

市域动车组高压箱电场特性仿真分析

陈志东 崔宪伟 陈 姝 付 琢

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//第一作者, 工程师)

摘 要 车顶高压箱是市域动车组运行的关键部件,明确高压箱的电场分布特性对市域动车组的安全运行具有重要意义。简要阐述了市域动车组高压箱的工作原理和结构构成,建立了三维有限元电场计算模型,仿真分析了高压箱体及内部器件的电位和电场分布。根据仿真计算结果,高压箱内电场分布主要集中在高压器件导电金属、绝缘材料和空气的结合点处,高压电缆终端一头部,真空断路器的上部、下部及头部,避雷器头部的电场强度相对较大。提出了对与绝缘材料接触的导电金属进行倒角处理和对端部导体金属增加绝缘护套保护的建议。

关键词 市域动车组; 高压箱; 有限元法; 电场仿真分析

中图分类号 U264.7: U266.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.020

Simulation Analysis of City EMU High-voltage Box Electric Field Characteristics

CHEN Zhidong, CUI Xianwei, CHEN Shu, FU Zhuo

Abstract The vehicle roof-top high-voltage box is a key component for city EMU. It is important to know the electric field distribution characteristics of the high-voltage box for the safe operation of city EMU. The working principle and structural composition of EMU high-voltage box are expounded, a three-dimensional finite element electric field calculation model is established, and the potential and electric field distribution of high-voltage box and internal devices are simulated and analyzed. According to the simulation calculation results, the high-voltage box internal electric field distribution mainly concentrates on high-voltage device conductive metal, joint spot of insulation material and air, high-voltage cable end, vacuum interrupter upper, bottom and head parts, while the electric field strength at lightning arrester head is relatively stronger. It is proposed to carry out chamfer treatment on the conductive metal contacting insulation material and to add insulation protection on conductive metal at ends.

Key words city EMU; high-voltage box; finite element method; electric field simulation analysis

Author's address National Engineering Research Center of

Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

市域动车组以动车组技术平台为基础,融合了地铁车辆技术,既具有动车组的快速舒适、绿色环保,又兼备地铁的乘坐便捷、载客量大等优点。市域动车组主要为中心城市与外围城镇之间提供快速、大容量、公交化的通行服务。

车顶高压系统作为动车组的重要组成部分,起着连接弓网与车辆的桥梁作用,为动车组提供运行动力。由于市域动车组运行于不同的空间环境,暴露于大气中的高压器件会承受恶劣的环境影响,雾霾、粉尘及冰霜雨雪等会使户外终端表面积聚污秽,易发生闪络。市域动车组高速行驶时,空中散落的小石子等坚硬物体可能会撞击高压器件,造成高压器件损伤^[1-3]。为了提高车顶高压系统的运行安全可靠,将高压器件集成于密闭的高压箱内,由高压箱保护高压器件免受外部环境的影响。然而,箱体空间有限,内部器件相距很近,对设备的绝缘性能提出了更高的要求。分析高压箱内的电场分布情况,可为高压箱结构和绝缘设计提供理论依据。目前对于高压设备单体部件的电场分布的研究较多,而对高压箱整体电场分布进行分析的较少,因此如何保证整个高压箱内不会出现放电或击穿等现象,需要进行进一步探究。

虽然 350 km/h 标准动车组已开始使用集成式高压箱,但与市域动车组高压箱内部结构不同,两种高压箱设计各异。本文根据市域动车组高压箱结构建立了三维有限元模型,对其进行电场仿真,分析了高压箱的电场分布特性,并对高压箱优化设计提出建议。

1 高压箱基本结构

1.1 高压系统工作原理

市域动车组高压箱主电路用于连接受电弓和

牵引变压器。动车组运行时升单弓,通过高压电缆将 25 kV 高压电传输至高压箱;高压箱引出线通过高压连接器连接到牵引变压器,从而为动车组提供运行动力。

1.2 高压箱结构组成

高压箱主要由箱体、真空断路器、接地开关、高压电缆终端(3 个)、避雷器、绝缘板等组成,整体结构如图 1 所示。由弓网引入的高压电通过高压电缆终端一连接到真空断路器,然后通过高压电缆终端二和三向主变压器供电。接地开关可以进行短路保护,避雷器起到防止高压器件雷击的作用。

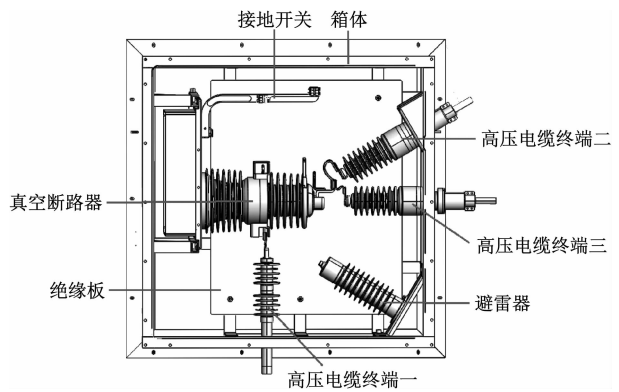


图 1 高压箱结构图(隐藏箱盖)

Fig. 1 Structure diagram of high-voltage box (cover hidden)

高压箱整体为半沉入式结构,箱体下半部分凹入车体;箱壁及箱底为铝合金材质,并通过接地线接地;为使高压箱减重,箱盖为玻璃钢材质,具有优良的机械强度和电绝缘性能;箱内底部铺设一块由复合材料制成的绝缘板,阻断高压器件对箱底的放电通道。

2 高压箱仿真模型

2.1 三维有限元模型

为了准确计算高压箱的电场分布,需要建立三维有限元模型。采用 SolidWorks 软件构建高压箱的物理模型。高压箱使用的器件均为批量化生产的成熟产品,默认所有器件均已通过型式试验和例行试验。由于本文主要研究高压箱内电场分布情况,不对器件本身性能进行评价,所以需要根据已有经验对高压箱模型进行适当简化,忽略一些对电场影响较小的细节^[3-4],在保证准确性的基础上节省计算资源,减少计算时间,提高效率。主要简化内容如下:

1) 高压器件的内部结构复杂,对电场分布无影

响,建模时忽略。

2) 箱体上的螺栓、铆钉、通孔和法兰等结构对电场分布无影响,建模时忽略。

3) 真空断路器、高压电缆终端、接地开关和避雷器外部绝缘及金属连接件保留。

4) 认为各器件均为理想器件,内部无缺陷,表面清洁、干燥,故计算过程不考虑空间电荷等的影响。

5) 忽略周围温湿度和气压变化的影响,在高压箱周围建立空气域。

2.2 材料参数

计算高压箱的电场分布需要确定各器件材料的相对介电参数,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料的相对介电常数及电导率		
Tab. 1 Relative permittivity and conductivity of materials		
材料	相对介电常数	电导率/(S/m)
空气	1.0	10^{-25}
金属	1 000.0	6.0×10^7
硅橡胶	3.0	10^{-15}
环氧树脂	3.5	10^{-14}
绝缘板	4.1	10^{-12}

2.3 数值计算模型

电气化铁路弓网的额定电压为 25 kV 工频交流电压,故高压箱中的电磁场属于电准静态场。电磁场随时间变化十分缓慢,电场强度向量 E 和电通密度向量 D 的方程与静电场中对应的方程完全一样。对同一仿真模型,若激励和边界条件相同,则使用静电场与瞬态电场计算的结果十分接近,因此,可使用静电场对高压箱进行仿真计算以提高计算速度^[5-6]。

根据麦克斯韦方程组,静电场基本方程为:

$$\nabla \times E = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{2}$$

式中:

∇ ——矢量微分算符;

ρ ——自由电荷体密度。

在静电场中,各向同性、线性、均匀的介质满足:

$$E = -\nabla\varphi \tag{3}$$

$$D = \varepsilon E \tag{4}$$

式中:

ε ——介电常数;

φ ——标量电位。

所以, φ 满足泊松方程或拉普拉斯方程, 即:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\varepsilon \quad (5)$$

或

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

当介质分界面没有自由面电荷时, 分界面处 2 种介质的标量电位相等, 且介电常数均为 φ 的法向量偏导数。

2.4 激励及边界条件

根据标准 GB/T 28427—2012 的要求^[7], 高压器件的额定电压为 27.5 kV, 将输入电压施加于真空断路器、避雷器及高压电缆终端的导体上。有限元模型的高压输入如图 2 所示。高压箱箱底、箱壁、器件安装支架接地, 电位为 0。有限元模型的接地如图 3 所示。

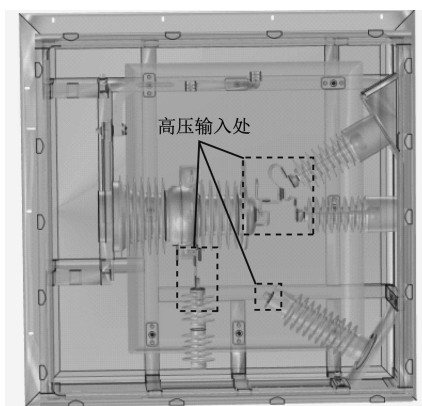


图 2 有限元模型的高压输入

Fig. 2 High-voltage input for finite element model

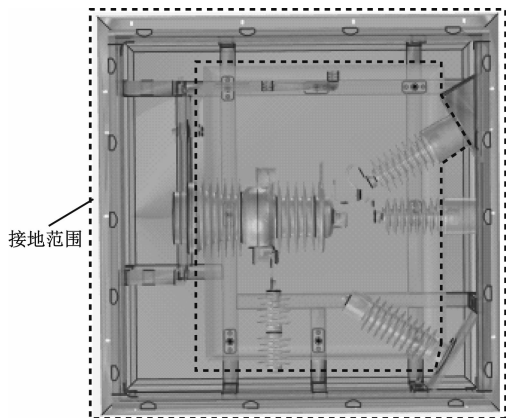


图 3 有限元模型的接地

Fig. 3 Grounding of finite element model

3 仿真结果及分析

通过仿真计算, 得到了高压箱的电位和电场强度分布云图, 如图 4 及图 5 所示。从电位分布图可

以看出: 高压器件的导电金属处电位均为 27.5 kV; 距离导电金属越近, 绝缘材料的感应电位越高。

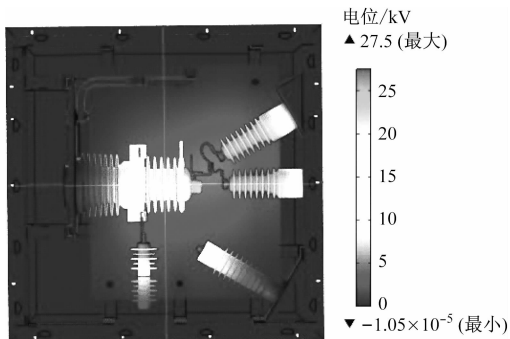


图 4 高压箱电位分布云图

Fig. 4 Potential distribution nephogram of high-voltage box

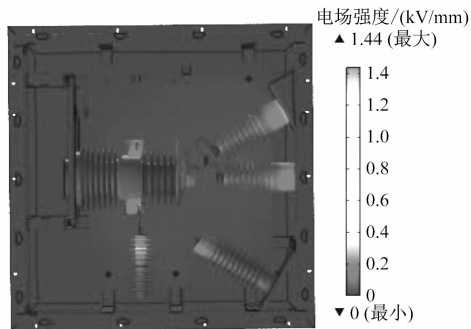


图 5 高压箱电场强度分布云图

Fig. 5 Electric field intensity distribution nephogram of high-voltage box

由高压箱电场仿真计算结果可见, 该高压箱布局较合理, 其内部最大电场强度为 1.44 kV/mm, 小于空气的击穿电场强度 (3.00 kV/mm), 能满足正常使用要求。

进一步分析高压箱箱体内部电场分布发现, 电场强度集中点为高压器件导电金属、绝缘材料和空气的交界处。如, 高压电缆终端一头部, 真空断路器上部、下部及头部, 避雷器头部等。高压器件局部电场强度分布云图如图 6 所示。不同高压器件部位的电场强度最大值如表 2 所示。

计算结果表明, 高压器件局部电场强度最大值均小于空气击穿电场强度, 在正常使用条件下不会发生放电现象。真空断路器头部和避雷器头部电场强度相对较大, 可能是由于导体、绝缘与空气三结合点处的结构设计不够平滑, 存在棱角, 故而使电场相对集中。为了优化电场分布, 可从以下两方面改善:

1) 对于真空断路器头部导电金属与绝缘材料直接接触位置, 可对金属边缘进行倒角处理, 以消

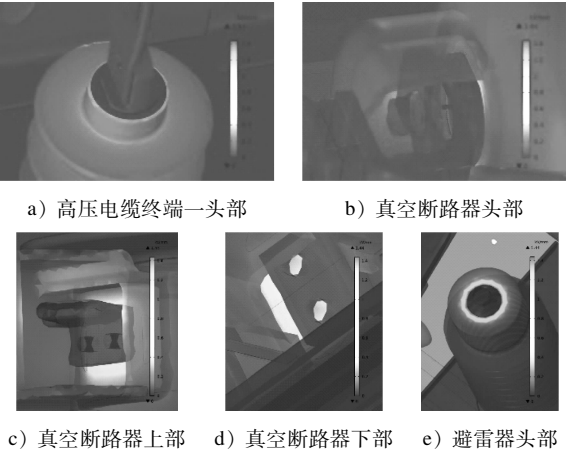


图6 高压器件局部电场强度分布云图

Fig.6 Local electric field intensity distribution nephogram of high-voltage device

表2 高压器件局部电场强度最大值	
Tab.2 Maximum local electric field intensity of high-voltage device	
器件名称	电场强度/(kV/mm)
高压电缆终端一头部	0.34
真空断路器头部	1.26
真空断路器上部	0.99
真空断路器下部	0.89
避雷器头部	1.42

除电场集中点。

2) 对于避雷器头部导体直接暴露于空气中的情况,可采用绝缘护套将导体进行包裹,从而改善电场分布。

4 结语

本文研究了市域动车组高压箱在额定工作电压下的电场分布情况,分析了高压箱整体的电位及电场强度分布,得到以下结论:

1) 高压箱内电场分布主要集中在高压器件导电金属、绝缘材料和空气的三结合点处。高压电缆终端一头部,真空断路器上部、下部、头部,以及避雷器头部的电场强度相对较大。

2) 针对高压器件相关位置电场强度较大的问题,提出了对与绝缘材料接触的导电金属进行倒角

处理和对端部导体金属增加绝缘护套保护的方法。

参考文献

[1] 律方成, 马建桥, 汪佛池, 等. 雾霾天气下动车组支柱绝缘子表面污秽分布规律[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3305.
LYU Fangcheng, MA Jianqiao, WANG Fochi, et al. Pollution distribution rule of insulator surface of locomotives under frog-haze condition[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3305.

[2] 罗蜀彩, 彭刚, 李军, 等. 车顶绝缘子湿润条件下表面电场分布研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 36.
LUO Shucui, PENG Gang, LI Jun, et al. Study of surface electric field distribution of railway coach roof insulator under wet condition[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 36.

[3] 邱浩, 李鸣霄, 王曙鸿, 等. 动车组车顶高压电器箱的电场计算及优化设计[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 372.
QIU Hao, LI Mingxiao, WANG Shuhong, et al. Electric field calculation and optimization of high voltage apparatus box on car roof of electric multiple unit[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 372.

[4] 律方成, 马建桥, 刘宏宇, 等. 基于有限元的高压设备箱绝缘优化研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(11): 2858.
LYU Fangcheng, MA Jianqiao, LIU Hongyu, et al. Insulation optimization of high voltage box based on finite element method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2858.

[5] 蒋聪健, 李涛, 杨瀛瑜. 动力集中动车组高压电器箱电场仿真分析[J]. 机车电传动, 2020(5): 87.
JIANG Congjian, LI Tao, YANG Yingyu. Simulation analysis of high voltage electrical box electric field for centralized power EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(5): 87.

[6] 杨燕花, 陈珍宝. 工频耐受电压下动车组高压箱电场仿真计算[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(2): 40.
YANG Yanhua, CHEN Zhenbao. Electric field simulation calculation of high voltage box on EMU under power frequency withstand voltage[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(2): 40.

[7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电气化铁路27.5 kV 单相交流交联聚乙烯绝缘电缆及附件: GB/T 28427—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 27.5 kV single-phase AC XLPE insulation cable and accessories for electrification railway: GB/T 28427—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

(收稿日期:2022-08-01)