

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.002

基于电阻抗成像技术的急性肺部炎症肺通气特征研究

宋雨佳¹, 李志伟², 陈庆强¹, 姚佳烽², 张瑛琪¹

(1. 河北医科大学第三医院急诊科, 河北 石家庄 050052; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 电阻抗成像技术通过检测肺通气情况, 能够有效评估急性肺部炎症患者的肺通气特征。通过分析电阻抗成像参数, 包括通气受阻区域占比、通气体积中心误差和全局通气延迟性, 可以动态监测肺通气状态。这些参数不仅揭示急性肺部炎症对通气功能的影响, 还为评估病变情况提供重要依据, 进而为临床诊治提供指导。这种无创性技术在急性肺部炎症的早期诊断和治疗管理中具有重要应用潜力。

关键词: 电阻抗成像技术; 肺部炎症; 肺通气

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0014-03

Reserch on Pulmonary Ventilation Characteristics of Acute Pulmonary Inflammation Based on Electrical Impedance Imaging

SONG Yujia¹, LI Zhiwei², CHEN Qingqiang¹, YAO Jiafeng², ZHANG Yingqi¹

(1. Emergency Department of the Third Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050052, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Electrical impedance imaging can effectively evaluate pulmonary ventilation characteristics in patients with acute pulmonary inflammation by detecting pulmonary ventilation. The parameters of electrical impedance imaging including the proportion of blocked ventilation area, the error of ventilation volume center and the global ventilation delay are analyzed for dynamical monitoring of the pulmonary ventilation statu. The parameters not only reveal the effect of acute pulmonary inflammation on ventilation function, but also provide an important basis for evaluating the lesions, giving guidance for clinical diagnosis and treatment. This non-invasive technique has important application potential in the early diagnosis and treatment management of acute pulmonary inflammation.

Keywords: electrical impedance tomography; pulmonary inflammation; pulmonary ventilation

0 引言

急性肺部炎症是感染性肺实质炎症, 是一种常见的急性呼吸道感染, 影响肺泡和远端气道, 并且是一个世界性的公共卫生问题, 在全球疾病、伤害和风险因素负担研究报告(2016年版)中指出, 肺炎是全球死亡率的主要贡献因素^[1]。肺部感染的死亡率与病情严重程度相关, 德国 CAP 监测网数据显示, 成人 CAP 患者的 30 d 病死率为 8.6%, 门诊及住院患者的病死率分别为 0.8% 和 12.2%。而多项研究结果表明, ICU 中重症 CAP 患者的 30 d 病死率达 23%~47%。2012 年我国肺炎的死亡率平均为 0.174 6‰, 随着肺炎患者年龄的增加, 其死亡率也逐渐增加^[2]。

肺部炎症是急诊科常见的感染性疾病。大多数肺部炎症患者在急诊科进行初始诊断和治疗^[3]。肺炎严重程度的评估是急诊科制定个体化治疗方案的前提。然而, 急诊科面临着患者流量大、病情复杂和工作强度高的困难和挑战, 需要临床医生在短时间内做出迅速判断。因此, 如何实现肺部炎症的床旁、快速诊断和实时监测对于减轻急诊科压力, 提高治疗效率和降低病死率则显得至关重要。

影像学检查肺部的浸润性是评估肺部炎症严重程度的重要工具。X 线胸片(chest X radiography, CXR)是急诊科诊断肺部炎症的常用方法。但是, X 线胸片诊断肺部炎症的准确率只有 65%, 有时会出现假阴性或者假阳性结果, 从而造成误诊。

基金项目: 2023 年中央引导地方科技发展基金项目(236Z7731G)

第一作者简介: 宋雨佳(1997—), 女, 满族, 河北承德人, 硕士研究生, 研究方向为电阻抗断层成像技术在急危重症领域诊治的应用, songyujia0531@163.com。

通信作者简介: 张瑛琪(1970—), 女, 达斡尔族, 内蒙古呼伦贝尔人, 教授, 硕士, 研究方向为急危重症救治, zhangyingqi@hebmu.edu.cn。

计算机断层扫描(computed tomography, CT)相较于 CXR 具有更高的灵敏度和特异性,是目前诊断肺部炎症的影像学金标准。CT 存在高辐射、高成本和便携性差的缺点,无法满足急诊科床旁监测的需求。近年来,胸部超声检查是急诊科的一种有吸引力的方法,具有易便携、准确率高的优势^[4-8]。但是床旁超声检查需要工作人员长时间接触患有呼吸道疾病的患者,增加了工作人员负担和交叉感染的风险。

电阻抗成像技术(electrical impedance tomography, EIT)是一种床旁无创、无辐射的影像学技术。EIT 实现了肺通气区域变化的连续监测和可视化评估,无需工作人员的诊断。已有文献表明 EIT 在监测肺部炎症通气分布和评估治疗后通气改善情况具有一定的可行性和研究价值^[9-10]。

本文概述了电阻抗成像技术在对肺部炎症患者监测和评估中的应用,并详细论述了监测肺部炎症患者在电阻抗成像技术相关参数的特点,可为肺部炎症的诊疗提供一定参考价值。

1 EIT 肺通气模型建立

近年来,EIT 在临床上得到了广泛的研究。EIT 是一种基于电流通过身体组织时电阻抗变化的成像技术,用于监测肺部通气状态。其原理依赖于不同组织对电流的阻抗差异。空气、肺组织、液体和血液等对电流的阻抗不同,空气的电阻抗较高,液体和肺组织的电阻抗较低。在肺部通气过程中,空气的电阻抗变化可以反映肺部的通气状态。通过测量电流在通过不同区域时的电阻抗变化,EIT 能够生成肺部通气的图像^[11]。

为了用 EIT 描述患者肺部炎症的情况,采用 EIT-1000 进行 EIT 数据的收集。将具有 16 个电极的 EIT 电极带配置在受试者的第 4—5 肋间,收集患者仰卧位下的 EIT 数据,信号稳定后记录 5 min 数据。所有 EIT 数据被用于离线重建 3D EIT 图像。使用一个 16 电极的标准人体胸腔有限元模型(standard human chest finite element model, FEM)作为 EIT 正问题模型。为了避免逆向犯罪(inverse crime),EIT 逆问题模型由 48×48×48 个立方体素网格构成。3D EIT 图像重建采用了 3D GREIT 算法,该算法已经得到了国际专家的共识^[12]。

为了降低电极数目的限制和临床噪声造成的影响,提出了一种基于胸部 CT 形状约束的 3D EIT 合成图像构建方法,如图 1 所示。首先,通过

3D Slicer 软件对受试者的 CT 序列图像进行分割,提取肺部 CT 像素矩阵并导入逆问题模型作为形状约束。然后,提取重建的 3D EIT 图像中的通气区域像素,用有限元网格中肺部 CT 的体素约束 EIT 通气区域的体素,得到 3D EIT 合成图像。肺部 CT 内的 3D EIT 图像表示有效通气区域(effective ventilation region, EVR),肺部 CT 内不包含 3D EIT 图像的区域表示通气阻塞区域(blocked ventilation region, BVR)。为了用 3D EIT 合成图像描述患者肺炎的严重程度,建立了通气受阻区域占比(percentage of ventilation blocked regions, PVBR)、通气体积中心误差(ventilation volume center error, VVCE)和全局通气延迟性(global ventilation delay index, GVDI)指标。

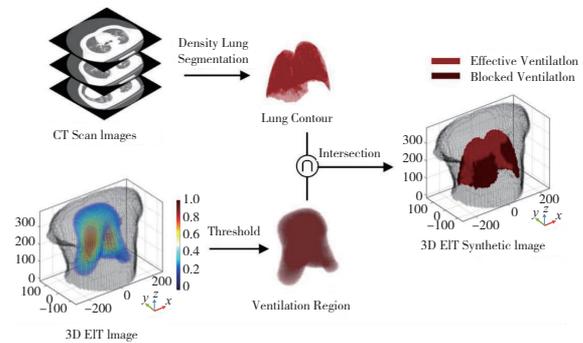


图 1 基于胸部 CT 形状约束的 3D EIT 合成图像构建方法

PVBR 计算公式为

$$M_{PVBR} = \frac{N_{BVR}}{N_{CT}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_{CT} 表示有限元网格中肺部 CT 体素的个数; N_{BVR} 表示有限元网格中 BVR 的体素个数。

VVCE 计算公式为

$$M_{VVCE} = \sqrt{(\bar{X}_{CT} - \bar{X}_{EVR})^2 + (\bar{Y}_{CT} - \bar{Y}_{EVR})^2 + (\bar{Z}_{CT} - \bar{Z}_{EVR})^2} \quad (2)$$

式中: $(\bar{X}_{CT}, \bar{Y}_{CT}, \bar{Z}_{CT})$ 表示有限元网格中肺 CT 图像中心点的坐标; $(\bar{X}_{EVR}, \bar{Y}_{EVR}, \bar{Z}_{EVR})$ 表示有限元网格中 EVR 中心点的坐标。

GVDI 计算公式为

$$M_{GVDI} = \sqrt{\frac{1}{N_{EVR}} \sum (t_{i,40\%} - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中: N_{EVR} 表示有限元网格中 EVR 的体素个数; $t_{i,40\%}$ 表示 EVR 中第 i 个体素在一个呼吸周期内从吸气开始达到最大阻抗变化的 40%所需要的时间; \bar{t} 表示 EVR 中所有体素达到最大阻抗变化的

40%所需要时间的平均值。

2 肺部感染的肺通气特征

本节是关于肺部感染患者在 EIT 监测下的相关技术参数(通气受阻区域占比、通气体积中心误差和全局通气延迟性指标)特点的论述。

2.1 通气受阻区域占比

通气受阻区域占比是指因炎症、渗出或气道阻塞等因素,肺部某部分或整体通气功能受限的比例。电阻抗成像技术(EIT)通过监测胸部电阻抗变化来反映肺组织的通气状态。在肺部炎症中,炎症会导致肺泡或支气管的阻塞,EIT 能够实时显示受阻区域并量化其占比。该参数的特点包括:1)识别局部通气障碍,EIT 可以精准显示因细菌性或病毒性肺炎导致的通气不足区域,如肺叶或肺段;2)识别炎症分布,不同类型的肺部感染会影响通气受阻区域的分布,病毒性肺炎通常影响肺泡,表现为大面积通气减少,而细菌性肺炎则可能导致特定肺段的通气受阻。该参数的临床意义是反映了感染的严重程度和范围。EIT 能够动态监测感染过程中通气状态的变化,有助于指导治疗方案的调整,评估治疗效果,预测患者恢复情况。

2.2 通气体积中心误差

通气体积中心误差是指通过 EIT 测得的肺部通气体积“中心”位置与真实通气体积中心之间的差异,反映肺通气的分布均匀性。该参数的特点包括:1)识别不均匀通气,肺部炎症常导致局部通气不足,EIT 可检测到通气中心的偏移,反映通气失衡;2)气道阻塞与炎症,严重气道阻塞会影响感染区域的通气,EIT 提供通气分布的定量信息。该参数的临床意义是通气体积中心的偏移有助于医生了解肺通气状态,尤其在肺炎和肺水肿等疾病中,为治疗方案的选择提供参考。

2.3 全局通气延迟性

全局通气延迟性是指整个肺部在气体交换时的时间延迟,反映肺部整体通气效率的变化。该参数的特点包括:1)气道炎症与通气延迟,感染导致气道黏膜肿胀和分泌物积聚,气流传导速度减慢,表现为通气延迟;2)低氧血症与通气延迟,通气延迟常伴随氧合功能下降,可能导致低氧血症,进一步加重通气延迟。全局通气延迟性是肺功能受损的重要指标,应用 EIT 监测可帮助医生判断治疗效果和患者通气恢复进度,尤其在急性肺部

感染和重症肺炎管理中具有重要价值。

3 结语

电阻抗断层成像技术(EIT)提供了一种无创、动态监测肺部通气状态的强大工具,能够详细反映肺部炎症对肺通气的影响。EIT 技术通过量化通气受阻区域占比、通气体积中心误差和全局通气延迟性,为临床提供了肺部通气功能的详细信息。这些参数的监测有助于评估炎症的范围与严重程度,精确了解肺部通气的分布状态,实时跟踪患者的病情变化,指导临床决策、评估治疗效果和预后。因此,EIT 不仅为肺部炎症的诊断提供了新的视角,也为治疗策略的个性化和精准化提供了可靠依据。

参考文献:

- [1] COLLABORATORS G 2 L R I. Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of lower respiratory infections in 195 countries, 1990–2016: a systematic analysis for the global burden of disease study 2016[J]. *The Lancet. Infectious Diseases*, 2018,18(11):1191-1210.
- [2] 中华医学会呼吸病学分会. 中国成人社区获得性肺炎诊断和治疗指南(2016年版)[J]. *中华结核和呼吸杂志*,2016,39(4):253-279.
- [3] TATAR D, SENOL G, ANAR C, et al. Markers of lower respiratory tract infections in emergency departments[J]. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*,2013,8(1):20.
- [4] SELF W H, COURTNEY D M, MCNAUGHTON C D, et al. High discordance of chest X-ray and computed tomography for detection of pulmonary opacities in ED patients: implications for diagnosing pneumonia[J]. *The American Journal of Emergency Medicine*,2013,31(2):401-405.
- [5] BHADRA A, GUPTA S, GARG N, et al. Survey on pneumonia disease detection[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2023, 12(4):84-93.
- [6] XU E, PÉREZ - TORRES D, FRAGKOU P C, et al. Nosocomial pneumonia in the era of multidrug - resistance: updates in diagnosis and management [J]. *Microorganisms*,2021,9(3):534.
- [7] LOUBET P, TUBIANA S, CLAESSENS Y E, et al. Community - acquired pneumonia in the emergency department: an algorithm to facilitate diagnosis and guide chest CT scan indication[J]. *Clinical Microbiology and Infection*,2020,26(3):382-389.
- [8] SEZGIN C, GUNALP M, GENÇ S, et al. Diagnostic value of bedside lung ultrasonography in pneumonia [J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*,2020,46(5):1189-1196.

(下转第 41 页)

3.3 预测方法对比分析

采用相同的累积模糊熵特征序列,对比 LSTM 模型、GRU 模型以及所构建 Bi-LSTM 模型的预测准确性,并且训练集和测试集保持一致。利用式(18)计算预测结果的决定系数 R^2 ;同时,为避免偶然性的结果,对 3 个模型各训练 10 次,采用 10 次预测结果的决定系数平均值进行比较,其结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,所构建的 Bi-LSTM 模型在预测准确性上有着最好的表现。

表 2 不同预测方法对比

预测方法	决定系数
GRU	0.918
LSTM	0.974
Bi-LSTM	0.988

4 结语

1) 相较于模糊熵特征,通过累积模糊熵特征来表征轴承退化过程,不仅同样可以体现出早期的轴承退化,而且弥补了模糊熵特征单调性较差的不足,可以更好地反映出劣化程度逐步加重的轴承退化过程。

2) 基于具有良好单调趋势的累积模糊熵特征,应用 Bi-LSTM 模型对轴承退化趋势进行预测,并对比 LSTM 与 GRU 模型,发现 Bi-LSTM 模型具有较高的预测准确性。

参考文献:

- [1] 汤勇. 基于 Morlet 小波与尺度空间的轴承故障诊断方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- [2] 张景超,张金敏,张淑清,等. 基于小波及非线性预测的轴承故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2012,

33(1):127-131.

- [3] 陈法法,杨勇,马婧华,等. 信息熵与优化 LS-SVM 的轴承性能退化模糊粒化预测[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4):779-787.
- [4] JIN Z Z, XIAO Y L, HE D Q, et al. Fault diagnosis of bearing based on refined piecewise composite multivariate multiscale fuzzy entropy[J]. Digital Signal Processing, 2023, 133:103884.
- [5] 陈剑,蔡坤奇,陶善勇,等. 基于 IITD 模糊熵与随机森林的滚动轴承故障诊断方法[J]. 计量学报,2021,42(6):774-779.
- [6] JIN Z Z, SUN Y Q. Bearing fault diagnosis based on VMD fuzzy entropy and improved deep belief networks[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023, 11(2):577-587.
- [7] 唐旭,徐卫晓,谭继文,等. 基于 LSTM 的滚动轴承剩余使用寿命预测[J]. 机械设计,2019,36(增刊1):117-119.
- [8] 康守强,周月,王玉静,等. 基于改进 SAE 和双向 LSTM 的滚动轴承 RUL 预测方法[J]. 自动化学报,2022,48(9):2327-2336.
- [9] CHEN W T, WANG Z Z, XIE H B, et al. Characterization of surface EMG signal based on fuzzy entropy[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(2):266-272.
- [10] DUAN L X, ZHAO F, WANG J J, et al. An integrated cumulative transformation and feature fusion approach for bearing degradation prognostics [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018:9067184.
- [11] QIU H, LEE J, LIN J, et al. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics [J]. Journal of Sound Vibration, 2006, 289(4/5):1066-1090.

收稿日期:2023-08-07

(上接第 16 页)

- [9] JIANG H Y, LI Q, YU X, et al. Ventilation improvement after pneumonia treatment evaluated with electrical impedance tomography: an observational study [J]. Physiological Measurement, 2021, 42(10):104001.
- [10] THEERAWIT P, PUKAPONG P, SUTHERASAN Y. Relationship between lung ultrasound and electrical impedance tomography as regional assessment tools during PEEP titration in acute respiratory distress syndrome caused by multi-lobe pneumonia: a pilot study [J]. Journal of Clinical Monitoring and

Computing, 2023, 37(3):889-897.

- [11] 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,等. 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.
- [12] GRYCHTOL B, MÜLLER B, ADLER A. 3D EIT image reconstruction with GREIT [J]. Physiological Measurement, 2016, 37(6):785-800.

收稿日期:2024-12-27