

# 计算人体生物电阻抗的柱体模型算法

阮方鸣<sup>1,2</sup>, Tomasz Dlugosz<sup>3</sup>, 高攸纲<sup>2</sup>

(1. 贵州师范大学物理与电子学院, 贵州贵阳 550001; 2. 北京邮电大学环境电磁学研究所, 北京 100876;  
3. 瓦格纳大学通信、信息与声学研究所, 瓦格纳 50-370, 波兰)

**摘要:** 考虑人体电特性的建模是对人体进行电磁生物效应研究的基础, 提出了一个可以用于计算人体输入阻抗的新的人体电路模型; 基于该电路模型给出了在人体圆柱模型下的输入阻抗计算方法. 并用试验证明, 据此计算出来的人体阻抗会随曝露系统的维数增加而减小, 反映出功率吸收的现实. 应用该模型分析人体阻抗变化, 可有益于人体健康状态信息的获取, 为进行医学诊断提供帮助.

**关键词:** 阻抗; 横电磁波小室; 吸收功率; 反射; 介质

**中图分类号:** O441.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0469-04

## Cylindrical Model Algorithm for Calculation of Human Body Impedance

RUAN Fang-ming<sup>1,2</sup>, Tomasz Dlugosz<sup>3</sup>, GAO You-gang<sup>2</sup>

(1. School of Physics & Electronics, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;  
2. Research Institute of Electromagnetic Compatibility, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
3. Institute of Telecommunications, Teleinformatics and Acoustics, Wroclaw University of Technology, Wroclaw 50-370, Poland)

**Abstract:** Electric model of human body impedance is essential for research on bio-electromagnetic effect but previous models are too theoretical to describe reliably real human body. We hence propose a new human body circuit and give a cylindrical model for impedance calculation of human body, describing algorithm based on the cylindrical human body model and providing confirmation experiment result that human body impedance reduces with dimension increase of transverse electromagnetic (TEM) cell, showing real variation of absorption power by human body. The algorithm may be applied to variation analysis of equivalent human body electric impedance, which can reflect health or sick state of human body and may provide a possible approach to diseases dialog for human body.

**Key words:** impedance; TEM cell; absorption power; reflection; media

## 1 引言

在进行电磁生物效应研究和人体对电击危害的防护的研究时, 人体的电生物阻抗都有着重要意义. 电磁场理论中的天线算法可以用来研究人体的生物电阻抗. 如果在天线附近存在导体介质, 则天线的输入阻抗与天线在没有介质存在的自由空间情况下的输入阻抗是不同的. 这是因为, 有介质存在时的天线与其对介质的镜像反射导致了互阻抗的出现. 在天线周围有介质存在情况下, 其输入阻抗的测量精度由此要受到一定的限制. 在关于人体生物电磁效应的实验研究中, 仍然可以假定被试生物体与周围导体介质存在着镜像反射, 从而引起互阻存在的现象. 考虑天线算法在电磁生物效应研究中的应用, 和基于新的人体等效电路, 本文提出了人体生物电阻抗的柱体模型并进行了仿真分析, 所得结果与用

大白鼠仿真实验结果具有一致性.

## 2 横电磁模小室的特点

横电磁波(TEM)小室可用于对生物体进行辐射, 是在电磁兼容研究、天线校正和生物医学工程研究中得到广泛应用的系统. 同时, 横电磁波小室也是建立横电磁场标准已提出来的一种新方式<sup>[1]</sup>. 在进行电磁生物效应研究时, 被测试生物体置于两块导体或者四块导体之间, 组成一个作用于生物体的电磁辐射系统.

由天线的相关理论知道, 在天线附近的导体介质对天线的输入阻抗要产生影响. 置于导体介质间的天线, 其输入阻抗与自由空间情况下的阻抗不同. 而产生这两者之间差别的原因, 则是天线的输入阻抗与天线在导体介质中的镜像反射两者之间存在着互阻抗. 因此附近有导体介质的天线, 其灵敏度也与真空情况下的灵敏度

不同.这一现象的存在,对天线输入阻抗灵敏度的测量造成了一定的限制.另一方面,对于临近无限大理想导体平面天线的计算表明,只要天线与导体介质间的距离大于天线波长的两倍( $2\lambda$ ),这里提到的互阻效应就可以忽略不计.对于在横电波小室里进行天线校正的情况,同样的现象也存在.也就是说在电磁辐射暴露系统中,腔体壁对置于其中天线的影晌将会改变这种校正天线的输入阻抗.<sup>[2,3]</sup>

### 3 横电磁波小室中的生物体

现在考察生物体置于空间有介质、并且有时介质是非理想导体的情况.横电磁波小室作用于生物体产生的影响,可以用置于横电磁波小室内生物体吸收的功率,与生物体在自由空间中吸收的功率,这两种功率的差别来描述.如果已经知道电场的功率密度和导体的电流密度,则能量损失(被试生物体吸收功率)就可以用如下的公式计算

$$P_{abs} = \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dV \quad (1)$$

其中: $P_{abs}$ 为被试生物体吸收的功率,

$\mathbf{E}$ 为被试生物体内的电场强度矢量,

$\mathbf{J}$ 为传导电流密度矢量,

$V$ 为被试生物体的体积.

式(1)适用于所考察的生物体,无论该物体是否均匀、形状是否规则.关于辐射系统作用于其中生物体的基本结果,已经有文献提到<sup>[4,5]</sup>.

为了计算吸收功率的方便,考虑将人体等效成均匀有耗的柱状物体(见图1).采用的计算网格单元取边长为1.5cm的立方体,电导率 $\sigma = 0.84S/m$ ,相对介电常数 $\epsilon_r = 80$ .该柱状物体置于 $20 \times 20cm^2$ 的两块平行的理想导体板之间,其间的电场强度保持为恒定值 $E = 1V/m$ .采用两种商用软件程序 MAXWELL-FEM 和 Fidelity-FDTD 进行仿真计算,所得到的结果如图2所示.同时,为了进行比较,图2中还给出了自由空间情况下该物体吸收功率的测试结果.

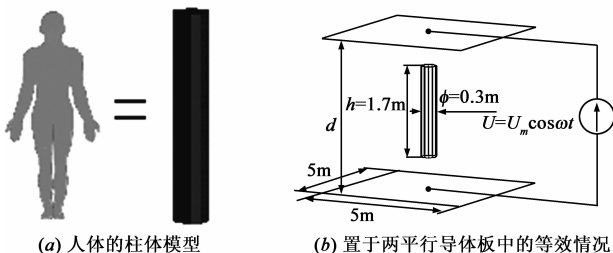


图1 人体的柱体模型和置于两导体间的情况

从图2可以看出,如果被试物体的线度很小( $h \ll d$ ),它在电磁辐射系统中所吸收的功率 $P_{abs}$ 就接近于在其在自由空间里所吸收的功率.但另一方面,如果被试

物体的线度足够大( $h \approx d$ ),则该物体在辐射系统中所吸收的功率 $P_{abs}$ ,与在自由空间所吸收的功率二者的差别就很大,从而导致误差的增大.随着两块金属板间距离的增大(即比率 $d/h$ 增大),物体的吸收功率下降,即意味着误差的减小.在生物医学工程中关于人体生物阻抗的研究,类似这样的问题也存在,即由于附近导体介质的影响,会造成计算结果的不精确.正如图2所示,放置于辐射系统中的被试生物体所吸收的功率,是辐射系统线度( $d$ )与受试物体大小线度( $h$ )二者比率的函数.受试体吸收功率大小的变化,受到了生物体镜像反射的影响.这正是存在着生物体电输入阻抗的表现.

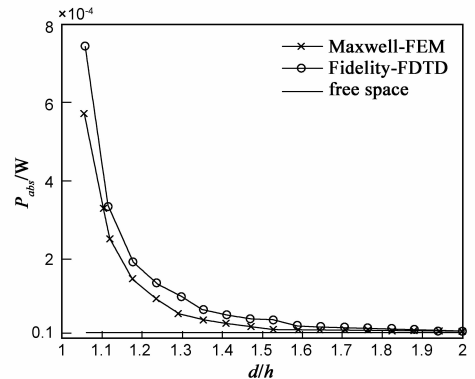


图2 安置于两块金属片构成的横电磁波谐振腔内生物体吸收功率

作为生命体的人体,是由不同的器官、组织和细胞构成的.各种生物组织的电性质是不同的<sup>[6]</sup>.事实上,不同组织是用不同的电参数描述的,因而它们在辐射系统中也就有不同的吸收功率.

大白鼠在电磁波照射下,它所吸收功率的仿真结果对人体也是有效的,因为二者存在着相同的电磁生物效应.图3是大白鼠体素的定向模型.

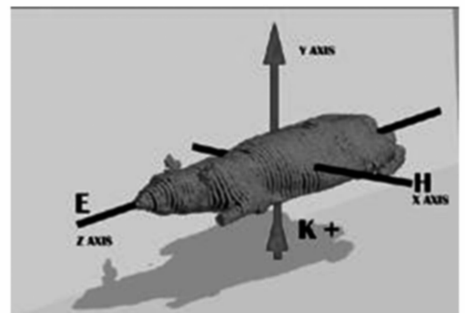


图3 大白鼠的体素定向模型

图4给出了对大白鼠比吸收率研究的仿真结果.用大白鼠做研究的依据在于,如果用相同方法对人体进行仿真,运算所占用的计算机内存会更大.仿真分析采用了放置于自由空间大白鼠的三维体素模型,见图3.据该模型再用时域有限差分法(FDTD99<sup>[7]</sup>)进行仿真,得到的仿真结果如图4所示.

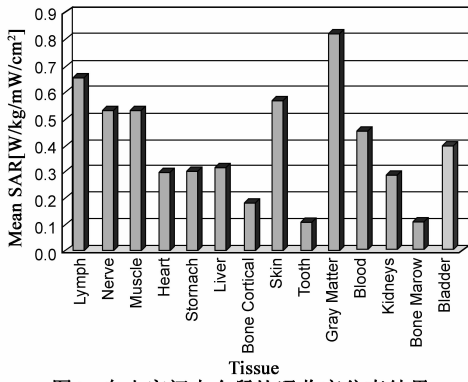


图4 自由空间大白鼠比吸收率仿真结果

### 4 人体柱体模型与仿真分析

由于不同生物组织吸收的电磁功率不一样,也就意味着这些组织是由电参数不同的细胞组成的.每个细胞可以由相应的电容与电阻并联的等效电路加以描述.其中电容用来模拟细胞内的体液,而电阻则用来模拟细胞外的体液大小<sup>[8]</sup>.既然细胞能用等效电路代替,那么由细胞构成的组织也可以用相应的等效电路替代.

对生物体组织的电性质研究表明,每个组织均具有它独特的介电常数和不同的表现,称为离散性(dis-persion).细胞组织的电性质,可以用多时间常数的电路来等效,如图5所示.其中,  $R_e$  是低频情况下测得的电阻,代表细胞外液体的等效电阻.  $C_j$  和  $R_j$  是组成不同组织的膜电容和内细胞电阻<sup>[9]</sup>.

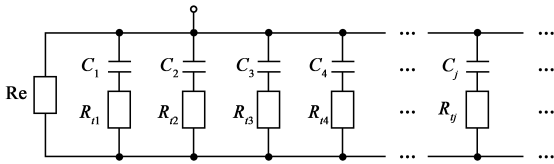


图5 生物组织的等效电路<sup>[9]</sup>

已知生物组织是由细胞构成,而人体又是由生物组织构成.所以,人体也可以用等效电路来替代.图6就给出了一种描述人体阻抗特性的等效电路.该模型来源于文献[10],但这里另外补充了头部的RC电路.人体的各个部分,头部、躯干、手臂、腿等,都分别用电容和与之并联的电阻来替代.

在已经建立了人体的等效电路之后,接下来的问题就是:该人体等效电路的输入端在何处?由图6看出,输入端可以有3种不同的组合方法:(1)两个手臂之间;(2)头-足之间;(3)手-足之间,其中每一种方法都是可采用的.  $Z_{in-h}$  为两手间的阻抗,  $Z_{in-h-f}$  为头足之间的阻抗.但可以断定,不同组合情况下的输入阻抗是不同的.如采用人体的柱体模型,其计算机仿真情况如何?采用图7所示的模型,输入阻抗可以用简单的方法获

得,即用通过人体的电流去除人体两端的电压降

$$\bar{Z}_{in-h-f} = \bar{U} / \bar{I} \quad (2)$$

其中,  $\bar{U}$ ,  $\bar{I}$  分别为计算需要的复数电压和复数电流.采用这种人体柱形模型的计算结果如图8所示.

这里提出的计算方法是许多算法中的一种尝试,因为关于生物体输入阻抗的统一认识至今还远未形成<sup>[11,12]</sup>.

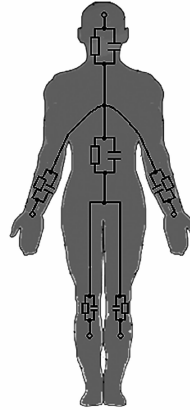


图6 人体的等效电路

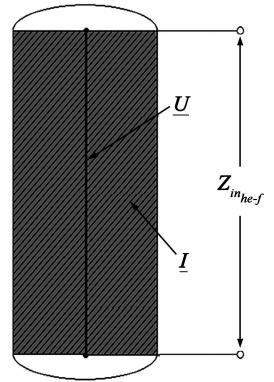
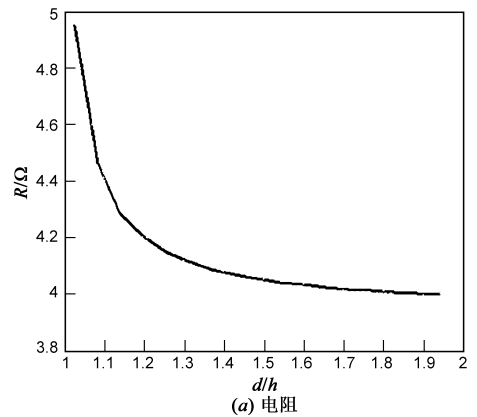
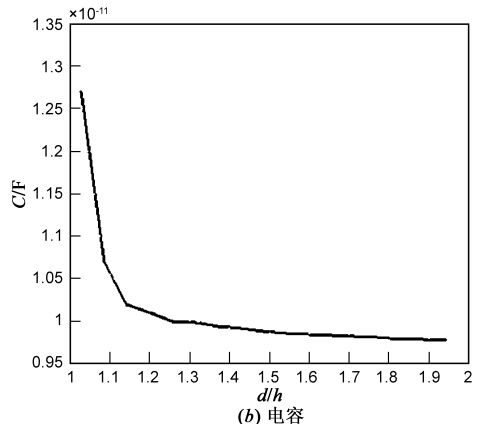


图7 人体的柱体模型与计算输入阻抗的方法



(a) 电阻



(b) 电容

图8 置于横电磁模小室中柱体模型的计算结果

## 5 结语

生物体的电输入阻抗概念虽然较早已经提出,但仍然需要作进一步的研究.文献[13]提出了人体阻抗的测量方法,但其对于建立包含理想反射的复杂人体详细模型的方法困难很大,用来等效人体的电路复杂而且不一定包含同步解.如此类型的仿真和测量手段,还远远不能准确反映观察到的真实、健康的复杂人体.

人体细胞组织和器官的电性质,可以用来表述整个人体的电特征.这些细胞组织和器官的变化可以反映被测人体与生理和病理有关的生物医学信息.通过仪器测量、理论计算和计算机仿真等手段,有助于快速发现这些细胞组织和器官电性质的变化,获取有用的生物医学信息.

人体输入阻抗的存在和对功率的吸收,可以由这样的结果加以证实:电磁辐射系统尺寸线度增大,导致人体阻抗减小(图2).本研究中提出的电路模型(图6),可以对人体输入阻抗进行基本的预计算,同时还提出了人体的柱体模型用来计算输入阻抗(图7).人体的柱体模型计算结果(图8)表明,人体确实可以用输入阻抗加以等效描述.

### 参考文献:

- [1] CRAWFORD M L. Generation of standard EM field using TEM transmission cell[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1974, 16(4): 189 - 195.
- [2] DLUGOSZ T, TRZASKA H. Proximity effects in EMF measurements and standards[A]. XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science[C]. New Delhi: International Union of Radio Science, CD Proceedings, 2005.
- [3] TRZASKA H. Calibration of directional antennas and limitations in their use[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 2000, 49(5): 1112 - 1116.
- [4] DLUGOSZ T, TRZASKA H. Mutual interactions in bioelectromagnetics[J]. The Environmentalist, 2007, 27(4): 403 - 409.
- [5] DLUGOSZ T, TRZASKA H. Mutual interactions in EMF dosimetry[A]. Proceedings of the International Conference and COST 281 Workshop on Emerging EMF-Technologies, Potential Sensitive Group and Health[C]. Graz: Institute of Clinical Engineering of Graz University of Technology, CD Proceeding, 2006.
- [6] Italian National Research Council. An Internet resource for calculation of "Dielectric Properties of Body Tissues in the frequency range 10Hz ~ 100GHz"[DB/OL]. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>, 2008-05-20.

- [7] LEBLANC D, HATCHER D, POST R D. Finite-Difference Time-Domain Front-End Utility [M]. Texas: Brooks Airforce Base, 2000.
- [8] LIEDTKE R J. Principles of bioelectrical impedance analysis [DB/OL]. [http://www.rjlsystems.com/docs/bia\\_info/principles/](http://www.rjlsystems.com/docs/bia_info/principles/), 1997-04-10.
- [9] KANAI H, CHATTERJEE I, GANDHI O P. Human body impedance for electromagnetic hazard analysis in the VLF to MF band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(8): 763 - 772.
- [10] LIEDTKE R J. The fundamentals of bioelectrical impedance analysis[DB/OL]. [http://www.rjlsystems.com/docs/bia\\_info/fundamentals/fundamentals.pdf](http://www.rjlsystems.com/docs/bia_info/fundamentals/fundamentals.pdf), 1998-02-16.
- [11] DLUGOSZ T. Mutual interactions between TEM cell and object investigated in it[D]. Wroclaw, Polish; School of Graduate, Wroclaw University of Technology, 2007.
- [12] CHAOSHI R, HUIYAN W, YUAN A, HONG S, GUOJING L. Development of electrical bioimpedance technology in the future[A]. Proceedings of the 20<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society[C]. Hong Kong: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1998. 1052 - 1054.
- [13] LINGWOOD B E, COLDITZ P B, WARD L C. Biomedical applications of electrical impedance analysis[A]. Proceedings of the 5th International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA '99)[C]. Brisbane: Queensland University of Technology, 1999. 367 - 370.

### 作者简介:



阮方鸣 男, 1962年12月生于贵州省黔西, 贵州师范大学教授, 北京邮电大学博士研究生, 中国电子学会高级会员, IEEE正式会员. 独立或以第一作者身份已发表学术论文40篇. 2004.10-2005.9以访问研究员身份留学日本名古屋工业大学环境电磁学研究所. 近年出席在欧洲、美国、日本、中国召开的多次国际电磁兼容学术会议并交流论文. 主要研究兴趣: 电磁兼容设计、静电放电、电磁生物效应. E-mail: ruan95@yahoo.cn



Tomasz Dlugosz 男, 1979年生于波兰别尔斯科-拜拉, 分别于2004年和2007年获得波兰瓦格纳科技大学授予的硕士学位和博士学位. 2007年起留校工作于瓦格纳大学通信、信息与声学研究所; 主要研究兴趣包括: 电磁理论和电磁仿真软件应用等.