

基于协同传感器的可穿戴式呼吸监测系统研究

梁 铎

(江西省地理国情监测遥感院,江西 南昌 330000)

摘要:基于协同传感器的可穿戴式呼吸监测系统,主要开发基于生物阻抗成像的呼吸监测系统。研究的内容主要是解决已知系统边界电压和电流,求解一定区域内生物组织电导率分布的情况,依据电导率的分布情况给出对应的图像,与已知的不同情况下的呼吸模式图像进行比对,达到监测病人肺部状态的目的。

关键词:协同传感器;可穿戴式;呼吸监测;系统研究

[DOI]10.12231/j.issn.1000-8772.2020.30.198

1 研究的目的、意义

电阻抗层析成像技术(Electrical Impedance Tomography, EIT)是继形态(X-ray)、结构(CT等)成像后出现的新一代无损功能成像技术,该技术利用生物组织的电特性,通过配置于生物体表面的电极阵列,施加安全的激励电流,测量其边界电压,经图像重构得到生物体内电阻率分布及变化的图像。

研究表明人体各组织、器官具有不同的阻抗特性,而且一些病理现象和生理活动均会引起人体组织阻抗变化。因此生物组织阻抗携带着丰富的病理和生理信息。EIT技术将生物体组织或器官的阻抗分布作为成像目标,通过贴放于人体体表的电极,可提取与人体生理、病理状态相关的组织或器官的电信息,实现无损伤功能性成像和医学图像监护。

表1 各种组织的电阻率和电导率

组织	电阻率 ($\omega \cdot \text{cm}$)	电导率 $\frac{1}{(10^4 \Omega \cdot \text{cm})}$	组织	电阻率 ($\omega \cdot \text{cm}$)	电导率 $\frac{1}{(10^4 \Omega \cdot \text{cm})}$
0.9% 氯化钠溶液	50	140	脾	630	—
血清	70~78	105	正常乳房	430	—
全血	160~230	56~85	乳腺癌	170	—
肌腓肌	470~711	58~90	肾髓质	400	—
心肌(无血)	—	50~107	皮质	610	—
(灌满血)	207~224	—	脂肪	1808~2205	0.4
肝	506~672	6~90	脑灰质	480	—
肺(呼气)	401	5~55	白质	750	—
(充气)	744~766	—	—	—	—

目前的临床医学成像技术主要包括X射线层析成像、超声层析成像(UT)、核磁共振成像(MRI)等。与这些传统的医学成像技术相比,EIT对人体无创伤,可以重复测量使用,且成本低廉,操作简单,工作环境要求低,这是CT、超声等其他成像技术无法比拟的优势,而且EIT不仅能与传统的X-ray、MRI成像一样反映目标截面的解剖学结构,更能给出器官的功能性成像结果,例如肺部呼吸过程中肺体积的变化,可以作为一种长期、连续监护的临床诊断技术。

2 系统构建的基本原理与依据

2.1 电阻抗成像的基本原理

电阻抗成像的基本原理是人体组织器官在不同的生理、病理状况下的阻抗分布差别较大,通过电极在人体表面施加微小的安全激励电流,在人体内部产生微弱的电场,利用在体表的测得的电压信号配合一定的成像算法可以实现人体内部电阻抗分布图像重构。人体可以看作一个导体,内部的组织和器官具有阻抗且差异较大,同一对象在不同的病理状态下的阻抗变化也会非常大。因此,利用电

阻抗成像的原理在人体表面施加一个激励信号并测量相应的电信号,配合合适的成像算法,可以完成对人体组织器官的截面成像。IT成像系统示意图可以由图1表示:系统主要由传感器单元、测量与控制单元、图像重建单元三大单元模块组成,传感器单元负责对被测对象施加电信号激励与电压感应,测量与控制单元负责测量边界电压信号。

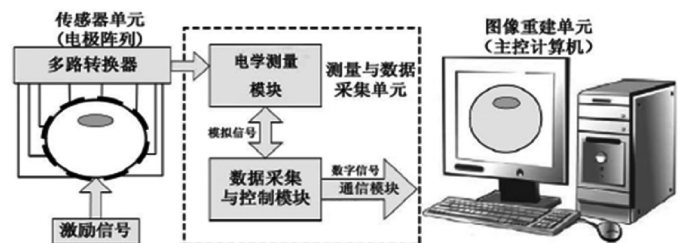


图1 EIT测试系统框图

2.2 生物组织的电阻抗特性

人体组织包含多种不同电导率的组织器官,这为EIT成像技术应用于医学检测提供了条件。组织器官的电导率受多种因素影响,例如:类型、测量频率和温度。表2给出了在频率20~100kHz时不同组织器官的电阻率。

表2 人体组织器官电阻率参数表(20kHz-100kHz)

组织	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	组织	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$
骨头	166	纵向骨骼肌	1.3~1.5
脂肪	21~28	横向骨骼肌	18~23
肺	7.3~24	肝脏	3.5~5.5
大脑灰质	2.8	血液	1.5
大脑白质	6.8	血浆	0.66
纵向心肌	1.6~5.8	脑脊液	0.65
横向心肌	4.2~51	神经组织	5.8

2.3 组织器官的电阻抗模型

国内外学者针对人体组织的电阻抗等电学特性的本质做了深入研究。总的来说,人体组织可以认为是许多细胞被包裹于一个导电环境中,该导电环境是细胞外液。而细胞外液中还包含一些其他的如胶原纤维、弹性纤维等无知,对电流有较强的阻碍作用。细胞与导电环境通过“绝缘壁”-细胞膜分开,这个“绝缘壁”的作用就相当于一个电容器。可以看出,人体的组织对电流既显示出阻碍作用,又表现出容性。这表现在:在低频率下,电流不能通过细胞膜,只能在细胞外液中进行传导;而在高频率下,细胞膜对电流的阻碍作用减弱,容抗随频率升高而降低,电流可以穿透细胞膜,此时,生物组织的高频率情况下的阻抗相较于低频较小。这种人体组织阻抗随电流

频率升高而降低的现象体现出了细胞膜电容性。在电阻抗基础理论的研究过程中,产生了代表性理论模型如:三元件模型,Cole-Cole模型、频散理论等。

3 系统组成结构及关键问题

本研究主要开发基于生物阻抗成像的呼吸监测系统,主要是解决已知系统边界电压和电流,求解一定区域内生物组织电导率分布的情况,依据电导率的分布情况给出对应的图像,与已知的不同情况下的呼吸模式图像进行比对,达到监测病人肺部状态的目的。

3.1 系统结构组成

3.1.1 构建胸腔和肺部 3D 模型

生物阻抗成像对于所测量对象的规则程度很敏感,往往利用规则模型建立起的算法和模型,在实际运用于生物体上依然存在误差。为了能够贴近实际的生物体情况,我们需要建立测量对象的三维模型,并在此基础上,搭建合适的实际测量模型和对系统进行必要的简化,再进行算法的验证和仿真,进行先期的实验验证算法和数学模型的可行性。因此,在前期工作中,需要建立一个胸腔和肺部的三维模型,以此来达到简化研究对象的目的,为之后复杂系统建模提供一个可靠的依据。

3.1.2 建立合适的成像系统

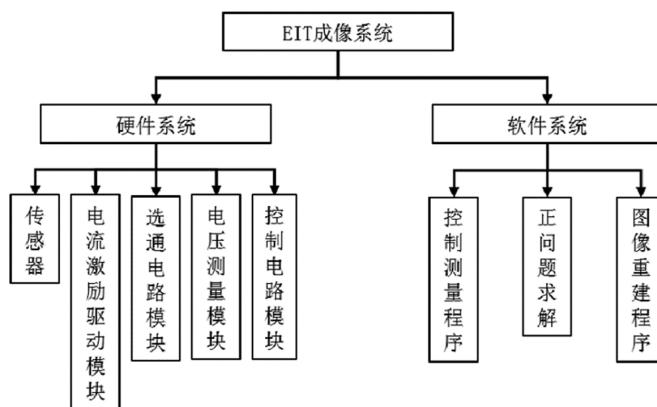


图2 EIT 成像系统主要组成

EIT 成像测量系统需解决边界的测量电压和激励电流的测量情况,通过相应的传感器将所需信号检出,并且进行降噪和滤波处理,最终 AD 转换成数字量传入我们的图像重构的计算机中,依据图像重构算法对所测信号进行处理,最终成像,可主要分为硬件系统和软件系统(如图2所示)。我们需要解决的是稳定的恒流源、精确的电压传感器、相应的降噪除噪电路、滤波电路和 AD 转换部分。还要解决传感器在生物体上的分布情况,即如何围绕研究对象和图像重构算法构建合适的测量模式。

3.1.3 图像重建的算法建立与仿真

图像重建是由边界测量数据重建对象内部阻抗分布的过程,主要分为正问题求解与逆问题求解。由于 EIT 的逆问题求解是一个严重的病态的非线性问题,微小的边界电压波动就会造成解的不确定性,因此需要谨慎选择图像重建算法。EIT 逆问题的求解只能采用数值法。首先,建立仿真模型,获得边界电压计算值。其次,通过图像重构算法得到电阻率分布。利用测量系统获得边界电压的测量值,并将测量值与计算值经过反复迭代修正电阻率,最终得到阻抗分布的近似值。图3为系统重构流程图。

3.2 系统构建的关键问题

由于生物组织结构复杂,不确定性和未知性因素很多。使得本项目的进行面临着诸多难题,主要包括以下几个方面:

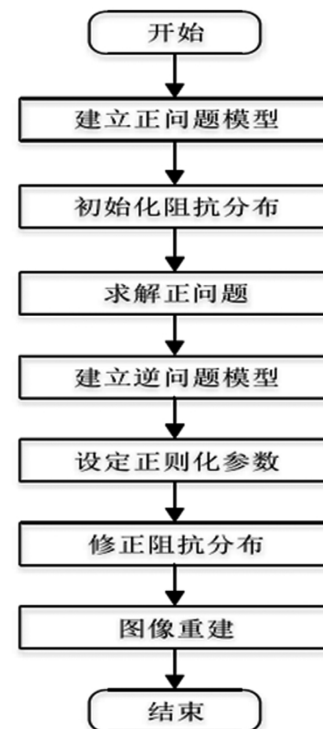


图3 图像重构流程图

3.2.1 模型的搭建

绝大部分的实验都是离体实验,需要搭建物理实验模型。由于生物体本身的复杂性,实验模型很难做到与实物在机理和结构上完全一致,很难搭建一个理想模型,导致实验结果与实际存在一定的偏差。

3.2.2 电极阵列

电极阵列主要完成信号的传输,所以电极的数量、安装的位置、材料以及形状都会影响最终数据采集的精度。电极数量少,电路结构简单,成像快。但是获得独立的数据比较少,造成成像像素低,分辨率不足。增加电极数量,可以获得更多独立的数据,硬件系统会更加复杂,不便于操作。如何选择合适的电极数量是本项目组的研究重点之一。

3.2.3 高精度、高速度数据采集电路

生物阻抗变化时能引起的最大边界电压变化范围是 10%,所以要求系统的数据采集精度至少达到 0.1%。目前 EIT 技术中测量手段采用的是外部电流激励,外部电压测量的方式,且要求激励电流源不能超过人体安全电流(5mA),使得系统抗干扰能力差,采集信号非常微弱,这就对测量电路的性能提出了更高的要求。研究表明,人体组织的阻抗信息含有丰富的生理和病理信息。肺部在呼气和吸气时,相对电导率和介电常数随频率变化,且频率变化范围在 10KHz-1MHz。所以要求激励源的频率比较高,这对设计放大电路,解调电路、滤波电路以及 A/D 采集电路提出更高的要求。

3.2.4 图像重构算法

EIT 图像重建是一个严重的病态逆问题,其中之一表现为较小的边界电压波动就会引起图像的巨大变化,所以只能通过算法加以克服,并且目前所研究的电阻抗成像系统存在着分辨率不一致的问题,即中心位置的分辨率高于边界位置的分辨率。成像算法的好坏直接影响最后的成像质量,目前的成像算法还不尽人意,算法复杂、不够稳定且计算量大。所以寻找出一种更高效、更高精度的成像算法也是本项目组的研究重点之一。