

基于Ansys Workbench的不同截面型式自力型触指/触头配合结构优化设计

杨帆, 邓斌, 王国志, 刘桓龙

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610000)

摘要: 采用Cu-Cr合金材料,利用Solidworks建立自力型触指的矩形和W型截面触指/触头配合结构三维模型;通过DOE分析选取设计变量;运用Ansys Workbench的参数目标驱动优化对其结构参数进行了优化仿真。2种不同截面配合结构的最大应力和最大变形量的对比显示:随着触头直径、触指厚度以及摩擦行程的增大,各响应变量与之成正比例关系,且触头直径与摩擦行程对响应变量的影响比触指厚度的变化对响应变量的影响更大。经过多目标驱动优化后,矩形触指的最大变形量为6.6 mm,而W型触指最大变形量为2.6 mm。因此,当触指的几何尺寸和材料均相同时,W型截面力学性能要优于矩形截面。

关键词: 自力型触指/触头; 矩形截面; W型截面; 优化设计

Optimization for Self-elastic Contact Coordination Structure with Different Sections Based on Ansys Workbench

YANG Fan, DENG Bin, WANG Guozhi, LIU Huanlong

(College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract: The Cu-Cr alloy is used. Building the 3D model for the section of rectangular and W type of the self-elastic contacts, which is used a software called Solidworks. The parameters target drive of Ansys Workbench is used to optimize the structural parameters. Comparing the maximum equivalent stress and the maximum total deformation of 2 kinds of structures with different cross sections, the conclusion is that positive correlations exist between design variables and response variables, and contact diameter with contact displacement exhibit more significant influence on response variables than contact depth. After multi-objective optimization, the total deformation maximum for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts is 6.6 mm, however the W type is 2.6 mm. The result is that the mechanical properties of W type is better than the section of rectangular.

Key words: self-elastic contacts; rectangular section; W shaped cross section; optimization

0 引言

传统隔离开关是采用弹簧提供触指与触头之间的接触压力,虽然接触稳定,但由于弹簧的存在也增加了触指/触头导电系统的复杂性。文中采用的GW4型触头结构,由于触指末端接触点自清扫能力较差,积灰、积垢和氧化,容易产生接触不良。在触指/触头导电系统中,只要弹簧两端存在电压差,触指、弹簧和触指座就会构成导电回路,隔离开关工作时弹簧就会有电流流过。当长时间使用后,弹簧

会因退火而逐渐失去弹性,从而导致接触电阻增大,而接触电阻的增大又会加剧弹簧的失效,形成恶性循环^[1-3]。

目前自力型触指材料一般采用Cu-Cr合金,该材料具有十分优良的过热稳定性和弹性,触指不需要依靠弹簧提供接触压力,仅靠自身的弹性就可保证与触头的可靠接触,长期运行也仍能保证接触力不变。鉴于这种材料的优点,文中研究基于Cu-Cr合金的自力型触指/触头配合结构^[4-6]。

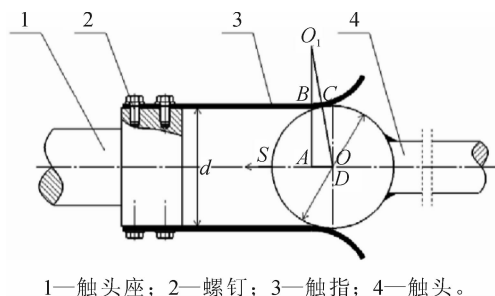
目前触指的截面型式主要为矩形和W型。对触指/触头结构进行优化设计之前,需要先校核触指的

强度和刚度^[7-9],但文中 W 型横截面形状复杂,使得手工校核触指强度、刚度变得十分困难,因此利用 Solidworks 建立这 2 种截面类型的触指/触头配合结构的参数化模型,将其导入 Ansys Workbench Environment(AWE)前后处理环境下的 DesignXplorer 模块,采用试验设计法(DOE)研究各个设计变量和响应变量(即目标函数)之间的关系。通过响应曲面优化和多目标驱动优化对触指/触头配合结构进行参数优化设计,并利用参数相关性优化,通过图表来动态的显示输入与输出参数之间的关系。

1 自力型触指/触头结构与配合参数设置

1.1 自力型触指/触头结构

自力型触指/触头配合结构见图 1。由于触头直径大于触指之间的开距,当隔离开关合闸时,两侧的触指张开,依靠自身的弹性力提供导电通流所需的接触压力。这种高压隔离开关触指/触头结构与传统触指触头结构相比,省去了弹簧装置^[10-11],有效地避免了因分流导致的弹簧退火失效,并且结构相对简单,操作灵活,且具有良好的自洁功能,但同时对其强度、刚度设计就有了更加高的要求^[12-13]。



1—触头座; 2—螺钉; 3—触指; 4—触头。

图 1 自力型触指/触头配合结构

Fig. 1 The assembly structure of the self-elastic contacts

1.2 自力型触指/触头配合参数设置

在隔离开关分合闸过程中,触指依靠其自身弹性提供接触压力。对接触压力的选取一般要综合考虑 2 方面因素: ①由于触指与触头通过螺钉连接,触指相当于是悬臂梁,因此固定端受力较大,触指变形量不宜太大; ②为了保证一定的过流稳定性和通流密度,要求有足够的接触压力,触指变形量也不宜太小。

影响触指变形量的参数主要是触指的厚度、触指之间的开距、触头的位移行程和触头的直径。文中研究的触指之间的开距采用 150 mm。参照传统触指结构参数,初步设定触头直径取值范围 152~160 mm。为了保证触指与触头接触的稳定性,触点应位于触指有效工作区域,见图 1。触点应位于 B 点

的左侧,因此触头的摩擦行程应该大于 BC,根据触指/触头配合的几何关系可知 $\Delta O_1BC \cong \Delta O_1AO$,可得:

$$\frac{BC}{AO} = \frac{O_1C}{O_1O}, \text{又 } \because AO = \sqrt{(O_1O)^2 - (O_1A)^2}$$

$$\therefore BC = \frac{O_1C}{O_1O} \sqrt{(O_1O)^2 - (O_1A)^2}$$

$$\text{取 } OC_{\max} = 80 \text{ mm}, O_1C = 40 \text{ mm}$$

$$\therefore O_1O_{\max} = OC_{\max} + O_1C = 120 \text{ mm}$$

$$\text{又 } O_1A = O_1B + BA = 115 \text{ mm}$$

$$\therefore BC = \frac{40}{120} \times \sqrt{120^2 - 115^2} \approx 11.43 \text{ mm}$$

文中设定触头的最小摩擦行程为 12 mm,根据相关资料选取最大行程为 16 mm^[6]。

针对目前已有的触指截面型式,文中选取矩形和 W 型触指进行研究,利用 Solidworks 分别建立其三维模型。在创建模型时,为了缩短后面优化分析时间,对模型进行了一定程度的简化,即只采用两片触指,见图 2、3。将以上所有的配合参数均设定为设计变量,并将其与模型一并导入 Ansys Workbench 中,为后面的参数优化设计做准备。

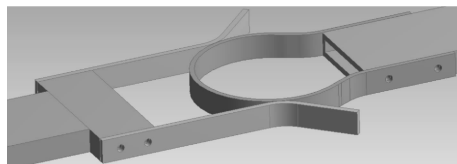


图 2 矩形触指/触头配合结构三维模型

Fig. 2 The 3D model of the rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

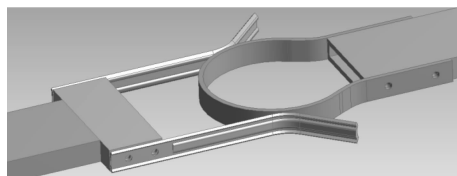


图 3 W 型触指/触头配合结构三维模型

Fig. 3 The 3D model of the W type of assembly structure of the self-elastic contacts

2 DOE 分析与参数目标驱动优化

2.1 DOE 分析

为了研究设计变量触指厚度、触头摩擦行程以及触头直径与响应参量触指的最大等效应力、最大剪切应力和最大变形量之间的关系,文中采用 DesignXplorer 模块的试验设计法(DOE 分析)。

首先分析这 3 个设计变量对响应参量的影响程度,做灵敏度分析,见图 4、5。

由图 4、5 对比分析可知:对矩形触指,触头的摩擦行程对最大变形量影响最大。而对 W 型触指,

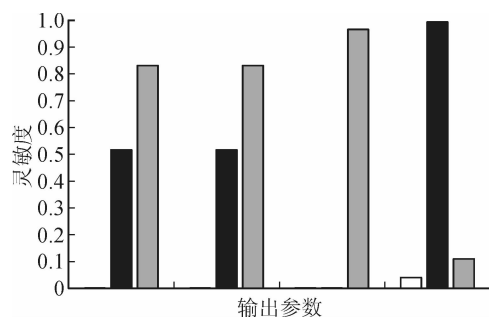


图4 矩形触指/触头配合结构灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

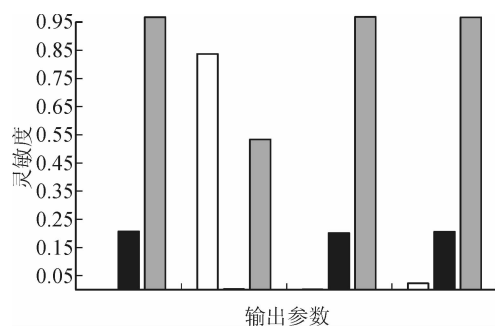


图5 W型触指/触头配合结构灵敏度分析

Fig. 5 Sensitivity analysis for W type of assembly structure of the self-elastic contacts

触头直径对其影响反而最大。绘制出相关性矩阵，见图6、7。

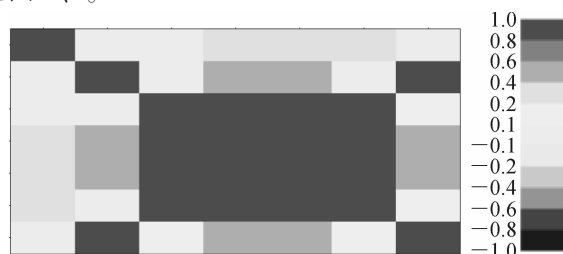


图6 矩形触指/触头配合结构相关性矩阵

Fig. 6 Linear correlation matrix for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

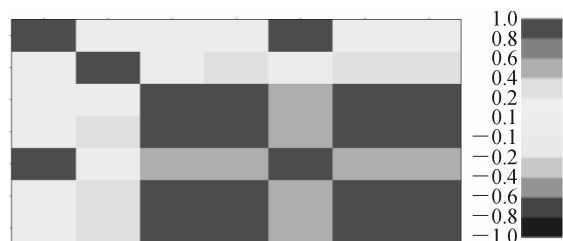


图7 W型触指/触头配合结构相关性矩阵

Fig. 7 Linear correlation matrix for W type of assembly structure of the self-elastic contacts

由图6、7可知：无论哪种截面型式，触指厚度对除质量以外的响应参数的相关性系数都很小，影响较其他设计变量而言都相对薄弱，又因为触指质

量在所有响应参量中重要性程度最低，因此在进行绘制响应曲面时，将触指厚度参数值固定，而将触头摩擦行程和触头直径设为变量。

将矩形触指的厚度确定为6 mm，而将W型截面触指厚度确定为3 mm，绘制出的最大变形量响应曲面见图8、9。

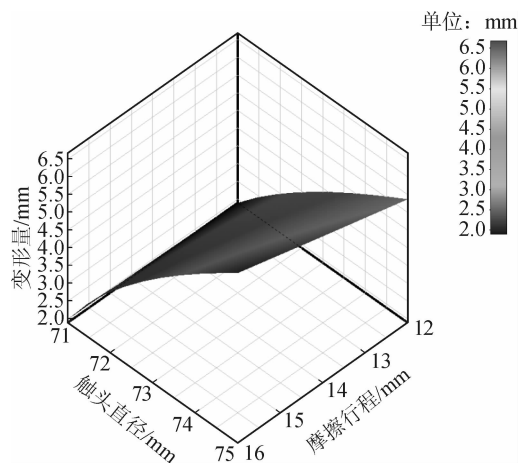


图8 矩形触指/触头配合结构最大变形量响应曲面

Fig. 8 Response surface of total deformation max-imum for rectangular assembly structure of the se-lf-elastic contacts

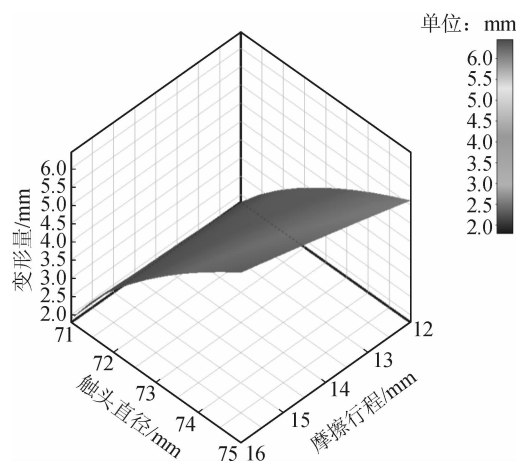


图9 W型触指/触头配合结构最大变形量响应曲面

Fig. 9 Response surface of total deformation max-imum for W type of assembly structure of the se-lf-elastic contacts

由以上响应曲面可以看出：随着触头直径和摩擦行程的增加，触指变形量也在增大。当设计变量均达到各自范围的最大时，矩形触指最大变形量约为6.5 mm，而W型触指约为6 mm。由此可知，触指要达到相近的变形量，W型触指的质量更轻，但6 mm的变形对于触指而言肯定不是最优结果，因此需要进行参数目标驱动优化。

2.2 参数目标驱动优化

文中建立的触指/触头配合结构优化数学模型

中选取 3 个设计变量,即触头直径 d 、触头摩擦行程 l 和触指厚度 H 。3 个响应参量,即最大等效应力 σ 、最大变形量 f 和最大切应力 τ 。

建立矩形触指/触头配合结构优化数学模型。

$$\begin{cases} J_1 = \min \sigma(X) = \sigma(d, l, H) \\ J_2 = \min f(X) = f(d, l, H) \\ J_3 = \min \tau(X) = \tau(d, l, H) \\ G_1(X) = d - 152 \geq 0 \\ G_2(X) = 160 - d \geq 0 \\ G_3(X) = l - 0.012 \geq 0 \\ G_4(X) = 0.016 - l \geq 0 \\ G_5(X) = H - 3.3 \geq 0 \\ G_6(X) = 6.6 - H \geq 0 \\ X = (x_1, x_2, x_3)^T = (d, l, H)^T \end{cases} \quad (1)$$

建立 W 型触指/触头配合结构优化数学模型。

$$\begin{cases} J_1 = \min \sigma(Y) = \sigma(d', l', H') \\ J_2 = \min f(Y) = f(d', l', H') \\ J_3 = \min \tau(Y) = \tau(d', l', H') \\ G_1(Y) = d' - 152 \geq 0 \\ G_2(Y) = 160 - d' \geq 0 \\ G_3(Y) = l' - 0.012 \geq 0 \\ G_4(Y) = 0.016 - l' \geq 0 \\ G_5(Y) = H' - 3.3 \geq 0 \\ G_6(Y) = 6.6 - H' \geq 0 \\ X = (y_1, y_2, y_3)^T = (d', l', H')^T \end{cases} \quad (2)$$

(1)-(2)式中: J 为目标函数; G 为状态变量; X 、 Y 为设计变量。

在 DesignXplorer 中,对矩形和 W 型触指设计变量均做默认设置,见表 1、2。

表 1 矩形触指/触头配合结构期望设置

Table 1 The design variable setup for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts mm				
设计变量	下限	上限	期望值	重要性
DS_R	71	75	无	默认
$DS_displacement$	0.012	0.016	无	默认
DS_H	3.3	6.6	无	默认

表 2 W型触指/触头配合结构期望设置

Table 2 The design variable setup for W type of assembly structure of the self-elastic contacts mm				
设计变量	下限	上限	期望值	重要性
DS_R	71	75	无	默认
$DS_displacement$	0.012	0.016	无	默认
DS_H	2.9	3.5	无	默认

对于响应参量,则要求触指的最大等效应力要小于 Cu-Cr 合金许用正应力 400 MPa,最大剪切力

小于许用切应力 220 MPa,质量尽可能小。相关资料显示 Cu-Cr 合金制成的触指、触头配合过程中,触指的变形量要大于 2.5 mm 以保证一定的过流稳定性和过流密度^[5]。在 DesignXplorer 中对响应参量见表 3。

表 3 响应参量期望设置

Table 3 The response variables setup			
响应参量	目标值	期望值	重要性
σ/MPa	400.0	小于目标值	高级
f/mm	2.5	大于目标值	高级
τ/MPa	220.0	小于目标值	默认
m	无	尽量小	默认

DesignXplorer 优化结果见表 4、5。

表 4 矩形触指/触头配合结构优化结果

Table 4 The optimizing results for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

参数	优化结果	评估
σ/MPa	127.00	☆☆☆
f/mm	6.60	☆☆☆
τ/MPa	65.50	—
m/kg	2.90	☆☆
DS_H/mm	3.48	—
DS_R/mm	74.90	—
$DS_displacement/\text{mm}$	15.80	—

表 5 W型触指/触头配合结构优化结果

Table 5 The optimizing results for W type of assembly structure of the self-elastic contacts

参数	优化结果	评估
σ/MPa	134.40	☆☆
f/mm	2.60	☆☆☆
τ/MPa	66.90	☆☆
m/kg	2.80	☆☆☆
DS_H/mm	2.92	—
DS_R/mm	71.50	—
$DS_displacement/\text{mm}$	13.90	—

从表 4、5 可以看出:经过优化后的矩形触指的变形量也仍然远远大于 W 型,其厚度比 W 型增大了 0.56 mm,质量比 W 型增加了 0.1 kg。由此可知虽然这两种截面形式的触指均采用了新型材料 Cu-Cr 合金,但 W 型截面的触指各方面综合性能还是要优于矩形触指。

将 DesignXplorer 模块下求得的这 2 种不同截面形式的最优设计点再导入 Ansys Workbench 中,得到最大等效应力和最大变形量云图见图 10-13。

由图 10、11 可以看出,触指在固定端往往会承

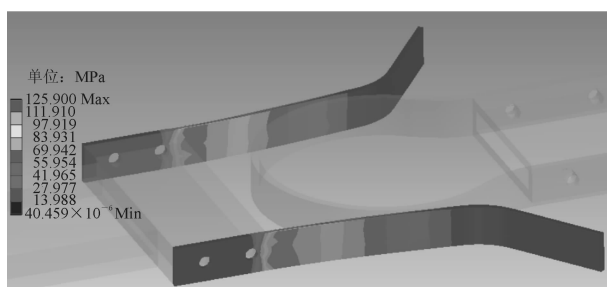


图 10 矩形触指/触头配合结构最大等效应力云图

Fig. 10 Response surface of equivalent stress maximum for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

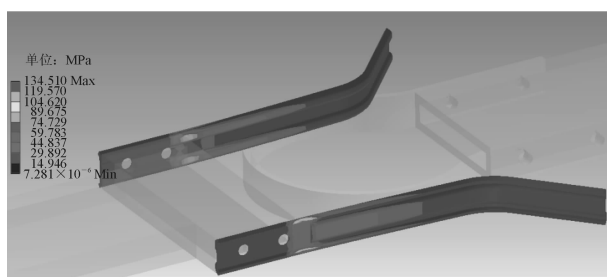


图 11 W 型触指/触头配合结构最大等效应力云图

Fig. 11 Response surface of total deformation maximum for W type of assembly structure of the self-elastic contacts

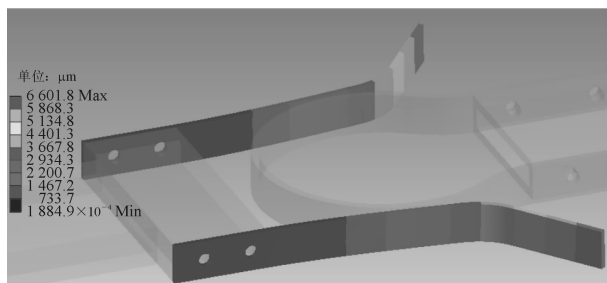


图 12 矩形触指/触头配合结构最大变形量云图

Fig. 12 Response surface of total deformation maximum for rectangular assembly structure of the self-elastic contacts

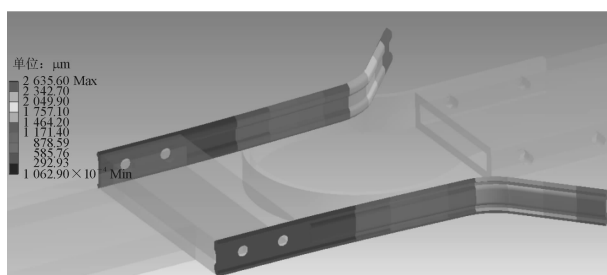


图 13 W 型触指/触头配合结构最大变形量云图

Fig. 13 Response surface of total deformation maximum for W type of assembly structure of the self-elastic contacts

两侧。

由图 12、13 可知,经优化后,矩形触指的最大变形量为 6.6 mm,而 W 型触指却只有 2.6 mm,因此当基于 Cu-Cr 合金制成的这 2 种截面形式触指/触头配合结构均达到接触压力要求时,W 型截面的触指刚度要明显优于矩形截面。

3 结语

目前触指的截面形式主要是矩形、W 型和圆形,触指零件的服役寿命决定了高压隔离开关的寿命,进而决定了高压输电网的安全运行^[14-16],而自力型触指中又以矩形和 W 型为主。文中采用 Cu-Cr 合金材料,利用 Solidworks 建立了这 2 种不同截面形式的触指,并将其导入 Ansys Workbench 中模拟触指与触头动态配合过程,获得了触指承受的最大等效应力、最大剪切力以及最大变形量。利用 DesignXplorer 模块对这 2 种截面形式的触指/触头配合结构进行优化,结果显示:当采用相同的材料时,W 型触指综合力学性能要优于矩形触指。

参考文献:

- [1] 钟振蛟. 户外隔离开关导电回路过热的原因及对策[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 307-309.
ZHONG Zhenjiao. The causes and countermeasures for the overheating of conducting circuit for outdoor disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 307-309.
- [2] 钟振蛟. 户外高压隔离开关实现免维护问题的探讨[J]. 电气世界, 2003(4): 20-23.
ZHONG Zhenjiao. Discussion on the maintenance-free of outdoor disconnector[J]. Electrical World, 2003(4): 20-23.
- [3] 郑洪. GW5 型户外隔离开关的完善[J]. 电气时代, 2004(12): 142-144.
ZHENG Hong. Improving of type GW5 outdoor disconnector[J]. Electric Age, 2004(12): 142-144.
- [4] 苑舜, 崔文军. 高压隔离开关设计与改进[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
YUAN Shun, CUI Wenjun. Design and restructuring for the voltage isolating switch[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [5] 刘卫峰, 宋克兴, 赵文强, 等. 高压隔离开关自力型触指/触头结构仿真分析与优化设计[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 6-10.
LIU Weifeng, SONG Kexing, ZHAO Wenqiang, et al. Finite element analysis and optimization for the assembly structure of the self-elastic contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12): 6-10.
- [6] 刘卫峰. 高压隔离开关自力型触指结构优化设计及其成形技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011.

- LIU Weifeng. Optimization design and study of formability on self-elastic contact finger used in the high voltage isolating switch[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2011.
- [7] 王平. 自力型触头的应用[J]. 高压电器, 1996, 32(5): 41-43.
- WANG Ping. Application of self-elastic contact[J]. High Voltage Apparatus, 1996, 32(5): 41-43.
- [8] UPADHYAYA A, GERMAN R M. Densification and dilation of sintered W-Cu alloys[J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1998, 34(2): 43-54.
- [9] GERMAN R M, RABIN B H. Enhanced sintering through second phase additions powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering A, 1985, 28(1): 7-12.
- [10] JOHNSON J L, GERMAN R M. Chemically activated liquid phase sintering of tungsten-copper[J]. The International Journal of Powder Metallurgy, 1994, 30(1): 91-102.
- [11] 李震彪, 张冠生, 秦庆生. 电触头材料抗静熔焊能力的研究[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(1): 34-39.
- LI Zhengbiao, ZHANG Guansheng, QIN Qingsheng. The static welding resistance of electric contact materials[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(1): 34-39.
- [12] 林莘, 何柏娜, 徐建源. 自力型触头的设计与计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 828-830.
- LIN Xin, HE Baina, XU Jianyuan. Design and calculation of self-elastic contact[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 828-830.
- [13] 刘英. SF₆ 高压电器产品中各类触头形式的优劣对比[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 298-300.
- LIU Ying. Merits and demerits of different types of contacts in SF₆ high voltage apparatus[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 298-300.
- [14] 凌颖, 赵莉华, 林显, 等. 高压隔离开关电触头性能改善探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 101-105.
- LING Ying, ZHAO Lihua, LIN Xian, et al. Discussion of improvement method of electrical contacts on high voltage disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 101-105.
- [15] 岳永刚, 白志强, 赵墨林, 等. 采用导电滚动触头的隔离开关过热故障分析[J]. 高压电器, 2010, 44(6): 592-595.
- YUE Yonggang, BAI Zhiqiang, ZHAO Molin, et al. Analysis of overheating fault of electric rolling-contact-type isolator[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 44(6): 592-595.
- [16] 陈宏伟, 王光临. GW4-126 型户外隔离开关的常见缺陷分析及改进措施[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 155-157.
- CHEN Hongwei, WANG Guanglin. Analysis of common faults of type GW4-126 disconnector and its improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 155-157.

杨帆(1990—), 男, 硕士, 主要从事结构仿真分析与优化设计。