

252 kV 真空灭弧室纵磁触头磁场分析及优化

刘志远, 郑跃胜, 王仲奕, 王季梅, 荣命哲

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Analysis and Optimization of Axial Magnetic Field Characteristics of 252 kV Vacuum Interrupter Contacts

LIU Zhi-yuan, ZHENG Yue-sheng, WANG Zhong-yi, WANG Ji-mei, RONG Ming-zhe
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Contacts of vacuum interrupters have important influence on nominal current carrying capability and short circuit current interrupting capacity of vacuum circuit breakers. By using 3D finite element method, axial magnetic field (AMF) characteristics of single coil contacts used in 252 kV vacuum interrupters were analyzed with single factor analysis and orthogonal regression analysis. The analyzed AMF characteristics include axial magnetic flux density at current peak, axial magnetic flux density at current zero, and conductor resistance. Regression equations that link AMF characteristics and contact parameters were given. Contact parameters that have significant influence on AMF characteristics were shown. Ideal AMF characteristics should be as follows: strong axial magnetic flux density at current peak, weak axial magnetic flux density at current zero and low conductor resistance. It is shown that the ideal AMF characteristics can be achieved by combination of optimization based on design of experiment, finite element method, and statistical analysis. By this way optimal contact parameters are found for a 252 kV AMF contact.

KEY WORDS: high voltage vacuum interrupter; axial magnetic field; optimization

摘要: 真空灭弧室的触头对真空断路器短路电流开断能力和额定电流通断能力有重要的影响。该文采用三维有限元方法对用于 252 kV 真空灭弧室的单匝线圈纵磁触头的磁场特性进行了单因素分析和正交回归分析, 包括电流峰值时纵向磁感应强度、电流过零时纵向磁感应强度和导体电阻值, 得到了磁场特性和触头设计参数之间的回归方程, 并且找出了影响磁场特性的显著因素。理想的纵向磁场特性应当是电流峰值时纵向磁感应强度强, 电流过零时纵向磁感应强度弱, 以

及导体电阻值小。将基于实验设计的优化、有限元分析和统计分析结合在一起, 可以达到这种理想的纵向磁场特性。采用这种方法, 得到了一种 252 kV 纵向磁场触头的优化设计参数。

关键词: 高压真空灭弧室; 纵向磁场; 优化

0 引言

电力系统中使用的高压断路器主要有真空断路器和 SF₆ 断路器。真空断路器在 12 和 40.5 kV 的中压开关领域占据优势地位, SF₆ 断路器在 72.5 kV 及以上的更高电压等级开关领域占据优势地位。由于 SF₆ 气体是一种“温室效应”气体^[1-2], 而真空断路器是一种环境友好型开关设备, 因而真空断路器向更高电压等级发展对减少 SF₆ 气体的使用具有积极的意义。世界上许多电气公司和科研院所都致力于更高电压等级真空断路器的研发, 无论在技术上还是经济上来看, 发展更高电压等级真空断路器都是可行的^[1-4]。我国也已经研制了 126 kV 高压真空断路器, 并且准备拓展至 252 kV 电压等级^[5-6]。

单匝线圈纵磁触头是一种可用于更高电压等级真空断路器的新型触头结构^[5-9]。更高电压等级的真空灭弧室通常由于绝缘和耐压特性的要求, 触头的开距比较大^[3]。触头间隙中的纵向磁感应强度随着触头开距的增大而逐渐减弱^[10-12], 从而在大开距下很难控制电弧。单匝线圈纵磁触头在大开距下仍然能够在触头间隙产生较强的纵向磁场, 因此可以用于更高电压等级真空灭弧室。

本文所研究的单匝线圈纵磁触头的磁场特性包括电流峰值时纵向磁感应强度, 电流过零时纵向磁感应强度和导体电阻值, 这几个特性与真空断路

基金项目: 国家自然科学基金项目(50537050)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50537050).

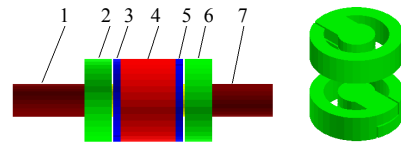
器的短路电流开断能力和额定电流导通能力有着密切的关系。对单匝线圈纵磁触头已经进行了一些研究性实验^[5-6],并且通过三维涡流场有限元仿真得到了电流峰值时纵向磁感应强度分布,但是至今没有文献对单匝线圈纵磁触头的其他磁场特性进行过分析。磁场特性由触头设计参数所决定,所以研究触头设计参数对单匝线圈纵磁触头磁场特性的影响具有非常重要的意义。国内外许多学者研究其他类型纵磁触头结构的触头设计参数对磁场特性影响时,往往是通过改变其中一个触头设计参数,其他几个触头设计参数保持不变,即单因素分析,得到单个触头设计参数对磁场特性的影响的定性关系^[10-13]。文献[14]得到了对杯状纵磁触头磁场特性有显著影响的触头设计参数,以及磁场特性和触头设计参数之间的线性回归方程,但是没有对磁场特性进行优化。

本文参考了文献[6]中给定的触头开距为80 mm,对可适用于252 kV高压真空灭弧室的单匝线圈纵磁触头进行了磁场特性分析,考虑触头直径、线圈厚度、线圈高度和触头片开槽数这4个触头设计参数对磁场特性的影响。对触头设计参数进行了归一化处理,使得不同的触头设计参数具有可比性。再通过单因素分析和正交回归分析,得到了单匝线圈纵磁触头的磁场特性和触头设计参数之间的回归方程,并且找出了影响磁场特性的显著因素,然后进行多目标优化对磁场特性进行了优化,这是单因素分析所不能够实现的。

将实验设计、有限元仿真和统计分析结合在一起,不仅可以同时分析不同触头设计参数对磁场特性的影响,而且可以对磁场特性进行优化。无论是对现有触头的改进,还是设计更高电压等级的触头结构,都具有参考意义。该方法简单实用,通用性强,也适用于其他类型纵磁触头磁场特性的分析和优化。

1 有限元模型

本文采用商业三维电磁场有限元分析软件包对单匝线圈纵磁触头进行三维涡流场有限元仿真。单匝线圈纵磁触头的有限元模型如图1所示。线圈拐臂的厚度取为线圈厚度的2倍,与拐臂相连的小圆柱与导电杆等直径。触头开距为80 mm,触头片直径和触头直径相等,触头片厚度取为13 mm。触头片开槽以减小涡流,开槽长度为触头半径的三分之二^[13]。电弧直径对纵向磁场影响很小,可以假设



1,7—导电杆; 2,6—线圈; 3,5—触头片; 4—真空电弧

图1 单匝线圈纵磁触头的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of single coil AMF contacts

电弧为直径和触头直径相等,长度和触头开距相等的圆柱^[12-13]。

电弧的电导率在一定范围内取值不同时,对电流和纵向磁场分布的影响非常小。在有限元计算中电弧只是起导通电流的作用。触头片的材料为CuCr50,其余部件的材料均为纯铜。模型中采用的各种材料的属性列于表1中。开断电流为50 Hz 交流电流,其有效值为40 kA。计算中考虑了触头片、线圈以及电弧的涡流效应。

表1 单匝线圈纵磁触头有限元模型中所用的材料属性

Tab. 1 Material properties of all parts of single coil AMF contacts

部件	材料	电导率/(S/m)	相对磁导率
导电杆	Cu	5.8×10^7	1
线圈	Cu	5.8×10^7	1
触头片	CuCr50	1.8×10^7	1
电弧	—	2800 ^[12]	1

2 单因素分析

2.1 因素水平编码

本文选取触头直径、线圈厚度、线圈高度和触头片开槽数这4个触头设计参数作为实验因素来安排有限元仿真。各触头设计参数具有一定的取值范围,对各触头设计参数进行归一化处理,如表2所示。可以看出,各触头设计参数取值范围的上限为1水平,取值范围的下限为-1水平,取值范围的中值为0水平。这样就所有的参数落到同一个区间内,使得参数值具有了可比性,方便了各个触头设计参数之间的比较。

表2 因素水平编码表

Tab. 2 Coding of factor levels

水平	触头直径 D/mm	线圈厚度 w/mm	线圈高度 h/mm	触头片开槽数 n/个
+1	140	25	60	6
0	130	20	50	5
-1	120	15	40	4

2.2 电流峰值时纵向磁感应强度分析

当所有的触头设计参数都取0水平时,电流峰值时纵向磁感应强度在开距中心平面的分布如图2所示。从图2中可以看出,纵向磁感应强度的分布

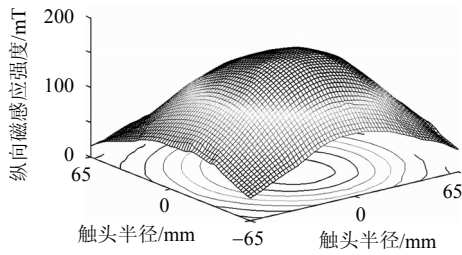


图 2 电流峰值时纵向磁感应强度在开距中心平面的分布
Fig. 2 Distribution of axial magnetic flux density on the intermediate plane of the gap at current peak

像一个山峰。由于拐臂的作用，峰值不在平面的中心点位置。本文选取电流峰值时纵向磁感应强度在开距中心平面的最大值点作为典型点来研究电流峰值时纵向磁感应强度。

电流峰值时纵向磁感应强度和触头设计参数之间的关系如图 3 所示。可以看出，电流峰值时纵向磁感应强度和触头设计参数之间基本上为线性关系。电流峰值时纵向磁感应强度随着触头直径和触头片开槽数的增大而增大，随着线圈高度和线圈厚度的增加而减小。还可以看出，触头直径、线圈高度和线圈厚度对电流峰值时纵向磁感应强度的影响相对较大，而触头片开槽数对电流峰值时纵向磁感应强度的影响相对较小。

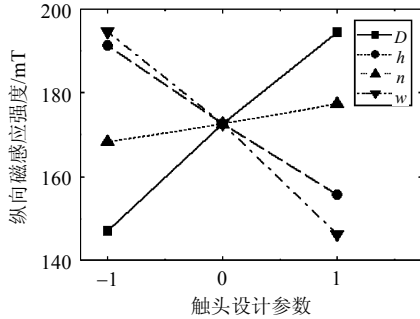


图 3 电流峰值时纵向磁感应强度和触头设计参数之间的关系

Fig. 3 Relationship between axial magnetic flux density at current peak and contact design parameters

2.3 电流过零时纵向磁感应强度分析

当所有的触头设计参数都取 0 水平时，电流过零时纵向磁感应强度在开距中心平面的分布如图 4 所示。可以看出，其分布与电流峰值时相近，只是幅值降低。因此仍取开距中心平面的最大值点作为典型点进行研究。

电流过零时纵向磁感应强度和触头设计参数之间的关系如图 5 所示。可以看出，电流过零时纵向磁感应强度和触头设计参数之间基本上为单调关系，直观上看线性度不是特别显著。电流过零时纵向磁感应强度随着触头直径的增大而增大，随着

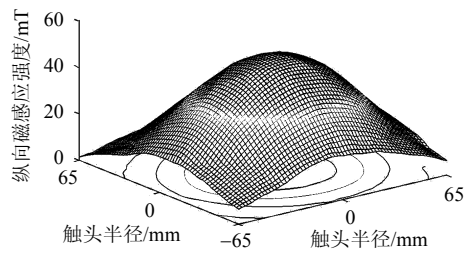


图 4 电流过零时纵向磁感应强度在开距中心平面的分布
Fig. 4 Distribution of axial magnetic flux density on the intermediate plane of the gap at current zero

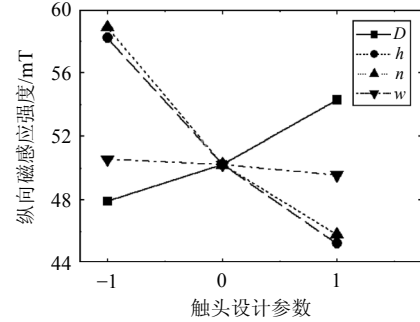


图 5 电流过零时纵向磁感应强度和触头设计参数之间的关系

Fig. 5 Relationship between axial magnetic flux density at current zero and contact design parameters

线圈高度、线圈厚度和触头片开槽数的增加而减小。还可以看出，线圈高度和触头片开槽数对电流过零时纵向磁感应强度的影响相对较大，而线圈厚度对电流过零时纵向磁感应强度的影响相对较小。

2.4 导体电阻值分析

在本文中触头的导体电阻值指 2 个线圈和 2 个触头片的电阻值之和，导体电阻值和触头设计参数之间的关系如图 6 所示。可以看出，导体电阻值和触头设计参数之间基本上为线性关系。导体电阻值随着触头直径的增大而增大，随着线圈高度、线圈厚度和触头片开槽数的增加而减小。还可以看出，线圈厚度对导体电阻值的影响相对较大，而触头片开槽数对导体电阻值的影响相对较小。

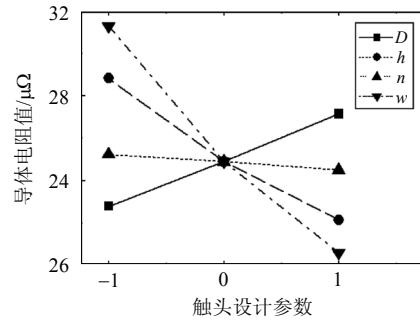


图 6 导体电阻值和触头设计参数之间的关系
Fig. 6 Relationship between conductor resistance and contact design parameters

3 正交回归分析

3.1 实验安排及结果

把触头直径、线圈厚度、线圈高度和触头片开槽数这4个触头设计参数作为因素来进行正交实验设计,触头设计参数的取值范围及其编码和表2完全相同。不考虑各个因素之间的交互作用,可以采用 $L_8(2^7)$ 正交表来安排实验。为了进行更精确的统计分析(如回归方程的失拟检验等),得到精度更高的回归方程,再安排一次零水平实验^[15]。正交实验安排及结果如表3所示。其中 B_z 为电流峰值时纵向磁感应强度在开距中心平面的最大值, B_{z0} 为电流过零时纵向磁感应强度在开距中心平面的最大值, R 为导体电阻值。

表3 正交实验安排及结果

Tab. 3 Design and results of orthogonal experiment

实验号	D	w	h	n	B_z/mT	B_{z0}/mT	$R/\mu\Omega$
1	-1	-1	-1	-1	184.170	64.206	34.012
2	-1	-1	-1	1	193.255	50.165	33.267
3	-1	1	1	-1	104.148	44.446	17.074
4	-1	1	1	1	108.515	37.618	16.899
5	1	-1	1	-1	181.393	55.344	30.438
6	1	-1	1	1	190.608	41.544	29.404
7	1	1	-1	-1	184.421	68.237	26.600
8	1	1	-1	1	193.846	54.178	25.572
9	0	0	0	0	172.552	50.224	24.878

从表3中可以看出任意2个触头设计参数之间具有正交性,用较少的实验就可以使实验点均匀分析,代表性强,并且使统计结果更加精确和便捷。正交设计的优点和其他特点可以参考关于实验设计的相关文献^[14-16]。

3.2 电流峰值时纵向磁感应强度分析

对电流峰值时纵向磁场强度和触头设计参数作线性回归分析,得到回归方程的 P 值小于0.001。 P 值小于高度显著性水平 $\alpha=0.01$,所以该回归方程是高度显著的。回归方程系数及其方差分析结果如表4所示。从表4可以得到电流峰值时纵向磁场强度和触头设计参数的回归方程:

$$B_z=168.101+20.023D-19.812w-21.379h+4.012n \quad (1)$$

同理可以得到电流过零时纵向磁场强度以及

表4 电流峰值时纵向磁场强度和触头设计参数的回归方程系数及其方差分析结果

Tab. 4 Variance analysis results of regression function between axial magnetic flux density at current peak and contact design parameters

因素	截距	D	w	h	n
系数	168.101	20.023	-19.812	-21.379	4.012
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.015

导体电阻值和触头设计参数的高度显著回归方程。

从表4中各系数的 P 值可以看出,因素 D 、 w 和 h 的 P 值小于0.01,对电流峰值时纵向磁场强度有高度显著影响。因素 n 的 P 值小于0.05,对电流峰值时纵向磁场强度有显著影响。可见,触头直径、线圈厚度和线圈高度对电流峰值时纵向磁场强度有高度显著影响,触头片开槽数对电流峰值时纵向磁场强度有显著影响。所以,电流峰值时纵向磁场强度和触头直径、线圈厚度、线圈高度以及触头片开槽数之间存在着高度显著的线性关系。当触头直径和触头片开槽数都取上水平,线圈厚度和线圈高度都取下水平时,电流峰值时纵向磁场强度最强,其值 $B_{z\max}$ 为233.327 mT。当触头直径和触头片开槽数都取下水平,线圈厚度和线圈高度都取上水平时,电流峰值时纵向磁场强度最弱,其值 $B_{z\min}$ 为102.875 mT。

3.3 电流过零时纵向磁感应强度分析

对电流过零时纵向磁场强度和触头设计参数作线性回归分析,得到回归方程的 P 值为0.002。 P 值小于高度显著性水平 $\alpha=0.01$,所以该回归方程是高度显著的。回归方程系数及其方差分析结果如表5所示。从表5可以得到电流过零时纵向磁场强度和触头设计参数的回归方程为

$$B_{z0}=51.774+2.859D-0.818w-7.229h-6.091n \quad (2)$$

表5 电流过零时纵向磁场强度和触头设计参数的回归方程系数及其方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results of regression function between axial magnetic flux density at current zero and contact parameters

因素	截距	D	w	h	n
系数	51.774	2.859	-0.818	-7.229	-6.091
P 值	<0.001	0.026	0.363	0.001	0.002

从表5中各系数的 P 值可以看出,因素 h 和 n 的 P 值小于0.01,对电流过零时纵向磁场强度有高度显著影响。因素 D 的 P 值小于0.05,对电流过零时纵向磁场强度有显著影响。因素 w 的 P 值大于0.20,可以认为对电流过零时纵向磁场强度无影响。可见,线圈高度和触头片开槽数对电流过零时纵向磁场强度有高度显著影响,触头直径对电流峰值时纵向磁场强度有显著影响,线圈厚度对电流过零时纵向磁场强度无影响。剔除不显著项后的回归方程为

$$B_{z0}=51.774+2.859D-7.229h-6.091n \quad (3)$$

由于各因素存在正交关系,方差分析结果和表5中的值相同,所以不需要重新作方差分析。可见,

电流过零时纵向磁场强度和触头直径、线圈高度以及触头片开槽数之间存在着高度显著的线性关系。当触头直径取上水平,线圈高度和触头片开槽数都取下水平时,电流过零时纵向磁场强度最强,其值 B_{z0max} 为 67.953 mT。当触头直径取下水平,线圈高度和触头片开槽数都取上水平时,电流过零时纵向磁场强度最弱,其值 B_{z0min} 为 35.595 mT。

3.4 导体电阻值分析

对导体电阻值和触头设计参数作线性回归分析,得到回归方程的 P 值小于 0.001。 P 值小于高度显著性水平 $\alpha=0.01$,所以该回归方程是高度显著的。回归方程系数及其方差分析结果如表 6 所示。从表 6 可以得到导体电阻值和触头设计参数的回归方程为

$$R = 26.460 + 1.345D - 5.122w - 3.205h - 0.373n \quad (4)$$

表 6 导体电阻值和触头设计参数的回归方程系数及其方差分析结果

Tab. 6 Variance analysis results of regression function between conductor resistance and contact parameters

因素	截距	D	w	h	n
系数	26.460	1.345	-5.122	-3.205	-0.373
P 值	<0.001	0.012	<0.001	<0.001	0.295

从表 6 中各系数的 P 值可以看出,因素 w 和 h 的 P 值小于 0.01,对导体电阻值有高度显著影响。因素 D 的 P 值小于 0.05,对导体电阻值有显著影响。因素 n 的 P 值大于 0.20,可以认为对导体电阻值无影响。可见,线圈厚度和线圈高度对导体电阻值有高度显著影响,触头直径对导体电阻值有显著影响,触头片开槽数对导体电阻值无影响。剔除不显著项后的回归方程为

$$R = 26.460 + 1.345D - 5.122w - 3.205h \quad (5)$$

由于各因素存在正交关系,方差分析结果和表 6 中的值相同,所以不需要重新作方差分析。可见,导体电阻值和触头直径、线圈高度以及线圈高度之间存在着高度显著的线性关系。当触头直径取上水平,线圈高度和线圈厚度都取下水平时,导体电阻值最大,其值 R_{max} 为 36.132 $\mu\Omega$ 。当触头直径取下水平,线圈高度和线圈厚度都取上水平时,导体电阻值最小,其值 R_{min} 为 16.788 $\mu\Omega$ 。

3.5 回归方程的检验

用单因素分析中的 9 次实验结果对回归方程的实际使用效果进行检验,计算各个样本的相对误差 E 和平均误差 E_{av} ,公式如下:

$$E = |(\hat{Y}_i - Y_i)/Y_i| \times 100\% \quad (6)$$

$$E_{av} = (\sum |(\hat{Y}_i - Y_i)/Y_i|) / N \times 100\% \quad (7)$$

式中: \hat{Y}_i , Y_i 分别为样本号为 i 的回归方程计算结果和三维有限元计算结果; N 为所有的检验样本数。回归方程检验结果如表 7 所示。

表 7 回归方程检验结果

Tab. 7 Test results of regression functions

磁场特性	最大相对误差/%	平均误差/%
电流峰值时纵向磁感应强度	5.78	2.30
电流过零时纵向磁感应强度	4.46	1.61
导体电阻值	10.29	4.26

从表 7 中可以看出,从工程角度出发该回归方程已经满足要求。如果要得到更高精度的回归方程,可以进行二次正交回归分析或者阶数更高的回归分析。

4 磁场特性优化

纵向磁场可以把真空电弧控制在扩散态,提高触头片表面的利用率,减少电弧对阴极和阳极的烧蚀,提高介质强度的恢复速度,从而提高了灭弧室的极限开断能力。纵向磁场较强比较弱时更有利于控制真空电弧,从而提高真空灭弧室的开断能力^[17]。所以设计触头时,电流峰值时纵向磁感应强度越强越好。由于涡流的作用,当电流过零时在触头间隙仍然存在着剩余纵向磁场,阻碍了等离子体的迅速扩散,影响了弧后介质强度的恢复^[9,18-19]。所以设计触头时,电流过零时纵向磁感应强度越弱越好。当电流通过导体时,导体电阻会由于欧姆效应而产生大量的热。尤其是当额定电流较大时,会使得断路器的温升更加明显^[20]。温升过高不仅影响触头的机械强度,而且对灭弧室的其他电气性能均有一定的影响。所以设计触头时,导体电阻值越小越好。

电流峰值时纵向磁场强度越强,电流过零时纵向磁场强度越弱以及导体电阻值越小,则认为单匝线圈纵磁触头具有越好的磁场特性。所以,单匝线圈纵磁触头磁场特性的优化是一个三目标优化问题,电流峰值时纵向磁场强度、电流过零时纵向磁场强度以及导体电阻值是磁场特性的 3 个指标。

为了使电流峰值时纵向磁场强度、电流过零时纵向磁场强度以及导体电阻值能够在同一水平线上进行比较,需要对这 3 个指标进行归一化。设 f 为磁场特性的一个指标, f_{max} 和 f_{min} 分别为此指标的上界和下界,那么对于任意的 $f(x)$,按以下方法进行归一化处理:

(1) 如果该指标与磁场特性正相关, 则归一化后的指标 $f_n(x)$ 为

$$f_n(x) = (f(x) - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (8)$$

(2) 如果该指标与磁场特性负相关, 则归一化后的指标 $f_n(x)$ 为

$$f_n(x) = (f_{\max} - f(x)) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (9)$$

电流峰值时纵向磁场强度与单匝线圈纵磁触头的磁场特性正相关, 归一化按式(8)进行。电流过零时纵向磁场强度以及导体电阻值与单匝线圈纵磁触头的磁场特性负相关, 归一化按式(9)进行。所以建立的单匝线圈纵磁触头的磁场特性的目标函数为

$$M = k_1(B_z(x) - B_{z\min}) / (B_{z\max} - B_{z\min}) + k_2(B_{z0\max} - B_{z0}(x)) / (B_{z0\max} - B_{z0\min}) + k_3(R_{\max} - R(x)) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (10)$$

式中 k_1 、 k_2 和 k_3 分别为电流峰值时纵向磁场强度、电流过零时纵向磁场强度和导体电阻值的权重。本文考虑电流峰值时纵向磁场强度、电流过零时纵向磁场强度以及导体电阻值对单匝线圈纵磁触头的磁场特性具有同等重要的影响, 所以 $k_1 = k_2 = k_3 = 1/3$ 。在此情况下, 将式(1)、(3)、(5)代入式(10), 经化简可得

$$M = 0.5 - 0.0015D + 0.0376w + 0.0751h + 0.073n \quad (11)$$

当触头直径取下水平, 线圈厚度、线圈高度和触头片开槽数都取上水平时, 磁场特性最佳, 其值为 0.687。该值越接近 1, 则磁场特性越好。此时, B_z 为 110.899 mT, B_{z0} 为 35.595 mT, R 为 16.788 $\mu\Omega$ 。

5 结论

通过对单匝线圈纵磁触头的磁场特性进行单因素分析、正交回归分析以及优化, 在本文的参数范围内, 得到如下结论:

(1) 电流峰值时纵向磁感应强度随着触头直径和触头片开槽数的增大而增大, 随着线圈高度和线圈厚度的增加而减小; 电流过零时纵向磁感应强度随着触头直径的增大而增大, 随着线圈高度、线圈厚度和触头片开槽数的增加而减小; 导体电阻值随着触头直径的增大而增大, 随着线圈高度、线圈厚度和触头片开槽数的增加而减小。

(2) 触头直径、线圈厚度和线圈高度对电流峰值时纵向磁场强度有高度显著影响, 触头片开槽数对电流峰值时纵向磁场强度有显著影响; 线圈高度和触头片开槽数对电流过零时纵向磁场强度有高度显著影响, 触头直径对电流峰值时纵向磁场强

度有显著影响, 线圈厚度对电流过零时纵向磁场强度无影响; 线圈厚度和线圈高度对导体电阻值有高度显著影响, 触头直径对导体电阻值有显著影响, 触头片开槽数对导体电阻值无影响。

(3) 通过正交回归方法得到了单匝线圈纵磁触头的磁场特性和触头设计参数之间的回归方程, 通过多目标优化得到了电流峰值时纵向磁感应强度较强, 电流过零时纵向磁感应强度较弱, 导体电阻值较小的最佳磁场特性触头结构设计参数。

参考文献

- [1] Yanabu S, Zaima E, Hasegawa T. Historical review of high voltage switchgear developments in the 20th century for power transmission and distribution system in Japan[J]. IEEE Trans. on Power Del., 2006, 21(2): 659-664.
- [2] Matsui Y, Nagatake K, Takeshita M, et al. Development and technology of high voltage VCBs; Brief history and state of art [C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 253-256.
- [3] Renz R. High voltage vacuum interrupters-technical and physical feasibility versus economical efficiency[C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 257-262.
- [4] Schellekens H, Gaudart G. High-voltage vacuum circuit breaker-a feasibility study[C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 263-266.
- [5] Jimei Wang. 126kV vacuum circuit breaker debuted in China [C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 1-5.
- [6] Wang Jimei, Liu Zhiyuan, Xiu Shixin, et al. Development of high voltage vacuum circuit breakers in China[C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 247-252.
- [7] 刘志远, 王季梅, 修士新, 等. 真空灭弧室单匝式触头: 中国, 200420086276.8[P]. 2005-12-21.
- [8] Cheng Shaoyong, Xiu Shixin, Wang Jimei, et al. Research on vacuum arc characteristics of a new electrode structure applied in high voltage vacuum interrupter[C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 185-188.
- [9] Cheng Shaoyong, Xiu Shixin, Wang Jimei, et al. Experimental investigation on the arc modes transition of the AMF electrode with one turn coil structure[C]. IEEE 22th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006, 1: 321-324.
- [10] Fenski B, Lindmayer M. Vacuum interrupters with axial field contacts 3-d finite element simulation and switching experiments[J]. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 407-412.
- [11] 张炫, 刘志远, 王仲奕. 杯状纵磁真空灭弧室磁场特性分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 161-165.
Zhang Xuan, Liu Zhiyuan, Wang Zhongyi. Analysis of axial magnetic field in vacuum interrupters with cup type axial magnetic field contacts[J]. High voltage apparatus, 2005, 41(3): 161-165(in Chinese).

- [12] Stoving P N, Bestel E F. Finite element analysis of AMF vacuum contacts[C]. IEEE 18th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, the Netherlands, 1998: 522-529.
- [13] Nitta K, Watanabe K, Kagenage K, et al. Three-dimensional magnetic field analysis of electrodes for VCBs[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1997, 12(4): 1520-1525.
- [14] 郑跃胜, 刘志远, 王仲奕, 等. 基于正交设计的杯状纵磁真空灭弧室磁场特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 23-27. Zheng Yuesheng, Liu Zhiyuan, Wang Zhongyi, et al. Analysis of magnetic field characteristics in vacuum interrupters with cup-type axial magnetic field contacts based on orthogonal design [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 23-27(in Chinese).
- [15] 李云雁, 胡传容. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [16] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [17] Watanabe K, Kaneko E, Yanabu S. Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1997, 25(4): 609-616.
- [18] Paul B J. Calculation of eddy-current-induced magnetic fields in vacuum interrupters with axial magnetic fields contacts[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1988, 24(5): 2204-2214.
- [19] 刘志远, 王仲奕, 王季梅, 等. 杯状纵磁触头纵向磁场滞后时间研究[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 87-90.
- Liu Zhiyuan, Wang Zhongyi, Wang Jimei, et al. Study on phase shift time of cup type axial magnetic contact[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 87-90(in Chinese).
- [20] Liu Zhiyuan, Wang Zheng, Wang Jimei. A new slot type axial magnetic field contact with low resistance, matsue[C]. IEEE 22th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Japan, 2006, 1: 293-296.

收稿日期: 2007-05-25。

作者简介:

刘志远(1971—), 男, 博士, 讲师, 从事真空电弧理论和真空开关方面的研究, liuzy@mail.xjtu.edu.cn;

郑跃胜(1981—), 男, 硕士研究生, 从事电磁场数值分析研究;

王仲奕(1956—), 女, 博士, 副教授, 从事电磁场理论及应用研究;

王季梅(1922—), 男, 教授, 博士生导师, 从事真空电弧理论、真空开关和熔断器方面的研究;

柴命哲(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电弧物理与电接触理论、电器智能化理论、低温等离子体空气净化技术方面的研究。

(责任编辑 车德竞)