

1 000 kV 特高压交流输电电磁暴露：成年人 与未成年人的对比研究

李林杰 逯 迈

(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 建立成年人和未成年人的人体模型，采用 Comsol 仿真软件分别计算分析特高压交流输电线路对成年人和未成年人产生的磁场效应，并对结果进行对比。结果表明，成年人和未成年人有相似的磁感应强度分布规律，人体磁感应强度和外围空气的分布一样，都呈圆弧形分布。就特高压输电线路在头部产生的磁感应强度大小来说，成年人比未成年人大。就产生的感应电场强度而言，最大值出现在头皮最上方位置，分别是 0.251 mV/m 和 0.163 mV/m。将计算结果与国际非电离辐射防护委员会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) 制定的导则限值相比较，结果表明，磁感应强度的大小无论是对专业人员还是对于普通民众均在 ICNIRP 导则限值范围之内。特高压输电线路所产生的电磁暴露对成年人和未成年人都是安全的。

关键词 特高压交流，成年人，未成年人，磁场效应，安全性

中图分类号 TL72, TM81

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2019.rj.37.020601

Comparative study on electromagnetic exposure of adults and minors from 1 000 kV ultra-high voltage AC transmission power lines

LI Linjie LU Mai

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

ABSTRACT Human body models of adults and minors were established, and Comsol simulation software was used to calculate and analyze the magnetic field effects of ultra-high voltage (UHV) AC transmission lines on adults and minors. Calculation results were compared with the guidelines established by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). The results showed similar circular-shaped distributions of magnetic induction intensity in the bodies of both adults and minors as well as in the surrounding air. The magnitude of the magnetic induction intensity generated by the UHV transmission lines on the head was greater for adults than for minors. In terms of the induced electric field strength, the maximum value presented at the top of the scalp, with values of 0.251 and 0.163 mV/m for adults and minors, respectively. Comparison of the calculation results with the

基金资助：国家自然科学基金(51567015、51867014)资助

第一作者：李林杰，男，1994 年 2 月出生，2016 年毕业于沈阳建筑大学，现为兰州交通大学在读硕士研究生，研究方向为特高压交流输电线路的电磁环境安全评估，E-mail: lilingjiejzjd@126.com

通信作者：逯迈，博士，教授，博士生导师，E-mail: mai.lu@hotmail.com

收稿日期：初稿 2018-08-06；修回 2018-12-05

Supported by National Natural Science Foundation of China (51567015, 51867014)

First author: LI Linjie (male) was born in February 1994, and graduated from Shenyang Jianzhu University in 2016. Now he is a master candidate in Lanzhou Jiaotong University, focusing on the safety assessment of electromagnetic environment of ultra-high voltage AC transmission lines. E-mail: lilingjiejzjd@126.com

Corresponding author: Ph.D. LU Mai, professor, doctoral supervisor, E-mail: mai.lu@hotmail.com

Received 06 August 2018; accepted 05 December 2018

ICNIRP guidelines demonstrates that the magnitude of the magnetic induction intensity is within the limits of the ICNIRP guidelines for both occupational and general public exposure. Electromagnetic exposure from UHV transmission lines is safe for adults and minors.

KEYWORDS Ultra-high voltage AC, Adult, Minor, Magnetic field effect, Safety

CLC TL72, TM81

随着我国经济的发展,各个领域对于电力的需求不断增加,而电网是电力传输的载体,目前,我国以 500、750 kV 交流输电作为电网跨区域输电的主要途径,存在输电能力不足、线路走廊等诸多制约因素的影响。虽然我国经济快速发展,但是能源和负荷中心分布不均匀,为了满足经济发展带来的电力需求,我国正在大力发展 1 000 kV 级特高压输电线路,这对我国的经济发展有着举足轻重的作用。

交流输电线路正常工作时,会在输电线路的周围产生工频电磁场,随着输电电压等级的提高,这种工频电磁场对周围环境的影响随之增大,伴随着人们环保意识的增强,人们开始关注电磁场带来的影响。相关研究表明,长期暴露在电磁场中,中枢神经系统机能会产生障碍,出现头晕头痛、失眠多梦、记忆力衰退等症状,尤其是增加了儿童患白血病的概率^[1-5]。

我国城市人口和用电负荷都比较集中,特高压输电线路进入人口密集地区不可避免,因此,输电线路对居住环境的影响倍受关注。长期暴露在低频电磁场时,低频电磁场和人体相互作用会在人体内部和人体附近产生较大的感应电场,相比成年人,对发育未健全的未成年人产生影响更为明显^[6]。如果产生的感应电场太大,会对人体的肌肉和神经组织造成危害。相关研究表明,低频电磁场可以导致头痛、耳鸣、神经障碍等症状^[7-8]。

人们对输电线路电磁环境问题的研究主要集中在输电线路空间某处的电磁分布规律,以及不同杆塔、导线、相序等对于输电线路空间电磁场的影响^[9-14]。研究电磁场与人体相互作用的文献^[15-17]主要研究成年人的电磁暴露,对于未成年人电磁暴露的研究尚未见报道。已有的研究多把人体的各个组织用相同的电磁参数来代替^[18-19],这种方法与实际情况差别较大。

本研究选用的输电线路长度接近实际档距,建立合理的成年人和未成年人人体模型,对头部和身体施加不同的电磁参数,分析比较成年人和

未成年人所受的电磁暴露。将计算结果与国际非电离辐射防护委员会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) 导则^[20] 进行比较分析,对我国特高压输电线路与人体相互作用进行安全评估,通过将成年人和未成年人所受的电磁暴露进行对比,为我国特高压电磁暴露防护标准的制定提供参考依据。

1 原理和模型

1.1 分析原理

特高压交流输电线路对人体的电磁暴露影响与人体所处的位置,以及人体各组织的电磁参数有关。要研究工频电磁场的相关问题,需要用电磁学基础方程组来描述。

麦克斯韦方程组的微分形式见公式(1)~(4)。

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

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

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

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

式中: $\vec{H}$ 为磁场强度矢量(A/m); $\vec{J}$ 为电流密度矢量(A/m²); $\vec{D}$ 为电通密度(C/m²); $\vec{E}$ 为电场强度矢量(V/m); $\vec{B}$ 为磁感应强度矢量(T); ρ 为电荷体密度(C/m³); ∇ 为哈密顿算子。

考虑到媒质存在时,补充3个本构方程(公式(5)~(7))。

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

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

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (7)$$

式中: ϵ 、 μ 、 γ 分别是介电常数(F/m)、磁导率(H/m)和电导率(S/m)。

引入两个变量,矢量 $\vec{A}$ 和标量 φ ,来分离电场量和磁场量,

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

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (9)$$

根据公式 (8)、(9) 可以得到关于磁场和电场的偏微分方程式 (10)、(11)。

$$\nabla^2 - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu\vec{J} \quad (10)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (11)$$

式中： ∇^2 为拉普拉斯算子。

根据以上公式，利用有限元法分别求出感应电场强度和感应电流密度等电磁物理量。

本研究使用 Comsol Multiphysics 仿真软件进行电磁场分析。Comsol Multiphysics 是一款通用工程仿真软件，其核心产品可单独运行，也可与任意组合附加模块结合使用，模拟电磁、结构力学、声学、流体、传热、化工等领域的产品设计和过程。以有限元法为基础，通过解微分方程实现物理现象。

Comsol Multiphysics 的 AC/DC 模块使用公式表示麦克斯韦方程组的微分形式，并结合初始条件和边界条件进行求解。Comsol Multiphysics 中 AC/DC 模块中的磁场模块 mf 物理场可以满足所有维度以及稳态和频域各种类型的研究，所以本研究采用 mf 物理场来解决电磁场问题。

在本研究中，首先在 Comsol 中建立研究模型，

给不同区域施加对应的材料属性，然后施加激励条件和边界条件，定义有限元网格对模型进行剖分，选择求解器进行求解，最后对结果进行处理。

1.2 人体模型

在 Comsol 中建立成年人人体模型，本次主要研究头部的电磁场特性，所以在建立人体模型时，主要分为头部和人体两部分。建立的头部模型采用 3 层球头模型^[21]，半径分别是 0.092、0.085 和 0.080 m，分别代表头部的头皮、颅骨和脑组织。根据成年人的平均尺寸，建立身高 1.750 m 的成年人站姿人体模型。人体位于输电线路正对中线位置，面向导线传输方向。

建立 7~10 岁未成年人人体模型，根据未成年人的平均人体尺寸^[22]，人体模型各部分参数为：大小腿由锥体构成；上身由中间长 0.117 m，宽 0.117 m，高 0.441 m 的长方体和两边半径为 0.059 m 的半圆柱组成，手臂由长 0.470 m 的圆柱构成；头部分别为半径 0.067、0.062 和 0.058 m 的球体构成头皮、颅骨和大脑的三层人头模型，人体身高 1.278 m。人体位于输电线路正对中线位置，面向导线传输方向。

建立成年人和未成年人人体模型如图 1 所示。

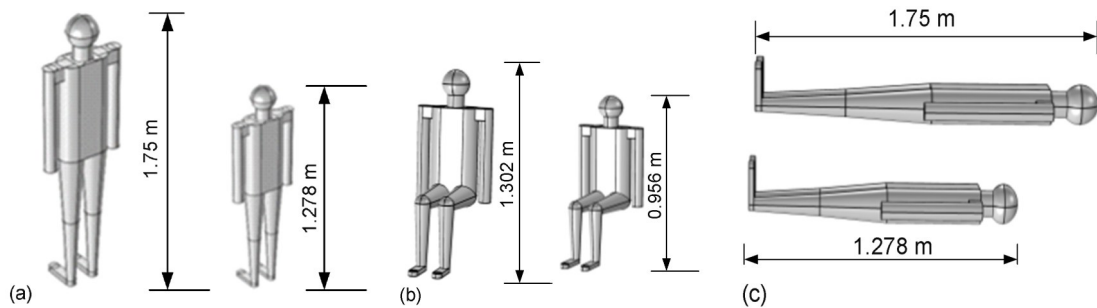


图 1 站姿(a), 坐姿(b)和卧姿(c)人体模型
Fig.1 Human body model of standing posture (a), sitting posture (b) and lying posture (c)

对于建立人体模型，假设人体各组织由分布均匀的介质构成，国际上一般采用 4 阶 Cole-Cole 模型^[23]来计算人体组织的介电参数，可以求得一个复相对介电常数，它的实部是相对介电常数。本研究利用 4 阶 Cole-Cole 模型分别得到头皮、颅骨、大脑和人体其他组织的介电参数，对于工频 50 Hz 下人体各组织的相对介电常数和电导率分别为：头皮 1×10^8 和 0.33 S/m，颅骨 4×10^6 和 0.02 S/m，脑组织 8×10^5 和 0.05 S/m，人体躯干部位 1×10^6 和

0.10 S/m。

1.3 特高压输电线路模型

特高压输电线路模型为 1 000 kV 级，各相导线电流有效值 4 000 A，导线采用八分裂 LGJ-500/35 型。输电线路模型为理想长直导线。

针对平原地区特高压输电线路，取一段档距为 400 m 的输电线路，并做出以下规定^[24]：特高压输电线两端悬挂点等高；计算只考虑线路主体

部分,而不考虑杆塔、绝缘子等物体产生的电磁场;架空输电线路是理想的柔性导线,只承受轴

向拉力;架空输电线路荷载沿导线均匀分布。输电线路模型如图2所示。

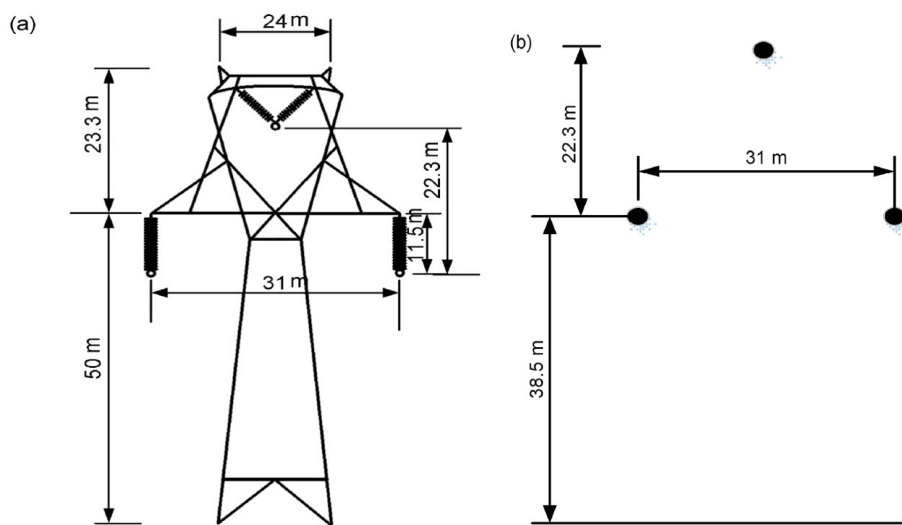


图2 1 000 kV交流输电线路模型:(a)杆塔模型;(b)导线模型
Fig.2 1 000 kV AC transmission line model: (a) tower model; (b) conductor model

2 结果

2.1 站姿人体仿真结果

人体是非磁性物质,对于磁场的分布不会产

生影响。人体周围的磁感应强度分布对比如图3所示。不管对成年人还是未成年人,人体磁感应强度和外围空气的分布一样,都呈圆弧形分布,磁感应强度从脚到头逐渐增大。

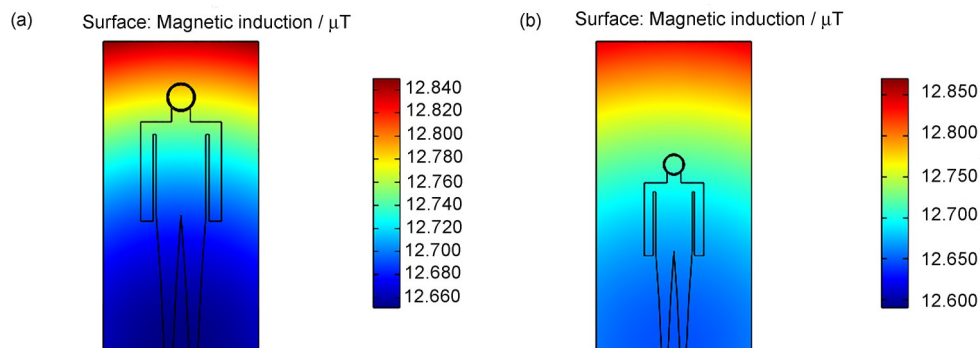


图3 站姿人体周围磁感应强度分布对比:(a)成年人;(b)未成年人
Fig.3 Comparison of magnetic induction intensity distribution around human body in standing posture: (a) adult; (b) minor

人体内部的磁感应强度分布与人体所站位置以及人体相对导线的位置有关。人体内部磁感应强度对比如图4(a)所示。可以看出,人体内部磁感应强度分布从脚到头部逐渐增大,成年人由于身高比未成年人高,磁感应强度比较大。左侧成年人磁感应强度达到 $12.792\ \mu\text{T}$,而右侧未成年人达到 $12.723\ \mu\text{T}$,均在安全阈值范围内。

根据法拉第电磁感应定律,空间交变的磁场

可以在人体内部各个组织产生感应电场,人体内部感应电场的分布如图4(b)所示。产生的感应电场强度大小跟人体各组织的生物特性有关,从图4(b)可以看出,产生的感应电场强度在颈部和身体连接的地方出现最大值,在人体腹部及其以上部位产生比较大的感应电场强度。感应电场强度最大值成年人为 $0.552\ \text{mV/m}$,未成年人为 $0.413\ \text{mV/m}$ 。

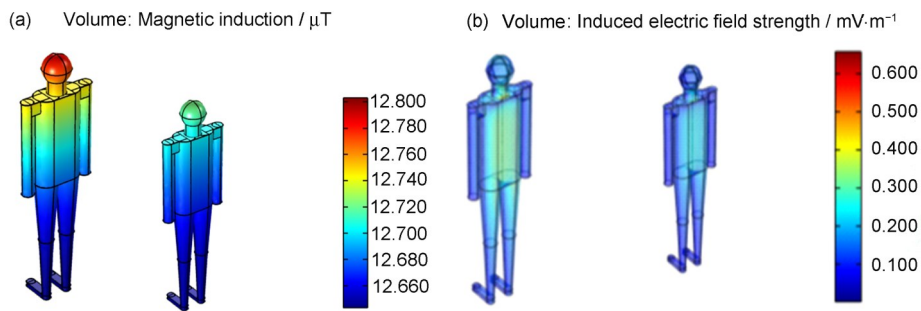


图4 人体场分布对比:(a)磁感应强度;(b)感应电场强度
Fig.4 Field distribution comparison: (a) the magnetic induction; (b) the induced electric field strength

对于脑组织内部的磁感应强度分布如图 5 所示。从图 5 (a) 可以看出,成年人和未成年人磁感应强度有着相似的分布规律。磁感应强度的分布从脑组织下方到上方逐渐增大,最大值出现在

脑组织最上方位置,分别是 12.791 μT 和 12.722 μT 。从图 5 还可以看出,感应电场强度分布由脑组织下方到上方逐渐变大,最大值出现在脑组织最上方位置,分别是 0.167 mV/m 和 0.122 mV/m 。

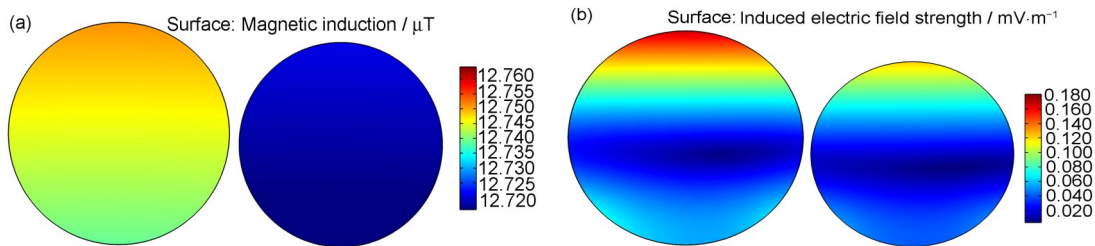


图5 站姿脑组织场分布对比:(a)磁感应强度;(b)感应电场强度
Fig. 5 Comparison of brain tissue field distribution in standing posture : (a) the magnetic induction; (b) the induced electric field strength

将计算结果与 ICNIRP 导则中的普通民众限值 (200 μT) 进行比较,结果表明,在头皮处成年人和未成年人的最大磁感应强度分别为 ICNIRP 阈值的 6.39% 和 6.36%,远远小于 ICNIRP 阈值。脑组织内部成年人和未成年人相差 0.53%。对于磁感应

强度而言,成年人和未成年人相差不大,就磁感应强度的大小来说,不管成年人还是未成年人其值都在安全阈值范围 ($<200 \mu\text{T}$) 内,仿真结果如表 1 所示。

表1 站姿人体头部各组织最大磁感应强度和感应电场强度
Table 1 Maximum magnetic induction and induced electric field strength of human head tissues in standing posture

头部	模型	磁感应强度	感应电场强度
Head	Model	Magnetic induction / μT	Electric field strength / $\text{mV}\cdot\text{m}^{-1}$
头皮	成年人 Adult	12.794	0.251
	未成年人 Minor	12.724	0.163
	相差百分比 Percentage difference / %	0.54	35.05
颅骨	成年人 Adult	12.793	0.178
	未成年人 Minor	12.723	0.131
	相差百分比 Percentage difference / %	0.54	26.41
脑组织	成年人 Adult	12.791	0.167
	未成年人 Minor	12.722	0.122
	相差百分比 Percentage difference / %	0.53	26.94

2.2 坐姿人体仿真结果

针对人体处于不同状态进行电磁暴露安全评估研究,根据上述人体模型比例建立成年人和未成年人坐姿人体模型。就坐在特高压输电线路下

的人而言,对于人体内部的磁感应强度分布如图6所示。由图6可以看出,磁感应强度从脚到头逐渐增大,最大值出现在头皮最上方位置,分别是 $12.715\ \mu\text{T}$ 和 $12.695\ \mu\text{T}$ 。

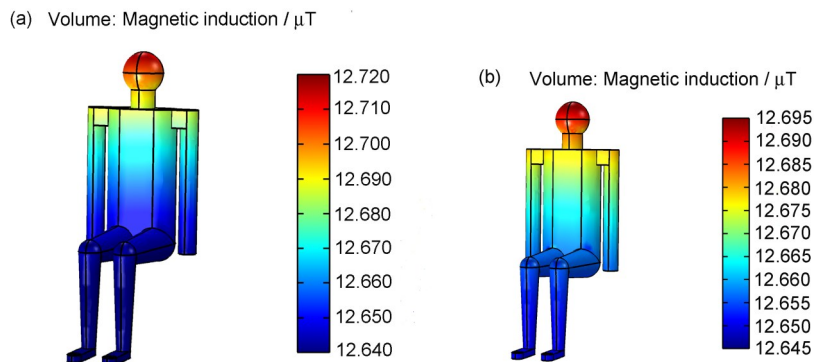


图6 坐姿人体磁感应强度分布对比:(a)成年人;(b)未成年人
Fig.6 Comparison of human body magnetic intensity distribution in sitting posture: (a) adult; (b) minor

脑组织内部的场分布如图7所示。由图7可知,随着位置高度的变化,磁感应强度和感应电场强度随着位置的增高而增大。最大值出现在脑

组织上方,分别是 $12.712\ \mu\text{T}$ 和 $12.693\ \mu\text{T}$,感应电场强度的最大值分别是 $0.165\ \text{mV/m}$ 和 $0.121\ \text{mV/m}$ 。

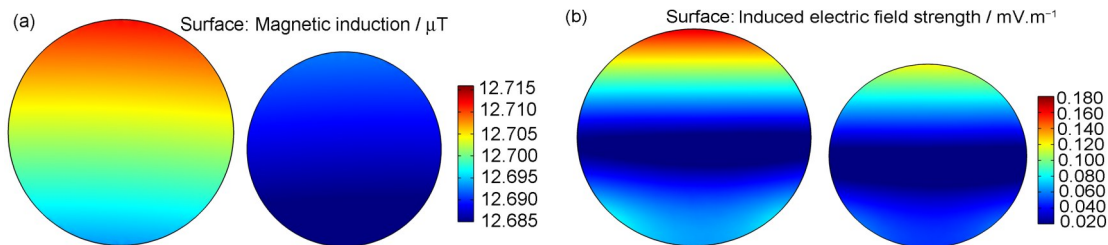


图7 坐姿脑组织场分布对比:(a)磁感应强度;(b)感应电场强度
Fig.7 Comparison of brain tissue field distribution in sitting posture: (a) the magnetic induction; (b) the induced electric field strength

2.3 卧姿人体仿真结果

根据上述人体模型比例建立卧姿人体模型,对于人体周围的磁感应强度分布如图8所示。由图8可以看出,对于平躺着的人来说,磁感应强度的横向分布基本对称。

脑组织内部的场分布如图9所示,取一脑组织的竖直切边,可以看出磁感应强度随着位置的增高而增大。最大值出现在脑组织上方,分别是

$12.690\ \mu\text{T}$ 和 $12.673\ \mu\text{T}$ 。脑组织感应电场强度分布基本呈对称分布,脑组织两端位置比较大,中间位置场强较小。

将计算结果与ICNIRP导则中的普通民众限值($200\ \mu\text{T}$)进行比较,结果表明,对于磁感应强度而言,成年人和未成年人相差不大,就磁感应强度的大小来说,不管成年人还是未成年人其值都在安全阈值范围($<200\ \mu\text{T}$)内,仿真结果如表2所示。

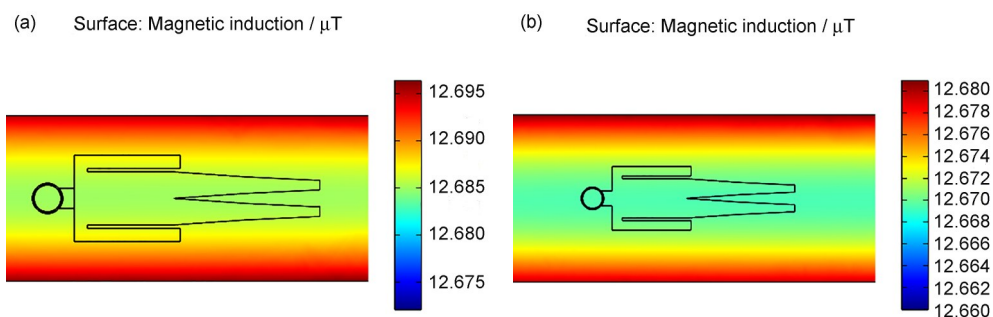


图8 卧姿人体周围磁感应强度分布对比:(a)成年人;(b)未成年人

Fig.8 Comparison of magnetic induction intensity distribution around human body in lying posture: (a) adult; (b) minor

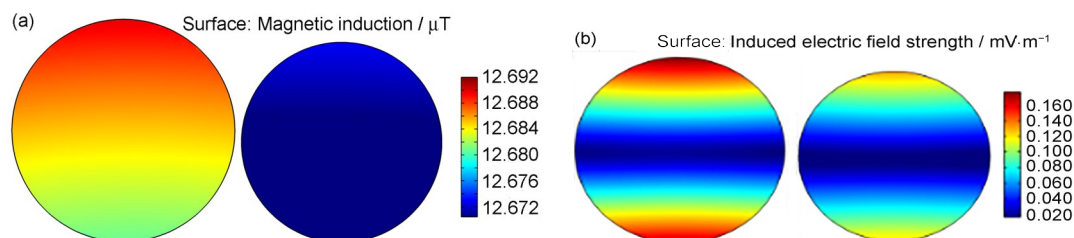


图9 卧姿脑组织场分布对比:(a)磁感应强度;(b)感应电场强度

Fig.9 Comparison of brain tissue field distribution comparison in lying posture: (a) the magnetic induction; (b) the induced electric field strength

表2 不同状态人体脑组织最大磁感应强度和感应电场强度

Table 2 Maximum magnetic induction and induced electric field strength of human tissues

类型	模型	坐姿	卧姿
Type	Model	Sitting posture	Prone position
磁感应强度	成年人 Adult	12.712	12.690
Magnetic induction / μT	未成年人 Minor	12.693	12.673
	相差百分比 Percentage difference / %	0.14	0.13
感应电场强度	成年人 Adult	0.165	0.177
Electric field strength / $\text{mV} \cdot \text{m}^{-1}$	未成年人 Minor	0.121	0.131
	相差百分比 Percentage difference / %	26.67	25.98

3 讨论

本文研究了成年人和未成年人位于1 000 kV特高压交流输电线路下,输电线路对人体产生的影响,并对研究结果进行安全评估。不管是成年人还是未成年人,无论是站着还是坐着或者是平躺着的人,在特高压交流输电线路下,人体内部的磁感应强度和感应电场强度均处于ICNIRP导则的安全阈值范围内。对于成年人和未成年人的计算结果进行对比,结果表明,就人体内部磁感应强度而言,成年人和未成年人有着相似的分布规律,人体磁感应强度的分布和外围空气分布一样,

都呈圆弧形分布,磁感应强度从脚到头逐渐增大。成年人和未成年人之间相差不大,仅仅相差0.54%。对于产生的感应电场强度在颈部和身体连接的地方出现最大值,分别是0.552 mV/m和0.413 mV/m。

对于坐姿状态的人体头部位置的场分布来说,脑组织位置的磁感应强度最大值分别是12.712 μT 和12.693 μT ;对于产生感应电场强度而言,在脑组织最上方位置产生最大值,为0.165 mV/m和0.121 mV/m。感应电场强度相差26.67%。

对于处于平躺状态成年人和未成年人的脑组

织来说, 磁感应强度最大值分别是 $12.690 \mu\text{T}$ 和 $12.673 \mu\text{T}$, 感应电场强度的最大值分别是 0.177 mV/m 和 0.131 mV/m 。

将计算结果与 ICNIRP 导则限值相比较, 成年人和未成年人的磁感应强度均未超过 ICNIRP 导则限值范围。针对成年人和未成年人位于特高压交流输电线路下的电磁场研究, 能够体现特高压交流输电线路的电磁暴露对于成年人和未成年人的影响。结果显示, 特高压交流输电线路的电磁暴露不论是对于成年人还是未成年人都是安全的。

参考文献

- 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. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006370.
- 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. DOI: 10.1023/A:1008922016813.
- 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.
- 包家立. 极低频电磁场的健康效应[J]. 高电压技术, 2015, **41**(8): 2550-2561. DOI: 10.13336/j. 1003-6520.hve.2015.08.008
BAO Jiali. Health effects of extremely low frequency electromagnetic field[J]. High Voltage Engineering, 2015, **41**(8): 2550-2561. DOI: 10.13336/j. 1003-6520.hve.2015.08.008.
- 郭庶, 彭晓武, 刘芸, 等. 极低频电磁场和射频电磁辐射对人体健康影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, **28**(5): 463-466. DOI: 10.16241/j. cnki. 1001-5914.2011.05.022.
GUO Shu, PENG Xiaowu, LIU Yun, *et al.* Human health effects of radio frequency and extremely low frequency electromagnetic radiation: a review of recent studies[J]. Journal of Environment and Health, 2011, **28**(5): 463-466. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2011.05.022.
- 王桢男, 梅勇. 工频电磁辐射对小学生健康指标的影响研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
WANG Yanan, MEI Yong. Study on the influences of power frequency electromagnetic field on pupil's health indicators[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- Lu M, Shoogo U. Comparison specific absorption rate induced in brain tissue of a child and an adult mobilephone[J]. Journal of Applied Physics, 2012, **111**(7): 07B311. DOI: 10.1063/1.3672854.
- 徐倩, 曹毅. 极低频电磁场与儿童白血病关系的研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2009, **18**(2): 243-245.
XU Qian, CAO Yi. The research progress of relationship between extremely low frequency electromagnetic fields and childhood leukaemia[J]. China Radiate Health, 2009, **18**(2): 243-245.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 孟絮絮, 孙志远, 马竞, 等. 不同输电结构特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 安徽电力, 2018, **35**(2): 13-16+28.
MENG Xuxu, SUN Zhiyuan, MA Jing, *et al.* Research on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines with different transmission structures [J]. Anhui Electric Power, 2018, **35**(2): 13-16+28.
- 王瑜. 特高压交流输电线路的电磁环境研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 14-27.
WANG Yu. Study on electromagnetic environment of

- ultra-high voltage AC transmission lines[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 14-27.
- 15 陈博栋, 逯迈, 陈小强, 等. 特高压交流输电线路对人体电场效应的对比分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2014, **32**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.060501.
CHEN Bodong, LU Mai, CHEN Xiaoqiang, *et al.* Comparative analysis of electric field effects on the human body induced by ultra high voltage AC transmission line[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2014, **32**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.060501.
- 16 张利航, 逯迈, 陈小强, 等. 带弧垂特高压交流输电线路的电磁剂量学分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2016, **34**(5): 050501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.34.050501.
ZHANG Lihang, LU Mai, CHEN Xiaoqiang, *et al.* Analysis of electromagnetic dosimetry by ultra high voltage AC transmission line with belt sag[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2016, **34**(5): 050501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rj.34.050501.
- 17 叶艳峰, 逯迈, 陈小强. 典型特高压交流输电线路电磁暴露安全评估的比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2017, **35**(6): 060601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.060601.
YE Yanfeng, LU Mai, CHEN Xiaoqiang. Comparative study on safety assessment of electromagnetic exposure of typical ultra high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2017, **35**(6): 060601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.060601.
- 18 Liang Z G, Hui Y. Calculation of human body suffered electric field under ultra high voltage overhead lines[J]. IEEE Conference Publications, 2011: 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748904.
- 19 王青于, 杨熙, 廖晋陶, 等. 特高压变电站人体工频电场暴露水平评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, **34**(24): 4187-4194. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.024.
WANG Qingyu, YANG Xi, LIAO Jintao, *et al.* Evaluation of human exposure to power frequency electric fields induced by UHV substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, **34**(24): 4187-4194. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.24.024.
- 20 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, **99**(6): 818-836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- 21 Rush S, Driscoll D A. Current distribution in the brain from surface electrodes[J]. Anesthesia and Analgesia, 1968, **47**(6): 717-723.
- 22 中国国家标准化管理委员会. 中国未成年人人体尺寸: GB/T 26158-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Human dimensions of Chinese minors: GB/T 26158-2010[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- 23 Gabriel S, Lau R W, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues[J]. Physics in Medicine and Biology, 1996, **41**(11): 2271-2293. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/003.
- 24 张家利, 姜震, 王德忠. 高压架空输电线下工频电场的数学模型[J]. 高电压技术, 2001, **27**(6): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2001.06.009.
ZHANG Jiali, JIANG Zhen, WANG Dezhong. Mathematical model of the power frequency electric field under high voltage overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2001, **27**(6): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2001.06.009.