

Electric Field Simulation Study on Live Working of Overhauling Arrester on 220 kV Double Circuit Tower

Shichun Wang¹, Tao Guo¹, Liangwen Zhao¹, Yuxi Huang¹, Peng Wang²

¹Guizhou Power Grid Co., Ltd., Transmission Operation and Maintenance Branch, Guiyang Guizhou

²School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 519909755@qq.com

Received: May 21st, 2019; accepted: June 5th, 2019; published: June 12th, 2019

Abstract

In order to improve the reliable operation level of overhead transmission lines, it is necessary to carry out regular overhaul of arresters in the southwest of China by installing arresters on 220 kV transmission lines. In order to ensure the safety of operators in live working, the relevant model is established in SolidWorks software, and the finite element method is used to simulate the live working of 220 kV Double Circuit Tower overhaul arrester, *i.e.* equipotential operation and three ways of entering equipotential operation. The distribution of electric field on the human body surface of live workers is obtained and analyzed, and then three ways of entering equipotential operation are compared, which can provide reference for the personal safety of live workers.

Keywords

220 Kv Line, Overhauling Arrester, Live Working, Electric Field of Human Body Surface

220 kV双回塔检修避雷器带电作业 电场仿真研究

王时春¹, 魏 韬¹, 赵良文¹, 黄钰锡¹, 王 鹏²

¹贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司, 贵州 贵阳

²武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉

Email: 519909755@qq.com

收稿日期：2019年5月21日；录用日期：2019年6月5日；发布日期：2019年6月12日

摘要

我国西南地区目前对220 kV线路加装避雷器以提高架空输电线路可靠运行水平，需要定期对避雷器开展检修工作。为了确保带电作业操作人员安全，在SolidWorks软件中建立了相关模型并采用有限元法对220 kV双回塔检修避雷器带电作业即等电位作业和三种进入等电位作业的方式进行仿真计算，得到并分析了带电作业施工人员人体表面电场分布，进而比较了三种进入等电位作业的方式，为带电作业操作人员人身安全提供参考。

关键词

220 kV线路，检修避雷器，带电作业，人体表面电场

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人民生活水平不断提高，用电需求也在相应增加，为了满足电网进一步发展的需求，带电作业成为线路运行检修的重要手段[1] [2] [3] [4]。220 kV 输电线路作为电网重要的组成部分，通过带电作业进行运行检修工作能够第一时间掌握电网设备的运行情况、及时发现和处理设备缺陷，对确保电网安全、稳定、可靠运行具有重要意义[5]。

我国西南地区地貌复杂、多样，以丘陵、山地为主，而架空输电线路多处于崇山峻岭之间，该区域雷电活动频繁，据统计，贵州电网运检公司管辖的220 kV 以上线路在2002~2013年雷击跳闸占到总次数的65% [6]。研究与实际经验表明，避雷器能够显著提升线路耐雷水平，降低因雷击引起的故障跳闸概率，提高架空输电线路可靠运行水平[7] [8] [9]。电网公司对途径山区、雷害严重区高压输电线路采取了加装线路避雷器措施，对降低架空输电线路雷击故障率效果明显。避雷器在长期运行过程中，会形成包括放电计数器问题、阀片受潮或老化缺陷、引线及端子板连接不良等故障[10] [11]。避雷器在220 kV 线路上应用后，架空线路绝缘子串周围空间结构发生变化，避雷器的结构使绝缘子串周围电场分布发生改变，给带电作业操作人员人身安全带来不确定性。目前国内外对于架空输电线路带电作业进行了大量研究，但并未考虑220 kV 线路检修避雷器带电作业这一特殊情况，为保证实际线路带电作业操作人员的安全，有必要参照实际线路进行架空输电线路检修避雷器带电作业的研究。

本文以西南地区某一段220 kV 线路为参照，对220 kV 双回塔检修避雷器带电作业进行SolidWorks建模及有限元法仿真，计算分析在特殊线路结构下，带电作业操作人员人体表面电场分布情况，进而比较了三种进入等电位作业的方式，为带电作业操作人员人身安全提供参考。

2. 带电作业电场计算方法

本文采用SolidWorks软件和Comsol有限元分析软件对带避雷器线路等电位作业工况进行建模仿真，计算不同工况下各个典型作业位置的人体表面电场分布。建立相应的作业人员标准模型时，主要参考《GB-T10000-88 中国成年人人体尺寸》中的统计数据。由于实际人体的形状极为复杂，精确的人体模型

将导致巨大的计算量，为了适当简化分析难度，在建立模型时将人体模型尽量简化，其中人体头部采用球形来模拟，上半身采用长方体模拟，身高选择为 175 cm，同时操作人员手臂和腿部的电场也是关注的重点之一，将手臂和腿部采用圆柱体模型，建立了人体坐姿模型，如图 1 所示。

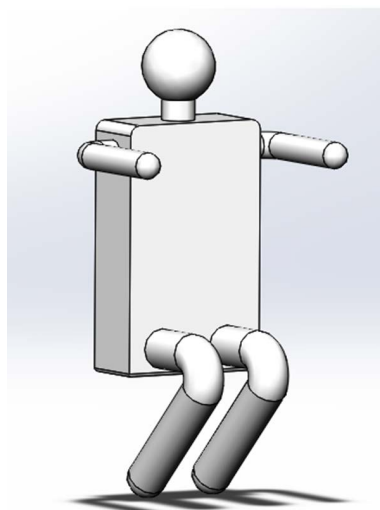
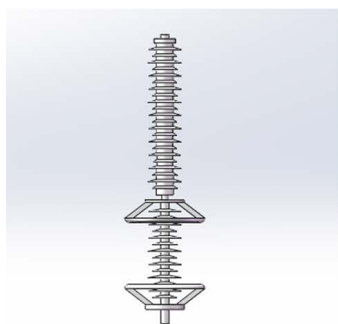


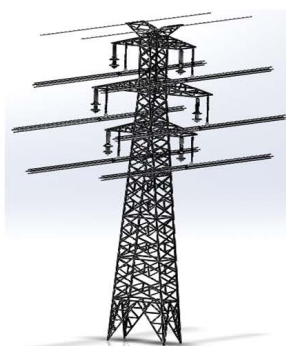
Figure 1. Human Model of Operators in Live Working

图 1. 带电作业操作人员人体模型

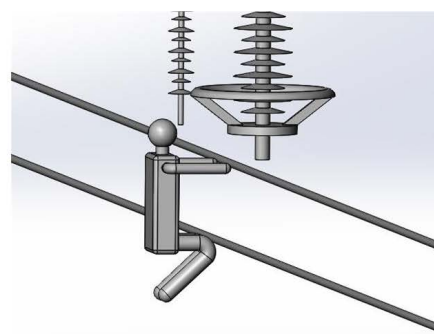
根据西南地区某工程实际建立了支撑间隙避雷器模型，如图 2(a)所示，及 220 kV 带支撑间隙避雷器双回路塔模型，如图 2(b)所示。根据西南地区带电作业检修避雷器工况，分别在上、中、下三相选取典型的等电位作业位置为导线上避雷器附近，建立了等电位检修避雷器带电作业模型，如图 2(c)所示。所有实体被 1 个半径为 120 m 的半圆柱型空气体包围，包括人体模型、支撑件间隙避雷器、双回路塔、复合绝缘子、均压环、联板、相导线(分裂导线)、其他连接金具等。



(a) 支撑间隙避雷器模型



(b) 220 kV 带支撑间隙避雷器双回路塔模型



(c) 等电位作业人体坐姿模型

Figure 2. SolidWorks Models

图 2. SolidWorks 模型

本文使用 Comsol 软件进行静电场仿真计算。静电场是电磁场的一种稳定状态，而麦克斯韦方程组用于表征电磁场的内部联系，所以静电场方程组是麦克斯韦方程组的特殊情况，可表示为：

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

由上式(2)和(3)可知, 在线性媒质中高斯定律可表示为

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (5)$$

式中, ρ 为自由电荷密度。结合式(4)可得

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla \varphi) = \rho \quad (6)$$

利用矢量恒等式 $\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = \varepsilon \nabla \cdot (\nabla \varphi) + \nabla \varphi \cdot \nabla \varepsilon$, 可将上式(6)转化为

$$\varepsilon \nabla^2 \varphi + \nabla \varphi \cdot \nabla \varepsilon = -\rho \quad (7)$$

对于均匀媒质的情况求解, ε 为常数, 则 $\nabla \cdot \varepsilon = 0$, 式(7)可转化为

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \varepsilon \quad (8)$$

上式在直角坐标系中可以表示为:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (9)$$

此方程即为静电场的泊松方程, 它表示求解场域内的电位分布取决于电荷分布。

对于那些电荷分布在导体表面的静电场问题, 在某些求解区域内多数点的体电荷密度为零, 则方程(9)可简化为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} = 0 \quad (10)$$

上式即为拉普拉斯方程。

在无电荷求解区域, 可求得一个既满足拉普拉斯方程又符合边界条件的电位函数 V 。一旦这一函数被求解出来, 电场强度就可以根据式(4)确定。拉普拉斯方程的解是唯一的。

有限元法的原理是将一个复杂、体积较大的研究对象划分为一个个较简单、体积较小的个体, 将每个个体作为一个单位, 对研究对象的场变量进行计算时能够通过计算划分出来的每个单位的场变量叠加成连续场变量, 并可以代入微分方程组中进行求解, 得到近似的数值解[12]。有限元法灵活性强, 具有明显的物理意义, 常应用于复杂物理问题的求解。

实际运行中, 三相导线对地电位是不停变化的, 转化成静电场问题时须对每相导线加载不同的定值电压。根据三相电压的余弦函数关系, 如一相初相角为 0° , 则另外两相分别滞后和超前 120° , 当其中一相电压达到最大值时, 另外两相分别达到 $-1/2$ 的最大值。

计算时, 对距离人体最近的导线、均压环、屏蔽环和高压端金具加载 220 kV 交流线路最高运行相电压幅值 $Um = 220 \times 1.1 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 198 \text{ kV}$, 其他两相则加载电压 $-Um/2 = -99 \text{ kV}$, 对构架、低压端金具、外部空气边界加载 0 电位。

3. 仿真计算

将 SolidWorks 中建立的模型导入到 Comsol, 使用 Comsol 有限元分析软件对检修避雷器的线路等电位带电作业及进入等电位作业工况进行计算。

3.1. 等电位带电作业

由仿真计算得到上、中、下三相等电位作业的人体表面电场分布，其中下相人体表面电场分布如图 3 所示。其中右侧数据为人体表面的电场强度，以不同颜色区分，左侧为人体表面电场分布。由图中可以看到，人体头顶部位场强大约为 650 kV/m，胸部及膝盖场强较小，均为 100 kV/m，脚尖处的场强最大，为 1000 kV/m。

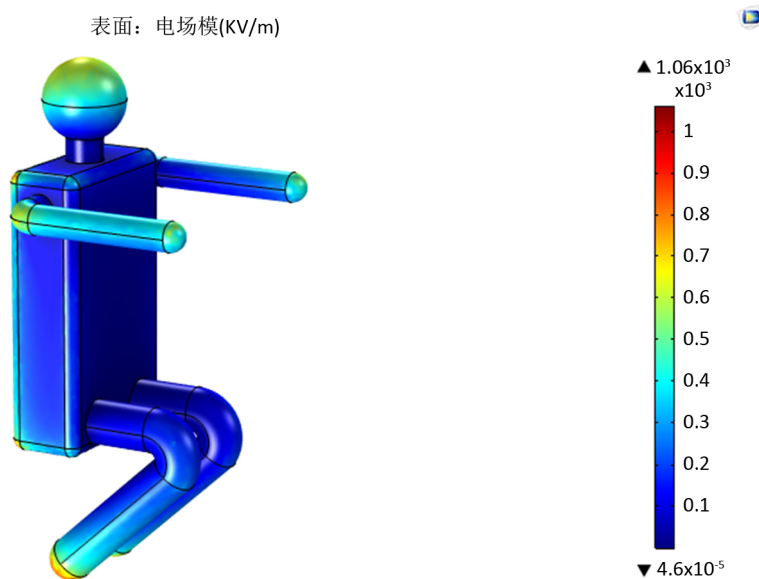


Figure 3. Electric field distribution map of human body surface in equipotential operation

图 3. 等电位作业人体表面电场分布图

不同等电位作业位置作业人员体表场强如表 1 所示。

Table 1. Surface Electric Field Strength of Operators at Equipotential Working (kV/m)

表 1. 等电位作业人员体表场强 (kV/m)

位置	头顶	面部	胸部	指尖	膝盖	脚尖
上相	800	500	100	800	100	1100
中相	700	500	100	800	100	1000
下相	650	400	100	700	100	1000

等电位作业人员需身穿屏蔽服作业，屏蔽效率可以衡量屏蔽服性能：

$$SE = 20 \lg \left(\frac{U_{ref}}{U} \right) \quad (11)$$

式中： SE 为屏蔽效率，单位为分贝(dB)； U_{ref} 为基准电压值(没有屏蔽时)； U 为屏蔽后的电压值。

GB/T 6568-2008《带电作业用屏蔽服装》规定，整套屏蔽服在规定的使用电压等级下，衣服内的体表场强不得大于 15 kV/m，人体外露部位的体表局部场强不得大于 240 kV/m。考虑到人体表面出现的最大场强为 1100 kV/m，穿戴 60 dB 的屏蔽服时，服内场强为 1.1 kV/m，能满足带电作业的要求。作业人员面部不可以裸露，需穿戴 20 dB 的屏蔽面罩。

3.2. 进入等电位带电作业

进入等电位时，带电作业操作人员体表场强主要与进入方式及与导线距离有关[13] [14]。目前我国进入等电位带电作业普遍应用吊篮法、平梯法、软梯法等，带电作业操作人员采取坐姿从杆塔上进入等电位作业位置。针对三种进入等电位方法选取典型位置进行计算，确定进入等电位典型位置分别为上相 1~7、中相 1~7、下相 1~10，具体位置如图 4 所示，相邻点间的距离为 1~1.7 m。在图 4(a)中，平梯法进入路径选取位置 1、2，吊篮法进入路径选取位置 3，软梯法进入路径选取位置 4、5、6、7，在图 4(b)、图 4(c)中同样选取类似位置。

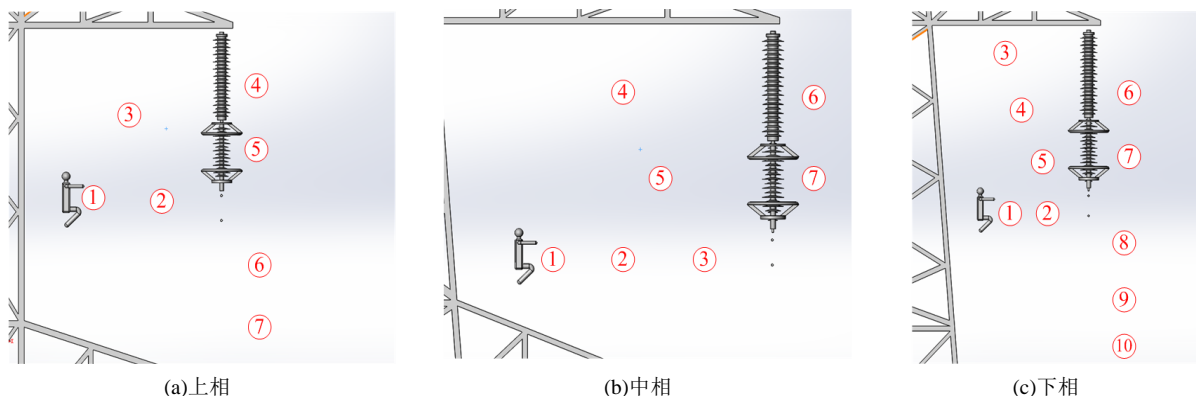


Figure 4. Typical Position Diagram for Entering Equipotential Operation
图 4. 进入等电位作业典型位置示意图

分别对各位置进行仿真计算得到人体表面电场分布，其中某位置的人体表面电场分布如图 5 所示。

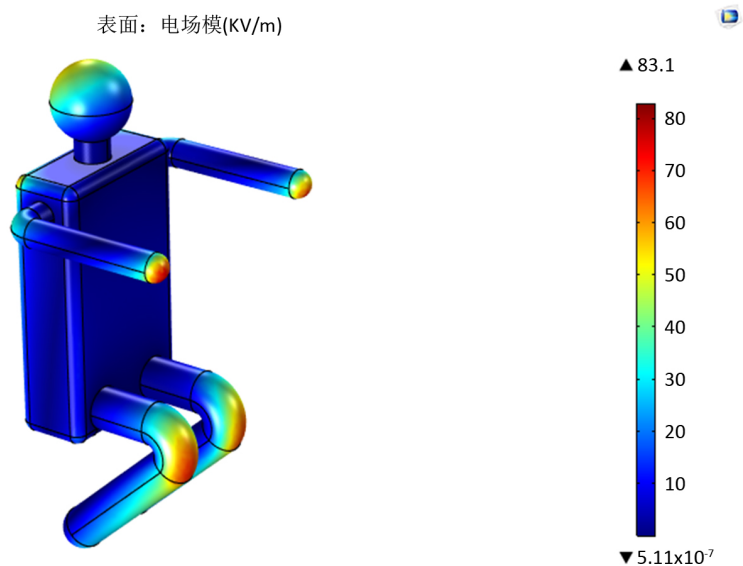


Figure 5. Electric Field Distribution on Human Body Surface at Entering Equipotential Operation
图 5. 进入等电位作业人体表面电场分布

采取不同方式进入等电位带电作业即不同位置的作业人员体表场强如表 2 所示。

在进入等电位过程中，需要穿戴整套屏蔽服，上相位置 6 的人体面部场强计算结果为 350 kV/m，已

Table 2. Surface Electric field strength of Operators entering equipotential operation (kV/m)
表 2. 进入等电位作业人员体表场强 (kV/m)

	进入方式	位置	头顶	面部	胸部	指尖	膝盖	脚尖
上相	平梯	1	20	20	20	155	60	70
		2	80	50	50	300	120	120
	吊篮	3	80	50	10	60	90	80
		4	140	100	20	140	110	170
	软梯	5	140	100	20	40	175	140
		6	350	350	100	500	100	350
		7	150	140	30	220	50	220
中相	平梯	1	10	10	10	95	20	40
		2	20	20	20	140	40	60
		3	100	50	50	350	150	150
	吊篮	4	55	35	10	25	35	55
		5	55	30	10	80	80	30
	软梯	6	100	80	20	70	70	120
		7	110	70	20	20	140	145
下相	平梯	1	60	20	20	190	80	80
		2	100	50	50	300	150	120
		3	70	50	10	50	50	75
	吊篮	4	70	40	10	60	95	70
		5	100	60	20	150	150	60
	软梯	6	80	70	20	80	70	120
		7	120	100	20	40	170	160
		8	165	120	20	165	50	165
		9	60	50	10	90	10	80
		10	30	25	10	55	10	40

经大于人体允许外露部位的体表最大局部场强 240 kV/m, 所以使用软梯法从上相导线下方进入等电位时, 需要穿戴 20 dB 屏蔽面罩确保作业人员安全。

4. 总结

从等电位带电作业的计算结果可以得到: 当作业人员位于导线上进行等电位作业时, 作业人员头顶、指尖及脚尖场强很大, 这是由于作业人员头顶、指尖及脚尖均为突出的部位, 在空间内形成了尖端, 导致周围电场畸变。而作业人员面部、胸部及膝盖面向分裂导线, 受到导线与躯干的屏蔽作用, 体表场强相对较小。

由进入等电位作业的计算结果可以得到: 在进入等电位带电作业的过程中, 在作业人员通常使用坐姿靠近导线的情况下, 相较于采取平梯及吊篮进入等电位作业位置, 使用软梯以从上往下或从下往上的

进入方式时, 作业人员的头顶、面部及脚尖会承受更大的场强; 在以上三种进入等电位作业位置方式中, 采用吊篮进入等电位作业位置时, 作业人员的手尖及脚尖场强最小; 整体上越靠近导线, 人体表面的场强越大。所以在进入等电位过程中, 应该尽量保持身体的舒展, 避免蜷缩, 以免因人体部位曲率半径小而出现较大的电场强度。

在等电位带电作业过程中人体表面最大场强可达到 1100 kV/m, 进入等电位过程中人体表面场强随着与导线的接近不断增加。结合国家标准 GB/T6568-2008《带电作业用屏蔽服装》, 为保障带电作业操作人员人身安全, 作业人员必须穿戴 60 dB 屏蔽服与 20 dB 屏蔽面罩进行检修避雷器带电作业。

参考文献

- [1] 王海龙. 准确把握形势, 紧密结合改革 统筹做好 2019 年全国电力需求侧管理工作[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1): 1-3.
- [2] 刘振亚. 中国电力与新能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 胡毅, 刘凯, 彭勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1921-1931.
- [4] 胡毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 1-10.
- [5] 李春华. 输配电线路带电作业技术的应用研究[J]. 技术与市场, 2018, 25(12): 105-106.
- [6] 魏韬, 梁文勇, 杨恒, 等. 基于全息数据的贵州电网雷击故障诊断研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 51-55.
- [7] 季坤, 严波, 操松元, 等. 220 kV 同塔双回输电线路避雷器防护配置研究[J]. 电瓷避雷器, 2018, 284(4): 128-137.
- [8] 苏杰, 曹炯, 姜文东, 等. 220 kV/110 kV 同塔四回输电线路双回同时闪络耐雷性能及防治[J]. 电瓷避雷器, 2013(5): 90-96.
- [9] 李振, 余占清, 何金良, 等. 线路避雷器改善同塔多回路防雷性能的分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3120-3128.
- [10] 曾赞, 漆铭钧, 李婷, 等. 基于不停电检测的避雷器状态检修优化研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 19-22.
- [11] 陈坤汉, 李顺尧. 一起 220 kV 线路避雷器泄漏电流超标的原因分析[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 111-114.
- [12] 刘凯, 吴田, 刘庭, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路的电位转移电流特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(10): 568-576.
- [13] 方雅琪, 彭勇, 苏梓铭, 等. 特高压紧凑型线路带线作业人体表电场仿真计算[J]. 中国电力, 2015, 48(10): 77-83.
- [14] 胡毅, 胡建勋, 刘凯, 等. 特高压交直流线路带电作业人员的体表场强[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 13-18.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org