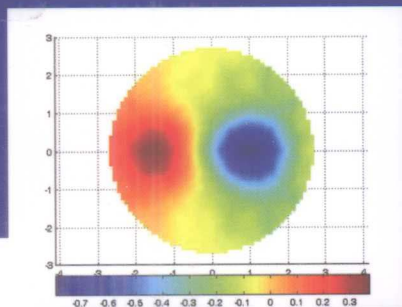
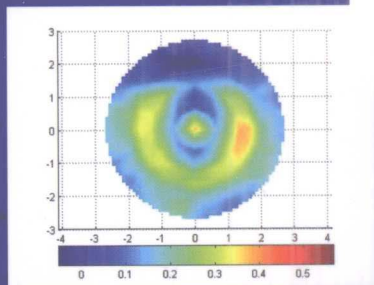


生物医学

电阻抗成像技术

Electrical Impedance Tomography in
Biomedical Engineering

徐桂芝 李颖 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

生物医学

电阻抗成像技术

Electrical Impedance Tomography in
Biomedical Engineering

2009-12-11 14:11



© 2009-2011

生物医学电阻抗成像技术

徐桂芝 李 颖 杨 硕
吴焕丽 张 帅 张剑军 著



机械工业出版社

本书总结了作者多年来在生物医学电阻抗成像技术方面的研究成果及培养研究生的教学经验, 主要内容包括生物医学电阻抗成像技术概述、生物组织电学特性分析、电阻抗成像正问题分析、图像重构算法研究、电阻抗成像系统设计、生物医学电阻抗信息检测与功能成像等。

本书内容丰富、结构合理、系统性强、层次分明、注重理论知识和实际应用相结合, 是专著性的教材, 可作为生物医学工程及相关专业研究生的教材, 也可作为本科生和科研人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

生物医学电阻抗成像技术/徐桂芝等著. —北京: 机械工业出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-111-30134-9

I. ①生… II. ①徐… III. ①影像诊断 IV. ①R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 046536 号

机械工业出版社 (北京市百万~~里~~大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于苏华 责任编辑: ~~于苏华~~ 谷玉香 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣 封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 13.75 印张 · 265 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-30134-9

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学的发展和社会的进步,如何将先进的科学技术用于人体医学检查及各项机能测试,实现对疾病的早期预防,增强机体功能、提高健康水平越来越成为人们共同关心的问题。

电阻抗成像(Electrical Impedance Tomography, EIT)技术,具有无损伤、功能成像和医学图像监护三大突出优势,是一种理想的、具有广泛应用前景的医学成像技术,可作为病人进行长期、连续的监护设备,在研究人体生理功能和疾病诊断方面有着重要的临床价值。由于其安全、成本低,而且很容易推广到诸如地球物理探矿、水文地理或坝体检测、水下目标探测等领域,从而引起了医学界和工程界科研人员的广泛关注。该方面的研究涉及生物医学工程、电工技术、信息技术、计算机技术等诸多学科领域,具有重要的学术和临床应用价值。

河北工业大学生物电磁技术科研学术群体,自1995年开展了生物电磁正、逆问题的研究,特别是对生物医学电阻抗成像技术中的正、逆问题及硬件系统进行了深入、系统的研究,主持并完成了国家自然科学基金项目“生物医学电磁场逆问题求解方法研究”,与清华大学、同济大学共同完成了国家自然科学基金重点项目“脑内电活动的三维动态成像”,另外还完成了教育部、科技部、河北省、天津市自然科学基金等资助的多项科研项目。2004年,获河北省科学技术突出贡献奖1项;2006年,获河北省自然科学奖1项,鉴定项目8项,均达国际先进水平;2006年,出版了《生物医学电磁场数值分析》专著;发表相关学术论文80余篇,其中被SCI、EI和ISTP检索60多篇。

本书总结了作者多年来在生物医学电阻抗成像技术方面的研究成果及培养博士后、博士、硕士研究生的教学经验。其主要内容包括生物组织电学特性分析、电阻抗成像正问题分析、图像重构算法研究、硬件系统设计、生物医学电阻抗信息检测与功能成像等。本书内容丰富、结构合理、系统性强、层次分明、注重理论知识和实际应用相结合,是专著性的教材,适用于相关专业本科生、研究生和科研人员。

本书由徐桂芝、李颖、杨硕、吴焕丽、张帅和张剑军著。颜威利教授审阅了全部书稿,提出了许多宝贵建议,在此深表谢意。

感谢为本书内容作出贡献的所有课题组成员。

在本书撰写的过程中,参阅了许多相关文献资料并利用了一些图表曲线等,

IV

在此向它们的作者和有关单位表示感谢。

衷心感谢国家自然科学基金委员会、科技部、教育部、河北省科技厅、河北省教育厅、天津市科委等部门对我们研究工作给予的资助和支持。

本书的出版得到了河北省教育厅科学技术出版基金的资助，在此深表谢意。

由于著者水平有限，缺点、错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2009 年 11 月于天津

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 医学影像技术概况	1
第二节 主要的医学成像技术介绍	3
第三节 生物医学电阻抗成像技术概述	7
第二章 生物组织的电学特性	20
第一节 生物组织的电磁特性	21
第二节 生物组织的电阻抗模型	26
第三节 生物组织电阻抗特性的测量与临床应用	28
第三章 电阻抗成像正问题的有限元分析	33
第一节 电阻抗成像正问题的求解方法	33
第二节 基于有限元法的二维电阻抗成像正问题求解	34
第三节 基于电阻抗成像技术的二维脑内电特性分析	55
第四节 基于有限元法的三维电阻抗成像正问题求解	62
第五节 基于电阻抗成像技术的三维胸腔模型建立与正问题分析	69
第四章 电阻抗成像的图像重构	76
第一节 电阻抗成像逆问题及其主要求解方法	76
第二节 基于等位线反投影方法的电阻抗成像图像重构	80
第三节 基于节点反投影方法的电阻抗成像图像重构	90
第四节 基于牛顿-拉夫逊方法的电阻抗成像图像重构	112
第五节 H-MNR 算法在电阻抗成像逆问题求解中的应用	126
第六节 微分进化方法在电阻抗成像逆问题求解中的应用	134
第七节 DE-MNR 算法在静态电阻抗成像中的应用	141
第八节 小波神经网络在电阻抗参数成像中的应用	148
第五章 电阻抗成像系统设计	163
第一节 电阻抗成像硬件系统概述	163
第二节 单频电阻抗成像系统	168
第三节 多频电阻抗成像系统	175
第四节 128 通道的三维电阻抗成像系统	179
第六章 生物医学阻抗信息检测与成像	186

第一节 常用的激励测量方法 186

第二节 基于物理模型的生物阻抗信息的测量与成像 191

第三节 基于人体胸腔呼吸过程的阻抗信息的测量与成像 202

参考文献 209

第一章 绪 论

进入 21 世纪, 生物医学工程迅猛发展, 如何将先进的科学技术用于人体医学检查及各项机能测试, 从而提高人类对疾病的早期预防和治疗, 增强机体功能、提高健康水平一直是人们共同关心的问题。因此, 人们对医学检测手段的要求越来越高, 检测方式已从人工主观检测发展到现在的主客观相结合。特别是医学影像技术的出现, 使疾病的诊断更加客观和准确。然而, 通过医学实践可以发现单一形态影像诊断仪器不能满足疾病早期诊断的需要, 形态和功能相结合的新型检测系统是医学发展的需要。向功能性检查和疾病的早期诊断发展, 向疾病的康复和愈后评价延伸, 正是现代医学发展所追求的目标。

电阻抗成像 (Electrical Impedance Tomography, EIT) 技术, 是以生物体内电阻抗的分布或变化为成像目标的一种新型无损伤生物医学检测与成像技术。它通过对生物体外加一定的安全激励电流, 测得生物体表面电压信号来重构生物体的阻抗分布。由于生物组织阻抗特性差别显著, 因而电阻抗成像结果明显。利用 EIT 技术, 可以显示生物体组织的阻抗分布图像、阻抗随频率变化的图像、生物体器官生理活动 (如呼吸、心脏搏动) 时的阻抗变化图像。由于采用外加安全电流激励, 是非侵入检测技术, 且是功能成像技术, 在研究人体生理功能和疾病诊断方面有重要的临床价值。它具有简便、无创、廉价的优势, 可作为对病人进行长期、连续监护的设备, 对疾病的早期预防、诊断、治疗及医疗普查都具有十分重大的意义, 一直受到众多研究者的关注。

第一节 医学影像技术概况

医学影像技术是用各种成像装置采集人体内部解剖学、生理学、病理学和心理学信息, 并实现可视化的科学。医学影像技术涉及物理学、生物学、医学、电子信息技术、计算机技术等多学科领域, 是典型的跨学科领域。

医学图像是真实物体信息的反映, 但还不是真实物体的镜像。到目前为止的所有成像设备只能采集人体的部分信息, 某种特定的医学影像是经过数学方法的反演之后得到的被成像人的特定部位在某一时刻部分信息的可视化表达。人体影像确实是人体信息的一部分, 含有被成像个体的特殊信息。但是, 即使成像过程中没有夹带任何虚假的信息 (伪影和噪声), 在某种特定的成像装置上采集的图像也只是被成像个体在特定时间和空间内的很小一部分信息。无论对

人体本身的研究,还是对人体疾病的诊断或者治疗,只靠这部分信息作出的判断会有较大的误差。据统计,用医学影像技术进行的疾病诊断在世界范围内的准确率大约为 85%,这是因为人体的情况太复杂,对疾病准确诊断所需要的数据还不够完整。目前,医院对病人采集的信息还需要进一步整合并及时完成在解剖学基础上的配准,生理学基础上的功能信息和解剖信息的集成,以及生化参数和影像的结合。尽管如此,医学影像能以非常直观的形式向人们展示人体内部的结构形态与脏器功能,是临床诊断中最重要的手段之一。

1972 年,第一台 X 射线计算机断层图像仪由英国学者 G. N. Hounsfield 研制成功,引发了医学诊断史上的重大革命。随后,传统的显微成像、X 射线成像和内窥镜成像技术得到不断发展。与计算机技术相结合的超声医学成像、磁共振成像和放射性核素成像等也已得到迅速发展和普及应用。相继出现单光子发射 CT (简称 SPECT)、正电子发射 CT (简称 PET)、超声 CT (简称 UCT)、微波 CT (简称 MCT)、核磁共振 CT (简称 NMRCT) 等,形成了 20 世纪 80 年代后医学影像诊断的新学科。超声波、X 射线、核医学、红外线和核磁共振成为当今五大医学影像技术。热成像、微波成像等技术亦在开发或研究之中,有的已形成产品。

近年来新的成像方法不断出现,从平面到立体、从局部到整体、从静态到实时、从形态到功能等,已成为医学影像技术发展的趋势。目前,B 型超声成像技术已经普及应用,彩色超声多普勒血流成像技术也已使用并日趋完善;X 射线 CT 已发展到第五代,扫描速度有了很大提高;磁共振成像(MRI)的磁体重量不断减轻,并在血流成像和波谱分析方面取得显著进展;放射性核素成像可获得组织化学及功能性图像;应用计算机的显微图像技术已成为进行细胞和分子水平研究的重要手段。X 射线 CT 仍是目前医学影像技术中体层摄影最为完善、应用最多的技术。但是,这些医学成像技术价格昂贵,并且绝大部分会对人体造成一定的伤害,不适于连续、长期的观测。对于正电子发射成像(PET)、单光子发射层析成像(SPECT)和功能性磁共振成像(fMRI)等功能成像,尽管空间分辨率较高,但时间常数较大,不能满足某些病理或神经科学中毫秒级时间分辨率的要求。

研究表明,生物组织的电学特性非常显著,如可以通过体表电极检测到生物体的脑电信号、心电信号、肌电信号等,这些都反映了生物体具有电学特性,其中主要是它的电阻抗特性。生物体的电阻抗特性主要表现为:

1. 不同生物组织间存在较大的阻抗差异 例如,胸腔内周围组织的电阻率约为 $3\Omega \cdot \text{m}$,心脏约为 $1.5\Omega \cdot \text{m}$,肺约为 $12\Omega \cdot \text{m}$,脊椎约为 $20\Omega \cdot \text{m}$ 。人体组织的电阻率在外加激励信号频率为 20 ~ 100kHz 时差别显著,从最小值脑脊髓液的 $0.65\Omega \cdot \text{m}$ 到最大值骨组织的 $166\Omega \cdot \text{m}$,上下限之比达到 250:1,软组织之间

电阻率的最大值与最小值之比也达到了 35:1。

2. 同一生物组织在不同的生理状态下阻抗也不相同 例如, 组织温度改变 1°C , 阻抗变化 2%; 组织内血液的流动和充盈情况也直接影响其阻抗大小, 如脑组织缺血时, 阻抗可增大近一倍; 由于心脏的周期活动, 身体各部分组织的阻抗也发生周期性的变化; 脏器体积的变化也对其阻抗产生很大的影响, 胃内食物的成分及胃的充满和排空使胃阻抗发生很大的变化; 在呼吸过程中, 肺阻抗大小与吸入的空气量紧密相关, 肺组织膨胀和收缩时阻抗发生数倍的变化。不论在自然或人工控制的被动呼吸状态, 肺内空气量同局部胸部阻抗有很好的线性关系。

3. 生物组织在发生病变时与正常时的阻抗变化十分显著 例如, 脑肿瘤异变组织约为正常组织的 13 倍; 脑震荡或脑肌肉萎缩组织约为正常组织的 2 倍; 脑出血异变组织约为正常组织的 $1/4$; 肺部疾病患者的阻抗值会发生显著改变, 用电阻抗可以检测出肺部组织液体异常变化的肺部病变。

4. 生物组织阻抗特性与频率有关, 即不同测量频率下的阻抗特性各异 另外, 某些生物组织的阻抗还具有各向异性的特点, 即沿组织不同方向测量时的阻抗值各不相同。

因此, 生物组织阻抗携带着丰富的病理和生理信息, 在医学影像研究中备受关注。近三十年发展起来的生物医学电阻抗成像 (EIT) 技术就是基于生物体的电学特性, 通过配置人体体表电极, 提取与人体生理、病理状态相关的组织或器官的电特性信息, 再通过图像重构算法也就是逆问题求解, 得到生物体内的阻抗分布图像。它不但反映了解剖学结构, 更重要的是利用 EIT 技术还可以得到反映生物组织活性及生理状态短时变化的功能图像。EIT 的装置简单便携、响应快速、成本低廉且运行安全, 而且它不使用放射元素或射线, 无辐射、对人体无创无害, 可以多次测量、重复使用, 应用对象与时间也不受限制, 可对病人进行长期连续监护, 在研究人体生理功能和临床疾病诊断方面, 具有重要的潜在价值和广泛的应用前景, 是继形态、结构成像之后, 新一代无损伤的功能成像技术。

第二节 主要的医学成像技术介绍

一、计算机断层成像技术

1972 年, 英国工程师 G. N. Hounsfield 研制成功首台计算机断层成像 (Computerized Tomography, CT) 机, 并应用于临床的颅脑 CT, 为此该工程师获得 1979 年诺贝尔生理和医学奖。X 射线 CT 是一种对穿透射线 (X 线) 所经过的物质的断面进行扫描, 通过检测器来测量透过该层人体 X 射线强度, 再通过计算

机加工处理,计算出该层内各个点 X 射线吸收系数,重构该层面结构的装置。CT 机是目前技术最成熟、应用最多、临床经验也最丰富的一种成像设备。在许多疾病的诊断中,CT 已成为医生首先考虑的检查方法,对肿瘤的定位与定量诊断相当迅速和准确,定性诊断价值也很大。对脑出血、脑梗塞、颅内水肿、脑挫伤的诊断与鉴别也很有效。尽管目前 X 射线 CT 的指标已达到相当理想的阶段,但 X 射线对人体的组织会造成一定的损伤,因而 X 射线 CT 不宜长期使用,在很多情况下(如对胎儿和孕妇)根本不能使用。另外,X 射线 CT 只能显示人体断层分布的几何特性,而对显示人体的生物化学信息则无能为力。

超声波 CT 是利用超声波完成扫描过程,从而避免了 X 射线 CT 对人体的放射影响,是目前最安全的一种成像系统,可用于包括妇产科在内的临床检查,但是超声波的传播受湿度、温度等多方面的影响,建立不同器官、不同密度和不同形状的超声波传播特性的数学模型非常困难。目前的超声波成像方法都忽略了超声波和生物组织之间的相互作用,因而不能得到理想的定量结果。

二、磁共振成像技术

磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)系统是基于物理学中的核磁共振现象设计的。人体中存在大量的氢原子核,它们具有固定的磁特性,当人体位于强磁场时,体内氢原子便按磁场方向进行排列。如果用一个频率很高的电信号形成附加磁场,则可使氢原子核偏离原来的排列方向。若突然切断该信号,那么氢原子核又趋于原来的排列方向,同时发出一种很弱的、具有特征频率的信号,MRI 便利用此信号蕴涵的信息进行图像重构。MRI 有其独特的优点:可重构三维图像,且可以从各种不同角度重构断面、冠状面、矢状面和任何斜面的切面图像;对软组织分辨率比 X-CT 高,对骨骼不产生伪影,且对软骨、骨髓结构有较高的分辨率;能分辨脑灰质、白质、脑干、垂体等;能反映出器官的生化结构的变化,并以此作出早期诊断等。所不足之处是结构复杂、设备庞大、价格昂贵。

三、功能性磁共振成像技术

MRI 提供的优秀解剖图像早已被人们所接受。近几年来,MRI 对组织磁化高度敏感的特点又被用来研究人脑的功能,特别是大脑各功能区的划分。这一新技术就是功能性磁共振成像(functional MRI, fMRI)。它主要基于以下两点:首先,人脑是可以划分为许多精细功能区域的,这使得人们能够设计各种激发方案来对它们分别进行研究;其次,在生理性的脑活动与脑血流、脑血流容积和能量代谢之间有着直接的联系。fMRI 就是通过检测上述神经活动的伴随现象来建立脑功能图像的。它突破了过去对人脑仅从生理学或病理学角度实施研究和评价的状态,打开了从语言、记忆、认知等领域进行研究的大门。fMRI 方法

有不使用同位素示踪剂、无创、可反复检测、空间分辨率高等优点，因此是脑功能成像的主要手段。但是，与 MRI 不同，fMRI 仍然是一种处于发展阶段的研究性功能成像方法，无论是在刺激的设计和序列的应用方面，还是图像的后处理及可视化等方面，还有相当多的技术问题需要解决。

四、正电子发射断层成像技术

正电子发射断层成像 (Positron Emission Tomography, PET) 是最早用来研究脑功能的成像技术。它利用放射性示踪物探测活动区域中血流量的增加情况，其成像速度慢，每次成像时间需要 1min。因此，研究人员可用 PET 进行“区域测试”。受试者首先进行一些简单的作业，使大脑重复同样的思维活动以采集数据。它可用于对脑的视觉活动、认知反映、神经功能等方面的功能成像，最典型的是对脑中的氧或葡萄糖的新陈代谢的血流成像。但是，由于需要注射放射性示踪剂、成像速度慢、分辨率低，以及需备加速器，使其成本较高。另外，动脉血流的测量需要采样，因此是侵入性的测量。正是由于这些不足，使得 PET 不如 fMRI 应用广泛。

五、脑电图技术

脑电图 (Electroencephalography, EEG) 是一种应用最广的将脑电信息进行采集与记录的方法。其基本原理是通过放置在头皮表面的电极，记录头皮上各神经元产生的电位信号，这些信号是由许多神经元共同协作而产生的。临床上用的电极按照解剖结构上的固定点均匀地放在头皮表面上。EEG 可以应用于许多方面，最常用的是通过记录被测试者在睡眠和苏醒情况下大脑内部的电生理活动产生的电信号，来诊断癫痫病是否发生。EEG 的空间分辨率比较低，但它可以检测脑电活动在毫秒级情况下发生的变化，具有很高的时间分辨率，是一种非侵入性的且方便的检测手段，且检测设备价格便宜，是深受临床接受的诊断设备。EEG 同样可以记录由外部刺激所产生的电信号，用于研究大脑对视觉、声音、嗅觉等刺激的反映，进行脑功能和认知科学方面的研究。

六、脑磁图技术

脑电图用于检测由于大脑神经元活动所产生的电信号，而脑磁图 (Magnetoencephalography, MEG) 所记录的是由此所产生的磁信号。人们已知地球磁场的强度是 10^{-5}T ，而脑的 α 波和癫痫病的棘波磁场强度为 10^{-12}T ，是地球磁场的百万分之一。因此，脑磁场的检测就变得异常艰难。1967 年，美国麻省理工学院的 D. Cohe 开始在磁场屏蔽室内，用反馈放大器制成的磁场检测器进行了人体大脑和心脏磁场的测定。到 1972 年超高灵敏度的磁场检测仪 (Superconduction Quantum Interference Device, SQUID) 研制成功后，第一个噪声小、清晰度高、以 α 波为代表的脑磁信号正式检测成功。利用在 MEG 的检测过程中产生

的诱发磁场分布,可以推定磁场信号源的位置,尤其是测定头颅表面的垂直方向的磁场。MEG 在脑磁场检测中具有独特的优越性。从磁场的产生源来看,MEG 的检测可分为自发性 MEG 和光、声等人为地施加外界刺激得到的诱发 MEG。在自发性脑磁场中,除正常的神经活动引起 α 波以外,神经细胞的异常放电(如癫痫病时)出现的棘波也会产生脑磁波。诱发脑磁场是由大脑皮层以及其他部位受到刺激产生的。在听觉诱发的脑磁场中,发生源在脑干,而脊髓神经的诱发脑磁场,发生源在脊髓。

MEG 与 EEG 相比有其独特的优点:无需测量电极,无需定标准点,可任取一点检测,是非接触性的测量,头颅骨的影响可以忽略不计。但其检测设备庞大、昂贵,使得临床使用难以大众化。

七、电阻抗成像技术

在过去的三十年里,解剖成像技术如计算机断层成像(CT)和磁共振成像(MRI)已在临床中广泛应用。最近,功能性磁共振成像(fMRI)和正电子发射断层成像(PET)技术正被研究用来功能成像。但这些技术都需要庞大的、昂贵和固定的设备。EEG 便于携带,但不能提供临床用成像,而且只对脑皮层的电活动敏感。

电阻抗成像(EIT)技术,是 20 世纪末迅速发展起来的一种新的成像技术。它利用介质的阻抗特性,通过外部电极施加一定的电激励(通常是低频电流),由表面不同位置的电极测得的电参量(通常是电位分布)信息,用一定的计算方法来重构目标内部的阻抗或其变化的分布图像。

生物医学电阻抗成像技术是将 EIT 技术应用于人体阻抗检测的一项技术,它根据人体内部不同组织具有不同的电阻抗,而且一些病理现象和生理活动均会引起人体组织阻抗的变化这一物理特征,通过给人体注入小的安全电流,测量体表的电位来重构人体内部的电阻抗分布图像。它除了能实现与 X 射线成像、计算机断层成像(CT)、磁共振成像(MRI)和超声成像相类似的功能外,还可以得到反映生物组织生理状态短时变化的图像,这在研究人体生理功能和疾病诊断方面有重要的临床价值。虽然目前应用 EIT 技术其图像的分辨率还不能与 CT 等成像技术相比,但它仍是一种有广泛应用前景的新型功能成像技术,是对目前医学成像手段的一个有效的补充。利用阻抗断层成像技术,可以显示人体内组织的阻抗分布图像、人体组织随频率变化图像、人体器官进行生理活动(如呼吸、心脏搏动)时的阻抗变化图像等。因此,该技术在近十几年受到国际学术界的广泛关注,并呈现出很好的应用前景。

第三节 生物医学电阻抗成像技术概述

一、生物医学电阻抗成像技术的由来

早在 20 世纪初,地质工作者利用向大地注入电流,并测量其在地表产生的电压分布来确定地球内部不同地层的电导率,通过对这些地层电导率的分析,结合已知岩面和矿物的特性来预测矿藏分布情况,这就是 EIT 技术的雏形。成熟的 EIT 思想是分别由 Henderson 和 Webster 作为医学图像成像技术与 Lytle 和 Dines 作为地球物理学的成像工具各自独立地提出的。

由于早期的 EIT 研究都是二维成像,采用等位线反投影成像算法实现,原理类似于 X 射线断层扫描成像,故沿用了“tomography”的称法,通常译作断层(也称体层或层析)成像。因此 EIT 也称为电阻抗 CT。实际上,由于电流在导体中是体传播的,并非沿直线或平面传播,所以电极上测量的信号反映的是内部阻抗的立体分布信息,而不是某个断层上的平面分布信息。尽管在实验室可以尽量做到沿成像平面垂直方向介质均匀一致,以减少体电流与面电流分布规律的差异,但是在实际应用中不可能存在这样的理想情况。将三维阻抗分布的测量结果假设为二维阻抗分布的响应,只能得到阻抗体分布的等效面分布图,近似视作某个断层的影像,而并非真正意义上的层析成像。目前,研究大多局限于二维,得到的图像也没有层析的意义,有时也用“imaging”或“inversion”代替“tomography”。

由于不同的介质阻抗可表现出不同的导电和导磁特征,实际上的阻抗应该是复阻抗。若不考虑虚部信息,只检测介质的电阻特性,通常称为电阻(率)成像(Electrical Resistance Tomography, ERT)。利用介质容抗特性的图象重构研究,称为电容成像(Electrical Capacitance Tomography, ECT)。此外还有电磁成像(Electromagnetic Tomography, EMT),研究对象涵盖了电导率 σ 、电容率 ϵ 、磁导率 μ 等主要电磁参数。以上可统称为电学成像(Electrical Tomography, ET)技术。

在不同的发展时期和不同的领域,电阻抗成像的名称也有所不同,尽管含义相近但词语不尽相同。20 世纪 70 年代,美国 Wisconsin 大学的 Swanson D. K 提出了电阻抗成像(EIT)的方法。1984 年,英国 Sheffield 大学的 Barber 和 Brown 等学者设计了外加电势层析成像(Applied Potential Tomography, APT)。20 世纪 80 年代中期,英国曼彻斯特大学理工学院(UMIST)以 M. S. Plaskowski 博士为首的研究小组提出“流动成像”(Flow Imaging),1988 年,UMIST 率先研制成功一种构造简单、价格低廉、动态响应好,且不与被测介质直接接触的 8 电极电容层析成像系统。在地学领域,主要考察介质的电阻特性,1987 年岛裕

雅 (Shima and Sakayama) 等提出了电阻率层析成像 (Resistivity tomography, RT) 一词, 并提出了反演解释的方法。在石油、化工、电力及冶金等行业的过程层析成像 (Process Tomography, PT) 检测中, 也主要利用电阻成像和电容成像, 有时直接将其称做过程层析成像。

在近几年的国际会议和学术刊物中, 尽管应用和称谓不尽相同, 考察的介质各有侧重, 模型和电极形状也有所差异, 但原理和图像重构算法都基本类似, 都是为了揭示稳定电流场中电阻抗的变化, 所以都可以归纳到 EIT 技术的研究范畴。

由于 EIT 可以从远端传感器获得的数据得到不可到达区域内的精确定量信息, 可以实现非侵入甚至可以通过电磁感应进行非接触测量, 所以具有很好的安全性能。另外, 系统结构简单、价格低廉, 可以在许多领域得到应用。在工业中, 利用不同介质的电阻、电容特性进行两相流和多相流检测, 可用于监测气液容器和输送管路中的混合体分布; 在地质地理测量中, 在表面或钻孔设置电极用来定位阻抗异常点。利用泥土、岩石、水源、石油、矿藏的阻抗差异特性成像, 可进行地下勘探、地质结构研究, 用来确定地下水、地下天然气及石油分布, 成为物探技术的前沿课题之一; 在军事上可用于地下测量、排除地雷等。德国科学家对树木进行断层成像, 检查树干中坏死部分, 诊断树木疾病, 避免在恶劣天气中折断伤人, 也可用来评定木材的优劣。尽管 EIT 技术出现的时间很短, 但在许多领域都具有广阔的应用前景, 受到广泛的重视和研究。

因为生物组织表现出阻性、容性和感性特征, 电阻抗随频率变化而产生很大变化, 不同组织的阻抗特性差别显著, 特别是器官生理活动 (如呼吸、心脏搏动) 的不同时期阻抗也发生显著变化。此外, 生物组织在不同的生理状态其阻抗差异也很大。所以利用 EIT 对生物组织进行成像, 不仅可以区分不同的组织结构, 而且可以对组织阻抗功能特性成像, 对于医学研究和疾病诊断具有特别重要的意义。

二、生物医学电阻抗成像的基本原理及数学描述

(一) 电阻抗成像的基本原理

EIT 是基于生物组织电阻抗特性的新的功能成像技术, 基本原理是在被测目标组织表面施加安全激励电流 (电压) 信号, 同时测量目标组织表面的电压 (电流) 信号, 由所测的信号采用图像重构算法得到被检测组织内的阻抗 (或阻抗变化) 图像分布, 其原理框图如图 1-1 所示。

也可以用下例来说明 EIT 的基本原理。设有一个二维的具有均匀电导率的长方形导体, 导体的 4 个表面是完全绝缘的, 其上下两端接有两个片电极 e_1 和 e_2 , 在 e_1 和 e_2 之间接有一个恒流激励源 I , 则导体块中电流密度是均匀分布的, 且电位线平行于 x 轴, 即电流线与电位线是正交的, 如图 1-2 所示。

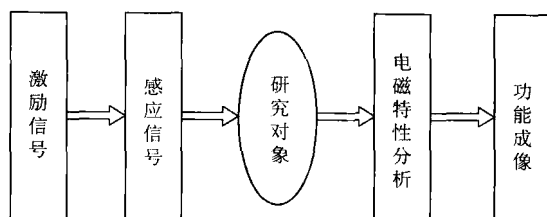


图 1-1 EIT 技术的基本原理框图

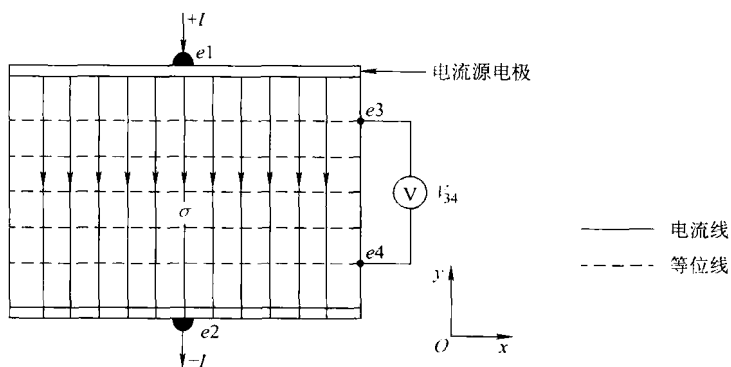


图 1-2 均匀电导率的长方形导体电位线分布示意图

设导体的电导率为 σ ，可通过在导体左右两边界上放置两个电极 $e3$ 和 $e4$ ，并用一个具有高输入阻抗的电压表测量 $e3$ 、 $e4$ 两端的电压值，两电极间的电阻可按下式计算得到

$$R_{34} = \frac{V_{34}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (1-1)$$

式中， L 是两个电极之间的距离； A 是导体横截面面积。

当在上述长方形导体中放置一个良导体时，则电流线和电位线都将发生扭曲，如图 1-3a 所示。从边界电极 $e3$ 、 $e4$ 看，则表现为 $e3$ 、 $e4$ 之间的电阻减小，由于是恒流激励，故可测得 $e3$ 、 $e4$ 之间的电压减小。而当放置的是一种绝缘体时，则表现为 $e3$ 、 $e4$ 之间的电阻增大， $e3$ 、 $e4$ 两点之间测到的电压会增大，如图 1-3b 所示。利用欧姆定律，可得到 $e3$ 、 $e4$ 之间的电阻为

当插入良导体时

$$R'_{34} = \frac{V'_{34}}{I} = \frac{L}{\sigma' A} \quad (1-2)$$

当插入绝缘体时

$$R''_{34} = \frac{V''_{34}}{I} = \frac{L}{\sigma'' A} \quad (1-3)$$