永磁体、直流励磁绕组、电枢绕组等部件。电机为12/8极,三相,定转子铁芯均为凸极结构。定子铁芯分为上下两段,沿轴对称放置,每段定子铁芯等分为4份,每份包含三个定子齿,分别嵌入A、B、C各相集中绕组。在上下两侧定子齿上,每相对应的4个绕组串联,形成三相

收稿日期:2022-04-24; 退修日期:2022-06-15; 录用日期:2022-07-20

基金项目:航空科学基金(20200040052001)

引用格式: Ma Xincheng, Chen Zhihui, Zhao Yazhou. Optimization design of axial hybrid excitation doubly salient aerospace machine based on response surface method[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(10): 74-81. 马昕晨, 陈志辉, 赵雅周. 基于响应面法的轴向混合励磁双凸极航空发电机优化设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 74-81.

绕组；上下转子同样沿轴放置，并相互错开 22.5° ，转子上无绕组。励磁绕组为集中式环形绕组，放置于双转子铁芯之间。定子外侧导磁体同样等分为 4 份，永磁体放置在相对的两片外导磁体中央。该瓦片状永磁体为轴向磁化，且两片永磁体磁化方向一致。

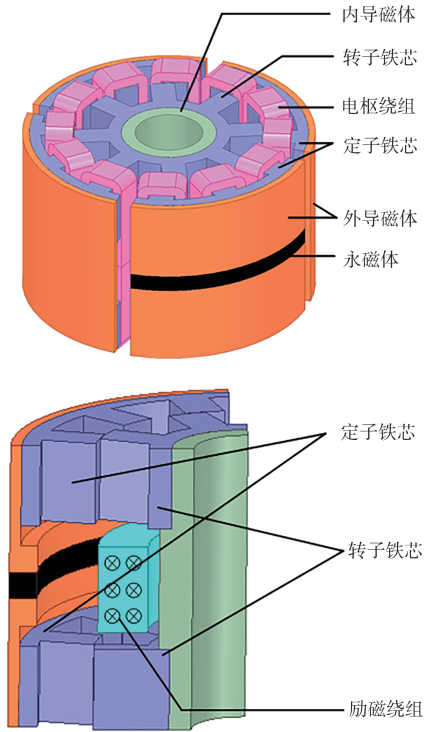


图1 AHEDSM电机结构

Fig.1 Structure of AHEDSM

影响电机性能的主要参数为机壳外径 D 、电机总长 H 、每段铁芯长度 h_e 、永磁体厚度 h_m 、气隙直径 D_δ 、定子外径 D_s 、转子内径 D_r 、轴直径 D_a 、内导磁体直径 D_n 、定子轭高 h_{li} 和转子轭高 h_{2i} 等，如图 2 所示。

AHEDSM 作为高压直流发电机，需外接整流器，输出直流电能。图 3 给出了二极管不控三相桥整流电路拓扑。其中， u_a 、 u_b 、 u_c 分别为 PWM 三相输入电压， i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 AHEDSM 三相输出电流， R_o 为直流侧等效负载， U_o 为输出直流电压，输出端无滤波电容。

根据电机设计经验，取电机气隙为 0.5mm，槽满率为 70%，励磁绕组线径为 1.725mm，电枢绕组线径为 3.665mm；励磁绕组环绕内导磁体，置于双转子之间，且与上下转子均需留有 6.5mm 的间隙，与内导磁体留有 4mm 的间隙，用于放置励磁绕组支架且防止转子高速转动时摩擦励磁绕组；励磁绕组与定子内径之间需留有 1mm 的间隙，

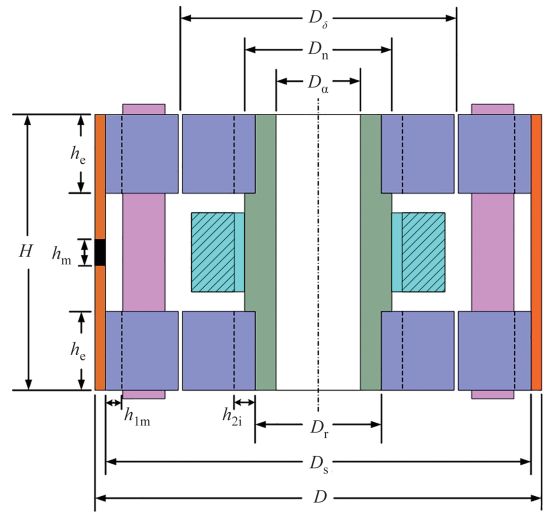


图2 AHEDSM尺寸参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of AHEDSM size parameters

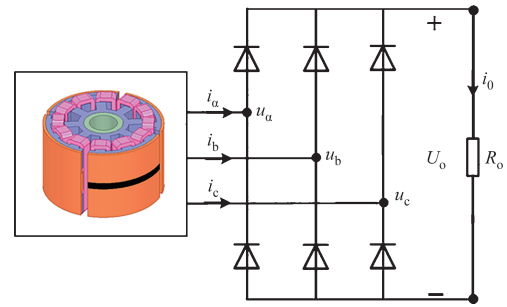


图3 AHEDSM控制电路拓扑

Fig.3 Control circuit topology of AHEDSM

防止与电枢绕组接触；则励磁绕组槽面积为

$$S_f = \left[\frac{D_\delta}{2} - 1 - \left(\frac{D_n}{2} + 4 \right) \right] \times (H - 2h_e - 13) \quad (1)$$

槽内可放置励磁绕组匝数为

$$N_f = \frac{S_f \times 0.7}{\pi \left(\frac{1.725}{2} \right)^2} \quad (2)$$

同理，根据定子外径 D_s 、定子轭高 h_{li} 、气隙直径 D_δ 可计算定子槽面积 S_a ，一个槽内放置两个电枢绕组线圈，则电枢绕组匝数为

$$N_a = \frac{S_a \times 0.7}{2 \times \pi \left(\frac{3.665}{2} \right)^2} \quad (3)$$

电枢绕组匝数越大，电机电感越大，高速运行时感抗越大，功率因数越低，故 N_a 应不大于 15 匝。电机设计指标为设计额定转速 12000r/min，额定直流电压 270V，额定功率 5kW。根据电磁校核计算和结构参数的调整，电机初始尺寸参数见表 1。

表1 AHEDSM结构尺寸

Table 1 Structure parameters of AHEDSM

参数	数值	参数	数值
D/mm	172	H/mm	105
h_e/mm	30	h_m/mm	10
D_s/mm	164	D_f/mm	56
h_{11}/mm	6.7	h_{21}/mm	8.2
D_n/mm	64	D_g/mm	40
D_8/mm	110.8	N_f	180
N_a	13		

2 优化设计

2.1 优化总流程

本文根据初始设计参数,在ANSYS仿真软件中搭建其三维有限元模型。由于AHEDSM具有特殊的双定子、双转子结构,结构复杂,优化过程中需要考虑的尺寸参数众多,为了兼顾全面优化电机和提高优化效率,先根据电机工作原理分析需要优化的尺寸参数,再建立田口正交试验表确定各参数对目标函数的影响率,选取影响率大的参数作为后续优化的关键结构尺寸参数。采用中心复合设计试验得到数据点,搭建响应面模型,结合自适应遗传算法求取响应面函数的最优值点,经有限元仿真验证,确定最终的尺寸参数。优化流程如图4所示。

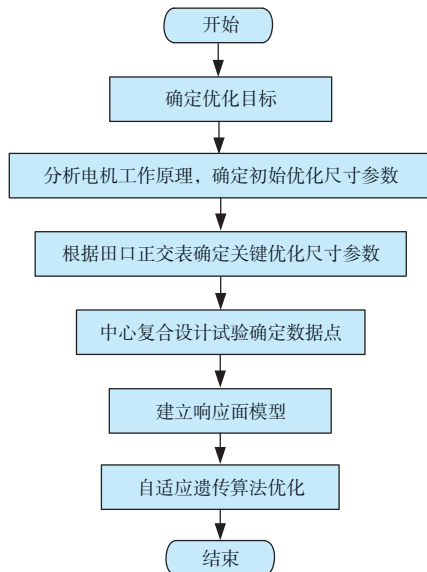


图4 优化设计流程

Fig.4 Process of the optimization

2.2 优化变量及目标

发电机优化的目的为在输入功率不变的情况下,合理设置计算电机电磁参数,使电机输出电压最大。电机电枢

各相绕组匝链的磁链大小决定着电机输出功率的大小,根据电机工作原理,各相绕组匝链的磁链越大,反电动势越大,经整流后输出电压越大,从而输出功率增大,所以将电机单相绕组匝链的磁链幅值作为优化目标。

优化过程中,应尽量保持电机体积不变,则将机壳外径 D 、电机总长 H 、轴直径 D_a 、内导磁体直径 D_n 、转子内径 D_r 设置为定值。

根据电机的工作原理,电机磁链为

$$\psi_a = 2N_a \left(\frac{F_m}{R_m + 2R_\delta} + \frac{F_f}{2R_\delta} \right) \quad (4)$$

式中,永磁体磁势 F_m 与永磁体厚度 h_m 有关,励磁磁势 F_f 与励磁绕组匝数 N_f 有关,永磁体磁阻 R_m 为永磁体厚度 h_m 和定子外径 D_s 的函数,气隙磁阻 R_δ 为气隙直径 D_δ 和每段铁芯长度 h_e 的函数,由式(3)得到电枢绕组匝数 N_a 与定子轭高 h_{11} 有关;综上,将 h_m 、 D_s 、 D_δ 、 h_e 及 h_{11} 设为优化变量。每个优化变量分别有4个水平变量,取值见表2。

表2 优化参数及参数变量取值

Table 2 Optimization parameters and parameter values of the variables

水平参数/mm	1	2	3	4
D_δ	106.8	108.8	110.8	112.8
D_s	160	162	164	166
h_m	8	10	12	14
h_e	26	28	30	32
h_{11}	4.7	5.7	6.7	7.7

根据田口法设计 $L_9(4^5)$ 正交表并建立试验矩阵^[6-7],绕组匝数随电机尺寸变化而变化,取励磁电流为12A,利用有限元分析得到磁链最大值,见表3。

根据表3中结果,计算各优化参数的平均值和方差,得到各参数变化对磁链影响所占的比重。 x 为不同的优化参数, i 为1、2、3、4的4个水平,则不同优化参数每个水平下的平均值为

$$M_{xi} = \frac{\psi_{xi}(1) + \psi_{xi}(2) + \psi_{xi}(3) + \psi_{xi}(4)}{4} \quad (5)$$

计算结果见表4。取每个参数4个平均值中的最大值,则使磁链最大的参数组合见表5。

根据表3,得磁链平均值为

$$M_\psi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (6)$$

式中, n 为试验次数。各优化参数的方差计算公式为

$$S = 4 \sum_{i=1}^4 (M_{xi} - M_\psi)^2 \quad (7)$$

表3 正交表及试验结果

Table 3 Orthogonal table and test results

序号	优化参数水平					ψ/Wb
	D_δ	D_s	h_m	h_e	h_{li}	
1	1	1	1	1	1	0.0280
2	1	2	2	2	2	0.0273
3	1	3	3	3	3	0.0255
4	1	4	4	4	4	0.0220
5	2	1	2	3	4	0.0227
6	2	2	1	4	3	0.0237
7	2	3	4	1	2	0.0263
8	2	4	3	2	1	0.0263
9	3	1	3	4	2	0.0249
10	3	2	4	3	1	0.0263
11	3	3	1	2	4	0.0235
12	3	4	2	1	3	0.0229
13	4	1	4	2	3	0.0217
14	4	2	3	1	4	0.0211
15	4	3	2	4	1	0.0249
16	4	4	1	3	2	0.0229

表4 各优化参数各水平下的平均值

Table 4 Average value of optimization parameters at each level

水平参数/mm	1	2	3	4
D_δ	0.0257	0.0240	0.0244	0.0227
D_s	0.0243	0.0246	0.0251	0.0228
h_m	0.0245	0.0245	0.0237	0.0241
h_e	0.0246	0.0239	0.0244	0.0239
h_{li}	0.0256	0.0254	0.0235	0.0223

表5 最优参数组合

Table 5 Optimal parameters combination

优化参数	D_δ	D_s	h_m	h_e	h_{li}
参数值/mm	106.8	164	10	26	4.7

得到每个参数的影响比重,见表6。根据表6中的结果,初选的5个参数中对磁链影响较大的为气隙直径 D_δ 、定子外径 D_s 和定子轭高 h_{li} ,所占比重分别为29.38%、18.91%

表6 优化参数对磁链的影响比重

Table 6 Influence proportion of optimization parameters on the flux linkage

优化参数	方差	比重/%
D_δ	0.00001957	29.38
D_s	0.00001260	18.91
h_m	0.00000243	3.65
h_e	0.00000197	2.96
h_{li}	0.00003000	45.10
总和	0.00006657	100

和45.10%,故将这三个参数作为后续优化的优化参数,初值见表5;永磁体厚度 h_m 和每段铁芯长度 h_e 对磁链影响较小,故设为定值,取值见表5。

2.3 响应面模型建立

响应面法(RSM)通过对指定设计空间内的样本点的集合进行有限的试验设计(DOE),选择出具有代表性的局部各点进行试验,拟合全局范围内变量与目标间的函数关系来代替真实响应面^[8]。

试验设计方法主要分为经典采样和全空间分布型采样^[9-10]两大类。经典采样包括部分因子试验(FFD)、全因子试验(FFD)、中心复合试验(CCD)和Box-Behnken方法等;全空间分布型采样主要有正交设计(OD)和拉丁超立方设计(LSD)等。全因子/部分因子试验耗时长,LSD对样本采样要求较高,综合考虑,本文采用CCD进行试验设计。

本文选用CCD设计中应用最广的表面集中型中心复合试验(CCF)设计,每个变量仅需三个水平,设计复杂性降低。优化变量为气隙直径 D_δ 、定子外径 D_s 和定子轭高 h_{li} ,每个变量具有-1、0、1三个水平,-1是变量取值范围的最小值,0是变量取值范围的平均值,1是变量取值范围的最大值。变量取值见表7。

表7 优化变量水平设计

Table 7 Optimizing variable level design

水平参数/mm	1	2	3
D_δ	102.8	106.8	110.8
D_s	162	164	166
h_{li}	3.7	4.7	5.7

借助ANSYS三维仿真软件得到每组样本点的响应值,电枢绕组匝数同样随着电机尺寸的变化而变化,表8是设计试验样本点及其对应的磁链响应值。

由于优化变量 X 与目标 Y 之间复杂的非线性关系,无法写出明确的函数表达式,因此只能用响应面模型构造近似函数来逼近真实函数^[11]。构建响应面模型的方法包括多项式回归法、人工神经网络法、kriging函数法和径向基函数法;由于人工神经网络法和kriging函数拟合所需时间较长,径向基函数适用于曲面重构,多项式回归法适用于少变量低阶问题,精度高且收敛速度快,因此本文综合考虑,选用多项式回归方法进行响应面建模。为了得到更加精确的弯曲响应,选用三元二阶响应面函数,其表达式如下

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^3 \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (8)$$

式中, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为待估算的回归系数; ε 为拟合误差; x_i, x_j

表8 CCF采样表

Table 8 CCF sampling sheet

序号	D_s/mm	D_δ/mm	h_{li}/mm	ψ/Wb
1	102.8	162	3.7	0.0262
2	110.8	162	3.7	0.0287
3	102.8	166	3.7	0.0222
4	110.8	166	3.7	0.0247
5	102.8	162	5.7	0.0263
6	110.8	162	5.7	0.0250
7	102.8	166	5.7	0.0223
8	110.8	166	5.7	0.0248
9	102.8	164	4.7	0.0250
10	110.8	164	4.7	0.0273
11	106.8	162	4.7	0.0278
12	106.8	166	4.7	0.0236
13	106.8	164	3.7	0.0263
14	106.8	164	5.7	0.0263
15	106.8	164	4.7	0.0263
16	106.8	164	4.7	0.0263
17	106.8	164	4.7	0.0263
18	106.8	164	4.7	0.0263
19	106.8	164	4.7	0.0263

为变量。

用矩阵表示为

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (9)$$

最小二乘法估算回归系数的值,求得回归系数的近似矩阵为

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (10)$$

响应的近似矩阵为

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} \quad (11)$$

拟合完成后,需要检验拟合模型的精确度,通常用相对均方根误差RMSE、相关系数 R^2 、调整绝对系数 R_{adj}^2 来判断模型的精确度。RMSE表示模型计算值与实际值之间的误差,越接近0说明模型越精确; R^2 表示模型与实际系统的近似程度,越接近1代表相似程度越高; R_{adj}^2 是决定系数 R^2 经调整后得到的统计参数,其值不受变量个数的影响,越接近1,说明拟合得越好。RMSE、 R^2 、 R_{adj}^2 的计算公式分别如式(12)~式(14)所示

$$\text{RMSE} = \frac{1}{n\bar{y}} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{S_{\text{SE}}(n-m-1)}{S_{\text{ST}}(n-1)} \quad (14)$$

式中, n 为样本点数; m 为自变量的数目; $\bar{y}$ 为试验平均值; y_i 为第 i 个样本点的试验值; $\hat{y}_i$ 为第 i 个样本点的预测值; S_{SE} 为残差平方和; S_{ST} 为总偏差平方和。计算公式如下

$$S_{\text{SE}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

$$S_{\text{ST}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (16)$$

经整理得,磁链和优化尺寸的关系为

$$\begin{aligned} \psi = & -4.2915 - 0.0044D_\delta + 0.0569D_s - 0.0248h_{li} - \\ & 2.1553 \times 10^{-5}D_\delta^2 - 1.9871 \times 10^{-4}D_s^2 - \\ & 1.94485 \times 10^{-4}h_{li}^2 + 5.9375 \times 10^{-5}D_\delta D_s - \\ & 1.1875 \times 10^{-4}D_\delta h_{li} + 2.3750 \times 10^{-4}D_s h_{li} \end{aligned} \quad (17)$$

该响应面模型的检验系数见表9,拟合程度较好,可用于后续优化中。

表9 响应面模型的拟合程度

Table 9 Fitting degree of response surface model

RMSE	R^2	R_{adj}^2
0.0035	94.09%	95.07%

2.4 自适应遗传算法优化

自适应遗传算法是一种简化的模拟生物遗传和变异过程的算法,基本原理是随机产生一组解,经过数字编码成为染色体,得到初始种群;计算种群中各个个体的适应度,按照适者生存和优胜劣汰的原理,淘汰适应度值低的个体,选择适应度值高的个体进行交叉、变异,产生新一代种群,并对新的种群继续进行更新换代,直到找到最优解^[12-15]。遗传算法的具体流程如图5所示。

选取响应面的三个设计参数为优化变量,调用Matlab遗传算法函数进行多目标优化,算法默认求解的是最小值,而目标是磁链最大,因此优化目标为磁链的倒数,适应度函数为响应面模型的倒数,具体问题归结为

$$\frac{1}{\psi} = \min \frac{1}{f(D_\delta, D_s, h_{li})} \quad (18)$$

优化结果见表10。至此,优化过程全部结束。

3 优化结果验证

利用ANSYS有限元分析软件对上文所求解出的最优设计进行仿真验证,比较优化前后电机电磁性能的差异见表11。

图6为电机优化前后磁链波形,A、B、C三相的磁链波形互差120°电角度,优化前的电机磁链幅值为0.0230Wb,

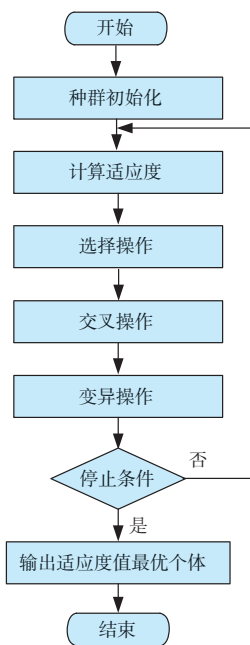


图5 遗传算法优化流程

Fig.5 Optimization steps of genetic algorithm

表 10 遗传算法的分析结果

Table 10 Analysis results of genetic algorithm

D_g/mm	110.8
D_s/mm	26
h_{11}/mm	3.7

表 11 优化前后参数对比

Table 11 Comparison between parameters before and after optimization

优化参数	优化前	优化后
D_g/mm	110.8	110.8
D_s/mm	164	162
h_m/mm	10	10
h_e/mm	30	26
h_{11}/mm	6.7	3.7
N_f	180	230
N_a	13	13

优化后的磁链幅值为0.0245Wb,提高了6.5%。

电机空载反电势的波形如图7所示,优化前电机空载反电势的有效值为161.47V,优化后电机空载反电势的有效值为171.20V,增长了6.0%。

电机尺寸的改变同样会引起齿槽转矩的变化,如图8所示。虽然优化后的电机的电磁性能有所改善,但齿槽转矩也有所增加,峰峰值由原来的0.458N·m增大到0.529N·m。

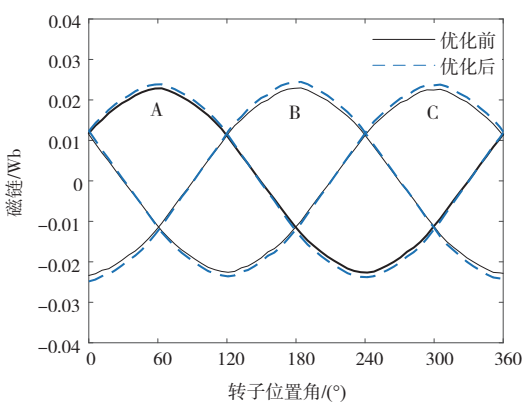


图6 优化前后磁链对比图

Fig.6 The comparison chart of flux linkage before and after optimization

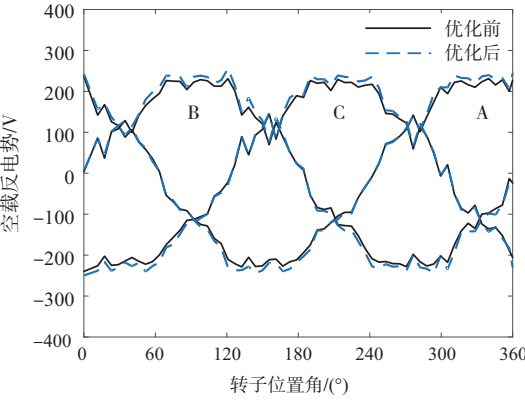


图7 优化前后空载反电势对比图

Fig.7 The comparison chart of back EMF before and after optimization

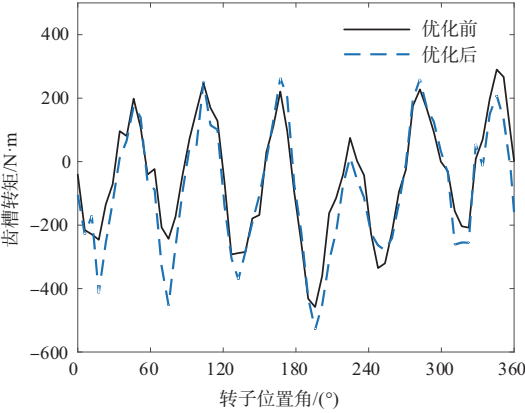


图8 优化前后齿槽转矩对比图

Fig.8 The comparison chart of cogging torque before and after optimization

4 结论

本文针对 AHEDSM 电机双定子、双转子的复杂结构,

提出一种基本响应面模型的多参数优化方法。根据田口正交表分析参数对目标的影响比重,筛选出对电机磁链影响最大的关键结构尺寸参数,采用中心复合设计试验得到数据点,搭建响应面模型,结合自适应遗传算法,快速有效地确定电机最优结构尺寸参数。通过ANSYS有限元分析软件计算电机的磁链及空载反电势,表明经优化调整后,电机的电磁性能有了明显改善,从而验证了该理论分析和优化方法的正确性。

AST

参考文献

- [1] 严仰光,秦海鸿,龚春英,等.多电飞机与电力电子[J].南京航空航天大学学报,2014,46(1):11-18.
Yan Yangguang, Qin Haihong, Gong Chunying, et al. More electric aircraft and power electronics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014,46(1):11-18. (in Chinese)
- [2] 秦海鸿.混合励磁双凸极电机基本性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
Qin Haihong. Research on doubly salient hybrid excitation machine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.(in Chinese)
- [3] 井立兵,高起兴,王冲,等.双转子混合励磁电机优化设计和特性分析[J].电机与控制学报,2019,23(9):43-50.
Jing Libing, Gao Qixing, Wang Chong, et al. Optimization design and characteristic analysis of dual-rotor hybrid excitation motor[J]. Electric Machines and Control, 2019,23(9): 43-50. (in Chinese)
- [4] 杨鑫.基于有限元分析的混合励磁开关磁阻电机参数多目标优化设计[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.
Yang Xin. Multi-objective optimization design of hybrid excitation switched reluctance motor based on finite element analysis[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.(in Chinese)
- [5] 方梦娇.混合励磁双定子磁悬浮开关磁阻电机的优化设计和分析[D].镇江:江苏大学,2019.
Fang Mengjiao. Optimization design and research on hybrid excitation double-stator bearingless switched reluctance motor [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.(in Chinese)
- [6] 李争,张璐,王群京,等.基于响应面法的永磁转子偏转式三自由度电动机结构参数的优化设计[J].电工技术学报,2015,30(13):134-142.
Li Zheng, Zhang Lu, Wang Qunjing, et al. Optimal design of structure parameters of three-DOF deflection type PM motor based on response surface methodology[J]. Electrical Engineering Magazine, 2015,30(13):134-142. (in Chinese)
- [7] 陈佳馨.三相聚磁式双边无源转子横向磁通永磁电机研究[D].南京:南京航空航天大学,2021.
Chen Jiaxin. Research on three-phase flux-concentrating transverse flux PM machine with two-sided passive rotor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.(in Chinese)
- [8] 李莉,张赛,何强,等.响应面法在试验设计和优化中的应用[J].实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
Li li, Zhang Sai, He Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015,34(8):41-45. (in Chinese)
- [9] 艾依斯.基于径向基函数响应面优化方法研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
Ai Yisi. Research on response surface method optimization based on radial basis function[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.(in Chinese)
- [10] 程敬丽,郑敏,楼建晴.常用的试验优化设计方法对比[J].实验室研究与探索,2012,31(7):7-11.
Cheng Jingli, Zheng Min, Lou Jianqing. Comparison of several common optimal experimental design methods[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012,31(7):7-11. (in Chinese)
- [11] 张昌锦.一种新型外转子横向磁通永磁电机的研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
Zhang Changjin. Research on a new transverse flux permanent magnet motor with external rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.(in Chinese)
- [12] 牛子杰,孙志峻,陈超,等.基于响应面模型和自适应遗传算法的中空型行波超声电机柔性转子结构优化[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5278-5385.
Niu Zijie, Sun Zhijun, Chen Chao, et al. Optimization of the rotor structure of a hollow traveling wave ultrasonic motor based on response surface methodology and self-adaptive genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5278-5385. (in Chinese)

- [13] 徐龙江, 牟磊, 汤磊, 等. 基于响应面模型和遗传算法的无刷分块电枢轴向磁场永磁电机齿槽转矩优化[J]. 微电机, 2020, 53(12): 22-28.
- Xu Longjiang, Mu Lei, Tang Lei, et al. Optimization of cogging torque of yokeless and segmented armature machine based on response surface model and genetic algorithm[J]. Micromotors, 2020, 53(12): 22-28. (in Chinese)
- [14] 朱慧玲, 周启航. 直升机主减弧齿锥齿轮优化设计[J]. 航空科学技术, 2021, 32(8): 12-17.
- Zhu Huiling, Zhou Qihang. Optimal design of helicopter's main spiral bevel gear[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(8): 12-17. (in Chinese)
- [15] 徐钊, 张一童, 潘震, 等. 基于遗传算法—支持向量机的航电模块故障分类研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10): 80-86.
- Xu Zhao, Zhang Yitong, Pan Zhen, et al. Avionics module fault classification based on genetic algorithm-support vector machine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 80-86. (in Chinese)

Optimization Design of Axial Hybrid Excitation Doubly Salient Aerospace Machine Based on Response Surface Method

Ma Xincheng¹, Chen Zhihui¹, Zhao Yazhou²

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Beijing Shuguang Aero Electric Limited Liability Company, Beijing 100020, China

Abstract: The hybrid excitation doubly salient machine has the characteristics of simple structure and high power density, suitable for aviation high-voltage power generation system. Firstly, this paper briefly introduces the structural characteristics of a new type of axial hybrid excitation double salient machine(AHEDSM), establishes the finite element simulation model and determines the initial design size parameters of the machine. According to the principle of maximum flux linkage, the key structural size parameters are screened out by Taguchi orthogonal optimization method. Then response surface model is established in the design space by central composite design. Finally, self-adaptive genetic algorithm is used to solve the global optimum based on response surface model. The finite element analysis results show that the optimized machine flux linkage and back EMF are improved, which confirms the correctness of the optimization method.

Key Words: hybrid excitation doubly salient machine; taguchi orthogonal optimization method; central composite design; response surface model; self-adaptive genetic algorithm

Received: 2022-04-24; Revised: 2022-06-15; Accepted: 2022-07-20

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200040052001)