

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.019

轨道交通接触网停电作业接触式验电器仿真研究

刘家¹, 杨一航¹, 符冠雄¹, 刘斌¹, 马明超²

(1. 中铁电气化局集团西安电气化工程有限公司, 西安 710000; 2. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710054)

摘要: 在轨道交通中,接触式验电器用于接触网停电作业中检测接触网是否停电,以确保作业地线的正确操作和检修工作安全进行。接触电极作为接触式验电器的重要组成部分,直接影响验电信号的采集。为研究接触式验电器的接触电极结构对验电结果的影响,以 GSY-II 型 27.5 kV 交流验电器和 ZGD 型 1 500 V 直流验电器为例,分析了其工作原理,并仿真研究了接触电极形状和长度的改变对验电结果的影响。仿真结果表明:对于交流验电器,改变接触电极形状为圆钩型和 V 型,内部电路的感应信号电压分别变化了 3.1% 和 2.3%,该变化对验电结果影响较小;增加接触电极长度会提高感应信号电压,从而提高验电灵敏度。对于直流验电器,其接触电极形状和长度改变后,内部电路的信号电压保持不变,因此接触电极的形状和长度不影响验电结果。仿真结果为设计和优化验电器结构提供了参考依据。

关键词: 接触网停电作业; 接触式验电器; 接触电极; 信号电压

Simulation Research on Contact-type Tester for Power Outage Operation of Contact Network in Rail Transit

LIU Jia¹, YANG Yihang¹, FU Guanxiong¹, LIU Bin¹, MA Mingchao²

(1. China Railway Electrification Bureau Group Xi'an Electrification Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In rail transit, contact-type tester is used to detect the power outage condition of the contact network in the power outage operation of the contact network so to assure the correct operation and safe maintenance of the ground wire. The contact electrode, as an important component of contact-type tester, affects directly the collection of electrical testing signals. For studying the influence of the contact electrode structure on the results of the contact-type tester, type GSY-II 27.5 kV AC tester and type ZGD 1 500 V DC tester are taken as examples, their working principles are analyzed, and the influence of variation of shape and length of the contact electrodes on the inspection results is simulated and studied. The simulation results show that for AC tester, the shape of the contact electrode is changed into round hood type and V shape, the variation of voltage of induction signal of the internal circuit is 3.1% and 2.3% respectively, and the influence of such variation on the inspection result is less; While, the length increase of the contact electrode improves induction signal voltage and thus enhances the test sensitivity. For the DC tester, in case of variation of shape and length of its contact electrode, the signal voltage of internal circuit remains unchanged, therefore the shape and length of the contact electrode will not affect the inspection result. The simulation results provide a reference for the design and optimization of the structure of the inspection device.

Keywords: power outage operation of contact network; contact-type inspection device; contact electrode; signal voltage

收稿日期:2024-03-21

基金项目:国家自然科学基金(52077176);中铁电气化局集团西安电气化工程有限公司重点项目(2023-82)。

0 引言

在轨道交通系统中,接触网是供电系统的关键组成部分,而接触网停电作业是确保轨道交通系统运行安全和可靠的重要措施^[1-4]。接触网停电作业中验电器用于检测接触网是否停电,以确保作业地线的正确操作和检修工作的安全进行^[5-8]。接触式验电器具有检测快速、使用方便等优点,因此被广泛用于接触网停电作业。验电过程中,检修人员需要将接触式验电器的接触电极直接与接触线接触,以确保准确测量电压值。验电器通过声光报警的方式,将对接触网的验电结果及时反映给检修人员^[9-14]。

验电器作为接触网停电作业中必不可少的工具,其检测接触网是否停电的准确性直接关系到作业地线和检修作业的安全性。为此许多学者对验电准确性的影响因素进行了研究^[15-20],如文献[18]分析了电容型交流验电器对220 kV输电线路验电时,导线分裂数、验电角度和接触电极长度等因素对验电结果影响。文献[19]研究了接触网中不同验电位置对电容型交流验电器的灵敏度影响,而文献[20]考虑了电场分布和起动电压等因素对电容型交流验电器验电盲区的影响。接触电极作为接触式验电器的重要组成部分,直接影响着验电信号的采集。然而,目前有关接触式验电器的接触电极结构对验电结果的影响研究较少。因此,研究接触网停电作业中接触式验电器的接触电极结构对验电结果的影响是非常必要的。

本文以GSY-II型27.5 kV交流验电器和ZGD型1500 V直流验电器为例,分析其工作原理和确定最小启动信号电压。其次,采用COMSOL对接触线和验电器进行建模仿真,计算在接触网停电作业中接触式验电器接触电极形状和长度改变后内部电路的信号电压。最后,将接触式验电器的最小启动信号电压与内部电路的信号电压进行计算比较,以分析接触电极形状和长度对验电结果的影响。

1 接触式验电器工作原理

1.1 交流验电器工作原理

对交流接触网验电时,通过将交流验电器的接触电极与接触线接触,使接触线与验电器、绝缘杆、人体和大地之间形成通路。接触线和验电器地之间存在杂散电容 C_1 ,验电器地和大地之间存在杂散电容 C_2 。验电器地通过导线与压控喇叭的底部铜

片相连,底部铜片将验电器地引出,因此将 C_1 简化为接触线与底部铜片之间的杂散电容, C_2 简化为底部铜片与大地之间的杂散电容^[21-22]。

交流验电器的验电原理是基于杂散电容的分压作用来实现的,杂散电容分压原理图见下图1。

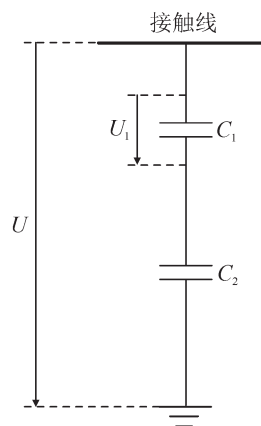


图1 分压示意图

Fig. 1 Schematic diagram of voltage division

将接触线理想化为无限长直导线,杂散电容 C_1 、 C_2 由下式^[21-22]算出:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{l}{a} - \frac{1}{R}} \quad (1)$$

$$C_2 = 2\pi\epsilon_0 R \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为空气介电常数; l 为铜片与接触线间的距离; a 为接触线截面的等效半径; R 为底部铜片半径。

当接触线电压为 U 时,验电器所承受的电压即为杂散电容 C_1 所分电压 U_1 ,计算公式为^[21-22]

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U \quad (3)$$

以GSY-II型27.5 kV交流验电器为例,在Multisim中搭建其内部电路仿真图^[23-24]见图2,由限流电路、放大电路、滤波电路、振荡电路、声光报警电路和自检电路构成。当对接触网验电时,验电器的限流电路在接触线上电压的作用下产生一个微小电流。当电流达到一定阈值后,三极管 Q_1 导通。随后微小电流经过放大电路放大,再经过滤波电路处理转换为一个驱动信号。该驱动信号经过振荡电路产生特定频率的矩形方波信号,驱动声光报警电路工作。自检电路用来校验验电器是否处于正常工作状态。仿真电路中电容 C_4 为杂散电容 C_1 ,经公式(1)计算得其为19.07 pF;交流电压源 V_1 是杂散电容 C_1 所分电压 U_1 ,作为内部电路的输入信号电压。当电压 U_1 大于验电器启动阈值,则验电器发出声光报警。

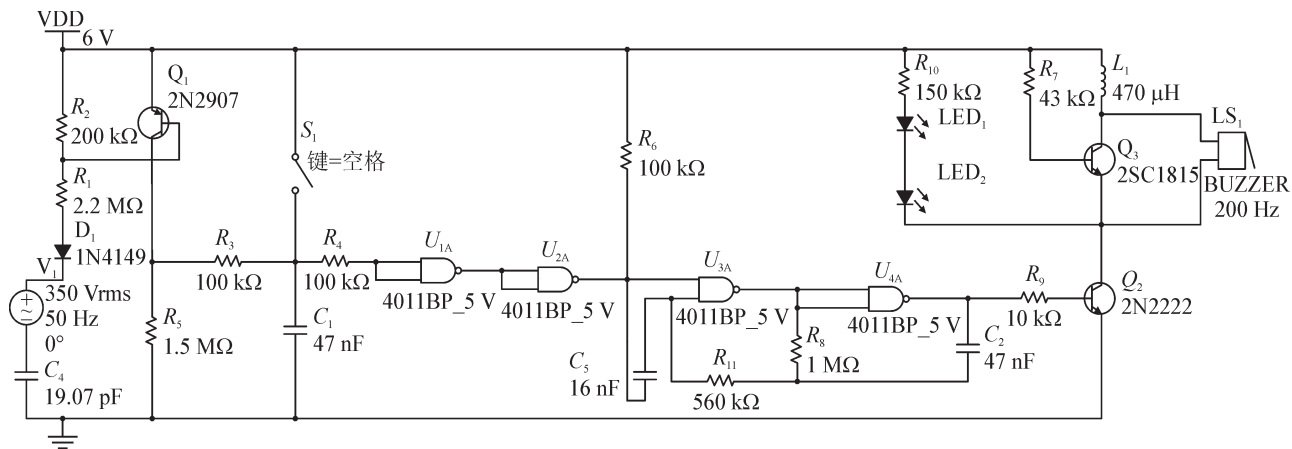


图2 GSY-II型27.5 kV交流验电器内部电路仿真图
Fig. 2 Internal circuit simulation diagram of type GSY-II 27.5 kV AC voltage tester

1.2 直流验电器工作原理

当对地铁直流接触网验电时,将直流验电器的接触电极与接触线接触,使接触线与验电器、绝缘杆中限流电阻和大地之间形成通路。

接触线上的直流电压经过验电器的接触电极引到内部电路输入信号端,验电器地通过导线连接到绝缘杆中限流电阻的一端,限流电阻的另一端经导线连接在地球上,其工作原理图如下图3所示。限流电阻的作用是限制回路中的电流,保证设备和人员的安全。同时,可将内部电路看作一个电阻,该电阻与限流电阻串联对直流电压分压,并将内部电路所分电压作为内部电路的信号电压。

以ZGD型1 500 V直流验电器为例,其内部电路与交流验电器相似,包括限流电路、放大电路、滤波电路、声光报警电路和自检电路^[23-24]。但直流验电器内部电路还包括整流电路,用于确保电压检测的稳定性。在Multisim中搭建直流验电器电路仿真图4,包括其内部电路和绝缘杆中的限流电阻

R_{12} 。其中直流电压源 V_2 为接触线电压,示波器的读数为内部电路所分的信号电压。当接触线电压足够大时,使内部电路所分的信号电压大于验电器启动阈值,则验电器进行声光报警。

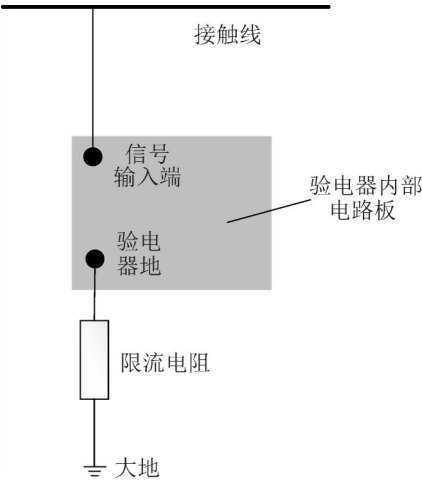


图3 直流验电器工作原理图
Fig. 3 Operation principle diagram of DC tester

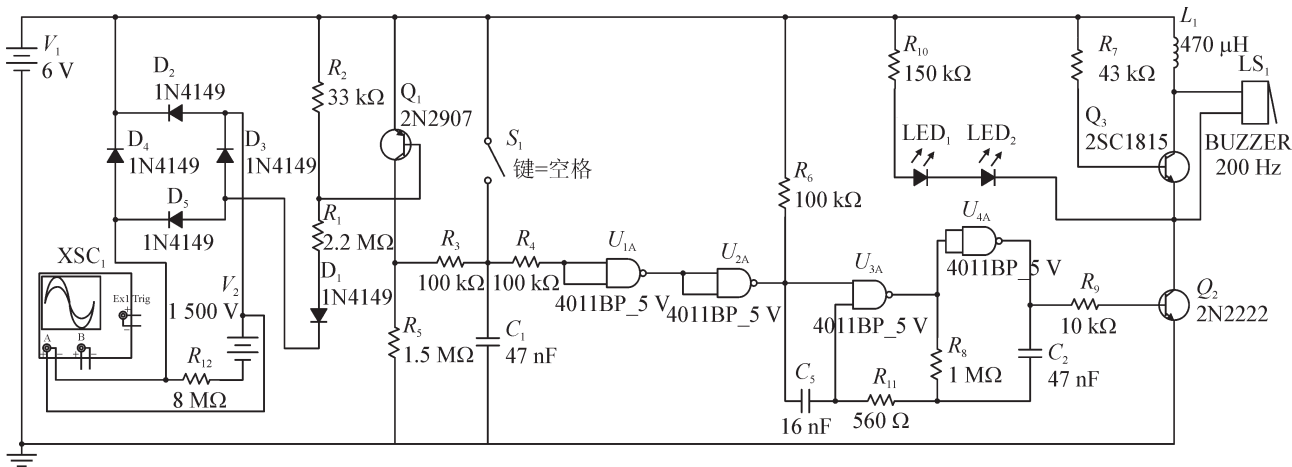


图4 ZGD型1 500 V直流验电器电路仿真图
Fig. 4 Circuit simulation diagram of ZGD 1 500 V DC tester

2 验电器的最小启动信号电压分析

2.1 交流验电器的最小启动信号电压

基于交流验电器的电路仿真图 2,确定交流验电器的最小启动信号电压。当交流电压源 V_1 的大小恰好能使验电器报警时,此时 V_1 值为验电器最小启动信号电压^[19]。

经过仿真可得,当验电器刚好启动声光报警所需的最小信号电压为 350 V,所以确定了验电器的最小启动信号电压为 350 V,该值为后续改变接触电极结构对验电结果的影响分析提供参考依据。

2.2 直流验电器的最小启动信号电压

基于直流验电器的电路仿真图 4,改变直流电压源 V_1 来确定验电器内部电路的最小启动信号电压。经过仿真可得,当直流电压源 V_1 为 150 V,示波器的读数为 34 V 时,验电器刚好启动声光报警,所以确定了直流验电器的启动电压为 150 V,内部电路的最小启动信号电压约为 34 V,该值为后续改变接触电极结构对验电结果的影响分析提供参考依据。

3 仿真分析

为分析在接触网停电作业中接触式验电器的接触电极结构对验电结果的影响,将验电对象简化为单根接触线,并在 GSY-II 型 27.5 kV 交流验电器和 ZGD 型 1 500 V 直流验电器的基础上,改变接触电极的形状和长度进行仿真研究。因此在 COMSOL 仿真软件中搭建接触线和验电器模型,其中接触线截面理想化为圆形,材料设置为铜。

3.1 交流验电器仿真分析

以 27.5 kV 交流接触网为例,简化为单根接触线。在仿真软件中建立接触线模型,设置接触线距轨面高度为 6 000 mm,对地电势额定值为 2.5×10^4 V。对交流验电器内部简化后,建立其模型见图 5,验电器内部中接触电极的下端与内部电路板上的焊接点 A 连接;位于内部电路板两侧的平板铜线与压控喇叭的底部铜片连接,形成等电势体 B^[19,26]。

设置 GSY-II 型 27.5 kV 交流验电器模型的接触电极为钢,相对介电常数为 1;其电路板和验电器封装外壳材料为塑料,相对介电常数为 2.6;绝缘杆材料为环氧树脂,相对介电常数为 4.2^[25-26]。

当交流验电器验电时,焊接点 A 与等电势体 B 间形成的电势差(感应信号电压 U_{AB})构成验电器内部电路的输入信号, U_{AB} 与验电器所处的空间电场分布有关。

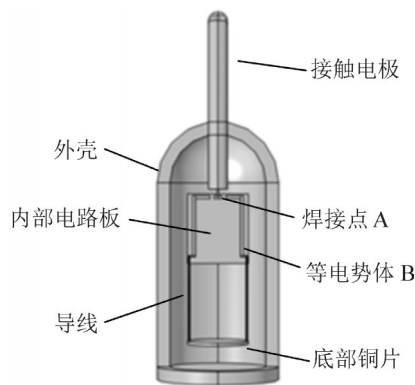
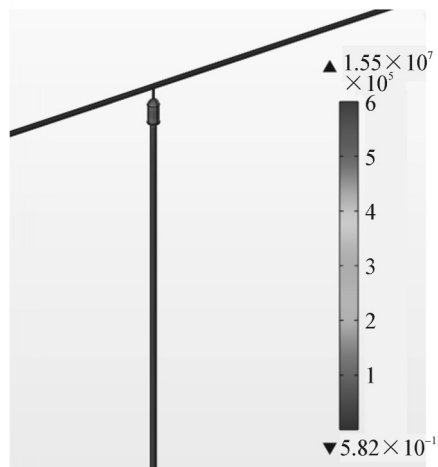


图5 交流验电器内部结构图
Fig. 5 Internal structure diagram of AC tester

在进行验电操作时,假设验电器绝缘杆垂直向上,使接触电极垂直向上接触接触线。通过建模仿真得验电器周围电势及电场强度分布图见图 6 所示。



(a) 电势分布图



(b) 电场分布图

图6 验电器周围电势及电场分布图
Fig. 6 Electric potential and electric Field distribution diagram around the tester

由图 6 可知,验电器接触电极的电势与接触线电势基本相同,电势沿着验电器绝缘杆向下逐渐减

小。接触电极附近电场强度较高。

验电器内部电势及电场分布图见图 7, 验电器内部电势从接触电极下端到验电器底部逐渐降低, PCB 板两侧铜线与验电器下方压控喇叭的底部铜片等电势; 接触电极端部周围电场强度较大。经过仿真计算, 内部电路的感应信号电压 $U_{AB} = 1\,213\text{ V}(>350\text{ V})$, 验电器正常报警。

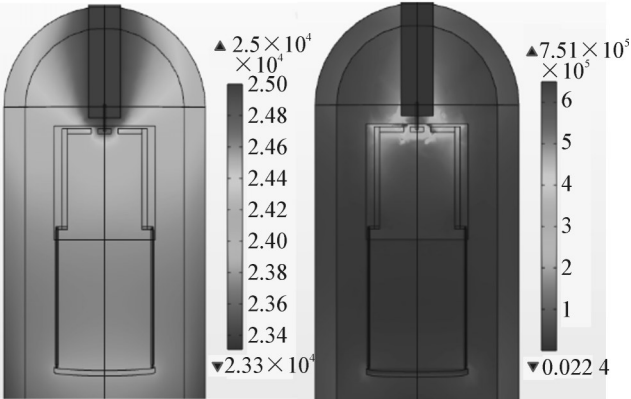


图 7 验电器内部电势及电场分布图
Fig. 7 Internal electric potential and electric field distribution diagram of the tester

3.1.1 不同接触电极形状的验电仿真

保持验电器的内部参数不变, 将接触电极由原来的探针形状改为圆钩型和 V 型见图 8, 分别进行仿真。

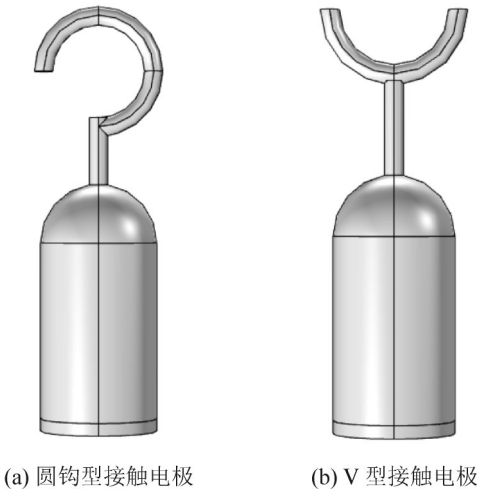


图 8 不同形状的接触电极
Fig. 8 The contact electrodes of different shapes

1) 圆钩型接触电极

改变接触电极形状为圆钩型, 保持接触线与验电器地间的距离保持不变。经仿真计算, 圆钩型接触电极验电器内部电势及电场强度分布图见图 9。

由上图 9 可知, 验电器的内部电势电场分布特点与图 7 相同, 只是数值上存在差异。经过仿真计算, 内部电路的感应信号电压 $U_{AB} = 1\,250\text{ V}(>350\text{ V})$,

验电器正常报警。相较于原接触电极, 感应信号电压 U_{AB} 提高了 3.1%。

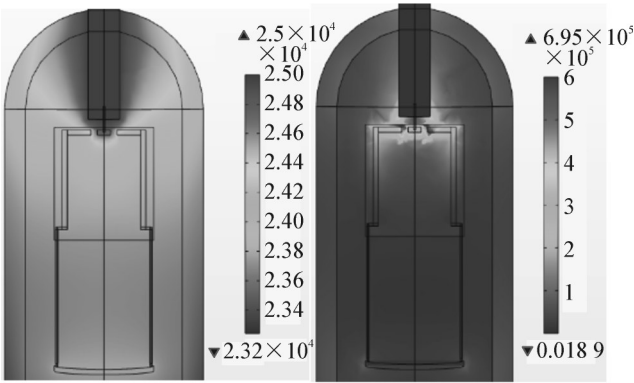


图 9 圆钩型接触电极验电器内部电势及电场分布图
Fig. 9 Internal electric potential and electric field distribution diagram of the tester

2) V 型接触电极

改变接触电极形状为 V 型, 保持接触线与验电器地间的距离保持不变。经仿真计算得, V 型接触电极验电器内部电势及电场强度分布图见图 10。

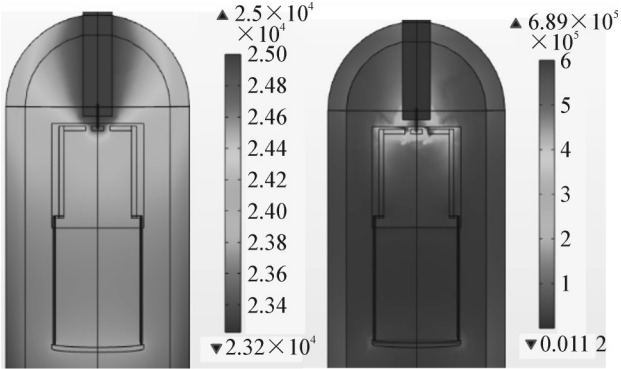


图 10 V 型接触电极验电器内部电势及电场分布图
Fig. 10 Internal electric potential and electric field distribution diagram of the tester

验电器的内部电势电场分布特点与图 7 相同, 只是数值上存在差异。经过仿真计算, 内部电路感应信号电压 $U_{AB} = 1\,240\text{ V}(>350\text{ V})$, 验电器报警; 相较于原接触电极, 感应信号电压 U_{AB} 提高了 2.3%。

在 3 种不同形状的接触电极中, 圆钩形状接触电极对应验电器内部电路的感应信号电压较大, 相较于原接触电极, 感应信号电压提高了 3.1%。通过改变验电器的接触电极形状, 使接触电极周围电场强度变化, 进而影响验电器周围的电场分布, 导致感应信号电压 U_{AB} 的变化, 但电压变化均较小。

3.1.2 不同接触电极长度的验电仿真

保持验电器的原接触电极形状不变, 在原接触电极长度为 55 mm 的基础上分别增加 30、60、90、120 和 150 mm 的延长段后, 接触电极长度变为 85、

115、145、175 和 205 mm。再经过仿真计算得,验电器的内部电势电场分布特点与图 7 相同,只是数值上存在差异。不同长度的接触电极下验电器内部电路的感应信号电压见表 1。

表 1 不同长度接触电极下内部电路的感应信号电压
Table 1 Induced signal voltage of internal circuits under contact electrodes with different lengths

接触电极长度/mm	感应信号电压/V
55	1 213
85	1 334
115	1 501
145	1 585
175	1 768
205	1 837

由表 1 可知,随着接触电极长度的增加,验电器的感应信号电压 U_{AB} 增大,且感应信号电压均大于最小启动信号电压,验电器均能正常报警。由于验电器的接触电极变长,使验电器周围的电场畸变增强,同时导致验电器轴向电势梯度增加,增加了感应信号电压 U_{AB} ,从而提高了验电灵敏度。

3.2 直流验电器仿真分析

以 1 500 V 直流接触网为例,简化其为单根接触线。在仿真中建立接触线模型,设置接触线距轨面高度为 4 600 mm,其对地电势为直流 1.5×10^3 V。

ZGD 型直流验电器和 GSY-II 型交流验电器的内部结构相似,但直流验电器内部的压片喇叭只起到声音警报使用,所以在对直流验电器建模时可忽略压片喇叭。简化后直流验电器的内部结构见图 11,接触电极下端与内部电路板上的焊接点 A 连接,即点 A 为内部电路的信号输入端。内部电路板两侧的平板铜线为验电器地 $B^{[26]}$ 。点 A 与验电器地 B 间形成的电势差构成验电器内部电路的信号电压 U_{AB} 。

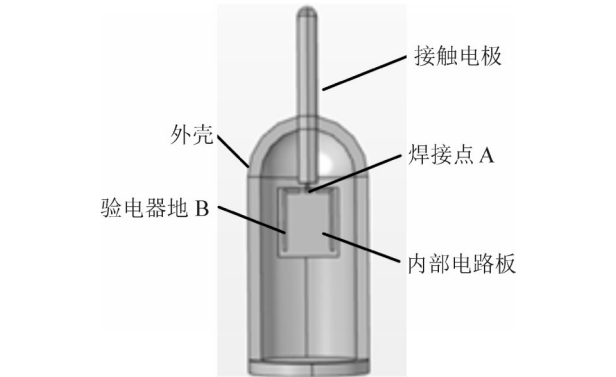
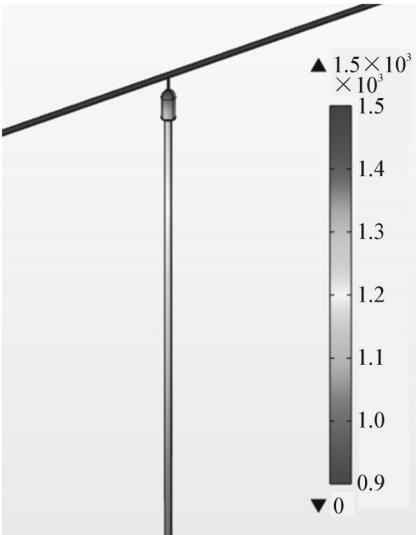


图 11 直流验电器内部结构图
Fig. 11 Internal structure diagram of DC tester

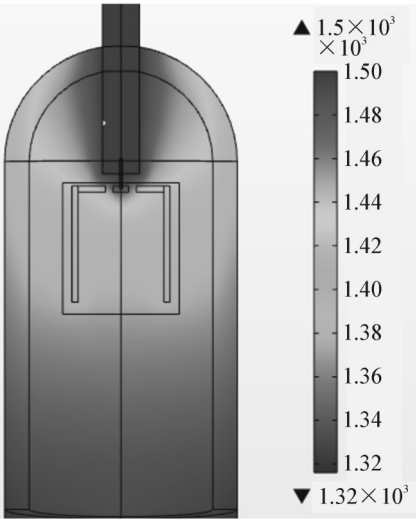
信号电压 U_{AB} 实际上是内部电路与限流电阻

R_{12} 对点 A 对地电势分压而来的,因此通过仿真计算内部电路中点 A 对地电势,再根据直流验电器电路仿真图可计算出内部电路的信号电压 U_{AB} 大小。最后将信号电压 U_{AB} 与验电器的最小启动信号电压进行比较,来判断验电器是否能正常报警。

设置直流验电器模型的材料与交流验电器相同。在进行验电操作时,假设验电器绝缘杆垂直向上,使接触电极垂直向上接触接触线。再通过建模仿真得,验电器周围和内部电势分布图见图 12。



(a) 验电器周围电势分布图



(b) 验电器内部电势分布图

图 12 直流验电器周围及内部电势分布图
Fig. 12 Electric potential distribution diagram around and inside the tester

由图 12 可知,电势沿着验电器绝缘杆向下逐渐降低。由于接触电极与内部电路板上焊点 A 连接,点 A 对地电势与接触线基本相同。经过仿真计算可得,点 A 对地电势具体为 1 499.966 V。基于直流验电器电路仿真图 5 可得,内部电路的信号电

压 U_{AB} 为 101.065 V (>34 V), 验电器正常报警。

3.2.1 不同接触电极形状的验电仿真

保持验电器内部电路参数不变, 将接触电极由原来的探针形状改为圆钩型和 V 型如图 8 所示, 分别进行仿真。

改变接触电极形状后验电器的内部电势图分布特点和图 12 相同, 但具体数值不同。不同形状接触电极的验电器内部电热分布图见图 13。

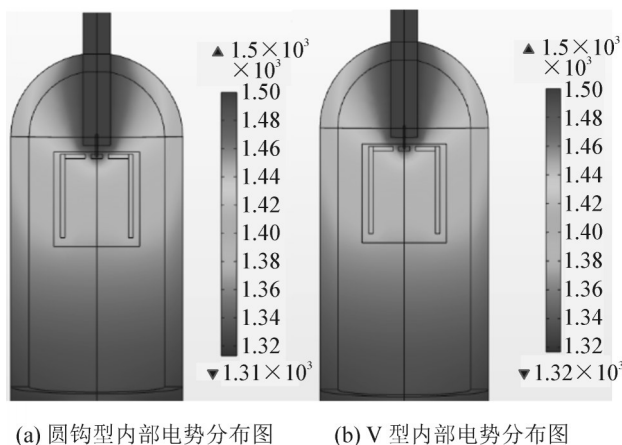


图 13 不同形状接触电极的验电器内部电势分布图
Fig. 13 Internal potential distribution diagram of the tester under different electrode shapes

经仿真计算, 验电器接触电极为圆钩型和 V 型时, 点 A 的对地电势分别为 1 499.964 V 和 1 499.967 V, 信号电压 U_{AB} 均为 101.065 V (>34 V), 验电器均可以正常报警。

改变验电器接触电极形状后, 验电器内部电路的点 A 对地电势变化, 但电势偏差远小于 0.01%。通过电路仿真图 5 计算后内部电路的信号电压 U_{AB} 均保持不变, 因此改变验电器的接触电极形状不影响验电结果。

3.2.2 不同接触电极长度的验电仿真

保持验电器的接触电极形状不变, 在原接触电极长度为 55 mm 的基础上分别增加 30、60、90、120、150 mm 长度并进行建模仿真。经过仿真分析得到, 不同长度的接触电极与验电器内部电路的点 A 对地电势关系图见图 14。

由图 14 可知, 随着接触电极长度增加, 内部电路上的点 A 对地电势逐渐减小, 但电势偏差远小于 0.01%。再通过电路仿真图 5 计算得不同长度的接触电极下, 内部电路的信号电压 U_{AB} 均为 101.65 V (>34 V), 验电器均可正常报警, 所以改变接触电极长度不影响验电器的验电结果。

由于改变直流验电器接触电极的形状和长度, 导致接触电极自身阻值的变化, 进而影响内部电路

中与接触电极相连接的点 A 对地电势。然而, 接触电极材料的电导率较高, 导致点 A 对地电势只有微小的变化, 对验电结果的影响可忽略不计。因此, 改变接触电极的形状和长度均不影响直流验电器的验电结果。

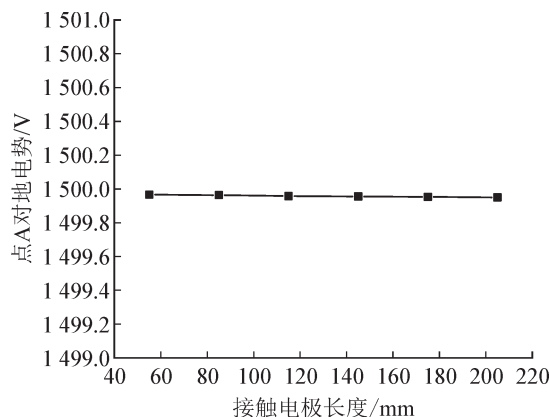


图 14 接触电极长度与点 A 对地电势关系图
Fig. 14 Diagram of the length of the contact electrode and the potential of point A to the ground

4 结语

本文通过仿真分析了接触网停电作业中接触式验电器不同形状和长度的接触电极对验电结果的影响, 得出以下结论:

1) 对于接触式交流验电器, 将接触电极形状改变为圆钩型和 V 型后, 相较于原接触电极, 验电器内部电路的感应信号电压分别变化了 3.1% 和 2.3%, 该变化对验电结果影响较小; 内部电路的感应信号电压随接触电极的长度增加而增加, 因此增加接触电极的长度可以提高验电灵敏度。在验电器的结构设计和优化时, 可以适当增加接触电极的长度, 以提高验电灵敏度;

2) 对于接触式直流验电器, 改变其接触电极的形状和长度后, 内部电路的点 A 对地电势偏差均远小于 0.01%, 该偏差不改变内部电路的信号电压, 说明改变接触电极的形状和长度均不影响验电结果。因此在验电器的结构设计和优化时, 可以结合实际使用情况改变接触电极的结构和长度, 使检修人员更方便、更安全地进行验电操作。

参考文献

- [1] 吕鸿伟. 关于京沪铁路接触网专业验电死区问题的探讨[J]. 电气化铁道, 2023, 34(z2): 96-98.
LYU Hongwei. Discussion on the dead Zone problem of overhead contact line inspection in the Beijing-Shanghai railway[J]. Electric Railway, 2023, 34(z2): 96-98.
- [2] 张正轮. 城市轨道交通运营期施工安全风险控制方法研

- 究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2021.
- [3] 陈青松. 浅谈铁路接触网的特点及其改进与保护[J]. 黑龙江科技信息,2011(15):27.
CHEN Qingsong. A brief discussion on the characteristics, improvement, and protection of railway overhead contact system[J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2011(15): 27.
- [4] ANGELOV J, VULETI J, A KOVSKI R, et al. An extension in cable modeling for grounding system analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(6): 5086-5094.
- [5] 卢文忠. 浅谈电气化铁路接触网的维护与检修[J]. 内蒙古煤炭经济,2010(4):109-110.
LU Wenzhong. Elementary discussion of maintenance and repairing of electric railway contact net[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2010(4): 109-110.
- [6] 刘家军,刘俊玲,杨瀚鹏. 基于ID3决策树算法接触网检修方案的研究[J]. 电气工程学报,2020,15(2):78-84.
LIU Jiajun, LIU Junling, YANG Hanpeng. Research on overhead contact line maintenance scheme based on ID3 decision tree algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering,2020,15(2): 78-84.
- [7] 李想. 接触网可视化接地管理系统在城市轨道交通中的应用探讨[J]. 电气化铁道,2020,31(1):57-59.
LI Xiang. Application exploration of overhead contact line visualization grounding management system in urban rail transit[J]. Electric Railway,2020,31(1): 57-59.
- [8] 张甜. 接触网检修作业防误挂接地线监测装置的研制[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [9] 帅伟,郑秋玮,刘庭,等. 特高压交流线路非接触式验电器研制与应用[J]. 高电压技术,2023,49(S1):169-173.
SHUAI Wei, ZHENG Qiuwei, LIU Ting, et al. Development and application of non-contact voltage detector for extra-high voltage AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2023,49(S1): 169-173.
- [10] 王宁,宋佳敏,闫振宏,等. 多电压等级非接触式验电器设计[J]. 电机与控制学报,2023,27(2):89-97.
WANG Ning, SONG Jiamin, YAN Zhenhong, et al. Design on non-contact electroscop with multiple voltage levels[J]. Electric Machines and Control,2023,27(2): 89-97.
- [11] 秦梓轩. 接触网停电检修作业中接地线接地状态检测与地线作业人员可穿戴装置研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [12] 于惠钧,江志辉,肖宇韬. 基于机器人的智能检测接触网验电器的设计[J]. 工业控制计算机,2022,35(12):159-162.
YU Huijun, JIANG Zhihui, XIAO Yutao. Design of catenary electroscop for intelligent detection based on robot[J]. Industrial Control Computer,2022,35(12): 159-162.
- [13] LIU Jiajun, HAN Sidan. Research on hanging grounding wire device with integrated electroscop and grounding[C]//2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). [S. l.]: IEEE,2019: 195-199.
- [14] VOLOKHOVSKII V Y, VORONTSOV A N, SUKHORUKOV D V, et al. Magnetic nondestructive testing as an effective instrument for monitoring conductors and ground wires of overhead transmission lines[J]. Power Technology and Engineering,2020,54(2): 242-249.
- [15] 杜杰,杨宽,黄超. 直流1 500 V 验电器检测方法探讨[J]. 中国计量,2023(10):117-119.
DU Jie, YANG Kuan, HUANG Chao. Discussion on testing methods for 1 500 V DC voltage detectors[J]. China Metrology,2023(10): 117-119.
- [16] HAO Sun, ZHANG Wenbin, YANG Guang. DC high voltage electricity inspection device based on vibration capacitance sensor[J]. Ferroelectrics,2019,548(1): 150-164.
- [17] 马雷,白家琨. 27.5 kV 电容型高压验电器验电死区问题探讨[J]. 电气化铁道,2013,24(4):14-15.
MA Lei, BAI Jiakun. Discussion on the dead zone problem of 27.5 kV capacitive high-voltage tester[J]. Electric Railway,2013,24(4): 14-15.
- [18] 雷兴列,潘巍巍,胡礼军,等. 电容型验电器影响因素研究[J]. 高压电器,2019,55(1):203-208.
LEI Xinglie, PAN Weiwei, HU Lijun, et al. Study on the influence factors of capacitive electroscop[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(1): 203-208.
- [19] 刘家军,高浩博,韩思丹. 接触网中验电位置对电容型验电器灵敏度的影响研究[J]. 电气工程学报,2021,16(3):177-183.
LIU Jiajun, GAO Haobo, HAN Sidan. Study on the influence of the position of electroscop on the sensitivity of capacitive electroscop in catenary[J]. Journal of Electrical Engineering,2021,16(3): 177-183.
- [20] 李禾,邓志祥,王闯等. 电容型验电器验电盲区问题的研究[J]. 电器与能效管理技术,2014(15):10-13.
LI He, DENG Zhixiang, WANG Chuang, et al. Research on the dead zone problem of capacitive voltage tester [J]. Electrical and Energy Management Technology,2014(15): 10-13.
- [21] 刘云华. 10 kV 组合式验电器的设计与实现[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [21] 宋佳. 接触网电压无地线测量装置的研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [22] 朱东良,顾燕苏,危凯琪,等. 35 kV 电容型验电器启动电压试验仿真与分析[J]. 电力安全技术,2022,24(9):66-69.
ZHU Dongliang, GU Yansu, WEI Kaiqi, et al. Simulation and analysis on starting voltage test of 35 kV capacitive

electroscope[J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(9): 66-69.

[23]江孝琪. 整备作业接触网残压检测系统的研究与实现[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.

[25]王宁,刘云华,闫振宏,等. 新型组合式验电器的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):164-170. WANG Ning, LIU Yunhua, YAN Zhenhong, et al. Design and implementation of a novel composite type verification device [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19):164-170.

[26]李姗姗. 220 kV 电容型高压验电器启动电压特性研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.

作者简介:

刘家(1984—),男,高级工程师,主要从事地铁运营管理工作。

杨一航(1993—),男,工程师,主要从事地铁维护与技术管理工作。

符冠雄(1998—),男,助理工程师,主要从事地铁运营与维护工作。

刘斌(1993—),男,高级技师,主要从事地铁运营与维护工作。

马明超(2000—),男,硕士研究生,主要从事电力系统测量与控制工作。E-mail:1131960521@qq.com。