

电阻抗肺功能成像设备的临床应用

符园园*, 王 昊#

暨南大学附属第一医院麻醉科, 广东 广州

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年1月28日; 发布日期: 2026年2月5日

摘要

电阻抗肺功能成像(EIT)凭借其无创、实时、可床旁监测的优势,正成为呼吸与危重症医学领域的重要监测工具。它通过体表电极阻抗变化重建胸腔内通气分布图像,为肺通气动力学的区域评估提供了可视化手段。本文系统综述了EIT的技术原理及其在关键临床场景中的应用进展,包括慢阻肺/哮喘的功能评估、ARDS患者个体化通气策略(如PEEP与潮气量)优化、机械通气患者的同步性管理与脱机指导,以及肺复苏与通气-灌注失衡分析的探索。然而,EIT的临床应用仍受限于空间分辨率不足、定量标准不统一及运动伪影等问题。未来,通过改进重建算法、融合深度学习与多模态监测、推动设备便携化与标准化研究,EIT有望从辅助工具演进为常规呼吸监测与个体化治疗的核心技术,为改善重症患者预后提供关键支持。

关键词

电阻抗肺功能成像, EIT, 通气分布, 机械通气, ARDS, 临床应用

Clinical Applications of Electrical Impedance Tomography (EIT) Devices

Yuanyuan Fu*, Hao Wang#

Department of Anesthesiology, The First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou Guangdong

Received: January 3, 2026; accepted: January 28, 2026; published: February 5, 2026

Abstract

Electrical Impedance Tomography (EIT) is emerging as a crucial monitoring tool in respiratory and

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 符园园, 王昊. 电阻抗肺功能成像设备的临床应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 1135-1143.

DOI: 10.12677/acm.2026.162495

critical care medicine, owing to its non-invasive, real-time, and bedside monitoring capabilities. By reconstructing images of intra-thoracic ventilation distribution from changes in surface electrode impedance, it provides a visualization method for the regional assessment of pulmonary ventilation dynamics. This article systematically reviews the technical principles of EIT and its advancements in key clinical applications, including functional assessment in COPD/asthma, optimization of individualized ventilation strategies (such as PEEP and tidal volume) in ARDS patients, synchronization management and weaning guidance for mechanically ventilated patients, and the exploration of lung recruitment and ventilation-perfusion imbalance analysis. However, the clinical application of EIT remains limited by issues such as insufficient spatial resolution, lack of unified quantitative standards, and motion artifacts. In the future, through improvements in reconstruction algorithms, integration of deep learning and multimodal monitoring, and the promotion of device portability and standardization research, EIT holds the potential to evolve from an auxiliary tool into a core technology for routine respiratory monitoring and individualized treatment, providing critical support for improving outcomes in critically ill patients.

Keywords

Electrical Impedance Tomography, EIT, Ventilation Distribution, Mechanical Ventilation, ARDS, Clinical Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电阻抗肺功能成像(Electrical Impedance Tomography, EIT)作为一种基于体表电阻抗变化重建胸廓内部通气分布的成像技术,近年来在临床呼吸监测领域引起了广泛关注。与传统影像学如X线、CT相比,EIT具备无电离辐射、可床旁连续监测、对呼吸动力学敏感等独特优势,能够实时反映潮气量分布、肺复张与塌陷动态及通气-灌注失衡的变化趋势。这些特点使其在急性呼吸窘迫综合征(ARDS)管理、机械通气参数优化、围手术期呼吸监测以及慢性呼吸疾病的功能评估中展现出重要的应用潜力。临床需求的增长和技术进步推动了EIT设备的小型化、无线化及算法改进,从而进一步拓宽了其床旁实施的可行性和图像重建的精度。

EIT的临床价值不仅体现在定性显示肺区通气,还通过定量参数(如区域通气优先指数、中心-外侧通气分布等)为个体化通气策略提供依据。

尽管EIT应用前景广阔,但其局限性亦不可忽视:空间分辨率低于CT,量化绝对通气体积存在挑战,受电极接触、体位与胸廓形态影响显著。临床应用尚缺乏统一的参数阈值和多中心大样本的循证支持。当前研究和产业界正通过改进电极设计、发展模型先验重建方法及引入深度学习技术来提升图像质量与定量可靠性。展望EIT,其有望与超声、血流动力学监测等多模态手段结合,形成更为完整的肺功能评估体系,推动从辅助参考向决策支持工具的转变,从而在重症医学、麻醉与呼吸康复等领域发挥更大作用。

2. 技术原理

电阻抗肺功能成像(EIT)基于组织电阻抗随空气含量变化的物理特性,将胸壁表面多点阻抗测量映射为肺内通气动态成像。通俗地说,肺在吸气时充气体积增加,局部导电性降低;呼气时气体排出,导电性相对上升。EIT通过在胸廓周围布置环形电极阵列,依次注入微弱高频电流并测量电极间电压差,获取

随呼吸周期变化的时空阻抗数据。重建算法将这些边界测量映射回胸腔横截面上的阻抗分布变化, 从而生成反映区域通气的动态图像。相较于传统影像学, EIT 的时间分辨率高, 可实现即时循环的呼吸周期捕捉, 适合监测快速变化的通气状态。

EIT 图像的对比度来自阻抗随气体体积分数变化带来的相对差异, 而非绝对阻抗值, 因此强调动态变化信号的采集与处理。在临床采集过程中, 电极接触阻抗、胸廓形状与体位改变都会引入伪影, 需通过基线校正与滤波策略减少干扰。现代设备常采用 16 至 32 个电极以平衡空间分辨力与实时性。表 1 是常见电极数量与典型空间分辨力、帧率的对比, 便于理解实际应用中的选择权衡。

Table 1. Typical performance parameters for different numbers of electrodes
表 1. 不同电极数量对应的典型性能参数

电极数	空间分辨力(相对)	时间分辨率(帧/秒)	典型应用场景
8	低	20~30	基础监测、低成本设备
16	中	25~50	临床床旁监护、科研常用
32	较高	50~100	需要更精细区域分辨的研究

EIT 成像依赖于稳态电流场的近似与区域线性响应, 这使得成像更能反映相对通气变化而非绝对肺容积。因此在临床解释时, 常以基线呼气相为参考, 呈现吸气过程的阻抗增减。为了得到更丰富的信息, EIT 信号常与气流、气道压力及血氧等生理信号同步记录, 通过时序对齐可以将阻抗变化定量关联到潮气量、呼吸频率及(呼吸机)设定参数的调整效果。通过瞬时阻抗变化的相位和幅值分析, 能够识别区域延迟通气、气道阻塞或复张/塌陷的时空特征, 有助于制定个体化通气策略。

总体而言, EIT 的物理原理结合了电生理测量与逆问题重建技术, 其优势在于无创、连续、床旁可重复监测区域通气动态。理解其信号来源与限制, 对于正确解读图像、减少伪影干扰并将 EIT 结果转化为临床可操作的决策至关重要。

3. EIT 常用定量指标

3.1. 全局不均匀性指数(GI)

全局不均匀性指数(Global Inhomogeneity Index, GI)是评估肺部通气分布均匀性的重要参数。它反映了肺部不同区域通气差异的程度。在正常生理状态下, 肺部通气相对均匀, GI 值较低; 而在肺部疾病状态下, 如急性呼吸窘迫综合征(ARDS)等, 肺部通气分布会出现明显的不均匀, 导致值升高。有研究表明, 在 ARDS 患者中, 通过 EIT 监测 GI 值的变化, 可以动态观察肺部通气的改善情况, 为调整呼吸机参数提供依据。一项 2014 年的研究摘要指出, GI 指数与 EIT 测量的肺复张程度高度相关, 并认为其可能有助于指导通气治疗。这间接表明 GI 改善可能意味着肺部通气状况好转[1], 证明 GI 值可以作为评估肺部疾病严重程度和治疗效果的重要指标之一。

3.2. 通气中心(CoV)

通气中心(Centre of Ventilation, CoV)表示肺部通气的重心位置。它反映了肺部通气在空间上的分布情况。CoV 用于描述肺内气体沿重力轴由腹侧至背侧的垂直分布。CoV 越接近 50%(中心), 通气在腹背分布越均匀; 比值增大表示背侧(重力依赖区)通气更多[2]。当肺部出现病变时, 如肺不张、胸腔积液等, CoV 会发生偏移[3]。通过监测 CoV 的变化, 可以及时发现肺部病变的位置和范围。一项 2025 年发表的关于新生儿和儿童 ARDS 的研究, 在进行 PEEP 递减试验时, 明确将 CoV 作为一项计算和评估的通气分

布指标[4], 因此 CoV 是评估肺部通气空间分布和疾病动态变化的重要参数。

3.3. 区域通气延迟(RVD)

区域通气延迟(Regional Ventilation Delay, RVD)是指肺部不同区域之间通气开始时间的差异。在正常呼吸过程中, 肺部各区域的通气应该是同步的, 但在肺部疾病状态下, 如纤维化、肺气肿等, 会出现区域通气延迟现象。RVD 的存在会导致肺部通气不均匀, 影响气体交换效率。通过 EIT 监测 RVD, 可以评估肺部疾病对通气同步性的影响程度。研究发现, COPD 患者的 RVDI 值均显著高于健康人。同时, 研究通过分析 FEV1/FVC (一秒率)的频率分布, 进一步揭示了 COPD 患者区域肺功能的时间延迟异质性, 从而明确了这种时间异质性(RVD)与常规肺功能指标(FEV1/FVC)之间的关联[5]。

3.4. Pendelluft 现象

Pendelluft 现象是指在呼吸过程中, 肺部不同区域之间的气体流动现象。正常情况下, 肺部各区域之间气体交换是均匀的, 但在肺部疾病状态下, 如 ARDS、肺部感染等, 会出现 Pendelluft 现象[6]。EIT 可以实时监测肺部不同区域的阻抗变化, 从而观察到 Pendelluft 现象的发生。在一项针对急性呼吸衰竭患者的研究中, 通过 EIT 监测发现, 患者在机械通气过程中存在明显的 Pendelluft 现象, 且该现象与患者的肺部损伤程度和预后相关[7]。

3.5. 其他通气参数

3.5.1. 通气比

通气比是指肺部不同区域的通气量之比。它可以反映肺部通气的分布情况。在正常情况下, 肺部各区域的通气比相对稳定; 而在肺部疾病状态下, 通气比会发生改变。通过监测通气比的变化, 可以评估肺部疾病对通气分布的影响程度。

3.5.2. Δ EELI

Δ EELI (End-Expiratory Lung Impedance Change)是指呼气末肺阻抗的变化。它可以反映肺部气体含量的变化。在正常呼吸过程中, Δ EELI 相对稳定; 而在肺部疾病状态下, 如肺水肿、气胸等, Δ EELI 会发生明显改变。通过监测 Δ EELI 的变化, 可以及时发现肺部疾病的发生和发展。

3.5.3. 通气中心

通气中心除了上述提到的 CoV 外, 还可以通过不同的计算方法得到其他形式的通气中心指标。这些指标都可以从不同角度反映肺部通气的空间分布情况, 为临床医生提供更全面的信息。

4. 临床应用现状

4.1. 肺部检测

肺部检测是电阻抗肺功能成像(EIT)最成熟且应用最广的临床场景之一。EIT 可实时反映胸廓横截面内气体分布与通气动态, 尤其适用于床旁监测、无创连续观察和动态变化趋势分析。在急性呼吸衰竭患者中, EIT 能够识别区域性塌陷与过度膨胀, 指导 PEEP 与潮气量调整, 从而减少通气相关损伤。

在慢性阻塞性肺疾病(COPD)与哮喘患者中, EIT 能够展示气道阻塞导致的区域性滞留与时间常数差异, 辅助评估支气管扩张疗效与药物吸入效果。对肺部感染或局灶性病变患者, EIT 可提示病灶相关的通气受限但需结合影像学确认。EIT 在揭示区域性通气分布、指导呼吸机参数调整以及评估治疗反应方面兼具实用性与可重复性, 有助于临床决策的即时优化[8]。表 2 为不同病理状态下 EIT 可识别的主要通气特征及临床意义, 便于在床旁快速判断病情方向。

Table 2. Key performance indicators and clinical significance of EIT in common lung disease detection
表 2. EIT 在常见肺病检测中的主要表现与临床意义

病理类型	EIT 主要表现	临床意义
ARDS	重力依赖区低通气、肺容积不均	辅助 PEEP 优化、避免过度膨胀
COPD/哮喘	区域滞留、呼气延迟	评估气道阻塞程度、疗效监测
肺不张	局灶或广泛低通气区	指导复张策略、评估复张效果
肺实变(感染)	局灶通气减少	提示病灶分布、需影像学核实
单肺通气/胸腔积液	一侧通气显著下降	指导体位调整与处理方案

EIT 对肺容积变化的相对定量能力, 使其在围手术期监测中具有独特价值。麻醉诱导与手术体位改变可导致快速的肺容积下降, 传统血氧饱和度与血气分析常滞后, EIT 可即时显示通气分布改变, 提示需行复张或调整通气参数。在重症监护环境, EIT 还能辅助判断气胸、单肺通气失败或支气管插管位置偏移等问题, 通过波形和通气分布突变实现早期预警。

尽管 EIT 在检测敏感性与实时性上有明显优势, 其空间分辨率与定量绝对值仍受限于电极布局与重建算法。临床解读时应以相对变化与趋势为主, 并结合胸部 X 线、CT 及临床生理参数进行综合判断。未来通过多参数融合、算法优化与大样本数据库建立, EIT 在肺部检测的定量化与诊断准确性将进一步提升, 为精准呼吸管理提供更可靠的床旁工具。

4.2. 癌症监测

癌症监测是 EIT 从重症与通气管理延伸到肿瘤患者随访的一项重要临床用途。对于原位肿瘤或术后残余病灶, 局部通气受限常先于影像学密度改变表现, EIT 以其高时间分辨率能捕捉到呼吸周期内的局部阻抗波动差异, 反映通气减少或过度通气区域。

临床实践中, EIT 可用于术后监测肺复张效果与早期并发症发现。比如胸腔手术后, 局部黏连或小范围塌陷常造成通气不均, 床旁 EIT 能在不转运患者的情况下连续记录呼吸改善趋势, 提示是否需要物理治疗、体位调整或影像学复查。对于接受立体定向放疗的患者, EIT 也能在放疗过程中或术后连续评估受照区周围的功能变化, 协助辐射剂量与呼吸管理策略微调。结合呼气末正压和换气量的监测, EIT 能够评估局部肺容积恢复的程度, 为肺功能保留策略提供生理学依据。在肿瘤治疗相关并发症(如放射性肺炎)早期, EIT 显示的区域通气下降常与症状及炎症标志物升高同步出现, 提示其在发病早期具有预警价值。尽管空间分辨率无法与 CT 匹敌, EIT 以其实时、可重复、无电离辐射的优势, 成为肿瘤患者长期功能追踪与并发症监测的有益补充工具。

4.3. 保护性肺通气策略的制定

在保护性肺通气策略的制定中, EIT 提供了独特的动态、区域化通气信息, 能够指导潮气量与 PEEP 的个体化调整、评估肺复张效果、选择合适通气模式并优化脱机时机。传统以体重计算潮气量的方法忽视个体肺容积与损伤分布, EIT 可通过区域通气分布辨别过度通气与塌陷区域, 避免单一整体参数导致的局部肺损伤。基于 EIT 的潮气量调整常见流程为: 在不同潮气量下记录通气分布, 观察依从容积变化的区域差异, 选取使通气更均匀且不会造成过度通气的潮气量范围。PEEP 滴定方面, EIT 可通过逐步递增或递减 PEEP 试验, 找到扩张曲线与坍塌曲线的交叉点[9]。

在通气模式选择上, EIT 有助于判别分布受损程度: 弥漫性病变适合低潮气量与较高 PEEP 的整体策略, 而局灶性损伤则需要更谨慎的通气策略, 以避免对健康肺组织造成二次损伤。在机械通气的脱机阶

段, EIT 可用于评估自主呼吸时的区域性通气恢复, 预测脱机成功的可能性[10]。

临床实践中将 EIT 与呼吸力学参数、气体交换指标结合, 可形成多维决策支持。总体而言, EIT 在保护性肺通气中既是实时监测工具, 更可作为个体化通气策略设计的桥梁, 使治疗更“看得见”、调整更精准, 最终降低通气相关肺损伤风险并改善患者结局。

4.4. 区域肺灌注监测

4.4.1. 原理

注射高导电造影剂法(高渗盐水团注)是 EIT 监测肺灌注常用的方法之一, 也叫盐水推注 EIT 成像法或造影剂增强 EIT 成像法。该方法是通过造影剂注射: 采取“弹丸”式注射。一名操作者负责实施屏气操作和记录数据, 并当 EIT 仪器检测屏气信号后(胸腔全局电阻出现平台期), 发出注射指令; 另外一名操作者得到指令后, 从中心静脉导管“弹丸”式注射 10% NaCl 10 mL, 要求尽可能快地完成注射。电阻抗数据采集: 注射盐水前(一般 2 min)即开始持续采集胸腔电阻抗数据, 并持续至注射完成后 1~2 min [11]。在呼气末暂停时, 经静脉快速团注高渗盐水以抑制通气干扰, 使信号主要反映肺灌注。盐水随血流首次通过右心至肺动脉, 其高电导率会瞬时改变肺血管内血液电导特性, 使灌注高的区域阻抗显著下降。通过连续监测胸廓阻抗-时间曲线并进行图像重建, 即可得到肺灌注分布图。目前主要采用模型分析与斜率分析法对曲线进行定量处理。Bluth 等通过斜率分析法对 13 头猪进行实验观察肺通气和灌注, 最终得出 EIT 和 PET 在测量和跟踪肺灌注相对变化方面具有一致性, 显示出注射高导电造影剂法在 EIT 监测肺上的可行性与可靠性[12]。有研究通过在猪的两种急性呼吸窘迫综合征模型中, 将基于高渗盐水团注的电阻抗断层扫描肺灌注成像与动态多探测器计算机断层扫描进行对比验证。结果表明, 两者在评估背腹侧及左右肺区的灌注分布上具有高度一致性(相关系数最高达 0.92), 证实了电阻抗断层扫描用于床旁肺灌注成像的可行性[13]。

4.4.2. 局限

虽然注射高导电造影剂法在 EIT 监测肺灌注方面显示出较好的可行性和优越性, 但也存在着一些不足。首先, 短时间内较大量盐水输注可能会导致渗透性脱髓鞘综合征、电解质紊乱(高氯血症、高钠血症和低钾血症)、代谢性酸中毒和肾脏损害等[14] [15]。其次, 研究者在造影剂浓度的选择上也未达成一致, 一些研究推荐使用 3%以上的 NaCl 溶液(如 3%、5.85%、10%、20%)来进行测量[16]-[18], 但本方法还缺乏大样本的临床研究数据支撑和相应的专家共识, 因此需要更多的临床及基础实验研究来改进和完善注射高导电造影剂 EIT 灌注成像法。

4.4.3. 与 CT 肺动脉造影(CTPA)对比

1) 优势

EIT 监测肺灌注具有无创性、实时性、连续性、无辐射性、可进行床旁监测等优点[19]。与 CT 肺动脉造影(CTPA)相比, EIT 不需要将患者从病房转移至检查室, 避免了危重患者转运过程中的风险; 而且 EIT 可以连续实时监测肺灌注的变化, 为临床医生提供动态的信息。例如, 在一些病情不稳定的患者中, 由于无法耐受 CTPA 检查, EIT 可以作为一种替代的监测手段, 及时发现肺灌注的异常情况。此外, EIT 在评估肺灌注的同时, 还可以监测肺通气和气体分布情况, 为临床诊断和治疗提供更全面的信息。

2) 劣势

目前, EIT 监测肺灌注在诊断的敏感性和特异性方面相比于 CTPA 还有一定的差距。CTPA 是目前临床诊断肺栓塞(PE)的金标准, 它可直接显示出血栓的部位、形态、大小以及与管腔的关系等[20]。而 EIT 在对 PE 的诊断上, 虽然有一定的应用前景, 但在诊断的准确性上还需要进一步提高。在一项纳入 68 例

急性呼吸衰竭患者的观察性研究中, 以 30.4%为临界值, 利用电阻抗断层成像(EIT)评估死腔来诊断肺栓塞, 其敏感性与特异性分别达到了 90.9%和 98.6% [21]。

区域肺灌注监测是 EIT 临床应用的重要拓展方向之一, 旨在通过阻抗随时间的微小变化识别肺血流动力学的空间分布, 从而评估通气-灌注(V/Q)匹配状态及其动态变化。与传统影像学(如 CT 灌注成像或核医学灌注扫描)相比, EIT 具有实时、床旁、连续监测的优势, 能够捕捉呼吸周期及体位改变下的灌注重分布与短时波动。常见方法包括用生理盐水或高导电性注射剂短时改变血流导电性, 或在呼吸暂停和心动周期分析中分离灌注信号。通过同步心电与呼吸周期信号, EIT 可将阻抗随心跳的变化映射为空间灌注图, 从而区分通气占优、灌注占优或 V/Q 失衡区域, 对急性肺损伤、肺栓塞和肺不张等病理状态具有诊断与监测价值。EIT 能以无创、实时的方式反映肺灌注动态变化, 为评估通气-灌注失衡提供床旁可及的工具, 尤其适用于血流动力学波动明显的危重患者[8]。

在实际应用中, EIT 灌注成像的关键在于能够为临床决策提供动态证据。例如在怀疑肺栓塞的重症患者中, EIT 可显示局部灌注缺损区域的出现与消退趋势, 辅助判断治疗反应; 在 ARDS 患者中, EIT 揭示的低灌注但高通气区域提示潜在死气腔, 需结合复张策略和血流动力学调整。需要注意的是, 灌注 EIT 受心率变化、容积状态及电极接触质量影响较大, 因此临床实施时必须建立标准化操作和多信号同步监测流程, 以提高结果的可靠性。未来通过深度学习的图像增强、多模态数据融合(如超声、血流动力学监测)以及更高密度电极阵列, EIT 在区域肺灌注监测中的灵敏度和定量能力有望显著提升, 使其从辅助观察工具发展为指导个体化通气与灌注优化的临床决策平台。

4.5. 围手术期监测

围手术期是患者生理波动最大、呼吸功能最易失衡的阶段, 电阻抗肺功能成像(EIT)因其无创、实时和床旁可行的特点, 成为监测围手术期通气分布与肺复张效果的重要工具。围麻醉诱导、机械通气维持与术后苏醒期间, 患者从自主呼吸到受控通气再回到自主呼吸, 肺容积、气道阻力和区域通气易发生剧烈变化, 尤其在老人、肥胖者及肺基础疾病患者中更为明显。EIT 可连续显示胸廓各象限的通气分布和潮气量变化, 帮助麻醉医师在诱导后迅速识别通气不均、塌陷或过度膨胀的肺区, 并通过调整呼吸机参数或实施目标化肺复苏来恢复均匀通气。肺电阻抗断层成像(Electrical Impedance Tomography, EIT)技术是一种无创、无辐射的新兴功能性成像技术, 可实时动态监测胸腔内通气与血流的分布变化, 指导围术期呼吸参数调节和患者的呼吸康复, 已成为麻醉及呼吸危重症领域的热门技术[22]。

在术中体位变化(如趴位、侧卧或上腹部手术)时, EIT 能实时反映重力和压迫造成的通气重分布, 指导麻醉团队在体位固定后立即进行目标性复张, 这一过程常用 EIT 动态视频或差值图进行判断。

在术后恢复阶段, EIT 同样可用于评估患者恢复自主呼吸后的通气均匀性与肺回气量分布, 及时发现因疼痛、腔内压增高或呼吸肌疲劳导致的局灶性低通气, 从而在恢复时就给予针对性处理。实践中, EIT 还可与动脉血气或肺超声联合使用, 形成多模态评估方案, 提高诊疗决策的准确性与安全性。EIT 在围手术期的应用可显著提升对肺功能动态变化的感知能力, 帮助个体化调节通气策略, 降低术中术后肺并发症的发生率。EIT 可用于 ARDS 患者的 PEEP 与潮气量优化、肺复张效果评估以及识别区域过张或低通气区, 从而支持个体化保护性通气策略的制定并降低通气相关损伤风险[23]。通过改进重建算法与提升计算效率, EIT 朝着更可靠的量化指标迈进, 并为与超声、CT 等多模态融合提供了技术基础, 以促进诊疗信息的互补与整合[24]。

5. 展望

电阻抗肺功能成像(EIT)正处于从实验室走向临床常规的关键阶段, 其未来发展既充满机遇, 也面临

挑战。技术层面的进步仍然是推动临床应用普及的核心。当前 EIT 在时域分辨率上具有天然优势, 但空间分辨率和定量准确性尚不足以取代传统影像学。随着硬件微电子技术、低噪声放大电路和高密度电极阵列的进步, 期待更高的电极密度与多频测量实现更精细的空间重建。深度学习与物理约束相结合的重建策略, 既能利用大规模数据学习复杂映射, 又能融入生理先验减少伪影, 这是未来算法发展的重要方向。

多模态融合将显著扩展 EIT 的临床价值。单一模态难以全面反映肺功能与灌注的复杂性, 通过与超声、床边 X 线、胸部 CT 或血流动力学监测的联合, 可以在解剖结构、血流灌注与通气分布之间建立更明确的对应关系。特别是在评估通气 - 灌注失衡、定位塌陷或过度通气区域, 以及指导区域性肺复张时, 融合信息有助于制定更精细的个体化通气策略。生物标志物和呼气分析等功能性数据的叠加, 将为病情监测提供多维度证据, 推动从图像描述向病理机制解释的转变。

临床研究设计与证据等级的提升至关重要。尽管大量小样本、单中心研究证明了 EIT 在参数调整与即时监测中的潜在效益, 但高质量、多中心、随机对照的临床试验仍不足。未来研究应围绕明确的临床终点, 如呼吸机相关并发症发生率、重症患者转出率、住院时长与死亡率等, 设计严格的干预试验, 并建立统一的 EIT 指标与报告规范。通过构建大样本数据库与多学科协作平台, 可以加速循证证据的形成, 推进指南与临床路径的更新。

便携化与智能化是设备发展的两大趋势。徐梓菲关于便携式 EIT 系统的设计推动了该技术向床旁化与移动化发展, 使得急诊、普通病房乃至康复科室都能实现实时通气监测, 从而显著扩大了 EIT 的临床可及性与应用场景[25]。借助无线传输、可伸缩电极贴片与低功耗处理单元, 有望实现在普通病房、院前急救甚至家庭环境中进行连续监测。结合智能算法实现实时预警、自动化参数优化建议, 将把 EIT 从被动监测工具转变为主动决策辅助系统。这一转变要求在设备可靠性、数据安全与用户界面设计上同步突破, 确保在繁忙临床环境中的可用性和可接受性。

参考文献

- [1] Zhao, Z., Pulletz, S., Frerichs, I., Müller-Lisse, U. and Möller, K. (2014) The Eit-Based Global Inhomogeneity Index Is Highly Correlated with Regional Lung Opening in Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome. *BMC Research Notes*, 7, Article No. 82. <https://doi.org/10.1186/1756-0500-7-82>
- [2] Soltész, L., Leyens, J., Vogel, M., Muders, T., Putensen, C., Kipfmüller, F., et al. (2025) Correction: EIT Guided Evaluation of Regional Ventilation Distributions in Neonatal and Pediatric ARDS: A Prospective Feasibility Study. *Respiratory Research*, 26, Article No. 208. <https://doi.org/10.1186/s12931-025-03292-9>
- [3] Chi, Y., Zhao, Z., Frerichs, I., Long, Y. and He, H. (2022) Prevalence and Prognosis of Respiratory Pendelluft Phenomenon in Mechanically Ventilated ICU Patients with Acute Respiratory Failure: A Retrospective Cohort Study. *Annals of Intensive Care*, 12, Article No. 22. <https://doi.org/10.1186/s13613-022-00995-w>
- [4] 马效禹, 范得慧, 王威威. 电阻抗断层成像技术用于呼气末正压滴定的研究进展[J]. 临床麻醉学杂志, 2024, 40(2): 185-189.
- [5] Bauer, M., Opitz, A., Filser, J., Jansen, H., Meffert, R.H., Germer, C.T., et al. (2019) Perioperative Redistribution of Regional Ventilation and Pulmonary Function: A Prospective Observational Study in Two Cohorts of Patients at Risk for Postoperative Pulmonary Complications. *BMC Anesthesiology*, 19, Article No. 132. <https://doi.org/10.1186/s12871-019-0805-8>
- [6] 李芳, 陈柏, 吴阳, 等. 基于电阻抗断层成像的慢性阻塞性肺疾病诊断方法研究[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(7): 1866-1877.
- [7] Yoshida, T., Torsani, V., Gomes, S., De Santis, R.R., Beraldo, M.A., Costa, E.L.V., et al. (2013) Spontaneous Effort Causes Occult Pendelluft during Mechanical Ventilation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 188, 1420-1427. <https://doi.org/10.1164/rccm.201303-0539oc>
- [8] 刘孟春, 邢金燕. 电阻抗断层成像技术在呼吸系统肺功能成像中的应用[J]. 中华重症医学电子杂志(网络版), 2019, 5(4): 373-378.
- [9] Maciejewski, D., Putowski, Z., Czok, M. and Krzych, Ł.J. (2021) Electrical Impedance Tomography as a Tool for Monitoring

- Mechanical Ventilation. An Introduction to the Technique. *Advances in Medical Sciences*, **66**, 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.advms.2021.07.010>
- [10] 中华医学会重症医学分会. 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]. 中华重症医学电子杂志, 2022, 8(2): 65-76.
- [11] 何怀武, 隆云, 池熠, 等. 床旁高渗盐水造影肺灌注电阻抗断层成像的技术规范与临床应用[J]. 中华医学杂志, 2021, 101(15): 1097-1101.
- [12] Bluth, T., Kiss, T., Kircher, M., Braune, A., Bozsak, C., Huhle, R., *et al.* (2019) Measurement of Relative Lung Perfusion with Electrical Impedance and Positron Emission Tomography: An Experimental Comparative Study in Pigs. *British Journal of Anaesthesia*, **123**, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.04.056>
- [13] Kircher, M., Elke, G., Stender, B., Hernandez Mesa, M., Schuderer, F., Dossel, O., *et al.* (2021) Regional Lung Perfusion Analysis in Experimental ARDS by Electrical Impedance and Computed Tomography. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **40**, 251-261. <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3025080>
- [14] 詹又佳, 梁碧先, 龚健. 高渗盐水对重症脑外伤脑水肿患者电解质和渗透压影响的临床观察[J]. 昆明医学院学报, 2011, 32(3): 130-131.
- [15] Li, H., Sun, S., Yap, J.Q., Chen, J. and Qian, Q. (2016) 0.9% Saline Is Neither Normal nor Physiological. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, **17**, 181-187. <https://doi.org/10.1631/jzus.b1500201>
- [16] Nguyen, D.T., Bhaskaran, A., Chik, W., Barry, M.A., Pouliopoulos, J., Kosobrodov, R., *et al.* (2015) Perfusion Redistribution after a Pulmonary-Embolism-Like Event with Contrast Enhanced Eit. *Physiological Measurement*, **36**, 1297-1309. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/36/6/1297>
- [17] Muders, T., Hentze, B., Leonhardt, S. and Putensen, C. (2023) Evaluation of Different Contrast Agents for Regional Lung Perfusion Measurement Using Electrical Impedance Tomography: An Experimental Pilot Study. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 2751. <https://doi.org/10.3390/jcm12082751>
- [18] Li, J., Zhu, M., Guo, Y., Li, W., He, Q., Wang, Y., *et al.* (2025) Dynamic EIT Technology for Real-Time Non-Invasive Monitoring of Acute Pulmonary Embolism: A Porcine Model Experiment. *Respiratory Research*, **26**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/s12931-024-03090-9>
- [19] He, H., Zhao, Z., Becher, T., Bellani, G., Yoshida, T., Amato, M.B.P., *et al.* (2025) Recommendations for Lung Ventilation and Perfusion Assessment with Chest Electrical Impedance Tomography in Critically Ill Adult Patients: An International Evidence-Based and Expert Delphi Consensus Study. *eClinicalMedicine*, **89**, Article ID: 103575. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2025.103575>
- [20] Pietersen, P.I., Goyard, C., Gille, T., de Margerie-Mellon, C. and Falster, C. (2024) The CT Revolution: The Role of PIOPED II in Establishing CT Pulmonary Angiography as the Reference Standard for Pulmonary Embolism Diagnosis. *Breathe*, **20**, Article ID: 230228. <https://doi.org/10.1183/20734735.0228-2023>
- [21] He, H., Chi, Y., Long, Y., Yuan, S., Zhang, R., Frerichs, I., *et al.* (2020) Bedside Evaluation of Pulmonary Embolism by Saline Contrast Electrical Impedance Tomography Method: A Prospective Observational Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **202**, 1464-1468. <https://doi.org/10.1164/rccm.202005-1780le>
- [22] 桂玉兰, 米卫东, 张昌盛. 肺电阻抗断层成像技术在围麻醉期机械通气中的应用研究进展[J]. 北京医学, 2022, 44(6): 526-529.
- [23] 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.
- [24] 张吴凯, 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.
- [25] 徐梓菲. 便携式电阻抗层析成像系统设计及应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.