

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.012

## 基于有限元电场分析优化的双屏蔽触头盒

吴昊<sup>1</sup>, 孟鹤<sup>1</sup>, 宋璠<sup>2</sup>, 赵瑞影<sup>1</sup>

(1. 正泰电气股份有限公司, 上海 201614; 2. 上海电科电器科技有限公司, 上海 201100)

**摘要:** 基于有限元分析软件 Ansys 对电场进行仿真分析, 对 40.5 kV 开关设备内重要的绝缘件——触头盒进行双屏蔽设计改进, 优化了高、低压双屏蔽层的布置方式和伞裙分布, 实现了触头盒的整体绝缘性能的提升。

**关键词:** 触头盒; 双屏蔽层; 电场分布; 优化设计

### Electric Field Analysis and Optimization Design of Double Shielded Contact Box Based on Finite Element Method

WU Hao<sup>1</sup>, MENG He<sup>1</sup>, SONG Fan<sup>2</sup>, ZHAO Ruiying<sup>1</sup>

(1. Chint Electric Co., Ltd., Shanghai 201614, China; 2. Shanghai Dianke Electric Appliance Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**Abstract:** Base on the double shielded design of the contact box an important insulating part in the 40.5 kV switch-gear, and the simulation of the electric field distribution by using the finite element analysis software Ansys, the layout of the high and low voltage double shielded layer and the distribution of the umbrella skirt are optimized, and the overall insulation performance of the contact box is improved.

**Key words:** contact box; double shielded layer; electric field distribution; optimization design

## 0 引言

目前中压可抽出式空气绝缘交流金属封闭开关设备主要采用空气作为绝缘介质, 同时采用绝缘件(触头盒)来保证穿过不同隔室时带电导体的连续性。开关设备投运后, 电力系统中的运行电压和电场分布等因素均会影响到其内部绝缘件的使用寿命<sup>[1]</sup>。已知运行电压为固有参数, 那么电场分布的差异对设备的影响就尤为突出。因此在产品设计中, 充分考虑电场分布的影响, 尽可能减少电场不均对绝缘件可靠性的降低是非常重要和必要的。对于现有中压开关设备, 尤其是小型化设备, 由于其尺寸较小, 设备内部带电体和其接地的壳体的布局大多不规整, 设备内部的电场强度较大, 电场分布不均匀, 这就极易导致产品在长时间运行后, 频发放电问题, 影响开关设备的整体可靠性<sup>[2]</sup>, 因此改善电场分布, 平衡空气中和绝缘件内部的电场强度是提高绝缘件安全可靠性的的重要手段。

根据《高压开关行业年鉴 2018》统计, 现有在运行的 40.5 kV 空气绝缘开关设备的绝缘闪络故障率很高<sup>[3]</sup>。故障原因多为 40.5 kV 开关设备绝缘裕度不足, 故障率最高为 0.05 次/百台, 这在所有故障率中排名第一。同时, 《国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施》也对开关柜提出了新的要求<sup>[4]</sup>, 例如, 40.5 kV 空气绝缘净距离大于 300 mm; 新安装开关柜禁止使用绝缘隔板; 单个绝缘件局部放电量不大于 3 pC; 24 kV 及以上开关柜内的穿柜套管、触头盒应采用双屏蔽结构等。因此, 优化设计开关设备的绝缘裕度是一个很紧迫的任务, 其中触头盒的绝缘优化又是重中之重。

## 1 触头盒现状

通过对国内现有市场上比较常见的外资、合资及国产 40.5 kV 空气绝缘开关设备的统计分析比较, 并对国内主流绝缘件供应商进行调研, 其触头盒主要有两种结构形式:

1) 国产-KYN61, ABB-UniGear ZS3.2, 西门子-NXAirS 等最常用的触头盒结构形式如下, 以CH系列为例, 见图1。

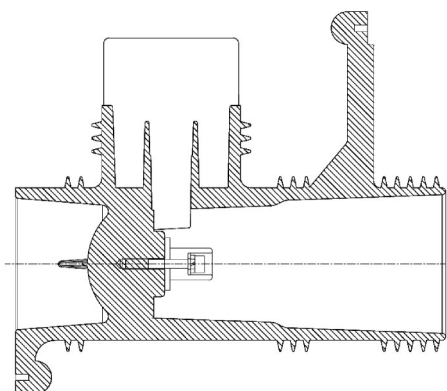


图1 CH系列触头盒

Fig. 1 CH series spout

此种触头盒在运行的数量最大, 但是由于其安装方式(前后安装)和内部导体走向的影响, 很难按照国网要求做成有效的双屏蔽结构。同时, 在国网内部会议中, 也有部分与会者提出, 此种安装运行方式中母线室与电缆室之间的金属隔板不连续, 无法满足IEC及GB标准的LSC2B-PM等级要求。CH触头盒柜内安装示意图见图2。

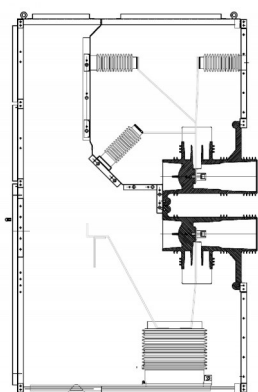


图2 CH触头盒柜内安装示意图

Fig. 2 CH spout installation diagram

2) 由于40.5 kV开关柜的体积较大, 部分厂家也推出了一种可以和电流互感器融合的一体式触头

盒, 根据需要也可以选择不集成电流互感器功能。以CTH系列为例, 见图3。

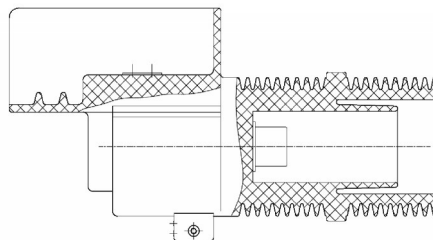


图3 CTH系列触头盒

Fig. 3 CTH series spout

此种CT式触头盒设计理念和方式有一定的优势, 而且方便分支母排搭接, 同时又能满足IEC及GB标准的LSC2B-PM等级要求<sup>[5-6]</sup>。但是在实际运行及试验过程中, 由于多种原因, 会出现触头盒的后端部对母线室—电缆室间金属隔板放电现象, 因此该柜型已经很少生产。由于此种触头盒内部导体尺寸及布置方式未知, 具体放电原因仍需成套厂家和绝缘件生产厂家共同参与做进一步的仿真分析及试验研究。CTH触头盒柜内安装示意图见图4。

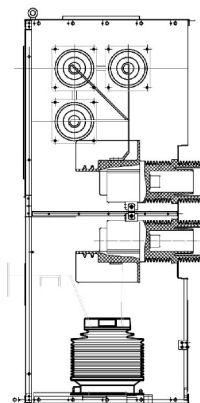


图4 CTH触头盒柜内安装示意图

Fig. 4 CTH spout installation diagram

3) 文中对国内主要绝缘件厂家生产的40.5 kV触头盒的关键技术参数进行了调研和统计, 这些技术参数在触头盒设计时需重点关注, 见表1。

表1 触头盒关键技术参数

Table 1 Partial spout parameters

| 型号               | 绝缘等级/kV | 局放/pC | 原材料牌号     | 爬电距离/mm | 玻璃化温度/℃   | 机械强度/kN |
|------------------|---------|-------|-----------|---------|-----------|---------|
| CHN3-/606 单屏蔽触头盒 | 95/185  | 客户选择  | 9219V 等   | —       | 100~120 等 | —       |
| CHN3-/660 单屏蔽触头盒 | 95/185  | ≤3    | 9219V     | —       | 100~120   | —       |
| CTH1-Q/300S      | 95/200  | —     | 国内 E-39-D | —       | 85±5      | ≥5      |
| CHA01 屏蔽触头盒      | 95/185  | ≤3    | —         | 1 020   | —         | ≥10     |
| CHA01-I 屏蔽触头盒    | 95/185  | ≤3    | —         | ≥1 020  | —         | ≥10     |

## 2 双屏蔽触头盒设计及优化

为了降低 40.5 kV 空气绝缘开关设备因绝缘问题所导致的故障占比, 满足 IEC 及 GB 标准的 LSC2B-PM 等级要求, 同时满足国网十八项反措的要求, 需要对触头盒进行新的设计及优化, 实现电场分布比较合理, 提高设备运行可靠性。

### 2.1 触头盒初版设计

触头盒在可抽出式开关设备内部起着联接支撑、绝缘隔离的作用。联接支撑是指联接分支母线和功能手车, 实现导电系统连续性的作用, 同时也起着绝缘隔离带电体和接地壳体的作用。触头盒

内部安装有静触头, 功能手车配有动触头, 当功能手车处在工作位置时动静触头啮合<sup>[7]</sup>。触头盒在设备运行时承受电压和电流的双重影响, 因此设计时需考虑工频耐受电压、雷电冲击电压、温升、短时和峰值耐受电流等因素, 即电场强度分布, 同时考虑通风散热性能和机械强度等环节, 这些将直接影响触头盒最终的结构形式、绝缘材料、安装方式等多方面特征<sup>[8-9]</sup>。

对于 40.5 kV 开关设备, 当额定电流为 1 250 A 及以下等级时, 柜宽为 1 400 mm, 这也是限制触头盒设计, 影响整体开关设备绝缘水平的主要因素。开关设备内最常用的功能手车为断路器, 而国内在运行量最大的断路器为 ZN85, 其外形尺寸见图 5。

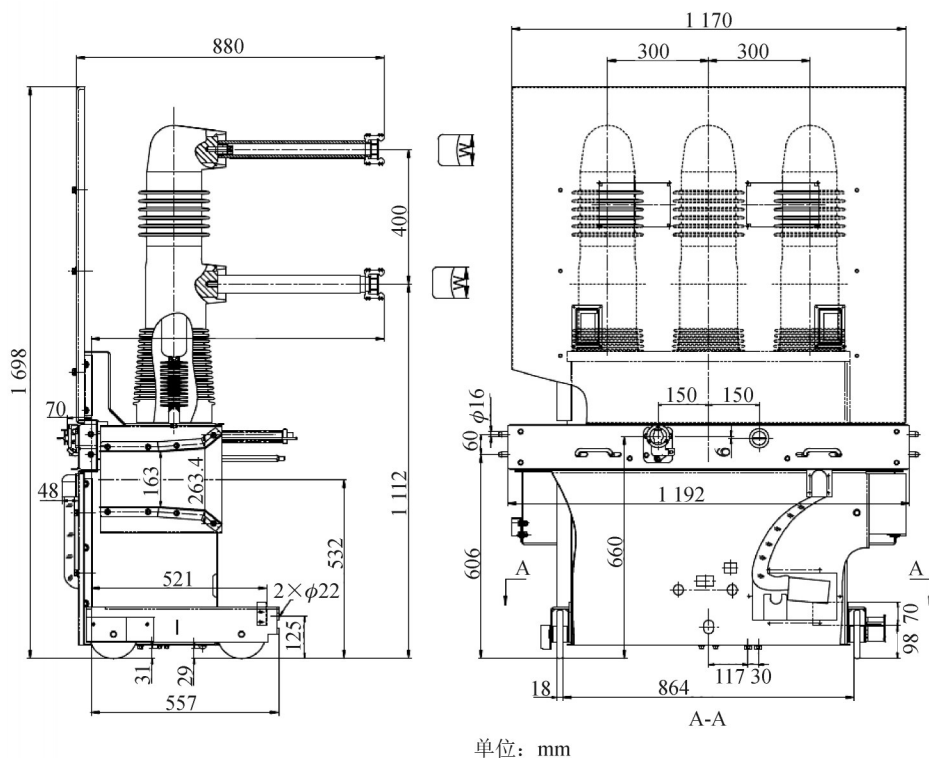


图5 断路器基本尺寸

Fig. 5 Basic dimensions of circuit breaker

其中对触头盒设计比较重要的尺寸为: 相间距为 300 mm, 极间距为 400 mm, 决定了触头盒的最大外形尺寸。与断路器动触头配合的静触头尺寸, 决定了触头盒前端内腔尺寸和搭接安装界面。与触头盒静触头搭接的分支母线的尺寸和布置方式, 影响了触头盒后端出线侧的内腔尺寸和护板方式。

对于环氧树脂材料制作的触头盒, 根据绝缘等级以及加工制造经验, 其基本壁厚(内绝缘)以及影响爬距的伞裙(外绝缘)都可以一并计算得出最低要求。

环氧树脂绝缘厚度  $d$ (mm) 的计算式为

$$d = \sqrt[n]{U/A} \quad (1)$$

式(1)中:  $U$  是放电电压, kV;  $A$  是系数(正雷电冲击电压作用时,  $A$  取 200; 工频电压作用时,  $A$  取 74);  $n$  是系数(雷电冲击电压或工频电压作用时, 均取 0.68, 由于  $n < 1$ , 放电电压随材料厚度增加, 有一定的饱和倾向)。

在工程应用中(与电极形状有关), 绝缘材料厚度 10 mm 的冲击破坏电压为 960 kV, 工频破坏电压为 355 kV。

填充氧化铝粉的环氧树脂的放电电压试验曲线见图 6。

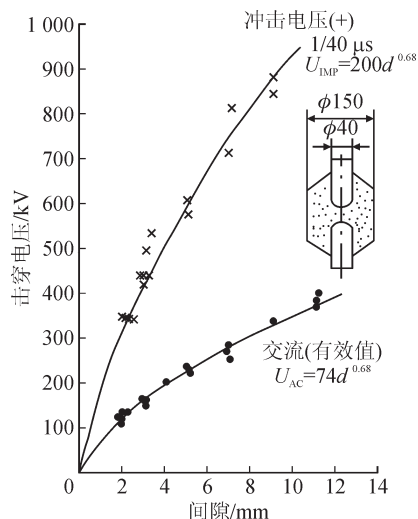


图6 放电电压试验曲线

Fig. 6 Discharge voltage test curve

通过外绝缘的爬电距离确定伞裙的大小及布置方式,而爬电距离与绝缘材料和运行环境(户内/户外、海拔、污秽等级等)有关。根据DL/T 593—2016规定,户内开关设备的相对地间、相和相间、断路器或负荷开关一个极的两个端子间的瓷质或有机绝缘子,其外绝缘的最小标称爬电距离由式(2)确定<sup>[10]</sup>

$$l_1 = a l_r U_r / (\sqrt{3} k_{ad}) \quad (2)$$

式(2)中:  $l_1$  为最小标称爬电距离(见注1), mm;  $a$  为与绝缘类型有关的应用系数;  $l_r$  为最小标称爬电比距,按国网要求户内开关设备的最小标称统一爬电比距:  $\geq \sqrt{3} \times 18 \text{ mm/kV}$  (对瓷质绝缘),  $\geq \sqrt{3} \times 20 \text{ mm/kV}$  (对有机绝缘);  $U_r$  为开关设备的额定电压;  $k_{ad}$  为直径的校正系数,当平均直径  $D_a < 300 \text{ mm}$  时,  $k_{ad} = 1.0$ , 当  $D_a \geq 300 \text{ mm}$  时,  $k_{ad} = 0.0005 D_a + 0.85$ 。

爬电距离的应用系数见表2。

表2 爬电距离的应用系数

Table 2 Application factor for creepage distance

| 绝缘的应用部位   | 应用系数 $a$   |
|-----------|------------|
| 相对地       | 1.0        |
| 相间        | $\sqrt{3}$ |
| 断路器或开关的断口 | 1.0        |

注:对实际爬电距离与标称爬电距离的偏差可以规定制造允差;相对地间测得的爬电距离与  $U_r/\sqrt{3}$  之比。

根据以上技术参数要求,完成了此触头盒的初版设计,见图7、8。

同时,按照国网要求的双屏蔽触头盒方案,总结目前行业内通用的屏蔽技术,在此触头盒内部设计的金属网桶状高压屏蔽和接地屏蔽<sup>[11-13]</sup>,见图9。

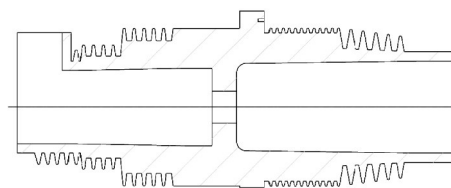


图7 初版触头盒剖视图

Fig. 7 Sectional view of the first version of the spout

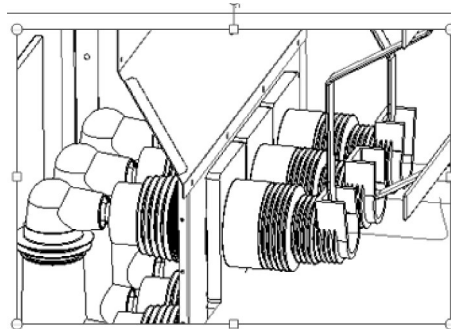


图8 初版触头盒三维模型

Fig. 8 3D model of the first version of the spout

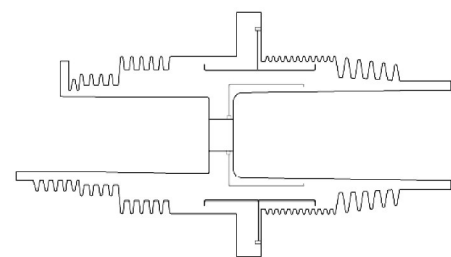


图9 初版触头盒屏蔽层

Fig. 9 The first version of the spout shield

## 2.2 触头盒电场分析

在触头盒分析模型中加入带电导体和触头盒安装板,选择一相回路做二维电场仿真分析,触头盒的初版回路布置见图10。

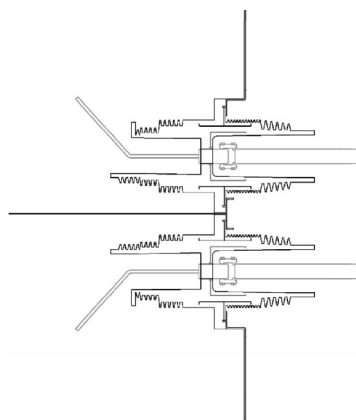


图10 初版回路布置图

Fig. 10 First edition circuit layout

- 1)分析过程中环境默认介质是空气;
- 2)带电导体材料为铜,绝缘材料为环氧树脂,屏蔽层和接地的安装板材料为铁;
- 3)环氧树脂的相对介电常数 $\epsilon$ 取4;

对于 40.5 kV 开关设备,按照标准要求,其工频耐受电压为 95 kV,因此带电导体按此值施加电压,接地安装板加载电压为 0 V。

首先,采用有限元分析软件 Ansys,利用二维轴对称分析模型进行仿真分析,得出其整体电压分布和电场分布分别见图 11、12。

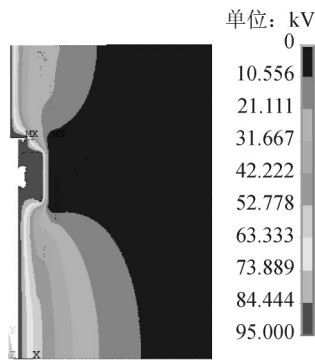


图 11 整体电压分布

Fig. 11 First detailed potential diagram

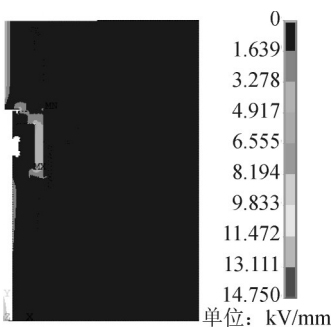


图 12 整体电场分布

Fig. 12 First detailed electric field diagram

为了对关键部位进行详细的分析,局部放大后的细节电场分别见图 13–15,由图 13 可知,在触头盒的环氧树脂内高压屏蔽的上下两端电场强度最大为 14.753 kV/mm,此值已超过环氧树脂的许用值;由图 14 可知,空气中的最大电场强度为 2.114 kV/mm。由图 15 可知,静触头后端由于屏蔽没能有效对其进行屏蔽,其最大电场达到 8.761 kV/mm,大大超过了许用值。因此需要对该屏蔽设计进行优化<sup>[14]</sup>。

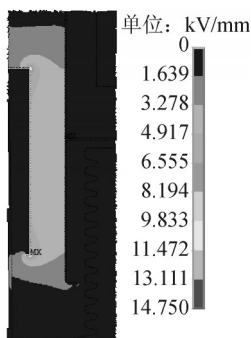


图 13 屏蔽层处电场图

Fig. 13 Electric field at the shield

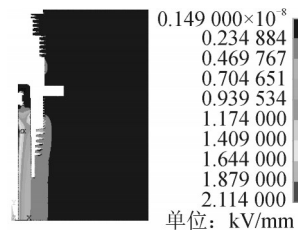


图 14 空气中电场图

Fig. 14 Electric field in the air

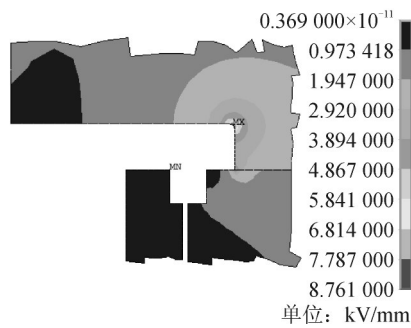


图 15 空气中静触头后端电场

Fig. 15 Electric field at the end of fixed contact in air

### 2.3 触头盒优化设计

由于带电导体和安装板位置都已基本确定,因此针对上述仿真结果需要对应优化高压和低压屏蔽<sup>[15]</sup>。对于高压屏蔽的上下两端电场强度较大问题,采取的优化方案如下:首先,增加高压屏蔽的长度,使其能够尽量多的覆盖屏蔽触头盒内的带电体位置,尤其是屏蔽静触头后端部,并在两端设置面向接地屏蔽的圆角。其次,在接地屏蔽的两端也增加圆角,降低触头盒外表面场强<sup>[16–20]</sup>,优化接地屏蔽边角处电场,同时能改善空气中的电场分布。在满足爬电距离的前提下去除接地屏蔽附近伞群,降低触头盒外表面伞群处的场强。优化后的触头盒及其屏蔽设计见图 16。

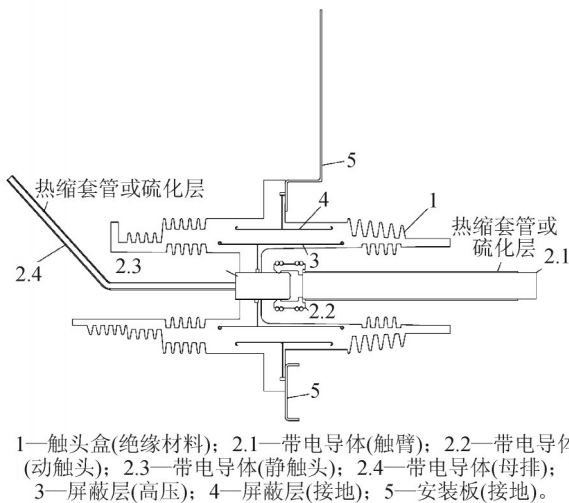


图 16 优化后回路及屏蔽布置图

Fig. 16 Optimized circuit and shielding layout

针对图 16 所示优化后的触头盒设计建立仿真

分析模型,加载条件与初版分析完全相同,其整体电压分布和电场分布分别见图17、18。

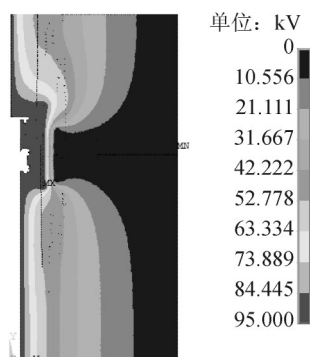


图17 优化后电压分布

Fig. 17 Optimized circuit and shielding layout

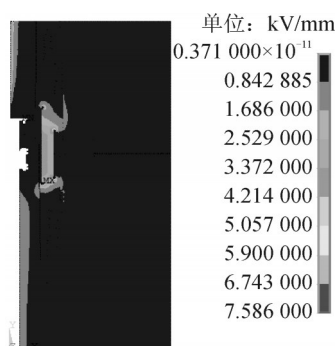


图18 优化后电场分布

Fig. 18 Optimized detailed electric field diagram

为了对关键部位进行详细的分析,局部放大后的细节电场分别见图19-21。由图19可知,在触头盒环氧树脂内屏蔽的上下两端电场强度最大值由优化前的14.753 kV/mm降到7.586 kV/mm,降幅明显。由图20可知,空气中的电场强度最大值由优化前的2.114 kV/mm降到1.615 kV/mm,降幅较大。由图21可知,静触头后端其最大电场强度由优化前的8.761 kV/mm已降低到0.459 kV/mm,极大降低了此处的电场强度。因此,优化后的方案从电场分布的角度来看优化明显,可以满足设计要求。

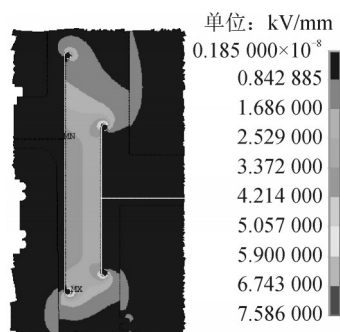


图19 优化后屏蔽处电场分布

Fig. 19 Electric field map at the shield after optimization

为了进一步对整个装配模型进行整体综合分

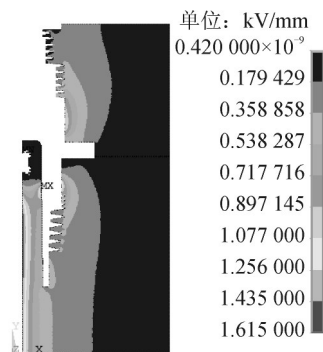


图20 优化后空气中电场分布

Fig. 20 Electric field map in the air after optimization

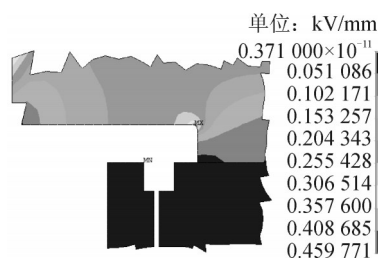


图21 优化后空气中静触头后端电场

Fig. 21 Electric field at the end of fixed contact in air after optimization

析,采用二维场对装配整体进行仿真分析,整体电压分布和电场分布分别见图22、23,空气中电场分布见图24。由图23可知,触头盒内电场强度最大值为8.247 kV/mm,由图24可知,空气中的电场强度最大值为1.843 kV/mm。因此,优化后的方案其整体电场分析结果都满足设计要求。

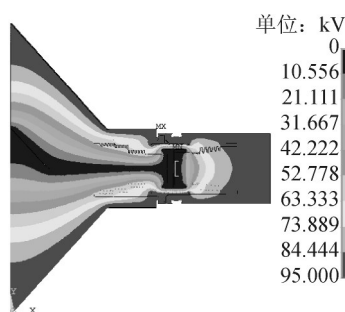


图22 优化后整体电位图

Fig. 22 Optimized overall potential map

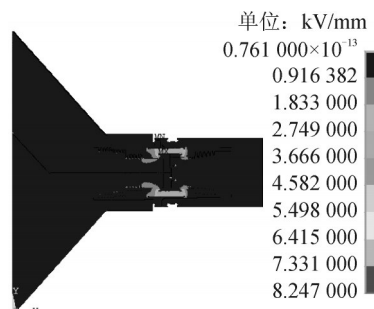


图23 优化后整体电场图

Fig. 23 Optimized overall electric field diagram

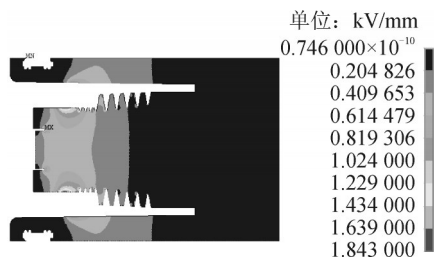


图24 优化后空气中电场图

Fig. 24 Electric field map in the air after optimization

### 3 结论

设计了一款40.5 kV空气绝缘开关设备的双屏蔽触头盒,并对其内部的高压屏蔽和低压屏蔽进行优化设计和电场分析,最终得到的仿真结果完全满足设计要求,并且此触头盒利用现有的加工工艺可以完成生产制造、实现批量化生产。后续工作,可以通过试制样件,对样件绝缘试验测试,并将实测结果与仿真分析结果进行分析对比,找出其相关性,以指导类似双屏蔽触头盒结构的环氧制品的设计和优化,提升产品的运行可靠性。

### 参考文献:

- [1] 钱家骊,袁大陆,杨丽华,等. 高压开关柜 结构、计算、运行、发展[M]. 北京:中国电力出版社,2007.  
QIAN Jiali, YUAN Dalu, YANG Lihua, et al. Structure, calculation, operation and development of high-voltage switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 丁健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 114-117.  
DING Jian. Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 114-117.
- [3] 元复兴,周小中. 高压开关行业年鉴2018[M]. 西安:中国电器工业协会高压开关分会, 2007.  
YUAN Fuxing, ZHOU Xiaozhong. High voltage switch industry yearbook[M]. Xi'an: High Voltage Switching Branch of China Electrical Equipment Industry Association, 2007.
- [4] 国家电网公司. 国家电网有限公司十八项电网重大反事故措施[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.  
State Grid Corporation of China. 18 item of electrical network significant counter-accident measures of State Grid Corporation of China[M]. Beijing: China Power Press, 2007.
- [5] High-voltage switchgear and controlgear-Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV: IEC 62271—2003[S], 2003.
- [6] 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB 3906—2006[S], 2006.  
Alternating-current metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 3.6 kV and up to and including 40.5 kV: GB 3906—2006[S], 2006.
- [7] 胡春旭. 35 kV 触头盒的改进方案分析[J]. 电工电气, 2017(12): 70-71.  
HU Chunxu. Analysis of improved scheme of 35 kV contact box[J]. Electrotechnics Electric, 2017(12): 70-71.
- [8] 王佳颖,方春恩,戴玉松,等. 35 kV 触头盒电场计算及优化设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 63-65.  
WANG Jiaying, FANG Chun'en, DAI Yusong, et al. Electric field calculation and optimal design of 35 kV contactor box[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 63-65.
- [9] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510-528.
- [10] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: DL/T 593—2016[S], 2016.  
Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: DL/T 593—2016[S], 2016.
- [11] 李晶,满家健,周电波,等. 金属封闭高压开关柜手车触头温度场仿真分析及实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 74-79.  
LI Jing, MAN Jiajian, ZHOU Dianbo, et al. Simulation analysis and experimental research on temperature distribution of metal-enclosed high voltage switchgear handcart contactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 74-79.
- [12] 甘源,白锐,张琪. 基于场—路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 144-149.  
GAN Yuan, BAI Rui, ZHANG Qi. Steady-state electromagnetic field and electrodynamic analysis of dry-type air-core reactor based on field-circuit coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 144-149.
- [13] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.  
NI Guangzheng. Engineering electromagnetic field calculation[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [14] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510-528.
- [15] 于庆瑞,王娇,刘建峰,等. 金属封闭开关设备触头盒绝缘结构的分析和优化[J]. 低压电器, 2012(18): 5-7.  
YU Qingrui, WANG Jiao, LIU Jianfeng, et al. Analysis and optimization for insulation structure of contactor box in metal enclosed switchgear[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(18): 5-7.
- [16] 张洪武. 有限元分析与 CAE 技术基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

- high voltage cables[J]. Smart Power, 2018, 46(11):65-69.
- [13] 叶远波, 谢 民, 王同文, 等. 适用于非同步采样故障电流的极性比较式快速母线保护[J]. 智慧电力, 2018, 46(4):87-92.
- YE Yuanbo, XIE Min, WANG Tongwen, et al. Polarity comparison fast bus protection for asynchronous sampling fault current[J]. Smart Power, 2018, 46(4):87-92.
- [14] 卞 超, 张正东, 赵 科, 等. 基于有限元的GIS母线不对中机械振动特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6):72-79.
- BIAN Chao, ZHANG Zhengdong, ZHAO Ke, et al. Study on mechanical vibration characteristics of GIS bus misalignment based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):72-79.
- [15] 黎高程, 陈晓彬, 孙玉彤, 等. 一种基于柜式母线故障特性的中低压母线精准保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17):156-162.
- LI Gaocheng, CHEN Xiaobin, SUN Yutong, et al. A kind of accurate protection of mid-low voltage bus based on the fault characteristics of cabinet bus[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17):156-162.
- [16] 刘 洋, 吴水兰, 朱若松, 等. 一种基于功率方向智能变电站中低压母线保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4):114-119.
- LIU Yang, WU Shuilan, ZHU Ruosong, et al. A scheme of mid-low voltage busbar protection based on power direction in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4):114-119.
- [17] 金超亮, 周 原, 李 化, 等. 220 kV 母线高压电抗器投切对电力系统的影响[J]. 广东电力, 2017, 30(5):119-123.
- JIN Chaoliang, ZHOU Yuan, LI Hua, et al. Influence of 220 kV busbar high-voltage shunt reactor switching on power system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5):119-123.
- [18] 蔡秋娜, 张乔榆, 刘思捷, 等. 市场环境下考虑多因素影响的母线负荷预测方法[J]. 广东电力, 2019, 32(8):65-72.
- CAI Qiuna, ZHANG Qiaoyu, LIU Sijie, et al. Bus load forecasting method considering multi factor influence in electricity marketing environment[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8):65-72.
- [19] 曹俊平, 蒋愉宽, 王少华, 等. XLPE 电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器, 2018, 54(7):87-97.
- CAO Junping, JIANG Yukuan, WANG Shaohua, et al. Analysis and prospect of defect detection key technology for XLPE power cable joints[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):87-97.
- [20] 杜 钢, 熊 俊, 张若兵. 基于脉冲电压及超声检测的GIS 母线故障定位技术研究[J]. 广东电力, 2019, 32(6):115-122.
- DU Gang, XIONG Jun, ZHANG Ruobing. Research on GIS bus fault location based on pulse voltage and ultrasonic detection[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6):115-122.
- 郝越峰(1986—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为配电网中性点接地系统保护与控制、变电一次设备检修与试验(E-mail:309874696@qq.com)。
- 马春雷(1964—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电网规划建设、安全生产管理以及智能电网、电力系统自动化、新能源技术研究。
- 陆禹初(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为变电一次设备高压试验。

(上接第 77 页)

- ZHANG Hongwu. Finite element analysis and CAE technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [17] 卞 超, 张正东, 赵 科, 等. 基于有限元的GIS母线不对中机械振动特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6):72-79.
- BIAN Chao, ZHANG Zhengdong, ZHAO Ke, et al. Study on mechanical vibration characteristics of GIS bus misalignment based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):72-79.
- [18] 邓永强, 陈 婧, 郑 聪, 等. 基于有限元仿真和微分进化算法的电场测量仪支架优化[J]. 智慧电力, 2020, 48(2):71-77.
- DENG Yongqiang, CHEN Jing, ZHENG Cong, et al. Optimization design of electric field measuring instrument holder based on finite element simulation and differential evolution algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(2):71-77.
- [19] 杨永通, 彭彦卿, 袁传镇, 等. 基于有限元分析的开关柜温度场研究与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(10):81-86.
- YANG Yongtong, PENG Yanqing, YUAN Chuanzhen, et al. Research and optimization of temperature rise of switch cabinet based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):81-86.
- [20] 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- JIN Jianming. Finite element method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998.
- 吴 昊(1985—), 男, 本科, 研究方向为中压设备相关产品研发(E-mail:wuhao1619@163.com)。