

# 轴向磁通永磁同步发电机的优化设计研究

上官璇峰 王亚辰

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

**摘要:** 利用田口方法确定了极弧系数和线圈边宽度是主要影响轴向磁通永磁发电机空载电压基波幅值和总谐波失真度的参数。在考虑磁密谐波的情况下,推导了电动势的谐波绕组系数表达式,结果发现通过优化线圈边宽度和极弧系数可以控制谐波绕组系数的大小。进一步利用响应曲面方法,以空载电压基波幅值最大且总谐波失真度最小为优化目标,寻求了极弧系数与线圈边宽度配合的最优方案,并通过有限元仿真计算验证了优化结果。优化前后发电机目标性能明显改善,证明了此优化方法在轴向磁通永磁电机优化设计中的可靠性。

**关键词:** 电机优化设计;响应曲面;田口方法;线圈边宽度;极弧系数;谐波绕组系数

**中图分类号:** TM351; TN02      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.4024

## Optimization of axial flux permanent magnet synchronous generator

Shangguan Xuanfeng Wang Yachen

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In this paper, the method of Taguchi method is used to determine the pole-arc coefficient and width of coil-side, which are the main parameters that affect the fundamental amplitude and the total harmonic distortion of the no-load voltage of the axial flux permanent magnet generator. The winding factor with harmonic of electromotive force (EMF) of generators was deduced in the case of considering the flux density with harmonic. The winding factor with harmonic can be controlled by the optimization of the width of coil-side and pole-arc coefficient. By the maximum amplitude of the fundamental harmonic of the EMF and the minimum total harmonic distortion (THD) as the optimizing goal, the optimization scheme of the match between pole-arc coefficient and width of coil-side was found by the response surface methodology, and the optimization results was proved by finite element analysis (FEA) results. After optimization, the performance of the generator was improved obviously, the reliability of the optimization methodology applied in axial flux permanent magnet machine was proved.

**Keywords:** optimization of machine; Taguchi methodology; response surface methodology; width of coil-side; pole-arc coefficient; winding factor with harmonic

## 0 引言

轴向磁通永磁同步发电机具有半径尺寸大的特点,很容易满足多极低速要求,特别适合应用于直驱式风力发电系统<sup>[1-3]</sup>,结构如图1所示。发电机提供给负载的电压波形应接近正弦波<sup>[4]</sup>,永磁电机中,气隙磁场中含较多的谐波,导致定子绕组感应电动势波形发生畸变,因此对发电机电动势波形的优化是十分必要的。

国内外学者对新型算法在电机优化设计方面的应用做了相当多的研究。Mahmoudi等人<sup>[5]</sup>通过遗传算法,以功率密度为目标,优化了电机的尺寸。Wang等人<sup>[6]</sup>在仅考

虑磁密基波条件下,对定子叠绕组和定子非叠集中绕组的绕组空载电动势进行了详细解析计算,得出结论,对于多极数电机,定子非叠集中绕组的优势更加明显。李立毅等人<sup>[7]</sup>以永磁体和环形绕组的尺寸参数为变量,以推力体积比、电机常数、电机波动为优化目标,利用多种群遗传算法对无铁心永磁直线同步电机进行了优化设计。

将多种优化算法结合起来使用可以使电机优化过程更加合理,优化结果更加可靠。本文利用田口法与响应曲面法相结合的方法,对轴向磁通永磁同步发电机的永磁体厚度,极弧系数,气隙长度以及线圈边宽度进行了优化,以达到电动势基波幅值最大,谐波含量最小的优化目标。

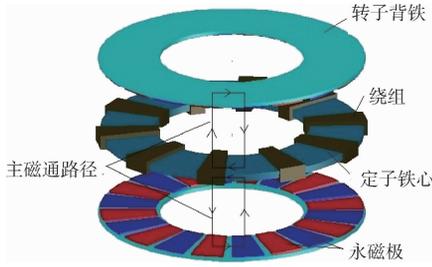


图 1 轴向磁通发电机结构

## 1 田口方法

### 1.1 田口方法原理

田口方法能通过尽量少的实验次数来迅速有效地确定最佳的实验设计组合方式<sup>[8]</sup>,其优点在于简单易懂,实验设计过程方便实用。田口方法的方案设计流程如下。

1) 优化参数设计。优化参数的设计即实验参数的选择,包括参数个数和水平的选择。

2) 制定可控因子正交表。可控因子正交表是田口优化方法的重要工具。对于 4 因素 3 水平的实验,若全部做需  $3^4$  次共 81 次实验,用正交表进行实验只需 9 次,这 9 次实验在全体 81 次实验表上是均衡分散的。

3) 获取实验数据。实验数据可通过具体实验获得,也可通过软件仿真获得。

4) 实验数据分析及确定优化结果。田口方法对实验数据的分析工具主要有平均值分析和方差分析两种。平均值表示某参数在不同因子水平下,对于响应的平均表现。方差的计算结果可得出各参数对响应的影响比重。

### 1.2 优化方案设计和有限元仿真计算分析

轴向磁通永磁同步发电机的初步设计未能使其性能达到一个相对的最优值。永磁极厚度,极弧系数,气隙长度和线圈边宽度是影响发电机输出性能指标的主要参数<sup>[9]</sup>。本文选取发电机空载电压的基波幅值及其总谐波失真度 (THD) 作为发电机优化的目标函数,将极弧系数  $\alpha_p$ 、线圈有效边宽度  $\theta_{re}$  (用平均半径处有效导体所占电角度表示)、永磁极厚度  $h_m$  和气隙长度  $h_g$  作为可控因子。表 1 所示为发电机有限元模型参数,表 2 所示为选取的可控因子及其取值。

表 1 发电机有限元模型参数

电机参数	数值	单位
额定功率 $P_o$	15	kW
额定相电压 $U_N$	220	V
额定电流 $I$	28	A
额定频率 $f$	50	Hz
相数 $m$	3	
极对数 $p$	10	对

续表

电机参数	数值	单位
线圈总数 $Q$	24	
导体直径 $d$	3.5	mm
单个线圈匝数 $N_c$	35	匝
线圈边截面积 $S$	132	mm <sup>2</sup>
线圈边宽度 $\theta_{re}$	25, 35, 45	elec. deg
极弧系数 $\alpha_p$	0.6, 0.75, 0.9	
永磁体厚度 $h_m$	4.25, 4.5, 4.75	Mm
永磁体内半径 $R_i$	200	mm
永磁体外半径 $R_o$	350	mm
单侧气隙长度 $h_g$	1.75, 2, 2.25	mm

表 2 影响因子及其取值

影响因子	$h_g$	$h_m$	$\theta_{re}$	$\alpha_p$
1	1.75	4.25	25	0.6
2	2	4.5	35	0.75
3	2.25	4.75	45	0.9

根据田口方法建立可控因子水平正交表,利用有限元仿真软件进行建模计算。有限元计算结果如表 3 所示。

表 3 正交表和有限元计算结果

次序	$h_g$	$h_m$	$\theta_{re}$	$\alpha_p$	$U_b/V$	$THD_U/\%$
1	1.75	4.25	2.5	0.6	298.50	7.165
2	1.75	4.5	3.5	0.75	309.63	6.153
3	1.75	4.75	4.5	0.9	303.60	6.354
4	2	4.25	3.5	0.9	307.40	4.703
5	2	4.5	4.5	0.6	306.81	5.411
6	2	4.75	2.5	0.75	305.61	6.397
7	2.25	4.25	4.5	0.75	306.49	7.114
8	2.25	4.5	2.5	0.9	304.71	3.405
9	2.25	4.75	3.5	0.6	306.70	7.307

发电机的某一参数在某一个水平下,对于发电机空载电压基波幅值的平均表现可以用式(1)表示。

$$m_{s,j} = \frac{1}{k} [U_b(n_1) + U_b(n_2) + \dots + U_b(n_k)] \quad (1)$$

式中: $x$  为电机参数; $j$  为水平数; $U_b$  为空载电压基波幅值; $n_1, n_2, \dots, n_k$  为第 1, 2,  $\dots, k$  次实验。

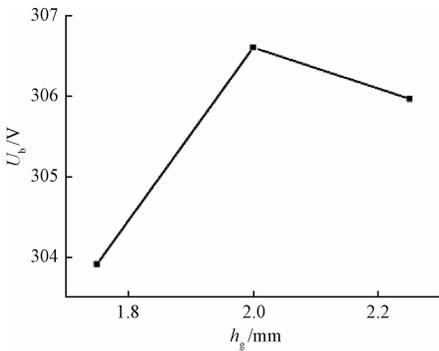
各参数在不同水平下,优化目标的平均值如表 4 所示。

将表 4 中的数据整理后可得出各参数在不同水平条件下对发电机空载电压基波幅值及总谐波失真度  $THD_u$  值的影响,如图 2 和 3 所示。

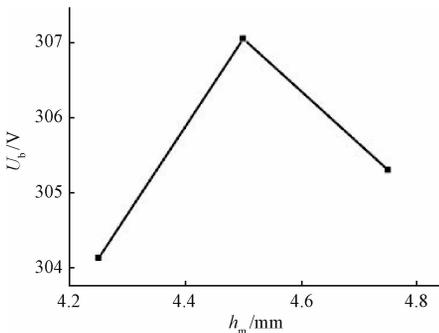
图 2 和 3 直观得显示出各参数变化时,发电机空载电压基波幅值  $U_b$  和总谐波失真度  $THD_u$  随其变化的趋势:当发电机气隙长度在区间  $1.75 < h_g < 2.25$  变化时,  $U_b$  先

表4 各性能指标平均值

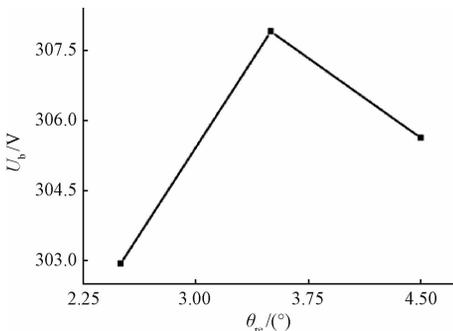
发电机参数	水平数	$U_b/V$	$THD_u/\%$
$h_g$	1	303.91	6.557
	2	306.61	5.504
	3	305.97	5.942
$h_m$	1	304.13	6.327
	2	307.05	4.990
	3	305.30	6.686
$\theta_{re}$	1	302.94	5.656
	2	307.91	6.054
	3	305.63	6.293
$\alpha_p$	1	304.00	6.628
	2	307.24	6.555
	3	305.24	4.821



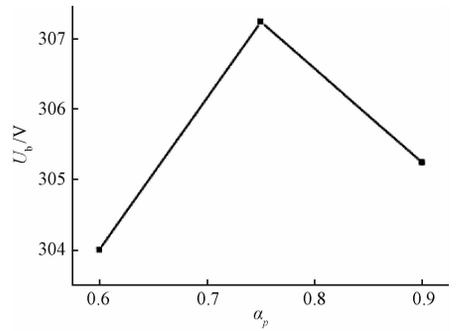
(a) 气隙长度不同水平下的空载电压基波幅值



(b) 磁极厚度不同水平下的空载电压基波幅值



(c) 线圈宽度不同水平下的空载电压基波幅值

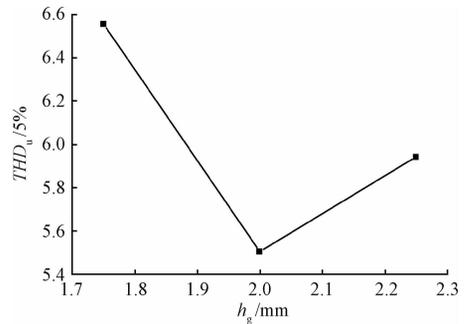
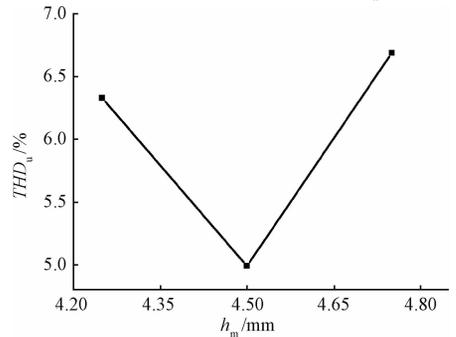
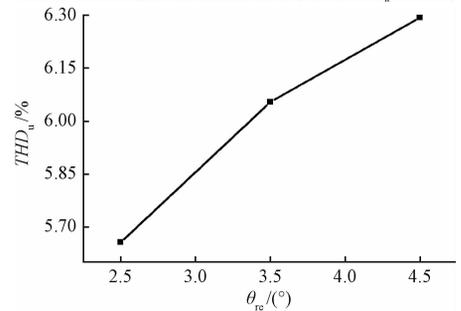


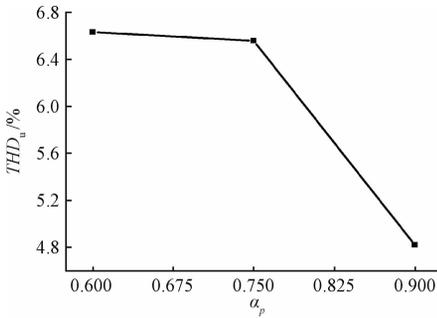
(d) 极弧系数不同水平下的空载电压基波幅值

图2 各参数对发电机空载电压基波幅值的影响

增大后减小,  $THD_u$  先减小后增大; 当永磁极厚度在区间  $4.25 < h_m < 4.75$  变化时,  $U_b$  先增大后减小,  $THD_u$  先减小后增大, 所以可以判断出, 当  $h_g = 2$  mm,  $h_m = 4.5$  mm 时, 发电机空载电动势基波幅值大且谐波含量较少, 符合优化要求。但是, 对于参数  $\alpha_p$  和  $\theta_{re}$ , 从图中不容易看出规律。

求出了优化目标在各参数不同水平下的平均值之后,

(a) 气隙长度不同水平下的  $THD_u$ (b) 磁极厚度不同水平下的  $THD_u$ (c) 线圈宽度不同水平下的  $THD_u$



(d) 极弧系数不同水平下的  $THD_u$

图 3 各参数对发电机  $THD_u$  的影响

可以利用方差的计算得出各参数对发电机性能指标的影响比重,方差计算表达式为:

$$SS = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (m_{ij}(S_i) - m(S))^2 \quad (2)$$

式中:  $m_{ij}(S_i)$  为参数  $x$  在水平  $i$  下,性能指标  $S$  的平均值;  $m(S)$  为性能指标  $S$  的总体平均值;

各参数对优化目标的影响所占的比重如表 5 所示。从表中可以看出,选择发电机空载电压基波幅值作为发电机优化设计的目标时,永磁体极弧系数  $\alpha_p$  的影响所占比重为 20.53%,线圈有效边宽度  $\theta_{re}$  所占比重为 47.52%,两者对于  $U_b$  影响比较大;选择  $THD_u$  作为优化设计目标时,极弧系数  $\alpha_p$  仍然是主要影响其优劣的因素。

综合考虑,通过田口方法基本确定了发电机参数  $h_g$  取 2 mm,  $h_m$  取 4.5 mm 时发电机空载电动势比较好,但不能确定极弧系数和线圈边宽度取何值时,发电机性能比较好,且这两个参数是主要影响发电机空载电动势基波幅值的因素,所以有必要对两者进行进一步优化。

表 5 各优化参数对性能指标影响所占比重

参数	$U_b/V$		$THD_u$	
	SS	所占比重/%	$SS \times 10^{-3}$	所占比重/%
$h_g$	1.33	15.34	1.87	13
$h_m$	1.44	16.61	5.32	35
$\theta_{re}$	4.12	47.52	0.71	5
$\alpha_p$	1.78	20.53	6.90	47
总计	8.67	100	14.8	100

## 2 响应曲面方法

### 2.1 响应曲面方法原理

响应曲面方法是被用来研究响应  $y$  与自变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间的关系,每个实验点所对应的响应值可以由实验获得,也可以通过软件仿真获得。真实的响应面方程  $f$  是未知且极其复杂的,在响应曲面建模中,通常假定响应与变量存在如下关系<sup>[10]</sup>:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i) + \epsilon \quad (3)$$

式中:  $\epsilon$  为拟合误差。

需要做的是在给定的范围内尽可能逼近真实的响应与自变量之间的函数关系。常用的方法是采用式(3)的一阶或二阶泰勒展开式逼近。先拟合出一阶线性响应面方程,若发现响应面有弯曲的趋势则用二阶模型将一阶模型替换,其一般形式为:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为回归系数;  $k$  为自变量个数;  $\epsilon$  为拟合误差。

对于响应曲面方法样本点组的采样,常用的方法有中心复合设计法和 Box-Behnken 设计法。以三因子点设计为例,中心复合设计法中的实验点分为 3 种,立方体顶点、中心点和一些带有参数的轴向点(星形点),如图 4(a) 所示。对于 BOX-Behnken 设计法,该设计将实验点设置在立方体棱的中点上,如图 4(b) 所示,相比中心复合设计法,这种设计方法的实验点少,采样点组呈近似的旋转型,但其不具备序贯性,在一次实验过后,对以后实验没有价值的实验点需要全部拿掉重新做。

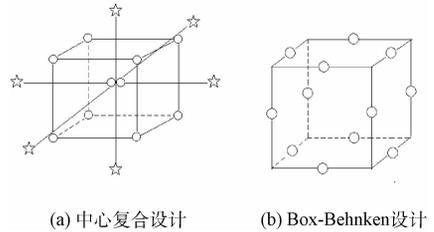


图 4 响应曲面采样点方法设计

### 2.2 发电机原理计算与优化方案设计

根据文献[11],轴向磁通永磁电机每个线圈中感应的反电动势  $e_c$  可表示为傅里叶级数形式:

$$e_c = \sum_{m=0,1,\dots}^{m=\infty} E_{cm} \sin(m\theta_e) \quad (5)$$

式中:  $\theta_e = \omega_e t$ ,  $\omega_e$  为电机电角速度。

幅值  $E_{cm}$  可以由绕组厚度方向上磁通密度轴向分量幅值的平均值求出:

$$E_{cm} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} r \int_{R_s}^{R_r} \frac{2}{p} \omega_e B_z(r, 0, z) N_c K_{wcm}(r) dr dz \quad (6)$$

式中:  $\omega_e$  为电机的电角速度,  $N_c$  为线圈匝数,  $h$  为绕组厚度,  $K_{wcm}(r)$  为绕组半径  $r$  处  $m$  次谐波的绕组系数。

轴向磁通永磁发电机定子绕组含  $m$  次谐波的绕组系数可表示为:

$$K_{wcm} = \frac{\sin(m\theta_r/2)}{m\theta_r/2} \sin\left(m \frac{\theta_m - \theta_r}{2}\right) \quad (7)$$

式中:  $\theta_m$  为线圈所跨的电角度(rad),  $\theta_r$  为半径  $r$  处有效导体所占的电角度(rad)。

考虑到发电机的磁密含有谐波分量,线圈电动势为各次磁密对应的线圈电动势的叠加,磁密轴向分量幅值可以

表示为傅里叶级数形式:

$$B_z(r, 0, z) = \sum_{q=0,1,\dots}^{q=\infty} B_q(r, 0, z) \sin(q\omega t) \quad (8)$$

含有  $q$  次谐波的电动势幅值  $E_{cm}$  可表示为:

$$E_{cmq} = \frac{2}{p} q \omega_e r B_{zqe} N_c K_{ucmq}(\theta_{re}) \quad (9)$$

式中:  $\theta_{re}$  为平均半径处有效导体所占电角度, 也可表征线圈边宽度;  $B_{zqe}$  为轴向上平均位置处磁密的幅值。

这样,  $q$  次磁密谐波对应的线圈反电动势为:

$$e_{eq} = \sum_{m=1,2,\dots}^{m=\infty} E_{cmq} \sin(mq\theta_e) \quad (10)$$

考虑到磁密谐波和线圈谐波共同影响线圈电动势波形, 所以含  $q$  次谐波磁密和  $m$  次谐波的绕组系数为:

$$K_{ucmq} = \frac{\sin(mq\theta_{re}/2)}{mq\theta_{re}/2} \sin\left(mq \frac{\theta_m - \theta_{re}}{2}\right) \quad (11)$$

当  $\theta_m$  为  $150^\circ$  电角度,  $q=1$  时, 即基波磁密条件下, 各次谐波的绕组系数是随线圈边宽度  $\theta_{re}$  变化而变化的, 当  $m$  分别取 1、3、5、7、9、11 时, 谐波绕组系数随着  $\theta_{re}$  的变化趋势如图 5 所示。

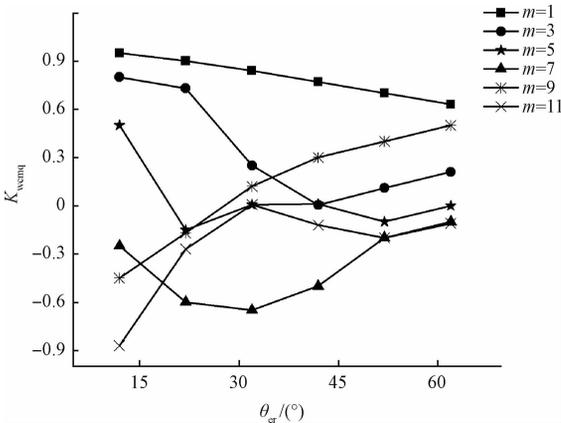


图 5 谐波绕组系数随着  $\theta_{re}$  的变化趋势

从图 5 中可以看出, 仅基波磁密条件下谐波绕组系数随着  $\theta_{re}$  的变化趋势就已经很复杂。为了改善发电机的气隙磁密波形, 削弱电动势的谐波含量, 就需要使基波绕组系数尽可能大, 同时谐波绕组系数尽可能小, 所以找到合适的  $\theta_{re}$  就显得至关重要了。

合理选择永磁极的形状和极弧系数不仅有助于提高发电机的经济性, 还可以改善电机的电动势波形<sup>[12]</sup>。所研究为极弧系数和线圈边宽度两个变量影响下发电机的优化问题, 可以适当简化使用典型的两变量二次多项式建立近似数学模型<sup>[13]</sup>:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (12)$$

式中:  $y$  为表征电机空载电动势基波幅值或总谐波失真度的响应函数,  $\beta$  为待定系数,  $\epsilon$  为拟合误差,  $x_1$ 、 $x_2$  为分别表示永磁体极弧系数  $\alpha_p$  和线圈边宽度  $\theta_{re}$  对应编码值。

以永磁体厚度  $h_m = 4.5$  mm, 极弧系数为 0.8 为标准, 保持永磁体体积不变, 当永磁体极弧系数分别取 0.7、0.8、0.9 时, 对应的永磁体厚度分别为 5.14、4.50、4.00 mm。发电机线圈边截面积为  $132$  mm<sup>2</sup>, 当线圈边宽度  $\theta_{re}$  (发电机平均半径处) 分别取  $23^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $53^\circ$  时, 对应线圈边厚度  $h_w = 18.2$ 、 $11.0$ 、 $7.9$  mm。

本文采用中心复合表面设计<sup>[14]</sup>, 进行代码变换后的自变量的高中低取值水平分别用 +1、0 和 -1 表示。先将自变量做线性变换, 即代码变换, 变换方法可遵循<sup>[15]</sup>:

$$x_1 = \frac{(\alpha_p - (\alpha_p(\max) + \alpha_p(\min))/2)}{(\alpha_p(\max) - \alpha_p(\min))/2} \quad (13)$$

$$x_2 = \frac{(\theta_{re} - (\theta_{re}(\max) + \theta_{re}(\min))/2)}{(\theta_{re}(\max) - \theta_{re}(\min))/2} \quad (14)$$

式中:  $\alpha_p(\max)$ 、 $\alpha_p(\min)$  为参数  $\alpha_p$  取值范围的最大值和最小值,  $\theta_{re}(\max)$ 、 $\theta_{re}(\min)$  为参数  $\theta_{re}$  取值范围的最大值和最小值。

采样点组的布置如图 6 所示, 坐标分别为  $(-1, 1)$ ,  $(1, 1)$ ,  $(-1, -1)$  和  $(1, -1)$ ;  $(0, 1)$ ,  $(0, -1)$ ,  $(-1, 0)$ ,  $(1, 0)$  和  $(0, 0)$ 。经过编码后如表 6 所示。

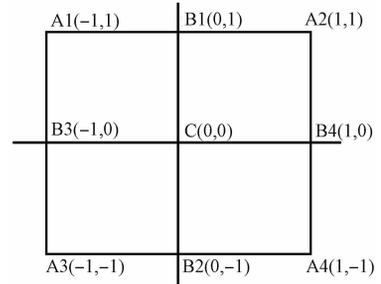


图 6 中心复合设计示意图

表 6 实验设计方案

序号	设计变量值		编码转换值	
	$\alpha_p$	$\theta_{re}/(^{\circ})$	$X_1$	$X_2$
1	0.7	2.3	-1	-1
2	0.9	2.3	+1	-1
3	0.7	5.3	-1	+1
4	0.9	5.3	+1	+1
5	0.7	3.8	-1	0
6	0.9	3.8	+1	0
7	0.8	2.3	0	-1
8	0.8	5.3	0	+1
9	0.8	3.8	0	0

### 2.3 优化方案有限元仿真验证

根据田口方法实验结果, 发电机永磁体厚度取 4.5 mm 气隙长度取 2 mm, 依据表 6 的设计变量组合建立有限元仿真模型进行计算, 仿真结果如表 7 所示。

利用有限元仿真计算结果在 MINITAB 中对其进行响

表 7 空载电压基波幅值与  $THD_u$  值

序号	变量值		基波幅值/V	$THD_u$
	$\alpha_p$	$\theta_{re}$		
1	0.7	2.3	300.76931	0.03193
2	0.9	2.3	298.91284	0.04115
3	0.7	5.3	307.97981	0.04932
4	0.9	5.3	308.77230	0.09441
5	0.7	3.8	307.16397	0.04009
6	0.9	3.8	307.59023	0.04738
7	0.8	2.3	302.56082	0.02985
8	0.8	5.3	314.36120	0.05148
9	0.8	3.8	310.56032	0.02479

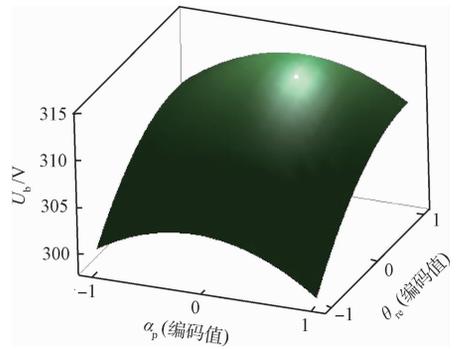


图 8 空载电压基波幅值的曲面

应曲面设计,变量  $\alpha_p$  和  $\theta_{re}$  分别用  $x_1$  和  $x_2$  表示,分析计算之后得出,空载电压基波幅值  $y_1$  的回归方程为:

$$y_1 = 311.080 - 0.106x_1 + 4.812x_2 - 3.963x_1^2 - 2.879x_2^2 + 0.662x_1x_2 \quad (18)$$

图 7 所示为发电机电弧系数  $\alpha_p$ ,线圈边宽度  $\theta_{re}$  与空载电压基波幅值  $U_b$  的等值线关系图,从图中可以看出,当  $\alpha_p$  的编码值在  $-0.5 \sim 0.5$ ,对应  $\alpha_p$  取值在  $0.75 \sim 0.85$ ;  $\theta_{re}$  的编码值在  $0.15 \sim 1.0$ ,对应  $\theta_{re}$  取值在  $4.025^\circ \sim 5.3^\circ$  时,发电机的空载电压基波幅值比较大,所以两变量的取值应尽量接近该区域。用两变量与  $U_b$  关系曲面图表示其变化趋势更为直观,如图 8 所示。从图中可以看出,在两变量取值范围内,响应变量  $U_b$  对应的曲面曲度明显,最大值在该曲面的顶点处取得。

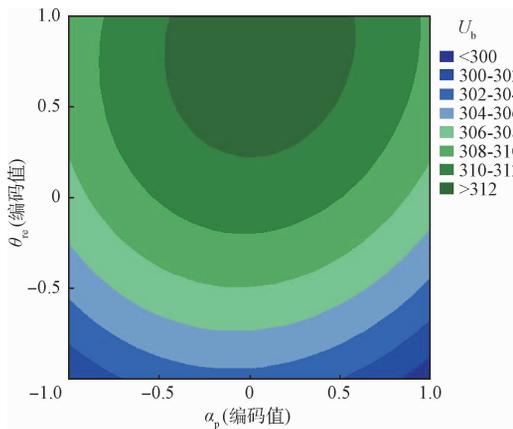


图 7 空载电压基波幅值的等值线

总谐波失真度  $THD_u(y_2)$  的回归方程为:

$$y_2 = 0.02719 + 0.01027x_1 + 0.01538x_2 + 0.01534x_1^2 + 0.01227x_2^2 + 0.00897x_1x_2 \quad (19)$$

图 9 所示为总谐波失真度  $THD_u$  的等值线图,从图中可以看出,当  $\alpha_p$  的编码值在  $-0.6 \sim 0.55$ ,对应  $\alpha_p$  取值在  $0.74 \sim 0.85$ ;  $\theta_{re}$  的编码值在  $-1.0 \sim 0.3$ ,对应  $\theta_{re}$  取值在  $2.3^\circ \sim 4.25^\circ$  时,发电机的总谐波失真度最小,所以两变量

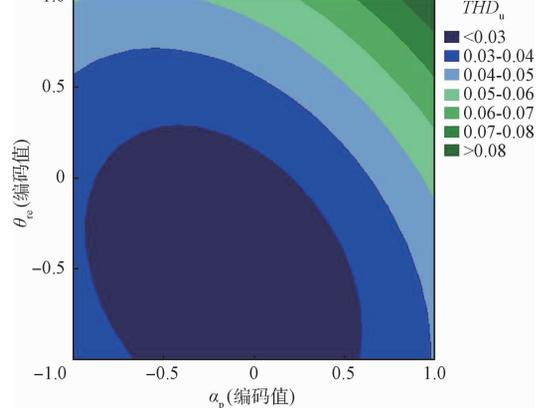


图 9 总谐波失真度的等值线

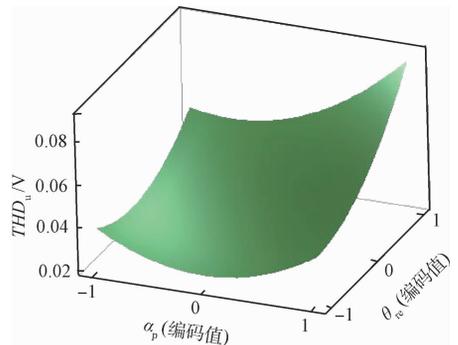


图 10 空载电压基波幅值的曲面

的取值应尽量接近该区域。用两变量与  $THD_u$  关系曲面图表示其变化趋势更为直观,如图 10 所示。从图中可以看出,在两变量取值范围内,响应变量  $THD_u$  对应的曲面曲度明显,最小值在该曲面的顶点处取得。

利用 MINITAB 的响应优化器,以空载电压基波幅值  $U_b$  最大,总谐波失真度  $THD_u$  最小为优化目标进行寻优计算,计算后结果如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,优化目标函数的最优解是空载电压基波幅值  $U_b = 311.7770$  V,总谐波失真度  $THD_u =$

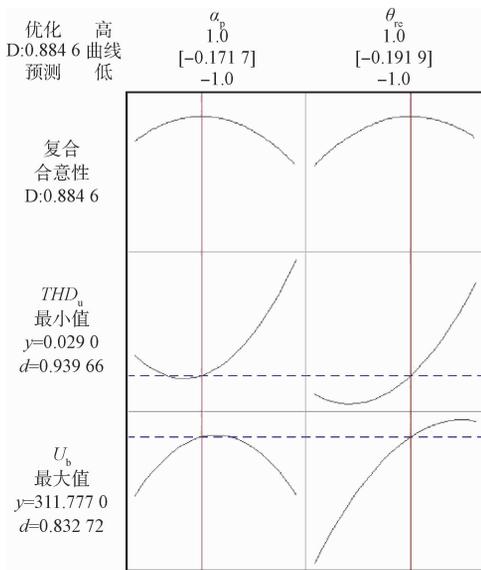


图 11 响应优化器寻优结果

0.0290, 对应的自变量  $\alpha_p$  和  $\theta_{rc}$  的编码值为 -0.1717 和 0.1919, 转化为编码前, 两参数的最优组合方式为极弧系数  $\alpha_p$  取 0.783, 线圈有效边宽度  $\theta_{rc}$  取  $40.88^\circ$  (电角度)。

根据优化结果重新建立发电机的有限元仿真模型, 计算后得出, 优化后发电机空载电压波形如图 12(b) 所示。从图中可以比较明显地看出, 相比较于优化前的发电机空

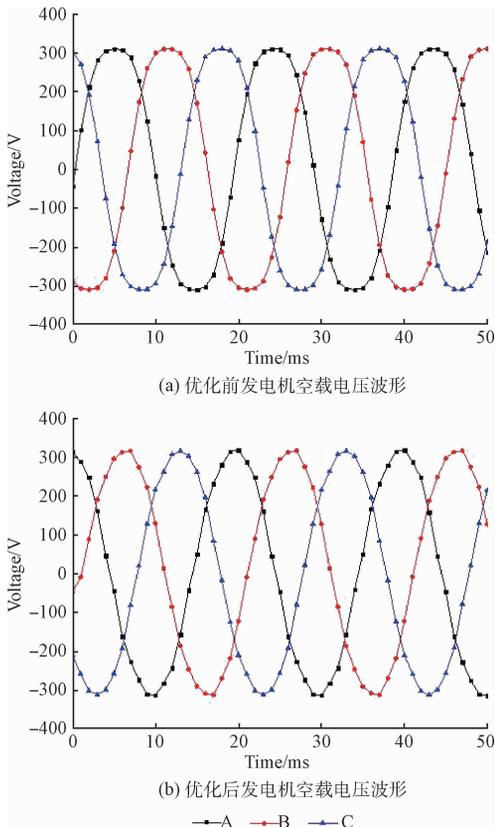


图 12 优化前后发电机空载电压波形

载电压波形, 经过优化后的电压波形正弦性更好。分析计算优化后发电机空载电压的基波幅值和谐波含量, 基波幅值为 311.9730 V, 总谐波失真度为 2.971%, 相比优化之前, 发电机性能明显改善。图 13 所示为发电机优化前后空载电压的谐波分布情况, 从图中可以看出, 优化之后, 发电机空载电压基波幅值有所增大, 各次谐波均得到了有效抑制。因此验证了此优化方法在轴向磁通永磁同步发电机优化设计应用中确实有效。

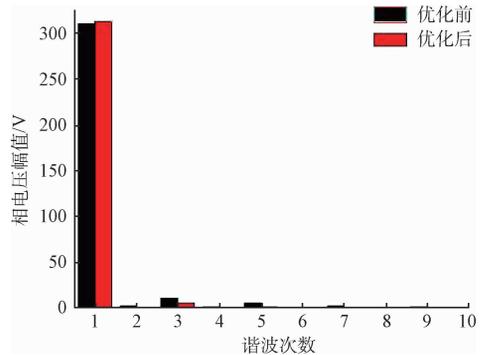


图 13 优化前后发电机空载相电压谐波分布

### 3 结 论

文章首先利用田口方法研究了影响发电机空载电压基波幅值和总谐波失真度值的主要电机参数, 确定了永磁体极弧系数和线圈边宽度是主要影响这两性能指标的变量, 发电机性能得到初步优化。然后通过具体原理计算推导出了基于谐波磁密的绕组系数, 通过响应曲面的方法, 以发电机的输出电动势基波幅值最大、谐波含量最小为目标, 进一步优化了发电机的极弧系数与线圈边宽度。通过有限元仿真计算验证了这两种方法在轴向磁通永磁同步发电机优化设计中的可靠性。

### 参考文献

- [1] 姜科, 赵晨栋, 单长帅, 等. 离网型永磁风力发电机级联整流装置研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 7-23.
- [2] 秦斌, 姜学想, 周浩, 等. 基于 SVM 的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1525-1531.
- [3] 张保钦, 雷保珍, 赵林惠, 等. 风机叶片故障预测的振动方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 285-291.
- [4] 崔畅, 赵强. PSMG 风力发电系统 MPPT 优化控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 60-63.
- [5] MAHMOUDI A, KAHOURZADE S, PING H W, et al. Design optimization and analysis of AFPM synchronous motor considering electrical and thermal

- parameters [C]. 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), IEEE, 2013: 562-567.
- [6] WANG R J, MAATEN J K, FRANCOIS G R. Analysis and performance of axial flux permanent magnet machine with air-cored nonoverlapping concentrated stator windings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009,44(5):1495-1504.
- [7] 李立毅,唐勇斌,刘家曦,等. 多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报,2013(15):11-102,94.
- [8] WANG H T, LIU Z J, CHEN S X, et al. Application of Taguchi method to robust design of BLDC motor performance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 35(5), 3700-3702.
- [9] 刘明基,韩志,裴亚伟,等. 基于田口法的永磁发电机气隙磁通密度优化[J]. 微特电机,2014(3):29-35.
- [10] 陈益广,潘玉玲,贺鑫. 永磁同步电机分数槽集中绕组磁动势[J]. 电工技术学报,2010(10):30-36.
- [11] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 定子无铁心轴向磁场永磁电机的解析设计[J]. 电工技术学报, 2013(3): 43-49.
- [12] 翟秀果,刘慧娟,张颖超,等. PMSM 极弧系数对感应电势和漏磁系数的影响[J]. 微电机,2012,45(5): 4-6.
- [13] RISNIDAR C, DAUT I, SYAFRUDDIN H. Relationships between harmonic characteristics and different types of voltage source [J]. Telkomnika, 2012,10(2): 219-228.
- [14] 常九健,马文礼,黄金龙. 永磁同步电机永磁体形状分析与优化[J]. 大电机技术,2012(2):P15-P18.
- [15] 吕晓威,罗玲,李丹,等. 基于正交试验法的盘式无铁心永磁同步发电机优化设计[J]. 微特电机,2013(3): 45-50.

### 作者简介

**上官璇峰**,1965 年出生,博士,教授,研究方向为电机和电磁装置的优化设计和控制等。

**王亚辰**,1988 年出生,硕士研究生,研究方向为永磁电机理论与设计。

E-mail:hjkjwyc01@126.com