

核电电磁脉冲中非电离辐射作用于人体的 电磁场和温度场仿真

王世鑫 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 采用国际电工委员会制定的双指数脉冲波形模拟核电电磁脉冲,分析脉冲波形主要谐波分量的幅值、频谱及相位。在多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立偶极子天线模型及人体三维模型,通过电磁场与热场耦合模块,求解人体组织中感应电场强度、磁场强度、比吸收率(Specific absorption ratio, SAR)和温度场分布。将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《限制电磁场暴露导则》进行比较。结果表明:人体距离暴露源1 km时,感应电场强度、磁场强度、局部最大 SAR 值和平均 SAR 值分别为 88.8 V/m、0.58 A/m、0.66 W/kg、0.011 W/kg。感应电场强度和磁场强度超过了 ICNIRP 规定限制 59.8 V/m 和 0.22 A/m。但在 10 km 处,电场、磁场、局部最大 SAR 值和平均 SAR 值都满足安全限制。人体组织中温度升高主要集中在大脑处,暴露时间为 6 min 时,温升为 0.217 1 °C,符合 ICNIRP 规定的局部温升 2 °C 和核心温升 1 °C 限值的要求。本研究结果为核电电磁脉冲环境中人体遭受电磁暴露的健康风险评估提供了一定的科学依据。

关键词 核电电磁脉冲, 偶极子天线, 电磁场, 温度场, 比吸收率

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0053

引用该文:

王世鑫, 逯迈. 核电电磁脉冲中非电离辐射作用于人体的电磁场和温度场仿真[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(3): 030602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0053.

WANG Shixin, LU Mai. Simulation research on electromagnetic field and temperature fields of nuclear electromagnetic pulse acting on human model[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(3): 030602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0053.



Simulation research on electromagnetic field and temperature fields of nuclear electromagnetic pulse acting on human model

WANG Shixin LU Mai

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

ABSTRACT The double exponential pulse waveform developed by the International Electrotechnical Commission is used to simulate the nuclear electromagnetic pulse, and the amplitude, spectrum, and phase of the

基金资助: 国家自然科学基金(51867014)和甘肃省教育厅项目(2024CXPT-11)资助

第一作者: 王世鑫,男,1995年1月出生,现在兰州交通大学在读研究生,研究方向为高功率电磁脉冲电磁暴露安全评估

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 2023-06-07; 修回 2023-08-19

Supported by National Natural Science Foundation of China (51867014) and Project of Department of Education of Gansu Province (2024CXPT-11)

First author: WANG Shixin (male) was born in January 1995. Now he is a graduate student at Lanzhou Jiaotong University, focusing on the safety assessment of high-power electromagnetic pulse electromagnetic exposure

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

Received 07 June 2023; accepted 19 August 2023

main harmonic components of the waveform are analyzed. A dipole antenna model and a three-dimensional human body model are established in the simulation software COMSOL Multiphysics. Through the coupling modules of electromagnetic and thermal fields, the induced electric field intensity, magnetic field intensity, specific absorption rate (SAR), and temperature distribution in human tissues were obtained. The results are compared with the "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields" established by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). The results showed that when the human body is 1 km away from the exposure source, the induced electric field intensity, magnetic field intensity, local maximum SAR value, and average SAR value are 88.8 V/m, 0.58 A/m, 0.66 W/kg, and 0.011 W/kg, respectively. The electric and magnetic fields exceed the ICNIRP limits of 59.8 V/m and 0.22 A/m, respectively. However, at a distance of 10 km, the electric field, magnetic field, local maximum SAR value, and average SAR value all meet the safety limits. The temperature rise in human tissues is mainly concentrated in the brain, and after an exposure time of 6 minutes, the temperature rise is 0.217 1 °C, which meets the ICNIRP's local temperature rise limit of 2 °C and core temperature rise limit of 1 °C. This study provides a scientific basis for the health risk assessment of electromagnetic exposure in the human body in a nuclear electromagnetic pulse environment.

KEYWORDS Nuclear electromagnetic pulse, Dipole antenna, Electromagnetic field, Temperature field, Specific absorption ratio

CLC TL72

核电电磁脉冲 (Nuclear electromagnetic pulse, NEMP) 是一种瞬态的电磁干扰。核电电磁脉冲波形具有振幅大、上升时间短、持续时间短、暴露面积广、频谱范围宽、瞬时功率大等特点^[1]。

核电电磁脉冲是由核爆炸产生的 γ 射线和X射线以光速由爆点向四周辐射,进入大气层后,与空气中的氧和氮原子撞击,产生康普顿电子,康普顿电子以爆心为中心做径向运动,在快速运动的过程中造成大气分子电离,产生二次电子-离子对。这些电子-离子对会受到电场的影响而向下漂移,因此具有导电性,使爆心周围的空气具有一定电导率。爆心附近形成正电荷堆积,远离爆心处形成负电荷堆积,产生阻碍康普顿电子运动的电场,同时形成回流的欧姆电流,最后达到平衡。由于空气密度随高度变化等非对称因素,康普顿电流和欧姆电流不是球对称,在地磁场的作用下,电子流做加速运动,并在电离空气中引发震荡,产生强烈的电磁辐射,从而形成电磁脉冲 (Electromagnetic pulse, EMP),该脉冲持续时间短,包含丰富高频分量^[2-4]。核电电磁脉冲对通信及电力传输设施的电磁兼容性已有系统研究^[5-6]。

电磁辐射会对人体心理、行为和识别能力造成影响^[7-8]。核电电磁脉冲在传播的过程中会在一瞬间发出极强的能量,并以光速向四周扩散,其携带的电磁能量如果被人体吸收,会对人体健康造

成威胁,比如引起严重的神经衰弱症,造成植物神经机能紊乱,以及对心血管系统的影响,包括心动过缓、血压下降或心动过速等。严重的可使人眼晶状体蛋白质凝固,伤害角膜、虹膜和前房,甚至可造成白内障,导致视力减退乃至完全丧失。

国内外对核电电磁脉冲的研究主要集中在核电电磁脉冲对通信、医疗、工业及军事设备等电子设备的电磁兼容性研究方面,针对核电电磁脉冲暴露是否会对人体造成直接或者潜在的危害研究较少。文献[9]采用垂直导体等效人体模型,对暴露于瞬态电磁场的人体安全性进行了分析。文献[10]讨论了不同电磁脉冲强度作用下头部组织对电磁波能量的吸收。文献[11-12]讨论了不同频率的核电电磁脉冲作用于人体头部SAR的分布。文献[13-14]研究了手机电磁暴露人头组织中SAR和温度的分布。文献[15-17]研究了不同频率电磁场暴露对人体及动物温度升高的影响。相较于手机电磁暴露在人头组织中比吸收率 (Specific absorption ratio, SAR) 的研究^[18-19],考虑NEMP作用于人体组织,全身比吸收率 (SAR) 和温度场分布的研究工作较少。

本文通过对核电电磁脉冲波形进行频谱分析,计算出其主要谐波分量的幅度、频率、相位,并作为激励施加到偶极子天线上,模拟人体暴露于核电电磁脉冲远场的情形。通过电磁场-热场耦合的

有限元分析, 获得人体组织中感应电场强度、磁场强度、SAR 和温度场分布; 并分析不同辐照时间、距离及频率对人体 SAR 值和温度场的影响, 评估人体在此环境下的安全性。为人体暴露于核电磁脉冲的健康风险提供科学依据。

1 模型建立及方法研究

1.1 核电磁脉冲波形频谱分析

核电磁脉冲产生的辐射强度可分为早、中、晚(E1、E2、E3)三个主要阶段, 如图1(a)所示。早期核电磁脉冲(E1阶段)其电场强度高达数万伏每米, 上升时间纳秒级, 持续时间在1 μ s 内。核电

磁脉冲一般是指E1阶段, 本文采用IEC确定的双指数波形模拟核电磁脉冲, 如图1(b)所示。

根据傅里叶级数分析, 任何波形都是由不同频率正弦波的加权和构成, 核电磁脉冲能够拆分为不同频率的正弦波^[20]。利用Matlab 软件的快速傅里叶变换函数(FFT), 对图1(b)进行快速傅里叶变换, 得到核电磁脉冲的不同谐波(图2(a))。对核电磁脉冲1~10次谐波分别进行加权, 得出傅里叶级数复合而成的核电磁脉冲图, 如图2(b)所示, 傅里叶级数阶次越高, 曲线拟合精度越好。谐波波次越高, 其幅值越低, 因此, 本文主要研究前三次谐波, 它们的幅度、相位数据如表1所示。

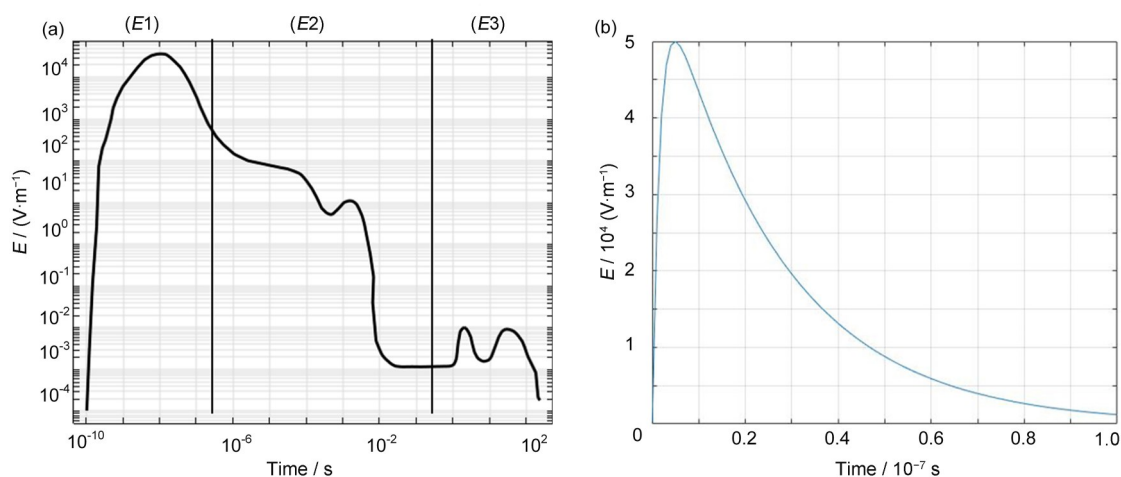


图1 (a)核电磁脉冲3个阶段;(b)核电磁脉冲E1阶段波形
Fig. 1 (a) Three stages of nuclear electromagnetic pulse; (b) NEMP waveform of E1 stage

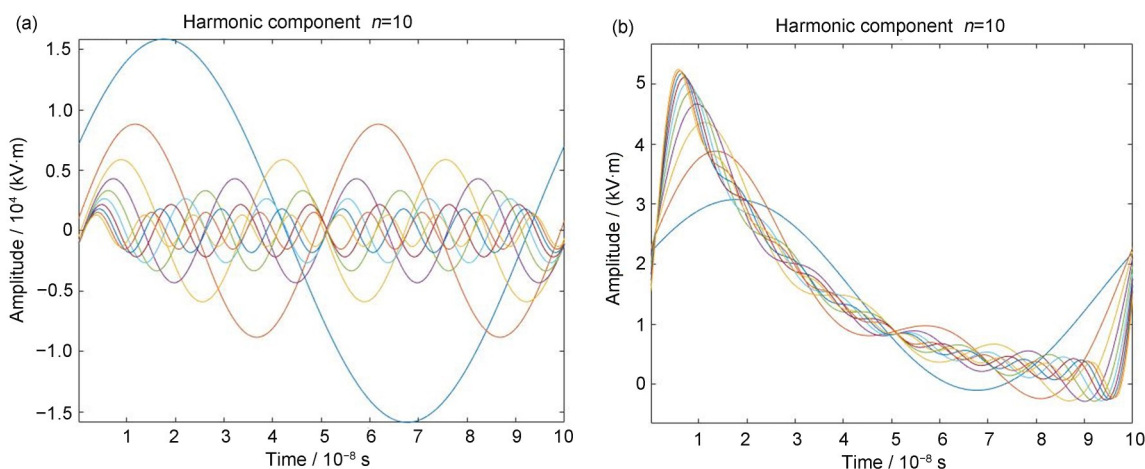


图2 频谱分析:(a)傅里叶级数谐波分量;(b)傅里叶级数复合曲线
Fig.2 Spectrum analysis: (a) Fourier series harmonic component, (b) Fourier series composite curves

表1 各次谐波分量幅度和相位
Table 1 Amplitude and phase of each harmonic component

谐波分量 Harmonic component	1	2	3
幅度 Amplitude / ($V \cdot m^{-1}$)	15 883.0	8 828.5	5 889.5
相位 Phase / ($^{\circ}$)	-63.65	-84.46	84.22

1.2 人体模型和天线模型的建立

通过对核电磁脉冲E1段频谱分析，前几次谐波的频率均在兆级赫兹频段，对人体的电磁暴露

可以通过偶极子天线产生的电磁波进行等效。本文采用Comsol仿真软件构建偶极子天线模型和人体模型，偶极天线模型和人体模型分别如图3和图4所示，其半臂长选为波长的1/4，天线半径是臂长的1/20，两臂间馈电点的间距为臂长的1/100，天线材质为铜。构建的偶极子天线如图3所示。人体模型根据中国成年人人体尺寸(GB/T 10000—1988)^[21]发布的人体尺寸进行构建。构建基于经典的3层球头模型^[22]。详细的建模尺寸如图4所示。天线的中心与人体的中心持平。

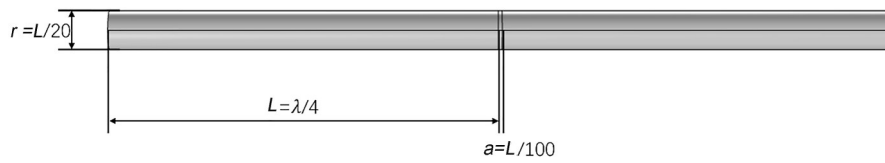


图3 偶极天线模型
Fig.3 Dipole antenna model

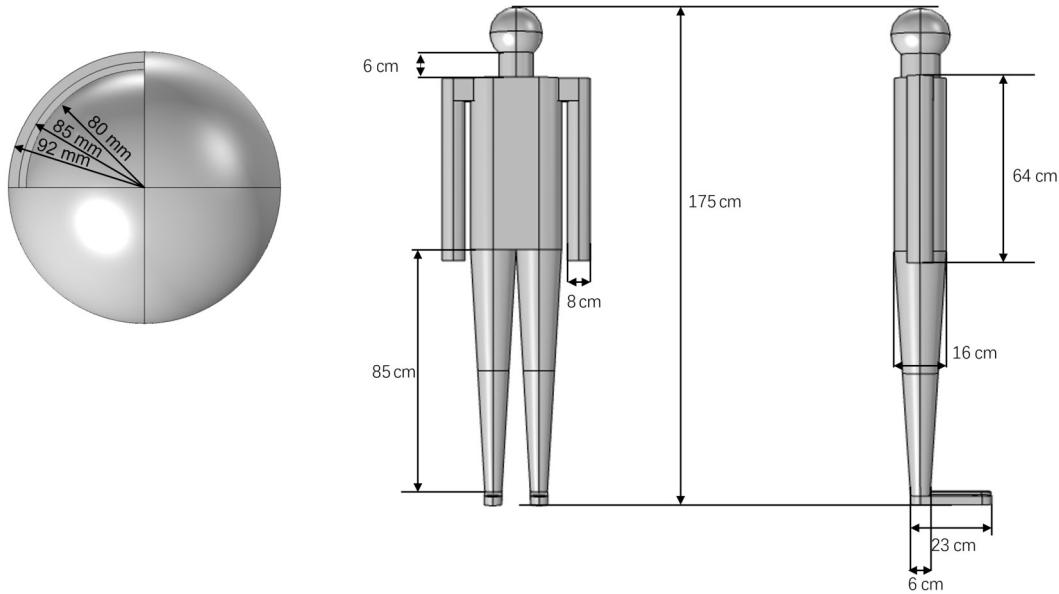


图4 人体模型
Fig.4 Human model

人体生物组织介电数据根据4阶Cole-Cole模型^[23]计算(式(1))，各组织层的比热容、密度、导热系数、血液灌注率等数据参考文献[24-26]得出，详细数据如表2和表3所示。

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

式中： $\hat{\epsilon}_r$ 为复相对介电常数； ϵ_r' 和 ϵ_r'' 为 $\hat{\epsilon}_r$ 的实部和虚部，且分别命名为相对介电常数和损耗因子； $\epsilon_{r\infty}$ 和 $\Delta\epsilon_n$ 分别为频率无穷大时的相对介电常数和相对介电常数增量； τ_n 为中心弛豫时间，s； α 为弛豫分布的时间， $0 \leq \alpha \leq 1$ ； σ_i 为离子电导率，S/m； ω 为角频率，rad/s； ϵ_0 为真空介电常数，F/m。

表2 不同频率下人体各组织介电常数和电导率
Table 2 Dielectric constant and conductivity of human tissues at different frequencies

频率 / MHz Frequency	组织 Tissue	相对介电常数 Relative permittivity	电导率 / (S·m ⁻¹) Conductivity
10	头皮 Scalp	361.66	0.197 32
	颅骨 Skull	36.772	0.042 822
	大脑 Brain	267.165	0.707 467 5
	躯干 Trunk	201.095 4	0.390
20	头皮 Scalp	209.22	0.289 53
	颅骨 Skull	24.917	0.048 915
	大脑 Brain	178.86	0.774 1
	躯干 Trunk	118.364 92	0.500 932
30	头皮 Scalp	152.94	0.341 68
	颅骨 Skull	20.939	0.052 468
	大脑 Brain	140.39	0.816 117 5
	躯干 Trunk	91.585 72	0.522 897 2

表3 人体组织热参数
Table 3 Thermal properties of different biological tissues of the human model

组织 Tissue	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$C / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$Q_{\text{met}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	ω_b / s^{-1}
头皮 Scalp	1 125	0.42	3 500	1 620	0.02
颅骨 Skull	1 990	0.37	3 100	610	0.000 46
大脑 Brain	1 038	0.53	3 650	7 100	0.008 83
躯干 Trunk	1 169	0.412	2 960	911	0.003

1.3 天线电磁波传播分析

1.3.1 天线的远场辐射电场

设偶极天线双臂垂直 xoy 平面，中心馈电点与原点重合，如图3所示，双臂长度远大于其半径 ($L \gg a$)，其半径远小于波长 ($a \ll \lambda$)，因此，偶极子只考虑纵向电流；忽略间隙内的位移电流所产生的辐射场。天线电流分布不均匀，根据电磁场理论，计算得远场电场^[27-29]公式(2)。

$$E_{\theta} = \int_{-\frac{\lambda}{4}}^{\frac{\lambda}{4}} j \frac{60\pi I_0 \cos(kz)}{\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} e^{jkz \cos(\theta)} dz \quad (2)$$

式中： I_0 为电流最大幅值； z 为天线距坐标原点距离； r 为远场测量点与天线的距离； θ 为 r 与 xoy 坐标面夹角。

1.3.2 电磁波传播的边界条件

为了在多物理场仿真软件中更加准确地模拟电磁波在介质中传播，需要根据麦克斯韦方程组在有限域中设置边界条件：(1)指派零切向电场的边界条件；(2)指派零切向磁场的边界条件；(3)

在两种不同导电媒质分界面上衔接条件；(4)建立完美匹配层(PML)，实现模拟空气域边界处于辐射源无限远处。

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}_1 = \mathbf{n} \times \mathbf{E}_2 \quad (5)$$

式中： $\mathbf{E}$ 为电场强度，V/m； $\mathbf{H}$ 为磁场强度，A/m； $\mathbf{E}_1$ 和 $\mathbf{E}_2$ 分别为边界两边的电场强度； $\mathbf{n}$ 为法向量。

1.4 电磁波生物传热分析

1.4.1 SAR值计算分析

电磁场可以渗透到组织内部，电磁辐射的生物效应取决于生物体生物组织吸收能量的数量和形式。在具有不同介电常数的材料之间的界面处，例如发生在空气和生物体表面之间的界面处，电磁波要么被反射，要么被折射，未被反射的入射能量部分进入人体组织并被部分或完全吸收。比吸收率(SAR)通常用来衡量人体生物组织对电磁能量的吸收程度，即单位人体组织吸收的电磁波

能量, 单位 W/kg。人体模型中的 SAR 采用数值计算的方法得到^[30]。SAR 值的定义见公式 (8)。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma}{2\rho} |\mathbf{E}|^2 = \frac{\sigma}{2\rho} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2) \quad (8)$$

全身平均 SAR 是全身吸收的总功率除以身体质量, 见公式(9)。

$$\text{SAR}_{\text{WB}} = \frac{\text{TP}_{\text{WB}}}{\text{TM}_{\text{WB}}} = \frac{\left[\int_{\text{WB}} \delta |\mathbf{E}|^2 dv \right]_{\text{WB}}}{\int_{\text{WB}} \rho dv} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m; σ 为电导率, S/m; ρ 为组织密度, kg/m³。

SAR_{WB} (Whole-body average SAR): 全身平均 SAR, W/kg; TP_{WB} (Total power): 吸收总能量, W; TM_{WB} (Total mass): 总质量, kg。

1.4.2 电磁波传热分析

本研究考虑了由于远场暴露引起的人体组织中热传递和温度升高。为了解决热问题, 研究了电磁波传播和非稳态生物传热的耦合效应。温度分布取决于 SAR。这是因为 SAR 是人体组织吸收电磁波能量的物理量。吸收的电磁能转化为热能, 从而提高了人体组织的温度。为了计算人体模型中的温度升高, 使用了考虑热传导、血流、代谢过程和电磁加热等热交换机制的生物热方程^[31]。

生物热方程见式(10)。

$$C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \rho (\text{SAR}) + Q + B(T_b - T) \quad (10)$$

式中: T 是组织的温度, °C; T_b 是血液温度, °C; K 是组织的热导率, W/m·K; C_p 是组织的热容量, J/(kg·K); ρ 是生物组织的密度, kg/m³; B 是与血流相关项, s⁻¹; Q 是代谢过程引起的热源, W/m³。

1.4.3 电磁波传热边界条件

为了准确研究核电磁脉冲对人体产生的温升, 需要建立一个热绝缘, 隔绝人体与空气域间的热对流, 防止热对流对人体造成热损耗, 进而影响研究结果, 即设置零传热通量边界条件, 如式(11)所示。

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{q}$ 为热通量, 又称热流密度, 是指单位时间通过单位面积的热能, W/m²。

2 结果与分析

2.1 仿真计算及其验证

为了验证 Comsol 仿真计算数值模型的准确性, 以文献[32]的模型为例, 计算了 SAR 的分布, 并与文献结果进行了对比。建立长、宽、高分别是 50 cm、30 cm、15.5 cm 的生物组织, 偶极子天线工作频率为 835 MHz, 辐射功率为 0.5 W, 研究在波传播方向 SAR 在生物组织中随深度的变化。在 y 轴方向, 取距表面 0~20 mm 的 SAR 值, 将结果和文献[32]的结果绘制成曲线图, 如图 5 所示, SAR 在电磁波传播方向上呈指数下降。图 5 清楚地表明本文结果与文献[32]有良好的一致性。

2.2 电场强度和磁场强度分布

为了研究核电磁脉冲一次谐波对人体的电磁暴露水平, 将一次谐波参数激励到偶极子天线, 计算得到的人体组织中感应电场强度和磁场强度分布 (人体的三维图和切面图) 如图 6 所示。

从图 6(a) 和 (b) 可以看出, 人体感应电场峰值在头部下颞颅骨、小腿处。人体与辐射源距离为 1 km、10 km 处时, 人体的感应电场强度最大值分别为 88.8 V/m、8.9 V/m, 分别占 ICNIRP 全身暴露公众限值 149%、14.9%。根据图 6(c) 和 (d) 可以得出, 人体磁场强度峰值在脚踝处。人体与辐射源距离为 1 km、10 km 时, 人体的磁场强度最大值分别为 0.58 A/m、0.06 A/m, 分别占 ICNIRP^[33] 全身暴露公众限值的 263.6%、27.3%。在全身照射下, 由于流经相对较小横截面积的电流集中, 因此, 颅骨和脚踝组织处的电磁场强度高于其他组织; 且人体表面的磁场强度明显高于人体体内的磁场强度, 随着从体表进入人体内部组织, 磁场强度逐渐降低。不同距离处, 人体组织中最大感应电场与磁场强度如表 4 所示, 在 1 km 处时, 颅骨的感应电场峰值都高于 ICNIRP 标准的公众限值, 大脑、颅骨、头皮、躯干组织的磁场峰值高于 ICNIRP 标准的公众限值; 因此, 会对人体健康造成风险; 在 10 km 时, 各组织的电场和磁场值都低于 ICNIRP 标准的公众限值, 此时, 不会对人体健康造成伤害。

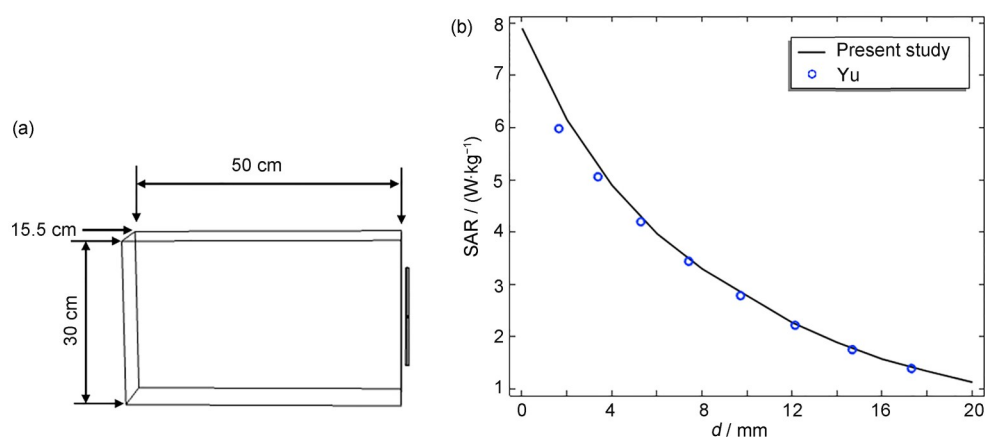


图5 SAR值验证:(a)验证的计算域;(b)计算的SAR值与文献[32]的比较
Fig.5 SAR value verification: (a) calculation domain of verification; (b) comparison of calculated SAR values with reference [32]

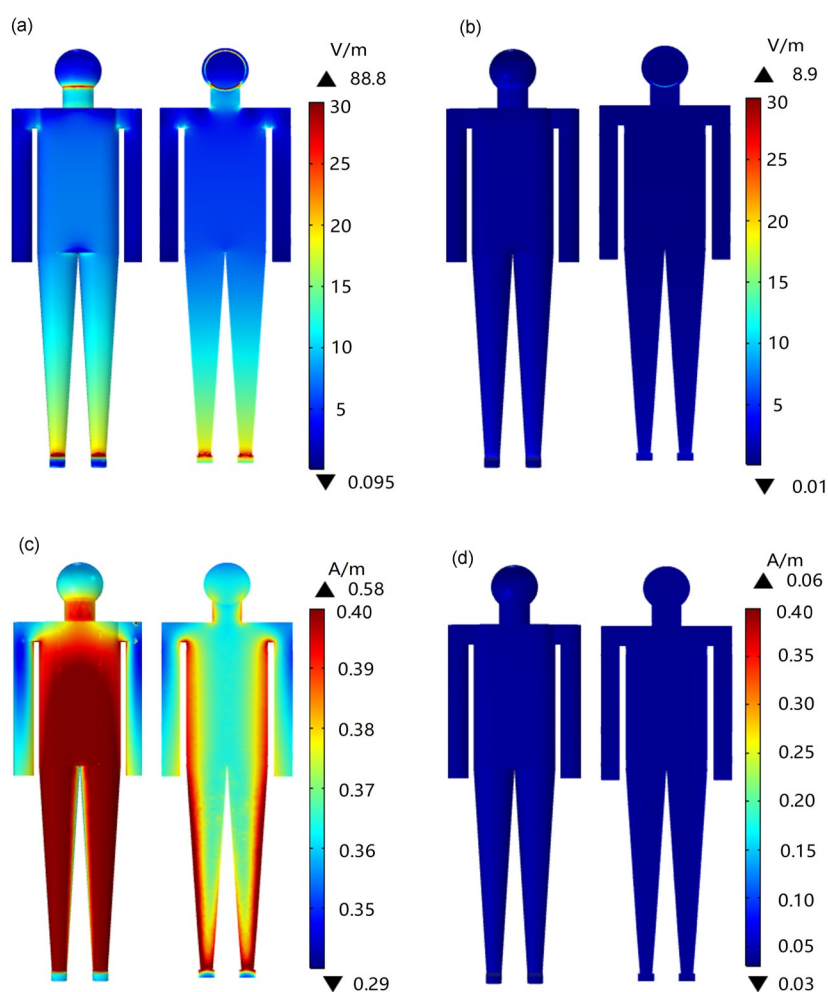


图6 人体感应电磁场分布:(a)1 km 电场强度;(b)10 km 电场强度;(c)1 km 磁场强度;(d)10 km 磁场强度
Fig.6 Human electromagnetic field distribution: (a) electric field intensity at 1 km; (b) electric field intensity at 10 km; (c) magnetic field intensity at 1 km; (d) magnetic field intensity at 10 km

表4 各组织电场和磁场强度最大值
Table 4 Maximum electric and magnetic field intensities in different tissues

距离 / km Distance	组织名称 Tissue	电场强度峰值 / ($V \cdot m^{-1}$) Peak value of electric field	磁场强度 / ($A \cdot m^{-1}$) Magnetic field
1	头皮 Scalp	3.25	0.39
	颅骨 Skull	88.80	0.39
	大脑 Brain	0.73	0.39
	躯干 Trunk	53.20	0.58
10	头皮 Scalp	0.33	0.04
	颅骨 Skull	8.90	0.04
	大脑 Brain	0.72	0.04
	躯干 Trunk	5.30	0.06

2.3 SAR值分布

当电磁波到达人体表面，将有部分电磁能量进入人体组织并被人体组织吸收。图7所示为人体在距暴露源不同距离时的SAR分布。

从图7可以看出，人体SAR值峰值在脚踝处。1 km、2 km、10 km人体组织中的SAR值最大值分别为0.66 W/kg、0.17 W/kg、0.006 6 W/kg，分别占

ICNIRP局部暴露公众限值的33%、5%、0.33%。采用公式(9)求SAR值全身求平均值分别为0.011 W/kg、0.002 9 W/kg、0.000 11 W/kg，其分别占ICNIRP全身平均暴露公众限值的13.75%、3.625%、0.138%。因此，在距离辐射源1 km时，人体各组织的SAR值都低于了ICNIRP限值，在1 km以上时，人体吸收的电磁能量不会对人体健康造成危害。

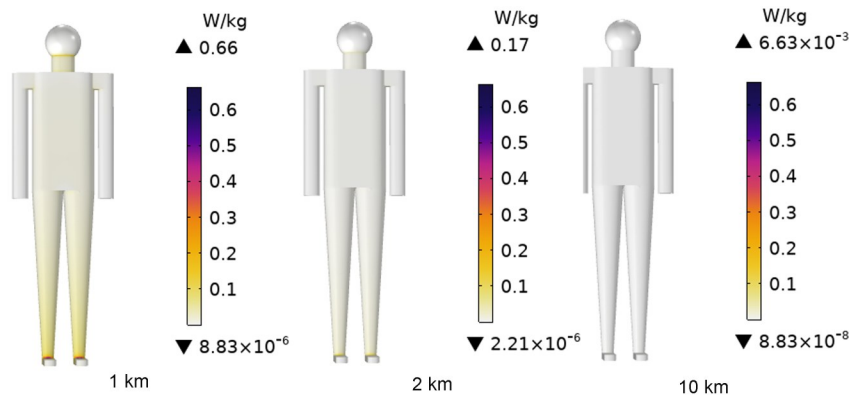


图7 不同距离处人体SAR值分布
Fig.7 Distribution of SAR in human body at varied distance

2.4 温度分布

2.4.1 距离对温度的影响

本研究的重点是由于远场电场暴露在人体组织中引起的温度变化。在人体模型中，环境温度变化的影响已被忽略，以深入研究电磁场和人体组织之间的相互作用。在人体的皮肤表面，设置零传热通量边界条件，隔绝人体与空气域间热对流，防止热对流造成热损耗。由于是远场电磁暴露，因此人体组织的温度增量很小，温度调节机制的影响也被忽略。为了研究电磁波在人体组织中

引起的温度增量，对电磁波传播和非稳态传热的耦合效应以及初始条件和边界条件进行了数值求解。通过电磁场与热场耦合，生物组织吸收电磁波能量，并转化为热能。实现了SAR转化为组织中的温度增量。将人体暴露在距离辐射源1 km和10 km处，持续暴露时间6 min，计算人体组织中的温升分布，如图8所示。

由于不同生物组织具有不同的介电特性，人体模型每一种生物组织吸收的电磁能量将不同。由图8可以得出，人体温度增量最大值汇集在头部大

脑处, 最小值主要集中在皮肤上。人体距离辐射源 1 km、10 km 处的温升最大值分别为 0.217 1 °C、0.216 9 °C, 低于 ICNIRP 标准的局部温度 2 °C 和核心温度 1 °C 的限值。随着距离的变化各组织的温度越接近稳定, 电磁波渗透进人体并被吸收转化成热量的能量很小。研究发现, 人体温度升高分布与局部 SAR 分布并不对应, 这与组织的血液灌注

率、导热系数等参数密切相关, 大脑在 1 km、10 km 处温升值近乎相等。可能的原因是: 人体的温度不仅受吸收的电磁辐射能量(SAR)的影响, 还受到血液灌注率等热特性因素影响; 由于 1~10 km 吸收的能量都较低, 在 mW/kg 量级; 因此, 通过吸收能量来引起的温度变化小。

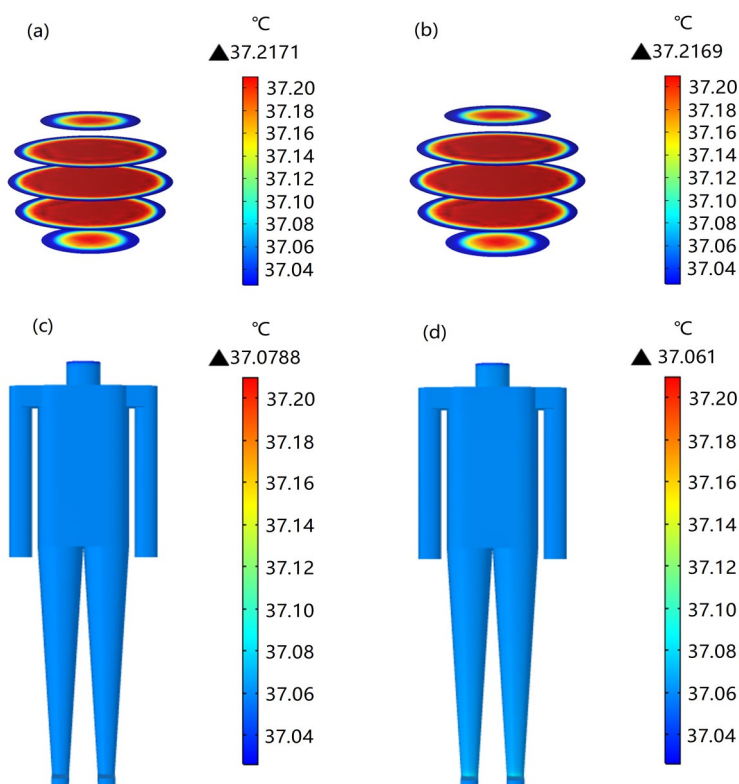


图8 人体组织温度分布:(a)、(c)1 km 头部切面和躯干;(b)、(d) 10 km 头部切面和躯干
Fig.8 Temperature distribution in human tissues: (a), (c) 1 km head section and trunk; (b), (d) 10 km head section and trunk

2.4.2 暴露时间对温度的影响

图9是频率为10 MHz、人体距离辐射源 1 km 处, 随着暴露时间的持续变化, 各组织的温度变化曲线图。根据曲线图可以看出, 暴露时间增加显然影响着各组织温度变化。持续暴露导致各组织中不断积累热量, 从而提高其温度。然而, 随着暴露时间不断增加, 当持续时间达到 6 min 后, 温度随暴露时间的变化相对较小, 原因是随着温度提高, 各组织传热、散热的能量等于其吸收的能量时, 各组织温度会趋于稳定状态。

2.4.3 频率对温度的影响

图10所示为核电磁脉冲 1~3 次谐波(频率分别为 10 MHz、20 MHz 和 30 MHz)作用下, 大脑在距辐射源 1 km 处, 大脑的温度增量随暴露时间的变化。由于不同谐波施加到偶极子天线的激励值不同,

不同频率作用下, 一次谐波与 3 次谐波相比, 大脑中温度的改变有明显的差别。因此, 核电磁脉冲的主要谐波对生物组织温度的影响尤为重要。

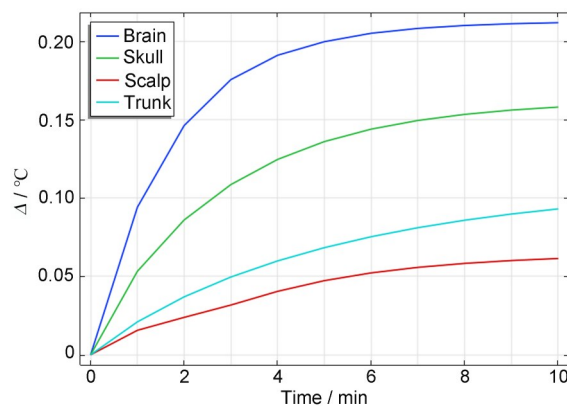


图9 人体温升与暴露时间的关系(彩色见网络版)
Fig.9 Temperature rise in body tissues with exposure time (color online)

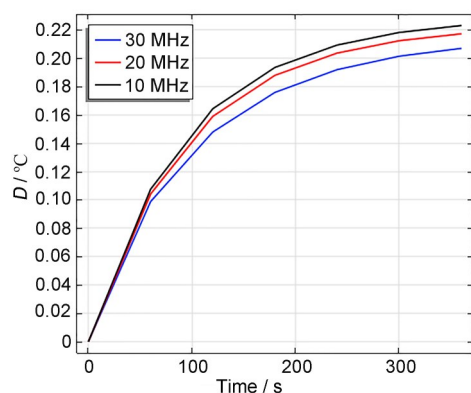


图10 不同谐波作用下脑组织温升与暴露时间变化关系
(彩色见网络版)

Fig.10 Dependence of brain temperature changes with exposure time at different frequencies (color online)

3 结论

本文研究核电磁脉冲作用于人体的电场强度、磁场强度、SAR值及温度变化。电场强度分布随距离的增加呈下降趋势，人体组织吸收的能量依赖于暴露距离和组织的介电特性。ICNIRP 导则中电场一般公众暴露安全限值为 59.8 V/m，在一次谐波照射下，距辐射源 1 km 时，人体感应电场强度高出 ICNIRP 限值 48%；磁场一般公众暴露安全限值为 0.22 A/m，在一次谐波照射下，距辐射源 1 km 时，人体感应电场强度高出 ICNIRP 限值 163.6%；SAR 一般公众暴露安全限值为 2 W/kg，平均 SAR 值为 0.08 W/kg，在一次谐波照射下，在 1 km 处时 SAR 值均低于 ICNIRP 规定的限值。

电场、磁场、SAR 值在随人体与辐射源距离的增加逐渐下降。在相同暴露距离下，核电磁脉冲作用于人体的感应电场、磁场及 SAR 分布差异大，人体的感应电场强度最大值分布在颅骨处，而磁场和 SAR 值分布在躯干脚踝处，且头部 SAR 值远小于躯干值。

在暴露时间相同的条件下，核电磁脉冲不同频率谐波引起温度变化趋势基本相似，生物组织中温度改变相对较小，分析原因认为：1 km、10 km 距离相对于核电磁脉冲来说距离较小，人体组织吸收的能量相差较小，不会引起明显的差异。随着暴露时长的增加，受人体组织吸收的电磁能量和血液灌注率等热特性因素影响，电磁暴露造成的温升越来越小。人体温度升高主要集中在头部，电磁暴露 6 min 时，1 km、10 km 处大脑组织的温度升高了 0.217 1 °C 和 0.216 9 °C。且均在 ICNIRP

规定的核心温度升高 1 °C，局部温度升高 2 °C 的电磁暴露限值范围内。

本文通过电磁场与生物传热多物理场耦合分析，研究了核电磁脉冲作用下，人体组织中感应电场强度、磁场强度、SAR 和温度场的分布；研究在不同的暴露条件下，人体组织对核电磁脉冲电磁能量吸收及温度改变。研究中获得的结果有助于更好地理解核电磁脉冲与人体之间的相互作用。本论文的研究结果为核电磁脉冲环境中人体遭受电磁暴露的健康风险评估提供了一定的科学依据。

作者贡献声明 王世鑫实施 COMSOL 建模与计算、数据整理、文字处理等工作；逯迈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

- 1 吴坚强. 高功率微波的发展和应用[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(S1): 129-132.
WU Jianqiang. Developments and applications of high power microwaves[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(S1): 129-132.
- 2 谭志良, 胡小锋, 毕军建. 电磁脉冲防护理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
TAN Zhiliang, HU Xiaofeng, BI Junjian. Electromagnetic pulse protection theory and technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- 3 王建国, 牛胜利, 张殿辉, 等. 高空核爆炸效应参数手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
WANG Jianguo, NIU Shengli, ZHANG Dianhui, et al. Manual of parameters of high-altitude nuclear explosion effect[M]. Beijing: Atomic Press, 2010.
- 4 Longmire C L. On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, EMC-20(1): 3-13. DOI: 10.1109/TEMPC.1978.303688.
- 5 Deb G K, Pande D C. Nuclear electromagnetic pulse (NEMP) — a threat to electronics[J]. IETE Technical Review, 1987, 4(1): 9-19. DOI: 10.1080/02564602.1987.11438055.
- 6 Hill J S. Electromagnetic compatibility technology applied to the nuclear electromagnetic pulse[C]//1973 IEEE International Electromagnetic Compatibility

- Symposium Record. New York: IEEE, 1973. DOI: 10.1109/ISEMC.1973.7569821.
- 7 邓桦. 电磁辐射和微波的生物学效应[J]. 国外医学(放射医学核医学分册), 2002, **26**(4): 191-193. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2002.04.014.
DENG Hua. Biologic effects of electromagnetic radiation and microwave[J]. Foreign Medical Sciences: Section of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 2002, **26**(4): 191-193. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1673-4114.2002. 04.014.
 - 8 查振林, 许顺红, 卓海华. 电磁辐射对人体的危害与防护[J]. 北方环境, 2004, **29**(3): 25-28.
ZHA Zhenlin, XU Shunhong, ZHUO Haihua. Harm and protection of electromagnetic radiation to human body[J]. Environmental Science and Management, 2004, **29**(3): 25-28.
 - 9 Mezoued S, Nekhoul B, Poljak D, *et al.* Human exposure to transient electromagnetic fields using simplified body models[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2010, **34**(1): 23-29. DOI: 10.1016/j.enganabound.2009.07.013.
 - 10 齐红星, 陈树德, 叶红, 等. 电磁脉冲作用人体的数值模拟和分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(12): 1581-1584. DOI: 10.1007/BF02911033.
QI Hongxing, CHEN Shude, YE Hong, *et al.* Numerical simulation of the human body illuminated by electromagnetic pulse[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, **16**(12): 1581-1584. DOI: 10.1007/BF02911033.
 - 11 Fang C H, Zhang Q, Xie D G, *et al.* The simulation of Specific Absorption on human head model from nuclear electromagnetic pulse[C]//2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing: IEEE, 2010: 370-373. DOI: 10.1109/APEMC.2010.5475551.
 - 12 Fang C H, Liu Q F, Zhao X N. The simulation of SAR on human head model from the second double-exponential electromagnetic pulse[C]//2012 6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM). Shanghai: IEEE, 2012: 337-339. DOI: 10.1109/CEEM.2012.6410637.
 - 13 Wiart J, Hadjem A, Wong M F, *et al.* Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults[J]. Physics in Medicine & Biology, 2008, **53**(13): 3681. DOI: 10.1088/0031-9155/53/13/019.
 - 14 Wessapan T, Rattanadecho P. Numerical analysis of specific absorption rate and heat transfer in human head subjected to mobile phone radiation: effects of user age and radiated power[J]. Journal of Heat Transfer, 2012, **134**(12): 121101. DOI: 10.1115/1.4006595.
 - 15 Mikołajczyk H, Kameduła M, Ruppe I, *et al.* Thermal effects in rats exposed to heat at 40 °C or to electromagnetic fields[J]. Journal of Thermal Biology, 1991, **16**(2): 115-119. DOI: 10.1016/0306-4565(91)90008-P.
 - 16 Guo K, Zhang Y, Fang X, *et al.* Effects of acute exposure to ultra-wideband pulsed electromagnetic fields on the liver and kidneys of mice[J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2020, **39**(2): 109-122. DOI: 10.1080/15368378.2020.1737806.
 - 17 Laakso I, Morimoto R, Heinonen J, *et al.* Human exposure to pulsed fields in the frequency range from 6 to 100 GHz[J]. Physics in Medicine & Biology, 2017, **62**(17): 6980-6992. DOI: 10.1088/1361-6560/aa81fe.
 - 18 Lin J C, Wang Z. SAR and temperature distributions in canonical head models exposed to near-and far-field electromagnetic radiation at different frequencies[J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2005, **24**(3): 405-421. DOI: 10.1080/15368370500382073.
 - 19 Lee A K, Hong S E, Kwon J H, *et al.* Mobile phone types and SAR characteristics of the human brain[J]. Physics in Medicine & Biology, 2017, **62**(7): 2741-2761. DOI: 10.1088/1361-6560/aa5c2d.
 - 20 Stutzman W L, Thiele G A. 天线理论与设计[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 258-292.
Stutzman W L, Thiele G A. Antenna theory and design [M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2006: 258-292.
 - 21 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸: GB 10000—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Human dimensions of Chinese adults: GB 10000—1988 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
 - 22 Rush S, Driscoll D A. Current distribution in the brain from surface electrodes[J]. Anesthesia & Analgesia, 1968, **47**(7): 17-23.
 - 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 Bhargava D, Leeprechanon N, Rattanadecho P, *et al.* Specific absorption rate and temperature elevation in the

- human head due to overexposure to mobile phone radiation with different usage patterns[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **130**: 1178-1188. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.031.
- 25 Fujimoto M, Hirata A, Wang J Q, *et al.* FDTD-derived correlation of maximum temperature increase and peak SAR in child and adult head models due to dipole antenna [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, **48**(1): 240-247. DOI: 10.1109/TEM.2006.870816.
- 26 Hirata A, Fujimoto M, Asano T, *et al.* Correlation between maximum temperature increase and peak SAR with different average schemes and masses[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, **48** (3): 569-578. DOI: 10.1109/TEM.2006.877784.
- 27 王增和, 卢春兰, 钱祖平, 等. 天线与电波传播[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
WANG Zenghe, LU Chunlan, QIAN Zuping, *et al.* Antennas and radio wave propagation[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 28 Khraisat Y S H, Hmood K A, Al-Mofleh A. Analysis of the radiation resistance and gain of full-wave dipole antenna for different feeding design[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2012, **4**(6): 235-242. DOI: 10.4236/jemaa.2012.46033.
- 29 Khraisat Y S H, Hmood K A, Anwar A M. The current distribution of symmetrical dual and triple feeding full-wave dipole antenna[J]. Modern Applied Science, 2011, **5** (6): 126-132. DOI: 10.5539/mas.v5n6p126.
- 30 Hirata A, Sugiyama H, Fujiwara O. Estimation of core temperature elevation in humans and animals for whole-body averaged sar[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, **99**: 53-70. DOI: 10.2528/pier09101603.
- 31 Moore S M, McIntosh R L, Iskra S, *et al.* Effect of adverse environmental conditions and protective clothing on temperature rise in a human body exposed to radiofrequency electromagnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2017, **38**(5): 356-363. DOI: 10.1002/bem.22048.
- 32 Yu Q S, Gandhi O P, Aronsson M, *et al.* An automated SAR measurement system for compliance testing of personal wireless devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, **41**(3): 234-245. DOI: 10.1109/15.784158.
- 33 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health physics, 2020, **118**(5): 483-524.