

8-5-2020

## Insulation Optimization of High Voltage Box Based on Finite Element Method

Fangcheng Lü

*1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; ;*

Jianqiao Ma

*1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; ;*

Hongyu Liu

*1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; ;*

Fochi Wang

*1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; ;2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Insulation Optimization of High Voltage Box Based on Finite Element Method

## Abstract

**Abstract:** The discharge between cable connector and box walls directly affects the operational reliability of CRH. Optimized design of the electric field distribution of the connector can improve stability of CRH. *The sheath installation position, sheath structure and thickness of the insulation layer* were analyzed to see its influence on the distribution of field intensity. The simulation results show that insulating jacket positioned at the high voltage end of cable connector can effectively improve the electric field distribution, *insulation sheath should appress to the high voltage fitting end of the cable connector and also extend to the root of first ceramic umbrella*. The test result shows that after installing the insulation sheath cling to the high voltage fitting surface, the withstand lightning impulse voltage value of the cable connector can fit the operational requirement at high altitudes.

## Keywords

China railways high-speed (CRH), high voltage box, insulation optimization, finite element method (FEM), simulation calculation

## Authors

Fangcheng Lü, Jianqiao Ma, Hongyu Liu, Fochi Wang, Xie Jun, Buchao Jia, Yunxiang Guo, and Li Min

## Recommended Citation

Lü Fangcheng, Ma Jianqiao, Liu Hongyu, Wang Fochi, Xie Jun, Jia Buchao, Guo Yunxiang, Li Min. Insulation Optimization of High Voltage Box Based on Finite Element Method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2858-2864.

## 基于有限元的高压设备箱绝缘优化研究

律方成<sup>1</sup>, 马建桥<sup>1</sup>, 刘宏宇<sup>1</sup>, 汪佛池<sup>1,2</sup>, 谢军<sup>1</sup>, 贾步超<sup>3</sup>, 郭云翔<sup>1</sup>, 李敏<sup>4</sup>

(1. 河北省输变电安全防御重点实验室(华北电力大学), 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;  
3. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 4. 宁夏天能电力设计公司, 宁夏 吴忠 751100)

**摘要:** 电缆连接器高压端部对箱体四壁放电影响动车组可靠运行, 对连接器端部进行合理优化, 可降低故障频次。分析绝缘护层加装位置、绝缘护层结构和绝缘护层厚度对电场强度分布的影响规律。仿真结果表明, 电缆连接器高压端加装绝缘护层可有效改善电场分布, 绝缘护层应紧贴连接器端部金属部件并延伸至靠近高压端的首个伞裙根部。试验结果表明: 优化后的电缆连接器雷电冲击电压耐受值满足高海拔地区运行要求。

**关键词:** 动车组; 高压设备箱; 绝缘优化; 有限元法; 仿真计算

中图分类号: TM911.42; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2858-07

### Insulation Optimization of High Voltage Box Based on Finite Element Method

Lü Fangcheng<sup>1</sup>, Ma Jianqiao<sup>1</sup>, Liu Hongyu<sup>1</sup>, Wang Fochi<sup>1,2</sup>, Xie Jun<sup>1</sup>, Jia Buchao<sup>3</sup>, Guo Yunxiang<sup>1</sup>, Li Min<sup>4</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co. Ltd., Qingdao 266111, China;  
4. Ningxia Tianneng Electric Power Design Company, Wuzhong 751100, China)

**Abstract:** The discharge between cable connector and box walls directly affects the operational reliability of CRH. Optimized design of the electric field distribution of the connector can improve stability of CRH. The sheath installation position, sheath structure and thickness of the insulation layer were analyzed to see its influence on the distribution of field intensity. The simulation results show that insulating jacket positioned at the high voltage end of cable connector can effectively improve the electric field distribution, insulation sheath should appress to the high voltage fitting end of the cable connector and also extend to the root of first ceramic umbrella. The test result shows that after installing the insulation sheath cling to the high voltage fitting surface, the withstand lightning impulse voltage value of the cable connector can fit the operational requirement at high altitudes.

**Keywords:** China railways high-speed (CRH); high voltage box; insulation optimization; finite element method (FEM); simulation calculation

## 引言

2008-08-01 京津城际铁路运营以来, 我国高速铁路里程数和运输能力呈现出几何级增长态势<sup>[1]</sup>。



收稿日期: 2015-04-16 修回日期: 2015-05-11;  
基金项目: 国家自然科学基金(51207055);  
作者简介: 律方成(1963-), 男, 内蒙赤峰, 博士, 教授, 博导, 研究方向电气设备绝缘机理; 马建桥(通讯作者 1982-), 男, 宁夏吴忠, 博士生, 研究方向为电气设备绝缘。

动车组高压设备箱内的电气设备主要由电缆连接器、真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)、避雷器等组成, 各部件之间由导杆连接, 箱体内各器件运行环境与大气环境基本一致。在额定工频电压 25 kV 作用下, 现有高压设备箱内各部件高压端金具均未出现电晕放电现象。

空气间隙的击穿实际上是强场电离的自由电子形成流注通道并贯穿所造成<sup>[2-3]</sup>。冲击电压作用

下流注形成时,需同时满足场强数值达到流注起始场强和在电极区域附近存在有效的自由电子等条件。

动车组在运行过程中除承受额定工频电压外,还承受各种过电压作用<sup>[4-6]</sup>。当过电压幅值超过设备最大击穿电压耐受值时,高压端金具同箱体四壁间空气间隙可能会被击穿而引发闪络故障,异常放电将影响动车组运行的正点率与和旅客对服务的满意度。

空气间隙击穿电压随海拔高度的增加而呈下降趋势。DL/T5222-2005 规定<sup>[7]</sup>:对在海拔高度 1 000~4000 m 处使用的电气设备,其外绝缘强度按照海拔每升高 100 m,绝缘强度约下降 1%进行修正。当在海拔低于 1 000 m 的地点试验时,其试验电压应按标准规定的高海拔地区设备额定电压耐受值乘以海拔高度修正系数。

国内现有动车组高压电气设备系按照平原地区耐压考核值设计, TB/T 1333.1-2002 规定,额定电压为 25 kV 的电气器件雷电冲击电压耐受值应  $\geq 170$  kV。而兰新铁路部分路段海拔高度为 3000 米,在平原地区试验时,该区域动车组高压箱设备雷电冲击电压耐受值需达到 213 kV 及以上。现有高压设备箱雷电冲击电压耐受值无法满足高海拔地区运行设备考核要求。受动车组运行环境限制,在不扩大现有箱体尺寸前提下,依据相关标准规范,通过对现有设备箱内器件端部采取绝缘加强措施,使其雷电冲击电压耐受值达到高海拔地区考核要求具有重要意义。

现有高压设备箱雷电冲击试验结果表明,电缆连接器端部附近电场强度数值高于其他区域,多次雷电冲击闪络中,首先发生闪络的器件为电缆连接器。由此可见,电缆连接器为高压设备箱内绝缘最为薄弱的环节。

本文以电缆连接器为研究对象,仿真分析绝缘护层加装位置、结构型式及厚度对场强分布的影响。仿真结果表明,通过加装结构合理的绝缘护层可以有效降低空气域电场强度最大值,为提出合理的优化方案提供了依据。试验验证结果表明,通过

加装绝缘护层,电缆连接器雷电冲击电压耐受值达到高海拔地区考核要求。

## 1 电缆连接器仿真模型

高压设备箱内主要设备安装位置如图 1 所示。为比较绝缘护层结构型式对电缆连接器高压端附近空气域场强分布的影响规律,建立如图 2 所示的坐标系,该坐标系中,原点为连接器端部金具中心,后续场强分布中 0 点均以此为基准。

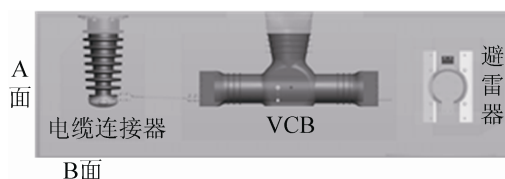


图 1 高压设备箱结构示意图

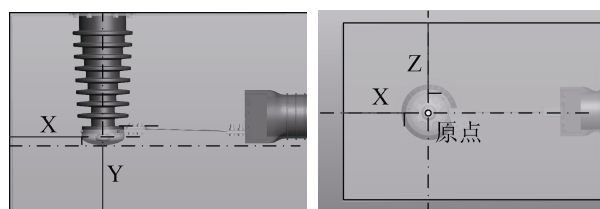


图 2 电缆连接器坐标示意图

雷电冲击电压耐受试验结果表明,现有高压设备箱内电缆连接器低压端放电点集中在如图 1 所示的 A 面(YZ)和 B 面(XZ)。从工程角度出发,仿真计算中将影响电缆连接器高压端电极对进行适当简化,按如下原则建立模型:

- 1) 不考虑箱体内连接导杆、接线端子、断路器端部等部件对连接器端部附近区域电场分布的影响;
  - 2) 高低压端电极及连接器伞裙表面处于清洁、干燥状态;
  - 3) 忽略海拔高度对电场分布的影响。
  - 4) 计算过程中不考虑空间电荷和离子流的影响
- 根据电缆连接器实体,忽略接线端子,在三维制图软件 Solidworks 中建立如图 3 所示的模型。该模型中,高压端金具材质为铜,伞裙材质为瓷,瓷质伞裙边缘做倒角处理。

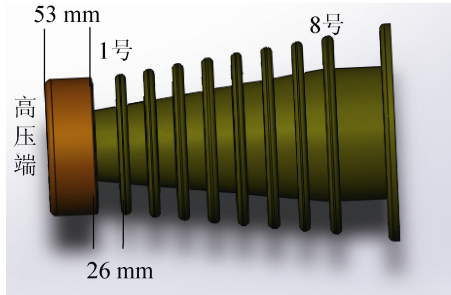


图 3 电缆连接器仿真模型

仿真计算中所用介电常数如表 1 所示。

表 1 介电常数

	空气	伞裙	电极	硅橡胶
相对介电常数	1	5.5	$10^8$	3.5

在静电场中,各相同性、线性、均匀的介质,其电位满足如下泊松或拉普拉斯方程<sup>[8-9]</sup>:

$$\varepsilon \nabla^2 \varphi = -\rho \text{ 或 } \varepsilon \nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

式(1)中: $\rho$ 为自由电荷体密度; $\varepsilon$ 为介电常数; $\varphi$ 为标量电位。本文求解过程中使用拉普拉斯方程。

静电场求解过程中首先由变分方法给出泊松方程的有限元离散通式,而后给出空间单元的特征式,最后进行代数方程集合和边界条件处理并求解。

采用变分法离散。式(1)可转化为等价的条件变分问题:

$$\begin{cases} \Omega: \min I(\varphi) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon (\nabla \varphi)^2 - \int_{\Omega} \rho \varphi d\Omega \\ \varphi = \varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

当分界面没有自由面电荷分布时,电位分界面满足如下方程:

$$\varphi_1 = \varphi_2, \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (3)$$

电缆连接器高压端金具同绝缘护层、绝缘护层同空气交界面处均满足式(3)条件。

电缆连接器模型计算过程中采用第一类边界条件(置电位),在求解过程中建立一个人工边界,动车组实际运行过程中高压箱体四壁接地,计算中亦将箱体四壁作为空气包边界,网格剖分类型为四面体。动车组在运行过程中额定运行电压为工频交

流单相 25 kV,仿真中高压端金具施加峰值电压 35.35 kV,在低压端电极及人工边界(箱体四壁)处置零电位。

## 2 仿真数据分析

### 2.1 绝缘护层结构对电场强度分布影响

根据现有高压设备箱电缆连接器高压端金具结构,根据图 3 中电缆连接器结构,设计如图 4 所示的绝缘护层,图中数字单位为毫米,护层厚度为 5 mm。为后续描述方便,将连接器高压端金具最外层壳命名为屏蔽罩。加装绝缘护层 A 和绝缘护层 B 后,屏蔽罩边缘同护层边缘平行,加装护层 D 后,护层开口边可延伸到电缆连接器 1 号伞裙根部。护层 B 内表面能紧密贴在电缆连接器高压端金具的正面,上倒角面和侧面,下倒角面和背面与空气相接触。绝缘护套长度超过电缆连接器电极部分同瓷柱之间存在空气介质。护层 C 和护层 D 除可覆盖连接器高压端金具正面、上倒角面外,还可覆盖屏蔽罩同终端瓷柱间金属棱边(背面)。不同结构型式绝缘护层对连接器端部附近区域场强分布影响规律如图 5 所示。加装绝缘护层后,绝缘护层分担原空气介质部分电压,靠近高压端空气介质电场强度最大值有明显的下降,其中 X, Z 方向下降幅度约为 36%, Y 方向下降幅度约为 18%。仿真结果表明,紧贴电缆连接器屏蔽罩加装绝缘护层后可有效降低高压端金具附近空气域电场强度最大值。

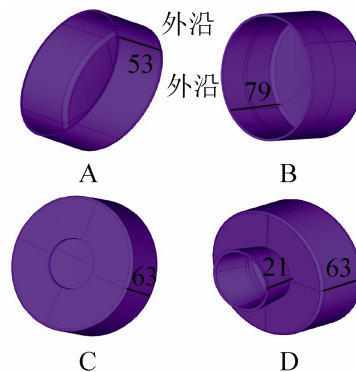
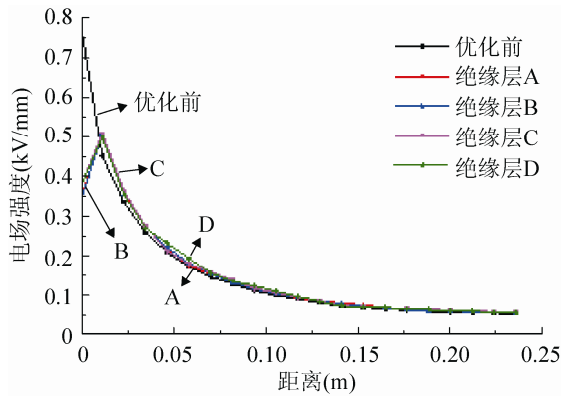
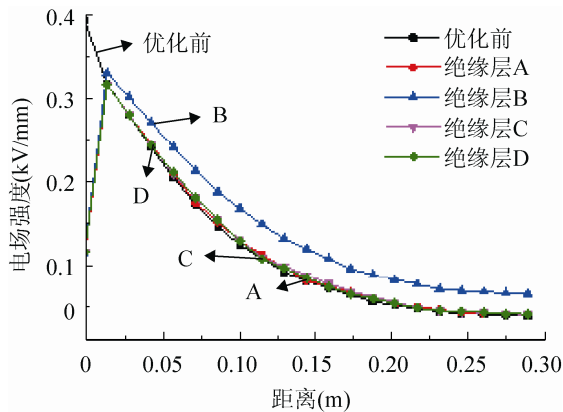


图 4 绝缘护层结构示意图

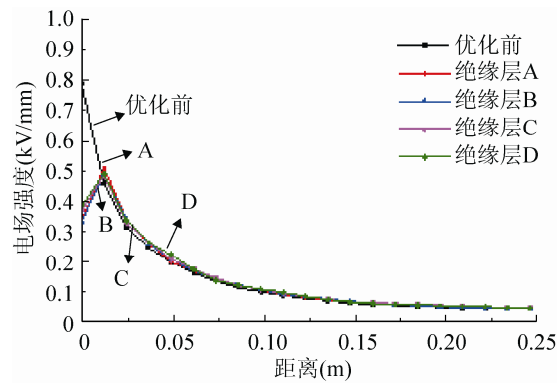




(a) X 方向场强分布



(b) Y 方向场强分布



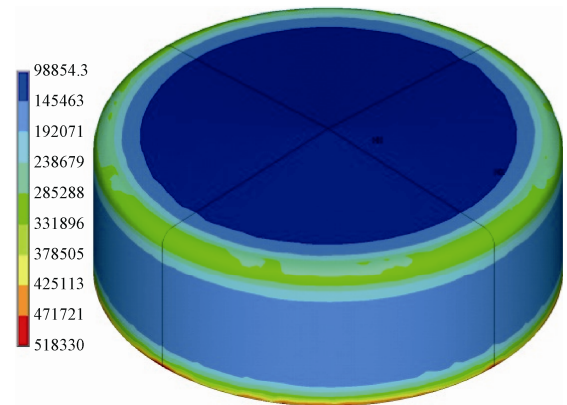
(c) Z 方向场强分布

图 5 绝缘护层对电场强度分布的影响趋势

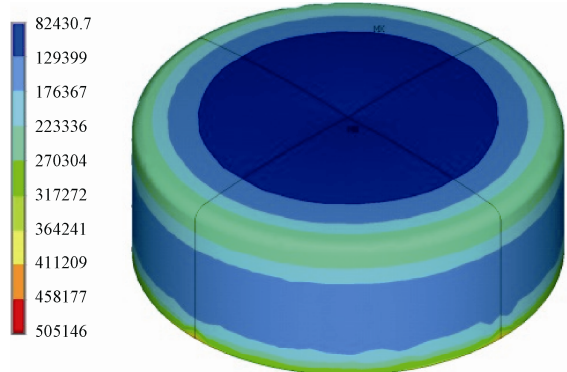
## 2.2 绝缘护层厚度对电场强度分布影响

加装绝缘护层前, 电缆连接器高压端金具同箱体四壁间电压由空气介质承担。加装绝缘护层后, 电压由绝缘护层和空气间隙两种介质共同承担。本文以绝缘护层 A 为例, 比较护层厚度对电场分布的影响规律, 加装不同厚度绝缘护层时护层电场分布云图如图 6 所示。对绝缘护层而言, 场强最高值

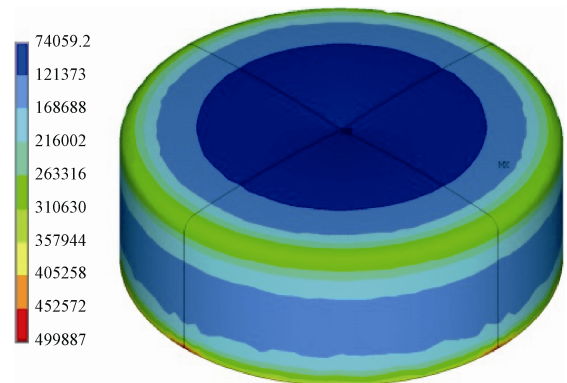
位于护层开口边缘处, 这是因为在金具边缘处厚度值较其他地方要小、曲率较大所致。比较不同厚度绝缘护层电场云图中最大值, 以绝缘护层 3 mm 为基准, 护层厚度 4 mm 时场强最大值约下降了 17%, 护层厚度为 5 mm 时场强最大值下降了约 24% 左右。仿真结果表明, 电场强度最大值随着绝缘护层厚度的增加而下降, 随着护层厚度值增加, 场强最大值下降幅度呈现逐步减小的趋势。



(a) 护层厚度 3mm



(b) 护层厚度 4mm



(c) 护层厚度 5mm

图 6 绝缘护层绝缘厚度对电场强度的影响

### 2.3 四壁加装环氧板对电场强度影响

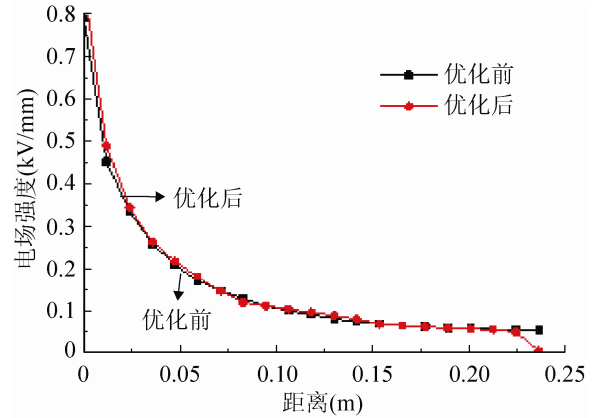
为比较在高压端和低压端加装绝缘护层后对空气间隙电场强度分布的影响规律, 仿真分析了高压设备箱壁(低压侧)加装 2 mm 厚环氧树脂绝缘板后的电场分布特性。低压端加装环氧树脂板对连接器端部附近空气域场强分布影响规律如图 7 所示。在高压端金具同箱体四壁(低压端)之间加装绝缘层时, 原来由空气承担的电压由绝缘层和空气两种介质共同承担。绝缘介质位于高压端时分担的电压数值远大于加装在低压端时的数值。仿真结果表明, 在低压侧加装环氧树脂绝缘板后, 对高压端附近空气域的电场强度分布可视为无明显影响。

### 2.4 绝缘护层对电场强度最大值影响

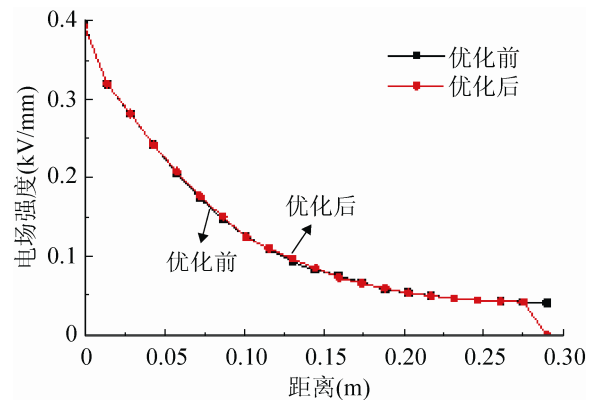
从本文 2.1 节结果看, 本文所述的四种不同结构型式绝缘护层对 X、Z 方向电场强度分布的影响没有明显的差别。但从护层结构对放电过程中的电子阻挡效果看, 护层 3 和护层 4 更好, 即护层 3 和护层 4 能有效阻挡不同路径的电子。按照图 8 对绝缘护层划分为不同区域, 提取不同区域场强最大值并进行比较。不同结构型式绝缘护层各部位最大电场强度值同绝缘加强前数值相比, 变化情况如表 2 所示。

表 2 中绝缘护层 A 和护层 B 正面、上倒角面、侧面的电场强度值取自绝缘护套外表面, 下倒角面和背面的电场强度取自电缆终端屏蔽罩相应表面。护层 C 和护层 D 各个表面电场强度均取自绝缘护套外表面。

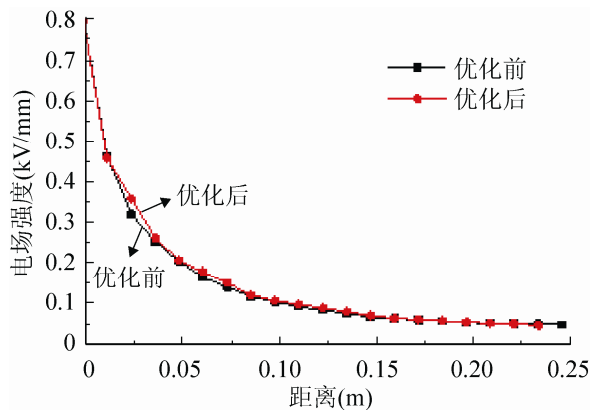
仅从护层正面、上倒角面和侧面对电场最大值的影响程度看, 各护层之间无明显差异。在考虑护层下倒角和背面场强最大值变化情况后发现加装护层 C 和护层 D 时, 护层各部位电场强度最大值下降幅度均在 29% 以上, 效果明显好于护层 A 和护层 B。通过上述分析后确定护层 C、护层 D 为优先考虑对象。



(a) X 方向场强分布



(b) Y 方向场强分布



(c) Z 方向场强分布

图 7 箱体四壁加环氧板对电场强度的影响

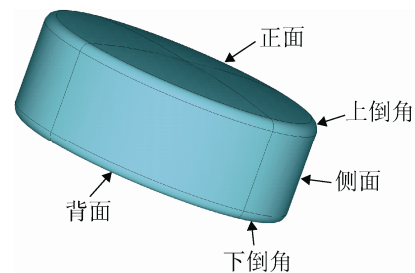


图 8 绝缘护层位置划分示意图

表 2 绝缘护层结构对电场强度最大值的影响

绝缘措施	参数	正面	上倒角	侧面	下倒角	背面
优化前	数值(kV/m)	1055.8	1237	1056.5	1092.6	809.06
护层 A	数值(kV/m)	623.34	762.83	701	945.78	787.13
	下降率(%)	40.96	38.33	33.65	13.44	2.71
护层 B	数值(kV/m)	596.59	759.48	600.64	941.7	703.9
	下降率(%)	43.49	38.60	43.15	13.81	13.00
护层 C	数值(kV/m)	607.26	729.28	686.74	716.46	506.83
	下降率(%)	42.48	41.04	35.00	34.43	37.36
护层 D	数值(kV/m)	557.54	809.19	614.62	770.44	546.25
	下降率	47.19	34.58	41.82	29.49	32.48

### 3 试验结果

为验证不同绝缘加强措施对高压设备箱雷电冲击电压耐受值的影响程度, 依据仿真结果, 委托厂家加工绝缘护层, 厚度为 5 mm。冲击电压试验所用冲击电压发生器单级电压为 150 kV, 共三级, 额定电压为 450 kV, 分压器变比为 2000:1, 示波器型号为 TDS2024。连接试品后从分压器低压臂电容取信号, 通过示波器获取的电压波形满足 GB/T16927.1-2011 要求。试验期间室内环境温度为 7~13 °C, 相对湿度为 32%~39%, 试验地海拔高度 <50 m。试验接线如图 9 所示。

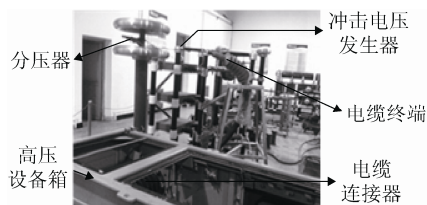


图 9 试验接线图

按照如图 10 所示方式将绝缘护层紧贴电缆终端屏蔽罩进行固定, 在固定过程中用单组份 RTV 填充孔隙。优化后的雷电冲击电压耐受值达到 235 kV, 该值可满足海拔高度 3 700 m 处设备雷电冲击电压要求。加装护层后的雷电冲击电压试验波形如图 11 所示。

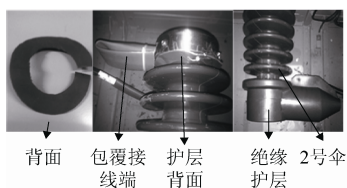
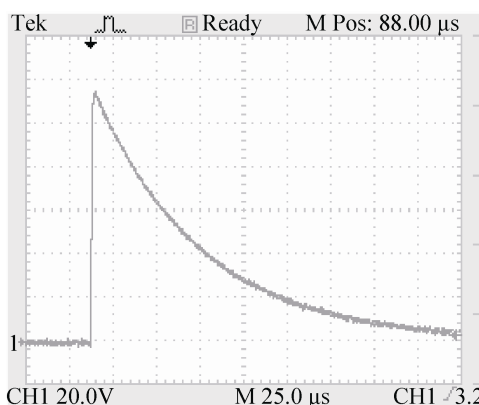
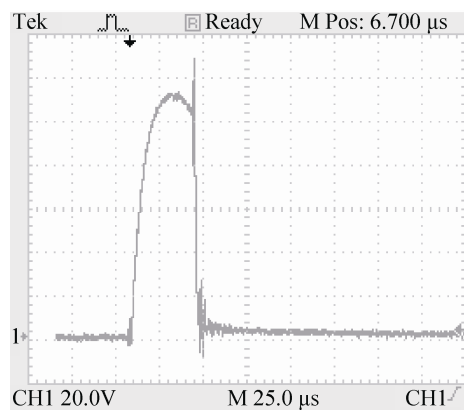


图 10 绝缘护层安装示意图



(a) 冲击电压波形



(b) 击穿电压波形

图 11 加装绝缘护层后雷电冲击试验电压波形

### 4 结论

本文以动车组高压设备箱电缆连接器为对象, 基于有限元数值计算方法, 仿真分析连接器高压端部加装硅橡胶绝缘护层前后金具端部附近空气域电场分布趋势的变化规律。仿真结果表明: 紧贴高压端金具外表面加装硅橡胶绝缘护套后可以有效



降低空气域最大电场强度值。当绝缘护层紧贴连接器高压端金具并延伸到首个伞裙时,护层同空气接触区域各部位电场强度最大值下降程度可达 29% 以上。电场强度最大值随着绝缘护层厚度的增加呈现下降趋势,下降幅度随着厚度值的增大而减小。试验结果验证了通过在高压端加装绝缘护层来提高电缆连接器雷电冲击电压耐受的有效性和可行性。

### 参考文献:

- [1] 律方成, 马建桥, 汪佛池, 等. 雾霾天气下动车组受电弓支柱绝缘子表面污秽分布规律 [J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3305-3310. (Lü Fangcheng, Ma Jianqiao, Wang Fochi, *et al.* CRH Insulator Surface Pollution Distribution Rule Research Under Frog-Haze condition [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3305-3310.)
- [2] The Renardières Group. Research on long air gap discharges at Les Renardières [J]. Electra, 1972, 29: 153-157.
- [3] The Renardières Group. Research on long air gap discharges at LesRenardièr, 1973 results [J]. Electra, 1974, 35: 149-156.
- [4] 詹花茂, 刘波, 颜廷利, 等. 操作冲击对空间电荷对间隙放电的影响 [M]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 212-218. (Zhan Huamao, Liu Bo, Yan Tingli, *et al.* Influence of Space Charge on Air Gap Discharge Under Switching Impulse [J]. Transactions of China Electro technical Society, 2014, 29(2): 212-218.)
- [5] 钮承新. 过电压引起电力机车放电间隙击穿原因分析 [J]. 电气化铁道, 2012, (1): 24-27. (NIU Chengxin. The analysis of breakdown of discharge gap in locomotive caused by overvoltage [J]. Electricity Railway, 2012, (1): 24-27.)
- [6] 聂颖, 胡学永. 高速动车组升弓浪涌过电压研究 [J]. 机车电传动, 2013, 4: 9-11. (Nie Ying, Hu Xueyong. Research on Rising Pantograph Surge over Voltage for High-speed EMUs [J]. Electric Drive for Locomotives, 2013, 4: 9-11.)
- [7] DL/T5222-2005. 导体和电气选择设计技术规定 [S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005.
- [8] 王泽忠. 简明电磁场数值计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 颜廷利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

## 《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心,以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源,首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标,并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序,发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%),在国内外学术界产生了较大反响。之后,2013 年版年报,将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前,2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成,《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊,走向世界,进入国际一流,指日可待!