

电阻抗断层成像技术原理及其在肺部疾病诊疗中的应用研究进展

邹瞿超, 金锦江, 叶建平, 王立坚, 王以文, 黄天海, 张鞠成, 褚永华

引用本文:

邹瞿超, 金锦江, 叶建平, 等. 电阻抗断层成像技术原理及其在肺部疾病诊疗中的应用研究进展[J]. 中国医疗器械杂志, 2025, 49(1): 35–41.

ZOU Quchao, JIN Jinjiang, YE Jianping, et al. Advances in Principle of Electrical Impedance Tomography and Its Application in Diagnosis and Treatment of Pulmonary Diseases[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2025, 49(1): 35–41.

<https://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240361>

收稿日期: 2024-07-07

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物电阻抗测量方法进展及应用

Progress and Application of Bioelectrical Impedance Measurement Methods

中国医疗器械杂志. 2021, 45(3): 296–300 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.03.014>

基于CORDIC算法的血管内超声成像系统数字坐标转换的FPGA实现

FPGA Implementation of Digital Coordinate Conversion of Intravascular Ultrasound Imaging System Based on CORDIC Algorithm

中国医疗器械杂志. 2022, 46(5): 485–489 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2022.05.003>

双能CT虚拟单能量图像在放疗计划系统中的应用研究

Application of Virtual Monochromatic Images Reconstructed by Dual-energy Computed Tomography in Radiotherapy Treatment Planning System

中国医疗器械杂志. 2021, 45(5): 568–572 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.05.021>

放射治疗用CBCT图像引导系统成像性能评价标准研究

Analysis of Imaging Performance Standards of CBCT X-IGRT System Used in Radiotherapy

中国医疗器械杂志. 2023, 47(6): 608–611 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2023.06.004>

基于Bloch-Siebert Shift的7.0 T磁共振电特性成像研究

Research on 7.0 T Magnetic Resonance Based Electrical Properties Tomography Based on Bloch-Siebert Shift

中国医疗器械杂志. 2020, 44(3): 189–193 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2020.03.001>

磁共振弥散张量成像和纤维束密度成像在中枢神经系统的研究进展

Research Development of MR Diffusion Tensor Imaging and Track Density Imaging in Central Nervous System

中国医疗器械杂志. 2019, 43(5): 352–354, 368 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2019.05.011>



微信公众号



网站二维码

文章编号: 1671-7104(2025)01-0035-07

电阻抗断层成像技术原理及其在肺部疾病诊疗中的应用研究进展

【作者】 邹瞿超, 金锦江, 叶建平, 王立坚, 王以文, 黄天海, 张鞠成, 褚永华
浙江大学医学院附属第二医院 临床医学工程部, 杭州市, 310009

【摘要】 电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 技术通过电极阵列施加安全的激励电流, 依次测量阵列相邻电极对的边界电压, 再通过重建算法重构组织的全部或部分区域的阻抗分布, 从而实现结构和功能成像。肺部EIT技术具有连续性、无辐射、非侵入性等特点, 可用于危重症患者肺部的动态实时监测。该文介绍了肺部EIT技术的基本原理, 从硬件系统、成像算法和临床应用 (包括肺通气、肺灌注和肺功能评估) 等方面分析了该技术的研究进展和存在的问题, 并对其发展方向进行了探讨, 为拓展肺部EIT的临床应用提供了思路。

【关键词】 电阻抗断层成像; 医学成像; 硬件系统; 图像重建算法

【中图分类号】 R318; R56

【文献标志码】 A

doi: 10.12455/j.issn.1671-7104.240361

Advances in Principle of Electrical Impedance Tomography and Its Application in Diagnosis and Treatment of Pulmonary Diseases

【Authors】 ZOU Quchao, JIN Jinjiang, YE Jianping, WANG Lijian, WANG Yiwen, HUANG Tianhai, ZHANG Jucheng, CHU Yonghua

Department of Clinical Medical Engineering, The Second Affiliated Hospital of Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou, 310009

【Abstract】 Electrical impedance tomography (EIT) is a technique that uses an array of electrodes to deliver safe stimulating currents and measures the boundary voltages between adjacent electrode pairs in the array in sequence. Subsequently, it reconstructs the impedance distribution in all or part of the tissue using reconstruction algorithms to achieve structural and functional imaging. Lung EIT technology features continuity, being radiation-free and non-invasive, and it can be used for real-time dynamic monitoring of the lungs in critically ill patients. This paper introduces the basic principles of lung EIT, analyzes the research progress and existing problems of the technology from the perspectives of hardware systems, imaging algorithms, and clinical applications (such as lung ventilation, lung perfusion, and lung function assessment), and discusses the development direction to provide ideas for expanding the clinical application of lung EIT.

【Key words】 electrical impedance tomography, medical imaging, hardware system, image reconstruction algorithm

0 引言

生物医学成像技术的发展使医生在疾病诊断过程中能够获取更为详实、准确的病理结构信息, 极大地促进了临床诊断水平的提升。尽管传统医学成像技术的理论和设备取得了深入的发展, 但是磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)、计算

机断层扫描成像 (computed tomography, CT) 等设备体积庞大、使用成本高, 且X线设备具备一定的辐射危害, 无法长期在床边开展成像; 超声 (ultrasound, US) 成像虽然使用方便, 具备无创、便携的特性, 但对操作者资质有较高要求, 且难以实现动态实时监测^[1-2]。电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 通过重建内部阻抗分布实现组织结构和功能的成像, 具有无创、实时、连续、无辐射等优点, 可以在床边方便地实现长时间的动态可视化监测, 尤其适用于危重症患者, 目

收稿日期: 2024-07-07

基金项目: 浙江省科技厅领雁计划项目 (2022C03111)

作者简介: 邹瞿超, E-mail: cnqczou@zju.edu.cn

通信作者: 褚永华, E-mail: 2190051@zju.edu.cn

前该技术已在肺部疾病、心脑血管疾病的诊疗等领域得到了快速发展和应用,成为传统影像技术的有益补充^[3]。

肺部EIT应用于临床评估,从理论提出到开展临床研究再到实现商业化成熟应用,已有近40年的发展史。该技术通过环绕待测者胸部的一条电极阵列带,按特定规律连续发射激励信号,再根据阻抗波在穿透胸腔内不同组织时的衰减程度进行图像重建,可对肺组织的不同区域进行分层或分象限的连续监测,从而实现不同状态下肺全部或局部的肺灌注、肺通气和肺功能情况的实时评估^[4]。随着科技的进步,EIT技术日益成熟。信号采集系统从单频发展到多频,电极阵列从8电极约束带发展到更适应人体结构的柔性32电极约束带,图像质量也随着深度学习算法的应用得到进一步提升,整体逐步从二维功能成像向三维功能成像发展。

近年来,EIT作为一种新兴的医学成像技术,在肺部疾病的诊疗中发挥着越来越重要的作用。下面从EIT技术的基本原理出发,就肺部EIT系统的硬件发展、重建算法改进和临床应用等展开综述,对EIT技术的应用效果和发展方向进行分析与讨论。

1 肺部EIT基本原理

1.1 肺部阻抗成像原理及采集方式

EIT是一种基于不同生理和病理状态下生物组织、器官的电阻抗值或曲线频谱变化实现结构重构与状态监测的无创生物医学成像技术。人体由不同种类的组织和器官构成,而生物组织由脂质、水、电解质等特定成分组成。其中,细胞内液和细胞外液的导电特性与水接近,可等效成导体,细胞膜同时具备绝缘特性和一定的导电特性,可将细胞整体看作电容器件,器官腔体内的气体起到阻值可变的电阻作用,因此组织细胞、细胞外液、组织器官腔体结构等的状态差异和变化会相应地导致电阻抗值不同^[5]。基于以上特性,通过对人体组织施加特定频率的安全交流电压或电流激励(安全电流幅值一般小于5 mA),采集由激励引起的相应电阻抗变化,即可通过计算机图像重建技术获取特定人体区域的电阻抗分布情况,从而实现对人体组织、器官生理和病理状态的观测^[6]。

人体肺部的气体交换的中枢,其中空气含量占比为80%~85%。在肺部运作过程中,腔体空气含量和血液灌注容量的变化引起的电阻抗改变尤为明显,可方便地区分肺部通气区域(高阻抗)和非通

气区域(低阻抗)^[7]。采集肺部阻抗时,通常于胸部第四或第五肋间隙环绕人体放置一圈电极带,经电极依次输入微弱的激励电流,并按序扫描阵列相邻电极的电压,从而获取边界电压序列。从该电压序列中提取与人体组织或器官的生理、病理状态相关的电阻抗信息,如电导、阻抗、介电常数等。再通过算法将电阻抗的分布及变化情况重构为数字矩阵,最终生成阻抗断层通气图,从而完成肺部的EIT功能成像。上述操作可实现呼吸运动过程中肺部通气状况及其动态变化的实时监测^[3,6-9]。

1.2 肺部阻抗成像主要应用指标

临床使用时,可以通过不同的功能成像算法分析EIT图像获取特定的量化指标,从而更好地表征各肺部区域的通气状况。肺部区域的通气状况按照受重力因素影响程度的不同,可分为重力依赖区(背侧)和非重力依赖区(腹侧)。通过调整感兴趣区域(region of interest, ROI)的参数,可定制相应区域的图像位置和大小。沿腹背侧方向通常分为ROI1区~ROI4区4层,特定ROI内阻抗变化的总和可以反映区域通气及灌注分布情况^[3]。同时,通气中心(center of ventilation, COV)考量从腹侧到背侧的通气分布趋势的可靠指标。COV值越高表明通气向背侧偏移越大,常用来标注重力依赖区的通气状况^[10]。而总不均一指数(global inhomogeneity index, GI)主要表征肺部各区域通气分布的均匀程度,GI值与通气差异呈正相关,因此在调整EIT参数时应确保GI保持在较低水平^[11]。过度扩张和肺不张或塌陷也是重要的EIT评价指标,主要通过在每个呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)图像上标记顺应性降低的像素点的位置及分布完成定量评估^[12]。

2 肺部EIT系统的典型结构及算法

2.1 肺部EIT系统的典型硬件构成

EIT系统的硬件采集系统是实现高精度阻抗图像重建的阻抗信号来源,采集的精度和速度决定了后续图像处理的分辨率。EIT系统的硬件部分一般由激励信号源、包含电极阵列的柔性电极带、信号采集器及控制器(含通信电路)组成,EIT系统的典型硬件结构如图1所示。其中,激励信号源的性能是决定整个系统精度的基础,对信号源的精度、稳定性、动态范围及信噪比都有较高的要求,通常在数字信号处理(digital signal processing, DSP)芯片调制频率、相位、电流大小等参数后,由直接数

字式频率合成器 (direct digital synthesizer, DDS) 发出正弦电压信号, 再通过电压控制电流源 (voltage controlled current source, VCCS) 将其转换为激励电流, 并经多路开关将信号施加于电极之上, 从而在相邻电极之间产生边界电压^[13]。柔性电极带作为整个系统的前端传感器, 其包含的电极数量与采集的信号数量、测量时间、图像重建难度呈正相关, 当前较为常见的为16/32电极系统, 重复使用的电极带通常在皮革、织物约束带的内侧面定制金属电极来提高耐用性, 而基于新兴柔性电子技术制作的一次性电极阵列能够达到更好的皮肤贴合度, 以减少连接方式、环境等因素的干扰。信号采集器采用相邻激励、相邻测量的方式, 由开关阵列轮流选择不同的测量电极对采集边界电压, 经信号放大和相敏解调后, 模数转换为数字信号。通信电路通过有线连接或无线连接 (如蓝牙、Wi-Fi、5G等) 技术将转换后的数字信号实时传递给图像处理终端 (如PC机等), 用于图像重建和分析。

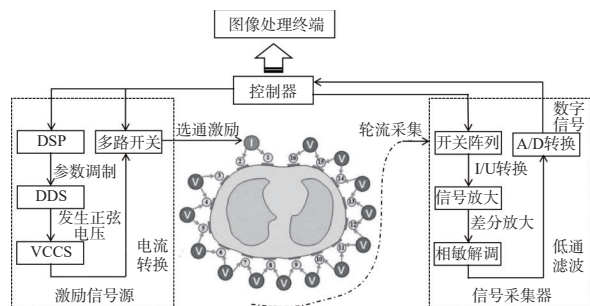


图1 EIT系统的典型硬件结构

Fig.1 Typical hardware structure of EIT system

随着电子技术的革新和发展, 肺部EIT系统得到了广泛的研究和应用。英国的WU等^[9]提出的穿戴式电阻抗成像系统设计有32个有源电极, 并通过柔性电路印刷技术将其集成在一次性织物内, 采用2个并行数据采集通道, 帧率可达107 Hz, 能够同时进行肺呼吸和心率等信号的监测。GOHARIAN等^[14]利用DSP构建了包含48个电极的3D多频电阻抗系统, 该系统通过基于相敏解调的幅值及相位提取技术, 实现了激励频率在0.1~125 kHz可调。李芳等^[15]开发了一种面向肺功能检测的便携式电阻抗成像系统, 该系统不依赖PC平台即可完成结果读取和人机交互操作, 并通过人体肺呼吸成像实验验证了其动态成像功能。结果表明, 该系统整体信噪比较低, 具有较好的一致性和重复性。陈奇等^[16]提出了一种基于EIT传感器的机械通气控制系统, 通过建模、仿真和实验平台的设计, 验证了EIT图像作为

机械通气过程控制参数的可行性。上述系统从穿戴式特性、便携性、实时观测功能和设备联动能力等方面进行了改良, 进一步拓展了EIT系统在肺部疾病监测领域的应用场景。

近年来, 已有商用EIT系统在急危重症领域得到应用和推广。最成熟的商用EIT设备之一为德尔格公司的Pulmovista 500, 最高帧率可达50 Hz, 配套16个电极的电极带应用EIT技术连续生成肺功能的横截面图像, 实现功能性EIT。多个国内外团队利用该设备对术中、急性呼吸窘迫综合征 (acute respiratory distress syndrome, ARDS) 等机械通气的患者进行PEEP滴定, 为患者提供最佳PEEP水平, 并验证其使用效果^[17-18]。同时, 国内相关EIT产品依托高校的技术转化也得到了快速发展, 如北京华睿博视医学影像技术有限公司的Infivision ET1000、杭州永川科技有限公司的EC-100、江苏济纶医工智能科技有限公司的1000型等, 这些产品的发展有利于降低使用成本, 推动EIT技术的进一步普及。此外, 迈瑞 (SV900)、安保 (VK600) 等主要国产呼吸机品牌推出了搭载EIT模块的呼吸机, 进一步节省床旁空间, 其通过可视化通气技术同屏显示肺部影像与通气数据, 实现PEEP自动滴定, 改善患者肺部通气及氧合情况。

2.2 肺部EIT图像的主要重建算法

EIT 图像重建算法实质是对逆问题的求解过程, 即由已知的边界电压、电流和敏感矩阵等信息求测场域内的电阻抗分布。EIT图像重建方法按路径不同, 分为绝对EIT和差分EIT^[19]。绝对EIT是指直接使用测得的边界电压或电流数据进行图像重建, 即直接求解逆问题。这种方法虽然具有易于实现、成本较低的优势, 但由于肺部结构具有不规则性和复杂性, 测得的边界电压与肺部电导率分布呈非线性关系, 而且即使微小的噪声扰动也会造成解的倍数变化, 导致精度较差。差分EIT是指利用不同时间点测得的数据进行差分图像重建, 在电导率变化分布的基础上获得胸腔内部不同组织和器官的结构信息与阻抗信息, 从而完成EIT图像重建。相比绝对EIT, 差分EIT的误差更小, 稳定性更好, 但对数据处理能力的要求较高, 依赖性能更强的软硬件系统。

相对于逆问题, 由域内电阻抗分布求其内部的电压和电流分布, 这个过程称为EIT的正问题, 这是解决 EIT逆问题的基础^[20]。当前最具普适性的图像重建方法是正则化方法, 它主要通过数值模拟方

法求解电阻抗分布,以降低逆问题的欠定性、非线性和病态性,再通过重建算法迭代更新电阻抗分布,从而提高计算精度和分辨率,得到更接近真实情况的阻抗分布^[21]。近年来,越来越多的团队试图将电导率重构问题转化为形状重构问题,提出了多种基于形状的重建算法。其中,较有代表性的是参数化水平集(parametric level set, PLS)方法。该方法将图像重建问题表述为图形重建问题,能够显著减少未知数的总数,从而提升计算效率和建模误差容错性,并提高图像质量^[22-23]。随着深度学习理论的不断成熟与应用,深度学习算法在特征表达和学习能力方面的优势得到了越来越多的验证。通过选择有针对性、高质量、多样化的训练样本,深度学习算法可以自动学习得到边界电压与区域内电导率分布之间的映射关系,更好地完成待测区域边界电压与肺部电导率分布之间的非线性关系建模,从而提高图像重建的速度和质量,解决EIT空间分辨率不高的问题^[20]。

3 面向临床应用的肺部EIT研究进展

3.1 肺通气检测

人体在同一位置测得的胸部区域阻抗值会随着通气和血流的改变而改变,其中一个呼吸周期内肺容量的变化会使阻抗值增加约300%,因此肺电阻抗的波动主要与潮气量的变化有关^[24]。EIT技术能够通过监测整个呼吸周期内的潮气阻抗变化(tidal impedance variation, TIV)和呼气末肺阻抗(end-expiratory lung impedance, EELI)可视化监测肺通气,并可按需个性化制定ROI以获得通气的局部分布,实现对肺容积变化的评估^[7]。因此,EIT技术可辅助临床医师在ARDS等肺损伤疾病的压力支持/辅助通气过程中动态监测患者肺通气状况的变化,针对性地调整呼吸机参数或模式,及早完成撤机,并实时监控机械通气相关并发症的发生风险。HE等^[6]借助EIT技术对30例ARDS患者或ARDS高风险患者的肺通气情况进行了监测,研究发现适当的高PEEP会使肺复张性较好的患者的肺通气分布更均匀,使肺复张性差的患者肺部过度膨胀,出现更多的分流,这表明EIT能够对PEEP值的滴定发挥辅助作用。PAVLOVSKY等^[25]应用EIT系统研究了PEEP对于ARDS的治疗机制及效果,发现非重力依赖区的无效腔通气和重力依赖区的肺内分流的消减能够在一定程度上改善区域肺通气与血流比例失调。

自主呼吸试验(spontaneous breathing trial, SBT)常用于评估机械通气患者是否符合脱机条件,从而缩短患者有创机械通气时间,降低病死率,但仍然有部分患者存在二次气管插管的风险^[26]。有研究使用EIT实时可视化和量化需延长脱机时间(定义为脱机过程至少经历3次SBT实验以及 ≥ 7 d机械通气)的患者SBT前后的空间通气分布,结果显示,如果避免让基线GI指数 $>41.5\%$ 的患者进行SBT试验,可减少87.5%的SBT失败率。虽然EIT在该应用中的特异性不高,但仍可为临床决策提供参考^[25]。

复张塌陷的肺泡有助于改善氧合,使肺通气更加均匀,从而降低呼吸机相关性肺损伤,改善换气和部分通气功能。BOLES等^[26]应用EIT观察了经鼻高流量氧疗(high-flow nasal cannula, HFNC)对12例急性低氧性呼吸衰竭患者的肺非重力依赖区通气及氧合的改善情况,结果表明,当流量大于60 mL/min时,患者的非重力依赖区出现了肺通气增加,证明输送高流量气体可以保证呼气末肺泡复张。PERIER等^[27]通过EIT观察了9例机械通气的新型冠状病毒感染(corona virus disease 2019, COVID-19)患者俯卧位3 h后的肺通气和血流情况,发现其与传统的ARDS患者俯卧位效果相似,背侧通气增加,表明俯卧位这种姿势可以复张患者肺部在EIT显示重力依赖区的肺泡,并改善肺部气体分布。EIT技术在动态可视化监测肺复张过程中区域通气情况的同时,还可以监测局部肺通气和顺应性的变化,从而评估肺复张过程中存在的局部过度膨胀和塌陷,有潜力成为肺复张的准确评估工具^[27]。

3.2 肺灌注评估

肺灌注显像用于观察肺部血液灌注和充盈情况,主要用于诊断肺栓塞、肺动脉高压等肺部疾病、心血管疾病。EIT主要通过监测肺血流脉动引起的区域阻抗变化实现肺灌注评估。肺血流脉动主要与心脏搏动相关,当右心室收缩时,肺动脉压力升高,肺部血液充盈,使相关区域阻抗值下降;当静脉血开始向左心房回流时,肺部毛细血管中的血容量逐渐减少,引起阻抗值升高。心脏的舒张和收缩引起的阻抗值变化约为3%,其幅度远低于肺通气引起的变化,实际应用时需要进行信号分离以降低肺通气的干扰,主要方法有周期性肺血管搏动法和注射高导电造影剂法^[28]。

周期性肺血管搏动法通过去除呼吸相关的EIT信号,获取与心脏搏动相关的信号变化,从而

评估肺灌注情况。主要的呼吸去除方法包括主成分分析 (principal component analysis, PCA)、心电图控 (electrocardiogram gating, ECGG)、呼吸屏气 (respiratory pause, RP)、频域滤波 (frequency domain filtering, FDF) 等^[29]。周期性肺血管搏动法是对心脏搏动引起的肺部血容量变化的监测, 而不是对肺部血流情况的真实反映, 虽然其具有无创、可连续监测等优点, 但是血管张力的变化、气体含量的同步变化、气道压力和肺小血管的扩张等因素会对心脏搏动信号与肺灌注的相关性产生影响, 使结果往往不够准确^[28-29]。SAFAEE等^[30]对21例肺动脉高压患者及30名健康对照者进行了 EIT 监测, 发现肺动脉高压患者的肺灌注阻抗变化信号更低, 证实了 EIT 在监测肺动脉高压对肺部血流灌注的影响过程中具有操作便利性和无创等优势。MAURI等^[31]利用 EIT 系统对10例行气管插管的 COVID-19 重症患者进行了肺灌注状况监测, 验证了 EIT 在识别肺灌注缺损和肺血管狭窄等方面的可行性。

注射高导电造影剂法是目前临床上主要使用的方法, 即在患者屏气 (或呼吸暂停) 时通过中心静脉快速注射高电导率造影剂 (如高渗盐水), 监测不同区域胸腔电阻抗的变化来反映局部肺灌注情况^[5]。该方法可通过注射的高渗盐水, 放大血液灌注过程中的液体流动引起的阻抗变化, 能够在一定程度上直接反映胸腔内血流量的灌注分布情况, 但存在放置中心静脉导管时的感染风险、短暂屏气时的呼吸暂停风险以及血液渗透压改变引起的溶血风险^[28]。WANG等^[32]对行腹腔镜下根治性膀胱切除术和回肠代输尿管术后的老年男性膀胱癌和前列腺癌患者, 进行 EIT 肺部监测, 在第6天时发现其右肺动脉多侧支均出现了血栓栓塞, 确诊后给予了相应的溶栓治疗。TINGAY等^[33]报道了1例出生13天的新生儿病例, 其右肺正常, 左肺存在血管大面积栓塞和肺坏死的情况, 与 EIT 显示的左肺通气及血流完全缺损的结果相符, 从而证明了该技术在新生儿肺血流监测方面的应用价值。

3.3 肺功能检查

肺部组织成分和结构的病理改变 (如胸腔积液、肺纤维化、肺水肿等导致的水、脂类、电解质含量的变化) 会引起生物阻抗的变化, 因此 EIT 图像能够直观反映肺部组织的功能异常, 从而对肺功能进行监测和评价^[4]。区别于常规的肺功能检查, EIT 可以基于区域肺通气分布来分析和检查残气量和用力肺活量 (forced vital capacity, FVC),

从而评估肺功能参数, 实现区域性肺功能测定。床边持续的 EIT 肺功能监测, 能够可视化、实时地评估肺部治疗操作对慢性肺部病变状态的影响, 有助于评价支气管镜灌洗、吸痰、雾化等治疗方式的效果和意义^[3]。VOGT等^[34]通过 EIT 设备在线监测支气管舒张剂使用前后慢阻肺患者局部肺功能的差异, 结果显示总第一秒用力呼气量 (forced expiratory volume in 1 second, FEV1)/用力肺活量 (forced vital capacity, FVC) 变化较小, 而区域性的 FEV1/FVC 变化较为显著, 有明显改善。

液气胸是指胸膜腔内有液体、气体异常积聚, 通常由胸腔内心脏、肺等重要器官的结构性损伤引起, 对该症状的早期快速识别有助于提高救治效率、降低患者死亡率^[35]。YANG等^[36]利用回顾性分析方法对机械通气患者的 EIT 监测数据进行了梳理, 发现气胸患者的腹侧通气缺损, 水平腹侧通气指数存在升高的现象, 证明了 EIT 在监测机械通气过程的同时能够有效识别气胸。KUNST等^[37]选择6例肺气肿患者作为实验组, 7位健康人员作为对照组, 发现实验组的心脏相关阻抗变化相较于对照组显著偏低。实验结果表明, EIT 对低氧性肺血管舒张的监测具有较高的灵敏度, 有助于对氧疗应用于肺气肿患者的疗效评价。此外, EIT 还可用于监测 ARDS 患者的血管外肺水 (extravascular lungwater, EVLW), 为肺水肿的液体治疗与管理提供参考^[38]。

4 结语

经过多年的发展, EIT 已经成为一种理论可行性高且相对成熟的成像手段, 具备床旁、无创、无辐射、动态成像等特点, 与 CT、MR、US 等主流成像手段相比, 具有更好的便携性和更低的成本, 在生物医学领域得到了较为广泛的应用。然而, 当前 EIT 多为二维图像重建的断层成像, 尚未有成熟的三维实时成像设备, 不能反映全局肺通气及血流情况; 检测结果易受外界环境或传感器佩戴情况的干扰, 个体差异较大, 在 PEEP 滴定等应用中的方法选择尚缺乏统一的标准。同时, EIT 的空间分辨率不足, 肺组织深部的监测效果不够理想, 因此仍需开展更深入的临床研究来推动 EIT 技术的进一步发展。

本文从成像原理、系统开发、算法演进及临床应用等方面入手, 对 EIT 技术的应用现状展开了探讨。随着硬件与算法的不断发展, EIT 技术凭借其便携、无损伤、无辐射、可视化及非侵入性等优

势,可向三维成像算法的优化、与CT等其他技术的联合成像及心肺联合成像等方向发力,进一步拓展其在个性化诊疗、应急救援、居家医疗等场景中的应用。此外,通过与人工智能等新兴技术的融合,EIT技术有望在生物医学成像领域实现更加广泛的发展。

参考文献

- [1] KOHLI P, KELLY V J, KEHL E G, et al. Perfusion imaging distinguishes exercise pulmonary arterial hypertension at rest[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2019, 199(11): 1438-1441.
- [2] FORONDA F A K, FERNANDES L R, LAHOZ A L C, et al. Electrical impedance tomography clues to detect pulmonary thrombosis in a teenager with COVID-19[J]. *Pediatr Radiol*, 2022, 52(1): 144-147.
- [3] 田翠杰,王海播,张文平,等.电阻抗断层成像技术在呼吸系统疾病中的临床应用[J]. *中国呼吸与危重监护杂志*, 2020, 19(6): 617-620.
- [4] LOBO B, HERMOSA C, ABELLA A, et al. Electrical impedance tomography[J]. *Ann Transl Med*, 2018, 6(2): 26.
- [5] 中国卫生信息与健康医疗大数据学会重症医学分会标准委员会,北京肿瘤学会重症医学专业委员会,中国重症肺电阻抗工作组.肺电阻抗成像技术在重症呼吸管理中的临床应用中国专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(9): 615-628.
- [6] HE H, CHI Y, YANG Y. Early individualized positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography in acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled clinical trial[J]. *Crit Care*, 2021, 25(1): 230.
- [7] 张红玲,邹晓静,吴永然,等.电阻抗断层成像技术在成年人急性呼吸窘迫综合征中的应用[J]. *国际麻醉学与复苏杂志*, 2023, 44(12): 1328-1334.
- [8] MACIEJEWSKI D, PUTOWSKI Z, CZOK M, et al. Electrical impedance tomography as a tool for monitoring mechanical ventilation. An introduction to the technique[J]. *Adv Med Sci*, 2021, 66(2): 388-395.
- [9] WU Y, CHEN B, LIU K, et al. Shape reconstruction with multiphase conductivity for electrical impedance tomography using improved convolutional neural network method[J]. *IEEE Sensors J*, 2021, 21(7): 9277-9287.
- [10] SHONO A, KOTANI T. Clinical implication of monitoring regional ventilation using electrical impedance tomography[J]. *J Intensive Care*, 2019, 7: 4.
- [11] ZHAO Z, MÖLLER K, STEINMANN D, et al. Evaluation of an electrical impedance tomography-based global inhomogeneity index for pulmonary ventilation distribution[J]. *Intensive Care Med*, 2009, 35(11): 1900-1906.
- [12] WALSH B K, SMALLWOOD C D. Electrical impedance tomography during mechanical ventilation[J]. *Respir Care*, 2016, 61(10): 1417-1424.
- [13] 杨永政.呼吸过程三维电阻抗系统研究[D].天津:天津科技大学,2016.
- [14] GOHARIAN M, SOLEIMANI M. A DSP based multi-frequency 3D electrical impedance tomography system[J]. *Ann Biomed Eng*, 2008, 36(9): 1594-1603.
- [15] 李芳,方海东,吴阳,等.面向肺功能检测的便携式电阻抗成像系统开发[J]. *机械制造与自动化*, 2022, 51(5): 239-242.
- [16] 陈奇,铁磊,刘凯,等.基于肺部电阻抗成像的机械通气控制系统[J]. *机械设计与制造工程*, 2022, 51(9): 105-109.
- [17] 徐佳世. EIT监测在妇科腔镜手术患者PEEP选择中的应用[D].上海:上海交通大学,2019.
- [18] JONGH S A M D, HEINES S, JONGH F D D, et al. Regional peak flow as a novel approach to assess regional pulmonary mechanics by electrical impedance tomography: an observational validation study[J]. *Ann Transl Med*, 2023, 11(6): 253.
- [19] HEIKKINEN L M, KOURUNEN J, SAVOLAINEN T, et al. Real time three-dimensional electrical impedance tomography applied in multiphase flow imaging[J]. *Meas Sci Technol*, 2006, 17(8): 2083-2087.
- [20] 吴凯,洗锦炽,王涛.电阻抗断层成像算法应用综述[J]. *中国医学物理学杂志*, 2023, 40(7): 847-856.
- [21] 徐灿华,董秀珍.生物电阻抗断层成像技术及其临床研究进展[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3738-3745.
- [22] LIU D, GU D P, SMYL D, et al. Shape-driven EIT reconstruction using Fourier representations[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(2): 481-490.
- [23] 李志伟,于瑶,吴阳,等.电阻抗成像技术在肺功能检测的研究进展[J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(1): 1-9.
- [24] BARBER D C. A review of image reconstruction techniques for electrical impedance tomography[J]. *Med Phys*, 1989, 16(2): 162-169.
- [25] PAVLOVSKY B, PESENTI A, SPINELLI E, et al. Effects of PEEP on regional ventilation-perfusion mismatch in the acute respiratory distress syndrome[J]. *Crit Care*, 2022, 26(1): 211.
- [26] BOLES J M, BION J, CONNORS A, et al. Weaning from mechanical ventilation[J]. *Eur Respir J*, 2007, 29(5): 1033-1056.
- [27] PERIER F, TUFFET S, MARAFFI T, et al. Effect of positive end-expiratory pressure and proning on ventilation and perfusion in COVID-19 acute respiratory distress syndrome[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(12): 1713-1717.
- [28] GRANT C A, FRASER J F, DUNSTER K R, et al. The assessment of regional lung mechanics with electrical impedance tomography: a pilot study during recruitment manoeuvres[J]. *Intensive Care Med*, 2009, 35(1): 166-170.
- [29] NGUYEN D T, JIN C, THIAGALINGAM A, et al. A review on electrical impedance tomography for pulmonary perfusion imaging[J]. *Physiol Meas*, 2012,

- 33(5): 695-706.
- [30] SAFAEI F B, ARAUJO M C, DE S S, et al. Bedside monitoring of lung perfusion by electrical impedance tomography in the time of COVID-19[J]. *Br J Anaesth*, 2020, 125(5): e434-e436.
- [31] MAURI T, SPINELLI E, SCOTTI E, et al. Potential for lung recruitment and ventilation-perfusion mismatch in patients with the acute respiratory distress syndrome from coronavirus disease 2019[J]. *Crit Care Med*, 2020, 48(8): 1129-1134.
- [32] WANG X, ZHAO H, CUI N. The role of electrical impedance tomography for management of high-risk pulmonary embolism in a postoperative patient[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8: 773471.
- [33] TINGAY D G, WALDMANN A D, FRERICHS I, et al. Electrical impedance tomography can identify ventilation and perfusion defects: a neonatal case[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2019, 199(3): 384-386.
- [34] VOGT B, ZHAO Z, ZABEL P, et al. Regional lung response to bronchodilator reversibility testing determined by electrical impedance tomography in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2016, 311(1): L8-L19.
- [35] 齐晨, 徐杨, 易俊, 等. 电阻抗成像技术在战创伤液气胸诊断中的应用价值分析[J]. *医学研究生学报*, 2023, 7: 715-718.
- [36] YANG Y, HE H, LONG Y, et al. Bedside electrical impedance tomography in early diagnosis of pneumothorax in mechanically ventilated ICU patients - a single-center retrospective cohort study[J]. *J Clin Monit Comput*, 2023, 37(2): 629-637.
- [37] KUNST P W, VONK-NOORDEGRAAF A, HOEKSTAD O S, et al. Ventilation and perfusion imaging by electrical impedance tomography: a comparison with radionuclide scanning[J]. *Physiol Meas*, 1998, 19(4): 481-490.
- [38] 林君, 周睿, 潘盼, 等. 电阻抗断层成像技术在肺灌注中的研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2023, 40(6): 1249-1254.