

## 电阻抗断层成像用于围手术期呼吸管理的研究进展

赵伦<sup>1#</sup>, 阿德力江·买买提明<sup>2#</sup>, 余雪渊<sup>1,2\*</sup>, 王春梅<sup>1</sup>, 吐尼沙·艾合买提<sup>2</sup>

1. 首都医科大学宣武医院 重症医学科, 北京 100032; 2. 和田县人民医院 重症医学科, 新疆 和田 848000

**摘要:** 电阻抗断层成像(EIT)是一种非侵入性的成像技术,它利用电流通过人体时电阻抗的变化来生成胸部横截面图像。在围手术期的呼吸管理中,EIT提供了一种实时、连续监测肺部通气和灌注状态的方法,指导围术期患者的呼吸管理,包括指导慢性阻塞性肺疾病(COPD)和哮喘患者的围术期用药、特殊人群术中个体化呼气末正压(PEEP)设置、儿童围手术期肺保护、预测术后肺部并发症等。EIT在围手术期的应用帮助临床医生更精确地管理患者呼吸状态,减少并发症,改善预后。通过实时监测和指导个体化治疗,EIT提高了围手术期呼吸管理的安全性和有效性,已经成为手术室中不可或缺的一部分。本文对EIT在围手术期的应用进行综述,以期为EIT的临床应用提供参考。

**关键词:** 电阻抗成像;围手术期;呼吸管理

中图分类号:R312;R332.2;R445 文献标志码:A

DOI:10.16352/j.issn.1001-6325.2024.11.1482

## Research progress on electrical impedance tomography for perioperative respiratory management

ZHAO Lun<sup>1#</sup>, Adelijiang · MAIMAITIMING<sup>2#</sup>, YU Xueyuan<sup>1,2\*</sup>, WANG Chunmei<sup>1</sup>,  
Tunisha · AIHEMAITI<sup>2</sup>

1. Intensive Care Unit, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100032;

2. Intensive Care Unit, People's Hospital of Hetian County, Hotan 848000, China

**Abstract:** Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive imaging technique that generates cross-sectional images of chest by measuring changes in impedance as electric currents passing through human body. In perioperative respiratory management, EIT provides a real-time, consecutive monitoring of lung ventilation and perfusion status, guiding respiratory management of perioperative patients including medication for COPD and asthma, personalized PEEP settings for specific patient populations, lung protection for pediatric perioperative cases, and predicting postoperative pulmonary complications. Application of EIT in the perioperative period helps clinicians to manage patient respiratory status more accurately, reduces complications and improves outcomes. Through real-time monitoring and individualized treatment guidance, EIT enhances the safety and effectiveness of perioperative respiratory management, becoming an essential part of the operating room. This review summarises the application of EIT in the perioperative period, aiming to provide reference for the clinical application of EIT.

**Key words:** electrical impedance tomography; perioperative period; respiratory management

收稿日期:2024-08-21 修回日期:2024-09-20

\* 通信作者 (corresponding author): 15901144566@163.com

# 对本文有相同贡献

电阻抗成像技术 (electrical impedance tomography, EIT) 是一种新兴的成像技术, 具有实时、无创、便携的特点, 能够动态监测肺部功能<sup>[1]</sup>, 该技术的成像原理是在胸部均匀布置一组电极, 对电极施加安全的交流刺激信号, 测量其余电极的电压信号, 将肺灌注和通气过程中引起的胸部阻抗变化进行描记, 借助重构图像算法重建肺部电导率分布情况, 最终以图像形式呈现<sup>[2-3]</sup>。目前在临床上, EIT 可以用于评估慢性阻塞性肺疾病 (chronic obstructive pulmonary disease, COPD)、肺纤维化、哮喘等患者的肺功能和区域通气情况<sup>[4]</sup>, 还可诊断气胸、胸腔积液、肺栓塞等疾病<sup>[5-6]</sup>。此外, 在 EIT 实时监测下可采用多种方法滴定个体化的 PEEP、指导俯卧位时的呼吸管理、预测撤机结局等为临床重症患者提供更全面的通气评估<sup>[7]</sup>。

近年来, EIT 技术在围手术期呼吸管理中的应用研究, 特别是在评估和优化患者肺功能方面取得了显著进展。EIT 技术能够应用于手术前、麻醉诱导、术中以及术后的不同阶段, 提供连续、无创的肺通气功能评估<sup>[7]</sup>。这对于确保围手术期呼吸管理的质量, 特别是在识别和预防术后肺部并发症方面至关重要。本文概述 EIT 用于围手术期全流程呼吸管理的研究进展。

## 1 EIT 在基础肺部疾病患者术前的应用

慢性阻塞性肺疾病和哮喘患者术前应用 EIT 可动态评估呼气流速受限的严重程度和支气管扩张剂的疗效, 以指导围术期用药<sup>[7]</sup>。

### 1.1 COPD 患者术前应用 EIT

Vogt 等人<sup>[8]</sup>使用 EIT 技术来评估 COPD 患者在支气管扩张剂反应性测试中的区域肺功能变化。通过对 35 例 COPD 患者进行 EIT 扫描, 并结合传统的肺功能测试 (如肺活量、最大呼气流量等) 来评估患者在使用支气管扩张剂后的肺功能变化。研究结果显示, EIT 可以有效地测量肺部不同区域的气体体积和流速变化, 并且这些变化在支气管扩张剂反应性测试后表现出明显的空间和时间异质性。通过比较不同患者和不同时间点的 EIT 数据, 研究人员发现 COPD 患者在支气管扩张剂反应性测试后的肺功能变化存在明显的区域差异。该研究的结果对于了解 COPD 患者的肺功能变化以及评估支气管扩张

剂治疗的效果具有重要意义。通过使用 EIT 技术, 能够更全面地了解 COPD 患者肺部的功能状态, 并且可以根据不同区域的肺功能变化来指导个体化的治疗策略。为进一步研究和应用 EIT 技术在 COPD 患者中的临床应用提供了重要的基础, 从而指导 COPD 患者的围手术期治疗。

### 1.2 哮喘患者术前应用 EIT

Frerichs 等人<sup>[9]</sup>使用 EIT 技术来评估哮喘患者的肺部通气情况。通过对哮喘患者和健康人进行比较, 探讨了肺部病理和支气管扩张剂的可逆性对区域肺功能的影响。研究使用 EIT 技术来获取肺部通气的空间和时间分布, 并将哮喘患者与健康人的结果进行对比, 以区分两组之间的差异。通过对哮喘患者和健康人的研究, 发现 EIT 技术能够准确评估哮喘患者的肺部通气情况, 并且能够区分哮喘患者和健康人之间的差异。这些发现为将来在肺部疾病患者中应用 EIT 技术提供了依据, 从而在术前指导相关治疗。

## 2 特殊人群中应用 EIT

### 2.1 病态肥胖患者术中应用 EIT

病态肥胖患者麻醉诱导时由于呼吸肌张力下降和胸腹部脂肪压迫, 常出现明显的功能残气量 (functional residual capacity, FRC) 降低, 可导致严重低氧血症<sup>[10]</sup>。通过 EIT 指导的个体化呼气末正压 (individualized positive end expiratory pressure, iPEEP) 设置可以有效减少肥胖患者手术后肺不张的发生, 同时降低呼吸机驱动压力, 改善氧合状况。

在病态肥胖患者中, FRC 显著降低<sup>[11]</sup>, 并在麻醉期间进一步降低<sup>[12-15]</sup>。麻醉期间肺容量的损失可导致术后几天的气体交换受损<sup>[16]</sup>。在仰卧位, 肥胖者比正常体重者更容易发生气道闭合<sup>[17]</sup>。气体交换受损时, 通过 EIT 指导的个体化呼气末正压 (iPEEP) 设置可以有效减少肥胖患者手术后肺不张的发生, 同时降低呼吸机驱动压力, 改善氧合状况。

Erlandsson 等人<sup>[18]</sup>通过使用 EIT 技术来优化肥胖病人在腹腔镜胃旁路手术期间的呼气末正压 (PEEP), 以维持 FRC 的正常水平。在诱导麻醉前, 在胸部周围放置了 16 个电极, 以监测呼吸引起的电阻变化。通过逐步增加潮气量, 校准了电阻抗断层扫描仪与肺容积变化之间的关系。随后, 逐步调整

PEEP 值,以保持 EIT 曲线的水平基线,对应于稳定的 FRC。使用氮洗出/洗入技术测量了绝对 FRC,使用食管多普勒方法测量了心输出量。为了防止 PEEP 引起的血流动力学障碍,给予了一定剂量的容量扩充剂。研究表明,电阻变化与潮气量变化密切相关。术后心输出量显著增加,肺泡死腔减少, $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 、分流和顺应性保持不变。因此,该研究通过使用 EIT 技术快速评估肥胖病人的肺容积变化,并优化 PEEP 值,提出需要用高水平的 PEEP 来维持正常的 FRC,并使分流最小化。通过解决这个问题,为肥胖病人的手术期间提供了更好的肺部保护和氧合管理。

Nestler 等人<sup>[19]</sup>探讨了在全身麻醉期间,对肥胖患者进行个体化的 PEEP 设置对气体交换和肺通气分布的影响。研究中使用 EIT 来估计最低的 PEEP,以减少循环性肺泡复张和塌陷,从而改善肺保护。研究采用随机对照试验的设计,将肥胖患者分为标准 PEEP 组和个体化 PEEP 组。标准 PEEP 组使用固定的 PEEP 值( $5 \text{ cm H}_2\text{O}$ ,  $1 \text{ cm H}_2\text{O} = 0.098 \text{ kPa}$ ),而个体化 PEEP 组根据 EIT 结果进行 PEEP 调整。研究结果显示,个体化 PEEP 组在术前和术后的气体交换和肺通气分布方面均表现出显著改善,而标准 PEEP 组则没有这种改善。因此,该研究通过个体化 PEEP 设置解决了肥胖患者在全身麻醉期间 PEEP 选择的难题,提供了一种改善肺保护的方法。

## 2.2 插入双腔气管导管的胸科手术术中 EIT 的应用

胸科手术需要插入双腔气管导管,传统上应用纤维支气管镜(fiberoptic bronchoscope, FOB)进行插管定位。EIT 可显示双肺通气分布,从而辅助判断插管位置。

Steinman 等人<sup>[20]</sup>通过使用 EIT 技术来确认双腔管的正确放置位置,并评估其在肺部通气评价方面的可行性。为了解决这个问题,研究者选择了 40 例需要使用双腔管进行气管插管和随后进行单肺通气的患者,在麻醉诱导前,将包含 16 个电极的 EIT 电极带放置在胸部第 5 肋间,并连接到 EIT 监测器上进行在线可视化,通过施加电流并测量相邻电极对之间的电压差异,生成 EIT 图像来显示通气引起的阻抗变化,将 EIT 图像分为 4 个象限,分别代

表胸部的不同区域。通过分析这些区域的阻抗变化,评估通气分布的变化情况。在 EIT 评估之前和之后,使用 FOB 来确认双腔管的正确放置位置。研究表明,EIT 可以有效地评估左右肺部的通气情况,并且可以帮助确认双腔管的正确放置位置。这对于临床医生来说是非常有价值的,因为正确放置双腔管对于成功进行单肺通气至关重要。

## 2.3 腹部手术术中 EIT 的应用

一些研究应用 EIT 实时监测腹部手术患者术中肺通气状态,优化机械通气模式选择和个体化 PEEP 设置,有助于避免肺塌陷、改善氧合和呼吸系统顺应性、降低驱动压,甚至降低术后肺部并发症发生率<sup>[21]</sup>。

2.3.1 根据 EIT 调整 PEEP,优化腹部手术患者术中通气状态:Pereira 等人<sup>[22]</sup>通过使用 EIT 来个体化调整术中机械通气的 PEEP,以优化患者的通气状态并减少术后肺不张的发生。研究选择了 40 例肺部健康并进行腹部手术的患者,所有患者在麻醉诱导后都接受了 PEEP 为  $4 \text{ cm H}_2\text{O}$  的机械通气,并进行了 PEEP 调整和肺复张操作。随后,患者被随机分配到两个治疗组中:一个是根据 EIT 调整 PEEP (PEEP-EIT),范围为  $4$  至  $20 \text{ cm H}_2\text{O}$ ;另一个是固定 PEEP 为  $4 \text{ cm H}_2\text{O}$  (PEEP4),通过 CT 扫描术后测量的肺不张程度来评估术后肺不张的发生情况。此外,还观察了 PEEP 选择对肺功能和血液动力学的影响。根据每个患者的特点和需要,个体化调整 PEEP,研究发现 PEEP-EIT 组的患者术后肺不张程度较低,并且在术中呼吸系统的氧合和顺应性方面表现更好。此外,PEEP-EIT 组的患者没有出现术中血液动力学不稳定的情况,也没有需要更多血管活性药物或液体的情况。因此,该研究通过个体化调整 PEEP,解决了术中机械通气中 PEEP 设置值的问题,并提供了一种优化患者通气状态和减少术后肺不张的方法。

2.3.2 机器人辅助腹腔镜根治性前列腺切除术 EIT 的应用:Girrbach 等人<sup>[23]</sup>通过使用 EIT 来指导个体化的 PEEP 设置,以改善机器人辅助腹腔镜根治性前列腺切除术(robot-assisted laparoscopic prostatectomy, RALP)患者的通气管理。为了确定个体化 PEEP 设置是否能够改善术后患者的氧合和肺功能,研究对象被随机分配到两组,一组接受个体化

PEEP 设置 (PEEPIND 组), 另一组接受 5cm H<sub>2</sub>O PEEP 设置 (PEEP5 组)。通过使用 EIT 监测患者的肺部情况, 研究人员能够根据实时数据调整个体化 PEEP 设置, 观察术后拔管时的动脉血氧分压与吸入氧浓度比值 (PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>) 和呼气末肺容积 (end expiratory lung volume, EELV)。研究结果显示, 在拔管前, PEEPIND 组的 PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> 比值比 PEEP5 组高 10.0 kPa (1 kPa = 7.5 mmHg)。此外, PEEPIND 组的 EELV 比 PEEP5 组高 1.01 L。这表明, 个体化 PEEP 设置可以改善术后患者的氧合和肺功能。通过使用 EIT 指导个体化 PEEP 设置, 这项研究解决了机器人辅助腹腔镜根治性前列腺切除术患者通气管理中的一个关键问题。

个体化 PEEP 设置可以根据患者的实时肺部情况进行调整, 从而优化通气策略, 改善氧合和肺功能。这对于提高手术患者的术后康复和减少并发症的发生具有重要意义。

#### 2.4 儿科手术中 EIT 的应用

Humphreys<sup>[24]</sup> 通过使用 EIT 技术, 研究了麻醉诱导和插管对心脏患儿的呼气末水平 (end expiratory level, EEL) 和通气分布 (ventilation distribution, VD) 的影响。研究使用了 EIT 系统对患儿进行测量, 将 16 个电极围绕在患儿胸部的横截面上, 通过施加小电流并测量电压差来获取肺部的电阻抗信号。研究还使用了其他指标如全局不均匀性指数和填充指数来评估 VD 的变化情况。研究结果表明, 在麻醉诱导和插管过程中, EEL 发生了变化, 通气从依赖性肺区向非依赖性肺区转移, VD 的不均匀性增加。此外, 研究还发现, 在机械通气开始后, EEL 恢复正常, 并且 VD 的不均匀性得到改善。通过这项研究, 解决了麻醉诱导和插管对心脏病患儿 EEL 和区域 VD 的影响问题。研究结果对于了解心脏病患儿在麻醉诱导和插管过程中的肺部功能变化具有重要意义, 有助于优化麻醉管理和机械通气策略, 提高患儿的术后肺功能和康复效果。

#### 参考文献:

[1] Frerichs I. Electrical impedance tomography (EIT) in applications related to lung and ventilation: a review of experimental and clinical activities[J]. *Physiol Meas*, 2000,

### 3 应用 EIT 评估术后机械通气患者肺部并发症

Iwata 等人<sup>[25]</sup> 通过使用 EIT 来研究术后患者的通气模式, 并评估其与术后肺部并发症 (postoperative pulmonary complications, PPCs) 和其他相关临床结局的关联。为了解决这个问题, 研究招募了 128 例高危 PPCs 的成年术后患者, 这些患者在入住 ICU 时进行机械通气。使用 EIT 技术揭示了三种通气模式的表型: 表型 1 (32%, 以腹侧通气为主), 表型 2 (41%, 均匀通气) 和表型 3 (27%, 以背侧通气为主)。评估这些通气模式与 PPCs 的关联, 研究了次要结果, 包括从机械通气和氧气使用中脱离的时间以及 ICU 住院时间的长度。通过这个研究设计和 EIT 技术的应用, 研究团队揭示术后患者的不均匀通气模式, 并发现这些模式与 PPCs、延迟脱离机械通气和氧气使用以及较长的 ICU 住院时间有关。该研究通过提供关于术后患者通气模式的信息, 对了解和预测术后肺部并发症以及相关临床结果的问题提供了帮助。

### 4 总结与展望

综上所述, EIT 技术在围手术期呼吸管理中的研究进展不仅体现在技术本身的成熟与优化, 也体现在其临床应用范围的拓宽和特定患者群体获益的明确。随着技术的进步和更多临床证据的积累, EIT 有望成为围手术期呼吸管理中的标准工具之一。但值得关注的是, EIT 高度依赖于组织的电导率, 对患者体液变化敏感, 如组织含水量、血液量和电解质浓度等, 这些变化可能会影响成像的准确性和稳定性。建议使用标准化的校准程序, 为每个患者建立一个基线 EIT 图像, 围术期图像可与之比较, 从而减少因体液波动产生的误差。希望随着技术的发展和临床经验的积累, EIT 技术在处理体液变化方面的适应性和准确性能不断提高。

21:R1-21. doi: 10.1088/0967-3334/21/2/201.

[2] Frerichs I, Amato MB, van Kaam AH, *et al.* Chest electrical impedance tomography examination, data analysis,

- terminology, clinical use and recommendations; consensus statement of the Translational EIT development study group[J]. *Thorax*, 2017, 72: 83-93.
- [3] Spinelli E, Kircher M, Stender B, *et al.* Unmatched ventilation and perfusion measured by electrical impedance tomography predicts the outcome of ARDS[J]. *Crit Care*, 2021, 25: 192. doi: 10.1186/s13054-021-03615-4.
- [4] Frerichs I, Lasarow L, Strodthoff C, *et al.* Spatial ventilation inhomogeneity determined by electrical impedance tomography in patients with chronic obstructive lung disease[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 762-791.
- [5] Putensen C, Hentze B, Muenster S, *et al.* Electrical impedance tomography for cardio-pulmonary monitoring[J]. *J Clin Med*, 2019, 8: 1176. doi: 10.3390/jcm8081176.
- [6] 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. doi: 10.3389/fmed.2021.773471.
- [7] 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: 615-628.
- [8] 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: L8-L19.
- [9] Frerichs I, Zhao Z, Becher T, *et al.* Regional lung function determined by electrical impedance tomography during bronchodilator reversibility testing in patients with asthma[J]. *Physiol Meas*, 2016, 37: 698-712.
- [10] Humphreys S, Pham TM, Stocker C, *et al.* The effect of induction of anesthesia and intubation on end expiratory lung level and regional ventilation distribution in cardiac children[J]. *Paediatr Anaesth*, 2011, 21: 887-893.
- [11] Eichenberger A, Proietti S, Wicky S *et al.* Morbid obesity and postoperative pulmonary atelectasis: an underestimated problem[J]. *Anesth Analg*, 2002, 95: 1788-1792.
- [12] Pelosi P, Croci M, Ravagnan I *et al.* Total respiratory system, lung, and chest wall mechanics in sedated-paralyzed postoperative morbidly obese patients [J]. *Chest* 1996, 109: 144-151.
- [13] Pelosi P, Croci M, Calappi E, *et al.* Prone positioning improves pulmonary function in obese patients during general anesthesia[J]. *Anesth Analg*, 1996, 83: 578-583.
- [14] Pelosi P, Croci M, Ravagnan I, *et al.* The effects of body mass on lung volumes, respiratory mechanics, and gas exchange during general anesthesia [J]. *Anesth Analg*, 1998, 87: 654-660.
- [15] Damia G, Mascheroni D, Croci M, *et al.* Perioperative changes in functional residual capacity in morbidly obese patients[J]. *Br J Anaesth*, 1988, 60: 574-578.
- [16] Reis Miranda D, Struijs A, Koetsier P *et al.* Open lung ventilation improves functional residual capacity after extubation in cardiac surgery[J]. *Crit Care Med*, 2005, 33: 2253-2258.
- [17] Hedenstierna G, Santesson J, Norlander O. Airway closure and distribution of inspired gas in the extremely obese, breathing spontaneously and during anaesthesia with intermittent positive pressure ventilation [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 1976, 20: 334-342.
- [18] Erlandsson K, Odenstedt H, Lundin S, *et al.* Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2006, 50: 833-839.
- [19] Nestler C, Simon P, Petroff D, *et al.* Individualized positive end-expiratory pressure in obese patients during general anaesthesia: a randomized controlled clinical trial using electrical impedance tomography[J]. *Br J Anaesth*, 2017, 119: 1194-1205.
- [20] Steinmann D, Stahl CA, Minner J, *et al.* Electrical impedance tomography to confirm correct placement of double lumen tube: a feasibility study[J]. *Br J Anaesth*, 2008, 101: 411-418.
- [21] Erlandsson K, Odenstedt H, Lundin S, *et al.* Positive end expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2006, 50: 833-839.
- [22] Pereira SM, Tucci MR, Morais CCA, *et al.* Individual positive end-expiratory pressure settings optimize intraoperative mechanical ventilation and reduce postoperative atelectasis[J]. *Anesthesiology*, 2018, 129: 1070-1081.
- [23] Girrbach F, Petroff D, Schulz S, *et al.* Individualised positive end-expiratory pressure guided by electrical impedance tomography for robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: a prospective, randomised controlled clinical trial[J]. *Br J Anaesth*, 2020, 125: 373-382.
- [24] Humphreys S, Pham TM, Stocker C, *et al.* The effect of induction of anesthesia and intubation on end-expiratory lung level and regional ventilation distribution in cardiac children[J]. *Paediatr Anaesth*, 2011, 21: 887-893.
- [25] Iwata H, Yoshida T, Hoshino T, *et al.* Electrical impedance tomography-based ventilation patterns in patients after major surgery [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2024, 209: 1328-1337.