

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.07.014

## 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

刘夏清<sup>1</sup>, 吴东<sup>2</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 李稳<sup>1</sup>, 唐祥盛<sup>3</sup>, 罗日成<sup>4</sup>

(1. 国网湖南省电力公司带电作业中心, 长沙 410007; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000;  
3. 国网湖北省电力公司荆州供电公司, 湖北 荆州 434000; 4. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 电场防护是带电作业安全技术研究的重要内容, 关系到作业人员的安全。文中分析了500 kV紧凑型同塔双回输电线路的结构特点, 建立了作业人员体表场强仿真模型, 计算了典型工况下不同作业点人员的体表场强分布, 同时分析了塔型和线路运行方式对人员体表场强分布的影响。计算结果表明: 同一运行方式下, 地电位作业时, 直线塔作业人员的头部和脚部场强较耐张塔高出约4倍; 等电位作业时, 耐张塔作业人员的头部场强较直线塔高243.2 kV/m, 手部较之高出1.9倍。同一塔型作业时, 相同工况下两回运行相比于一回运行对等电位作业影响较大; 地电位仅中间横担处人员体表场强受运行方式影响明显。通过屏蔽效率的计算, 校核了不同工况以及不同作业点应采取的安全防护措施。研究结果可以为带电作业的安全防护工作提供理论参考, 具有一定的工程实用价值。

**关键词:** 带电作业; 紧凑型同塔; 同塔双回; 体表场强

## Research on Electric Field Distribution Characteristics of Body Surface with Live Working in Compact 500 kV Same Tower Double Circuit Transmission Lines

LIU Xiaqing<sup>1</sup>, WU Dong<sup>2</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, LI Wen<sup>1</sup>, TANG Xiangsheng<sup>3</sup>, LUO Richeng<sup>4</sup>

(1. Hunan Provincial Live Working Center of State Grid, Changsha 410007, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company Zibo Power Supply Company, Shandong Zibo 255000, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Company Jingzhou Power Supply Company, Hubei Jingzhou 434000, China; 4. College of Electric and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The electric field protection is an important part of live working security technology research, which related to the workers' safety. This article purposefully analyzes the structural characteristics of compact 500 kV same tower double circuit transmission lines, establishes the simulation model of body surface field strength, and calculates the body surface field strength of different operating points under typical conditions. At the same time, it analyzes the influence of the tower type and line operation mode on body surface field strength distribution. The results show that: under the same operating mode, when working at ground potential, the head and foot field strengths of the personnel working in the linear tower are about 4 times higher than those in the strain towers; When working in equipotential, the head field strength on the strain towers is 243.2 kV/m higher than that in the linear towers, and hand field strength is 1.9 times higher than that in the linear towers. When working in the same tower, compared with one circuit operation mode, two circuit operation modes under the same conditions has a stronger influence on the equipotential operation; When working in ground potential, the influence of the operation mode on the body surface field strength on the cross arm is obvious. Through the calculation of shielding efficiency, the safety protection measures under different working conditions and different operation points are checked. The research results can provide theoretical reference for safety protection of live working, and have certain practical value in engineering.

**Key words:** live working; compact same tower; same tower double circuit transmission lines; body surface field strength

收稿日期: 2017-02-25; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50977003); 电力与交通安全监控及节能技术教育部工程研究中心基金(2010#03)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50977003), Power and Traffic Safety Monitoring and Energy Saving Engineering Research Center of Ministry of Education Fund(2010#03).

## 0 引言

为了减少输电线路走廊的占地面积,降低单位容量线路的成本,采用同塔双/多回输电线路正成为中国电网建设的发展趋势<sup>[1]</sup>。带电作业是在高压电气设备带电的状态下进行的检修,当电气设备处于带电状态时,工作在电气设备周围的作业人员,会受到电气设备所产生的电磁场的影响<sup>[2]</sup>。作业人员进行带电作业时必须采取有效的防护措施,以确保人身安全。因此,对同塔双/多回线路带电作业的安全开展技术研究,是目前我国电网公司亟需解决的技术课题<sup>[3-4]</sup>。

同塔双回输电线路普遍存在以下特征:杆塔高、杆塔型式多样、横担间距离和相间净空距离小、导体布置相对复杂等,这将导致线路周围电场发生严重畸变、安全距离减小等一系列问题的出现<sup>[5-6]</sup>。因此,为保护带电作业人员人身安全,需要对电场分布进行研究。

目前,国内外对500 kV紧凑型输电线路工频电场进行了研究,文[7]中分别对进出500 kV紧凑型杆塔上、中、下三相导线等电位的作业方式进行了试验研究,得到了组合间隙的50%操作冲击放电电压和组合间隙距离的关系曲线,并根据试验结果计算分析了带电作业危险率和所需的最小安全距离,未对作业人员的电场防护进行详细说明;文[8]基于Ansys对高海拔500 kV紧凑型输电线路进行电场环境仿真分析,并与现场测试数据对比分析,未对作业人员进出电场时体表场强的分布情况进行研究。文中以带电作业安全防护为背景,研究同塔双回输电线路人体体表电场分布特性,对确保带电作业人员的人身安全<sup>[9-12]</sup>和电网的可靠运行具有重要的实践意义<sup>[13-14]</sup>。

## 1 计算方法

### 1.1 麦克斯韦方程组

Maxwell方程组是电磁问题分析的基础,由下列4个微分方程组成。

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho. \quad (4)$$

在经典电磁理论中,还有电流连续性方程和洛

伦兹方程

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t}; \quad (5)$$

$$f = qE + q(V \times B). \quad (6)$$

式(1)~(6)中包含了下列变量:场强 $E$ , V/m;电通密度 $D$ , C/m<sup>2</sup>;磁场强度 $H$ , A/m;磁通密度 $B$ , Wb/m<sup>2</sup>;电荷密度 $\rho$ , C/m<sup>3</sup>;电流密度 $J$ , A/m<sup>2</sup>等。

### 1.2 有限元法

有限元法基本思想是将一个复杂的连续介质的求解区域分解为有限个形状简单的子区域(单元),形成原区域的等效离散区域,从而把求解连续体的场变量问题简化为求解有限个单元节点上的场变量问题,而后将求解描述真实连续场变量的微分方程组简化为求解代数方程组,得到近似的数值解。

应用有限元法求解电动势分布的关键在于找出节点上的电动势值,应用一组线性独立的尝试函数和待定系数来表示方程的近似解,并用加权余数法(迦辽金法)和变分法(里海—里兹法)来求解这些待定系数。矩阵方程的形式为

$$[K][b] = [f] \quad (7)$$

式(7)中:[ $K$ ]为 $n \times n$ 阶系数矩阵; $[b]$ 为 $n \times 1$ 阶节点势函数矩阵; $[f]$ 为 $n \times 1$ 阶激励矩阵。

该方程表示了整个区域内未知势函数值与问题的几何结构和激励源的关系,因此常称为整体矩阵方程。系数矩阵中

$$K_{ij} = K_{ji} = \int_{\Omega} \nabla \Psi_i \nabla \Psi_j d\Omega; \quad (8)$$

$$f_i = \int_{\Omega} q \nabla \Psi_i d\Omega. \quad (9)$$

式(8)~(9)中: $\Psi_i, \Psi_j$ 为节点 $i$ 和 $j$ 的形函数; $f_i$ 为整体激励矩阵的某一元素; $\Omega$ 为整个区域; $q$ 为激励。

当 $q=0$ (即激励为零)时, $f_i=0$ 。

令待定系数等于节点的势函数,于是矩阵方程式为

$$[K][\phi] = [f]. \quad (10)$$

若用 $N$ 表示单元的个数,则 $K_{ij}$ 的计算过程可写成

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^N \int_{\Omega^e} \nabla \Psi_i \nabla \Psi_j d\Omega = \sum_{e=1}^N K_{ij}^e; \quad (11)$$

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \nabla \Psi_i^e \nabla \Psi_j^e d\Omega. \quad (12)$$

式(11)~(12)中: $e$ 表示对应于某个单元的量; $\Omega^e$

表示对应于某个单元的子区域;  $K_g^e$  认为是局部系数矩阵的某一单元元素。

用同样的原理可以将整体激励矩阵的某一元素  $f_i$  表示为对应于各个单元的积分之和为

$$f_i = \sum_{e=1}^N \int_{\Omega^e} q \Psi_i d\Omega = \sum_{e=1}^N f_i^e; \quad (13)$$

$$f_i^e = \int_{\Omega} \nabla \Psi_i^e d\Omega. \quad (14)$$

## 2 电场仿真模型

### 2.1 工程概况

文中以星沙变电站 500 kV 龙门架到星城变电站 500 kV 龙门架区间内的交流同塔双回输电线路为研究对象, 全线杆塔型式为直线型和耐张型。紧凑型线路导线采用 6×JL/GIA-300/40 钢芯铝绞线, 地线一根采用 36 芯 OPGW-17-150-3 型复合光缆, 另一根采用 JLB40-150 铝包钢绞线。杆塔主要采用塔型为 5SCZ2。

### 2.2 计算点选取

铁塔表面视为接地导体, 并根据杆塔结构、导线位置及空间电场分布的基本规律选取计算点。

对于直线塔, 考虑到杆塔两侧电场分布的对称性, 只需对塔身一侧电场分布进行计算。当作业人员攀登到离开地面一定高度时开始取点, 由于与导线等高塔身处, 人距塔体垂直距离较小, 为场强较高的地方, 故在该处安排一测量点(见图 1 中 1、4、9、12 位置); 且每回线路绝缘子串悬挂点处是带电作业人员在塔上经常工作的位置, 故选择绝缘子悬挂点处为测量点(见图 1 中 3、7、8、11、15、16 位置); 另外, 选择人站在导线上为一测量点<sup>[15]</sup>(见图 1 中 2、5、6、10、13、14 位置)。电场强度计算点选取位置图见图 1。

对于耐张塔, 该杆塔不具有对称性, 因此有别于直线塔, 所取测量点也有所不同。考虑到上、中、下相绝缘子串悬挂点处是带电作业人员在塔上经常工作的位置, 故选择绝缘子悬挂点处为测量点(见图 2 中 1、2、3、4、6、7、8、9 位置); 另外, 还选择了人处于导线上的等电位作业点(见图 2 中 5 位置)。电场强度计算点的位置图见图 2。

### 2.3 模型的建立

由于 500 kV 同塔双回输电线路有两回相同电压等级的输电线, 但杆塔类型分为直线型和耐张型, 且每种塔型运行方式分为两回不停电、I 回停电和 II 回停电 3 种情况, 共 6 种情形。单回运

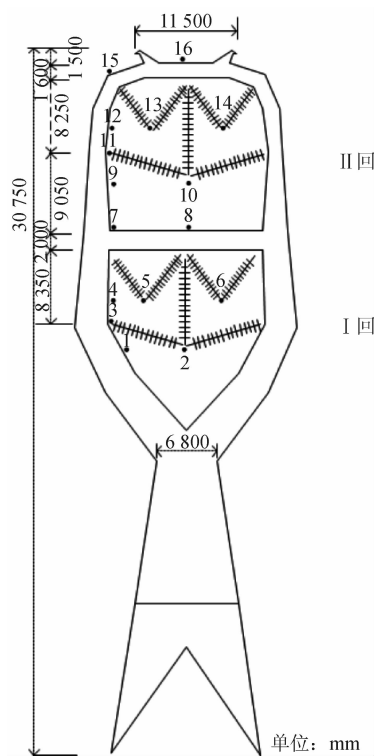


图 1 500 kV 直线塔电场强度计算取值点

Fig. 1 Points for electric field intensity calculation of linear 500 kV towers

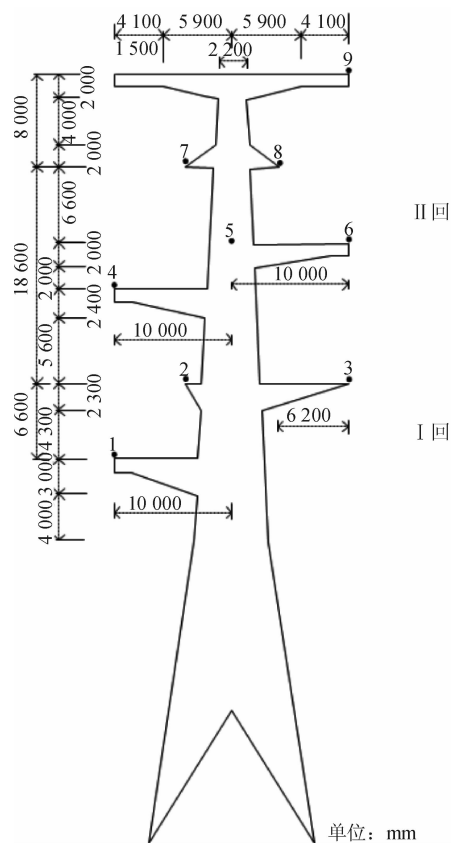


图 2 500 kV 耐张塔电场强度计算取值点

Fig. 2 Points for electric field intensity calculation of 500 kV tension type tower

行时,停电线路由于电磁感应将产生一定的感应电压或电流,停电线路作业安全防护不应忽视。

### 2.3.1 杆塔模型

直线塔采用 Inventor 软件利用二维绘图模块对实际塔型进行 1:1 比例进行建模,然后导入到 Ansoft 软件进行仿真分析;耐张塔使用三维绘图的方式绘制并导入到 Ansoft 软件进行仿真分析。

### 2.3.2 作业人员模型建立

人体模型见图 3,人体各部分的参数见表 1。

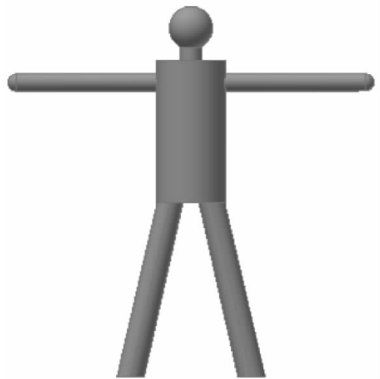


图 3 人体模型

Fig. 3 Human body model

表 1 人体模型尺寸

| Table 1 The size of human body model cm |       |    |      |
|-----------------------------------------|-------|----|------|
| 人体部位                                    | 所用几何体 | 高度 | 半径   |
| 头部                                      | 球体    | 10 | 10.0 |
| 手臂                                      | 圆柱体   | 70 | 4.0  |
| 颈部                                      | 圆柱体   | 7  | 8.0  |
| 腰部                                      | 圆柱体   | 65 | 16.0 |
| 腿部                                      | 圆柱体   | 80 | 6.5  |

## 3 作业人员在不同位置时场强的计算

### 3.1 作业人员在中间电位作业时体表场强

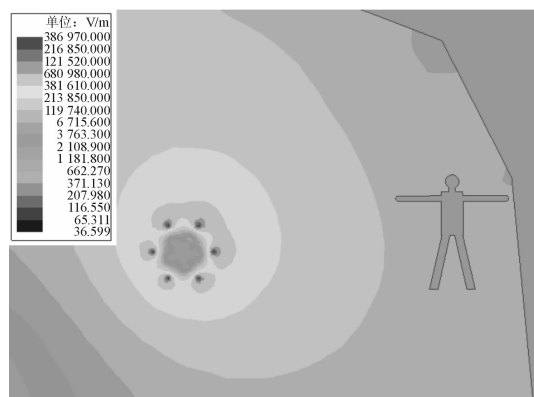
对于直线塔,计算选取人体位于与导线等高处(第 9 计算点),仿真分析 500 kV 两回不停电和 II 回停电 2 种运行方式下人体体表不同部位电场强度,见图 4。人体关键部位场强见表 2。

对于耐张型杆塔,由于杆塔的复杂性,以及作业人员不常活动等情况,一般不考虑中间电位作业的情况,只考虑地电位和等电位作业的情况。

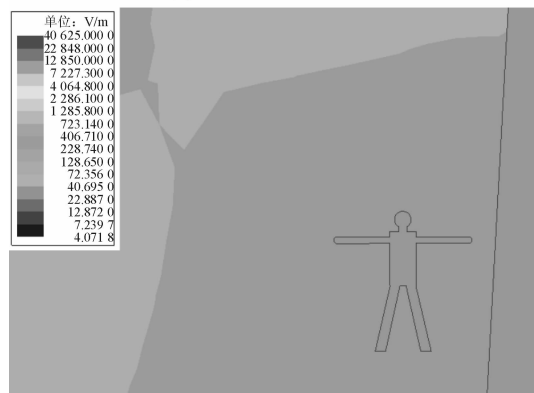
### 3.2 作业人员在地电位作业时体表场强

在直线塔中,500 kV 两回不停电和 II 回停电 2 种运行方式下,人体位于绝缘子垂直上方处(第 15 计算点)体表电场强度,见图 5、表 3。

对于耐张塔,计算选取人体位于绝缘子垂直上方处(第 7 计算点),仿真人体 500 kV 两回不停电和



(a)两回不停电情况下



(b)II回停电情况下

图 4 处于中间电位的人体表面周围电场分布

Fig. 4 The electric field distribution around the body surface in the middle potential

表 2 在中间电位处 2 种运行方式下人体体表不同部位的电场强度

Table 2 The electric field intensity effecting on different positions of the human body about two cases in the middle potential  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$

| 人体部位      | 电场强度    |         |
|-----------|---------|---------|
|           | 第 1 种情况 | 第 3 种情况 |
| 头顶        | 11.43   | 1.29    |
| 手(靠近杆塔一侧) | 17.20   | 0.98    |
| 手(远离杆塔一侧) | 8.10    | 1.12    |
| 脚         | 5.40    | 1.29    |

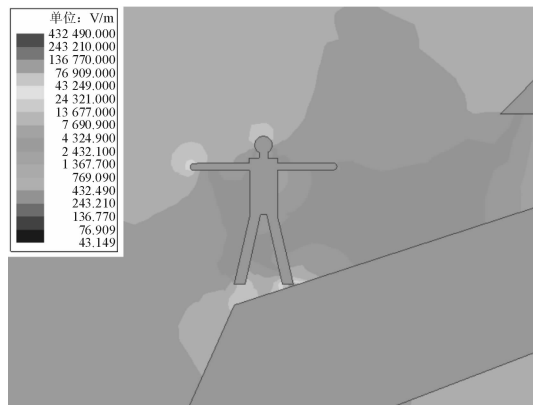
注:第 1 种情况为两回不停电情况下;第 3 种情况为 II 回停电情况下。

II 回停电 2 种运行方式下人体体表不同部位电场强度,见图 6,人体关键部位场强见表 4。

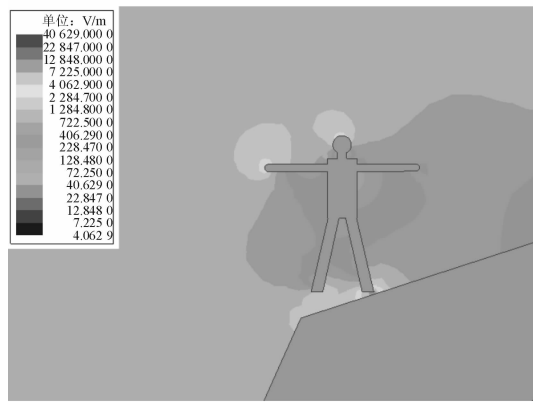
由图 5、6 和表 3、4 可得以下规律,对于地电位上的带电作业人员,无论是两回不停电还是一回单独运行的情况下,在直线塔上的平均场强均大于在耐张塔上的平均场强。仅在两回不停电时,手(远离杆塔一侧)处,直线塔的场强远小于耐张塔的场强。

### 3.3 作业人员位于等电位作业时体表场强

在直线塔上,500 kV 两回不停电和 I 回停电 2 种



(a)两回不停电情况下



(b)II回停电情况下

图 5 直线塔横担上人体表面周围电场分布

Fig. 5 The electric field distribution around the body surface on the cross arm of linear towers

表 3 直线塔横担上(地电位)2 种运行方式下人体体表不同部位电场强度

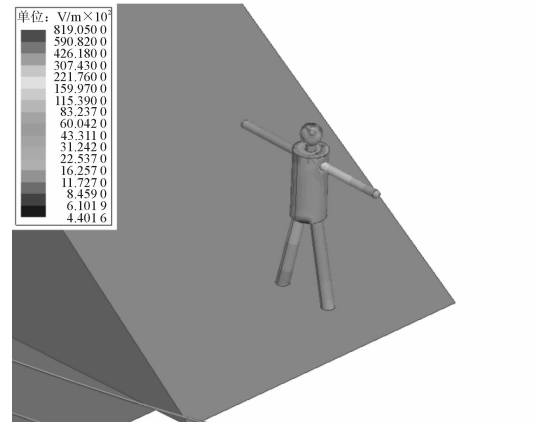
Table 3 The electric field intensity effecting on different positions of the human body about two cases in the ground potential on the cross arm of linear towers  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$

| 人体部位      | 电场强度    |         |
|-----------|---------|---------|
|           | 第 1 种情况 | 第 3 种情况 |
| 头顶        | 24.32   | 4.06    |
| 手(靠近杆塔一侧) | 43.25   | 4.06    |
| 手(远离杆塔一侧) | 7.69    | 1.28    |
| 脚         | 243.21  | 28.85   |

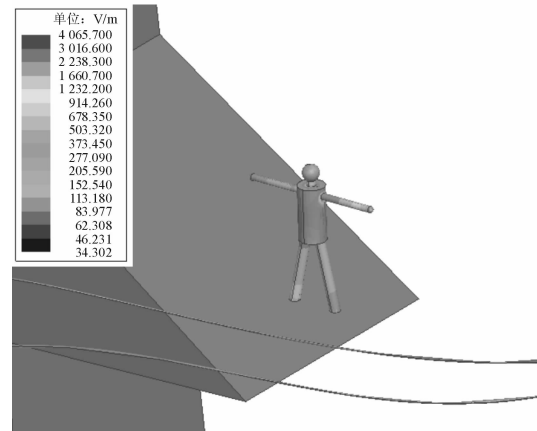
运行方式下,人体位于导线处(第 5 计算点),体表电场强度,见图 7、表 5。

对于耐张塔,计算选取人体位于导线处(第 5 计算点),仿真分析 500 kV 两回不停电和 II 回停电两种运行方式下人体体表不同部位电场强度,见图 8。人体关键部位场强见表 6。

由图 7、8 和表 5、6 可得以下规律,位于等电位工作的带电作业人员,两种运行方式下均有直线塔的平均场强要远小于耐张塔的平均场强。且关键部位均有直线塔的场强小于耐张塔的场强。



(a)两回不停电情况下



(b)II回停电情况下

图 6 耐张塔横担上人体表面周围电场分布

Fig. 6 The electric field distribution around the body surface on the cross arm of the tension type tower

表 4 耐张塔横担上(地电位)2 种运行方式下人体体表不同部位电场强度

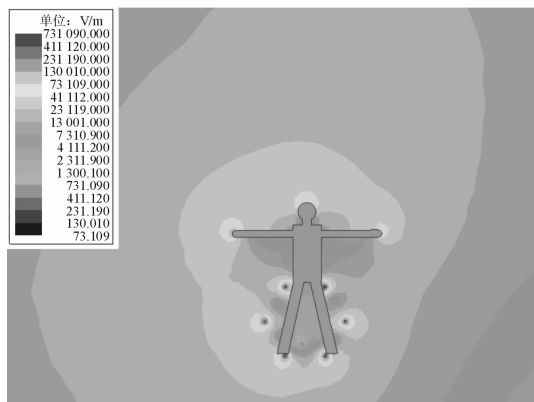
Table 4 The electric field intensity effecting on different positions of the human body about two cases in the ground potential on the cross arm of the tension type tower  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$

| 人体部位      | 电场强度    |         |
|-----------|---------|---------|
|           | 第 1 种情况 | 第 3 种情况 |
| 头顶        | 1.63    | 0.21    |
| 手(靠近杆塔一侧) | 11.54   | 0.28    |
| 手(远离杆塔一侧) | 81.90   | 0.92    |
| 脚         | 6.13    | 4.07    |

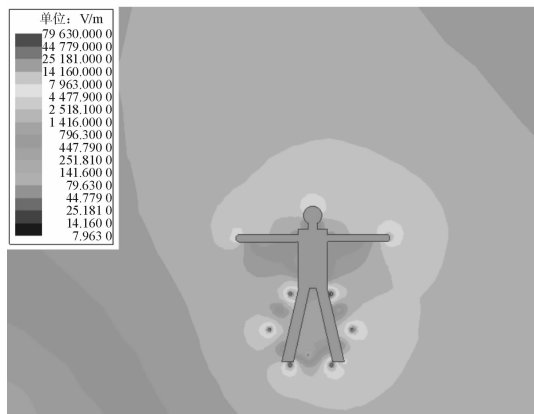
注:第 1 种情况为两回不停电情况下;第 3 种情况为 II 回停电情况下。

#### 4 作业人员电场防护

研究发现:人体在均匀电场中,电场梯度为 25 kV/m 时,人体无不正常反应发生,人体皮肤对表面局部场强的“电场感知水平”为 240 kV/m。关于人体体表场强的测试研究表明,一个中等身材(1.75 m)



(a)两回不停电情况下



(b)II回停电情况下

图 7 直线塔等电位处人体表面周围电场分布

Fig. 7 The electric field intensity distribution of the human body in the equipotential of linear towers

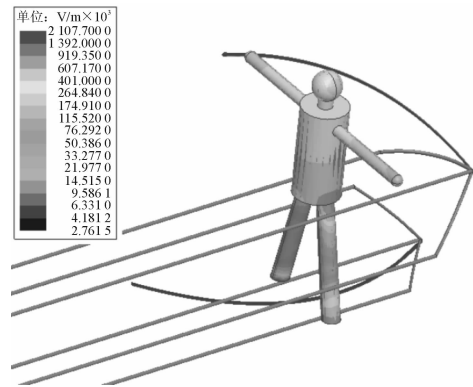
表 5 直线塔 2 种运行方式下在导线处人体表面不同部位的电场强度

Table 5 The electric field intensity effecting on different positions of the human body about two cases in the wires on the linear towers  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 

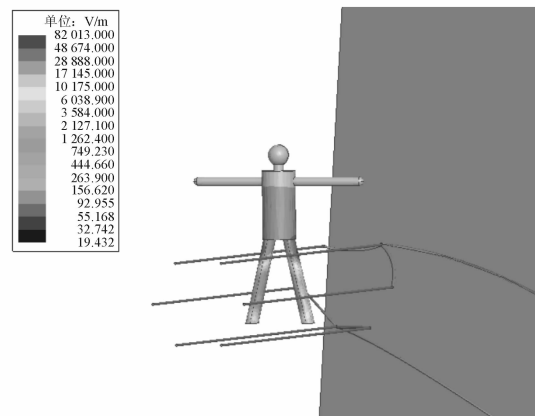
| 人体部位      | 电场强度    |         |
|-----------|---------|---------|
|           | 第 1 种情况 | 第 2 种情况 |
| 头顶        | 68.23   | 7.96    |
| 手(靠近杆塔一侧) | 68.23   | 7.96    |
| 手(远离杆塔一侧) | 121.33  | 14.16   |
| 脚         | 383.69  | 44.80   |

的人站在地面场强为  $10 \text{ kV/m}$  的均匀电场中, 头顶部的局部最高场强可达到周围场强的  $13.5 \sim 14.5$  倍, 即头部最高体表场强可达到  $135 \text{ kV/m}$  以上, 因此, 仿真分析结果符合理论要求。中国在制订《工频电场安全技术标准》时, 曾建议地面场强在  $5 \text{ kV/m}$  以下时, 工作时间不受限制; 在  $5 \sim 8 \text{ kV/m}$  时, 允许工作  $4 \text{ h}$ ;  $8 \sim 12 \text{ kV/m}$  时, 允许工作  $2 \text{ h}$ ; 超过  $20 \text{ kV/m}$  的地方, 则需采取防护措施<sup>[16-18]</sup>。

国家标准 GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》规定, 对于整套屏蔽服, 处于高压直流输电的



(a)两回不停电情况下



(b)II回停电情况下

图 8 耐张塔等电位作业时人体表面周围电场强度分布

Fig. 8 The electric field intensity distribution of the human body in the equipotential about tension type tower

表 6 耐张塔 2 种运行方式下处于导线上的体表不同部位电场强度分布

Table 6 The electric field intensity effecting on different positions of the human body about two cases in the wires on the tension type tower  $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 

| 人体部位      | 电场强度    |         |
|-----------|---------|---------|
|           | 第 1 种情况 | 第 3 种情况 |
| 头顶        | 352.1   | 10.18   |
| 手(靠近杆塔一侧) | 375.6   | 155.68  |
| 手(远离杆塔一侧) | 346.2   | 17.15   |
| 脚         | 567.5   | 82.01   |

带电作业人员, 屏蔽服内的最大场强不大于  $15 \text{ kV/m}$ , 人体局部裸露在外部位的最大交流场强不得大于  $240 \text{ kV/m}$ <sup>[19-20]</sup>。

根据前文中 2 种塔型在典型位置人体表面场强的计算分析, 以及屏蔽效率(SE)的计算公式(即没有屏蔽时接收极上的电压  $U_{\text{ref}}$  与经屏蔽后接收极上的电压  $U$  比值的分贝值), 即

$$SE = 20 \times \lg \left( \frac{U_{\text{ref}}}{U} \right). \quad (15)$$

因此, 可得出如下防护措施:

1)在 500 kV 两回不停电情况下,直线塔等电位作业人员,其脚部的场强为 380 kV/m 左右,大于 240 kV/m 的行业标准,而头部场强为 108.88 kV/m,小于 240 kV/m 的行业标准应穿戴屏蔽效率为 40 dB 的屏蔽服;而耐张塔等电位作业人员,其脚部的场强为 568 kV/m,头部场强达到 352.1 kV/m,远大于 240 kV/m 的行业标准,应穿戴屏蔽效率为 40 dB 的屏蔽服。这对带电作业人员的人身安全极为重要。

直线塔地电位作业人员,其脚部的场强为 243 kV/m 左右,略大于 240 kV/m 的行业标准,头部场强为 66.21 kV/m,应采用屏蔽效率为 40 dB 的屏蔽服,而耐张塔地电位作业人员,最大场强出现在其手部,为 81.9 kV/m,远小于 240 kV/m 的行业标准,故作业人员穿戴常规屏蔽服或静电防护服即可满足要求。

直线塔上与导线平行的中间电位作业人员,其最大场强为 17.2 kV/m,远远小于 240 kV/m 的行业标准,故作业人员穿戴常规屏蔽服或静电防护服即可满足要求。

2)500 kV 单回运行情况下,2 种塔型,500 kV I 回或 II 回停电情况下,由于人体周围最大场强为 155.68 kV/m,当且仅当耐张塔 II 回停电情况下位于等电位位置时,其它测量点的场强均小于 100 kV/m,故作业人员穿戴常规屏蔽服或静电防护服即可。

## 5 结论

作业人员体表场强的分布规律受较多因素的影响,其中最主要的影响因素是作业人员与带电体的距离及人体各部位的特征。通过计算分析得出以下结论:

1)地电位作业时,直线塔作业人员的头部和脚部场强较耐张型高出约 4 倍,手部场强几乎相等;等电位作业时,耐张塔作业人员的头部场强较直线型高 243.2 kV/m,手部较之高出 1.9 倍,塔型对脚部场强影响较小。

2)同一塔型作业时,相同工况下两回运行相比于一回运行对等电位作业影响较大,人员体表电场最大处高出 372.76 kV/m;地电位仅中间横担处人员体表场强受运行方式影响明显,两回运行其电场幅值约是一回时的 9 倍。

3)根据国标 GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》对安全防护指标校核发现:两回同时运行时直线塔等电位及地电位作业人员穿戴屏蔽效率为 40 dB 的屏蔽服,耐张塔等电位作业人员应穿戴屏蔽效率为 40 dB 的屏蔽服满足作业要求。单回运行

时作业人员体表场强均小于 240 kV/m,在停电线路上进行作业穿戴常规屏蔽服或静电防护服即可。

## 参考文献:

- [1] 邬雄,万保权,路遥. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术,2006,32(12):55-58.  
WU Xiong, WAN Baoquan, LU Yao. Study on electromagnetic environment for 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58.
- [2] 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.  
HU Yi, HU Jianjun, 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.
- [3] 胡毅,张俊兰. 500 kV 同杆双回线路塔上作业人员体表场强的测量研究[J]. 中国电力,1999,32(5):53-55.  
HU Yi, ZHANG Junlan. The measurement and research of electric field intensity on human-body surface at 500 kV double-circuit transmission line[J]. Electric Power, 1999, 32(5), 53-55.
- [4] 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法分析[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.
- [5] 柏克寒,倪建华,田应超,等. 220~500 kV 输电线路塔上电场分布人体感应电流测量及防护的研究[J]. 华中电力,1994,7(2):33-35.  
BAI Kehan, NI Jianhua, TIAN Yingchao, et al. 220~500 kV transmission of electric field distribution in human body induction current measurement and protection of the tower[J]. Central China Electric Power, 1994, 7(2): 33-35.
- [6] 胡涛,胡毅,李景禄,等. 输电线路带电作业安全防护研究[J]. 高电压技术,2006,32(12):74-77.  
HU Tao, HU Yi, LI Jinglu, et al. Safety protection for live working on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 33-35.
- [7] 丁玉剑,宋刚,陈稼苗,等. 500 kV 同塔双回垂直排列紧凑型输电线路带电作业试验研究[J]. 电网技术,2013,37(11):81-87.  
DING Yujian, SONG Gang, CHEN Jiamiao, et al. Experimental research on live working carried on double circuit vertically arranged 500 kV compact transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 81-87.
- [8] 刘红文,杨卓,谭向宇,等. 高海拔 500 kV 紧凑型输电

- 线电场仿真分析与对比研究[J]. 电线电缆, 2013(2): 41-44.
- LIU Hongwen, YANG Zhuo, TAN Xiangyu, et al. High altitude of 500 kV compact transmission lines electric field simulation analysis and comparative study[J]. Electric Wire & Cable, 2013(2): 41-44.
- [9] 王建华, 文 武, 阮江军. 特高压交流输电线路工频磁场在人体内的感应电流密度计算分析[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 7-11.
- WANG Jianhua, WEN Wu, RUAN Jiangjun. Calculation and analysis on power frequency magnetic field induced current density within human body under UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 7-11.
- [10] 刘元庆, 邹 军, 张 波, 等. 高压电力线路工频电场对人体影响的分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 35-37.
- LIU Yuanqing, ZOU Jun, ZHANG Bo, et al. Analysis of influence of 50 Hz electric fields generated by the high voltage power lines on human body[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 35-37.
- [11] 胡 毅, 翁 旭. 三峡 500 kV 同塔双回线路带电作业试验研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 57-58.
- HU Yi, WONG Xu. The research of live-working on sanxia 500 kV double transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 57-58.
- [12] 罗日成, 李志前, 李 稳, 等. 王力农. 同塔四回混压输电线路感应电压与电流分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 52-59.
- LUO Richeng, LI Zhiqian, LI WEN, et al. Induced voltage and current analysis for four-circuit transmission line with different voltage classes on the same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 52-39.
- [13] 柏克寒. 500 kV 带电作业时入电场的几个问题[C]//带电作业技术实践与研究论文集. [S.l.]: 四川省电机工程学会供用电专委会, 1995: 24-27.
- BAI Kehan. Several problems in 500 kV live line work when the electric field[C]//Charging Technology Practice Assignments and Essays. [S.l.]: Sichuan Institute of Electrical Engineering Power Supply Branch, 1995: 24-27.
- [14] 杨新法, 刘洪正, 孟海磊, 等. 660 kV 直流输电带电作业安全防护的试验研究[J]. 电力建设, 2012, 33(3): 1-5.
- YANG Xinfa, LIU Hongzheng, MENG Hailei, et al. Experimental research on safety protection for live-wire operation on  $\pm 660$  kV DC power transmission line[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(3): 1-5.
- [15] 顾祥庆. 国内外 500 kV 屏蔽服综述[J]. 东北电力大学学报, 1995(10): 59-62.
- GU Xiangqing. Domestic and foreign 500 kV shielding clothing review[J]. Journal of Northeastern Electric Power, 1995(10): 59-62.
- [16] DL 409—1991 电业安全工作规程[S]. 1991.
- DL 409—1991 Safety code of electric power industry [S]. 1991.
- [17] 师宝安, 李 倩. 500 kV 同塔四回输电线路的感应电压和感应电流[J]. 电力建设, 2012, 33(9): 31-34.
- SHI Bao'an, LI Qian. Induced voltage and current of transmission line of 500 kV quadruple-circuit in one tower[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9): 31-34.
- [18] 卢 刚. 660 kV 直流输电线路带电作业技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- LU Gang. Live working technology of  $\pm 660$  kV DC transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [19] 胡 毅, 裴定珍, 王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(12): 31-33.
- HU Yi, NIE Dingzhen, WANG Linong. Research on safety operation of 500 kV compact double-circuit transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(12): 31-33.
- [20] 易 辉. 带电作业技术标准体系及标准解读[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- YI Hui. Standard system and interpretation of live working technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- 刘夏清(1962—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事带电作业的研究与培训工作。
- 吴 东(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统过电压、输电线路电磁环境分析、绝缘子覆冰研究、劣化绝缘子检测。