

文章编号:1000-582x(2000)03-0001-03

①
2000, 23(3)
1-3, 8

电阻抗 CT 技术在人体上肢图象重建中的应用

姚德贵, 周守昌

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

R814.42

摘要: 人体实验是电阻抗 CT 技术应用于临床的重要研究课题之一。在研制了适用于人体上肢的环状无源 32-电极系统的基础上, 对不同受试者的上臂和前臂作了多组测试工作。文中给出了电阻抗 CT 逆问题计算的数学模型和人体实验的结果。结果表明: 经过图象重建和处理后, 基本符合人体上肢的解剖学特征, 可以清晰地分辨出骨骼与肌肉组织。

关键词: 电阻抗; 电极 / 人体上肢; 电阻抗 CT
中图分类号: TM 154.4 **文献标识码:** A

图象重建 数学模型

电阻抗 CT 作为一种新兴的医学成像技术, 其优点非常独特: 成像迅速、定位准确、对人体无伤害及成本低廉等。所以其广泛的应用前景备受人们关注, 研究它的团体也如雨后春笋般涌现。人们在算法、软件等方面做了大量的研究后, 将该技术应用于临床诊断终究是可能的。因而临床应用前的人体实验显得较为关键。

电阻抗 CT 的理论依据是在已知场域边界电压电流分布的情况下确定出场域内电导率的分布。也就是说, 在知道人体上肢某个位置皮肤周围上的电压和电流分布情况后, 便可确定出该处电导率的断层分布图。人体各种生物组织的电导率不一样, 发生病变组织的电导率也会相应改变, 所以根据该断层图上电导率的分布情况就可以得到组织病变的相关信息^[1]。

本文是在前期工作的基础上, 将工作重点由模拟实验转向对人体实验的探索研究。具体地说, 是对不同受试者的上臂和前臂作了多例测试工作, 经过图象重建和图象处理后, 结果基本符合人体上臂和前臂的解剖学特征, 即能分辨出骨骼和肌肉组织。尽管图象的空间分辨率仍有待改善, 然而这些人体实验研究的初步成果却具有一定的突破性意义, 它为电阻抗 CT 技术应用于临床奠定了坚实的基础。

1 数学模型

如果不考虑三维效应, 可将人体上肢的断层当作

一个二维圆形场的问题来研究, 该场域满足似稳条件^[1], 所以也可将它视作一个直流场(如图 1 所示)。

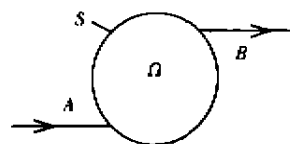


图 1 场域示意图

图中, Ω 为二维直流场, A, B 分别为两个向场域内注入电流的电极。假定场域内电导率为 $\sigma(x, y)$, 电流密度为 $\delta(x, y)$, 电场强度为 $E(x, y)$, 电位函数为 $\Phi(x, y)$. 这样可得到如下三个公式:

- 1) $\delta = \sigma E$ (欧姆定律的微分形式)
- 2) $\nabla \cdot \delta = 0$ (电流连续性方程的微分形式)
- 3) $E = -\nabla \Phi$

若假定电导率是各向同性的, 又由于电导率和电流密度无关, 所以电导率分布 $\sigma(x, y)$ 就成为一个标量。由以上三式可以得到如下的方程:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \Phi = 0 \quad \in \Omega \quad (1)$$

电阻抗 CT 的目的是求得上式中的 σ , 已知的是在场域边界注入的电流和测量所得的边界电位, 场域内部的电位则是未知量。显然, 仅进行一次测量是不够

收稿日期: 1999-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39470218)

作者简介: 姚德贵(1971-), 男, 安徽芜湖人, 重庆大学博士生, 从事电磁场理论在生物医学工程中的应用研究。

的,只有通过改变电流的注入位置(定义每一特定的电流注入端口为一“投影角”),反复测量边界电位的方法来获得足够多的信息以完成电导率的重建计算。重建计算的约束条件为:

$$\sigma \frac{\partial \Phi_i}{\partial n} = \delta_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n, \in S) \quad (2)$$

式中 $\frac{\partial \Phi_i}{\partial n}$ 为第 i 次电流注入时边界电位的法向导数; δ_i 为第 i 次电流注入时边界上的法向电流密度。

式(1)、(2)构成了电阻抗 CT 的数学模型。对此模型的求解方法就是电阻抗 CT 的重建算法,这是一个电场计算的逆问题。本文中采用的重建算法是一种改进的迭代等位线算法。场域分割法的基本迭代格式为(3)式,改进的迭代等位线算法计算公式如(4)式所示^[1]。

$$\sum_{i=1}^{z_0} h_{ij} \Delta \sigma_i^k = \Delta Z^k \quad (3)$$

$$\rho_i^{k+1} = \rho_i^k \left(\sum_{j=1}^{PN} h_{ij} \hat{z}_{ij} / z_{ij} \right) / \sum_{j=1}^{PN} h_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, z_0) \quad (4)$$

式中 σ_i 、 ρ_i 分别为单元 i 的电导率和电阻率; P 表示投影角总数; N 表示在每一个投影角下所得电阻抗测量值的数目; z_{ij} 为端口 i 对端口 j 的开路阻抗测量值 ($z_{ij} = \frac{\Phi_i - \Phi_j}{I}$, I 为注入电流); 加权系数 $h_{ij} = \int_{\Omega_{ij}} (\|\nabla \varphi\|^2 / I^2) dS$ (Ω_{ij} 为相邻两等位线所夹区域与被计算单元相交的区域); 修正系数 \hat{z}_{ij} / z_{ij} 为转移阻抗的迭代计算值与真实值之比; z_0 为剖分单元总数(图 3 显示的是圆形场域的剖分情况)。

2 电极系统

随着电阻抗 CT 技术的不断发展,许多研究人员正在探索如何把他们设计的系统应用到人体上去,而不是仅仅局限于各种生理模型的研究应用。为了得到身体某部位的电阻抗图象,必须将电极紧紧地绕在该部位周围而获取各种所需信息。电极的数量、极间的相对位置以及它与皮肤间的接触电阻对最后的成像效果都有很大的影响^[2]。因此,一个系统的电极设计显得非常重要。设计出的电阻抗 CT 成像电极系统应该能做到:1)能将电极紧紧地贴附在皮肤表面上;2)可以准确地确定电极的位置;3)可以适应诸如病人呼吸或移动而对被测量部位的外形与尺寸产生的变化。

尽管目前研制出的电极种类繁多,但不同的电极有其不同的适用性,因为电极是按被测部位的接触面

积和几何形状来设计制作的。本文中所制作的电极主要是针对人体上肢的电阻抗 CT 成象的。电极采用很薄的铜片制成,其宽度为 3 mm,长度为 28 mm。用来固定电极的外壳是一个直径为 90 mm、高度为 30 mm 的硬塑料环。电极紧紧镶嵌在塑料环的内侧,并用导线将它与多路开关及开关控制器相连,从而构成系统的数据采集部分。

这里需要说明的是,虽然电极的数目越多,能够得到的测量数据也就越多,但由于相邻电极间的距离减小,电极间电位差变小,使得测量误差的影响变大;另外,过密的电极会使极间电容的影响增大,而且还为制作带来麻烦。所以,本文中总共选用了 32 根电极均匀分布在塑料环的内侧。显然,这是一个无源电极系统,它的制作也是非常廉价的。

为了减小电极同皮肤间的接触电阻,更好地获取人体组织的生物信息,在进行人体实验前,先将铜电极进行打磨,除去电极表面的氧化层;再用无水乙醇把待测量部位擦洗干净,并涂上医用耦合剂。这样将电极套在胳膊上,张紧肌肉,便可以保证电极与皮肤间良好的接触。实验时的电极位置见图 2。其中,左图进行的是上臂实验,右图进行的是前臂实验。国际电工协会与美国国家标准机构规定医用设备的安全电流值为 $(100 \mu\text{A}/\text{kHz}) * f^{0.1}$,而本文在实测时所采用的注入电流频率 $f = 50 \text{ kHz}$,也就是说,我们实验装置的安全电流限值为 5 mA,它大于 1 mA 的实验电流,从而保证了被测试者的安全。由于数据采集系统的转换开关速度非常快,所以对于体积相对较小的似稳场域,在一个电



图 2 实测时的电极位置

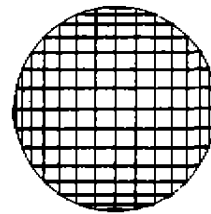


图 3 圆形场域的剖分

流周期内可以满足边界测量电位几乎是同一时刻的, 这样便可保证用于重建计算的数据的准确性。

3 实验结果

图 4 分别给出了几幅人体上臂及前臂根据实测数据重建图象的结果。图 4(a) 是被测试者甲上臂的重建图象, 图 4(b) 是被测试者乙上臂的重建图象; 图 4(c) 则是受试者丙前臂的重建图象, 图 4(d) 是被测试者丁前臂的重建图象。图象的灰度显示规律表明: 当场域内的电导率愈大, 即其电阻率愈小时, 其灰度显示就愈亮, 反之就愈暗。人体胳膊的主要组织有肌肉、骨骼和血液等, 它们的电导率都各不相同(见表 1)。

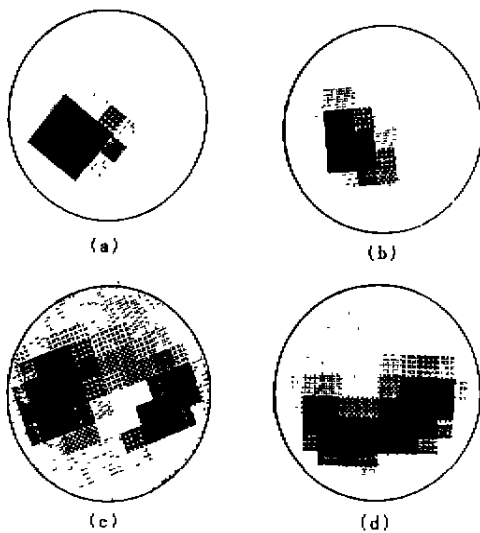


图 4 人体上肢实验的重建图象

由表 1 可知, 骨骼的电导率远小于肌肉和血液的电导率。也就是说, 图中较暗的部分应为骨骼, 而较亮的部分应为肌肉、血液或其它电导率很大的组织, 这也基本符合人体上臂和前臂的解剖学特征。人体上肢的结构如图 5 所示。

表 1 人体部分组织的电导(电阻)率

人体组织	$\rho/\Omega \cdot m$	$\sigma/\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
骨骼	166.0	0.006
肌肉	3.0	0.333
血液	1.5	0.670
脂肪	27.2	0.037

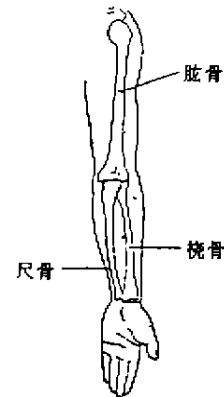


图 5 人体上肢结构图

人体实验是电阻抗 CT 技术应用于临床实践前的关键一步。作者在研制出环状无源 32-电极系统后, 对数名受试者的上臂或前臂进行了多次测试工作, 经过图象重建与处理后, 得到的图象均可清晰地分辨出骨骼和肌肉。这也同实际基本相符: 即人体上臂有一根肱骨, 而前臂则有一根桡骨和一根尺骨。这些实验研究的初步成果证实了我们研制的人体电阻抗 CT 锥形(电阻抗自动成象系统)供实验用的可行性。当然, 在今后的工作中, 为了提高图象的空间分辨率, 进一步改善重建图象质量, 一方面应继续深入研究重建算法, 在算法上谋求有效的改善; 另一方面, 应设法提高数据采集的准确度。为此, 要设法减少人体生物电的干扰; 研制有源电极, 保证电极与皮肤间良好的机械接触和电接触, 减小高频情况下极间电容、寄生电容等对测量准确性的影响。此外, 还要提高数据采集速度, 使成象系统达到实时化的要求。

参 考 文 献

- [1] 贺兴柏. 电阻抗成象技术的理论研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 1991.
- [2] GENCER N G, IDER Y Z, DANYLEIKO M D. Electrical Impedance Tomography: Induced - Current Imaging Achieved with a Multiple Coil System[J]. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 1996, 43(2): 139 - 149.
- [3] PETER M E, GARY J S, JONATHAN C N, et al. A Real - Time Electrical Impedance Tomograph[J]. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, 1995, 42(9): 849 - 859.

Study of Intelligent Fault Diagnostic System for a Kind of Power Plant

WU Kai-gui¹, ZHOU Jia-qi¹, ZHAO Peng², YANG Zi³, XIE Zhao-lf³

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Based on the neural networks, object-oriented technique, artificial intelligence technique and computer networks, an intelligent fault diagnosis system of the power plant whose need of the operation is presented. The architecture of software system, hardware system and corresponding databases is designed. The software of collecting data is established. The intelligent fault diagnosis system based on neural networks and object-oriented technique is also developed. The physical system operation has been shown that the method mentioned above is feasible and effective in practice.

KEYWORDS: fault diagnosis; computer networks; expert system / object-oriented technique; neural networks

(责任编辑 李胜春)

* * * * *

(上接3页)

Applications in Reconstructing Images of the Upper Limbs of Human Body Using Electrical Impedance Computed Tomography Techniques

YAO De-gui, ZHOU Shou-chang

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Human body experiment is one of the key problems for the electrical impedance tomography (EIT) in clinical meaning. In this paper an orbicular passive 32-electrode system which is suited for the upper limbs is developed, and the mathematical model for EIT to solve inverse problem is given. After testing many upper arms or forearms of persons, the author have reconstructed the images which are distinct to distinguish skeleton from muscle.

KEYWORDS: electrical impedance; electrodes / upper limbs of human body; electrical impedance computed tomography

(责任编辑 李胜春)