

# 基于中国可视人数据集的时域有限差分法人体头部电磁仿真模型构建

李昊澄, 宁旭, 谭立文, 金贵, 许佳, 秦明新  
陆军军医大学生物医学工程与影像医学系, 重庆 400038

**【摘要】目的:**为掌握人体组织电磁特性的变化,实现对真实人体结构电磁辐射特性的模拟和仿真计算。**方法:**在中国数字可视化人体数据集基础上,提出建立真实人体三维电磁模型的方法并利用 CST STUDIO SUITE 对其进行电磁仿真计算。**结果:**构建了适用于时域有限差分法计算的网格精度为  $1\text{ mm}^3$  的三维人体头部电磁模型,满足频率为 30 GHz 以下的电磁仿真计算在数值色散空间离散间隔上的要求。**结论:**该模型具有很好的可视性和可操作性,对构建数字电磁人以及优化生物电磁检测技术具有重要的理论价值和实践指导意义。

**【关键词】**人体头部模型;脑磁感应检测;中国可视化人;时域有限差分法;电磁仿真

**【中图分类号】**R314

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)07-0837-05

## Construction of FDTD electromagnetic simulation model of human head based on Chinese visible human data set

LI Haocheng, NING Xu, TAN Liwen, JIN Gui, XU Jia, QIN Mingxin

Department of Biomedical Engineering and Imaging Medicine, Army Medical University, Chongqing 400038, China

**Abstract: Objective** To realize the simulation and simulation calculation of the electromagnetic radiation characteristics of the real human body for grasping the changes of the electromagnetic characteristics of human tissues. **Methods** Based on Chinese digital visual human body data set, the method for establishing the three-dimensional electromagnetic model of the real human body was proposed, and the electromagnetic simulation calculation was carried out using CST STUDIO SUITE. **Results** A three-dimensional electromagnetic model of the real human head which was suitable for finite-difference time-domain calculation was constructed, with a grid precision of  $1\text{ mm}^3$ , and it satisfied the requirement of numerical dispersion for spatial discrete spacing in electromagnetic simulation below 30 GHz frequency. **Conclusion** The proposed model has good visibility and maneuverability, and it has important theoretical value and practical significance for the construction of digital electromagnetic human and the optimization of biological electromagnetic detection technology.

**Keywords:** human head model; brain magnetic induction detection; Chinese visible human; finite-difference time-domain; electromagnetic simulation

## 前言

脑磁感应检测技术的发展离不开电磁检测理论的指导,而电磁仿真模型则从理论上提供了探索、研究电磁信号在不同病理条件下人脑电磁特性变化规律的工具。人体头部电磁仿真模型可对磁感应相位移技术(Magnetic Inductive Phase Shift, MIPS)<sup>[1]</sup>、电

阻抗断层成像技术(Electrical Impedance Tomography, EIT)<sup>[2]</sup>、电阻抗频谱法(Electrical Impedance Spectroscopy, EIS)<sup>[3]</sup>、微波成像(Microwave Imaging, MWI)<sup>[4]</sup>等检测技术的后续研究提供支持。时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)<sup>[5]</sup>是目前在国际上应用非常广泛的一种研究生物体电磁效应的方法<sup>[6]</sup>,这种方法可以很好地解决有关非均匀介质、任意形状和复杂结构散射体以及辐射系统和散射体的电磁问题,并且在这方面比较突出<sup>[7]</sup>。使用FDTD模拟人体组织的仿真需要将人体组织的计算空间进行体素化(Voxelization)<sup>[8]</sup>,其最为关键的一点就是使用体素单元对一些复杂的生物组织和结构进行相应的构造,

**【收稿日期】**2021-01-14

**【基金项目】**重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0671)

**【作者简介】**李昊澄,硕士研究生, E-mail: lhc19890327@vip.qq.com

**【通信作者】**秦明新,教授,博士生导师,研究方向:脑磁感应检测, E-mail: qmingxin@tmmu.edu.cn

也就是用FDTD的体素单元对人体头部内各种器官和组织进行模拟。本文基于中国数字化人体数据集<sup>[9]</sup>构建可用于电磁计算的FDTD人体头部电磁模型。

### 1 CAD技术实现人体头部三维模型

在研究人体模型的电磁特性时,必须要对人体模型的几何以及物理参数进行一些比较详细的描述,并对人体模型进行体素化离散以符合FDTD要求<sup>[10]</sup>。但一般条件下,研究者可以获得的人体断层解剖图像,如通过CT成像和MRI成像等所获得的人体断层解剖图,无法提供FDTD计算所需要的物理参数电磁描述,因此需制作人体FDTD体素化模型以符合FDTD仿真的要求。目前业内最为典型的FDTD人体模型有欧洲的SAM模型<sup>[11]</sup>、DUKE人体模型<sup>[12]</sup>、

Ella模型<sup>[13]</sup>,但这些模型是以欧美人为标准的,而以中国人体数据为基础构建的FDTD电磁仿真模型尚属少见,并且以往国内并没有高精度的FDTD人体模型。在2003年之后,我国陆军军医大学数字医学研究所张绍祥等<sup>[14]</sup>已经很好地完成了一系列中国数字可视化人体数据集,为构建中国人的数字化电磁模型奠定了基础和发展契机。

本文工作选用AutoCAD 2012软件对人体头部进行三维建模。由于CST STUDIO SUITE(CST)电磁仿真软件可以导入sat格式的标准三维模型文件,而AutoCAD软件可以生成所需的模型文件,故采用Autodesk公司AutoCAD 2012软件对人体头部进行结构建模。利用AutoCAD 2012软件的三维建模功能,对人体头部组织的横截面图像进行三维拉伸,再堆叠,制出人体头部三维模型,建模步骤见图1。

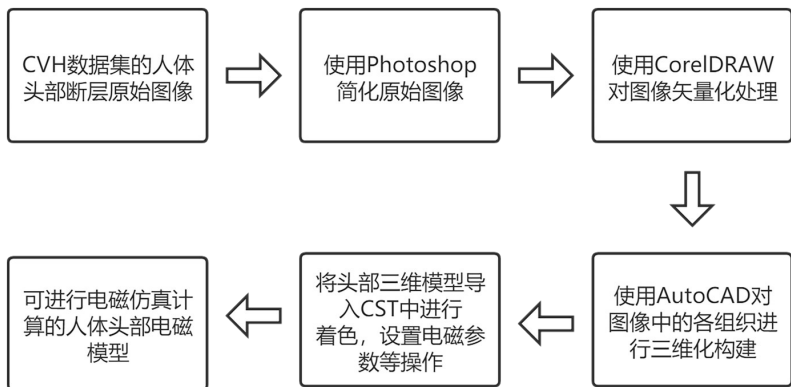


图1 人体头部电磁仿真模型构建流程

Fig.1 Construction process of electromagnetic simulation model of human head

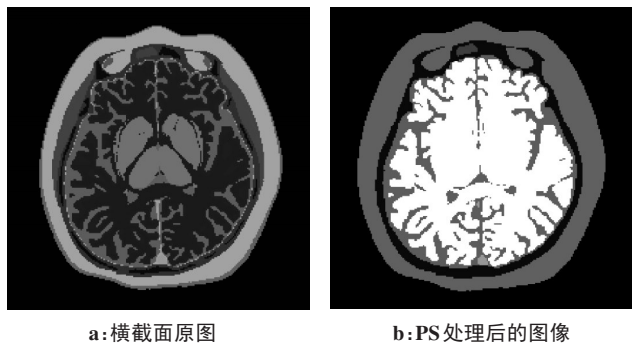
#### 1.1 用Photoshop(PS)软件进行图像的简化

中国数字可视化人体数据集采集的是基于真实的完整人体完成的。因为人体的身体组织相对来说比较复杂,在电磁建模的过程中必需要将其进行相应的简化<sup>[15]</sup>。使用PS软件对最原始图像进行一些相应的简化处理,将电磁参数相近的组织进行合并,电磁参数不同的组织进行分割<sup>[16]</sup>。图2为中国数字化人体的横截面原图以及采用PS软件简化处理后的对应图像。

在图2b中用不同的灰度值区分电磁参数差异较大的组织,用相同的灰度值代表具有相近电磁参数的相应组织。经比较简单化的处理,可以通过对灰度值参数的读取判断该灰度值所代表的组织。

#### 1.2 采用CorelDraw12将光栅图转化为矢量图

因为采用PS处理后的图像主要是光栅图像,然而AutoCAD是将图像进行相应的三维立体化,要求只能采用矢量图进行处理,所以需要CorelDraw12



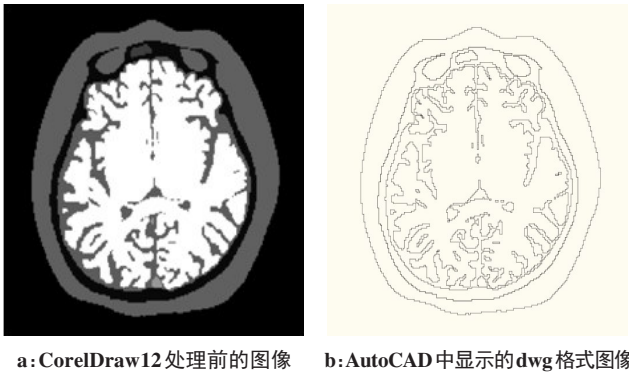
a:横截面原图

b:PS处理后的图像

图2 横截面原图及采用PS处理后的图像

Fig.2 Original cross-section image and the image processed by PS

软件按照特定的比例将光栅图像转化为对应的矢量图,如图3a。然后再利用CorelDraw12中的Trace功能将其进行轮廓化,转化成AutoCAD可进行三维立体化的dwg格式文件,图3a经处理后在AutoCAD 2012中显示即为图3b。



a: CorelDraw12处理前的图像    b: AutoCAD中显示的dwg格式图像

图 3 采用 CorelDraw12 进行矢量转换处理的结果

Fig.3 Images before and after vector conversion using CorelDraw12

1.3 采用 AutoCAD 进行三维重建处理

将 CorelDraw12 中输出的矢量图导入到 AutoCAD 2012 中,对图像进行三维立体化处理,具体

步骤为:①利用拉伸功能对图像的高度进行拉伸,拉伸高度为 1 mm,以图 2b 为例,拉伸后的图像如图 4。②对矢量图进行拉伸后,许多不同组织重合在一起或者相同的组织相互独立未形成一个整体的组织结构,需要利用 AutoCAD 的交集和并集功能对具有不同电磁参数的组织进行区分和对相同的组织合并,图 5 为进行立体化处理后的皮肤组织。③将处理好的各个组织按照相应的基点组合并设置好颜色,最后合成为头部的断层立体模型。图 6 为最后生成的过人眼球断层立体模型。④在每个做好的断层立体模型中找到一个基准点,然后每层模型按照基准点进行堆叠,最后形成实体化的三维人体头部 CAD 模型,如图 7 所示。⑤将最后完成的人体头部模型用 AutoCAD 输出为 sat 格式的文件,以便导入到 CST 电磁仿真软件中。

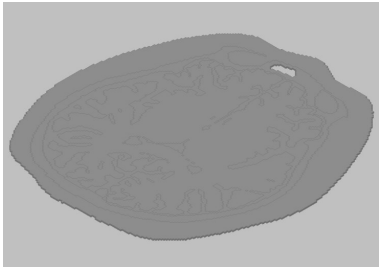


图 4 采用 AutoCAD 拉伸后斜 45°俯视图  
Fig.4 Top view with an oblique angle of 45° after being stretched by AutoCAD

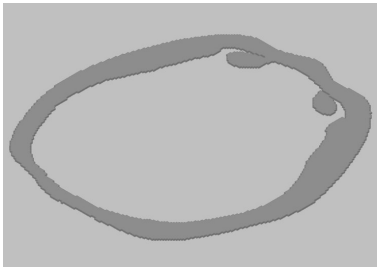


图 5 采用 AutoCAD 处理后立体化的皮肤组织  
Fig.5 Three-dimensional skin tissues after being processed with AutoCAD

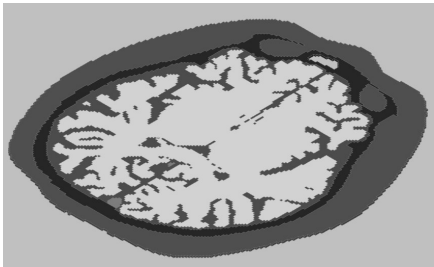


图 6 过人眼球断层立体模型  
Fig.6 Three-dimensional model of passing human eyeball

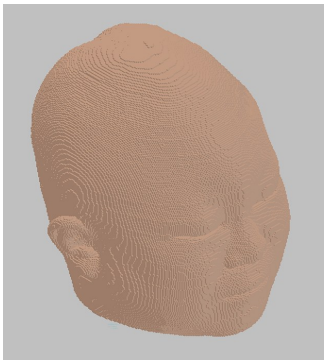


图 7 最后堆叠完成的人体头部实体模型  
Fig.7 The final stacked solid model of the human head

2 可用于计算的人体头部电磁模型

本研究主要采用 CST 电磁仿真软件实现人体头部的电磁仿真计算。建立比较适合的 FDTD 计算的人体头部结构对应的电磁模型,FDTD 模型的体素最小边边长仅有 1 mm,可以满足在 30 GHz 以下工作频率下的数值色散对空间离散间隔的要求<sup>[17]</sup>。在 CST 软件中利用 Import 功能将 AutoCAD 输出的 sat 格式

的 CAD 三维模型导入。将人体头部三维模型导入到 CST 软件中之后,将皮肤、颅骨、眼球、视神经、脑脊液、血液、脑组织 7 个组织的电磁参数设置相应工作频率下的电磁参数<sup>[18]</sup>。图 8 为 CST 中已设置好参数的人体头部模型。图 9 分别为人体头部模型的皮肤、颅骨、眼球、视神经、脑脊液、血液、脑组织 7 个组织。

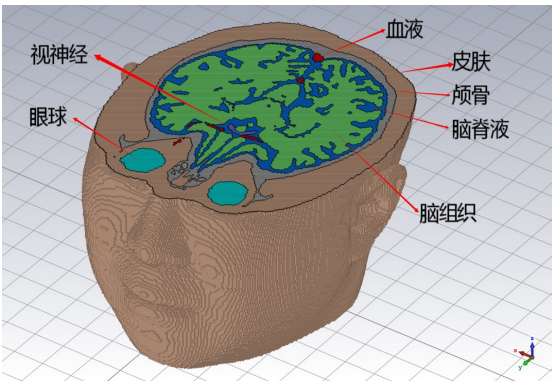


图 8 CST 软件中人体头部电磁模型横截面  
Fig.8 Cross section of electromagnetic model of human head in CST software



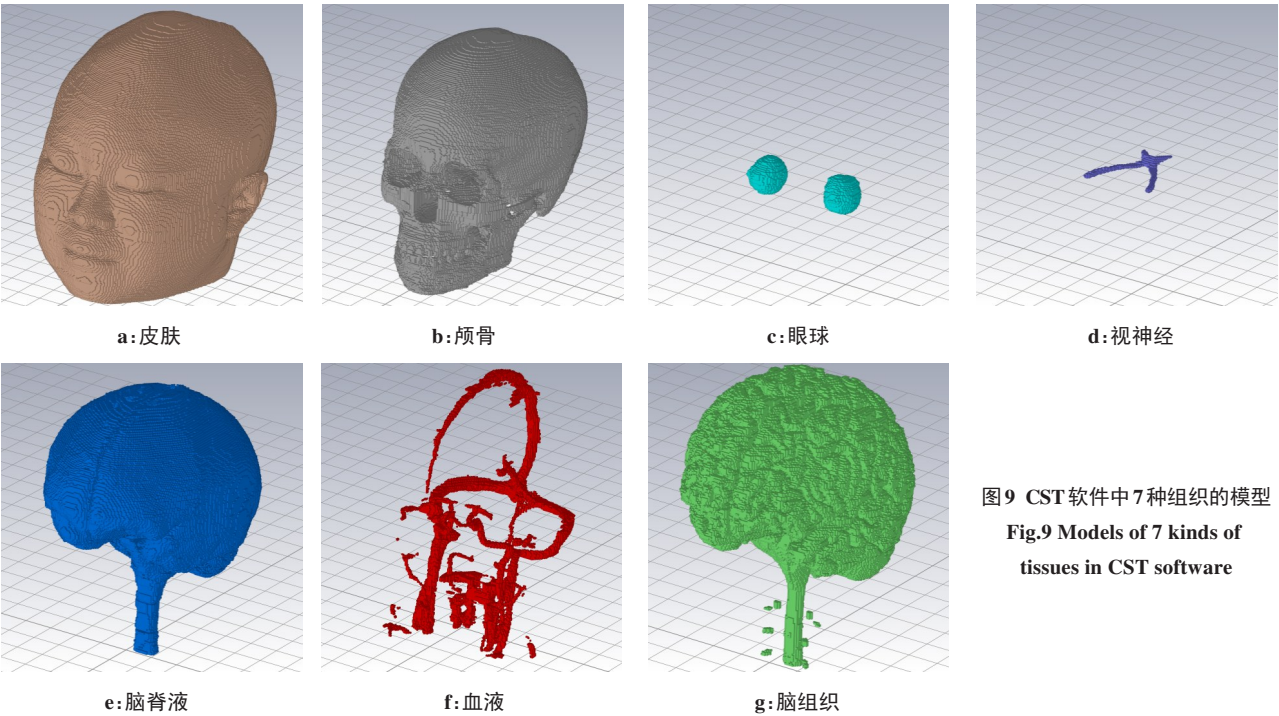


图9 CST软件中7种组织的模型  
Fig.9 Models of 7 kinds of tissues in CST software

本研究中将头部模型的组织按照 10 MHz 条件进行赋值,表1给出各种组织在 10 MHz 条件下相对应的电参数。在不同工作频率下,可以在 CST 中改变各个组织的电参数,以便更准确地对人体头部进行电磁仿真。

表1 10 MHz条件下人体头部各组织电磁属性参数  
Tab.1 Electromagnetic properties of human head tissues under 10 MHz

头部组织	电导率/ $S\cdot m^{-1}$	相对介电常数
皮肤	0.617	171
颅骨	0.082 8	53.8
脑组织	0.292	320
眼球	1.200	127
视神经	0.223	155
脑脊液	2.000	109
血液	1.100	280

3 对人体头部仿真模型进行电磁仿真

设置好人体头部各组织的电参数后,在 CST 中设置 1 个 10 匝边长为 50 mm 的正方形涡流线圈<sup>[19-21]</sup>,仿真频率为 10 MHz<sup>[22]</sup>,涡流线圈的位置距离人体头部约 10 mm,位于人体耳部正上方,如图 10 所示。

仿真历时 16 h 完成,仿真完成后可对电场、磁场等进行结果分析。仿真后的电场图如图 11 所示,电损密度如图 12 所示,磁场图如图 13 所示,磁场能量密度如图 14 所示。

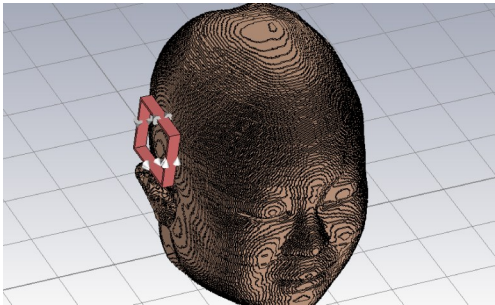


图10 涡流线圈和人体头部模型的相对位置  
Fig.10 Position of eddy current coil relative to human head model

4 问题与改进策略

(1)本文所制作的人体头部FDTD仿真模型所占用的存储空间过大,下一步可对模型在保持精度和准确度的情况下,进一步精简,减小其所占用的存储空间,减少模拟仿真所消耗的时间,并降低模拟仿真时所需要的计算机配置要求。(2)人体头部模型有且仅有人体头部的7种组织,下一步需将头部组织继续细化,增加类似于人体头部的复杂性,使其更加真实精确地还原出真实的人体头部组织和结构。(3)人体头部模型保存方式仅制作成sat格式的文件,下一步可进一步制作stl、stp、igs格式的文件,以便其适用于除CST之外其他的电磁仿真软件。

5 结语

利用CAD软件的三维建模功能可以轻松地完成那些比较普通的建模方法无法直接完成的FDTD三维电磁建模工作。一般来说人体的组织与组织之间的边界

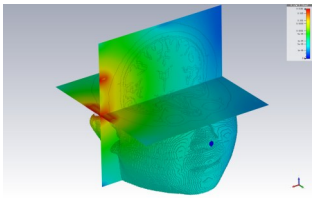


图 11 电场图

Fig.11 Electric field

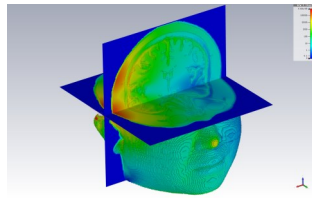


图 12 电损密度

Fig.12 Electrical loss density

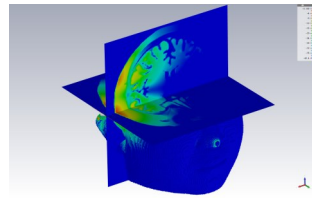


图 13 磁场图

Fig.13 Magnetic field

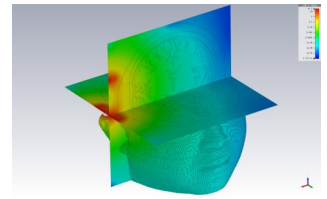


图 14 磁场能量密度

Fig.14 Magnetic energy density

啮合是最复杂、棘手的问题,然而人体的头部是在人体中结构最为复杂的一个部位,不仅仅是头部的表面存在不规则,并且内部组织结构更加多样和复杂。怎样才能让电磁仿真模型比较精确地逼近真实人体头部组织结构是建模过程的重点也是难点。本文所制作的模型都是在每一张真实人体头部断层图基础上进行的三维立体重建,所采用的方法能较好地确保每个人体断层之间衔接的准确性,最大程度精确地还原出真实的人体头部组织和结构。本文所用方法可使电磁模型具有较好的可操作性和可视化效果,在 30 GHz 以下各种频率条件下具有很大的灵活性,可为 EIT、MIPS、MWI 等电磁检测技术提供理论指导。

## 【参考文献】

- [1] JIN G, SUN J, QIN M, et al. A new method for detecting cerebral hemorrhage in rabbits by magnetic inductive phase shift[J]. Biosens Bioelectron, 2014, 52: 374-378.
- [2] LI Z, ZHANG J, LIU D, et al. CT image-guided electrical impedance tomography for medical imaging[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2020, 39(6): 1822-1832.
- [3] CALVO P C, CAMPO O, GUERRA C, et al. Design of using chamber system based on electrical impedance spectroscopy (EIS) to measure epithelial tissue[J]. Sensing Bio-Sensing Res, 2020, 29: 100357.
- [4] VASQUEZ J, SCAPATICCI R, TURVANI G, et al. A prototype microwave system for 3D brain stroke imaging[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2607.
- [5] 秦明新,王海彬,焦李成,等.磁感应方法检测脑组织电导率的 FDTD 仿真研究[J].中国医学物理学杂志,2006,23(2): 104-107.
- [6] 周晓明,赖声礼.手机与人体系统近场的研究综述[J].安全与电磁兼容,2002(6): 43-48.
- [7] 王长清.时域有限差分(FD-TD)法[J].微波学报,1989(4): 8-18.
- [8] 王长清. On the finite-difference time-domain (FD-TD) method[J]. Journal of Microwaves, 1989(4): 8-18.
- [9] ZHOU Y, LU H, WANG G, et al. Voxelization modelling based finite element simulation and process parameter optimization for fused filament fabrication[J]. Mater Design, 2019, 187: 108409.
- [10] 张绍祥,王平安,刘正津.中国数字化可视人体图谱[M].北京:科学出版社,2004: 1-312.
- [11] ZHANG S X, WANG P A, LIU Z J. Chinese visible human data set [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-312.
- [12] XIAO Z, TAN C, DONG F. 3-D hemorrhage imaging by cambered

- [13] magnetic induction tomography[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2019: 1-9.
- [14] 郑丽.医用天线对人体头部电磁辐射影响的仿真研究[D].沈阳:东北大学,2015: 29-30.
- [15] ZHENG L. The simulation research of the infection of the medical antennas electromagnetic radiation on the human head[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015: 29-30.
- [16] 邓官华,蓝茂英,段松,等.基于磁共振信号幅值的射频场成像技术研究[J].中国生物医学工程学报,2018,37(2): 181-187.
- [17] DENG G H, LAN M Y, DUAN S, et al. Study of B1 mapping methods based on the amplitude of MRI[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2018, 37(2): 181-187.
- [18] SOHANI B, KHALESBI B, GHAVAMI N, et al. Detection of haemorrhagic stroke in simulation and realistic 3-D human head phantom using microwave imaging[J]. Biomed Signal Process Control, 2020, 61: 102001.
- [19] 张绍祥,刘正津,谭立文,等.首例中国数字化可视人体完成[J].第三军医大学学报,2002,24(1): 1231-1232.
- [20] ZHANG S X, LIU Z J, TAN L W, et al. Number one of Chinese digitized visible human completed[J]. Journal of Third Military University, 2002, 24(1): 1231-1232.
- [21] 曾雁冰,黄绮华,辛学刚.真实人体三维电磁模型的建立及其在 MR 射频线圈设计中的应用[J].中国医学物理学杂志,2011,28(6): 3012-3016.
- [22] ZENG Y B, HUANG Q H, XIN X G. The establishment of real human three-dimensional electromagnetic model and application in the design of RF coil in MR[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2011, 28(6): 3012-3016.
- [23] 宫进昌,赵尚义,王远军.基于深度学习的医学图像分割研究进展[J].中国医学物理学杂志,2019,36(4): 54-58.
- [24] GONG J C, ZHAO S Y, WANG Y J. Research progress on deep learning-based medical image segmentation[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(4): 54-58.
- [25] 康刚,祝西里,王长清,等.移动通信手机天线对人体作用的剂量学研究进展[J].微波学报,1998,14(4): 347-355.
- [26] KANG G, ZHU X L, WANG C Q, et al. Current dosimetric research on the interaction between mobile handset antenna and human body[J]. Journal of Microwaves, 1998, 14(4): 347-355.
- [27] GABRIEL S, LAU R W, GABRIEL C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues[J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2271-2293.
- [28] ZHAO S, LI G, GU S, et al. An experimental study of relationship between magnetic induction phase shift and brain parenchyma volume with brain edema in traumatic brain injury[J]. IEEE Access, 2019, 7: 1.
- [29] ZHUANG W, PAN W, XU L, et al. A preliminary study on the feasibility of detecting global acute cerebral ischemia by the MIPS method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 32290-32296.
- [30] 杨骏,张海生,金贵,等.基于磁感应的闭合性颅脑撞击伤脑出血早期检测实验研究[J].中国医学物理学杂志,2018,35(9): 1069-1074.
- [31] YANG J, ZHANG H S, JIN G, et al. Experimental research of early detection of cerebral hemorrhage in closed craniocerebral injury based on magnetic induction[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(9): 1069-1074.
- [32] KE L, ZU W, DU Q, et al. A bio-impedance quantitative method based on magnetic induction tomography for intracranial hematoma[J]. Med Biol Eng Comput, 2020, 58(7): 1-13.

(编辑:黄开颜)