

## 工作在 6.48 kHz 的电磁安检门电磁暴露安全评估

白伟江 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** 为了评估电磁安检门在 6.48 kHz 下工作时电磁环境对通过者(成年人及儿童)的电磁暴露安全问题,利用仿真软件 COMSOL 模拟电磁安检门的工作环境,计算人体模型中的磁感应强度与感应电场强度,并与国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)公众暴露限值 27  $\mu\text{T}$  和 874.8 mV/m 进行比较。结果表明:对于人体中的磁感应强度,成年人及儿童位于安检门正下方靠近线圈一侧时最大,出现在靠近门板一侧的胳膊处,分别为 2.44  $\mu\text{T}$  (成年人)和 1.86  $\mu\text{T}$ (儿童),为 ICNIRP 限值(27  $\mu\text{T}$ )的 9.04% 和 6.89%;对于中枢神经系统组织中的感应电场强度,成年人及儿童位于安检门靠近线圈一侧时最大,分布在靠近线圈一侧的头皮及颅骨处,分别为 1.27 mV/m (成年人)和 1.1 mV/m(儿童),为 ICNIRP 限值(874.8 mV/m)的 0.15% 和 0.13%。仿真结果小于 ICNIRP 制定的公众暴露限值,说明安检门工作时发射线圈产生的电磁场对人体的电磁暴露不具有健康威胁。

**关键词** 电磁安检门,成年人模型,儿童模型,公众暴露,安全评估

**中图分类号** TL929, TL7

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2022-0041

## Safety assessment of electromagnetic exposure of walk-through metal detectors operating at 6.48 kHz

BAI Weijiang LU Mai

(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**ABSTRACT** This study aims to evaluate the safety of electromagnetic exposure of passers-by (adults and children) in the electromagnetic environment of walk-through metal detectors operating at 6.48 kHz. The magnetic induction intensity and induced electric field intensity in a human model were calculated using COMSOL simulation software to simulate the operating environment of the electromagnetic walk-through metal detectors and compared with the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) public exposure limits of 27  $\mu\text{T}$  and 874.8 mV/m. The magnetic induction intensity was the highest in the human body when directly below the walk-through metal detectors near the coil side. This intensity was observed on the arm near the door panel 2.44  $\mu\text{T}$  (adults) and 1.86  $\mu\text{T}$  (children), corresponding to 9.04% and 6.89% of the ICNIRP limit (27  $\mu\text{T}$ ), respectively. The electric field intensity in the CNS tissue was the highest in the human body when inside the walk-through metal detectors, distributed over the scalp and skull near the coil side, 1.27 mV/m (adults) and 1.1 mV/m (children),

基金资助: 国家自然科学基金(51567015、51867014)资助

第一作者: 白伟江,男,1994年7月出生,2017年毕业于天津工业大学,现为兰州交通大学硕士研究生

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

收稿日期: 初稿 2022-04-14; 修回 2022-06-21

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

First author: BAI Weijiang (male) was born in July 1994, and graduated from Tiangong University in 2017. Now he is a graduate student of Lanzhou Jiaotong University

Corresponding author: LU Mai, doctoral degree, professor, doctoral supervisor, E-mail: mai.lu@126.com

Received 14 April 2022; accepted 21 June 2022

corresponding 0.15% and 0.13% of the ICNIRP limit (874.8 mV/m), respectively. The simulation values were below the public exposure limits set by ICNIRP, indicating that the electromagnetic fields generated by the transmitting coils during the operation of the walk-through metal detectors do not pose a health risk to humans owing to electromagnetic exposure.

**KEYWORDS** Walking-through metal detectors, Adult model, Child model, General exposure, Safety assessment

**CLC** TL929, TL7

全球第一台金属探测器诞生于1960年,主要用于检查矿产浓度。1970年,金属探测器被引入安全检查领域,成为目前安检门的雏形。20世纪80、90年代,安检门成为许多发达国家监狱管理机构必备的安检设备,并成功应用到其他行业。2002年以后,随着国家在安防领域的不断推进,安检门在车站、机场、医院、超市等场所得到广泛应用。安检门周围的电磁环境是否对通过者和安检工作人员的健康产生影响引起社会的广泛关注<sup>[1]</sup>。早在2007年,休斯顿大学电气与计算机工程系的Wu等<sup>[2]</sup>用阻抗法计算人体内的感应电流密度,并评估孕妇通过安检门的电磁暴露情况。韩国首尔大学Im等<sup>[3]</sup>将边界积分方程法应用于安检门电磁场计算,研究了安检门电磁暴露安全问题。美国犹他大学的Orcutt等<sup>[4]</sup>研究了三维阻抗法在研究生物电磁暴露的有效性。美国罗格斯大学的Nelson等<sup>[5]</sup>通过对三组不同品牌的安检门实验测量,研究了安检门的安全性。

生物电磁学是一门研究生物组织和非电离辐射电磁场相互作用规律及应用的学科<sup>[6]</sup>,为电磁暴露安全评估提供了理论基础和研究方法<sup>[7]</sup>。在现代科学技术发展的大背景下,针对低频<sup>[8]</sup>、高频<sup>[9]</sup>、射频<sup>[10]</sup>等电磁场对人体的健康研究大量涌现。众所周知,人类正在被诸如电磁安检门等大量电磁设备包围,并暴露于电磁辐射中<sup>[11]</sup>。文献[12-14]综述了生物组织的介电特性,为电磁暴露安全评估提供了生物介电参数的基础;文献[15-17]研究了低频电磁场对生物体的影响;文献[18-19]研究了深部经颅磁刺激中的线圈设计,HTC线圈可用于深部经颅磁刺激;文献[20]利用COMSOL仿真探究了5G手机天线对人体头部电磁暴露情况和温度场的分布;文献[21]研究了特高压输电线路中同塔混压四回交流输电线路周围的电磁环境特性。

1992年,国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)成为一个独立委员会,继续国际非电离辐射委员会(INIRC)的工作<sup>[22]</sup>。1998年,ICNIRP发布了暴露在电磁场中的公众与职业人员电磁暴露防护指南<sup>[23]</sup>。2010年,ICNIRP修订了100 kHz频段以下的电磁暴

露指南<sup>[24]</sup>。新标准在基本限值的规定方面中做出了适当的改变,将1998版ICNIRP中用电流密度大小作为标准限值的部分删除,加入了电场强度大小作为新的评定准则。2005年,美国电气与电子工程师协会(IEEE)发布3 kHz~300 GHz人体电磁暴露相关标准<sup>[25]</sup>。国内在电磁暴露准则的制定方面始于20世纪80年代,相继制定了一系列电磁暴露的安全标准。2014年,我国发布了《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)<sup>[26]</sup>。

电磁安检门工作时的电磁环境是否安全引起社会的广泛关注。本研究利用基于有限元法的三维仿真软件(COMSOL Multiphysic),考虑生物组织介电参数,计算了电磁安检门工作时成年人和儿童在安检门附近不同情况时人体组织中的磁感应强度和感应电场强度,并重点对人体中枢神经系统(Central Nervous System, CNS)进行分析。最后与ICNIRP在6.48 kHz频率下的公众暴露限值进行比较,评估了安检门电磁暴露安全问题,也为安检行业的发展提供参考依据。

## 1 方法

### 1.1 原理

电磁安检门又称金属探测门(Walking-through metal detectors, WTMD),由晶振产生3.50~4.95 MHz的正弦振荡,分频器分频出6~9 kHz正弦波(本文实际测量为6.48 kHz),经功率放大后输入发射线圈,在空间产生电磁场,由探测线圈接受。当电磁安检门中无金属通过时,发射线圈产生的磁场信号直接被探测线圈接受;当电磁安检门中有金属时,金属内感应出涡流并再向周围空间发射额外的电磁场,触发报警器报警<sup>[27]</sup>。

本研究采用了COMSOL中的AC/DC模块研究电磁安检门的电磁环境。分别建立成年人及儿童人体模型、电磁安检门及辐射源模型,求解麦克斯韦方程组在给定边界条件下的边值问题。最终求得域内各个位置的磁矢位 $A$ 和电势 $\varphi$ ,进而求得人体磁

感应强度和感应电场强度。通过与 ICNIRP 导则对比,对电磁安检门电磁暴露进行安全评估。

## 1.2 安检门及辐射源建模

以常用安检门为例进行建模。两侧门板及顶部机箱用长方体表示,其中,安检门外形尺寸为:2.2 m(高)×0.96 m(宽)×0.45 m(深);通道尺寸为:2.0 m(高)×0.8 m(宽)×0.45 m(深)。作为辐射源的发射线圈位于左右两侧门板内以最大限度环绕两侧门板。

## 1.3 成年人及儿童人体建模

参照 GB 10000—1988 中成年人身体比例<sup>[28]</sup>,建立成年人人体站姿模型。其中,成年人人体模型身高为 1.75 m,头部采用半径分别为 0.085 m、0.090 m 和 0.092 m 的三层球头模型,分别表示大脑、颅骨和头皮;颈部用半径 0.075 m,高 0.1 m 的圆柱体表示,与头部的重合部分已在 COMSOL 中做差集处理;胸腹部总长度为 0.6 m,腿部总长度 0.87 m,其中大腿、

小腿分别由两个高 0.45 m 圆台组成;脚长 0.23 m,高 0.025 m,且在脚下加入 0.005 m 厚、材质为聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, PVC)的绝缘鞋。

根据 GB/T 26158—2010 中儿童各部分比例及尺寸<sup>[29]</sup>,建立 7~10 岁儿童人体站姿模型。主要参数为:身高 1.229 m,头部采用半径分别为 0.067 6 m、0.062 4 m 和 0.055 8 m 的球体构成大脑、颅骨和头皮;胸腹部总长度为 0.441 m,由一个长方体和两个半圆柱体组成;手臂由直径为 0.05 m、长 0.470 m 的圆柱构成;腿部总长度 0.6 m,大腿、小腿各 0.3 m,且分别由两个圆台组成;脚长 0.15 m、高 0.02 m。脚下加入 0.005 m 厚、材质为聚氯乙烯的绝缘鞋。成年人及儿童人体模型如图 1 所示。成年人及儿童人体主要部分尺寸如表 1 所示。其中,头部中大脑、颅骨、头皮分别用  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  表示,躯干中身高、胳膊直径、人体厚度、人体宽度、胳膊长度、下半身高度、脚长、脚的厚度分别用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_7$ 、 $L_8$  表示。

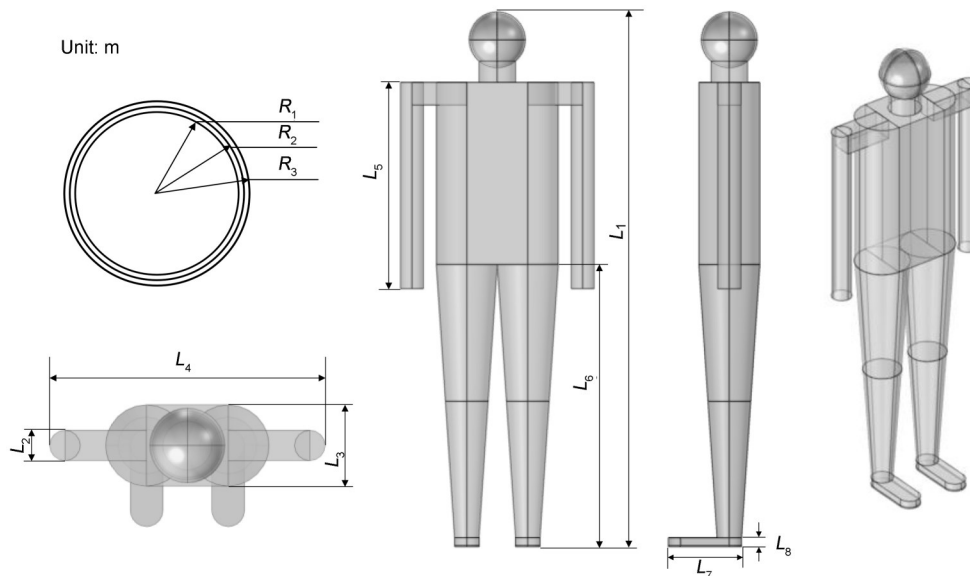


图 1 人体模型  
Fig.1 Human model

表 1 成年人及儿童人体主要部分尺寸  
Table 1 Dimensions of major body parts for adults and children

人体 Human	头部 / m Head			躯干 / m Body							
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$
成年人 Adults	0.080 0	0.085 0	0.092 0	1.750	0.037 5	0.20	0.560	0.68	0.93	0.23	0.03
儿童 Children	0.058 8	0.062 4	0.067 6	1.229	0.025 0	0.16	0.425	0.45	0.62	0.15	0.02

## 1.4 人体介电常数

国际上一般采用 4 阶 Cole-Cole 模型<sup>[14]</sup>计算人

体组织的介电参数,见式(1)。

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_{r\infty} + \sum_{n=0}^4 \frac{\Delta\epsilon_m}{1 + (j\omega\tau_n)^{1-\alpha}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

式中： $\epsilon_r^*$ 为复相对介电常数； $\epsilon_r'$ 为相对介电常数； $\epsilon_r''$ 为耗损因子； $\epsilon_{r\infty}$ 为光频处的相对介电常数； $\Delta\epsilon_m$ 为相对介电常数增量； $\tau_n$ 为中心弛豫时间，s； $\alpha$ 为弛豫分布时间，取值为 $0 \leq \alpha \leq 1$ ； $\sigma_i$ 为离子电导率，S/m； $\omega$ 为角频率，rad/s； $\epsilon_0$ 为真空介电常数，F/m。通过式(1)计算电磁安检门工作频率6.48 kHz成年人及儿童人体中主要组织的介电常数。6.48 kHz人体主要组织相

对介电常数和电导率如表2所示。其中，大脑采用脑脊液、脑灰质和脑白质的平均值，躯干采用肌肉、骨骼、血液、脂肪的平均值。

### 1.5 ICNIRP 公众暴露限值

2010年，ICNIRP制定了时变电磁场的电磁暴露导则(1 Hz~10 MHz)，其中6.48 kHz的公众暴露限值如下：人体电场强度限值为874.8 mV/m，中枢神经系统电场强度限值为874.8 mV/m，人体磁感应强度限值为27  $\mu$ T。

表2 6.48 kHz人体主要组织相对介电常数和电导率  
Table 2 Human important tissues permittivity and conductivity at 6.48 kHz

组织 Tissue	相对介电常数 Relative permittivity	电导率 / (mS·m <sup>-1</sup> ) Conductivity
头皮 Scalp	1 134.3	0.201 87
颅骨 Skull	1 531.7	5.140 05
大脑 Cerebrum	16 905.7	726.41
躯干 Body	8 438.7	194.573 17

### 1.6 安检门电磁暴露两种情况

成年人及儿童通过安检门内在正中间或靠近线圈一侧的实验模型仿真图如图2所示。利用

COMSOL对成年人及儿童人体模型、安检门及辐射源模型进行有限元离散分割，分割网格约280万个四面体单元，并对发射线圈加入电流激励，选择低频静态磁场模块进行计算分析。

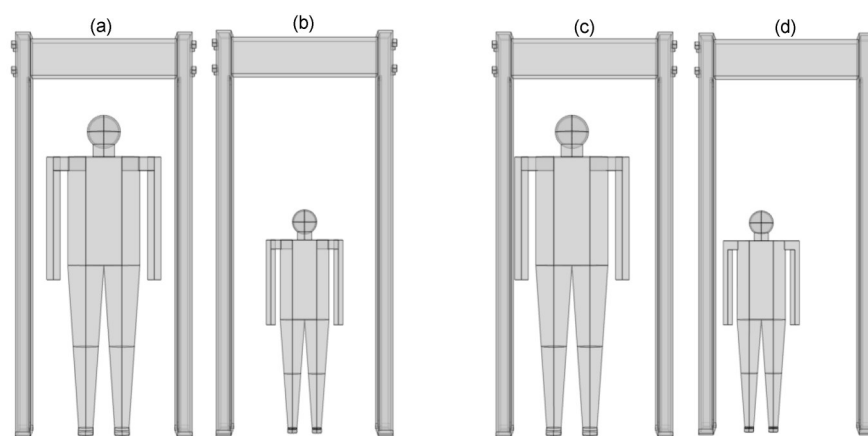


图2 成年人及儿童在安检门内的实验仿真模拟图:(a)、(b)正中间;(c)、(d)靠近线圈一侧  
Fig.2 Simulation scenario of adults and children in the WTMD: (a), (b) in the middle; (c), (d) near the coil side

## 2 仿真结果分析

### 2.1 人体中的磁感应强度

分别分析成年人及儿童在安检门内不同位置的磁感应强度，以成年人及儿童通过安检门位于正中间或靠近线圈一侧为例。图3所示为成年人及儿童在安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、

(d)的磁感应强度三维立体分布。由图3可知，电磁安检门工作时发射线圈产生的电磁场对人体的影响与人体通过安检门的位置有关，人体距离发射线圈越近，人体中的磁感应强度越高。当成年人及儿童位于安检门内靠近线圈一侧时，发射线圈产生的电磁场对人体的影响最大，最大值出现在距离发射线圈较近一侧的胳膊处，分别为2.44  $\mu$ T及1.86  $\mu$ T，分别占ICNIRP限值(27  $\mu$ T)的9.04%、6.89%。当成

成年人及儿童位于安检门内正中间时,磁感应强度最大值出现在距离发射线圈较近的两侧胳膊处,分别

为 1.75  $\mu\text{T}$ 、1.02  $\mu\text{T}$ ,分别占 ICNIRP 限值(27  $\mu\text{T}$ )的 6.48%、3.78%。上述各值均在 ICNIRP 限值范围内。

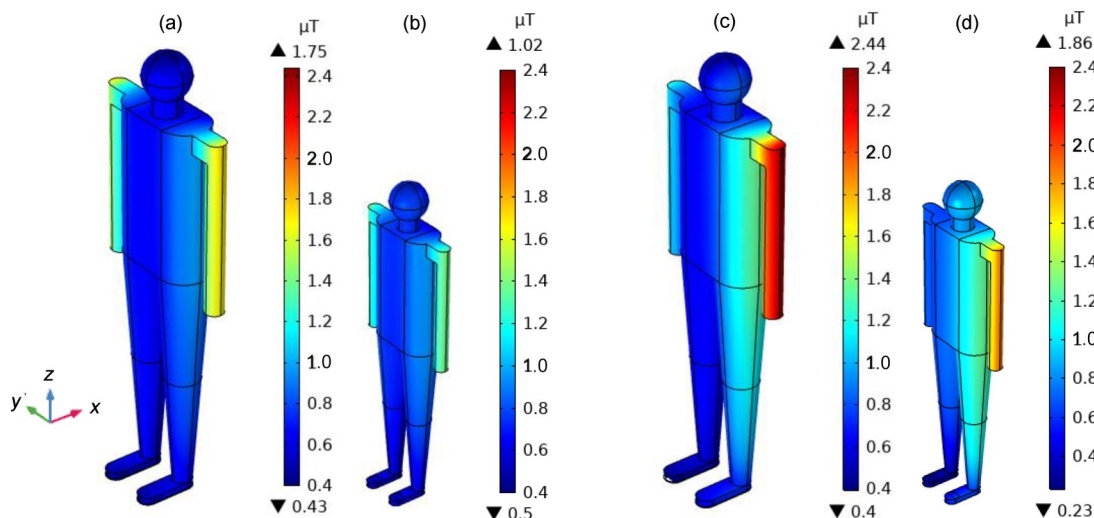


图3 成年人及儿童在安检门内磁感应强度分布图:(a)、(b) 正中间;(c)、(d) 靠近线圈一侧  
 Fig.3 Distribution of magnetic induction intensity for adults and children in the WTMD:  
 (a), (b) in the middle; (c), (d) near the coil side

图4所示为成年人及儿童在安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、(d)人体内部磁感应强度二维截面分布(沿着zy平面通过大脑圆心)。从二维截面图可看出,人体内部磁感应强度分布相似于

立体图,成年人及儿童最大磁感应强度值均出现在离发射线圈较近的位置,且成年人及儿童在安检门内正中间和靠近线圈一侧时的截面最大值均略小于三维立体图中的最大值。

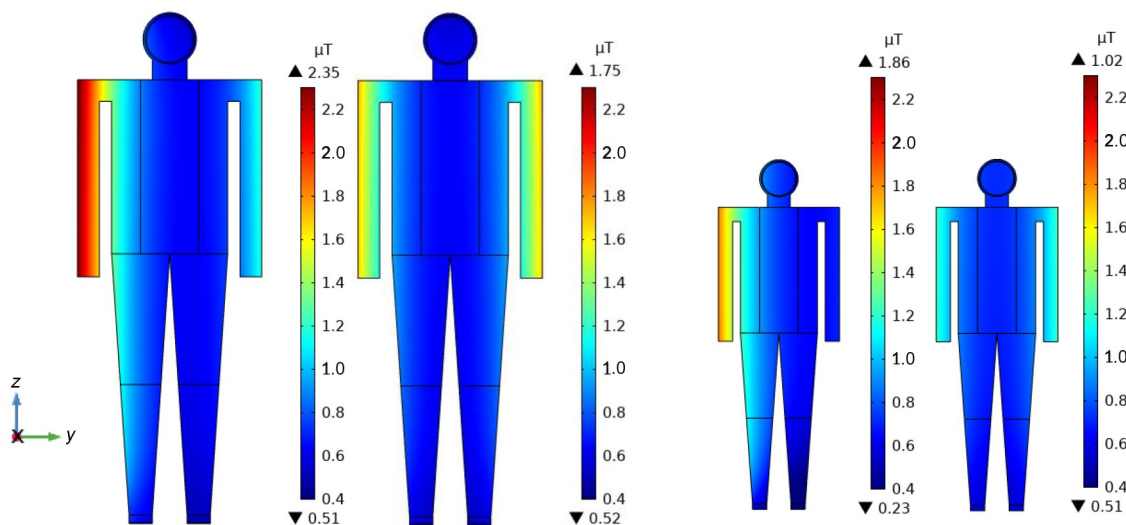


图4 成年人及儿童在安检门内磁感应强度分布截面图:(a)、(b) 正中间;(c)、(d) 靠近线圈一侧  
 Fig.4 Cross-sectional view of magnetic induction intensity distribution in the WTMD for adults and children:  
 (a), (b) in the middle; (c), (d) near the coil side

考虑到人体的中枢神经系统位于大脑,头部的电磁暴露情况直接影响到是否对人体直接造成伤害,因此对头部中枢神经系统切片后单独分析。图5所示:成年人及儿童通过安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、(d)时头部的磁感应强度值(沿着zy平面通过大脑圆心)。从头部二维截面可看出:当成年人及儿童在安检门内正中间时,头部磁感应强

度最大值出现在离发射线圈较近的左右两侧头皮及颅骨处,分别为 0.66  $\mu\text{T}$  和 0.67  $\mu\text{T}$ ,占 ICNIRP 限值(27  $\mu\text{T}$ )的 2.44% 和 2.48%;当成年人及儿童在安检门靠近线圈一侧时,头部磁感应强度最大值出现在离发射线圈较近一侧,分别为 0.87  $\mu\text{T}$  和 0.99  $\mu\text{T}$ ,占 ICNIRP 限值(27  $\mu\text{T}$ )的 3.22% 和 3.67%。成年人及儿童在安检门内正中间或靠近线圈一侧时的头

部磁感应强度最大值均远小于 ICNIRP 限值。

由上述磁感应强度仿真结果图可看出,当人体离发射线圈越近,人体内部磁感应强度越高。人体

组织中磁感应强度最大值如表 3 所示,从表中可以看出不论在哪个位置,成年人磁感应强度最大值均大于儿童。

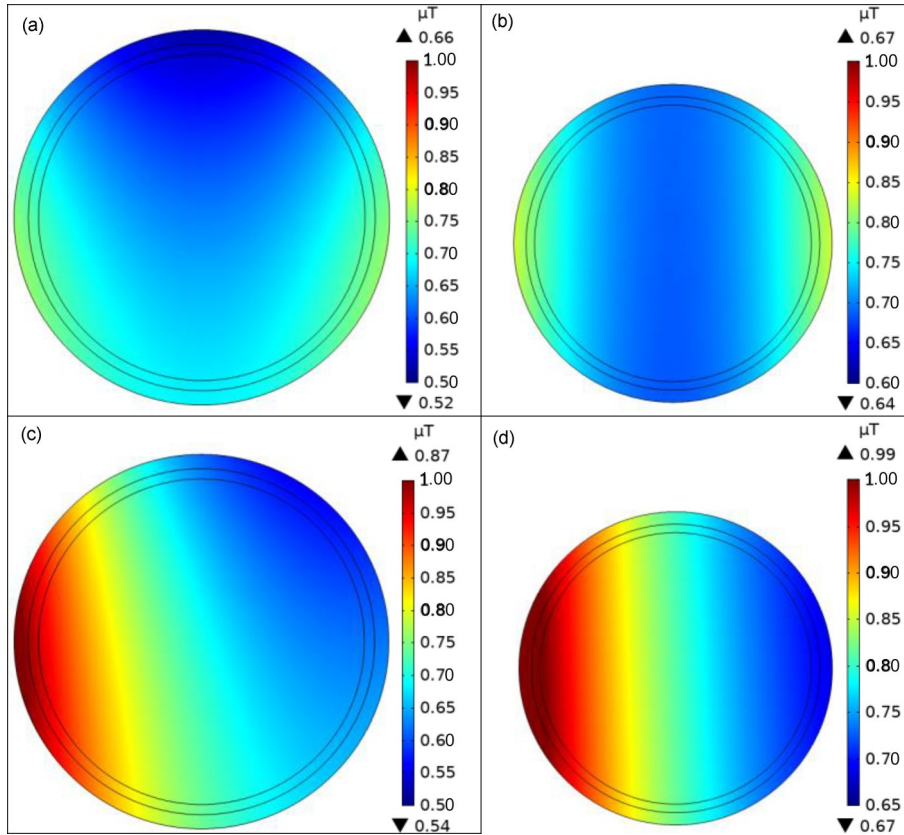


图5 成年人及儿童在安检门内头部磁感应强度分布截面图:(a)、(b) 正中间;(c)、(d) 靠近线圈一侧  
 Fig.5 Cross-sectional view of the magnetic induction intensity distribution of the heads of adults and children in WTMD: (a),(b) in the middle; (c),(d) near the coil side

表3 成年人及儿童处于不同位置时人体内部的磁感应强度最大值  
 Table3 The maximum magnetic induction intensity inside the human body when adults and children are in different positions

模型 Model	位置 Location	磁感应强度 / $\mu\text{T}$ Magnetic flux density	占 ICNIRP 限值的比率 / % Account for ICNIRP
成年人 Adult	安检门中间 In the middle of the WTMD	1.75	6.48
	安检门侧边 In the side of the WTMD	2.44	9.04
儿童 Children	安检门中间 In the middle of the WTMD	1.02	3.78
	安检门侧边 In the side of the WTMD	1.86	6.89

## 2.2 人体中的感应电场强度

根据法拉第电磁感应定律,交变的磁场在人体各组织介质内产生感应电场和感应电流,感应电场值的大小与人体所处位置及生物组织特性等因素有关。成年人及儿童在安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、(d)的感应电场强度分布如图 6 所示。由图 6 可知,当成年人及儿童在安检门正中间

时,人体的感应电场强度最大值均匀分布在人体的胸腹部,分别为 4.37 mV/m 和 2.12 mV/m,占 ICNIRP 限值(874.8 mV/m)的 0.49% 和 0.24%;当成年人及儿童在安检门靠近线圈一侧时,人体的感应电场强度最大值分布在与安检门较近一侧的胸腹部,为 4.79 mV/m 和 3 mV/m,占 ICNIRP 限值(874.8 mV/m)的 0.55% 和 0.34%,远低于 ICNIRP 标准限值。

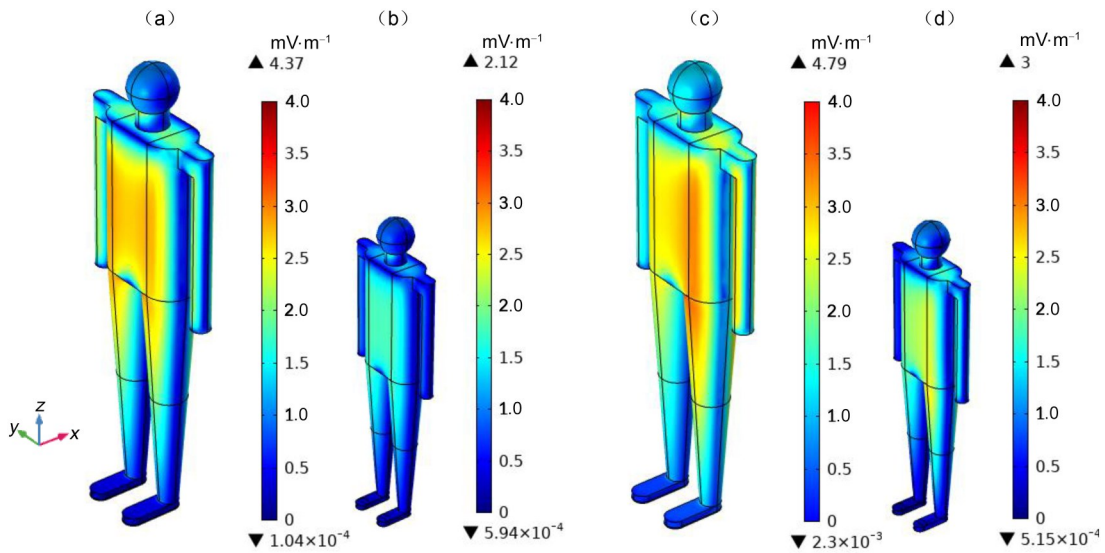


图6 成年人及儿童在安检门内感应电场强度分布图:(a),(b)正中间;(c),(d)靠近线圈一侧  
 Fig.6 The distribution of induced electric field strength for adults and children in WTMD:  
 (a),(b) in the middle; (c),(d) near the coil side

如图7所示,成年人及儿童在安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、(d)的感应电场强度(沿着 $zy$ 平面通过大脑圆心)。成年人及儿童人体内部的感应电场强度分布最大值出现在肩膀处。当成年人及儿童在安检门内正中间时,感应电场强度最大值分别为 $2.01\text{ mV/m}$ 和 $1.27\text{ mV/m}$ ;当成年人及儿童在安检门内靠近线圈一侧时,感应电场强度最大值分别为 $2.52\text{ mV/m}$ 和 $1.79\text{ mV/m}$ 。上述数据均小于成年人及儿童三维立体图中的最大值,且最大值分布与立体图不同。由此对比可知,成年人及儿童通过安检门时最大值应覆盖在人体表面皮肤处,

且距离发射线圈较近的位置数值更大。

由上述感应电场强度仿真结果图可看出,当人体离发射线圈越近,人体感应电场强度越高且最大值分布在人体的胸腹部。人体组织中感应电场强度最大值及与ICNIRP限值的占比见表4。

如图8所示,成年人及儿童位于安检门内正中间(a)、(b)或靠近线圈一侧(c)、(d)时头部的感应电场强度(沿着 $zy$ 平面通过大脑圆心)。从头部二维截面可看出,成年人及儿童通过安检门正中间或靠近线圈一侧时头部的感应电流强度最大值出现在上下两侧头皮及颅骨处。

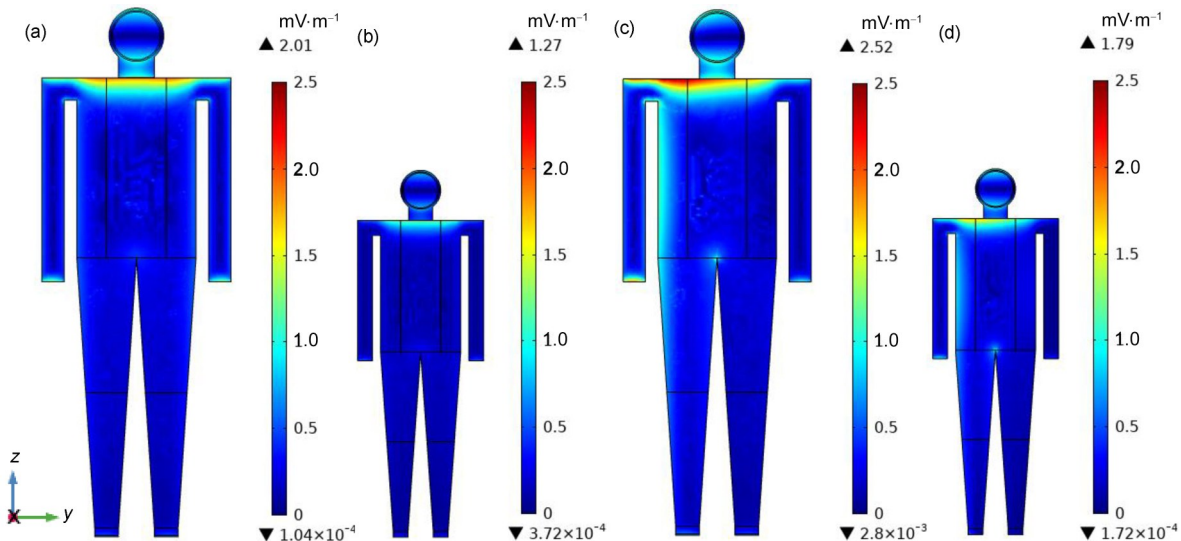


图7 成年人及儿童在安检门内感应电场强度分布截面图:(a),(b)正中间;(c),(d)靠近线圈一侧  
 Fig.7 Cross-sectional view of the induced electric field intensity distribution in WTMD for adults and children:  
 (a),(b) in the middle; (c),(d) near the coil side

表4 成年人及儿童处于不同位置时人体内部的感应电场强度值  
Table 4 Electric field strength value inside the human body when adults or children are in different positions

模型 Model	位置 Location	感应电场强度 / (mV·m <sup>-1</sup> ) Induced electric field	占 ICNIRP 限值的比率 / % Account for ICNIRP
成年人 Adult	安检门中间 In the middle of the WTMD	4.31	0.49
	安检门侧边 In the side of the WTMD	4.97	0.57
儿童 Children	安检门中间 In the middle of the WTMD	2.32	0.27
	安检门侧边 In the side of the WTMD	3.12	0.36

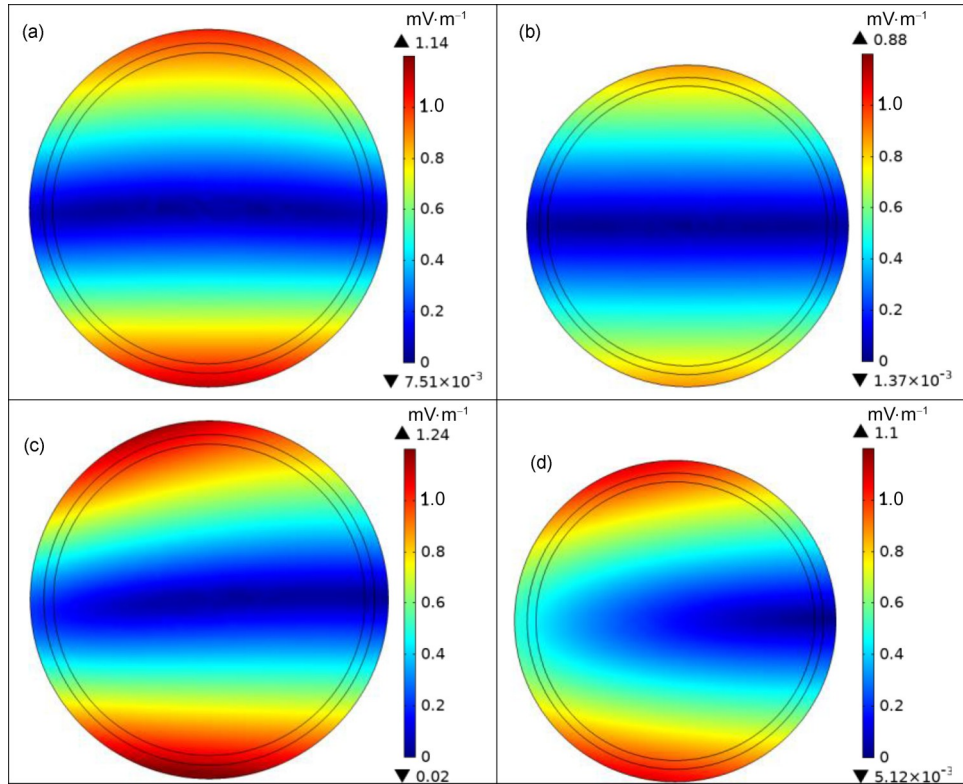


图8 成年人及儿童在安检门内头部感应电场强度分布截面图:(a)、(b)正中间;(c)、(d)靠近线圈一侧  
Fig.8 Cross-sectional of the distribution of the induced electric field in the head for adults and children in WTMD:  
(a), (b) in the middle; (c), (d) near the side of the coil

中枢神经系统组织的感应电场强度最大值及 ICNIRP 占比情况如表 5 所示。可见,成年人及儿童位于不同位置时头部中枢神经系统组织的感应强度最大值均小于 ICNIRP 限值(874.8 mV/m),因此,不会对人体中枢神经系统造成影响。

表5 成年人及儿童处于不同位置时头部中枢神经系统组织的感应电场强度值  
Table 5 Electric field strength value inside the CNS tissue of the head when adults or children are in different positions

模型 Model	位置 Location	头部中枢神经系统电场强度 / (mV·m <sup>-1</sup> ) Electric field strength of CNS tissue of the head	占 ICNIRP 限值的比率 / % Account for ICNIRP
成年人 Adult	安检门中间 In the middle of the WTMD	1.14	0.13
	安检门侧边 In the side of the WTMD	1.27	0.15
儿童 Children	安检门中间 In the middle of the WTMD	0.88	0.10
	安检门侧边 In the side of the WTMD	1.10	0.13



### 3 讨论

安检门工作时发射线圈产生的磁场频率为6.48 kHz, ICNIRP规定该频率下公众暴露的磁感应强度参考限值为27  $\mu\text{T}$ , 人体感应电场强度和中枢神经系统感应电场强度参考限值均为874.8 mV/m。当成年人及儿童位于安检门正中间时, 离发射线圈较近两侧胳膊处磁感应强度最大, 分别为1.75  $\mu\text{T}$ 、1.02  $\mu\text{T}$ , 占ICNIRP限值(27  $\mu\text{T}$ )的6.48%和3.78%; 感应电场强度最大值分布在人体的胸腹部, 分别为4.31 mV/m和2.32 mV/m, 占ICNIRP限值的0.49%和0.24%。当成年人及儿童位于安检门靠近线圈一侧时, 离发射线圈较近一侧胳膊处磁感应强度最大, 分别为2.44  $\mu\text{T}$ 、1.86  $\mu\text{T}$ , 为ICNIRP限值(27  $\mu\text{T}$ )的9.04%和6.89%; 感应电场强度最大值分布在离发射线圈较近一侧人体胸腹部, 分别为4.79 mV/m和3 mV/m, 为ICNIRP限值(874.8 mV/m)的0.55%和0.34%。对于头部中枢神经系统组织, 成年人及儿童位于安检门内正下方或靠近线圈一侧时, 感应电场最大值为1.14 mV/m、0.88 mV/m和1.27 mV/m、1.1 mV/m, 占ICNIRP限值(874.8 mV/m)的0.13%、0.10%和0.15%、0.13%。由此可见, 安检门工作时产生的电磁场环境, 未对成年人及儿童产生明显的健康风险。

### 4 结论

本研究分析了安检门工作时发射线圈产生的电磁场对人体产生的影响, 利用COMSOL仿真软件计算了人体组织中的磁感应强度值、感应电场值及中枢神经系统感应电场的分布, 与ICNIRP在6.48 kHz频率下的限值进行对比。结果表明: 对于人体中的磁感应强度, 当成年人及儿童位于安检门正中间或靠近线圈一侧时, 最大值出现在与发射线圈较近两侧或一侧胳膊处; 对于人体中的感应电场强度, 当成年人及儿童位于安检门正中间或靠近线圈一侧时, 最大值均匀分布在人体的胸腹部或离发射线圈较近一侧的胸腹部; 对于头部中枢神经系统感应电场强度, 当成年人及儿童位于安检门正中间或靠近线圈一侧时, 最大值均出现在上下两侧或靠近线圈一侧的头皮及颅骨处。成年人及儿童人体磁感应强度、感应电场强度及头部中枢神经系统感应电场强度最大值均未超过ICNIRP在该频率下提出的公众暴露限值。所以我们认为在6.48 kHz下工作的安检门是安全的, 这对消除大众对电磁安检门电磁

暴露的担忧有一定的积极作用, 同时也可以为我国制定相关电磁暴露安全防护标准提供支撑。

**作者贡献声明** 白伟江实施COMSOL建模与计算、数据整理、文字处理等工作; 逯迈教授整体设计论文工作的基本思想、实施步骤、数据处理、论文架构等, 审定论文的结果与结论。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

### 参考文献

- Misakian M, Casamento J P, Laug B. Development of emulator for walk-through metal detectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, **44** (3): 486-489. DOI: 10.1109/temc.2002.801775.
- Wu D, Qiang R, Chen J, *et al.* Possible overexposure of pregnant women to emissions from a walk through metal detector[J]. Physics in Medicine & Biology, 2007, **52** (19): 5735-5748. DOI: 10.1088/0031-9155/52/19/001.
- Im C H, Jung H K. Numerical emulator for walk-through metal detectors using 3-D indirect boundary integral equation method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, **54**(3): 1166-1170. DOI: 10.1109/TIM.2005.847241.
- Orcutt N, Gandhi O P. A 3-D impedance method to calculate power deposition in biological bodies subjected to time varying magnetic fields[J]. IEEE transactions on bio-medical engineering, 1988, **35**(8): 577. DOI: 10.1109/10.4590.
- Nelson C, Chaudhary V, Edman J, *et al.* Walk-through metal detectors for stadium security[C]. IEEE Symposium on Technologies for Homeland Security. IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/THS.2016.7568969.
- Kato M. Electromagnetics in Biology[J]. Springer Berlin, 2010, **30**(1): 149-150. DOI: 10.1029/94RS01919.
- 宋涛, 霍小林, 吴石增. 生物电磁特性及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2008: 1-6.  
SONG Tao, HUO Xiaolin, WU Shizeng. Bioelectromagnetic properties and their applications[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2008: 1-6.
- Chen X L, Benkler S, Li C H, *et al.* Low frequency electromagnetic field exposure study with posable human body model[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 2010: 2-5. DOI: 10.1109/IEMC.2010.5711363.
- Poljak D, Cvetkovic M, Dodig H, *et al.* Electromagnetic-

- thermal analysis for human exposure to high frequency (HF) radiation[J]. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2017, **12**(1): 55-67. DOI: 10.2495/DNE-V12-N1-55-67.
- 10 周兢程, 林艳云, 陈克亮, 等. 射频电磁辐射对大鼠脑组织胆碱能标志物的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2017, **35**(1): 010202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rrj.35.010202.  
ZHOU Jingcheng, LIN Yanyun, CHEN Keliang, *et al.* Effects of radiation-frequency electromagnetic radiation on cholinergic neuronal markers of SD rat brain[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2017, **35**(1): 010202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rrj.35.010202.
- 11 曲敏, 毕卓悦, 唐雨萌, 等. 生物电磁技术应用及其相关健康风险评估对策[J]. *高电压技术*, 2015, **41**(8): 2625-2634. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.013.  
QU Min, BI Zhuoyue, TANG Yumeng, *et al.* Application of bio-electromagnetic technique and its related health risk assessment strategy[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(8): 2625-2634. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.013.
- 12 Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1996, **41**(11): 2231-49. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/001.
- 13 Gabriel S, Lau R W, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1996, **41**(11): 2251-2269. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/002.
- 14 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.
- 15 Korobsova V, Morozov Y, Stolorov M. Influence of the electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection[C]. *International Conference on High-tension Electric Systems*. Paris, France: CIGRE, 1972: 23-26
- 16 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 fields[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(8): 2550-2561. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.08.008.
- 17 王琴, 苏海峰, 包家立等. 高压输电线环境电磁场暴露健康效应的原初作用[J]. *高电压技术*, 2013, **39**(1): 193-200. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.01.028.  
WANG Qin, SU Haifeng, BAO Jiali, *et al.* Primary reaction for the environmental electric and magnetic fields exposure around High Voltage Transmission line on health effects[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, **39**(1): 193-200. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.01.028.
- 18 Lu M, Ueno S. Comparison of the induced fields using different coil configurations during deep transcranial magnetic stimulation[J]. *PLoS One*, 2017, **12**(6): e0178422. DOI: 10.1371/journal.pone.0178422.
- 19 Lu M, Ueno S. Computational study toward deep transcranial magnetic stimulation using coaxial circular coils[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, **62**(12): 2911-2919. DOI: 10.1109/TBME.2015.2452261.
- 20 陈登鹏, 逯迈. 5G手机天线辐照特性及其在人体头部中温度场分布[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2021, **39**(3): 7030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.030601.  
CHEN Dengpeng, LU Mai. Exposure characteristics of 5G mobile phone antenna and its temperature field distribution in the human head[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2021, **39**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.030601.
- 21 杜庆中, 逯迈. 1000 kV/500 kV同塔混压四回交流输电线路电磁暴露安全评估[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020602.  
DU Qingzhong, LU Mai. Safety assessment of electromagnetic exposure of quadruple-circuit AC transmission line with 1000 kV/500 kV dual voltage on the same tower[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020602.
- 22 Editors G Z, Repacholi M, Mckinlay A. International commission on non-ionizing radiation protection[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2006, **92**(1): 1-3. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.022.
- 23 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (up to 300 GHz)[J].

- Health Physics, 1998, **74**(4): 494-522. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181aff9db.
- 24 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. 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.
- 25 IEEE Standards Coordinating Committee. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz: IEEE Std C95.1—2005[EB/OL]. (2006-04-19) [2022-04-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=10830>. DOI: 10.1109/IEEESTD.2006.99501.
- 26 环境保护部科技标准司. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. National Environmental Protection Agency. Controlling limits for electromagnetic environment: GB 8702—2014 [S]. Beijing: China Environmental Press, 2014.
- 27 黄锐, 曾国强, 罗群, 等. 一种用于金属安检门微弱信号处理电路的设计[J]. 测控技术, 2014, **33**(4): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8829.2014.04.040. HUANG Rui, ZENG Guoqiang, LUO Qun, *et al.* Design of a weak signal processing circuit for metal security gates[J]. Measurement and Control Technology, 2014, **33**(4): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8829.2014.04.040.
- 28 全国人类工效学标准化技术委员会. 中国成年人人体尺寸: GB 10000—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988. National Ergonomic Standardization Technical Committee. Human dimensions of Chinese adults: GB 10000—88[S]. Beijing: China Standard Press, 1988.
- 29 中国国家标准化管理委员会. 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.