

电阻抗断层成像技术在围手术期脑图像监护中的应用与展望

严国飞，夏建松，李琛晖，孙菲，杨辉

引用本文：

严国飞，夏建松，李琛晖，等. 电阻抗断层成像技术在围手术期脑图像监护中的应用与展望[J]. 中国医疗器械杂志, 2025, 49(5): 507–513.

YAN Guofei, XIA Jiansong, LI Chenhui, et al. Application and Prospects of Electrical Impedance Tomography in Perioperative Brain Imaging Monitoring[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2025, 49(5): 507-513.

<https://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.250087>

收稿日期: 2025-02-10

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

中国医疗器械杂志. 2025, 49(1): 35–41 <http://doi.org/10.12455/j.issn.1671-7104.240361>

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>

围术期肌松监测的研究

Research of Perioperative Muscle Relaxant Monitor

中国医疗器械杂志. 2020, 44(3): 231–235,275 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2020.03.009>

围术期多中心数据中心的设计与应用

Design and Application of Perioperative Multi-center Data Center

中国医疗器械杂志. 2021, 45(3): 292–295 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2021.03.013>

基于Bloch–Siegert 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–Siegert 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>

数字化导航技术在显微根尖手术中的应用与进展

Application and Progress of Digital Navigation Technology in Micro-apical Surgery

中国医疗器械杂志. 2023, 47(1): 74–79,88 <http://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2023.01.013>



微信公众号



网站二维码

文章编号: 1671-7104(2025)05-0507-07

电阻抗断层成像技术在围手术期脑图像监护中的应用与展望

【作者】 严国飞, 夏建松, 李琛晖, 孙菲, 杨辉
浙江省医疗器械审评中心, 杭州市, 311121

【摘要】 电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 是一种新兴的医学功能成像技术, 其原理是通过贴置在体表的电极施加符合人体安全标准的激励电流, 测量电极间的边界电压并选用适定的图像重构算法可视化断层截面的电阻率。相较于传统的医学成像技术, EIT 无创无辐射, 且对组织电阻率变化敏感, 具有较高的时间分辨率, 可满足临床病情动态监护的实时需求。该文综述了脑EIT技术的研究现状, 系统总结了其在围手术期应用中的优势和技术局限, 同时基于当前研究基础与临床应用需求, 对围手术期脑EIT的未来发展方向进行了前瞻性的预测与展望, 旨在为该技术的进一步优化及临床推广应用提供方法参考。

【关键词】 电阻抗断层成像; 围手术期; 脑成像; 图像监护

【中图分类号】 R318; TP391.4

【文献标志码】 A

doi: 10.12455/j.issn.1671-7104.250087

Application and Prospects of Electrical Impedance Tomography in Perioperative Brain Imaging Monitoring

【Authors】 YAN Guofei, XIA Jiansong, LI Chenhui, SUN Fei, YANG Hui
Zhejiang Center for Medical Device Evaluation, Hangzhou, 311121

【Abstract】 Electrical impedance tomography (EIT) represents an emerging medical functional imaging technology, which operates by applying safe-to-human excitation currents through surface-mounted electrodes, measuring boundary voltages between electrodes, and selecting appropriate image reconstruction algorithms to visualize resistivity in tomographic cross-sections. Compared to traditional medical imaging techniques, EIT offers non-invasive and radiation-free operation, high sensitivity to tissue resistivity changes, and superior temporal resolution, meeting the real-time requirements of clinical dynamic condition monitoring. This paper comprehensively reviews the research status of brain EIT technology, systematically summarizes its advantages and technical limitations in perioperative applications, and prospectively forecasts future development directions of perioperative brain EIT based on current research foundations and clinical application demands, with the aim of providing methodological references for further optimization and clinical promotion of this technology.

【Key words】 electrical impedance tomography (EIT), perioperative period, brain imaging, image monitoring

0 引言

实现围手术期实时动态的医疗监护是保障患者安全和评价手术实施效果的关键环节。围手术期包含患者术前评估、术中管理及术后恢复的各个阶段。在此期间, 诸如呼吸系统功能异常、神经紊乱等多种病症或生理变化均可能影响手术方式和治疗手段的选择^[1]。因此, 围手术期医疗监护的核心目标是通过持续监测患者的生命体征、器官功能和病理状态, 及时发现和诊断病灶区域的潜在威胁, 有

效预防术中及术后并发症的发生, 从而提高手术的成功率, 改善患者预后状况^[2]。

电阻抗断层成像 (electrical impedance tomography, EIT) 是一种新型医学功能成像技术, 能够根据不同组织特有的电阻抗特性、同一组织在不同生理病理状态下电阻抗特性不同的特点开展测量成像^[3]。其原理是通过电极向物体表面施加微弱的安全交流电激励, 同时测量电极间的边界电压, 并依据特定的图像重构算法重建物体内部的电阻率分布图像^[4]。相较于传统的医学成像技术, 例如计算机断层扫描 (computed tomography, CT)、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 和正电子发射计算机层

收稿日期: 2025-02-10

作者简介: 严国飞, E-mail: yanguofei@zjmde.org.cn

通信作者: 杨辉, E-mail: yanghui@zjmde.org.cn

显像 (positron emission computed tomography, PET) 等, EIT具有无创无辐射、便捷易操作等优势, 因此其在术前评估、术中脑损伤监测预警和危重脑伤病的实时监护方面存在巨大潜力。研究表明, 脑阻抗特性会由于颅内出(缺)血组织抑或液体含量变化(如脑水肿)而动态变化^[5, 6]。EIT作为一种对血流动力学极为敏感的成像技术, 能够实时捕捉和反映脑部血流动力学的细微变化, 在监测颅脑病变的早期发生及其发展的过程中, 具有重要的应用价值^[7-8]; 适用于围手术期脑功能监测、创伤性脑损伤评估以及脑卒中等脑血管事件的检测^[9-11]。

围手术期的脑监护不仅在术中环节依据手术需求和患者病症的特点进行个性化调整, 还在术前评估和术后康复观察中发挥重要作用。术前利用EIT技术评估脑部状态, 有助于发现潜在的风险因素, 优化手术方案; 术中和术后监护能够及时提示并发症风险, 图像化观测患者的生命体征及病情发展变化。本综述结合EIT在围手术期不同阶段的临床应用, 阐述该技术在患者脑监护过程中的具体表现, 旨在为颅脑相关疾病的干预和治疗提供高效准确的可视化辅助测量手段, 并探讨其在重症监护领域未来的发展方向。

1 EIT在围手术期脑监护中的应用

目前, EIT技术在临床颅脑监护领域的应用尚处于早期探索阶段。现有研究多数聚焦于术中及术后的监测场景, 而针对术前EIT测量的相关文献极为匮乏。术前EIT测量主要为临床决策提供参考依据, 更多的是与术后治疗效果进行对照, 以此凸显术后恢复状况。因此, 本章节将重点阐述EIT技术在术中及术后的具体应用情况。

1.1 EIT术中脑血流监护

在神经外科手术中, 术中脑灌注的实时监测对预防手术相关性脑损伤起决定性作用。脑组织代谢旺盛, 对血容量的细微变化极为敏感, 脑血流动力学一旦出现波动, 就可能引发不可逆的脑损伤, 严重影响患者预后。EIT技术为外科医师提供了一种全新的术中监测手段, 能够在手术全程动态评估脑血流量, 实时捕捉血流变化趋势, 帮助术者精准识别潜在脑损伤风险, 为及时调整手术策略、优化脑保护措施提供关键依据。

DAI等^[12]的研究旨在验证EIT用于检测人体颅内电阻率变化的临床可行性。他们选取6例亚急性或慢性硬膜下血肿患者, 在其钻孔引流术中利用自

主研发的EIT系统实时监测。术中注入和引流5%葡萄糖溶液(D5W)时测量EIT数据, 基于患者CT图像构建有限元模型进行图像重建与分析。结果显示, 注入D5W时, EIT图像相应位置电阻率显著上升, 引流时逐渐下降, 平均电阻率值和感兴趣区域大小与注入D5W体积呈高度线性相关。该项研究首次提供临床证据表明, EIT可重复检测和量化人体颅内电阻率变化, 进而为临床医师提供颅内血肿的位置和数量信息。LI等^[13]首次尝试探究EIT在全主动脉弓置换术(total aortic arch replacement, TAAR)中无创脑成像和监测的可行性。他们前瞻性观察42例接受TAAR的患者, 术中用EIT系统监测脑阻抗, 术后收集神经功能障碍(neurological dysfunction, ND)等预后信息。结果显示, 脑阻抗与灌注流量呈负相关, 最大电阻率不对称指数可量化脑部病理变化, 其预测术后ND的受试者工作特征曲线下面积达0.864, 在多因素逻辑回归分析中是ND的最强独立预测因子。该研究表明, EIT能检测区域脑阻抗变化, 或可反映区域脑灌注, 在TAAR的脑监测中颇具前景。为进一步探索EIT在TAAR中预警脑损伤的可行性, GUO等^[14]对57例TAAR患者, 术中采用16电极EIT系统监测脑阻抗, 提取5个与低温停循环期相关的EIT参数, 并测定术前、术后即刻、术后12 h、24 h和48 h血清中4种神经生物标志物浓度来建立EIT参数与血清神经生物标志物变化的相关性。结果显示: 术后神经功能障碍患者的EIT参数与生物标志物变化的相关性更强; 术前生物标志物水平异常的患者, 其术后生物标志物变化与特定EIT参数相关性突出。这些结果表明, EIT有望从电生理角度为TAAR术中脑损伤提供实时预警辅助信息。

近些年有研究通过在健康志愿者的头部表面粘贴电极并施加电流激励, 对颅脑血流动力学状态进行干预, 成功利用EIT捕捉到了脑血流灌注状态的变化。EIT的测量结果与同步记录的经颅多普勒参考信号趋势高度一致^[8-11]。这些研究表明, EIT技术能够以非侵入性的方式反映颅内血流灌注状态的动态变化, 显示出EIT在基于血流灌注监测的临床手术应用方向上具有巨大潜力。这一成果为EIT在脑部手术中的推广应用打下了坚实的理论基础。

1.2 术中EIT辅助定位

在立体定向手术过程中, 脑组织的电阻抗具备便捷测量的特性, 能够作为极为有效的辅助手段。手术实施时, 医师可借助专业设备对特定区域脑组

织的电阻抗数据进行快速、精准的收集。不同部位的脑组织，因其生理结构与细胞组成存在差异，呈现出的电阻抗数值也各不相同。凭借这一特性，通过对术中所测电阻抗数据进行深入分析，医师能够清晰地辨别组织类型，进而确认手术目标的具体位置，极大程度提升手术操作的精准度，降低手术风险，为患者的治疗效果提供有力保障。

SIEMIONOW等^[15]探究术中测量组织电阻抗在确认立体定向定位的苍白球内侧段（globus pallidus internus, GPI）中的作用。该研究纳入53例帕金森病患者，在立体定向苍白球切开术中，使用计算机化立体定向设备定位，通过测量推进至目标的有源电极与腿部参考电极间的阻抗，同时结合电刺激来确定GPI位置。结果显示，电阻抗测量能有效确认GPI位置，与立体定向计算的目标位置差异较小，且阻抗值会在接近目标时增加、穿过目标时骤降。该研究表明，测量组织电阻抗可作为一种辅助手段，在神经外科手术中为立体定向定位的GPI提供更精确的定位依据，也可能对其他手术靶点定位有帮助。

SOLEIMANI等^[16]聚焦于将新型水平集重建技术应用于脑部EIT以监测冷冻手术的可行性。冷冻手术是一种利用冷冻技术破坏肿瘤组织的治疗方法，其原理基于低温对组织细胞的损伤作用。冷冻手术通过插入针状冷冻探针，使局部组织温度急剧降低。低温会导致细胞内水分结冰，形成冰晶，冰晶的生长和膨胀会破坏细胞的结构，如细胞膜、细胞器等，使细胞失去正常功能；同时，低温还会引起局部血液循环障碍，导致组织缺血缺氧，进一步加速细胞死亡^[17]。此外，冷冻和解冻过程中的温度变化还会引发一系列的生物化学和免疫反应，增强对肿瘤组织的破坏效果^[18]。SOLEIMANI等^[16]利用冷冻组织与周围组织电导率的高对比度，将电导率重建问题转化为嵌入物体几何表示的反问题，采用水平集技术描述物体边界。他们以二维多物体重建、脑部球形冷冻区域模拟及冷冻区域生长监测为例，表明该方法能有效跟踪冷冻区域的形状和位置，相比传统重建方法，具有噪声免疫力强、能提取更多特征、计算效率高且稳定等优势，为冷冻手术的实时监测提供了有力支持。

1.3 术中颅内压监护

患者在脑部或全身麻醉手术中易面临脑缺血、脑水肿、严重颅内高压等并发症风险。甘露醇脱水疗法作为降低颅内压（intracranial pressure, ICP）

的常用手段，被广泛应用于临床^[19]。然而，不当使用甘露醇会引发多种副作用。其中，血容量减少（低血容量）较为常见，这可能进一步影响血压等生理指标。更为严重的是，若使用不当，停药后可能出现ICP继发性急性反弹，即ICP在短时间内显著升高，严重威胁患者健康^[20]。因此，在采用甘露醇脱水疗法治疗时，需密切监测患者生理状态，预防潜在并发症。

费舟等^[21]纳入12例符合入组标准的颅脑损伤伤员，使用自主研制的EIT动态监护仪，在甘露醇脱水过程中连续监测电阻抗一维指标与二维图像变化，并记录伤员排尿量和液体摄入量。该研究旨在探究甘露醇脱水疗法治疗创伤性脑水肿时脑部电阻抗变化规律，以及EIT对其脱水功效的监护作用。该研究结果显示，在48次脱水过程中，颅内液体量变化与电阻抗一维指标变化呈负相关，二维图像也相应改变。研究表明，EIT可动态监测脑含水量改变，有助于判别甘露醇脱水疗法治疗效果和指导拟定治疗方案，有望成为颅内病变脑含水量监测的有效方法。

随着临床研究的深入，YANG等^[9]对比EIT与ICP在反映脑水肿相关脑含水量变化上的关系，旨在探讨EIT用于监测脑水肿发展的可行性。研究纳入40例脑出血患者，在甘露醇脱水治疗时同步进行EIT和ICP监测，计算EIT图像的平均重建阻抗值（average reconstructed impedance value, ARIV）并与ICP比较。其结果显示，脱水治疗中ARIV和ICP变化呈高度负相关，表明EIT有望成为实时、无创监测脑水肿的成像工具，可用于评估甘露醇脱水效果，指导临床治疗决策。

值得注意的是，ZHU等^[22]已利用EIT通过监测脑灌注对ICP升高进行实时预警。该研究构建了猪颅内高压模型，以有创ICP监测为对照，使用高精度EIT系统采集分析脑灌注EIT图像参数随ICP的变化规律。其结果显示，ICP升高时EIT灌注参数显著下降，在颅内高压状态下二者相关性更强；基于随机森林算法的灌注参数综合模型检测ICP升高的灵敏度、特异性和曲线下面积均超0.9。这意味着在临床应用中，EIT凭借高时间分辨率可及时捕捉脑灌注随ICP变化的动态信息，降低患者因有创监测带来的感染、出血等风险，提高监测的安全性。尤其对于一些病情不稳定、无法耐受有创操作的患者，EIT有望成为重要的ICP监测手段，为早期发现ICP升高并及时干预创造条件。

1.4 术后EIT监护

EIT脑监护技术在临床实践中的广泛应用尚处于发展阶段，许多医疗机构对其应用经验积累不足。同时，术后长时间持续回访需要投入大量的人力、物力以及时间，这在一定程度上限制了术后长时间持续回访性EIT脑监护案例的大规模开展。再者，对于术后患者脑部状况的评估，传统影像学方法已形成较为固定的模式，EIT脑监护技术在推广过程中面临着诸多挑战，导致其在术后长时间持续回访方面的应用未能得到充分的探索与实践。

SATZER等^[23]探究了在恒定刺激设置下，深部脑刺激（deep brain stimulation, DBS）治疗阻抗和电流是否会随时间变化及其变化程度。基于44例帕金森病或特发性震颤患者的79个DBS电极数据，结果显示，阻抗平均每年下降（ 27 ± 12 ）Ω，电流每年增加（ 0.142 ± 0.063 ）mA，表明即使刺激设置恒定，阻抗仍会逐渐下降。

在DBS治疗中，阻抗变化能反映电极组织界面状态，但无法直观呈现组织变化情况。EIT可基于组织电特性差异成像，清晰地展示脑部结构和功能信息。二者结合，能在DBS治疗时利用EIT实时监测脑部组织变化。研究表明，DBS阻抗会随时间下降，通过EIT成像可明确这种下降是否由组织病变导致，为疾病监测提供更全面、准确的信息，及时发现潜在问题。

此外，DBS治疗效果受多种因素影响，现有评估方法存在局限。EIT法观察DBS电极周围组织的电阻抗分布，可以从电生理学和形态学两方面评估判断治疗区域是否精准、范围是否合适。对比治疗前后的EIT图像，可直观了解组织变化，更准确地评估治疗效果，从而为患者制定个性化治疗方案，选择最佳电极位置、刺激参数等。在持续监测过程中，医师可根据患者变化及时调整，提高治疗效果和患者生活质量，推动个性化医疗发展。

2 局限性和未来展望

2.1 颅骨的电流屏蔽特性

OUYPORNKOCHAGORN等^[24]提出颅骨的生物物理特性具有显著的高电阻率特性，形成天然的电流屏蔽层，导致传统EIT系统产生的激励电流难以穿透颅腔，形成完整的容积导体模型。这种物理限制会引发成像灵敏度衰减，并在颅骨与脑组织界面产生电流折射效应，导致深部脑区的阻抗变化信号在传导过程中发生幅值衰减和相位偏移，使系统

对脑实质局部阻抗变化的检测灵敏度降低。此外，成像的空间分辨率受限，在现有电极阵列配置下，EIT系统对颅内结构的空间分辨能力难以识别较小的局灶性病变^[25]。

多年来，通过模拟试验探究如何减轻颅骨对成像结果的影响一直是研究的重点。FERNANDEZ-CORAZZA等^[26]利用参数化EIT测量技术估计头皮、颅骨、密质骨和骨髓骨的电导率，并探究颅骨建模细节对估计结果的影响，构建了5种具有不同颅骨简化程度的有限元头部模型。其结果表明，关闭颅骨孔、使用简化的四层边界元法模型以及忽略脑脊液层累积会使颅骨电导率高估50%~70%。该研究为精确头部建模提供了更准确的电导率估计值，对改进脑电图源定位和经颅电刺激等神经诊断和治疗技术具有重要意义。

为了制作出符合实际情形的颅脑模型，ZHANG等^[27]通过3D打印技术设计并制造出具有真实解剖几何结构和连续变化颅骨电阻率分布的新型头部模型，探究3D打印材料电阻率与成分比例的关系，构建出颅骨模型并验证其电阻率分布和几何精度；搭建包含头皮、颅骨、脑脊液和脑实质的四层头部模型，并对其电阻率稳定性进行验证。该研究涉及的标准化、高效可重复构建方法可应用于脑功能研究相关人体模型的制造，打印出的实物模型也可为EIT测量营造高度贴合实际的试验环境。

改善颅骨电流屏蔽作用对EIT在围手术期图像监护意义重大，此举能降低颅骨对电流的阻碍，增强内部组织电导率测量的准确性，提升成像质量，更精准地反映组织生理病理状态，辅助医师判断病情。未来应聚焦于优化颅骨建模，通过更精细的结构模拟、考虑多种影响因素以及采用先进制造技术来构建更贴合实际的模型。

2.2 优化接触阻抗

由于临床脑EIT监护中皮肤出汗以及导电凝胶的干燥，在较长时间过程中电极接触阻抗很大程度会发生改变，张戈等^[28]研究了二维差分EIT重建中电极接触阻抗、电极面积和电极下边界形状误差的影响，结果表明20%的接触阻抗变化会导致图像出现明显的伪影。

基于上述研究，YANG等^[29]测量并分析了47名受试者在10 Hz~1 MHz范围内头部电极皮肤接触阻抗的频谱特性，并根据电流分布和两个测量电极之间的接触阻抗量化了接触阻抗对脑卒中检测成像的影响。微电极阵列EIT和Ag/AgCl粉末电极的使用

为解决颅骨和皮肤接触阻抗问题提供了新的途径。李衡等^[30]根据10名健康志愿者的阻抗数据,发现了Ag/AgCl粉末电极具有低接触阻抗、高信噪比、更好的均匀性和更高的测量稳定性,为EIT动态监护系统和脑损伤快速检测系统优选出合适的电极与导电膏组合,减少接触阻抗变化对数据质量的影响。YANG等^[31]随后验证Ag/AgCl粉末电极和低黏度导电凝胶的组合可能是脑EIT监护的最佳选择。

围手术期长时间的脑EIT监护过程中,患者很难保持静止,医师和医护人员在执行手术和护理程序的时候也会引起运动干扰。因此,电极连接是否正常也是影响成像效果的关键。HU等^[32]的研究提出了一种通过分离EIT电极的电压差分值来检测故障电极的方法,并基于电压替换和电压位移的方法来补偿故障电极的无效数据。为了避免噪声和干扰可能导致的重构图像质量下降,LI等^[33]评估了基于先验信息的信号处理重构方法的性能并进行模拟实验,其研究表明可以改善脑EIT图像质量,并从某些通道数据质量不佳的测量中恢复颅内扰动。此外,梁文等^[34]和陈晓飞等^[35]提出了基于小波分解的体动干扰实时处理方法来管理脑EIT数据中的头部运动干扰并证实该种方法可以有效恢复信号的连续性,并显著减少图像上的重构伪影。

当前研究致力于通过研发新型电极材料与设计,增大敏感场较弱区域电场强度、减少电极皮肤接触阻抗,提高系统灵敏度;未来要综合考量电极宽度、间距及电极数量等参数,进一步提升电阻抗技术在围手术期图像监护中的准确性与可靠性。

2.3 多模态融合EIT

多模态融合EIT技术作为医学成像领域的创新成果,将EIT与其他成像模态相结合,优势互补,极大提升了成像的精准度与信息丰富度。CT、MRI等传统成像技术能清晰展现高分辨率的解剖结构,可助力EIT更精准定位功能异常区域;EIT提供的功能信息,能够补充传统成像技术对病变功能状态判断的不足^[36-37]。

对于围手术期需要连续实时监测脑组织氧合程度的场景,近红外光谱仪(near infrared spectrum instrument, NIRS)技术通过检测前额处含氧和脱氧血红蛋白的独特吸收光谱,计算出混合静脉血的血氧饱和度,反映脑氧供需平衡。EIT通过对大脑组织电阻抗特性的分析,提供有关脑血流、水肿等的信息,与NIRS反映的脑氧合信息相互补充印证;还可结合脑电技术记录大脑皮质的电活动,辅

助判断大脑的功能状态、监测麻醉深度及识别癫痫等异常脑电活动^[38]。

跨模态方法已经成为EIT临床监护研究的一个重要趋势。医师可借助该融合技术,在术前依据不同模态提供的综合信息,全面评估患者脑部病变与正常组织的功能、代谢及电学特性差异,从而制定更精准的手术规划,确定最佳手术入路,最大程度避免损伤重要脑功能区;术中可实时动态监测大脑状态,及时调整手术操作,采取如改善脑灌注、调整麻醉深度等措施,降低术后神经功能障碍等并发症的发生风险;术后通过持续的多模态融合监测,能对患者脑功能的恢复情况进行跟踪评估,为后续康复治疗方案的制定和调整提供科学依据,助力患者更好地恢复神经功能。

2.4 深度学习EIT

近年来人工智能领域蓬勃发展,在诸多领域掀起了创新变革的浪潮,为各行业的发展注入了强劲动力。因颅脑手术的高风险性,对大脑功能实施实时、精准的监测至关重要,深度学习赋能的EIT技术具有巨大的潜力价值。传统EIT虽可提供脑部组织的电学特性相关信息,但其具有成像分辨率较低、易受噪声干扰等固有缺陷,限制其在围手术期颅脑监护场景中的广泛应用。深度学习EIT技术则通过引入前沿的深度学习算法来打破传统临床测量的应用瓶颈^[39-40]。

深度学习不仅可以通过单神经网络直接重建,如基于传统神经网络、卷积神经网络等,直接建立测量数据与电导率分布的关联;还能与传统算法联合重建,结合两者优势,提高重建的稳定性和准确性。施艳艳等^[41]提出一种基于改进密集全卷积神经网络的脑出血图像重建方法来构建逼近真实颅脑结构的三层模型。其网络结构包含卷积块、密集卷积层等多个部分,能从不同尺度的数据获取信息,提升电导率特征提取能力,缓解梯度消失问题。该研究仿真生成包含不同形状和位置脑出血目标物的训练及验证数据集,采用二元交叉熵损失函数,利用自适应矩估计算法训练网络。结果表明该方法在重建颅内脑出血电导率分布方面性能优良,重建图像质量高,受噪声和模型形变影响小,优于全连接神经网络和卷积神经网络等。

未来在临床围手术期脑图像监护环境下,单神经网络可直接重建、利用径向基函数人工神经网络和卷积神经网络等,凭借其非线性映射能力直接建立测量数据与脑电导率分布联系,从而有望提升实

时监测成像分辨率；多网络混合重建则整合不同神经网络特性，通过先重建再滤波、结合人工神经网络与U-Net或转移学习等方式，提高图像处理算法在噪声环境下的鲁棒性，为围手术期脑图像监护提供可靠依据^[42-43]。

3 结论

EIT在围手术期床旁实时动态监测领域的临床价值已获得医学验证，其应用为围手术期个体化医疗提供了全新的技术支撑。该技术通过多维度生理信息的动态捕获，在术前风险分层、术中器官功能精准调控及术后并发症预警等围手术期管理的全流程中发挥重要作用。针对神经外科领域的特殊需求，未来研究应聚焦于建立标准化的监测参数体系，通过多中心临床研究明确脑血流动力学参数、组织氧代谢等关键参数的动态变化阈值，并制定多中心临床应用标准。随着深度学习算法的迭代升级与新型柔性传感器材料的突破，EIT技术有望发展成为具备高时空分辨率的床旁脑功能监测工具，为急性脑损伤的早期干预提供实时影像学依据，推动神经外科精准医疗模式的革新。

参考文献

- [1] ROWE D G, CALLAGHAN E O, YOO S, et al. Perioperative trends in distress among cancer patients: a systematic review and meta-analysis[J]. *Cancer Med*, 2025, 14(6): e70456.
- [2] 郝小军, 张超, 杨晨, 等. CT灌注参数和围手术期临床资料用于预测成年烟雾病患者接受联合搭桥术后发生脑过度灌注综合征[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(09): 1300-1305.
- [3] YOUSSEF BABY L, BEDRAN R S, DOUMIT A, et al. Past, present, and future of electrical impedance tomography and myography for medical applications: a scoping review[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1486789.
- [4] SCARAMUZZO G, PAVLOVSKY B, ADLER A, et al. Electrical impedance tomography monitoring in adult ICU patients: state-of-the-art, recommendations for standardized acquisition, processing, and clinical use, and future directions[J]. *Crit Care*, 2024, 28(1): 377.
- [5] WANG W C, LI W C, LIU B Y, et al. Temperature dependence of dielectric properties of blood at 10 Hz-100 MHz[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 1053233.
- [6] WANG W C, ZHU M X, LIU B Y, et al. Temperature and frequency dependence of human cerebrospinal fluid dielectric parameters[J]. *Sensors (Basel)*, 2024, 24(22): 7394.
- [7] ZHANG W R, JIAO Y, ZHANG T, et al. Early detection of acute ischemic stroke using Contrast-enhanced electrical impedance tomography perfusion[J]. *Neuroimage Clin*, 2023, 39: 103456.
- [8] YAN X H, WANG Y, LI W C, et al. A preliminary study on the application of electrical impedance tomography based on cerebral perfusion monitoring to intracranial pressure changes[J]. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1390977.
- [9] YANG B, LI B, XU C H, et al. Comparison of electrical impedance tomography and intracranial pressure during dehydration treatment of cerebral edema[J]. *Neuroimage Clin*, 2019, 23: 101909.
- [10] 王瑞康, 张兵, 王巧红, 等. 脑电阻抗监测技术在急性脑梗死患者中的应用进展[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2020, 23(5): 458-461.
- [11] OUPORNKOCHAGORN T, POLYDORIDES N, MCCANN H. Towards continuous EIT monitoring for hemorrhagic stroke patients[J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1157371.
- [12] DAI M, LI B, HU S J, et al. *In vivo* imaging of twist drill drainage for subdural hematoma: a clinical feasibility study on electrical impedance tomography for measuring intracranial bleeding in humans[J]. *PLoS One*, 2013, 8(1): e55020.
- [13] LI Y D, ZHANG D, LIU B Y, et al. Noninvasive cerebral imaging and monitoring using electrical impedance tomography during total aortic arch replacement[J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2018, 32(6): 2469-2476.
- [14] GUO Y T, YANG C, ZHU W J, et al. Electrical impedance tomography provides information of brain injury during total aortic arch replacement through its correlation with relative difference of neurological biomarkers[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 14236.
- [15] SIEMIONOW V, YUE G H, BARNETT G H, et al. Measurement of tissue electrical impedance confirms stereotactically localized internal segment of the globus pallidus during surgery[J]. *J Neurosci Methods*, 2000, 96(2): 113-117.
- [16] SOLEIMANI M, DORN O, LIONHEART W R B. A narrow-band level set method applied to EIT in brain for cryosurgery monitoring[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2006, 53(11): 2257-2264.
- [17] KHURSHID S, HANLEY A. Brain freeze: cryoablation of typical atrial flutter in a patient with a deep brain stimulator[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2022, 64(3): 549-550.
- [18] MAROON J C, ONIK G, QUIGLEY M R, et al. Cryosurgery re-visited for the removal and destruction of brain, spinal and orbital tumours[J]. *Neurol Res*, 1992, 14(4): 294-302.
- [19] KARAMIAN A, SEIFI A, LUCKE-WOLD B. Comparing the effects of mannitol and hypertonic saline in severe traumatic brain injury patients with elevated intracranial pressure: a systematic review and meta-analysis[J]. *Neurol Res*, 2024, 46(9): 883-892.
- [20] CHONG S L, ZHU Y N, WANG Q, et al. Clinical outcomes of hypertonic saline vs mannitol treatment

综合评述

- among children with traumatic brain injury[J]. *JAMA Netw Open*, 2025, 8(3): e250438.
- [21] 费舟, 李兵, 付峰, 等. 创伤性脑水肿甘露醇脱水治疗电阻抗断层成像实时监测的研究[J]. *临床神经外科杂志*, 2010, 7(1): 3-6.
- [22] ZHU M X, LI J Y, CAI Z X, et al. A novel method for detecting intracranial pressure changes by monitoring cerebral perfusion via electrical impedance tomography[J]. *Fluids Barriers CNS*, 2025, 22(1): 10.
- [23] SATZER D, YU H Y, WELLS M, et al. Deep brain stimulation impedance decreases over time even when stimulation settings are held constant[J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 584005.
- [24] OUPORNKOCHAGORN T, OUPORNKOCHAGORN S. *In vivo* estimation of head tissue conductivities using bound constrained optimization[J]. *Ann Biomed Eng*, 2019, 47(7): 1575-1583.
- [25] KE X Y, HOU W, HUANG Q, et al. Advances in electrical impedance tomography-based brain imaging[J]. *Mil Med Res*, 2022, 9(1): 10.
- [26] FERNANDEZ-CORAZZA M, TUROVETS S, LUU P, et al. Skull modeling effects in conductivity estimates using parametric electrical impedance tomography[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018, 65(8): 1785-1797.
- [27] ZHANG J, YANG B, LI H T, et al. A novel 3D-printed head phantom with anatomically realistic geometry and continuously varying skull resistivity distribution for electrical impedance tomography[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 4608.
- [28] 张戈, 代萌, 徐灿华, 等. 电阻抗断层成像系统的非正常连接电极实时检测方法[J]. *医疗卫生装备*, 2014, 35(11): 1-4,162.
- [29] YANG L, DAI M, XU C H, et al. The frequency spectral properties of electrode-skin contact impedance on human head and its frequency-dependent effects on frequency-difference EIT in stroke detection from 10Hz to 1MHz[J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0170563.
- [30] 李衡, 董秀珍, 祁琦, 等. 脑部电阻抗测量中电极与导电膏性能对比研究[J]. *医疗卫生装备*, 2017, 38(1): 1-5.
- [31] YANG L, LI H, DING J J, et al. Optimal combination of electrodes and conductive gels for brain electrical impedance tomography[J]. *Biomed Eng Online*, 2018, 17(1): 186.
- [32] HU C L, LIN Z Y, HU S Y, et al. Compensation for electrode detachment in electrical impedance tomography with wearable textile electrodes[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(24): 9575.
- [33] LI H T, CHEN R Q, XU C H, et al. Combing signal processing methods with algorithm priori information to produce synergistic improvements on continuous imaging of brain electrical impedance tomography[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 10086.
- [34] 梁文, 胡世颉, 刘学超, 等. 基于小波包分解的脑部EIT测量干扰分析与抑制方法研究[J]. *医疗卫生装备*, 2022, 43(10): 17-22.
- [35] 陈晓飞, 张戈, 王辉林. 基于小波分解的颅脑动态电阻抗监测中体动干扰实时处理方法研究[J]. *医疗卫生装备*, 2023, 44(8): 1-9.
- [36] LI Z A, ZHANG J, LIU D, et al. CT image-guided electrical impedance tomography for medical imaging[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020, 39(6): 1822-1832.
- [37] 闫丹丹, 沈圣远, 陈会. 基于磁共振电阻抗成像技术的3维脑病变检测仿真[J]. *高电压技术*, 2015, 41(4): 1372-1376.
- [38] XU J W, KONIJNENBURG M, SONG S, et al. A 665 μ W silicon photomultiplier-based NIRS/EEG/EIT monitoring ASIC for wearable functional brain imaging[J]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2018, 12(6): 1267-1277.
- [39] STRAUSS T, KHAN T. Implicit solutions of the electrical impedance tomography inverse problem in the continuous domain with deep neural networks[J]. *Entropy (Basel)*, 2023, 25(3): 493.
- [40] YU H, LIU H Y, LIU Z, et al. High-resolution conductivity reconstruction by electrical impedance tomography using structure-aware hybrid-fusion learning[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2024, 243: 107861.
- [41] 施艳艳, 王奕珺, 李亚婷, 等. 基于改进密集全卷积神经网络的脑出血图像重建方法研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2024, 41(6): 1185-1194.
- [42] ZHANG T, TIAN X, LIU X C, et al. Advances of deep learning in electrical impedance tomography image reconstruction[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 1019531.
- [43] 张里园, 李磊, 刘学超, 等. 基于深度学习的电阻抗断层成像图像重建算法研究综述[J]. *医疗卫生装备*, 2024, 45(4): 98-103.