

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.12.026

动车组车顶绝缘子电场分布特性研究

张士宇¹, 王子建², 赵海波¹, 周 博¹, 郭英强¹

(1. 长春轨道客车股份有限公司技术中心, 长春 130062; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 动车组车顶绝缘子作为车顶的主要绝缘设备, 其可靠性直接影响动车组的正常运行。文中基于ANSYS有限元软件分析了车顶绝缘子结构对其电场分布的影响, 通过分析洁净状态下和水滴附着状态下绝缘子的电位和电场, 得到伞裙结构对绝缘子电场分布特性的影响。结果表明, 绝缘子顶部大小伞裙结构的不同配合方式会影响绝缘子的电场分布, 尤其水滴附着状态下, 绝缘子顶部采用大伞裙结构的会增加绝缘子电场强度, 随着电场强度的增加, 增加了绝缘子顶部发生局部放电的可能性。

关键词: 绝缘子; 电场; 局部放电

Research on the Electric Field Distribution of EMU Roof Insulators

ZHANG Shiyu¹, WANG Zijian², ZHAO Haibo¹, ZHOU Bo¹, GUO Yingqiang¹

(1. Technology Center of Changchun Railway Vehicle Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: EMU Roof Insulators as the main insulation equipment, its reliability direct influence normal operation of EMU. The paper analysis the influence of roof insulators structure on insulators electric field distribution by ANSYS finite element method software, by analysis the insulators electric field distribution with clean mode and separated globules on insulators mode, get influence of insulators structure on insulators electric field distribution. The results indicates that the insulators top with small or big shed have different electric field distribution, particularly, on insulators with separated globules mode, electric field intensity of insulators top with big shed is increased, with the increase of electric field intensity, increase the possibility of partial discharge.

Key words: insulator; electric field; partial discharge

0 引言

随着高速铁路的快速发展, 动车组安全可靠运行是车辆运营维护的重点。针对动车组车顶高压系统的研究也得到了人们的关注^[1-2]。动车组车顶绝缘子, 包括导电杆支撑绝缘子和受电弓支撑绝缘子, 是动车组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。动车组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^[3-4]。

车顶绝缘子会出现积污、闪络等问题, 影响行车安全, 这主要与绝缘子工作环境有关, 绝缘子附近的荷电尘粒要受到电场、空气流场、重力场等的影响。风速较大时, 稳态拽力对尘粒起主导作用, 由空气动

力学分析可知, 低温高速气流作用下, 绝缘子迎风面与背风面积污较为严重^[5-7]。除空气流场外, 绝缘子表面电场分布对尘粒的积污有一定的影响, 基于伞裙表面垂直电场力促进荷电尘粒沉积^[8]。针对绝缘子的积污特性研究, 可以通过建立污秽绝缘子的模型, 利用流体力学等理论掌握绝缘子的积污特性^[7], 结合电场分析进而掌握积污绝缘子表面的电场分布^[8-9]。目前应用的绝缘子主要有瓷绝缘子和复合绝缘子两种, 动车组车顶绝缘子主要采用复合绝缘子, 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。硅橡胶材料由有机大分子组成, 老化是决定硅橡胶寿命的一个主要因素^[10], 绝缘子出现劣化及绝缘子表面干燥带的大小等对绝缘子表面电场分布也有一定的

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-08-27

影响^[10-12],并且复合绝缘子微间隙大小也会影响绝缘子表面电场的分布^[12-13]。在秋冬季节,部分地区出现大雾等潮湿气候,绝缘子表面附着水珠,而表面附着水珠的绝缘子容易发生局部放电等现象,而这种局部放电现象的直接原因就是绝缘子表面的分离水珠引起的电场畸变,直接影响局部放电的发展。对于水珠对场强影响的研究,主要针对单个水珠和两个水珠时水珠接触角、水珠间距对电场的影响^[14]以及分布大量水珠时,其表面 RTV 涂层对电场分布的影响^[14-15]。针对水珠不同形状及不同分布状态下绝缘子表面电场的分布情况^[16]。

结合现有研究成果,文中主要对比分析两种伞裙结构绝缘子在洁净和分离水珠作用下的电场分布,通过对比分析不同伞裙结构下绝缘子的表面电场分布情况,研究不同环境下绝缘子电位和场强分布特性,掌握两种伞裙结构绝缘子的电场分布特性,为车顶绝缘子设计、选型、维护提供一定参考。

1 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、金具和伞群的形状^[17-18]。

电磁场的基本理论基础是麦克斯韦方程组,为了便于分析,文中利用有限元软件 ANSYS 内置相关算法进行电场分析,车顶绝缘子的 2D 模型见图 1。目前市场上广泛应用的绝缘子伞裙结构主要以一大一小伞裙结合为主。文中对比分析两种伞裙结构不同绝缘子的电场分布特性,为便于分析,定义为绝缘子 A 和绝缘子 B,两种绝缘子的主要区别是第 1 片伞裙的尺寸不同,绝缘子 A 的第 1 片和第 2 片伞裙均采用的小伞裙,而绝缘子 B 采用的大小伞裙结构,剩余部分采用的是大小伞裙分布,见图 1。

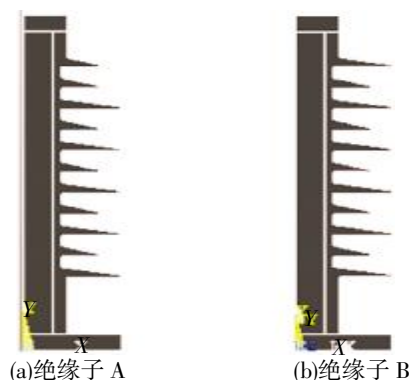


图 1 两种绝缘子的模型图

Fig. 1 Model of two kinds of insulators

该仿真以结构高度为 400 mm 的车顶绝缘子为

研究对象,绝缘子主要结构参数见表 1。

表 1 绝缘子具体技术参数

Table 1 The technical parameters of insulator mm	
参数	数值
电气间隙	380
结构高度	400
伞间距	50
大伞伸出	53
小伞伸出	33
芯棒直径	54
护套厚度	6

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,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^[17-18]。复合绝缘子各组成部分介电常数和电导率取值见表 2。

表 2 复合绝缘子各组成部分的材料属性

Table 2 The material properties of 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
伞套	0	3.500 0
芯棒	0	5.000 0
水珠	2.0×10^{-8}	81.000 0
空气	0	1.000 6

车顶绝缘子工作电压为 25 kV 工频电压,最大值为 35.355 kV。工频电场的电压频率为 50 Hz,相对较低,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。

2 洁净状态下两种绝缘子的电位分布

洁净状态下绝缘子的电位分布图见图 2。图 2 中颜色深浅代表不同的电位值,由绝缘子电位分析结果可知,在车顶绝缘子的高压端,沿绝缘子轴向很短的距离内,颜色变化非常快,前 3 片伞裙共承受了车顶绝缘将近 50%的工作电压。

因此,由图 2 可知绝缘子高压端电位下降比较快,伞裙承受的电压较高,而中间伞裙,颜色变化相对较慢,电位下降比较缓慢,低压端伞裙上接近底部金具时,电位变化也比较快。为进一步对比分析两种绝缘子的电位分布差异,两种绝缘子的沿面电位分布曲线见图 3,并给出高压端前 3 片伞裙沿面电位。

洁净状态下绝缘子 A、B 沿面电位分布曲线见图 3。通过对比图 3(a)、(b)可知,两种绝缘子的沿面电位分布趋势基本相同,均是高压端和低压端附件电位变化较快,但由图 3 可知,两种绝缘子第 1 片伞裙附近的电位分布有所不同,与绝缘子 A 相比,绝缘子 B 第 1 片伞裙附件电位变化更大;图 3(c)、(d)为

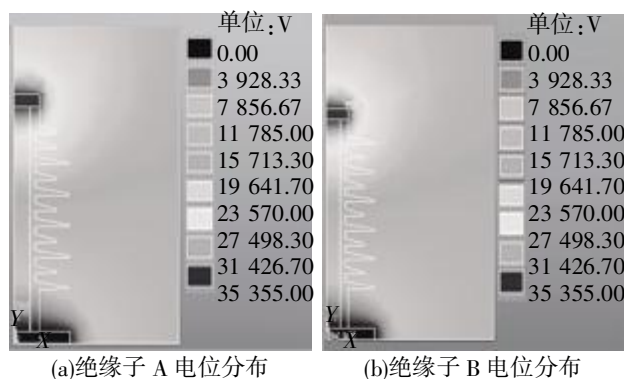


图2 洁净状态下绝缘子的电位分布图

Fig. 2 The potential distribution of insulator in clean mode

两种绝缘子高压端前3片伞裙的电位分布,这部分电位分布较大,重点对比了这部分的电位变化,因绝缘子B第1片伞裙比绝缘子A第1片伞裙大,其电位变化更大,第2片和第3片伞裙的电位分布基本相同。

3 洁净状态下两种绝缘子的电场强度分布

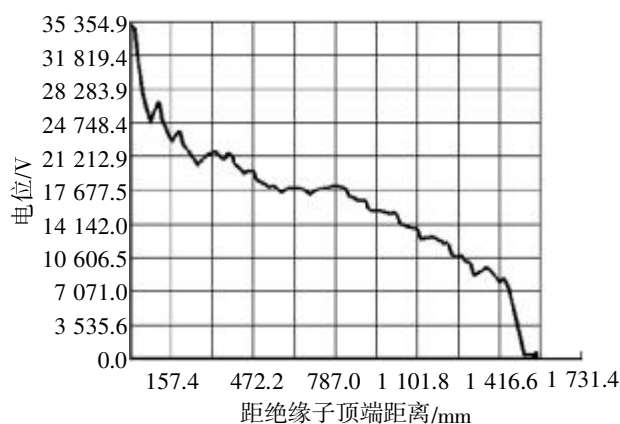
洁净状态下,两种绝缘子的电场强度分布见图4。由图4可知,两种绝缘子的最大场强均出现在上金具与绝缘伞套接触部分。绝缘子A的最大场强为805 081 V/m,绝缘子B的最大场强为957 357 V/m,绝缘子B的最大场强高于绝缘子A的最大场强。

洁净状态下两种绝缘子沿面场强分布见图5。由图5可知,绝缘子B的沿面电场强度要略高于绝缘子A的沿面电场强度分布。

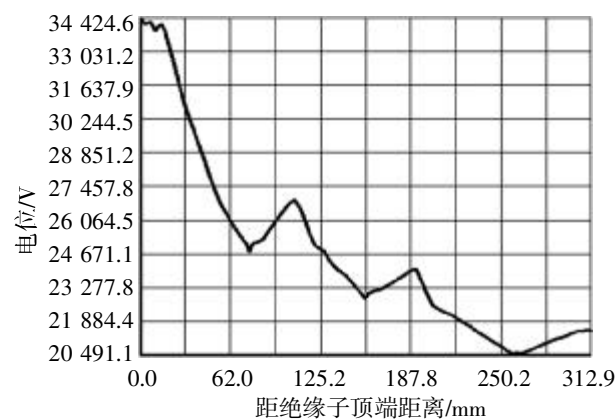
4 分离水滴附着状态下绝缘子电位分布

为进一步对比两种绝缘子的电场分布特性,基于ANSYS软件分析了绝缘子表面有分离水滴附着情况下的电场特性。已有文献分析水滴半径、接触角及水滴间距对绝缘子电场分布的影响,文中重点对比两种绝缘子的电场分布特性,因此,水滴设置为半径2 mm,接触角为90°,水滴间距为2 mm。分离水滴附着状态下绝缘子电位分布见图6。由图6可知,在水滴附着状态下,绝缘子A和绝缘子B的电位分布有所差别,水滴对绝缘子A的电位分布影响不大,高压端前3片绝缘子分布接近50%的电压。对于绝缘子B,高压端前4片绝缘子承受了接近50%的工作电压。

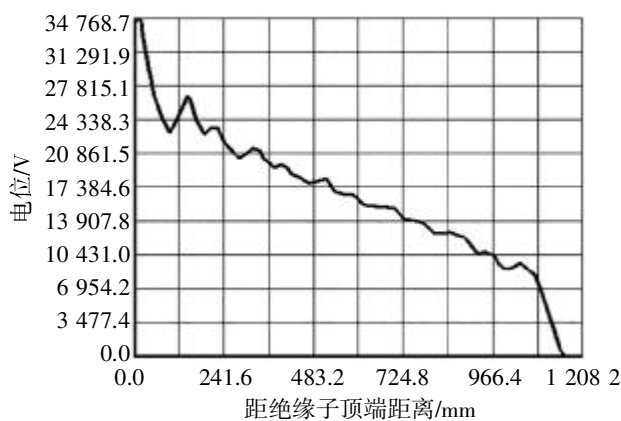
水滴附着状态下绝缘子沿面电位分布见图7。由图7(a)、(c)可知,在分离水滴的作用下,绝缘子沿面电场有一定影响,水滴附件的电场会发生变化,但对绝缘子沿面电位整体下降趋势影响不大。图7(b)、(d)为分离水滴作用下,高压端前3片伞裙的电位分布



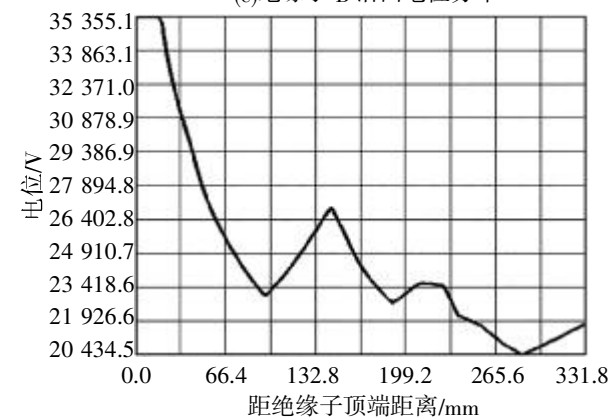
(a)绝缘子 A 沿面电位分布



(b)绝缘子 A 顶端 3 片伞裙沿面电位分布



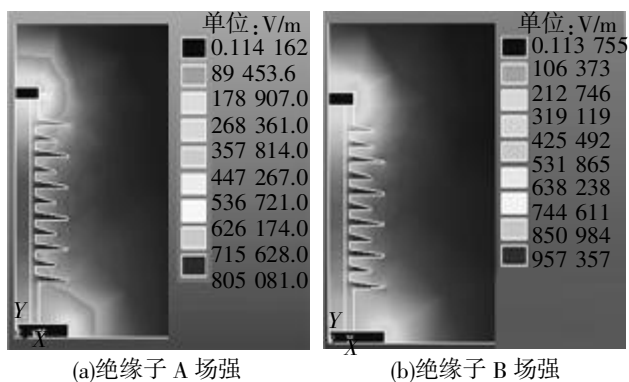
(c)绝缘子 B 沿面电位分布



(d)绝缘子 B 顶端 3 片伞裙沿面电位分布

图3 洁净状态下绝缘子沿面电位分布

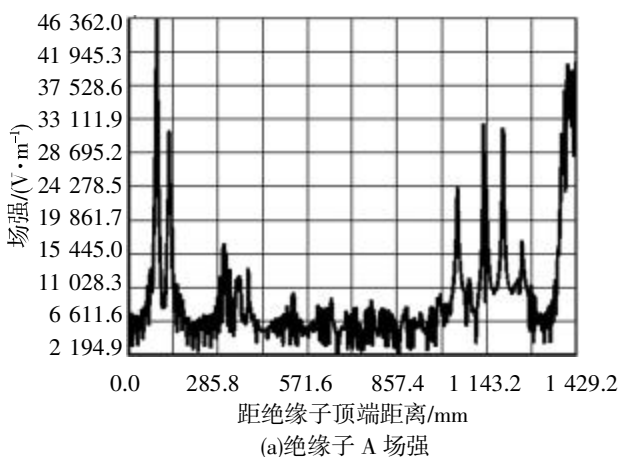
Fig. 3 The surface potential distribution of insulator in clean mode



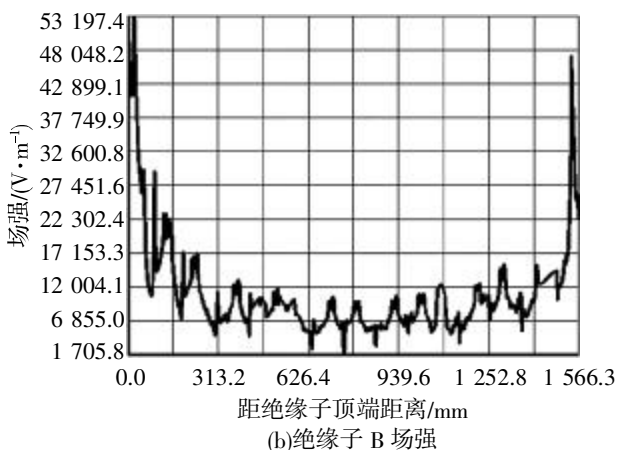
(a)绝缘子 A 场强 (b)绝缘子 B 场强

图 4 洁净状态下两种绝缘子的电场强度分布图

Fig. 4 The electric field intensity distribution of two kinds of insulators in clean mode



(a)绝缘子 A 场强



(b)绝缘子 B 场强

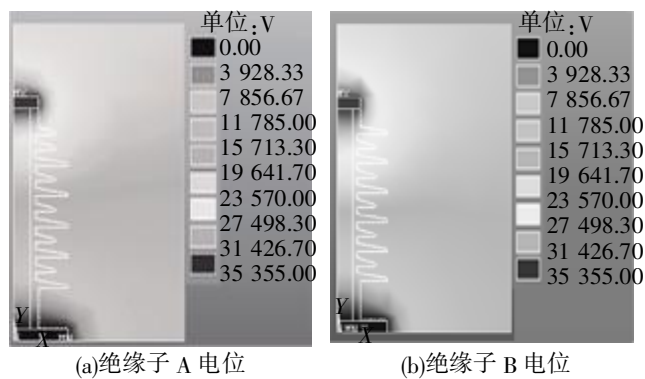
图 5 洁净状态下绝缘子的沿面场强分布图

Fig. 5 The surface electric field intensity distribution of insulator in clean mode

变化,可以得到分离水滴的作用,对绝缘子表面电位局部影响。

5 分离水滴附着状态下绝缘子电场强度分布

分离水滴附着状态下绝缘子的场强分布图见图 8。由图 8 分析可知,相比洁净状态下,水滴附着绝缘子的最大场强明显加强,且最大场强发生在固体、液体及气体交界处。绝缘子 A 的最大场强为 0.382×10^7



(a)绝缘子 A 电位

(b)绝缘子 B 电位

图 6 分离水滴附着状态下绝缘子电位分布图

Fig. 6 The potential distribution of insulator in separated globules mode

10^7 V/m, 绝缘子 B 的最大场强为 0.598×10^7 V/m, 绝缘子 B 的最大场强也明显高于绝缘子 A 的最大场强。

分离水滴附着状态下绝缘子沿面场强分布见图 9。通过对比分析可知,水滴附着状态下绝缘子 B 的沿面场强高于绝缘子 A 的沿面场强。

6 结语

复合绝缘子伞裙结构的不同,不仅会影响其爬电距离,不同结构对绝缘子电场分布也有一定的影响。文中采用 ANSYS 软件进行两种不同伞裙构造复合绝缘子的仿真计算,得出以下结论。

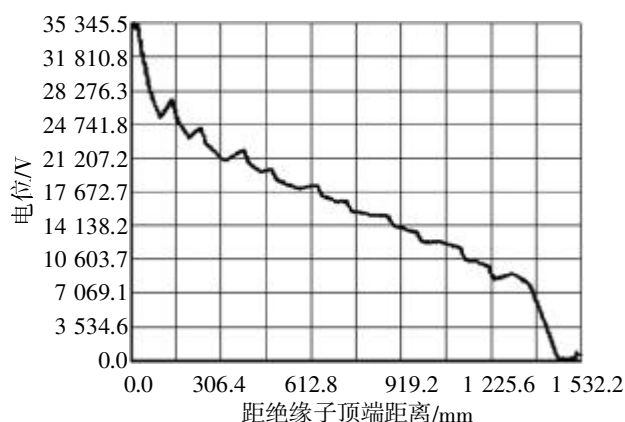
1) 洁净状态下,在绝缘子两端施加一定电压,伞裙结构的不同对绝缘子电位分布影响不大,电压主要降落的前 3 片伞裙上,绝缘子的顶端和低端的电位下降速度较快。

2) 洁净状态下,在绝缘子两端施加一定电压,伞裙结构的不同对绝缘子电场强度影响不大,第 1 片伞裙选择大伞裙的绝缘子最大场强要大一些,且绝缘子最大场强出现在绝缘子金具与伞套接触部分。

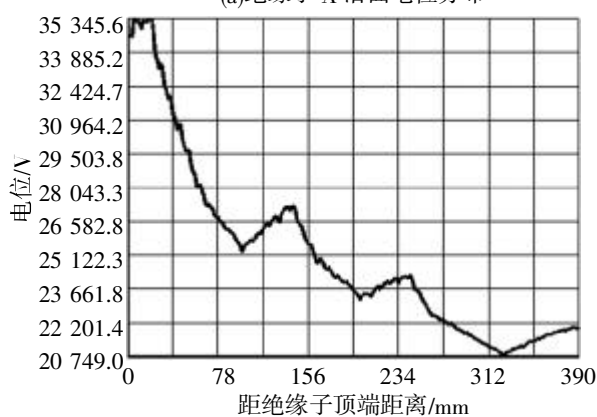
3) 分离水滴附着状态下,在绝缘子两端施加一定电压,伞裙结构的不同对绝缘子电位分布有一定影响,绝缘子 A 和绝缘子 B 的电位分布有所差别,水滴对绝缘子 A 的电位分布影响不大,高压端前 3 片绝缘子分布接近 50% 的电压。对于绝缘子 B,高压端前 4 片绝缘子承受了接近 50% 的工作电压。

4) 水滴附着状态下,绝缘子的最大场强明显加强,由分析可知,最大场强发生在固体、液体及气体交界处。绝缘子 A 的最大场强为 0.382×10^7 V/m, 绝缘子 B 的最大场强为 0.598×10^7 V/m, 绝缘子 B 的最大场强也明显高于绝缘子 A 的最大场强。

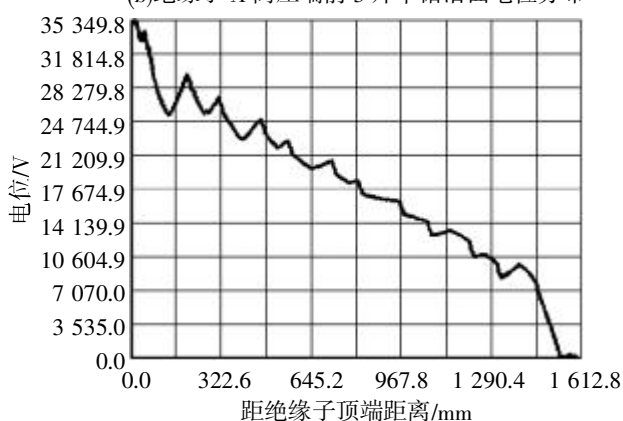
综上所述,通过分别对比洁净状态下和分离水滴附着状态下两种绝缘子电位和电场分布可知,增加伞裙半径可以增加绝缘子爬电距离,但绝缘子的



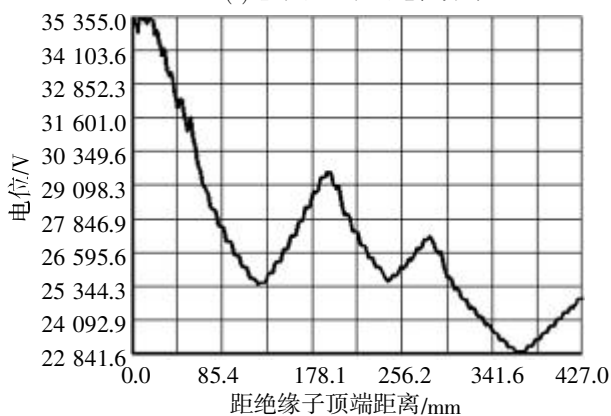
(a)绝缘子 A 沿面电位分布



(b)绝缘子 A 高压端前 3 片伞裙沿面电位分布



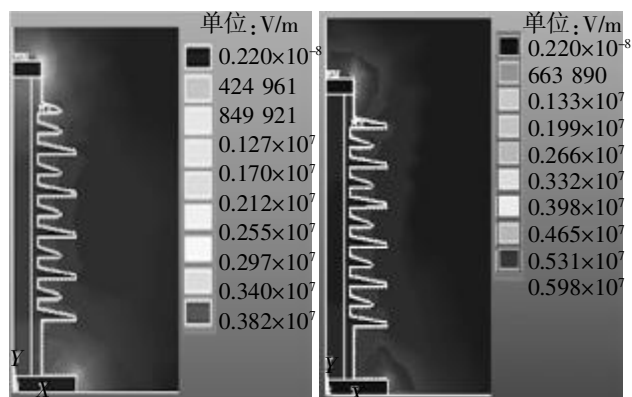
(c)绝缘子 B 沿面电位分布



(d)绝缘子 B 高压端前 3 片伞裙沿面电位分布

图 7 分离水滴附着状态下绝缘子沿面电位分布

Fig. 7 The surface potential distribution of insulator in separated globules mode

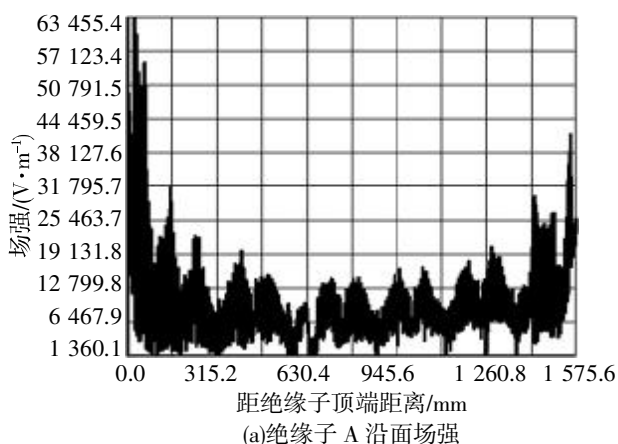


(a)绝缘子 A 场强

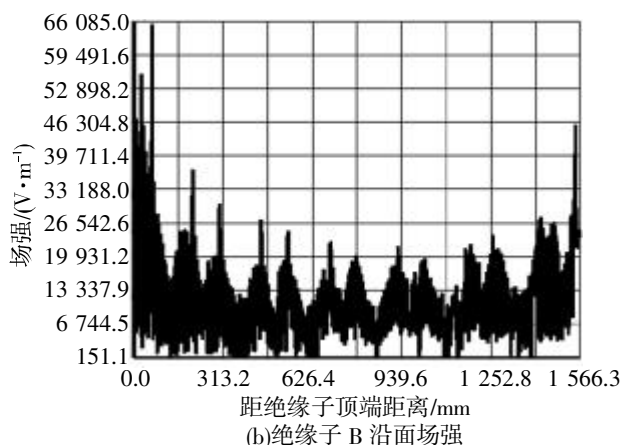
(b)绝缘子 B 场强

图 8 分离水滴附着状态下绝缘子的场强分布图

Fig. 8 The electric field intensity distribution of insulator in separated globules mode



(a)绝缘子 A 沿面场强



(b)绝缘子 B 沿面场强

图 9 分离水滴附着状态下绝缘子的沿面电场强度分布图

Fig. 9 The surface electric field intensity distribution of insulator in separated globules mode

最大场强也会增加, 最大场强影响绝缘子的局部放电特性, 因此绝缘子设计、选型时, 应全面考虑结构对其电气特性的影响, 合理选择绝缘子型号。

参考文献:

- [1] 郭晨曦. 电力机车/动车组高压绝缘设计问题探讨[J]. 铁道机车车辆, 2010, 30(2): 1-4.

- GUO Chenxi. Discussion on insulator design of electric locomotives and EMUs[J]. Railway Locomotive & Car, 2010, 30(2): 1-4.
- [2] 孙继星, 吴广宁, 高国强, 等. 水滴降落对列车车顶电场的影响及应对策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1748-1755.
- SUN Jixing, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. Influence of dropping water droplets on electric field above train roof and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1748-1755.
- [3] 韩克勤. 机车车顶高分子复合绝缘子的研究与应用[J]. 机车电传动, 2011(2): 22-24.
- HAN Keqin. Research and application on polymer composite insulator of locomotive roof[J]. Electric Drive for Locomotive, 2011(2): 22-24.
- [4] 刘学忠, 周升, 朱永占, 等. 车顶环氧复合绝缘子的外绝缘特性研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(6): 11-14.
- LIU Xuezhong, ZHOU Sheng, ZHU Yongzhan, et al. Study on the outer insulation properties of electric locomotive roof epoxy composite insulators[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2006, 29(6): 11-14.
- [5] 王晶, 陈林华, 刘宇, 等. 电场对复合绝缘子积污特性影响的探究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 585-593.
- WANG Jing, CHEN Linhua, LIU Yu, et al. Effect of the electric field on the contamination accumulation characteristic of the insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 585-593.
- [6] 陈钺. 电力机车车顶绝缘子沿面放电机理分析及防污闪对策[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(4): 40-41.
- CHEN Cheng. Electric locomotive roof insulator creeping discharge mechanism analysis and antifouling flash countermeasures[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2009, 32(4): 40-41.
- [7] 蒋兴良, 李海波. 计算流体力学在绝缘子积污特性分析中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 329-334.
- JIANG Xingliang, LI Haibo. Application of computational fluid dynamics to analysis of contamination depositing characteristics of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 329-334.
- [8] 方春华, 王建国, 赵灵, 等. 污秽绝缘子表面局部电弧与泄漏电流波形特征间对应关系分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 609-615.
- FANG Chunhua, WANG Jianguo, ZHAO Ling, et al. Corresponding relation between partial arc and leakage current waveform characteristics of polluted insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 609-615.
- [9] 李明翔. 高速动车组车顶绝缘子积污特性与电场分布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- LI Mingxiang. Contamination characteristic and electric field distribution of roof insulators on high speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [10] 蒋兴良, 夏强峰, 胡琴, 等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 118-124.
- JIANG Xingliang, XIA Qiangfeng, HU Qin, et al. Influence of deteriorated insulator on the electric field distribution of overhang string[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 118-124.
- [11] 高博, 王清亮, 周建博, 等. 干燥带对污秽绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2421-2426.
- GAO Bo, WANG Qingliang, ZHOU Jianbo, et al. Effect of dry band on electric field distribution of polluted insulator[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2421-2426.
- [12] 李如锋, 王成江, 胡帅, 等. 复合绝缘子微间隙大小对电场分布的影响[J]. 电力与能源, 2012, 33(5): 429-432.
- LI Rufeng, WANG Chengjiang, HU Shuai, et al. Study on electric field variety of composite insulator with a variable micro-gap[J]. Power & Energy, 2012, 33(5): 429-432.
- [13] 杨坤松. 动车组车顶绝缘子湿污和内部缺陷条件下电场分布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- YANG Kunsong. Research on electric field distribution of roof insulator on EMU under wetting contamination [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 徐志钮, 律方成, 李和明. 分离水珠对支柱绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2278-2284.
- XU Zhiniu, YU Fangcheng, LI Heming. Influence of separated globules on post insulator electric field distribution [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2278-2284.
- [15] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- LI Mingjia. Electrical field distribution calculation and analysis of effect factors on hydrophobicity of 10 kV composite insulator[D]. Chongqing: Chongqing university, 2002.
- [16] 王仲奕, 王琪, 陈青. 湿润复合绝缘子表面的电场分析[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 53-58.
- WANG Zhongyi, WANG Qi, CHEN Qing. Calculation of AC electric field distributions along polluted polymer insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 53-58.
- [17] 陈昌龙, 王黎明. 电力机车车顶绝缘子电场计算[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 53-57.
- CHEN Changlong, WANG Liming. Electric field calculation for electric locomotive roof insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 53-57.
- [18] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
- XU Zhiniu, YU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization. high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.

张士宇(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为轨道客车站顶高压设备测试及牵引系统测试研究。