

500 kV 变电站中巡检机器人对人体的电场分布影响

李永明¹, 何胜鱼¹, 徐禄文², 王旭旭³, 邹岸新²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 3. 浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 随着变电站中智能化设备的广泛应用, 巡检机器人在变电站中愈加常见, 工作人员与巡检机器人的接触增多, 但对此种情况下人体工频电场暴露水平以及感应电流的研究并不多见。本文结合模拟电荷法和有限元法, 对处于变电站开关场区域中的人体与巡检机器人周围电场分布以及人体内电流进行计算分析。结果表明, 作业人员应当首先弯腰靠近巡检机器人, 然后下蹲对巡检机器人进行检查, 这样可保证作业人员身体各部位保持较小的感应电流密度, 最大程度保证作业人员身体免受伤害。

关键词: 变电站; 巡检机器人; 开关场; 模拟电荷法; 有限元

DOI: 10.12067/ATEEE1911019 **文章编号:** 1003-3076(2020)09-0074-07 **中图分类号:** TM12

1 引言

变电站中设备众多, 分布复杂^[1-2]。变电站新增的智能设备虽然使变电站的运行与控制更加智能化, 但使变电站的电磁环境分布更加复杂。巡检机器人代替工作人员在变电站内进行巡检作业, 弥补了人工巡检的缺陷, 将会在变电站中得到更加广泛的应用^[3-5]。但变电站内巡检机器人和作业人员同时进行作业, 或作业人员对巡检机器人进行检查时, 两者无可避免会发生相遇, 由于两者都对地绝缘, 均存在感应电荷, 因此距离较近时, 会产生较大的电位差, 使人体内部的感应电流增加, 并可能在人体内部产生反应, 如接触时的疼痛感、抽搐等^[6]。

目前国内外对工频电磁场中人体的感应电场以及感应电流密度已经做了很多研究^[6-10]。如文献[7]用 ANSYS 计算了特高压变电站中人体的工频电场暴露水平以及电流密度; 文献[8]用 COMSOL 分别计算了在极低频时磁场和电场作用下人体内感应电流和感应电场的分布。这些文献的结果表明, 人体在高压输电线下以及变电站中其体内电场强度以及电流密度均未超过国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)规定的电磁场暴露限值^[11,12]。现有研究以有限元法(FEM)为主流方法, 但变电站中设备复

杂, 且其中电磁场为开域场, 若用传统有限元方法会增加计算量, 降低计算效率^[7]。且现有研究只考虑了仅有人体且人体为站立的情况, 对于变电站中同时存在作业人员与巡检机器人的情况未曾研究, 也鲜有对人体弯腰姿势与下蹲姿势的研究。此外, 若对变电站中同时存在作业人员与巡检机器人时其电场分布及电流密度直接进行测量存在困难, 而对人体组织内部的电流密度进行直接测量也不可行^[13]。

因此, 本文以 500 kV 变电站为研究对象, 建立简化人体模型与巡检机器人模型, 采用模拟电荷法(CSM)与有限元结合的分析方法, 研究变电站中人体站立、弯腰以及下蹲姿态靠近巡检机器人情况下人体周围电场分布和人体内部感应电流密度, 对作业人员如何更加安全地在有巡检机器人存在的变电站中进行作业提出了建议。

2 计算原理

2.1 模拟电荷法与有限元法

模拟电荷法基于电场的唯一性定理, 将带电体上的自由电荷或介质分界面上的束缚电荷用计算区域外的模拟电荷等效替代。本文开关场中导线电荷为线电荷。如图 1 所示, 将导线划分为 l 个长度为 L 的线电荷单元, 每单元线电荷所带电荷量线性分布。

收稿日期: 2019-11-08

作者简介: 李永明(1964-), 男, 江西籍, 副教授, 博士, 主要研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容及环境保护; 何胜鱼(1996-), 女, 重庆籍, 硕士研究生, 主要研究方向为数值计算及输变电系统电磁环境研究等。

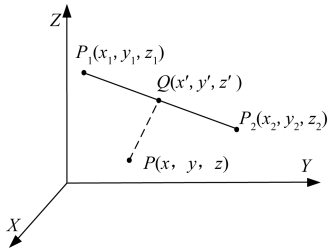


图 1 线电荷基本单元

Fig.1 Line charge basic unit

则该线电荷基本单元对 P 点产生的电位为:

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\tau(u)}{D} du \tag{1}$$

式中, $\tau(u)$ 为线电荷密度,其大小与导线两端点的线电荷密度有关; ϵ_0 为真空介电常数; D 为源点到 P 点的距离。开关场中的门型架与接地体用电电荷等效,点电荷在空间任一点 P 产生的电位为:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} \tag{2}$$

式中, R 为源点到待求点的距离; q 为电荷量。

将点电荷与线电荷结合,可以得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} P_\tau & P_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_\tau \\ \Phi_q \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, P_τ 与 P_q 分别为线电荷与点电荷点系数矩阵; τ 与 q 分别为待求线电荷量与点电荷量; Φ_τ 与 Φ_q 分别为匹配点电位。求出电荷量后,再取若干已知电位的校验点进行校验,直到满足精度要求。

有限元法将泊松方程或拉普拉斯方程转换为相应的变分问题,再对区域进行剖分插值,将变分问题离散化,得到一组多元代数方程。

求解输电线以及电力设备在空间中产生的电场,属于 Laplace 边值问题:

$$\begin{cases} -\epsilon \nabla^2 \varphi_1 = 0 & \in \Omega \\ \varphi_1 = \varphi_0 & \in \Gamma_1 \end{cases} \tag{4}$$

式中, ϵ 为空间中介电常数; φ_1 为空间中电场; Ω 为计算区域; Γ_1 为计算区域的边界; φ_0 为边界上的电位值。

将计算区域剖分成四面体单元,选取插值函数,最后将变分问题离散化,得到如下的有限元方程:

$$[k][\varphi_1] = 0 \tag{5}$$

式中, $[k]$ 为总电场能系数矩阵; $[\varphi_1]$ 为待求电位。

2.2 模拟电荷法与有限元法结合的算法

由于巡检区域远大于巡检机器人自身,用模拟电荷法计算整个区域电场分布,并确定边界电势不

受巡检机器人影响的区域大小。用模拟电荷法计算区域边界上的电位值,对有限元计算边界进行插值,即可求得计算区域上的电场分布。计算流程图如图 2 所示。

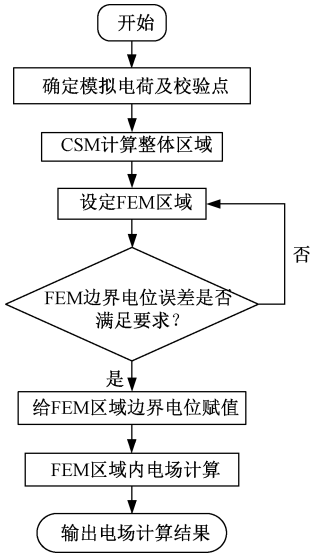


图 2 模拟电荷法与有限元法相结合计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of combination of CSM and FEM

3 计算方法验证

3.1 有限元区域边界的确立

以三相输电线下方只存在巡检机器人为例,说明确立有限元边界的方法。设置一 $0.6\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的接地体代替巡检机器人,放置在三相输电线下方。三相输电线高 6 m ,沿 y 轴方向长 40 m ,A 相位置 $x=0\text{ m}$,B、C 相依次沿 x 轴方向增加 6 m 。接地体中心处于 A 相正下方 $x=0\text{ m}$ 、 $y=10\text{ m}$ 处。三相输电线电压为 400 kV ,导线为四分裂导线,为简化计算,将输电线等效为一根导线。等效计算图如图 3 所示。

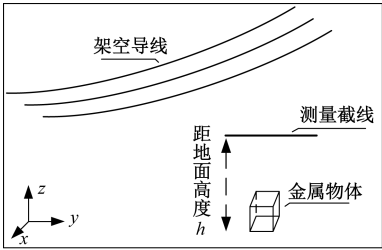


图 3 等效计算图

Fig.3 Diagram of equivalent calculation

经计算,发现接地金属物体正中心上方对电势影响最大,则对照有无接地物体时,分析接地体中心

上方 2 m、2.5 m、3 m、3.5 m 高度处的电势分布情况。用电位误差来具体分析有无接地金属物体时的电位变化。设电位相对误差为：

$$\delta\% = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\%$$

(6)

式中, V_0 为不存在金属物体时, 截线中心位置的电位; V_1 为有金属体时, 截线中心位置电位。

有无金属接地体时, 不同高度对应的电位分布和电位相对误差如表 1 所示。

表 1 电位分布和相对误差

Tab.1 Potential distribution and relative error

对应截线高度 h/m	无接地体 $x=0\text{ m}$ 处电位 V_0/kV	有接地体 $x=0\text{ m}$ 处电位 V_1/kV	误差 $\sigma(\%)$
2	13.08	12.04	7.95
2.5	16.53	15.89	3.87
3	20.09	19.66	2.14
3.5	23.82	23.49	1.38

由表 1 可知, 随着截线高度增加, 金属物体中心位置上方电势逐渐增大, 电势误差逐渐减小。当截线距离地面高度为 3 m 时, 误差为 2.14%, 低于 3%, 可为满足误差要求。此时截线与金属物体之间的距离为 2.1 m, 因此可设有限元研究域为 5 m×5 m×3 m (长×宽×高) 的长方体。

3.2 混合算法验证

为验证计算方法的有效性, 取沿垂直于输电线方向长 2 m、高 1.5 m 的路径, 路径中心与接地体中心重合, 分别用混合算法与模拟电荷法计算此路径上的电场, 计算结果对比如图 4 所示。

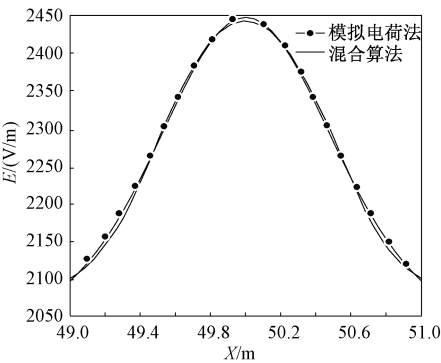


图 4 计算结果对比
Fig.4 Comparison of calculation results

由图 4 可知, 两种方法的计算结果吻合较好, 因此可用混合算法计算人与巡检机器人周围电场分布。

4 巡检机器人与人体模型建立

4.1 巡检机器人模型建立

巡检机器人主要组成部分有行走装置, 摄像装置, 热成像装置, 声音、温湿度等信息采集装置, 电气箱体。对照图 5 所示的巡检机器人实物, 建立变电站巡检机器人简化计算模型, 如图 6 所示。



图 5 变电站巡检机器人实物图
Fig.5 Substation inspection robot

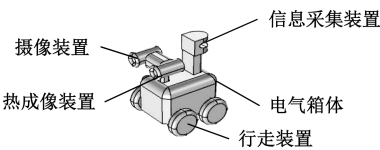


图 6 机器人简化计算模型图
Fig.6 Simplified calculation model of robot

巡检机器人对应各部分简化计算参数为：

- (1)行走装置:由半径为 0.12 m 的四个车轮组成。
- (2)摄像装置:简化成圆柱体,底面半径为 0.06 m、长度 0.23 m。
- (3)热成像装置:简化模型与摄像装置相同。
- (4)信息采集装置:0.18 m×0.17 m×0.15 m 的长方体。
- (5)电气箱体:长宽高为 0.55 m×0.4 m×0.35 m 的长方体。

巡检机器人行走装置外部相对介电常数为 5, 电导率为 1.5 S/m;其余部分为金属材质,电导率为 $3.774\times10^7\text{ S/m}$ 。

4.2 人体模型建立

人体高度为 1.75 m, 参照《GB10000-88 中国成年人人体尺寸标准》建立人体简化模型^[15], 人体简化模型及各部分在工频条件下电参数见表 2。

表 2 人体各部位简化模型参数及电参数
Tab.2 Simplified model parameters and electrical parameters in different parts of human body

身体部位	头部	躯干	手臂	腿部
形状及大小/cm	球体; 半径 9.6	长宽高: 47、 30、 58	圆柱; 半径 4、 高 58	圆柱; 半径 7.5、 高 90
电导率/(S/m)	0.075	0.02	0.7	0.23
相对介电常 ϵ_r	1.2×10^7	8 800	5 300	1.8×10^7

鞋底为厚 2 cm 的橡胶,设置半径为 12 cm 的塑料半球壳作为安全帽,厚度为 0.2 cm,忽略安全帽边沿。安全帽与鞋的相对介电常数均为 5。综上,人体模型如图 7 所示。

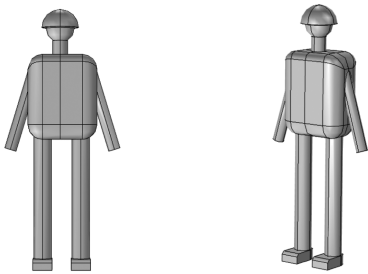


图 7 人体简化计算模型
Fig.7 Simplified calculation model of human body

5 巡检机器人与人体的电场相互影响

5.1 开关场电场分布

变电站开关场下的电场为整体场强最大处。因此以巡检机器人对 500 kV 开关场进行巡检工作为例,分析巡检机器人与人体的相互影响。考虑接地支柱和门型架,对开关场区域建立简化计算模型,如图 8 所示。计算区域均为空气介质。

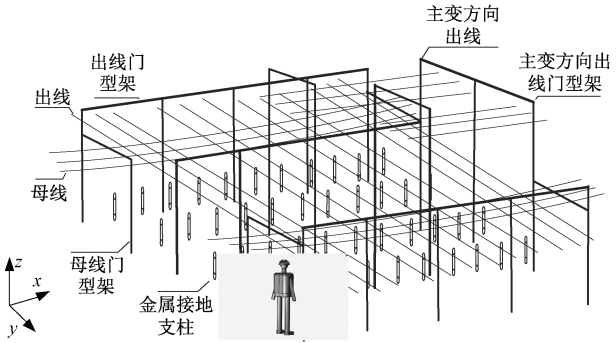


图 8 500 kV 开关场透视图
Fig.8 Perspective of 500 kV switching field

模拟电荷法计算的电场分布如图 9 所示,电场

幅值为9 434.2 V/m。假设作业人员单独站在变电站中场强最高处,即第二回母线末端外侧相(C 相)门型架附近,如图 8 所示。为验证计算方法与模型的有效性,取 $y=18\text{ m}$, $x=10\sim80\text{ m}$,即母线外侧相下方的一条路径,将计算值与实测值对比,如图 10 所示。

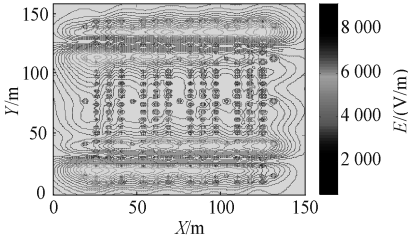


图 9 500 kV 开关场电场分布图
Fig.9 Electric field distribution map of 500 kV switching field

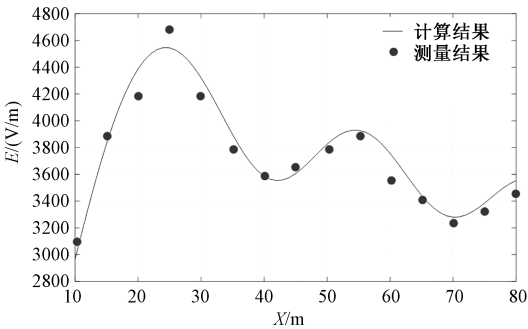


图 10 计算结果与实测值对比
Fig.10 Comparison between calculation results and measured values

5.2 人与巡检机器人同时存在时电场分布

本文考虑开关场中仅存在人体时、人体与巡检机器人相距 1.8 m 时、相距 1m 时、站立检查巡检机器人、弯腰检查巡检机器人以及下蹲检查巡检机器人这 6 种情况,分析人体与巡检机器人周围的电场分布情况。上述 6 种情况的示意图以及电场分布图如图 11~16 所示。

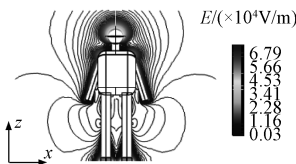


图 11 仅有人体
Fig.11 Human body only

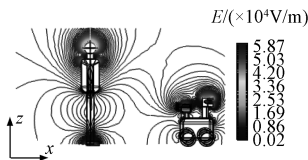


图 12 相距 1.8 m
Fig.12 1.8 m apart

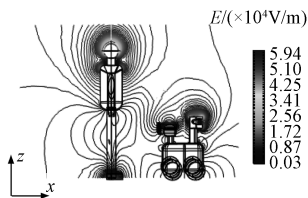


图 13 相距 1 m
Fig.13 1 m apart

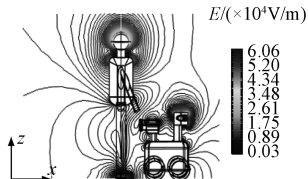


图 14 站立检查机器人
Fig.14 Standing inspection

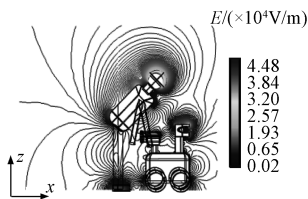


图 15 弯腰检查机器人
Fig.15 Squatting inspection

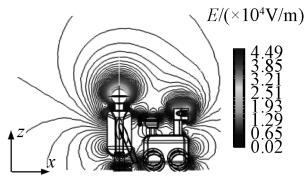


图 16 蹲下检查巡检机器人
Fig.16 Bending inspection

表 3 人体各部位以及巡检机器人各装置周围电场

Tab.3 Electric field around human body parts and inspection robot devices

(单位:kV/m)

不同情况	头部 电场	臀部 电场	热成像装置 电场	信号采集 装置电场
仅有人体	57	5.9	—	—
相距 1.8 m	59.4	6.4	24.5	50
相距 1 m	60	6.7	18.7	32
站立检查 机器人	60.6	6.9	3~5	30
弯腰检查 机器人	47.7	12	0.5~1.5	30
下蹲检查 巡检机器人	45.5	1.5	0.5~1.5	40

从表 3 中数据可以看出,随着人体与巡检机器人距离越来越远,人体头部与臀部畸变电场越来越大,站立检查时离机器人最近,因此此时畸变数值最大;但是若人弯腰并蹲下,畸变电场会逐渐降低;随着人体的靠近与人的弯腰并蹲下,人体对巡检机器人的屏蔽作用越来越大,因此巡检机器人热成像装置与信号采集装置周围电场越来越小。

5.3 巡检机器人存在时人体的电流密度

由于工频电磁场的波长远大于所研究对象的几何尺寸,因此可以认为在人体中可以略去位移电流^[16],人体中电流密度计算结果如表 4 所示。

表 4 不同情况下人体各部位感应电流密度

Tab.4 Induced current density in different parts of human body under different conditions

(单位: mA/m²)

不同情况	电流密度	头部	颈部	躯干	手臂	腿部
无巡 检机器人	幅值	4.632	5.585	4.154	2.822	5.685
	平均值	0.381	1.132	0.255	0.186	1.855
人与巡检 机器人相 距 1 m	幅值	4.469	8.584	4.327	4.602	5.687
	平均值	0.398	1.498	0.259	0.178	1.841
站立检查 巡检机器人	幅值	5.168	9.842	4.326	3.943	5.895
	平均值	0.401	1.512	0.259	0.175	1.812
下蹲检查 巡检机器人	幅值	3.386	5.910	2.453	0.248	2.794
	平均值	0.263	0.971	0.119	0.081	0.781
弯腰检查 巡检机器人	幅值	2.565	3.926	2.107	1.039	2.814
	平均值	0.298	1.006	0.190	0.081	1.046

表 3 列出了以上 6 种情况下,人体各部位与巡检机器人各装置周围的畸变电场数值。

由表 4 可知,巡检机器人在人体正前方 1 m 远,人体颈部感应电流密度幅值增加 53.7%、平均值增加 32.33%;人体手臂感应电流密度幅值增加

63.08%、平均值没有明显变化;人体其他部位感应电流密度幅值和平均值没有明显变化。人站立检查巡检机器人时,颈部电流密度幅值达到 9.842 mA/m²,相较于没有巡检机器人时增加 76.22%,非常接近 ICNIRP 导则中规定的工频条件下电流密度职业暴露限值 10 mA/m²[11]。则变电站作业人员站立时当注意与巡检机器人的距离。

人体弯腰检查巡检机器人时,人体头部、颈部感应电流密度幅值相较于下蹲时均有减小:颈部减小 33.57%,头部减小 24.25%,手臂感应电流密度幅值有所增加,但数值较小。

人体靠近巡检机器人下蹲后,相较于站立时,各部位的感应电流密度幅值和平均值均有明显下降。其中头部感应电流密度幅值降低 34.48%、平均值降低 52.47%;颈部感应电流密度幅值降低 39.95%、平均值降低 35.78%;躯干感应电流密度幅值降低 43.30%、平均值降低 54.05%;手臂感应电流密度幅值降低 93.71%、平均值降低 53.71%;腿部感应电流密度幅值降低 52.60%、平均电流密度降低 56.90%。

由以上三种计算结果可知:人体站立靠近巡检机器人,人体各部位的感应电流密度幅值和平均值均最大,且两者电位差也为最大;人体靠近巡检机器人为下蹲状态,人体与巡检机器人的相对电位差最小;人体靠近巡检机器人处于弯腰 45°姿态,人体各部位的感应电流密度幅值和平均值与人体呈下蹲姿态时相近,总体略偏小于人体呈下蹲姿态,人体与巡检机器人的电位差处于三者之间。

6 结论

(1)为研究人体与巡检机器人在 500 kV 变电站开关场区域的电场相互影响,本文结合模拟电荷法与有限元法,对巡检机器人及人体建立模型并计算其周围电场分布。为进一步研究巡检机器人对人体的影响,计算了人体内电流密度。

(2)计算结果表明,人体站立检查巡检机器人时,头部畸变电场幅值最大,颈部感应电流密度幅值接近职业暴露限值 10 mA/m²;下蹲时头部电场幅值最小;弯腰 45°时,各部位的感应电流密度幅值略小于下蹲姿态。

(3)作业人员应首先弯腰靠近巡检机器人,然后下蹲对巡检机器人进行检查,这样可避免巡检机器人与人体之间的电位差对人体的电击效应,又可

保证作业人员在整个过程中身体各部位保持较小的感应电流密度,最大程度保证作业人员身体免受伤害。

参考文献 (References):

- [1] Harimurugan D, Puneekar G S. Electric field reduction in an EHV substation for occupational exposure via transposition of conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (6): 3147-3154.
- [2] 张建功, 赵军, 干喆渊 (Zhang Jiangong, Zhao Jun, Gan Zheyuan). 应用时域积分法的变电站内开关操作空间电磁场分析 (Electromagnetic field analysis of operation space of switch in substation based on time domain integration method) [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版 (Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition))), 2018, 45 (2): 70-74.
- [3] 鲁守银, 张营, 李建祥, 等 (Lu Shouyin, Zhang Ying, Li Jianxiang, et al.). 移动机器人在高压变电站中的应用 (Application of mobile robot in high voltage substation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (1): 276-284.
- [4] 李振宇, 郭锐, 赖秋频, 等 (Li Zhenyu, Guo Rui, Lai Qiupin, et al.). 基于计算机视觉的架空输电线路机器人巡检技术综述 (Survey of inspection technology of overhead transmission line robot based on computer vision) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2018, 51 (11): 139-146.
- [5] 马爱清, 王淑情, 张绮华, 等 (Ma Aiqing, Wang Shuqing, Zhang Qihua, et al.). 高压交流输电线路暴露场强限值下人体感应电场和感应电流分析 (Induced electric field and induced current analysis of human body at exposure limits of electric field generated by HVAC transmission lines) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (5): 1637-1643.
- [6] 王青于, 杨熙, 廖晋陶, 等 (Wang Qingyu, Yang Xi, Liao Jintao, et al.). 特高压变电站人体工频电场暴露水平评估 (Evaluation of human exposure to power frequency electric fields induced by UHV substation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (24): 4187-4194.
- [7] Laissouai A M, Nekhoul B, Poljak D, et al. Current density and internal electric field in a model of the human body exposed to ELF electric and magnetic fields [A]. 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. 2014. 974-979.
- [8] 田瑞, 逯迈 (Tian Rui, Lu Mai). 高速动车组动力电缆对车厢内乘客的低频电磁暴露水平仿真及其健康评

- 估 (Simulation and health assessment of low frequency electromagnetic exposure of power cables below the carriage of high-speed electric multiple units) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (8): 2540-2548.
- [9] 王建华, 文武, 阮江军 (Wang Jianhua, Wen Wu, Ruan Jiangjun). 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 (Calculation and analysis on power frequency magnetic field induced current density within human body under UHVAC transmission line) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, (13): 7-10, 33.
- [10] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection. Guidelines limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [J]. Health Physics, 1998, 74 (3): 494-522.
- [11] IEEE Standard C95.6 IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3kHz [S]. 2002.
- [12] GB10000-88 中国成年人人体尺寸 (Body size of Chinese adults [S]. 1988.
- [13] 李海燕, 逯迈, 董绪伟 (Li Haiyan, Lu Mai, Dong Xuwei). 纯电动汽车典型无线充电线圈电磁暴露安全评估研究 (Research on electromagnetic exposure safety assessment of typical wireless charging coil for battery electric vehicle) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (11): 74-80.
- [14] 刘亚永, 李尧生, 徐鲁宁, 等 (Liu Yayong, Li Yaosheng, Xu Luning, et al.). 交指状电极结构仿真分析及其电场分布拟合 (Simulation of interdigital electrodes configuration and distribution surface fitting of its electrostatic field) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 61-67.
- [15] Nedjem Z, Seghier T, Hadjadj A. Study of the influence of an electromagnetic field close to a high-voltage line on the human being [A]. Electrical Sciences and Technologies [C]. Maghreb, Tunis, 2014.
- [16] Andreas Barchanskia, Markus Clemensb, Herbert De Gersema, et al. Efficient calculation of current densities in the human body induced by arbitrarily shaped, low-frequency magnetic field sources [J]. Journal of Computational Physics, 2006, 214 (1): 81-95.

Effect of patrol robot on electric field distribution of human body in 500 kV substation

LI Yong-ming¹, HE Sheng-yu¹, XU Lu-wen², WANG Xu-xu³, ZOU An-xin²

(1. State Key Laboratory of Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technologies, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 3. Shaoxing Power Supply Company, Zhejiang Electric Power Co., Shaoxing 312000, China)

Abstract: With the wide application of intelligent equipment in substations, patrol robots are becoming more and more common in substations, and the contacts between workers and patrol robots are increasing. However, there are few studies on the exposure level of human power frequency electric field and induced current in this case. In this paper, the electric field distribution around the human body and the inspection robot in the switching field area of substation and the electric current inside the human body are calculated and analyzed by combining the simulated charge method and the finite element method. The results show that the operator should first bend down close to the inspection robot, and then squat down to inspect the inspection robot, so as to ensure that all parts of the operator's body maintain a small inductive current density, and maximize the protection of the operator's body from injury.

Key words: substation; patrol robot; switching field; analog charge method; finite element method