

通过导电壁上窗口透入的电磁波对人体作用的研究¹

王长清

(北京大学无线电电子学系 北京 100871)

摘 要 本文用时域有限差分法和人体非均匀电磁模型研究了通过无限大导电壁上窗口透入的电磁场与人体的相互作用。首先对平面电磁波通过导电壁上窗口的透入特性进行了计算,并与解析解进行比较,证明了计算的可靠性。在此基础上对不同极化情况的入射平面波的透入场与靠近窗口的坐姿人体模型的作用进行了研究,计算了人体模型中的电磁场分布和所吸收的电磁能量。

关键词 时域有限差分法, 导电壁窗口, 人体电磁模型, 电磁场分布

中图分类号 O441, TN051.11

1 前 言

电磁波与人体的作用已成为重要的研究课题^[1]。但在过去的研究中人们主要是把人体孤立起来考虑在平面电磁波的直接照射下对人体可能产生的影响,最多考虑了地面的作用^[2]。实际的情况是人的周围总是存在各种物体,实际环境对电磁场的分布有很大影响;而且人体往往不是受平面电磁波的直接照射,而是通过各种耦合途径到达人体所处的环境之中。为了把电磁波对人体作用的研究引向深入,这些因素应该加以考虑。

本文的目的是研究通过导电壁上窗口的耦合场与人体的相互作用。为此不仅需要正确模拟人体,还要正确模拟平面电磁波通过导电壁上窗口的透入过程以及透入场对人体的作用。这是一个复杂的电磁场问题,必须采用适当的方法才有希望正确解决。时域有限差分法能直接模拟电磁波的传播及其与物体相互作用的过程,又适合模拟各种复杂的电磁结构,因此是一种合适的解决这类复杂电磁场问题的有效方法。

在以前的工作中我们已经证明可以用时域有限差分法正确地计算在近场和远场的照射下人体内的电磁场分布^[3,4]。现在我们只需证明用时域有限差分法也能正确地解决平面电磁波通过孔的耦合问题。为此计算了无限大导电壁上的窗口在平面电磁波照射下透过的电磁场分布,把计算结果与解析法进行了比较,并得到了相当好的一致性;在此基础上利用人体坐姿电磁模型研究了不同极化方向的平面电磁波照射窗口时透入场对靠近窗口的人体的作用,计算了人体中的电磁场分布以及人体所吸收的电磁能量。

2 计算方法概述

有关时域有限差分法我们已在多处进行过讨论^[5,6]。尤其在文献^[7]中有详尽的论述。本文所用的计算程序是在文献^[8]中所用程序的基础上加以改造而形成的。为了考虑平面电磁波通过无限大导电壁上窗口的透入问题,把计算网格空间分成两部分,其分界面为导电壁。在壁的一

¹ 1994-09-29 收到, 1995-05-26 定稿

侧保留了吸收边界条件和连接条件, 并产生向导电壁垂直入射的平面电磁波, 在导电壁的另一侧, 由于透过窗口的电磁波具有辐射波的特性, 故只需保留吸收边界条件。为了与解析法进行比较, 需考虑尽量薄的导电壁, 这要求计算空间的网格应尽量小。但是, 所考虑的窗口的长和宽均为一个波长, 网格过小将造成计算网格空间的网格总数过大。考虑到现有的实际计算条件, 选择立方体网格的边长 δ 为 $\lambda/20$, 其中 λ 为入射波的自由空间波长。图 1 是窗口上电场分布的计算结果。 E_y 与入射平面波的电场 E_i 相平行。为了绘图方便, 图上显示的归一化场值是原值的 100 倍, 把该结果与文献 [9] 中用解析法对同样问题所获得的结果进行比较可以发现, 两者有很好的·一致性。

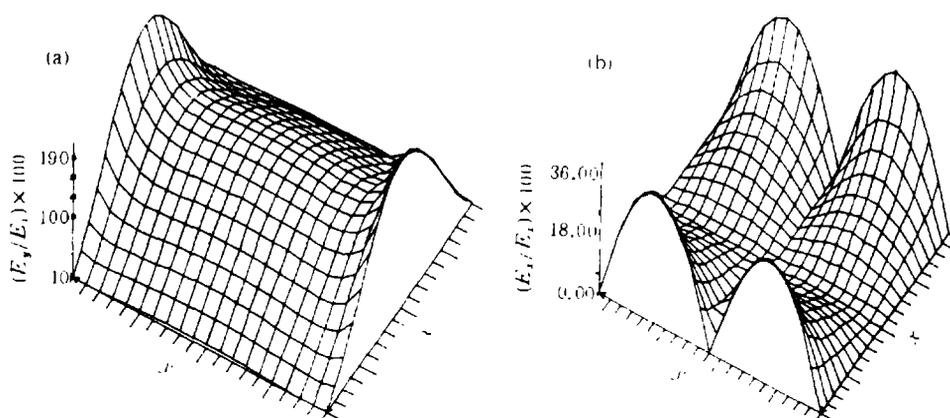


图 1 厚度为 $\lambda/20$ 的导电壁上 $1\lambda \times 1\lambda$ 方孔中的电场分布

(a) (E_y/E_i) 的分布, (b) (E_x/E_i) 的分布

所存在的差异也主要与本文计算中导电壁为有限厚有关。图 2 给出的是 $(E_y/E_i)^2$ 在窗的中心轴线上随离开窗口的距离的变化规律, 图上同时给出了用积分方程法和克希霍夫近似法对无限薄导电壁的计算结果 [9]。可以看出用时域有限差分法所获得的结果处于上述两种方法所得结果的中间, 这也证明了所用方法的可靠程度。

为了了解在以后的计算中所用窗口的透入特性, 特别计算了 $0.55\lambda \times 0.43\lambda$ 窗口的透入场沿轴线方向的分布, 图 3 是 $(E_y/E_i)^2$ 沿轴线随距窗口距离的变化规律。其中 y 与宽边平行。

在验证了所用方法的可靠性之后, 把坐姿人体电磁模型引入计算网格空间中透入场的一侧, 这样就可以在考虑导电壁和窗口影响的情况下计算透入场与人体的相互作用。为了与人体模型相配合, 所用均匀立方体网格空间的网格边长取作 2.62cm, 窗口取作 $18\delta \times 14\delta$, 导电壁的厚度为 1δ 。窗口的长边取为坐标 y , 窄边为 x , 入射平面波的极化方向考虑了 y 和 x 两种情况, 且在 100MHz 和 350MHz 两种频率下进行了计算。

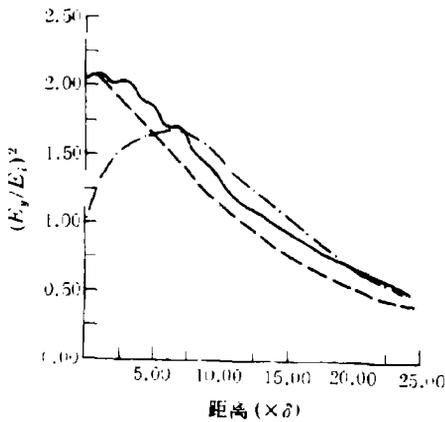


图 2 $(E_y/E_i)^2$ 沿窗口中心轴上的变化
—— 为本文计算结果, --- 为积分方程法的结果
- · - 为克希霍夫近似法的结果

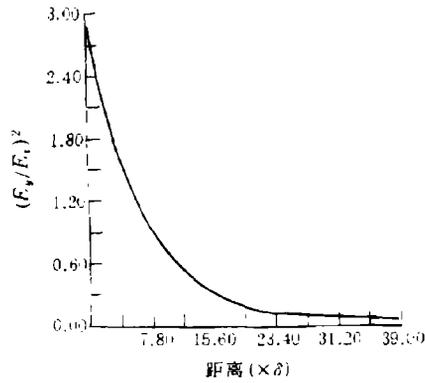


图 3 $0.55\lambda \times 0.43\lambda$ 窗口中心线上
 $(E_y/E_i)^2$ 的分布

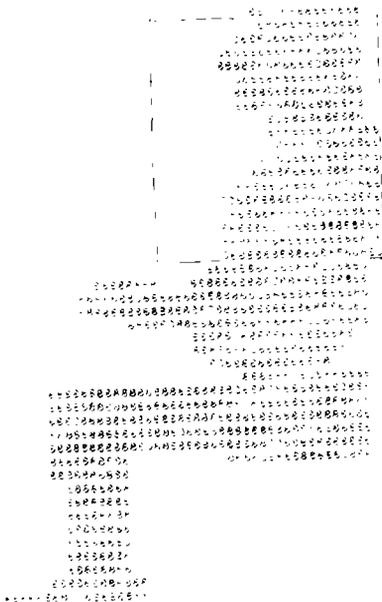


图 4 人体坐姿模型与窗口的相对位置

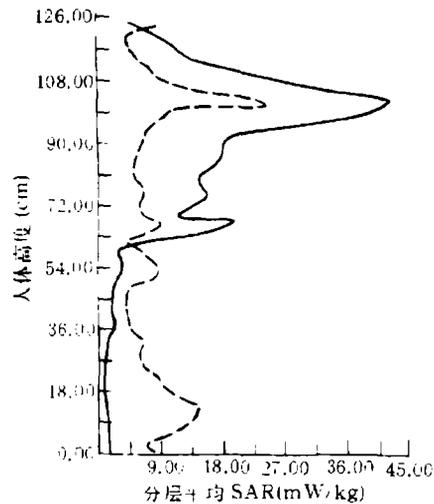


图 5 人体分层平均 SAR 的分布与离窗口
距离的关系
—— 为相距 3δ 的结果, --- 为相距 8δ 的结果

3 某些计算结果

对每一种情况的计算都获得了人体模型中的每一网格中的电磁场值及其所吸收的电磁能量, 要显示出这样丰富的信息是十分困难的。下面仅用分层平均比吸收率 SAR (Specific Absorption Rate) 来给出一些计算结果。为了便于理解这些结果与实际计算条件的联系, 图 4 显示了人体坐姿模型与窗口之间的关系, 为了使打印出的人体模型更接近人体的体形, 这里用两个数字 8 代表一个模型网格。在所做的计算中都保持入射平面波的功率为 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 。当入射波为

350MHz, (y 向极化), 人体距窗口为 3δ 和 8δ 时人体内的分层平均 SAR 由图 5 给出, 由此可知, 人体吸收电磁能量随着离开窗口的距离的增加急剧地减小, 这与图 3 所显示的透入场的变化规律相一致。图 6 给出了 350MHz 的入射波沿 y 和 x 两种方向极化时分别计算所得的分层平均 SAR 分布。在 y 方向极化时最大分层平均 SAR 值在头部, 而 x 方向极化时最大值则在臂部, 显示出明显的差别。在这一计算中人体模型与窗口的距离为 3δ 。保持这一距离和入射波 y 向极化, 但频率改为 100MHz, 与同一情况下 350MHz 时的分层平均 SAR 由图 7 给出。由于 100MHz 比 350MHz 更远离窗口的谐振频率, 使得这时的透入电磁场变弱, 因此人体所吸收的电磁能量相应地减小。

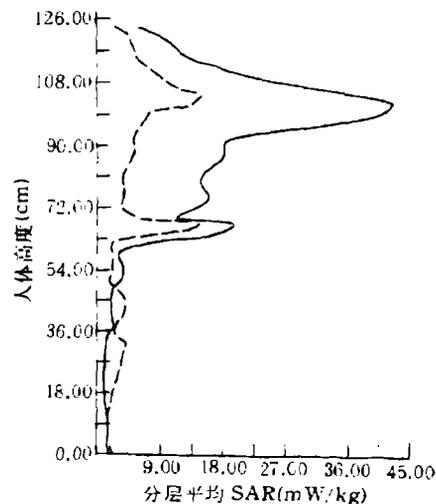
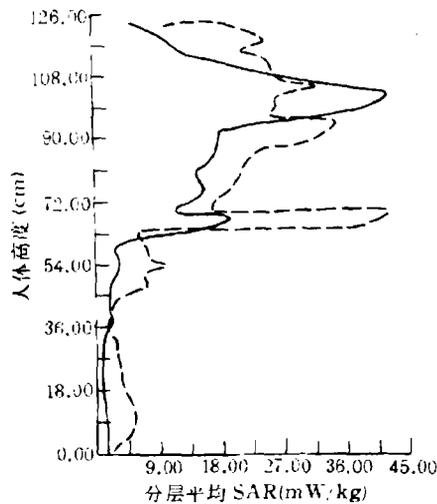


图 6 分层平均 SAR 与入射波极化方向的关系
——为 y 向极化的结果, ---为 x 向极化的结果

图 7 不同频率时的分层平均 SAR 分布
——350MHz 时的结果, ---100MHz 时的结果

以上结果只显示了距离、极化和频率诸因素对分层平均 SAR 分布的影响, 在生物电磁学中更具实际意义的信息是各网格的局部 SAR 分布。虽然计算中这些信息均已获得, 但由于篇幅的限制无法表示这些结果。计算表明, 以上各种情况的局部 SAR 分布存在非常明显的差别。

4 结论

用时域有限差分法成功地模拟了平面电磁波通过无限大导电壁上窗口的耦合特性, 计算所得窗口上的场分布和透入场随距离的变化规律均与解析法所得结果符合较好。在此基础上利用人体坐姿电磁模型研究了通过窗口的透入场对人体的作用。结果显示, 主要是直接照射部分受影响较大, 影响程度明显地与窗口的频率选择性有关。由于导电壁的遮挡作用, 随着离开直射区的距离人体所吸收的电磁能量迅速减少。由于透入场随距离迅速衰减, 人体受透入波的作用与人体距窗口的距离有密切关系。与人体的形态相关, 当入射波极化方向改变时, 人体吸收电磁能量的分布发生明显的变化。

参 考 文 献

- [1] 陈金元, 王长清. 电子学报, 1990, 18(2): 109-115.

- [2] Sullivan, D M, Gandhi O P, Taflove A. IEEE Trans. on BME, 1988, BME-35(3): 179-185.
- [3] Wang Changqing, Gandhi Om P. IEEE Trans. on MTT, 1989, MTT-37(1): 118-126.
- [4] 王长清, 祝西里. 电子科学学刊, 1992, 14(4): 390-395.
- [5] 王长清. 无线电电子学汇刊, 1988, (1-2): 38-48.
- [6] 王长清. 微波学报, 1989, 19(4): 8-18.
- [7] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法. 北京: 北京大学出版社, 1994, 第二章 - 第四章.
- [8] 王长清, 陈金元. 电子科学学刊, 1991, 13(3): 308-312.
- [9] Batter C M, Samii Y R, Mittra R. IEEE Trans. on AP, 1978, AP-26(1): 82-93.

ON THE INTERACTION OF HUMAN BODY WITH PENETRATED ELECTROMAGNETIC FIELDS THROUGH APERTURE IN CONDUCTING SURFACE

Wang Changqing

(*Peking University, Beijing 100871*)

Abstract The interaction of human body with penetrated electromagnetic fields through aperture in conducting surface is considered by using the finite-difference time-domain method and inhomogeneous man models. First, the characteristic of penetrated electromagnetic fields through aperture is studied. The comparison of obtained results with those by use of analytical method shows that the method used in this paper is available. The contributions of electromagnetic fields and absorption energy in human body are calculated when the aperture is irradiated by plane wave and the electromagnetic man model in sitting posture is placed to other side of the surface near the aperture for different polarization and frequency of incident plane wave.

Key words Finite-difference time-domain, Aperture in conducting surface, Electromagnetic model of human body, Contribution of electromagnetic fields

王长清: 男, 1934年生, 教授, 主要从事电磁场理论和计算电磁学的研究, 主要应用领域有电磁散射、电磁兼容和生物电磁学。