

特高压交流输电线路对人体电场效应的对比分析

陈博栋¹ 逯迈² 陈小强¹ 胡延文¹

¹ (兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070)

² (兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室 兰州 730070)

摘要 本文通过有限元分析方法计算了1 000 kV输电线路下方简化人体模型的电场效应,比较分析了不同塔型时人体中的感应电场及其分布情况。结果表明:人体周围电场并不是均匀分布的,而是产生了畸变;人体较细的部位(如颈部与腿部)电流密度较大;与普通型输电线路相比,紧凑型线路下人体内感应电流密度较小;中枢神经系统组织的最大感应电流为远小于 $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 安全限值;与紧凑型线路相比,普通型线路中枢神经系统组织的电场强度较大,但其最大感应电场仍小于 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的光幻视阈值。研究表明,特高压交流输电线路下人体感应电流及电场均低于根据ICNIRP导则推荐的安全限值。

关键词 特高压交流输电, 工频电场, 有限元法, 感应电流密度, 感应电场

中图分类号 TM81, TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.060501

低频电磁场暴露生物效应已成为生物电磁学研究热点之一,如核磁共振梯度线圈电磁辐射^[1-3]、手机及手机基站的电磁辐射等^[4-6]。相关研究表明,长期暴露在强电磁场中,会发生中枢神经系统机能障碍,出现头晕头痛、失眠多梦、记忆力衰退等症状,尤其是儿童白血病几率增加^[7-9]。

工频电磁场与人作用可以在人体内感应出微弱的电场和电流。通过细胞和动物研究发现,人体内感应电流密度超过一定的阈值,感应电流会对神经和肌肉组织产生影响,这些影响随着感应电流密度增加加剧,为防止对神经系统造成危害,暴露在电磁场中的人体感应电流密度须限制在 $100 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 以内,取安全系数为10,人体职业暴露安全限值取 $10 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$,公众暴露安全限值取 $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[10]。根据ICNIRP 2010标准,即国际非电离辐射防护委员会(The International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)发布的标准^[11],由于感应电场是确定生物效应的物理量,为避免感应视网膜光幻视,以中央神经系统组织中的感应电场强度 $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 光幻视阈值作为公众暴露限值基础。

由于电能的需求的增加,输电线的工作电压也在不断提高,特高压输电线路电压都在1 000 kV及

以上,这有利于缓解我国用电需求和线路走廊问题,更好地实现“西电东送”和“全国联网”。输电线路对环境和人体健康影响近年来倍受关注,输电线路难免会经过居民区,人也不可避免的会经过输电线路。因此,有必要对靠近人类生活输电线的场以及与人体的相互作用进行研究。关于特高压不同杆塔类型输电线路在地面附近产生的电场和磁场进行了大量的分析^[12-15]。但针对特高压与人体相互作用的文献较少,而且存在人体模型较为简单,采用二维分析及边界条件与实际不符等问题^[16-18]。

本文通过研究不同塔型特高压输电线路下方人体与地绝缘时感应电场对人体的影响,利用有限元法对人体感应电流,尤其是中枢神经的感应电场进行计算,并与ICNIRP导则中的电磁暴露标准比较,对我国特高压输电线路的电磁暴露进行科学评估,可为生物医学研究提供相关的参考数据,也可为国家制定相关标准提供依据。

1 分析原理与模型

1.1 分析原理

为进一步了解工频磁场与人体健康的关系,首

基金资助: 国家自然科学基金(51267010)和甘肃省杰出青年基金(1308RJDA013)资助

第一作者: 陈博栋, 男, 1988年2月出生, 2010年毕业于兰州交通大学, 现为该校在读硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化

通讯作者: 逯迈, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: mai.lu@126.com

收稿日期: 初稿 2014-07-23; 修回 2014-08-28

先必须精确计算人体各重要器官中产生的感应电流及感应电场。人体感应电流的强度与分布不仅与外界场强有关,而且与人体的形状、各种器官的导电率、介电常数等有关,因此精确计算存在一定的困难。采用有限元法解得电势的场分布值,然后再经过处理可得到电磁场中的其他物理量,如感应电流密度、感应电场等。

感应效果的相对强弱与人体的电导率 σ 和介电常数 ε 有关。根据麦克斯韦方程组:

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

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

式中, H 为磁场强度矢量, J 为电流密度矢量, D 为电通密度, E 为电场强度矢量, B 为磁感应强度矢量, ρ 为电荷体密度。

由电磁理论的麦克斯韦方程组构成了 3 个本构方程:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_0 \quad (7)$$

式中, μ 为磁导率。为了便于数值求解,定义磁矢位 A 和标量电势 Φ_e , 自动满足法拉第电磁感应电流和高斯磁通定律, 定义如下:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

电场可以写成:

$$\vec{E} = \nabla \Phi_e - j\omega \vec{A} \quad (9)$$

在静态场中, 如果所有的材料表现出介电性能的服从 $\sigma \gg \omega \varepsilon$ (欧姆电流占主导地位, ω 为电流频率), 可以推出:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \Phi_e = j\omega \nabla \cdot \sigma \vec{A} \quad (10)$$

矢量势 A 从电场中解耦等效于静矢量势 A_0 , 如果磁导率 μ 是恒定的, 在整个计算区域 Ω , 由毕奥-萨伐定律可以计算出 A_0 :

$$A_0(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{J_0(r')}{|r-r'|} dr' \quad (11)$$

我们可以对方程(8)和(9)进行数值求解, 采用有限元法解得磁势和电势的场分布值, 然后再经过处理可得到电磁场中的其他物理量。

1.2 分析模型

在计算特高压输电线路下方人体感应电流时, 首先在 ANSYS 中建立人体模型, 各部分参数为: 脚部位长 0.17 m, 宽 0.06 m, 高为 0.03 m 的长方体和两个半径为 0.03 m 的半圆柱组成; 小腿由两边半径分别为 0.03 m 和 0.05 m, 长 0.42 m 的椎体构成; 大腿由两边半径分别为 0.05 m 和 0.08 m, 长 0.43 m 的椎体构成; 上身由中间长 0.16 m, 宽 0.16 m, 高 0.6 m 的长方体和两边半径为 0.08 m 的半圆柱组成, 内部含一个长 0.1 m, 宽 0.2 m, 高 0.25 m 的内脏, 手臂由半径 0.04 m 长 0.64 m 的圆柱构成; 颈部为半径为 0.06 m, 高 0.06 m 的圆柱; 头部分别为半径 0.1 m、0.092 m、0.085 m 的球体构成头皮、颅骨、和大脑的三层人头模型, 总体身高 1.74 m。人体位于输电线路正对中线位置, 面向导线传输方向, 如图 1 所示。根据 50 Hz 下人体主要组织的介电常数和电导率^[19], 假定人体各个部分由均匀介质构成, 电导率及相对介电常数见表 1。

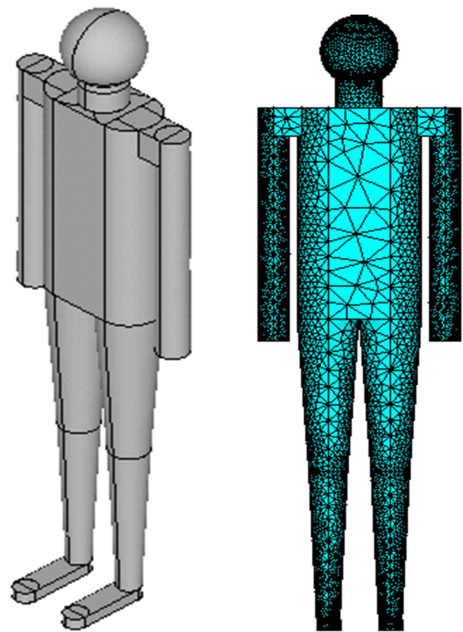


图 1 人体及网格剖分模型
Fig.1 Body and mesh generation model

表 1 人体组织介电常数及电导率
Table 1 Human tissues permittivity and conductivity

组织名称 Organization	介电常数 Dielectric constant	电导率/ $S \cdot m^{-1}$ Electrical conductivity
头皮 Scalp	1×10^8	0.33
颅骨 Skull	4×10^6	0.02
大脑 Cerebrum	8×10^5	0.05
内脏 Visceral	1×10^7	0.03
其他 Other	1×10^6	0.10

本文对当前已运行某段 1 000 kV 特高压线路模型进行分析，特高压架空线路的普通塔型和新型紧凑型如图 2 所示^[17]，绝缘子串长均为 11.5 m，线路运行额定线电压为 1 000 kV。

对于高压输电线下方人体感应电场的计算尺寸较大，而 ANSYS 可以很好地解决大型电磁仿真计算问题。在采用 ANSYS 三维谐性电磁场分析时，

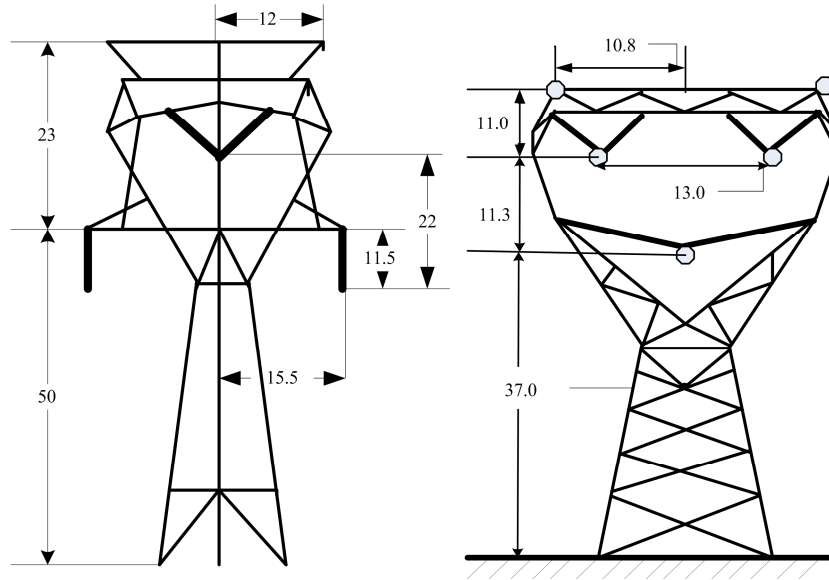


图 2 1000 kV 特高压普通型（左）和紧凑型（右）杆塔
Fig.2 1000 kV UHV ordinary tower (left) and compact (right) tower

由于计算量较大，对计算机性能要求比较高，故忽略杆塔、端部效应和导线弧垂的影响，线路长度取 20 m，线路高度采用平均高度；选取 10 节点四面体实体单元 SOLID 232 求解三维模型的电势分布；分别对各个实体材料进行赋值；在对模型进行网格剖分时采用 Smartsize 自动网格划分工具，有利于生成形状合理的网格单元，剖分后网格单元数量在一百多万；对于模型的边界条件，在导线上分别施加相电压，相位差为 120° ，频率为 50 Hz，取地面电势为零，其余边界认为是无穷远点。由于网格数量较多，计算量较大，在进行求解时，计算机存储容量需在 8 GB 以上，计算时间需 1 h 以上。

2 结果分析

2.1 线路下方人体周围电场分布

如图 3 和图 4 所示，输电线路下方人体周围的电场，由于人体及空气介电常数及电导率的变化，并不是均匀分布的，而是产生了畸变，致使人体周

围的场强比均匀场强增大了几倍甚至好几十倍。

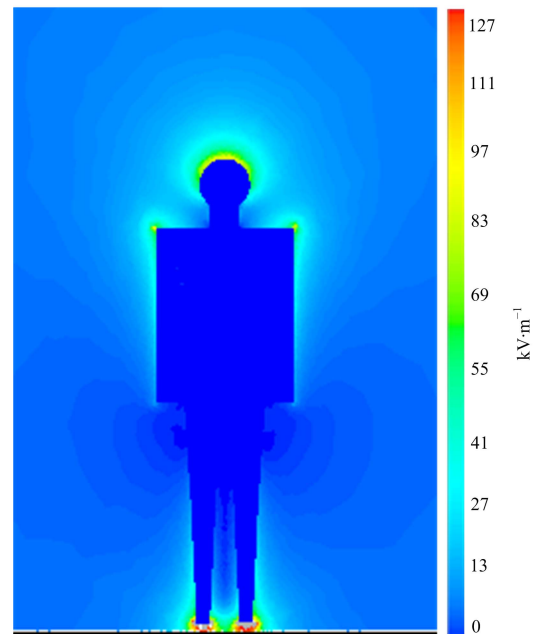


图 3 普通塔型线路人体周围电场分布
Fig.3 Ordinary tower electric field distribution around the body

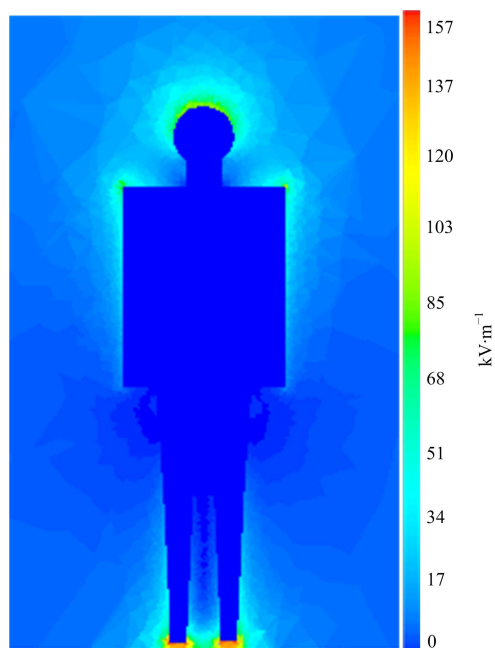


图4 紧凑型线路人体周围电场分布
Fig.4 Compact tower electric field distribution around the body

由图3和图4可看出,在人体脚部和头部周围的电场强度较大,这是由于脚部和头部集中了大量的异性电荷,从而产生了很大的场强;人体周围最大场强出现在脚部位置,普通型塔杆线路与紧凑型塔杆线路下人体周围最大场强相比紧凑型线路相对较大;但是人体头部周围的场强普通型杆塔线路相对较大,这可能与导线布置方式有关。

2.2 人体内感应电流密度

对于线路下方人体感应电流的分布,如图5所示。从总体上来看,自上而下人体内电流密度呈逐渐增大趋势;脚部位置的电流密度较大,而手臂位置感应电流最小;人体较细的部位与较粗的部位相比电流密度较大,如颈部与腿部;普通型输电线路与紧凑型线路下人体内感应电流密度相比紧凑型线路较小,分别为 $18 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $8.6 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$, 均位于脚部位置。

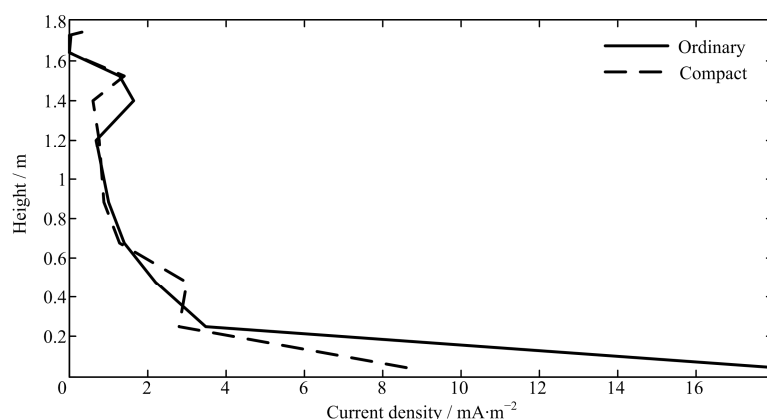


图5 人体内部感应电流分布
Fig.5 Induced current distribution inside the body

2.3 人体头部感应场分布

人体头部的感应电流和电场与周围电场的大小以及各组织的材料有关,由图6和图7可知:由表及里,头部的感应电流呈减小趋势,头皮处的电流密度最大;普通型与紧凑型塔杆线路人体头部感应电流密度相比普通型线路较大,但均小于人体电流密度暴露限值 $2 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

由图8和图9可知,人体头部电场,并非与

电流密度分布一致,具体见表2。电场强度最大值是在颅骨处;普通型线路下人体头部最大场强为 $1.47 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$, 低于 ICNIRP 导则推荐的 $20 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ 的暴露限制,而紧凑型线路下人体头部最大场强为 $0.32 \text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ 远低于这一限值,这与头部周围的场强以及线路布置方式有关,因此在单从公众电磁暴露安全的角度建议采用紧凑型塔杆线路,从而对我国特高压交流输电电磁暴露安全评估提供理论依据。

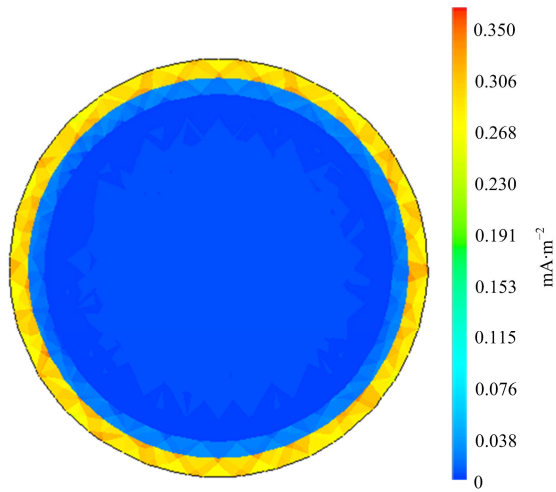


图6 普通塔型线路人体头部电流密度
Fig.6 Ordinary human head tower line current density

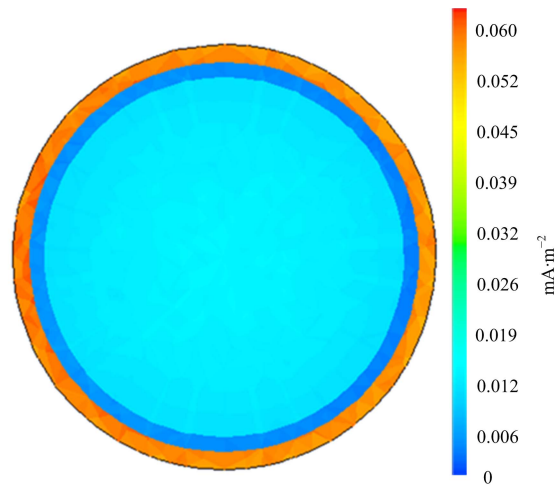


图7 紧凑塔型线路人体头部电流密度
Fig.7 Compact tower line current density human head

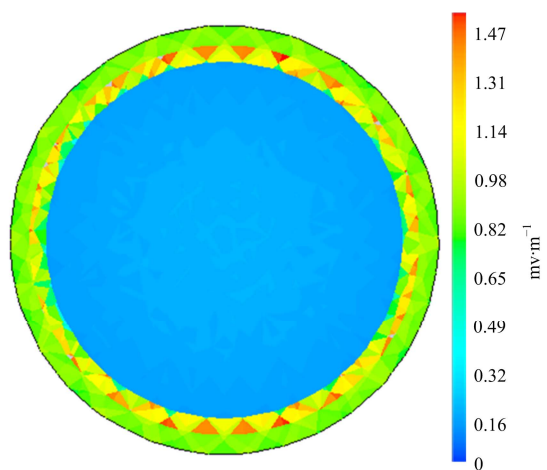


图8 普通塔型线路人体头部电场分布
Fig.8 Ordinary human head line tower electric field distribution

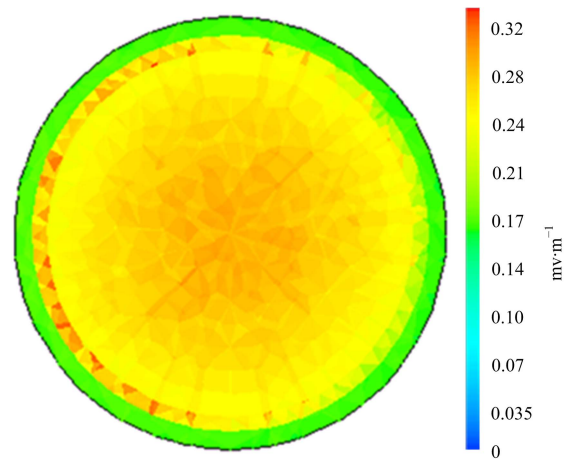


图9 紧凑塔型线路人体头部电场分布
Fig.9 Compact tower line electric field distribution of human head

表2 人体头部组织的最大感应场强
Table 2 Human head tissue maximum induction field distribution

组织名称 Organization		头皮 Scalp	颅骨 Skull	大脑 Cerebrum
感应电流 Induced current	普通型 Ordinary	0.35	0.03	0.032
	紧凑型 Compact	0.06	0.006	0.012
感应电场 Electric field	普通型 Ordinary	0.82	1.47	0.32
	紧凑型 Compact	0.17	0.32	0.28

3 结果与讨论

本文分析了1000 kV级特高压交流输电线路下不同塔型线路情况下的人体模型内部感应场的分布，得到以下结论：人体周围的电场不是均匀分布的，而是产生了畸变，并且增大了几倍甚至几十倍；从头至脚，人体内的电流密度呈增大趋势，身体较细的部位，如颈部、小腿处的电流密度相对较大，手臂感应电流最小。人体头部（中枢神经）位置的感应电流与感应电场分布并不一致，最大感应电流位于头皮处，而最大感应电场位于颅骨处；普通塔型线路下中央神经系统组织的感应电流及感应电场强度均略高于紧凑型线路，从公众安全角度考虑，建议采用紧凑型塔杆线路，但人体中央神经系统组织的最大感应电流远小于 $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 的安全限值，感应电场均小于 $20 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光幻视阈值。

人体简化模型能够很好地反映出人体内部感应场的变化，该结果将会推动生物医学研究理论和应

用研究的进一步深化,为我国特高压电磁暴露评估提供参考,但还存在不足之处,需进一步对真实人体模型的电场效应进行研究。

参考文献

- 1 胡格丽,倪志鹏,王秋良. 结合振动控制的柱面纵向梯度线圈目标场设计方法 [J]. 物理学报, 2014, **63**(1): 018301.
HU Geli, NI Zhipeng, WANG Qiuliang. A target field method for designing cylindrical z-gradient coil combined with vibration control [J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(1): 018301.
- 2 MAI Lu, Shoogo Ueno. Dosimetry of exposure of patients to pulsed gradient magnetic fields in MRI [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, **47**(10): 3841-3844.
- 3 刘虎, 尤克增. 磁共振扫描中受检者电磁辐射现状与防护对策 [J]. 环境与职业医学, 2012, **29**(9): 576-579.
LIU Hu, YOU Kezeng. Electromagnetic radiation and protection in magnetic resonance scanning [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2012, **29**(9): 576-579.
- 4 高翔, 刘群芳, 姚勇. GSM 移动通信基站电磁辐射水平防护距离理论预测与现场实测对比分析 [J]. 辐射防护, 2011, **31**(1): 46-49.
GAO Xiang, LIU Qunfang, YAO Yong. Analysis of theoretical prediction and field measurement about GSM mobile base station electromagnetic radiation protection level [J]. Radiation Protection, 2011, **31**(1): 46-49.
- 5 李旸, 逯贵祯. 手机辐射对 DNA 分子作用的机理研究 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, **55**(4): 460-464.
LI Yang, LU Guizhen. Research of mechanism of interaction between the microwaves radiated from the mobile phone and DNA molecules [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2009, **55**(4): 460-464.
- 6 MAI Lu, Shoogo Ueno. Comparison of specific absorption rate induced in brain tissues of a child and an adult using mobile phone [J]. Journal of Applied Physics, 2012, **111**(7): 07B311.
- 7 Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2003, **106**(4): 341-348.
- 8 Feychting M, Floderus B, Ahlbom A. Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer (Sweden) [J]. Cancer Causes Control, 2000, **11**(2): 151-156.
- 9 Davis S, Mirick D K, Stevens R G. Residential magnetic fields and the risk of breast cancer [J]. American Journal of Epidemiology, 2002, **155**(5): 446-454.
- 10 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz) [J]. Health Physics, 1998, **74**(4): 494-522.
- 11 ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, **99**(6): 818-836.
- 12 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场 [J]. 高电压技术, 2006, **32**(12): 69-74.
PENG Ying, RUAN Jiangjun. Calculation of three-dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method [J]. High Voltage Engineering, 2006, **32**(12): 69-74.
- 13 肖冬萍, 何为, 张占龙, 等. 特高压输电线路工频磁场三维优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, **29**(12): 116-120.
XIAO Dongping, HE Wei, ZHANG Zhanlong, *et al.* Three-dimension optimization model for power frequency magnetic field of UHV transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, **29**(12): 116-120.
- 14 兰生, 张振兴, 原永滨. 考虑弧垂的交流特高压输电线路三维电磁场 [J]. 电机与控制学报, 2012, **16**(12): 42-46.
LAN Sheng, ZHANG Zhenxing, YUAN Yongbin. The 3D electromagnetic field of AC EHV transmission lines with sag [J]. Electric Machines and Control, 2012, **16**(12): 42-46.
- 15 黄韬, 吕建红, 文远芳, 等. 基于矩量法的输电线路工频电磁场实测与计算分析 [J]. 高压电器, 2013, **49**(2): 30-36.
HUANG Tao, LYU Jianhong, WEN Yuanfang, *et al.* Calculation of power frequency electromagnetic field around transmission line based on moment method [J]. High Voltage Apparatus, 2013, **49**(2): 30-36.
- 16 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): 7-10.
WANG Jianhua, WEN Wu, RUAN Jiangjun. Calculation and analysis on power frequency magnetic field induced current density within human body under uhvac transmission line [J]. Power System Technology, 2007, **31**(13): 7-10.

- 17 胡宇. 超高压输电线路环境中人体电磁场分析 [D]. 沈阳. 沈阳工业大学. 2003.
HU Yu. The electromagnetic field analysis in human body in the environment of the extra-high voltage transmission line [D]. Shenyang. Shenyang University of Technology. 2003.
- 18 田子山. 交流架空输电线路附近工频电场及其人体内感应电流计算研究 [D]. 重庆. 重庆大学. 2013.
- TIAN Zishan. Calculation of power frequency electric field from ac overhead transmission lines and induced current in human body [D]. Chongqing. Chongqing University. 2013.
- 19 Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. literature survey [J]. Physics in Medicine and Biology, 1996, **41**(11): 2231.

Comparative analysis of electric field effects on the human body induced by ultra high voltage AC transmission line

CHEN Bodong¹ LU Mai² CHEN Xiaoqiang¹ HU Yanwen¹

¹(College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

²(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT To study the influence of ultra high voltage (UHV) AC transmission line frequency electric field on the human body, finite element analysis method was used to calculate electric field effect of the simplified human body model under 1000 kV transmission line. Then, comparative analysis of different towers was carried out to show the differences in the induced electric field and its distribution in the human body. The results indicated that electric field around the body is not evenly distributed, and distortion was produced; current density in the small parts of human body (e.g. the neck and legs) is high; compared with compact transmission lines, normal transmission lines induce smaller current density in the human body; the maximum induced current in the central nervous system is much smaller than safety limits of $2 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$; electric field strength in the central nervous system under normal transmission lines is high, but the maximum induced electric field is still less than $20 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$, which is the phosphene threshold value. Studies demonstrate that induced current and electric field in the human body under UHV AC transmission line are both less than the reference levels from the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) guidelines. The results can not only provide the basis for calculation of electromagnetic exposure of the real human body, but also provide reference for electromagnetic exposure assessment standard of UHV power transmission engineering in China.

KEYWORDS Ultra high Voltage (UHV) AC transmission, Frequency electric field, Finite element method, Induced current density

CLC TM81, TL72