

电力机车车顶绝缘子电场计算

陈昌龙, 王黎明

(清华大学深圳研究生院能源电工实验室, 深圳 518055)

摘要: 在车顶绝缘子闪络事故中, 由于绝缘子覆冰而导致的闪络事故占很大比例。如何才能有效地减少车顶绝缘子上覆冰的形成, 提高绝缘子覆冰闪络电压, 已经成为华北地区电气化铁路急需解决的难题。针对车顶绝缘子冰闪事故的实际发生情况, 采用绝缘子表面部分涂覆半导体涂层的组合绝缘子设计方案。笔者利用有限元电场分析方法, 分析了半导体涂料涂覆长度和位置对于电场分布的影响情况, 得出了半导体涂料涂覆的优化配置方案。

关键词: 车顶绝缘子; 闪络; 覆冰; 半导体涂层; 电场计算

中图分类号: TM216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2011)01-0053-05

Electric Field Calculation for Electric Locomotive Roof Insulator

CHEN Chang-long, WANG Li-ming

(Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In all these flashover accidents, the reason that caused by ice accumulation covered a large proportion. How to effectively reduce the forming of ice on roof insulator used in electric locomotive and improve the flashover characteristic of icing insulator, has become a serious problem that urgently needs to be addressed in electric railway in North China. In connection with actual situation of the ice coating flashover on roof insulator, we adopted the design of combination insulator that partial surface was covered with semi-conducting glaze. Electric field around the insulator surface with changing of the position and length of semi-conducting glaze was calculated by finite element method. In the end, the optimization coating design of the semi-conducting glaze was given and coated on the roof insulator surface.

Key words: roof insulator; flashover; ice accumulation; semi-conducting glaze; electric field calculation

0 引言

电力机车车顶绝缘子, 包括导电杆支持绝缘子和受电弓支撑绝缘子, 是电力机车的主要绝缘设备之一, 其可靠性直接关系着电气化铁路的正常运行。随着中国铁路的跨越式发展, 电气化铁路日益增多, 电力机车运行速度不断提高。电力机车车顶绝缘子已经成为影响电气化铁路安全稳定运行的重要因素^[1]。

从 1996 年起, 铁路运输部门在韶山、8G、8K 等多种电力牵引机车(包括货运列车和客运列车)上使用 DG 系列硅橡胶复合绝缘子, 在解决污闪问题上取得了很好的效果^[2], 硅橡胶材料本身具有优异的

憎水性和憎水迁移性, 使得硅橡胶绝缘子拥有优异的污秽闪络特性, 且日常运行的时候无需进行清洗维护。但在实际运行过程中, DG 系列的硅橡胶复合绝缘子虽然可以运行于污秽程度比较严重的地区而不发生污秽闪络, 但在温度较低的气候条件下, 遇到大雾、冻雨, 机车在高速运行中, 这种绝缘子表面也会结污冰过多而发生冰闪^[2]。对于复合绝缘子, 在冰闪电压上与电瓷绝缘子相比没有太多的优势, 冰闪问题仍然是一个有待解决的技术难题^[3]。

覆冰可以看成是一种特殊的污秽。其电场分布与染污绝缘子有一定的相似之处, 但覆冰的情况比污秽更为复杂, 冰棱的长度、冰棱与绝缘子间空气间隙对覆冰绝缘子的表面电场分布都有较大的影响,

覆冰绝缘子表面的电场分布和电位分布不仅与绝缘子结构、绝缘材料的介电常数以及周围等势体悬浮电位有关,还与覆冰、融冰水和污秽的电导率相关,覆冰绝缘子的电场分布比污秽绝缘子更为复杂^[4-5]。

从 20 世纪 50 年代开始,国外的研究者们对电力系统的覆冰问题进行了广泛的研究,对输电线路的覆冰过程、覆冰的类型情况以及绝缘子冰闪特性等方面进行了深入的研究,并得到了相应的研究成果^[6-8]。对于电力机车车顶绝缘子的研究,则主要集中在如何提高其绝缘能力及耐污特性^[9],在现有文献中,关于车顶绝缘子防覆冰技术的研究以及防覆冰绝缘子的研制较为稀少。

1 新型车顶绝缘子设计方案

新型车顶绝缘子采用热力除冰方法和被动除冰法相结合的设计方案。首先根据绝缘子的覆冰机理及流体力学特性,利用半导体涂层产生的热量,融化绝缘子表面的覆冰。

新型车顶绝缘子采用部分伞裙加涂半导体涂层的方法,以提高闪络性能。如果全部伞裙加涂半导体涂层,即采用半导体型车顶绝缘子,在日常运行的时候,绝缘子表面比环境温度高出 5℃ 左右,在雾天,产生热量将绝缘子表面烘干,阻止绝缘子的进一步湿润,形成较长的干区,有效地提高车顶绝缘子的闪络电压,但半导体涂层由于导通了电极两端,涂层内长期通过电流,产生热量,使得复合绝缘子的老化加速,寿命减短,且半导体涂层本身存在热不稳定性等缺点。

部分伞裙加涂半导体涂层的方法有效地避免了这些弊端,当日常运行的时候,绝缘子表面干燥,上下电极之间没有形成导通回路,半导体涂层内仅通过极小的表面电流,不产生热量。当运行于大雾、毛毛雨、凝露等湿润气候条件下时,绝缘子表面污层受潮,污层中的电解质溶解于水中,在绝缘子表面形成导电水膜,与半导体涂层一起形成导电通路,半导体涂层中持续通过电流,产生热量,阻止了绝缘子表面污层的进一步湿润,并在半导体涂层上形成干区,阻止电弧的发展,从而提高了闪络电压。

当电力机车通行于容易发生冰闪事故的区域时(即环境温度在 -3~3℃ 的地区),将未涂覆半导体涂层的伞裙用导线短接,此时新型绝缘子成为完整的半导体绝缘子,表面的半导体涂层与短接导线形成导电通路,产生热量,由于设计时采用的半导体涂料能有效地将绝缘子表面温度提高 5℃ 以上,因此当电力机车在车站中停留时,绝缘子表面的半导体涂

层中通过稳定的电流,产生热量,较快地烘干了融冰期的水膜,形成干区,从而有效地阻止了冰闪事故的发生。

2 车顶绝缘子电场分析模型

车顶绝缘子的 2D 模型忽略受电弓和接触网的影响,只针对绝缘子本身,计算绝缘子及周围相对较小范围内的电场分布,可以详细考虑绝缘子的细节,如绝缘子、金具和伞裙的形状。

车顶绝缘子的 2D 模型见图 1。建模时金具、芯棒和伞套的尺寸都参照实际的复合车顶绝缘子,需要特别考虑的 3 个问题:伞裙和金具弧形表面的建模、计算场域的大小和边界条件以及复合绝缘子各组成部分的相对介电常数值。由于外面的半导体涂层仅有 0.5 mm 厚,其高压端第 1 个大伞裙和第 1 个小伞裙之间涂覆半导体涂层后的局部放大图见图 2。车顶绝缘子的 3D 模型见图 3。

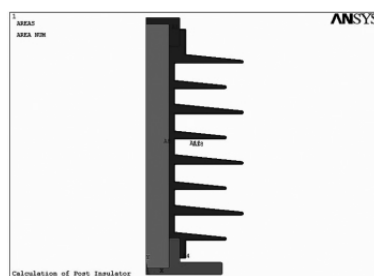


图 1 车顶绝缘子有限元 2D 模型

Fig.1 2D finite element module of roof insulator

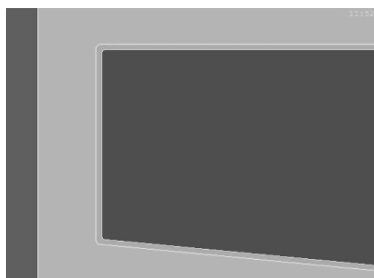


图 2 车顶绝缘子有限元 2D 模型局部放大图

Fig.2 Partially enlarging of the 2D finite element module of roof insulator

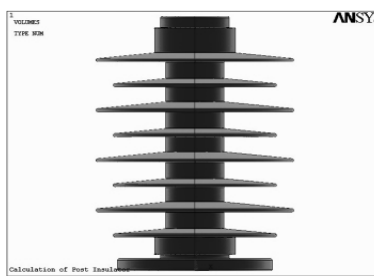


图 3 车顶绝缘子有限元 3D 模型

Fig.3 3D finite element module of roof insulator

对于复合绝缘子芯棒和伞套材料的电导率和介电常数,不同绝缘子的计算所取的数值随具体产品不同而略有差异,但总体上都是芯棒的介电常数大于伞套。不失一般性,笔者对复合绝缘子各组成部分介电常数和电导率的取值见表1。

表1 复合绝缘子各组成部分的材料属性

Tab.1 The property of material composing the composite insulator

材料	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
金具	3.8×10^7	40 000(虚拟大介电常数)
伞套	0	3.5
芯棒	0	5.0
半导体涂层	2.0×10^{-8}	81
空气	0	1.000 6

对于有限元模型,如果忽略伞裙尖端和金具尖端的圆角,将导致自适应算法在尖角处细化网格,在尖角处产生畸变电场,因此实际建立的有限元模型将伞裙上表面和下表面处理用弧度过渡,在伞裙尖端及根部、金具边缘均采用导角过渡。

对于边界元模型,将伞裙上表面和下表面处理成锥面,伞裙和金具尖端采用导角过渡,程序自动使用弧形边界单元进行求解计算,同时边界元的模型不需要指定场域的大小。

与边界元不同,有限元因为不能处理开域问题,所以必须指定求解场域的大小,同时特别处理边界条件。求解场域轴对称,仿真中对开场域问题的处理选用人工截断法,求解域长宽选为复合绝缘子结构高度的6倍,设置边界为轴对称/零电荷。

车顶绝缘子工作电压为25 kV工频交流,最大值为27.5 kV。因为工频电场的电压频率为50 Hz,比较低,且材料中出现了半导体涂料这样具有导电性的材料,故电场计算中没有采用静电场,而是用谐波准静态场进行计算。该仿真以结构高度为315 mm的车顶绝缘子为研究对象,采用ANSYS有限元计算软件进行仿真。

绝缘子具体技术参数见表2。

表2 计算模型参数

Tab.2 Parameter of calculated module

结构高度/mm	绝缘高度/mm	伞间距/mm	伞伸出/mm	爬电距离/mm	芯棒直径/mm	护套厚度/mm
315	265	62/31	85/60	≥1 300	54	6

该仿真主要针对使用半导体涂层后对于绝缘子沿面电位分布进行分析,用来指导半导体涂层的分布,并对其进行优化设计。

高压端加在车顶绝缘子上金具上,选择加压为27.5 kV,为接触网的最大电压,车顶绝缘子下金具以及整个区域的下表面加压为0,半导体涂层厚度为1 mm,通过比较涂层不同分布位置及长度,来比较其电场的畸变及对电压分布的影响,车顶绝缘子从上到下,按照伞裙的大小不同,定义为一大到四大,一小到四小。具体2D模型形式见图1。

3 不同长度半导体涂层对绝缘子电压分布的影响

半导体涂层为一个整段,分别位于高压端和低压端时,不同的半导体涂层长度对车顶绝缘子电压分布有不同的影响。下文中的图片和表格中,若无特殊说明,则伞裙从高压端向低压端开始进行编号,编号为1~8,编号0代表高压端金具,编号9代表低压端金具。

3.1 高压端半导体涂层长度对电压分布的影响

高压端涂覆半导体涂料,其不同长度对绝缘子表面电位分布的影响见图4。从图4中可以看出,只要高压端第1个伞裙涂覆半导体涂料之后,随着半导体涂料长度的增加,绝缘子表面电位分布的变化较小,但是与未涂覆半导体涂层的普通绝缘子相比,电位分布有明显的改善。其中绝缘子表面不涂半导体涂料的沿面电位分布见图5,绝缘子高压端第1个伞裙涂覆半导体涂料的沿面电位分布见图6。

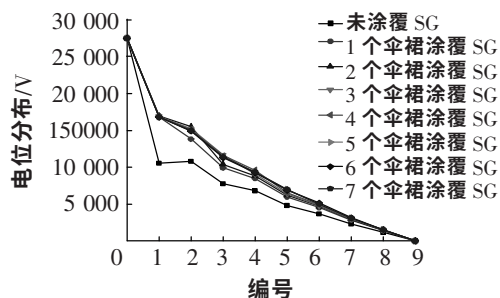


图4 高压端涂覆半导体涂料的电位分布

Fig.4 Potential distribution when high voltage terminal covered by semi-conducting glaze

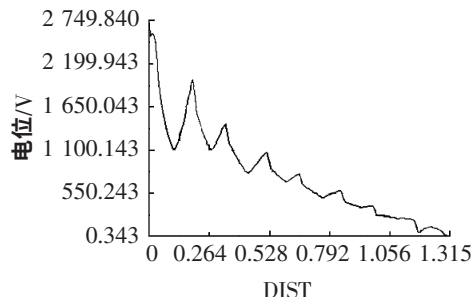


图5 不涂覆半导体涂料的绝缘子沿面电位分布

Fig.5 Potential distribution along insulator surface without semi-conducting glaze

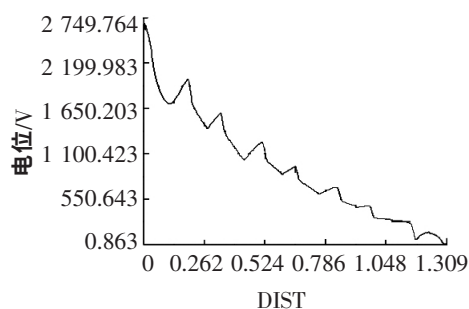


图 6 高压端第 1 个伞裙涂覆半导体涂料沿面电位分布

Fig.6 Potential distribution along insulator surface when the first skirts covered by semi-conducting glaze

3.2 低压端半导体涂层长度对电压分布的影响

低压端涂覆半导体涂料, 其不同长度对绝缘子表面电位分布的影响见图 7。从图 7 中可以看出, 随着半导体涂层长度的增加, 与未涂覆半导体涂层的普通绝缘子相比, 绝缘子表面电位分布的变化较小, 没有明显的改善。

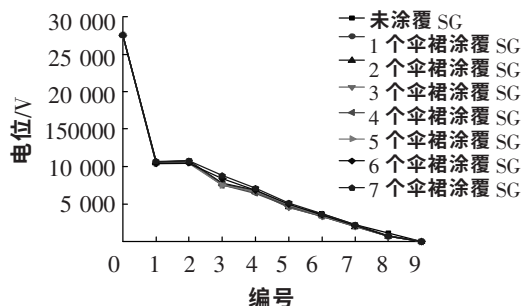


图 7 低压端涂覆半导体涂料的电位分布

Fig.7 Potential distribution when low voltage terminal covered by semi-conducting glaze

3.3 相同长度不同位置的半导体涂层对电压分布的影响

不同位置相同长度的半导体涂层产生的热量相同, 但是半导体涂层处于不同位置, 对绝缘子表面电位分布有着较大的影响。

半导体涂层仅为一大一小两个伞裙长度的情况见图 8。由图 8 可知, 高压端 1、2 两个伞裙涂覆半导体涂层与 1、4 伞裙涂覆半导体涂层的表面电位分布类似, 1、4 两个伞裙涂覆半导体涂层, 即高压端第 1 个大伞裙和第 2 个小伞裙分别涂覆半导体涂层, 其电位分布与高压端一大一小两个连续伞裙涂覆半导体涂层的电位分布类似。与之对应, 当 3、4 伞裙(即高压端二大二小两个连续伞裙)涂覆半导体涂层, 电位分布于前述两者相差较大。因此, 高压端第 1 个伞裙对绝缘子电位分布起主要作用, 当高压端第 1 个大伞裙涂覆半导体涂层时, 电位分布比之普通绝缘

子有了明显的改善, 当高压端第 1 个伞裙未涂覆半导体涂层时, 与普通绝缘子相比, 表面电位的分布改善较小。

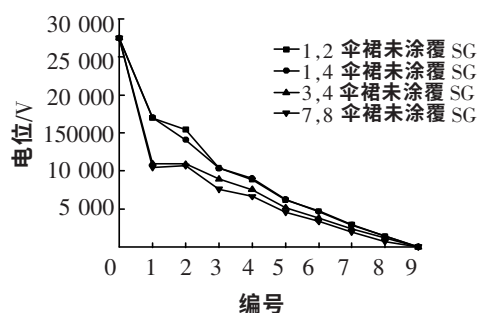


图 8 两个伞裙涂覆半导体涂料的绝缘子电位分布

Fig.8 Potential distribution when two skirts covered by semi-conducting glaze

当半导体涂层较长时, 以仅有一大一小两个伞裙未涂覆半导体涂层的情况为例, 其绝缘子表面电位分布情况见图 9。由图 9 可知, 当高压端第 1 个大伞裙涂覆半导体涂料时的 3 种情况下的绝缘子表面电位分布变化较小, 比之第 1 个大伞裙未涂覆半导体涂料的情况电位分布改善明显。

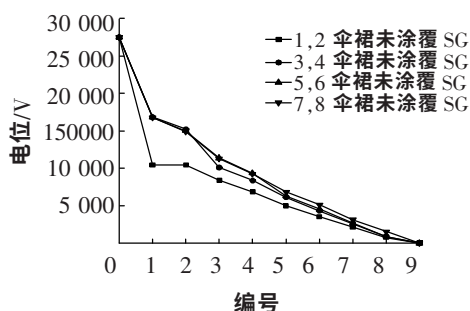


图 9 两个伞裙涂覆半导体涂料的绝缘子电位分布

Fig.9 Potential distribution when two skirts covered by semi-conducting glaze

4 结论

通过对不同长度、不同位置的半导体涂层分布下, 车顶绝缘子沿面电位分布进行了计算分析, 得出如下结论。

1) 由于复合车顶绝缘子的杂散电容的存在及硅橡胶材料较大的电阻率, 使得复合绝缘子沿面电位分布极不均匀, 其中车顶绝缘子沿面电位分布最不均匀的位置位于高压端第 1 层伞裙。

2) 高压端第 1 层伞裙涂覆半导体涂层后, 将大大改善了车顶绝缘子的沿面电位分布。

3) 在高压端第 1 层伞裙未涂覆半导体涂层的情况下, 低压端和中间各伞裙处涂覆半导体涂层对改

善绝缘子电压分布影响较小。

4) 不考虑高压端第 1 层伞裙涂覆半导体涂层的情况下, 其他各位置半导体釉层长度对改善绝缘子电压分布影响较小。

参考文献:

- [1] 周升. 高速电力机车车顶用有机复合绝缘子的研究与开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
ZHOU Sheng. The research and exploitation of polymeric composite insulators used in the roof of high speed electric locomotive[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [2] 俞明昌, 李凯, 关晓军. 电力机车车顶绝缘子耐污情况及提高耐污性能的措施[J]. 机车电传动, 2001(3): 47-50.
YU Ming-chang, LI Kai, GUAN Xiao-jun. Contaminant resistance of roof insulator for electric locomotive and countermeasures to improve[J]. Electric Drive for Locomotives, 2001(3): 47-50.
- [3] 蒋兴良, 杜轶, 林峰, 等. 持久性就地成型防污闪复合涂料对绝缘子覆冰及交流冰闪电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 71-75.
JIANG Xing-liang, DU Yuan, LIN Feng, et al. Effect of PRTV on insulator string's icing and its AC icing flashover voltage[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 71-75.
- [4] 杨庆. 覆冰绝缘子沿面电场特性和放电模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

- YANG Qing. Research on the surface electric field performance and the flashover model of ice-covered HV insulators[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [5] 邵进. 基于电场分布的覆冰合成绝缘子结构特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
SHAO Jin. Structural characteristics of iced composite insulator based on electric field distribution[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [6] FUJIMURA T. Performance of insulator covered with snow or ice[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1979, 98(5): 1621-1631.
- [7] CHERNEY E A. Flashover performance of artificially contaminated and iced long-rod transmission line insulator[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1982, 99(1): 46-52.
- [8] FARZANEH M, KIERNICKI J. Flashover performance of IEEE standard insulator under ice conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1602-1613.
- [9] DONGUK J, KEEJOE L, MOONSEOB H. Analysis of electric field distribution on the surface of polymer post insulator used in electric railway catenary system[C]// 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008: 752-755.

陈昌龙(1974—), 男, 博士后, 研究方向为高电压与绝缘技术、智能电网等交叉领域。

王黎明(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为高电压与绝缘技术以及电工与生命科学等交叉领域。

(上接第 52 页)

- [6] 邹丽丽, 孙才新, 陈维青, 等. 一种结构紧凑的场畸变型低电感的气体火花开关[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 50-52.
ZOU Li-li, SUN Cai-xin, CHEN Wei-qing, et al. Design of compact field distortion gas spark gap switch with low inductance[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 50-52.
- [7] 耿江海, 王平, 贾伯岩, 等. SF₆ 开关设备故障检测典型案例分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 103-106.
GENG Jiang-hai, WANG Ping, JIA Bo-yan, et al. Case of fault detection on SF₆ switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 103-106.
- [8] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的数学模型及其特性的研究综述[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 269-273.
LI Xing-wen, CHEN De-gui. Review of the investigations on the modeling and characteristics of air switching arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 269-273.
- [9] WILLIAMS P F, PETERKIN F E. Triggering in trigatron spark gaps: A fundamental study[J]. American Institute of Physics, 1989, 66(9): 4163-4175.
- [10] LECHIEN K R, GAHL J M. Investigation of a multi-channeling, multigap marx bank switch[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(1): 174-178.
- [11] 梁天学, 孙才新, 邱爱慈, 等. 200 kV 多级多通道火花

开关[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 56-58.

- LIANG Tian-xue, SUN Cai-xin, QIU Ai-ci, et al. Multi-gap multi-channel 200 kV gas spark switch for fast LTD[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 56-58.
- [12] SHIMONURA N, TAWA I, NAGATA M, et al. Numerical analysis of multichannel gap switch in pulsed power generators[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 1213-1215.
- [13] 李艳, 李胜利, 李劲. 场畸变火花开关电极优化设计及其触发特性[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 71-74.
LI Yan, LI Sheng-li, LI Jin. Electrode optimum design and experimental study of triggering feature of field distortion spark switch[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 71-74.
- [14] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 西安: 水利电力出版社, 1994.
QIU Yu-chang. GIS equipment and insulation technology[M]. Xi'an: China Water Power Press, 1994.
- [15] 中野义映. 高电压技术[M]. 张乔根, 译. 北京: 科学出版社, 2004.

王虎(1975—), 男, 博士, 主要研究场畸变气体开关电极烧蚀特性及寿命研究。