

人体吸收电磁能量与人射 方向和极化的关系

王长清 祝西里

(北京大学, 北京 100871)

摘要 本文讨论了用时域有限差分法计算在平面电磁波照射下人体对电磁能量的吸收问题。计算了各种入射方向和极化条件下非均匀块状人体模型中的局部比吸收率(SAR)分布。计算结果表明,人体并不总是在正面入射时吸收能量最多;同时还表明,局部比吸收率比平均比吸收率更值得重视,因为局部吸收率的最大值往往比全身平均值大几倍到十几倍。本文的计算结果丰富了人们在人体电磁剂量学方面的知识。

关键词 电磁能量吸收;时域有限差分法;比吸收率;电磁剂量学

一、引言

随着高功率射频和微波设备在生产、科研、医疗以及日常生活中日益广泛地应用,越来越多的人工作或生活在较强的电磁环境中。关于电磁场对人类健康的影响问题已经进行了广泛的调查研究,并确认在一定剂量电磁波的照射下,人体可能受到临时的或永久性的伤害。为了保护人类的健康,很多国家都制订了电磁辐射安全防护标准。安全防护标准制订的依据之一是人体电磁剂量学的研究成果^[1]。

理论电磁剂量学主要解决在电磁波辐照下人体对电磁能量吸收问题的分析和计算。在70年代和80年代这方面的研究有迅速发展。在初期主要是用解析法研究均匀和分层均匀的圆球和椭球等简单的人体模型,以后采用矩量法对均匀和非均匀的人体块状模型进行了数值计算。直到80年代末由于采用了时域有限差分法才使计算的精确度和SAR(Specific Absorption Rate 比吸收率)分布的空间分辨率达到了令人比较满意的高度。但是在这方面所进行的工作还是很不够的,还有很多问题没有得到满意的解决。

物理分析和简单模型计算表明,人体吸收电磁能量不仅与频率有关,而且与平面波相对人体的入射方向和极化有密切关系。但是,直到最近用FD-TD法只计算了对人体正面入射和沿人体长轴极化的一种特殊情况。本文的目的就是用FD-TD法和基于分层解剖图形成的非均匀块状人体模型的实际计算来研究人体吸收电磁能量与平面波入射方向和极化之间的关系。

二、方法简述

1. 时域有限差分法

1966 年 Yee^[2] 提出了一种电磁场的时域计算方法,其特点是直接求解麦克斯韦旋度方程

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \partial \mathbf{E} / \partial t + \sigma \mathbf{E}$$

并采用 Yee 氏网格,把电场和磁场分量按图 1 所示的方式在空间配置,按中心差分格式把麦克斯韦旋度方程的 6 个标量方程转化为差分形式^[2-6]。差分方程中包括一些由媒质特性决定的参数。在适当位置设置相应的参数即可在计算网格空间中模拟各种复杂的结构。人体模型就是通过这种方法置于计算网格空间中的。

人体对平面电磁波的散射是一个开放问题,但计算空间只能是有限的,即所设置的网格空间总要在某处被截断。为了减少由截断效应引起的电磁波在截断面上的反射,通常是在截断面上设置一吸收边界,它对外行波要有良好的吸收特性,以便近似地模拟无限大空间。我们采用 Mur^[7] 提出的二阶近似吸收边界条件,可在各种入射角度下吸收 95% 以上的外行波。为了保证到达吸收边界的均为外行波,通常设置一连接边界,把计算网格空间分为两个区域: 散射场区,即与吸收边界相连的外部区域;总场区,即入射场与散射场相加的内部区域。当内部无散射体存在时,则只有一纯粹平面电磁波。有关时域有限差分法的详细说明我们已在别处多次论及^[4-6]。

2. 人体非均匀块状模型

本文所使用的人体模型是根据人体分层解剖图形成的。首先把每一层解剖图划分为 0.635cm 见方的细网格(相当于身高为 175cm),并近似地认为每一个网格中只包含一种组织,每一种组织用一个数字来表示,于是就形成了一种由数字表示的人体组织结构模型。每一种组织在一定频率下具有一定的介电常数和电导率。表 1 给出了 100 MHz 和 350MHz 时 14 种组织的电学性质。我们所使用的模型即由这 14 种组织构成。由于这种网格构成的人体模型大约有 30 万多个单元,这是我们现有的计算条件所无力承受的。因此我们由基础模型经过两次合并形成边长为 2.62cm 的网格。在合并过程中每一新网格单元的介电常数和电导率由它们所包含的基础模型中各网格所代表的组织按比例计算而得到。在网格的合并过程中,边界的一部分网格可能与空气合并。如果把 $\sigma > 0.03\text{S/m}$ 的网格均视为模型单元,则单元总数为 5374;若把 $\sigma > 0.003\text{S/m}$ 的网格均视为模型单元,则单元总数可达 5883。在计算 SAR 时我们近似地认为各种组织的质量密度都与水相同,于是整个模型相当于体重为 70kg 的人体。

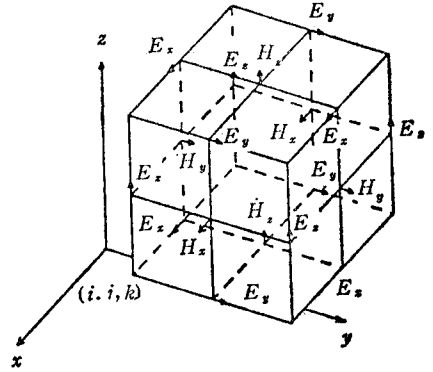


图 1 电磁场各分量在 Yee 氏网格一个单元中的位置

表 1 人体模型中各组织的电学参数

代表号码	组织名称	介电常数 100MHz	电 导 率 (S/m) 100 MHz	介电常数 350MHz	电 导 率 (S/m) 350MHz
1	肌肉	73.5	1.1	53.	1.33
2	脂肪/骨	7.5	0.067	5.7	0.072
3	血	74.	1.1	65.	1.2
4	肠	36.2	0.55	26.5	0.66
5	软骨	7.5	0.067	5.7	0.072
6	肝	77.	0.62	50.	0.82
7	肾	90.	1.01	53.	1.16
8	胰	90.	1.01	53.	1.16
9	脾	100.	0.82	90.	0.9
10	肺	75.	1.03	35.	1.1
11	心脏	76.	0.75	56.	1.0
12	神经	82.	0.53	60.	0.65
13	皮肤	24.5	0.55	17.6	0.44
14	眼	85.	1.9	80.	1.9

3. 计算内容

平面电磁波对人体的照射可有很多方式,若用 L 代表人体的长轴, E 代表电场方向, k 代表平面波波矢,则我们考虑了以下几种典型情况:

- (1) 正面入射, $E//L$ 和 $E\perp L$,
- (2) 侧面入射, $E//L$ 和 $E\perp L$
- (3) 背后入射, $E//L$ 和 $E\perp L$
- (4) 顶部入射, $E\perp L$, $k//L$

在计算了各网格单元处的电场有效值 E_x , E_y 和 E_z 后,按下式计算了各单元的局部 SAR

$$\text{SAR}(i,j,k) = (1/\rho) \cdot [\sigma_x(i,j,k) \cdot E_x^2(i,j,k) + \sigma_y(i,j,k) \cdot E_y^2(i,j,k) + \sigma_z(i,j,k) \cdot E_z^2(i,j,k)],$$

在此基础上计算了分层平均 SAR 和全身平均 SAR,在整个计算中平面波的人射功率密度为 $1\text{mW}/\text{cm}^2$,或电场强度有效值为 $61.4\text{V}/\text{m}$.

所用计算程序已在其他计算中做过验证^[6].

三、计算结果

为了再次验证计算程序用于平面波照射下人体吸收电磁能量问题的可靠性,首先把计算结果与性质完全不同的另一种方法——Sinc FFT 法^[8]在图 2 中进行了比较,由图可以看出,就分层平均 SAR 而言,两种方法的计算结果是比较一致的.考虑到所用模型不同,存在一定差异是必然的.与其他作者^[9]用同样方法所得结果几乎是一致的,一些小的差异也主要是由于形成人体模型时的某些差别所造成的.

图 3 和图 4 给出了在 100MHz 时不同入射方向和不同极化下,分层平均 SAR 按身

高的分布。由这些图可以看出,在各种可能的人射方向下, $E//L$ 时总是比 $E\perp L$ 时的分层平均 SAR 高得多。而且在 $E//L$ 条件下各种入射方向时其结果大体接近,但侧面入射时稍突出一些。另一个明显的特点是,在 $E//L$ 条件下各种入射方向时总是膝部的分层平均 SAR 最高。

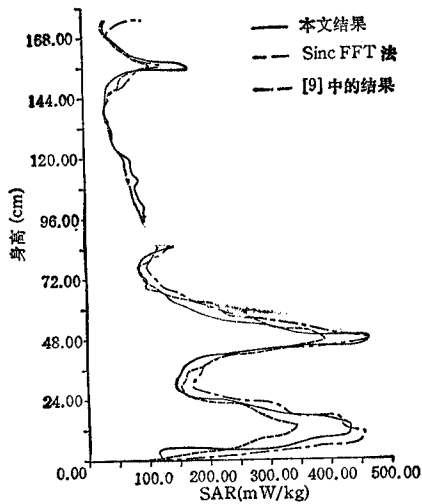


图2 正面入射 $E//L$ 时分层平均 SAR 与其他方法所获结果的比较(入射功率为 $1\text{mW}/\text{cm}^2$, 频率为 100MHz)

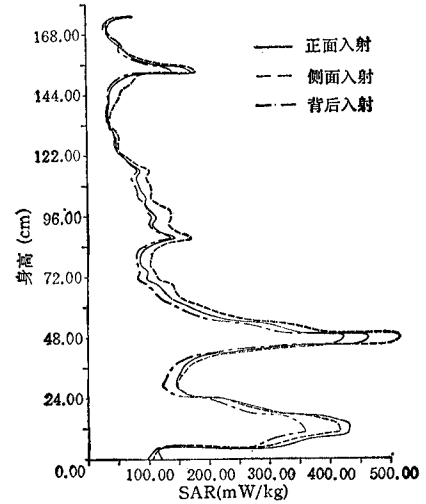


图3 在 $E//L$ 时分层平均 SAR 随身高的分布(频率 100MHz , 入射功率 $1\text{mW}/\text{cm}^2$)

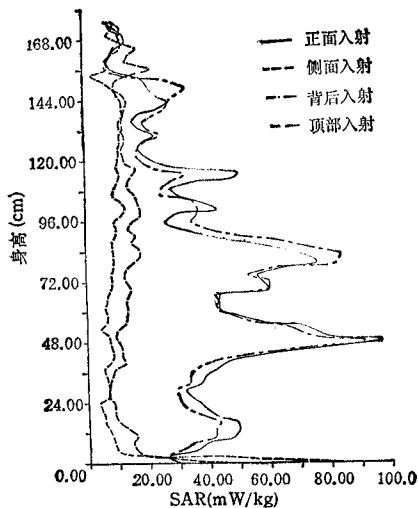


图4 在 $E\perp L$ 时分层平均 SAR 随身高的分布(频率 100MHz , 入射功率密度 $1\text{mW}/\text{cm}^2$)

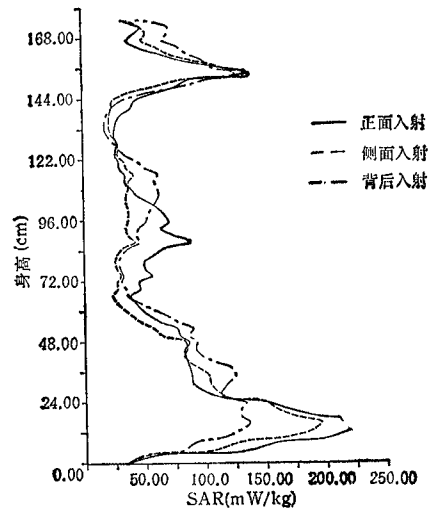


图5 $E//L$ 时分层平均 SAR 随身高的分布, (频率 350MHz , 入射功率密度 $1\text{mW}/\text{cm}^2$)

图5给出了在 350MHz 时几种入射条件下的分层平均 SAR 随身高的分布。可以清楚地看出,与 100MHz 时不同的是,无论哪种入射方向,在 $E//L$ 的条件下,踝部的分层平均 SAR 比膝部的高;而 100MHz 时,是膝部最高。

从电磁场对人体作用的角度看,局部 SAR 比平均 SAR 更重要,尤其是当它们差别

很大时。FD-TD 法的优点之一是,可以给出较高空间分辨率的局部 SAR 分布,由于人体在电学上是高度非均匀的,其结构又非常复杂,因而局部 SAR 的分布也必然是很不均匀的。我们更关心的是在一定剂量电磁波的照射下局部 SAR 的一些极大值,我们常把它们称作热点。热点主要出现在颈、臂、膝、踝等部位。表 2 给出了这些热点的部位及其数值,以及与全身平均 SAR 的比较。由表 2 可以看出,热点的 SAR 值比全身的平均值可能大出几倍,甚至十几倍,由此足以证明局部 SAR 的重要性。当然此处所给出的热点的数值还可能与人体模型的逼真程度有一定的关系。在条件允许时应该使用更细致的人体模型做进一步的研究。

表 2 热点的位置及其数值 (SAR 单位均为 mW/kg)

入射波频率(MHz)	100			350	
	正 面	背 面	侧 面	正 面	侧 面
颈部热点	498	453	611	508	485
臂部热点	978	870	1578	676	853
踝部热点	1190	822	1182	747	720
膝部热点	1627	1303	1651	252	570
分层平均最大值	462	422	530	218	194
全身平均	103	94	117	56	45

在生物电磁学的发展初期,曾用长椭球模型计算了全身平均 SAR^[10]。表 3 是非均匀块状模型与长椭球模型(长半轴为 0.875m,短半轴为 0.135m)计算结果的比较。由表可以看出,长椭球的简单人体模型虽然不能给出真实的局部 SAR 分布,但所给的全身平均 SAR 值还是有一定的参考价值。这也说明,全身平均 SAR 对模型逼真程度的依赖不象局部 SAR 那样强烈。

表 3 本文方法与长椭球模型结果的比较

入射波频率 (MHz)	100			350	
	E//L	E⊥L	k//L	E//L	E⊥L
长椭球模型全身平均 SAR (mW/kg)	110	18	20	41	24
本文方法全身平均 SAR (mW/kg)	103	35	15	56	17

四、结 论

用时域有限差分法和基于分层解剖图建立的非均匀人体块状模型计算了在平面波不同入射方向和极化方向时在自由空间中人体吸收的电磁能量。在计算了局部 SAR 的基础上进一步求得了分层平均 SAR 和全身平均 SAR。结果表明,在 E//L 条件下,分层平均和全身平均的 SAR 与入射方向关系不大,但考虑到局部 SAR 时,则在 100MHz、侧面入射时的热点最高,且分层平均 SAR 的最大值总是在膝部;而在 350 MHz 时分层

平均 SAR 的最大值则落在踝部。由此可知, 人体吸收电磁能量的分布与频率有很大关系。由给出的结果还可以看出, 入射波的不同极化, 对人体吸收电磁能量影响非常明显。从所列出的热点分布及其数值可知, 由于它们可比全身平均值大几倍, 甚至十几倍, 故从电磁波对人体的作用方面看, 局部 SAR 具有更重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 陈金元, 王长清, 电子学报, **18**(1990)2, 109—115.
- [2] K. S. Yee, *IEEE Trans. on AP*, **AP-14**(1966)5, 302—307.
- [3] A. Taflove, M. E. Brodwin, *IEEE Trans. on AP*, **AP-23**(1975)8, 623—630.
- [4] 王长清, 微波学报, 1989年, 第4期, 第8—18页.
- [5] 王长清, 无线电电子学汇刊, 1988年, 第3—4期, 第1—8页.
- [6] 王长清, 陈金元, 电子科学学刊, **13**(1991)3, 308—312.
- [7] G. Mur, *IEEE Trans. on EMC*, **EMC-23**(1981)4, 377—382.
- [8] D. T. Borup, O.P. Gandhi, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-32**(1984)4, 355—360.
- [9] D.M. Sullivan, O.P. Gandhi, A.Taflove, *IEEE Trans. on BME*, **BME-35**(1983)3, 179—185.
- [10] 李缉熙, 牛中奇, 生物电磁学概论, 西安电子科技大学出版社, 西安, 1990年, 第三章, 第二节.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE EM ENERGY ABSORPTION OF HUMAN BODY AND THE INCIDENT DIRECTION AND POLARIZATION OF PLANE WAVE

Wang Changqing Zhu Xili
(Peking University, Beijing 100871)

Abstract The problems of EM energy absorption of human body irradiated by plane wave are discussed by using the Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) method. The local SAR (Specific Absorption Rate), the whole-body-averaged SAR and the layer-averaged SAR for the inhomogenous block model of human body with different incident direction and different polarization of the incident waves are calculated. The results show that the appearance of maximum EM energy absorption is not always at the situation of the front incidence and the local SAR is more important for the interaction of the EM fields with human body. All results provide more information about the electromagnetic dosimetry for human body.

Key words EM energy absorption; Finite-difference time-domain method; Specific absorption rate; Electromagnetic dosimetry