

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.016

110 kV 同塔四回线路带电更换悬垂绝缘子串作业方法研究

陈鑫涛, 马爱清, 徐进帅, 张成武

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对110 kV同塔四回输电线路相间净空距离与横担间距离较近,带电更换悬垂绝缘子串存在一定的难度以及危险性的问题,文中基于有限元仿真从带电作业危险率以及作业人员体表场强两个方面,对比分析了采用等电位作业、地电位作业以及中间电位作业3种不同作业方式时带电作业的安全性。研究表明:等电位、地电位作业方式均存在危险率大于 1×10^{-5} 的情况,不符合安规;而采用中间电位作业法进入电场时的组合间隙以及带电作业危险率均符合安规;且采用中间电位作业法时作业人员体表场强也远小于另外两种作业方式,故使用中间电位作业法更换悬垂绝缘子串满足安全性。

关键词: 同塔四回; 中间电位作业法; 危险率; 体表场强

Study on Operation Method of Live Replacement of Suspension Insulator Strings for 110 kV Four-circuit Transmission Lines on the Same Tower

CHEN Xintao, MA Aiqing, XU Jinshuai, ZHANG Chengwu

(School of Electric Power, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In view of the problem that the clearance distance between phases and the distance between cross arms of the 110 kV four-circuit transmission line on the same tower are relatively close, and the live replacement of the suspension insulator string poses certain difficulties and risks, in this paper the safety in live operation is compared and analyzed by adopting such three different operation modes as equipotential operation, ground potential operation and intermediate potential operation based on finite element simulation and also from such two aspects as the risk rate of live operation and the strength of the operator's body surface field. The study shows that the risk rate of equipotential and ground potential operation modes is greater than the case of 1×10^{-5} , which is not in compliance with safety regulations. However, the combined gap and the risk rate of live working when entering the electric field by using the intermediate potential operation method are more compliance with the safety regulations. In addition, in case of adopting the intermediate potential operation method, the body surface field strength of the operator is also far less than the other two operation modes, therefore using the intermediate potential operation method to replace the suspension insulator string can meet the safety requirements.

Key words: four-circuit transmission line on the same tower; intermediate potential operation method; risk rate; body surface field strength

0 引言

同塔多回输电线路可以提升输电走廊的利用率,降低线路建设成本^[1-3],中国部分城市110 kV线路已广泛采用同塔四回的输电方式,且城郊区域110 kV线路更多采用同塔四回钢管塔圆(或方)横担

设计。同塔四回输电线路的广泛运用也给线路的运行维护带来了一些难题^[4-5],尤其是带电更换悬垂绝缘子串这种作业项目开展的难度较大^[6-8]。所以对钢管塔圆(或方)横担结构的110 kV同塔四回线路带电更换悬垂绝缘子串的作业方法进行可行性分析十分必要。

收稿日期:2025-08-05; 修回日期:2025-10-12

基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1420600)。

Project Supported by Shanghai Natural Science Foundation(19ZR1420600).

2 两种作业方法的技术分析

2.1 等电位作业方式

2.1.1 作业人员在导线上

绝缘子串及连接金具总长为 1 600 mm, 标准 DL/T 1126—2017 中规定, 地电位作业时, 作业人员与带电体间的最小安全距离为 1 m; 等电位作业时, 作业人员在进出等电位过程中最小组间距离为 1.2 m, 与相邻导线最小距离为 1.4 m^[22-23]。作业人员在该位置时的整体模型见图 4, 整体的电位云图见图 5。在该位置时, 人员手部的体表电场值最大, 为 1 184.15 kV/m, 体表电场仿真结果见图 6、7。

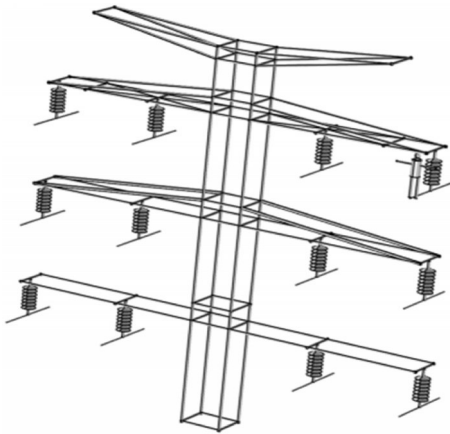


图 4 作业人员在导线上
Fig. 4 The operator on the wire

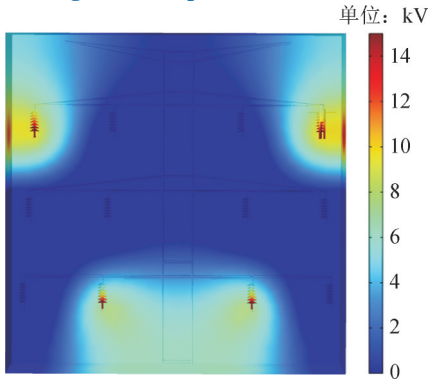


图 5 电位云图(人在导线上)
Fig. 5 Potential cloud diagram(person on wire)

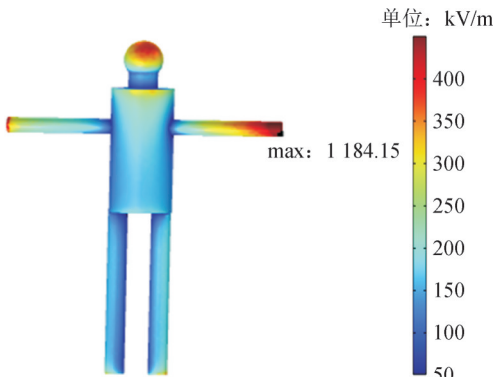


图 6 等电位作业的体表电场(站姿)
Fig. 6 Surface electric field of equipotential working(standing)

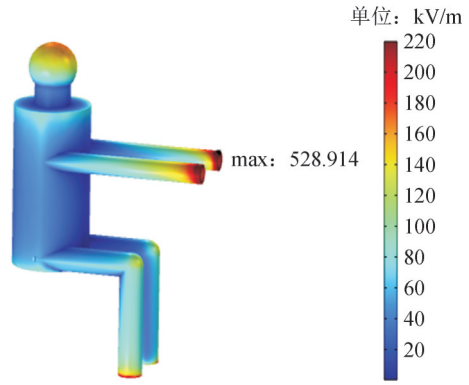


图 7 等电位作业的体表电场(坐姿)
Fig. 7 Surface electric field of equipotential working(sitting)

2.1.2 作业人员接触导线

对于本研究中的钢管塔圆(或方)横担结构而言, 该作业位置进出等电位的组间距离考虑的是导线到作业人员脚部以及作业人员头顶到上方横担的距离, 在考虑人员最小占位 500 mm 的情况下可满足规定的最小组间距离以及最小安全距离。通过搭建模型, 仿真计算人员的体表电场。作业人员在该位置时的整体模型见图 8, 整体的电位云图见图 9。在该位置时, 人员手部的体表电场值最大, 为 1 132.48 kV/m, 人员处于该位置作业的电场仿真结果见图 10、11。

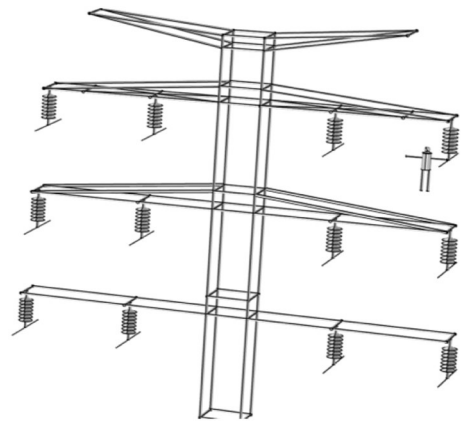


图 8 作业人员接触导线

Fig. 8 Operators contacting with wires

2.2 地电位作业方式

该作业位置人员位于中层横担, 需要考虑两个间隙, 分别是作业人员与正上方上相导线间隙 S_1 以及作业人员与正下方中相导线的间隙 S_2 , 该作业位置的最小安全距离满足导则的规定。作业人员在該位置时的整体模型见图 12, 整体的电位云图见图 13。在该位置时。人员手部的体表电场值最大, 为 258.91 kV/m, 人员处于该位置作业的电场仿真结果见图 14、15。

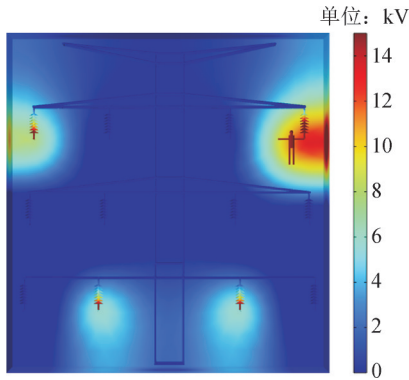


图9 电位云图(人接触导线)

Fig. 9 Potential cloud diagram(human contacting wire)

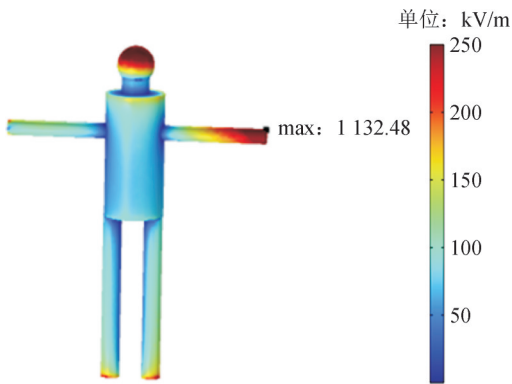


图10 等电位作业的体表电场(站姿)

Fig. 10 Surface electric field of equipotential potentia(standing)

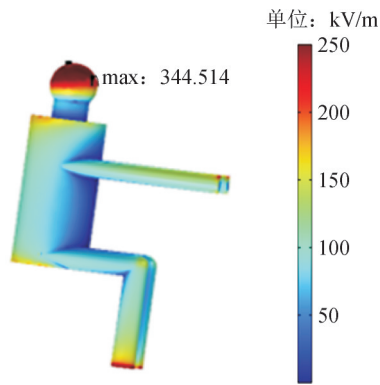


图11 等电位作业的体表电场(坐姿)

Fig. 11 Surface electric field of equipotential working(sitting)

2.3 中间电位作业方式

该作业位置人员处于同侧两水平导线中间,计算危险率时需要考虑两个间隙,分别是右侧导线到人体的间隙 S_1 与左侧导线到人体的间隙 S_2 。作业人员在該位置时的整体模型见图16,整体的电位云图见图17。在該位置时,人员手部的体表电场值最大,为23.18 kV/m,人员处于該位置作业的电场仿真结果见图18、19。

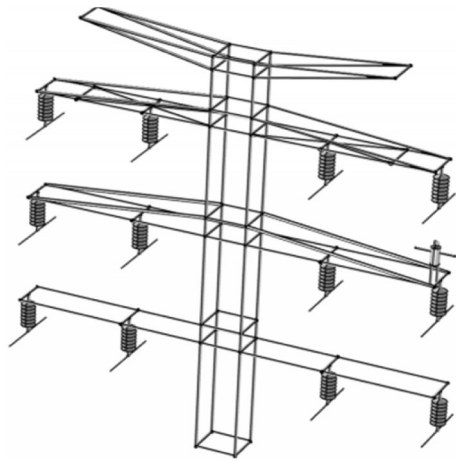


图12 作业人员在横担上

Fig. 12 The operator on the cross-arm

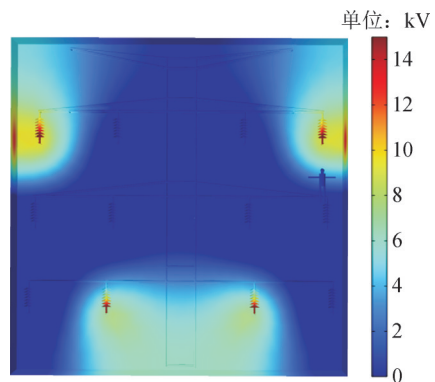


图13 电位云图(人在横担上)

Fig. 13 Potential cloud diagram(human on cross-arm)

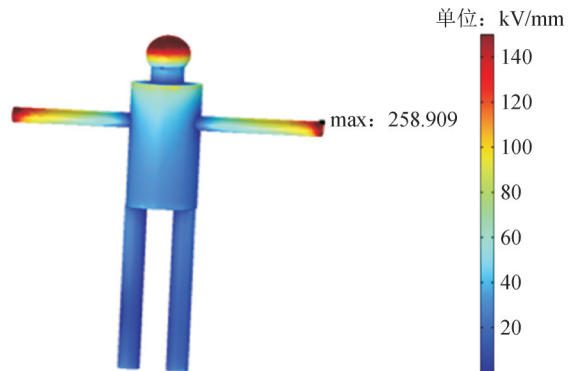


图14 地电位作业人员体表电场(站姿)

Fig. 14 Surface electric field of ground potential operator(standing)

2.4 3种作业方式的对比分析

3种作业方式下人员各部位的体表场强见图20、21。作业时考虑300 mm的活动余地,分别计算上述3种作业方式的带电作业危险率,并将危险率计算结果以及作业时体表电场最大值汇总见表2。综合体表场强与危险率进行对比分析,可以看出:

1)在等电位与地电位两种作业方式典型位置中存在危险率大于 1×10^{-5} 的情况,而中间电位作业方式的危险率均小于 1×10^{-5} ,即满足带电作业要求。

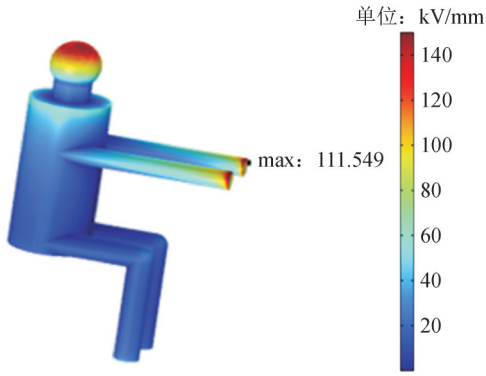


图 15 地电位作业人员体表电场(坐姿)
Fig. 15 Surface electric field of ground potential(sitting)

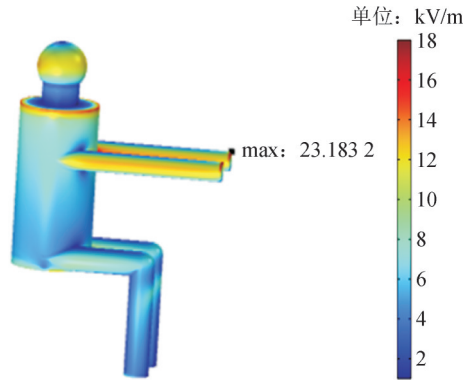


图 19 中间电位作业人员体表电场(坐姿)
Fig. 19 Surface electric field of intermediate potential(sitting)

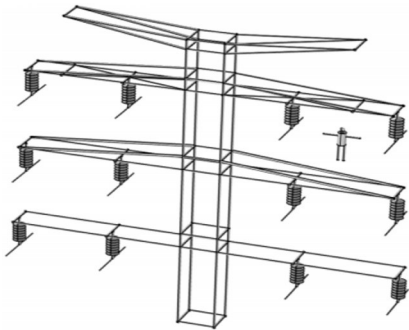


图 16 作业人员在上方水平导线中间
Fig. 16 The operator is in the middle of the upper phase horizontal wire

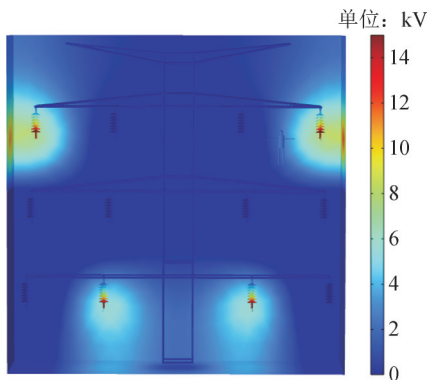


图 17 电位云图(人在上方水平导线中间)
Fig. 17 Potential cloud map(human in the middle of the upper phase horizontal wire)

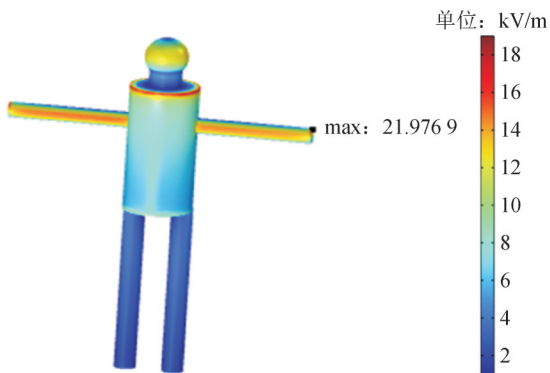


图 18 中间电位作业人员体表电场(站姿)
Fig. 18 Surface electric field of intermediate potential(standing)

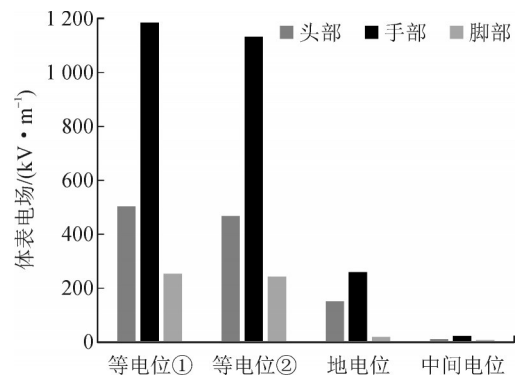


图 20 3种作业方式下人员各部位体表场强(站姿)

Fig. 20 Surface field strength of each part of personnel under three working modes(standing)

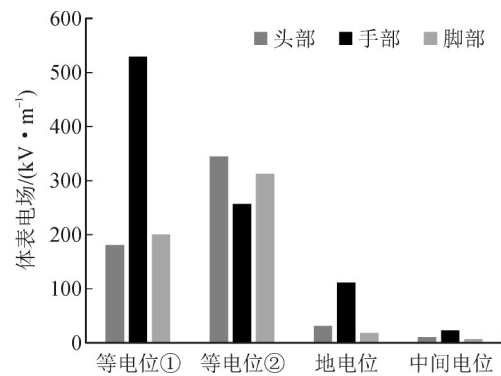


图 21 3种作业方式下人员各部位体表场强(坐姿)

Fig. 21 Surface field strength of each part of personnel under three working modes(sitting)

2)中间电位作业方式的人员体表场强远小于等电位与地电位作业方式。

由上述对比,分析可得:针对钢管塔圆(或方)横担结构的110 kV同塔四回线路而言,采用中间电位作业法进行带电作业更为合适,因为其他两种作业方式无法满足带电作业安全性的要求。

表2 3种作业方式的对比

Table 2 Comparison of three working modes

作业方式	带电作业 危险率	体表电场(站 姿)/(kV·m ⁻¹)	体表电场(坐 姿)/(kV·m ⁻¹)
等电位①	3.26×10 ⁻³	1 184.15	528.91
等电位②	9.31×10 ⁻⁴	1 132.48	344.51
地电位	(S ₁)1.03×10 ⁻⁵	258.91	111.55
	(S ₂)1.38×10 ⁻¹⁶		
中间电位	(S ₁)1.80×10 ⁻¹³	22.02	23.18
	(S ₂)8.08×10 ⁻²¹		

3 中间电位作业法

本节将从原理、进入电场的路径、进入电场至作业位置过程中的危险率、作业时的体表电场几个方面分析介绍并验证该种带电作业方法。

3.1 中间电位作业法原理

采取中间电位作业法时,人员处于带电设备与大地中间的某一电位状态,使用绝缘操作工器具进行作业,因为输电线路电压等级较高,必须保持足够的安全距离才能确保人员的安全,其示意图及等值电路见图22^[24]。

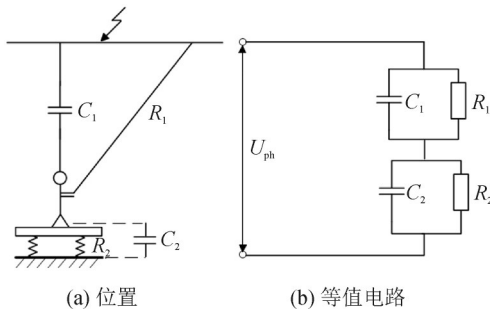


图22 中间电位作业位置示意图及等值电路

Fig. 22 Schematic diagram of intermediate potential working position and equivalent circuit

图22中: R_1 为绝缘杆电阻; R_2 为绝缘平台电阻, C_1 为人员对带电体之间的电容; C_2 为人员对大地的电容;人体处于的电位是

$$U = U_{ph} \frac{j\omega C_2 // R_2}{j\omega C_1 // R_1 + j\omega C_2 // R_2} \quad (1)$$

所以,只要人员与带电体和接地体之间满足规定的安全距离,采用中间电位作业法就能满足安全性的要求。

3.2 进入电场的路径

同塔四回输电塔上相导线空间布局见图23。图23,上层横担与下层横担之间空间高度为4.25 m,绝缘

子串总长为1.6 m,水平相邻的两回线路相距为4 m。选择横担上L形绝缘折叠硬梯的挂点位置时,与待更换的悬垂绝缘子串水平方向距离2~2.2 m为最佳。根据上相导线空间布局提出的进入电场至作业位置的步骤如下(以更换外侧悬垂绝缘子为例),示意图见图24:①作业人员通过绝缘吊篮进入上层横担,从上层横担步行进入到位置1处;②地面工作人员配合横担上的作业人员使用绝缘梯固定装置将L形绝缘硬梯固定在位置1处;③确认绝缘硬梯固定完毕后,作业人员从位置1处通过绝缘硬梯缓慢攀爬至位置2即作业位置处。

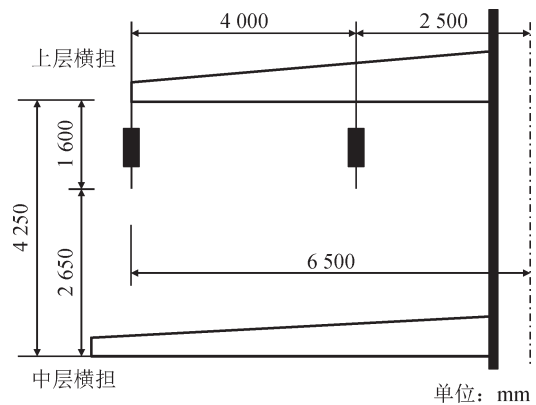


图23 上相导线空间布局

Fig. 23 Space layout of upper phase conductor

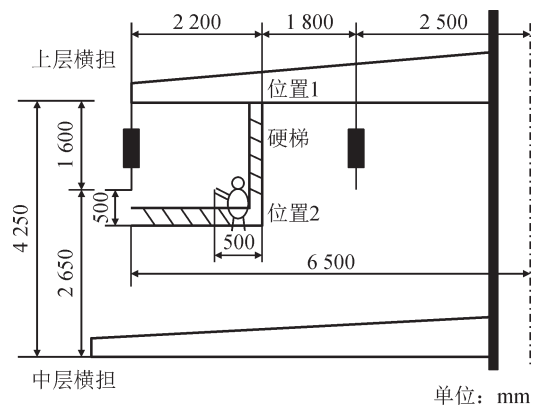


图24 进入电场路径

Fig. 24 Path of entering electric field

3.3 带电作业危险率

文中考虑了0.3 m的活动余地以及0.5 m的人体占位空间,作业人员从上层横担进入电场的过程以及在绝缘梯上作业的活动范围见图25。图25中: S_1 为作业人员与外侧导线的距离, S_2 为作业人员与内侧导线的距离,作业人员从横担进入电场至到达作业位置过程中典型位置的带电作业的危险率计算结果见表3。

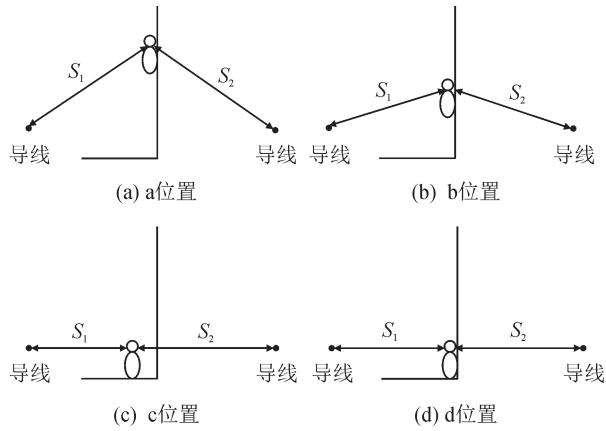


图 25 作业人员在电场中的位置

Fig. 25 Position of workers in the electric field

表 3 危险率计算

Table 3 Calculation of risk rate

所处位置	间隙距离/m	危险率
a	S_1 2.0	5.93×10^{-20}
	S_2 2.1	8.08×10^{-21}
b	S_1 1.8	5.10×10^{-18}
	S_2 1.9	5.06×10^{-19}
c	S_1 1.4	1.80×10^{-13}
	S_2 2.1	8.08×10^{-21}
d	S_1 1.7	5.58×10^{-17}
	S_2 1.8	5.10×10^{-18}

从表3带电作业危险率的计算结果可知:采用中间电位作业法时,作业人员从横担进入电场至到达作业位置过程中,其危险率均满足要求,即小于 1×10^{-5} 。

3.4 作业人员体表电场

作业人员在绝缘硬梯上采用中间电位作业法,采用坐姿为作业姿势,使用绝缘操作杆进行悬垂绝缘子串的更换,作业人员整体模型见图26,整体的电位云图见图27。作业人员的体表场强仿真结果见图28。

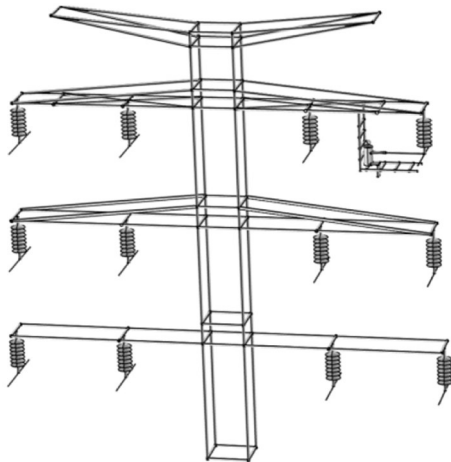


图 26 中间电位法整体模型

Fig. 26 Intermediate potential method overall model

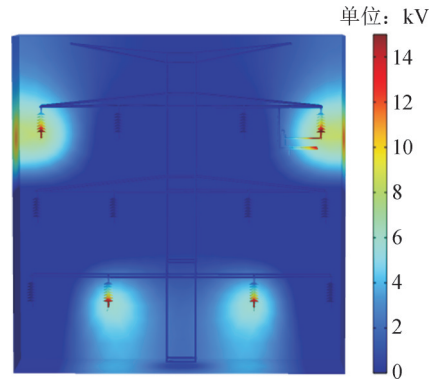


图 27 电位云图(中间电位)

Fig. 27 Potential cloud map(intermediate potential)

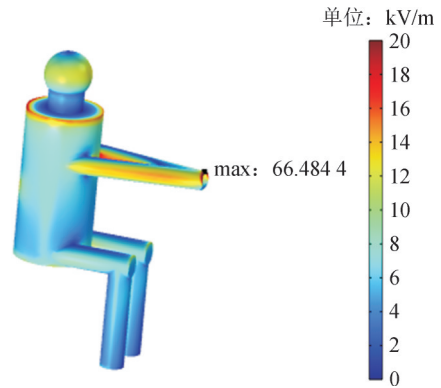


图 28 体表场强仿真

Fig. 28 Body surface field strength simulation

由图28可知,作业人员手持绝缘操作杆作业时,体表电场最大值为66.48 kV/m,最大场强出现在手部,该场强远小于人体感知电场240 kV/m,故使用中间电位作业法带电更换绝缘子串满足可行性与安全性要求。

4 结论

根据钢管塔圆(或方)横担结构的110 kV同塔四回路塔头结构,搭建3种带电作业方式的三维精细模型,从危险率以及体表场强两个方面进行对比分析,得出以下结论:

1)等电位与地电位作业方式,其带电作业危险率均出现了大于 1×10^{-5} 的情况,无法满足带电作业安全性的要求;而中间电位作业法作业过程中的危险率均小于 1×10^{-5} ,满足带电作业安全性的要求,作业人员可在活动范围内进行作业。

2)采用中间电位作业法进行作业时,人员各部位的体表电场相较于采用等电位、地电位作业方式时的人员体表电场要小很多。

3)综上,采用中间电位作业法,使用绝缘操作杆带电更换悬垂绝缘子串,满足安全性要求。在作业过程中,人体体表最大场强出现在手部,为66.48 kV/m,

远小于人体感知电场 240 kV/m,长时间作业需穿戴屏蔽服。

参考文献:

- [1] 罗日成,唐祥盛,李志前,等.500/220 kV 同塔四回输电线路带电作业电场仿真分析[J]. 高压电器,2015,51(8):164-170.
LUO Richeng, TANG Xiangsheng, LI Zhiqian, et al.Simulation analysis on electric field intensity of 500/220 kV four-circuit-on-one - tower transmission line for live working[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(8): 164-170.
- [2] 汪 枫,高宇轩,孙秋芹,等.同塔多回线路非全相运行谐振特性研究[J]. 高压电器,2021,57(4):62-68.
WANG Feng, GAO Yuxuan, SUN Qiuqin, et al.Analysis of resonance characteristics during non-full-phase operation of multi-circuit transmission lines on the same Tower[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(4):62-68.
- [3] 刘 震,高厚磊,郭雅蓉.同塔混压四回线下的单回线故障零序方向元件动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(24):1-12.
LIU Zhen, GAO Houlei, GUO Yarong.Performance analysis of a zero-sequence directional relay for a single-circuit fault in mixed-voltage four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(24): 1-12.
- [4] JIN Yi, XIAO Yum, LIU Ting, et al.Study on circuit service without total outage of the 500 kV transmission line of four circuits on one tower[J]. Electric Power, 2012,45(9):29-34.
- [5] HU Yi, HU Jiayun, LIU Kai, et al.Field strength of body surface during the live working on the UHV AC and DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2010,36(1):13-18.
- [6] 雷兴列,李宇泽,彭 勇,等.复合绝缘子导通性缺陷对带电作业安全距离影响[J]. 中国电力,2019,52(6):134-139.
LEI Xinglie, LI Yuze, PENG Yong, et al.Influence of conductivity defects of composite insulators on live - line working approach distance[J]. Electric Power, 2019,52(6):134-139.
- [7] 陶留海,孙 超,李雪奎,等.±1 100 kV 特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(s1):134-139.
TAO Liuhai, SUN Chao, LI Xuekui, et al.Study on the practical technology for ±1 100 kV UHVDC transmission line live working [J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(s1): 134-139.
- [8] 丁玉剑,李嘉伟,苏 宇,等.±1 100 kV 耐张串双人带电作业安全距离试验和电场分布特性[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):2011-2019.
DING Yujian, LI Jiawei, SU Yu, et al.Minimum approach distance test and electric field distribution characteristic of live working by two workers on ±1 100 kV tension string[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(5):2011-2019.
- [9] 唐 波,李勃铖,奉 彭,等.500 kV 同塔双回输电线路直升机吊索法带电作业进入等电位的路径[J]. 南方电网技术,2020,14(6):71-80.
TANG Bo, LI Bochong, FENG Peng, et al.Path to access equipotential for live working of 500 kV same-tower double-circuit transmission line by helicopter sling method[J]. Southern Power System Technology, 2020,14(6):71-80.
- [10] 刘夏清,邹德华,李 稳,等.110 kV/220 kV 同塔混压四回输电线路带电作业中人体体表场强仿真分析[J]. 电力科学与技术学报,2015(3):131-136.
LIU Xiaqing, ZOU Dehua, LI Wen, et al.Simulation analysis of body surface electromagnetic field in live overhaul of 110 kV/220 kV four - parallel lines on same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015(3): 131-136.
- [11] 鲁 斌,王小丽,孟 毓.220 kV/110 kV 混压同塔四回架空输电线路的应用研究[J]. 华东电力,2009,37(8):1288-1291.
LU Bin, WANG Xiaoli, MENG Yu.Application of quadruple - circuit transmission line with dual voltage 220 kV/110 kV on the same tower[J]. East China Electric Power, 2009,37(8): 1288-1291.
- [12] 杨 琪,汪志刚,夏增明,等.220 kV/110 kV 同塔四回输电线路检修方式及安全防护措施研究[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(2):128-133.
YANG Qi, WANG Zhigang, XIA Zengming, et al.Research on the maintenance method and safety protection measures of 220 kV/110 kV four - parallel lines on same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(2):128-133.
- [13] 安卫中,平林涛.220 kV/110 kV 同塔四回输电线路检修方式及安全防护措施研究[J]. 工业设计,2017(5):180-181.
AN Weizhong, PING Lintao.Study on maintenance mode and safety protection measures of four transmission line of 220 kV/110 kV tower[J]. Industrial Design, 2017(5):180-181.
- [14] 李金亮,邹德华,刘夏清,等.500 kV/220 kV 同塔四回混压输电线路检修作业安全防护研究[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(2):134-140.
LI Jinliang, ZOU Dehua, LIU Xiaqing, et al.Research on security protection of maintenance work on 500 kV/220 kV four - circuit mixed - voltage transmission lines on the same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(2): 134-140.
- [15] YANG Qi, ZOU Dehua, TONG Cheng, et al.The safety analysis of live working on 500/220 kV four-parallel lines on the same tower [C]//2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy(ICPRE).Shanghai: IEEE, 2016: 15-18.
- [16] LI Jinliang, WANG Zhigang, XIA Zengming, et al.Research for the maintenance way of partial outage on 500 kV/220 kV four-circuit mixed-voltage transmission lines on the same tower[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE).Chengdu: IEEE, 2016: 1-4.
- [17] 杨 琪,郭婷婷,李 辉,等.同塔四回输电线路带电作业可行性分析[J]. 高压电器,2018,54(8):7.
YANG Qi, GUO Tingting, LI Hui, et al.Feasibility analysis of live working on the four circuit transmission lines on the same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(8):7.
- [18] 杨 益.110 kV 同塔多回线路带电作业技术研究[J]. 云南电力技术,2015,43(6):87-90.
YANG Yi. Research on suspension insulator string live replacement technology in sametower for 110 kV steel tower structure[J]. Yunnan Electric Power, 2015,43(6):87-90.
- [19] 何光华,王兴宇,徐 骏,等.基于体表电场的 110 kV 电缆终端

- 绝缘子带电作业方式选择研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 186-191.
HE Guanghua, WANG Xingyu, XU Jun, et al. Live working mode selection of 110 kV cable terminal insulator based on body surface electric field[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 186-191.
- [20] 吴田, 王兴宇, 何光华, 等. 带电作业人员侵入 110 kV 电缆终端塔间隙方式对套管及应力锥电场分布的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 73-80.
WU Tian, WANG Xingyu, HE Guanghua, et al. Influence of live worker's intrusion into gap of 110 kV cable terminal tower on the distribution of electric field of bushing and stress cone[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 73-80.
- [21] 刘夏清, 吴东, 李辉, 等. 500 kV 紧凑型同塔双回输电线路带电作业人体体表电场分布特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 87-94.
LIU Xiaqing, WU Dong, LI Hui, et al. Research on electric field distribution characteristics of body surface with live working in compact 500 kV same tower double circuit transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 87-94.
- [22] 同塔多回线路带电作业技术导则: DL/T 1126—2017[S]. 2018. Technical guide for live working on overhead transmission line with multiple circuits on one tower: DL/T 1126—2017[S]. 2018.
- [23] 电业安全工作规程电力线路部分: DL/T 409—2023[S]. 2023. Electricity safety work regulations-power line section: DL/T 409—2023[S]. 2023.
- [24] 张守强. 高压带电作业现状分析及发展研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
ZHANG Shouqiang. Analysis of the current status and development research on high-voltage live working[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- 陈鑫涛(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压输电线路带电作业(通信作者)(E-mail: 2533005840@qq.com)。
马爱清(1975—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为输配电设备新技术、高压电磁模拟。

(上接第 128 页)

- calibration method of gas pressure reducer[J]. Instrumentation Customer, 2020, 27(11): 32-34.
- 赵磊(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备试验与技术监督工作(E-mail: 18548139722@163.com)。
冯汝明(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备试验与技术监督工作(E-mail: 459159374@qq.com)。
刘天宇(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备试验与技术监督工作(E-mail: 18586208468@126.com)。
赵俊(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备试验与技术监督工作(E-mail: 627177435@qq.com)。
种佳丽(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备试验与技术监督工作(E-mail: cjl_dky@163.com)。
陈聪(2000—), 男, 博士研究生, 研究方向为电气设备及其在线智能监测、电气仪器仪表等(E-mail: 18367516925@163.com)。
曾伟(1979—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向为电气设备及其在线监测、电气仪器仪表等(通信作者)(E-mail: zengwei@shroye.com)。
金海勇(1968—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压电气设备状态监测及过障诊断、电气仪器仪表等(E-mail: jinhy@shroye.com)。