

文章编号: 100124322(2004)1221581204

电磁脉冲作用人体的数值模拟和分析^X

齐红星¹, 陈树德¹, 叶 红¹, 乔登江²

(1. 华东师范大学 物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062;
2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 建立色散介质 3 维真实人体模型, 用色散介质时域有限差分 ((FD)²TD) 方法计算了强电磁脉冲 (EMP) 对人体的作用。结果表明, 电磁脉冲对人体的透入主要决定于脉冲前沿, 受脉冲宽度的影响较小; 透入体内的脉冲, 相对辐照脉冲显著变窄; 人体吸收的电磁能没有明显受到辐照脉冲能注量的影响; 虽然人体从单个脉冲吸收的能量远低于用比吸收能定义的安全标准, 但这种剂量的照射在离体培养的人肝细胞 (L202) 上却产生了明显的生物学效应, 这意味着比吸收能难以作为人员安全评估标准。

关键词: 色散介质时域有限差分法; 电磁脉冲; 三维真实人体模型; 比吸收能
中图分类号: TL71 **文献标识码:** A

近来, 电磁脉冲技术快速发展, 电磁脉冲器件逐渐走向小型化和实用化。研究表明, 强电磁脉冲对神经、视觉等重要的生理系统具有很大的破坏力, 认识电磁脉冲作用人体的规律对其防护和应用十分必要。由于实验上存在保障实验人体安全性的困难, 直接对人体进行大量实验研究的可行性不高, 我们从数值模拟的角度对这一问题进行了探讨。人体不仅具有复杂的几何结构, 而且其电磁特性, 尤其是电特性, 非常复杂。数值计算中, 这是需要解决的两个主要问题。本文从一女性尸体 3 维核磁共振图像得到人体解剖学上的空间结构, 用多阶 Debye 关系拟合了人体主要组织的电性能的实验数据, 从而建立了 3 维色散介质人体模型。进一步用色散介质时域有限差分 ((FD)²TD) 方法^[1]计算了典型核电磁脉冲对该人体模型的作用, 结合核电磁脉冲对人体细胞作用的实验, 分析讨论了数值模拟的结果。

1 模型和方法

根据 Michigan 大学 VHP 项目组在网上公布的一女性尸体的 3 维核磁共振图像, 得到其中各种组织的空间分布, 如图 1 所示。

将人体近似划分为 17 种组织, 用计算网格模拟各种器官的形状, 并在对应的空间位置作好组织类别标记。文献[2]测量了人体主要组织在不同频率下的电容率和电导率, 并拟合出 Cole2Cole 表达式。这种表达式不利于时域计算, 我们采用多阶 ($M = 6$) Debye 关系式

$$\epsilon = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^M \frac{\epsilon_i}{1 + j\omega\tau_i} \quad (1)$$

用最小二乘法对实验数据进行了重新拟合, 从而建立了可用于时域计算的色散介质 3 维真实人体模型。

本文的计算方法为时域有限差分 (FD TD) 法^[3]的改进方法 —— (FD)²TD^[1]。它采用添加辅助矢量的方法对本构关系进行了时域处理。过程如下

令辅助矢量

$$P_i = \frac{\epsilon_i}{1 + j\omega\tau_i} E \quad (2)$$

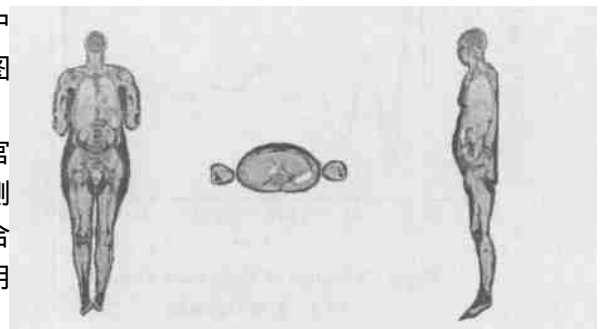


Fig. 1 Cross sections of a female cadaver
图 1 女尸剖面图

X 收稿日期: 2004202219; 修订日期: 2004208217
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题 (5137030)
作者简介: 齐红星 (1975 —), 男, 博士生, 主要从事电磁剂量学研究。

把它代入 Maxwell 旋度方程,得

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sum_{i=1}^M \frac{\partial \mathbf{P}_i}{\partial t} + \mathbf{E} \tag{3}$$

联立(2)式对应的时域方程

$$\mathbf{P}_i + \frac{\partial \mathbf{P}_i}{\partial t} = 0 \quad \mathbf{E} \tag{4}$$

和(3)式及另一 Maxwell 旋度方程,采用 Yee 交错网格^[4]差分化,得到时域场量更新方程。

人体模型位于计算域的中心,为站立姿势,入射波从正面照射,在计算域的外围设置 CPML 吸收边界^[5]。选择的入射脉冲为

$$E(t) = E_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \tag{6}$$

对 E_0 , τ_1 , τ_2 取两组参数分别计算。第一组: $E_0 = 65\text{kV}$, $\tau_1 = 4 \times 10^7\text{s}^{-1}$, $\tau_2 = 6 \times 10^8\text{s}^{-1}$;第二组: $E_0 = 52.5\text{kV}$, $\tau_1 = 4.765 \times 10^6\text{s}^{-1}$, $\tau_2 = 6 \times 10^8\text{s}^{-1}$ 。

能量吸收功率的计算公式为

$$w_a(t) = E^2(t) + \frac{1}{2} \left[\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \mathbf{D} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right] \tag{7}$$

2 计算结果

图 2~5 分别给出了人体头部、心脏、大腿和小腿中心沿身高方向的电场随时间的变化。从中可以看出,虽然两入射脉冲的半宽都大于 20ns,但透入体内的主脉冲半宽都在 20ns 以内,明显窄于入射脉冲。这说明入射波中的低频成份更容易被外层组织屏蔽。与两种入射脉冲半宽比为 8 形成鲜明对照的是,透入体内的主峰宽度差别很小。由于两入射脉冲的峰值一样,因此有理由认为脉冲对人体的透入主要决定于其前沿(即上升时间)。造成这一现象的主要原因可能是人体组织在低频电容率很高($10^5 \sim 10^6$ 量级)的缘故。四个图都显示前沿越陡的脉冲对人体的透入性越好(透入体内的主峰更高)。

计算结果表明,人体不同部位的电场主峰强度不存在量级的差异,说明脉冲透入的场相对比较均匀。

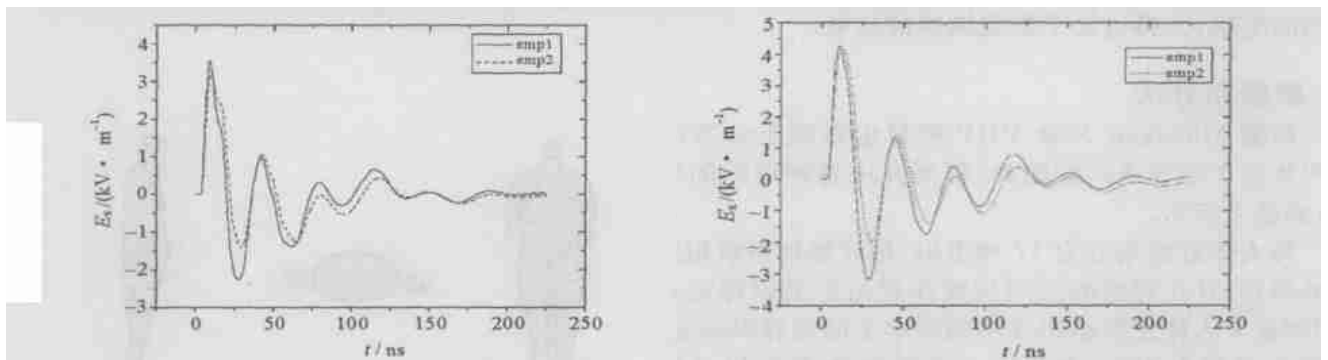


Fig. 2 Variation of E_x in head with time

Fig. 3 Variation of E_x in heart with time

图 2 头颅中心电场

图 3 心脏中心电场

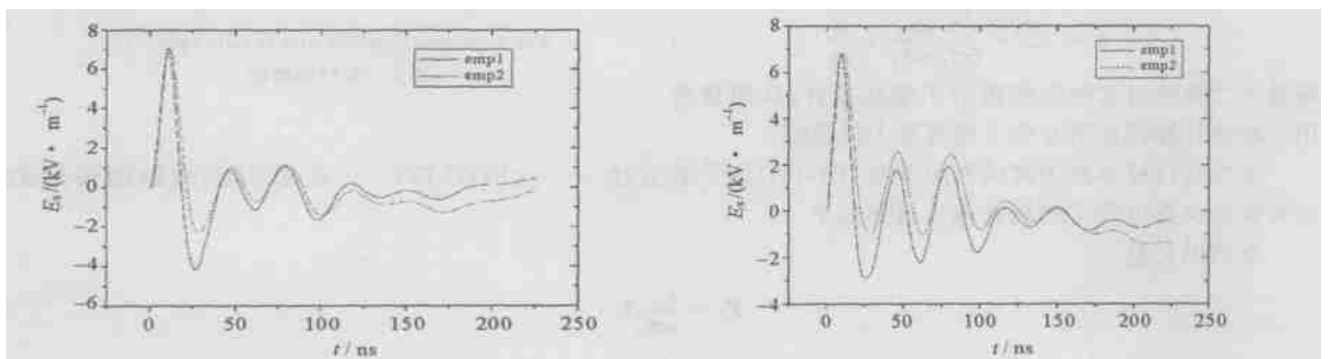


Fig. 4 Variation of E_x in thigh with time

Fig. 5 Variation of E_x in crus with time

图 4 大腿中心电场

图 5 小腿中心电场

由于透入体内的场有很高的峰值,若不计极化电流,也可产生峰值高达近 $500\text{A}/\text{m}^2$ 的传导电流密度,其持续时间约 20ns ,这是值得关注的。

图 6 为按(7)式对整个体积积分得到的人体吸收总能量随时间的变化。

从图 6 中可以看出,两脉冲在人体沉积的总能量非常小,分别为 20mJ 和 17.5mJ 。若模型体重按 60kg 计算,比吸收能分别为 $0.33\text{mJ}/\text{kg}$ 和 $0.29\text{mJ}/\text{kg}$,都远低于美国 ANSI C95.1 RFPG 1990 年修正的标准建议值,即,对于每个脉冲,整个人体的平均比吸收能应低于 $28.88\text{J}/\text{kg}$ 。有趣的是,尽管 emp1 的能注量是 emp2 的 $1/5$,但 emp1 在体内沉积的能量仍然高于 emp2,这一点与谐波和人体的作用特点明显不一样。按水的比热计算人体,单个脉冲使体温上升 8×10^{-5} 。考虑到人体吸收的不均匀性,扩大 10 倍,则体内最高局部温升为 8×10^{-4} ,远小于体内热噪声,可忽略不计。超过 100 个以上的脉冲连续作用,且在这个过程中没有散热,局部最高温升才能达到 0.1 ,有可能产生热效应。

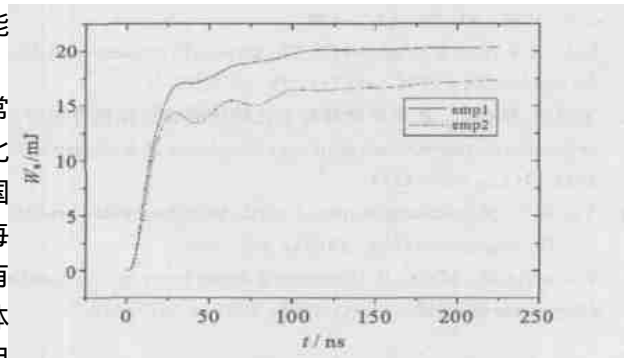


Fig. 6 Dependence of the absorbed energy in the whole body on time

图 6 吸收总能量随时间的变化

3 电磁脉冲对人肝细胞生长的影响

以人肝细胞(L202)为对象,用电磁脉冲模拟器产生脉冲场辐照,观察细胞增殖和受照剂量的关系。辐照脉冲峰值为 $400\text{kV}/\text{m}$,上升时约 3ns ,半宽约 100ns 。表 1 是用 MTT 比色分析法检测的细胞增殖情况(脉冲次数均为 400 次,间隔 1s),其中光密度的百分变化率反映了各实验组样品与对照组样品细胞密度数的百分变化率, p 为用 T 检验方法对实验组和对照组实验数据进行显著性差异分析的结果($p > 0.5$ 表示两者之间无明显差异, $p < 0.001$ 表示两者有明显差异)。结果显示,电磁脉冲作用对 L202 细胞的增殖产生了明显的抑制作用。

表 1 不同 EMP 场强对细胞增殖的影响

Table 1 Effect of different EMP on cell proliferation

	contrast1	contrast2	experiment
peak value of EMP/ ($\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0	400	
meam volue of optical density	0.998 1	0.985 6	0.795 3
	± 0.029	± 0.022	± 0.025
mean value of the rate of variation/ %		- 0.254	- 19.512
p		> 0.5	< 0.001

我们用数值方法得到细胞培养液中的电场峰值和半宽分别为 $10.4\text{kV}/\text{m}$ 和 30ns 。计算表明,这种波在培养液内产生的温度升高远小于安全标准,可以忽略不计。如果我们能够把离体细胞实验的结果向人体推广,对比上面对人体的数值模拟,不难发现,在远低于现有安全标准的电磁脉冲的作用下,仍然有可能对人体产生伤害。这说明,我们以往基于吸收能量导致体内温度升高而建立的人员安全评价标准是值得怀疑的,需要进一步探讨新的安全评估方法。

4 结 论

从一女尸 3 维磁共振图像^[2]中得到人体各组织的空间分布,并用多阶 Debye 关系描述人体组织的电特性,根据实验数据用最小二乘法拟合出相关参数,从而建立了可用于计算的色散介质 3 维真实人体模型。用 (FD)²TD 方法计算了高强度电磁脉冲对人体的辐照,得到以下计算结果:(1)电磁脉冲对人体的透入主要决定于脉冲前沿,受脉冲宽度的影响较小;(2)透入体内的脉冲,相对辐照脉冲显著变窄;(3)人体吸收的电磁能没有明显受到辐照脉冲能注量密度的影响;(4)人体从单个脉冲吸收的能量非常小,远低于用比吸收能(SA)定义的安全标准。我们用脉冲辐照离体培养的人肝细胞(L202),观察到在辐照剂量小于现有的安全标准内,L202 细胞的增殖明显受到抑制。这一现象和对人体的数值分析结果意味着完全基于吸收能量的人员安全评估标准是有问题的。

参考文献:

- [1] Young J L. Propagation in linear dispersive media: finite difference time2domain methodologies[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 1995, **43**(3): 422—426.
- [2] Gabriel S, Lau R, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues[J]. *Phys Med Bio*, 1996, **41**(11): 2271—2293.
- [3] 王建国,秋化敏. 高功率微波对带孔腔体的非线性耦合理论分析[J]. *强激光与粒子束*, 1995, **7**(1): 108—116. (Wang J G, Qiu H M. Theoretical investigations on nonlinear couplings of high power microwaves into the cavity with a hole. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, **7**(1): 108—116)
- [4] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell 's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 1966, **14**(3): 302—307.
- [5] Kuzuoglu M, Mittra R. Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers [J]. *IEEE Microwave Guided Letters*, 1996, **6**(12): 447—449.

Numerical simulation of the human body illuminated by electromagnetic pulse

QI Hongxing¹, CHEN Shude¹, YE Hong¹, QIAO Dengzhang²

(1. Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69215, Xi 'an 710024, China)

Abstract: The illumination of a 3D human body model by electromagnetic pulse (EMP) is numerically analyzed with frequency2dependence time2domain finite2difference ((FD)²TD) method. The fields in the body exhibit a strong dependence on the rise time of the illuminating pulses. Compared with the incident EMP, the transmitted pulses are narrower in width. No apparent relation between the absorbed energy and the incident energy density is observed, which is much different from that of the harmonic fields. Though the absorbed energy is far below the existing safety limit, the cell in experiment shows a growth inhibition. This phenomenon combined with the numerical results suggests that the safety assessment based on energy absorption is questionable.

Key words: Frequency2dependence time2domain finite2difference((FD)²TD); EMP; 3D human body model; Specific energy absorption