

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.021

电阻抗断层成像技术在医学应用中的研究进展

程秋菊¹, 吴小珍¹, 李志伟², 田航¹

(1. 广州医科大学 附属妇女儿童医疗中心麻醉科, 广东 广州 510623;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:电阻抗断层成像(EIT)是一种基于生物组织电导率差异的功能性成像技术,具有无辐射、实时动态、便携等优势,能够动态监测肺部功能,有利于辅助呼吸系统疾病的早期诊断和保护性通气策略的决策,同时在肿瘤早期筛查中具有广阔的临床应用前景。系统阐述了EIT的成像原理、涉及电极配置和图像重建算法等关键技术要素、涵盖各专科的具体临床适应症以及国际最新研究进展,并深入探讨了包括三维成像技术创新和人工智能深度整合在内的未来重点发展方向。

关键词:电阻抗断层成像;成像原理;临床应用;发展趋势

中图分类号:R445 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)06-0115-05

Research Progress on Medical Applications of Electrical Impedance Tomography

CHENG Qiuju¹, WU Xiaozhen¹, LI Zhiwei², TIAN Hang¹

(1. Department of Anesthesiology of Guangzhou Women & Children's Medical Center, Guangzhou Medical University,

Guangzhou 510623, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics

Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:Electrical impedance tomography (EIT), a functional imaging technology based on the conductivity differences of biological tissues with advantages of non-radiation, real-time dynamic monitoring capability and portability, can dynamically assess pulmonary function, which facilitates early diagnosis of respiratory diseases and supports decision-making for protective ventilation strategies, with broad clinical application prospects in the early screening of tumors. This review systematically elaborates the imaging principles of EIT, key technical elements including electrode configuration and image reconstruction algorithms, specific clinical applications across various medical specialties, and the latest international research advances. And its future research directions focusing on innovations in three-dimensional imaging technology and deep integration with artificial intelligence is discussed in depth as well.

Keywords: electrical impedance tomography; principles of electrical impedance tomography; clinical applications; development trend

0 引言

医学影像学技术是现代疾病诊断的重要工具。电阻抗断层成像(electrical impedance tomography, EIT)作为一种基于生物电阻抗原理的新型功能成像技术,以其无辐射、设备便携、操作简便和可连续监测等优势,在临床医学领域展现出广阔的应用前景,特别是在肺部疾病诊疗和呼吸管理方面取得了显著成效。然而,与传统成熟的医学影像技术相比,EIT在空间分辨率方面仍存在不足,这需要通过优化电极阵列设计和改进图像重建算法等技术创新来提升。本文系统阐

述了EIT的成像原理、最新临床应用进展,并对其未来发展方向进行了展望。

早期准确诊断对疾病治疗至关重要。目前临床广泛应用的医学影像技术包括X线、超声、磁共振成像(MRI)和计算机断层扫描(CT)等。这些技术普遍存在辐射暴露、设备昂贵、操作复杂或结果受操作者经验影响等局限性。近年来,生物医学工程领域的研究重点逐渐转向开发非侵入性早期诊断技术。EIT作为一种新兴的无创、便携式成像方法,凭借其无辐射、设备简单、操作成本低、可连续监测等独特优势正逐步被应用于临床实践^[1-2]。本文从EIT的基本原理出发,详细评

基金项目:广州市科技计划项目(2023A03J0862)

第一作者简介:程秋菊(1982—),女,湖北广水人,主任医师,硕士,研究方向为麻醉学与疼痛治疗,chengqiuju2007@163.com。

通信作者简介:田航(1973—),男,辽宁大连人,主任医师,硕士生导师,研究方向为自体血回收及微针治疗,tianhang2544@126.com。

述其在临床医学中的应用现状,并探讨未来发展趋势,为进一步拓展 EIT 的临床应用提供参考。

1 EIT 成像原理

电阻抗断层成像技术起源于 20 世纪 60 年代到 70 年代的电阻抗分析研究,其原理基于生物组织在不同电刺激频率下表现出的特异性阻抗特性^[3-4]。作为一种功能性医学成像技术,EIT 通过向人体组织注入安全交流电(50~250 kHz,3~10 mA)并测量表面电位响应,利用组织间电导率和介电常数的差异重建内部阻抗分布图像^[5-7]。与 CT、MRI 等结构成像相比,EIT 虽然空间分辨率较低,但能实时反映组织功能状态变化,当阻抗差异显著时图像对比度更为明显。

电阻抗断层成像系统的核心架构是一个高精度的多通道阻抗测量装置,其成像性能主要受两大关键技术要素的影响^[8]。在硬件配置方面,标准的 EIT 设备通常采用 8~32 个电极组成阵列系统,这些电极被集成在可调节的电极带中,配合特制导电凝胶的应用,能够有效维持电极-皮肤界面的稳定性,从而显著降低因患者移动导致的运动伪影^[9]。在软件算法方面,图像重建技术经历了从传统迭代方法到现代人工智能的演进,其中牛顿-拉夫森迭代算法作为经典方法被广泛应用^[10],而近年来以 GOMES 等^[11]为代表的学者开发的基于自动编码器和极限学习机深度融合的神经网络算法,通过创新性地应用反向预测机制,将 EIT 图像重建技术推向了新的高度。这些持续的技术革新不仅提升了 EIT 系统的成像质量,更为其在临床实践中的广泛应用奠定了坚实基础。

2 EIT 在临床医学中的应用

该技术最初主要用于重症监护病房的肺部功能监测,现已逐步发展至心脏功能评估和神经活动监测等多个医学领域。在肺部疾病诊疗方面,EIT 最重要的临床应用是通气/灌注成像,该技术能够提供反映肺部病理状态的关键功能信息,在急性呼吸窘迫综合征、气胸和肺栓塞等疾病的诊断和监测中展现出独特价值。值得注意的是,近年来 EIT 的应用范围已延伸至肿瘤诊断领域,特别是在乳腺癌和前列腺癌的检测中取得了突破性进展。这种技术的持续发展使其在临床医学中的应用前景日益广阔。

2.1 肺通气检测

电阻抗断层成像(EIT)在重症监护领域具有

重要临床应用价值,尤其在机械通气患者的区域性通气监测方面表现突出^[12]。该技术通过无创方式评估潮气量,其理论基础建立在呼气末肺阻抗变化($\Delta EELI$)与呼气末肺容积(EELV)的高度相关性上,使得阻抗信号可有效转换为容积参数。临床研究表明,EIT 能精确捕捉体位改变(如从床旁转移到轮椅)导致的肺背侧通气量变化^[13],并能识别慢性阻塞性肺疾病患者的异常通气分布特征^[14]。此外,EIT 可全面监测包括用力呼吸和安静潮气呼吸在内的各种呼吸模式。此外,EIT 提供的动态功能信息与 CT 显示的结构影像具有良好的互补性,二者联合应用可同时获取肺部解剖结构和通气功能的完整信息,为临床诊断提供更全面的依据^[15]。

2.2 肺灌注评估

肺灌注作为动脉血输送至肺毛细血管床的重要生理过程,其临床评估价值与通气监测同等重要。XU 等^[16]系统阐述了 EIT 在肺灌注评估中的应用方法,重点分析了搏动法和电导率对比剂盐水团注法这两种主流技术及其最新进展。其中,电导率对比剂团注法通过快速注射高渗盐水并利用屏气状态下稳定的胸腔阻抗环境,通过盐水引起的阻抗变化可准确反映肺部血流动力学特征。临床实践证实,EIT 技术在灌注评估方面具有显著优势;SAFAEE 等^[17]成功运用该技术评估了一例严重呼吸困难患者的肺灌注功能;HE 等^[18]研究证明 EIT 获取的区域性通气/灌注参数能有效区分急性呼吸衰竭的 3 种主要病因。值得注意的是,KIRCHER 等^[19]开发的指示剂增强 EIT 技术进一步提高了灌注成像的空间稳定性,使该技术即使在复杂病理状态下仍能精确追踪肺部亚区域的灌注动态变化。这些研究结果充分证实了 EIT 技术在肺灌注功能评估方面具有重要的临床应用价值。

2.3 通气/灌注比值监测

通气/灌注(ventilation/perfusion, V/Q)比例失调是新冠肺炎中重度患者和急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患者的典型病理生理特征,这种异常可能导致严重的临床后果。EIT 技术通过量化局部肺泡通气量与血流量的比值,为区域性通气/灌注匹配度监测提供了创新性解决方案^[20]。SPINELLI 等^[21]的研究证实,采用 5% 盐水团注法的 EIT 测量可准确评估机械通气 ARDS 患者的通气/灌注状态,该技术不

仅能识别高危患者,还能为个体化治疗提供重要依据。在呼吸衰竭管理中,EIT的独特价值体现在:1)深入揭示气体交换障碍的病理机制;2)实时评估呼吸机参数调整(如 PEEP 设置、俯卧位通气)和治疗干预(如一氧化氮疗法)对区域通气/灌注的影响^[22]。目前 EIT 主要采用团注法和搏动法两种测量技术,其中团注法因与 SPECT 和 PET 成像结果高度一致,已被确立为评估通气/灌注匹配度的金标准^[23]。

2.4 呼气末正压滴定

辅助通气中的呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)滴定较控制性通气更具挑战性,主要受自主呼吸用力变异性大、呼吸顺应性评估困难及血流动力学不稳定等因素影响^[24]。目前临床最常用的是通过递减 PEEP 试验评估局部顺应性变化的“过度膨胀-肺塌陷”法,该方法能有效分析 PEEP 对区域性通气分布的影响^[25]。循证医学证据显示,基于该方法的个体化 PEEP 策略可显著改善 ARDS 患者的呼吸力学指标,并可能带来临床预后获益^[26]。最新研究进展表明:首先,通过监测不同 PEEP 水平下的区域性吸气峰流量参数,可实现自主呼吸期间肺力学特征的量化评估^[27];其次,EIT 技术与动态跨肺压监测的联合应用,能够精确定义压力支持通气中预防肺塌陷同时避免过度膨胀的最佳 PEEP 水平。除传统递减 PEEP 试验外,研究者正在探索基于呼气末肺阻抗变化的创新型 PEEP 设定方法^[28]。这些技术进步为机械通气患者的精细化呼吸支持提供了新的可能性。

2.5 气胸诊断

气胸作为危重症患者的重要并发症,在急性呼吸窘迫综合征(ARDS)患者中的发病率可达 8%~10%。近年研究表明,EIT 在床旁气胸检测中展现出显著优势^[29]。MIEDEMA 等^[30]首次系统揭示了气胸发生前的特征性肺充气模式改变,为早期预警提供了重要依据;YANG 等^[31]研究进一步证实,腹侧区域性通气缺损是 EIT 诊断气胸的特异性影像学标志。此外,GIRRBACH 等^[32]通过 CT 对照研究,验证了 EIT 在创伤后气胸诊断中的可靠性,这为发展 EIT-CT 多模态诊断方案奠定了科学基础。这些研究成果提示 EIT 在气胸早期诊断中的重要临床价值。

2.6 新冠肺炎相关 ARDS 的鉴别诊断

急性呼吸窘迫综合征(ARDS)作为危重症患

者的高致死率肺部疾病,在新冠肺炎患者中表现出独特的病理生理特征。研究表明,新冠肺炎相关 ARDS 患者相较于其他病因导致的 ARDS 患者具有显著差异:前者需要更高的最佳中位 PEEP 水平(约高 2~4 cmH₂O),且在较高 PEEP 设置时肺过度膨胀风险更低^[33];此外,两类患者在呼吸系统顺应性等关键呼吸力学参数上也存在明显区别^[34]。基于这些特征性差异,EIT 技术不仅能够通过实时监测区域性通气分布来实现新冠肺炎相关 ARDS 的鉴别诊断,还能对 ARDS 患者的肺部病理演变过程进行长期动态观察,为临床治疗决策提供重要依据。此外,EIT 在创伤性 ARDS 的鉴别诊断中同样展现出独特的应用价值。

2.7 肺栓塞诊断

肺栓塞是一种以肺动脉及其分支急性阻塞为特征的危重症,作为新冠肺炎(COVID-19)患者血栓栓塞性并发症的主要表现形式,其早期诊断与干预对改善患者预后至关重要。近期研究进展表明:NGUYEN 等^[35]开发的创新性生物阻抗信号重建算法显著提升了 EIT 对肺栓塞严重程度的评估精度;多项临床研究证实,EIT 作为无创床旁监测工具,在急性肺栓塞的实时诊断和治疗效果随访中具有独特价值^[36]。特别值得注意的是,高渗盐水团注法与 EIT 的联合应用展现出良好的诊断效能。WANG 等^[37]报道的典型病例显示该方法能为高危肺栓塞患者的临床决策提供关键依据;PRINS 等^[38]进一步指出,这种联合诊断策略具有广阔的临床应用前景,但尚需更多研究验证其可靠性。这些研究成果为肺栓塞的早期诊断和精准治疗提供了新的技术选择。

2.8 肿瘤诊断

EIT 在肿瘤诊断领域展现出独特优势,其原理基于恶性组织与正常组织间显著的电阻抗差异(可达 20~40 倍)^[39]。在前列腺癌诊断方面,BORSIC 等^[40]开发的经直肠 EIT(TREIT)技术有效克服了传统经直肠超声的局限性,能准确区分良恶性组织的电特性差异,尤其对大肿瘤的初筛具有重要价值;TAN 等^[41]的研究进一步证实,EIT 可作为近距离放射治疗的精确定位辅助手段。EIT 不仅适用于前列腺癌筛查,在乳腺癌早期检测中也展现出良好的应用前景。尽管乳房 X 线摄影仍是标准方法,但其存在 7%~9% 的假阳性率^[42],而 AKHTARI-ZAVARE 等^[43]的研究表明,电阻抗计算机化乳腺 X 线摄影(MEIK)系统的检

测灵敏度与传统方法相当。值得注意的是,LEE等^[44]研发的宽带 EIT 集成电路(9.6 mW/通道,10 MHz)通过乳腺癌模型验证,实现了高精度、低相位误差的成像性能,为乳腺癌早期检测提供了新的技术选择。这些进展凸显了 EIT 作为补充筛查工具的临床潜力。

3 结语

电阻抗断层成像技术凭借其无辐射、实时动态监测等独特优势,已在重症监护、呼吸管理和肿瘤诊断等多个医学领域展现出重要应用价值。然而,该技术仍面临若干关键性技术挑战。

1) 三维成像技术的突破

当前临床应用的二维 EIT 系统存在明显的局限性:a)单平面电极阵列仅提供单一断面成像,难以实现全肺容积覆盖;b)心肺运动易产生伪影影响 PEEP 试验等关键评估的准确性。发展三维 EIT 技术已成为必然趋势,通过双电极带同步数据采集结合先进重建算法,不仅可提高病灶定位精度,还能显著改善 V/Q 评估的可靠性。

2) 人工智能融合创新

人工智能与 EIT 技术的深度融合为突破传统成像限制提供了创新解决方案;通过开发基于深度神经网络的图像重建算法可显著提升成像质量;利用智能分析技术实现肺轮廓自动识别、信号去噪和伪影校正的自动化处理;同时优化数据分析流程以增强临床实用性。建立标准化数据集是推动人工智能在 EIT 领域应用的关键基础。这些技术进步将极大拓展 EIT 的临床应用范围,为精准医疗实践提供新的技术支撑。

参考文献:

- [1] FRANCHINEAU G, JONKMAN A H, PIQUILLOUD L, et al. Electrical impedance tomography to monitor hypoxemic respiratory failure [J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2024, 209(6): 670-682.
- [2] GRIECO D L, DELLE CESE L, MENGA L S, et al. Physiological effects of awake prone position in acute hypoxemic respiratory failure [J]. Critical Care, 2023, 27(1): 315.
- [3] SHI Y, YANG Z G, XIE F, et al. The research progress of electrical impedance tomography for lung monitoring [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 726652.
- [4] LI Z, QIN S J, CHEN C, et al. Emerging trends and hot spots of electrical impedance tomography applications in clinical lung monitoring [J]. Frontiers in Medicine, 2022, 8: 813640.
- [5] QIN S J, YAO Y L, XU Y Q, et al. Characteristics and topic trends on electrical impedance tomography hardware publications [J]. Frontiers in Physiology, 2022, 13: 1011941.
- [6] TAN Z J, LU S Y, YANG L, et al. Research trends and hotspots of medical electrical impedance tomography algorithms: a bibliometric analysis from 1987 to 2021 [J]. Cureus, 2023, 15(11): e49700.
- [7] ADLER A, HOLDER D. Electrical impedance tomography: methods, history and applications [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- [8] MAURI T, ALBAN L, TURRINI C, et al. Optimum support by high-flow nasal cannula in acute hypoxemic respiratory failure: effects of increasing flow rates [J]. Intensive Care Medicine, 2017, 43(10): 1453-1463.
- [9] ZAMORA-ARELLANO F, LÓPEZ - BONILLA O R, GARCÍA - GUERRERO E E, et al. Development of a portable, reliable and low - cost electrical impedance tomography system using an embedded system [J]. Electronics, 2021, 10(1): 15.
- [10] WISSE J J, GOOS T G, JONKMAN A H, et al. electrical impedance tomography as a monitoring tool during weaning from mechanical ventilation: an observational study during the spontaneous breathing trial [J]. Respiratory Research, 2024, 25(1): 179.
- [11] GOMES J C, PEREIR J M S, DE SANTANA M A, et al. Deep learning for data analytics: foundations, biomedical applications and challenges [M]. Waltham: Academic Press, 2020.
- [12] STRODTHOFF N, STRODTHOFF C, BECHER T, et al. Inferring respiratory and circulatory parameters from electrical impedance tomography with deep recurrent models [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2021, 25(8): 3105-3111.
- [13] YUAN S Y, HE H W, LONG Y, et al. Rapid dynamic bedside assessment of pulmonary perfusion defect by electrical impedance tomography in a patient with acute massive pulmonary embolism [J]. Pulmonary Circulation, 2021, 11(1): 1-3.
- [14] FRERICHS I, LASAROW L, STRODTHOFF C, et al. Spatial ventilation inhomogeneity determined by electrical impedance tomography in patients with chronic obstructive lung disease [J]. Frontiers in Physiology, 2021, 12: 762791.
- [15] CUI Z Q, LIU X Y, QU H T, et al. Technical principles and clinical applications of electrical impedance tomography in pulmonary monitoring [J]. Sensors, 2024, 24(14): 4539.

- [16] XU M R, HE H W, LONG Y. Lung perfusion assessment by bedside electrical impedance tomography in critically ill patients [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 748724.
- [17] SAFAEI FAKHR B, ARAUJO MORAIS C C, DESANTIS SANTIAGO R R, et al. Bedside monitoring of lung perfusion by electrical impedance tomography in the time of COVID - 19 [J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2020, 125(5): e434-e436.
- [18] HE H W, CHI Y, LONG Y, et al. Three broad classifications of acute respiratory failure etiologies based on regional ventilation and perfusion by electrical impedance tomography: a hypothesis - generating study [J]. *Annals of Intensive Care*, 2021, 11(1): 134.
- [19] KIRCHER M, ELKE G, STENDER B, et al. Regional lung perfusion analysis in experimental ARDS by electrical impedance and computed tomography [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2021, 40(1): 251-261.
- [20] SOMHORST P, GOMMERS D, ENDEMAN H. Advanced respiratory monitoring in mechanically ventilated patients with coronavirus disease 2019 - associated acute respiratory distress syndrome [J]. *Current Opinion in Critical Care*, 2022, 28(1): 66-73.
- [21] SPINELLI E, KIRCHER M, STENDER B, et al. Unmatched ventilation and perfusion measured by electrical impedance tomography predicts the outcome of ARDS [J]. *Critical Care*, 2021, 25(1): 192.
- [22] PELLEGRINI M, SOUSA M L A, DUBO S, et al. Impact of airway closure and lung collapse on inhaled nitric oxide effect in acute lung injury: an experimental study [J]. *Annals of Intensive Care*, 2024, 14(1): 149.
- [23] BLUTH T, KISS T, KIRCHER M, et al. Measurement of relative lung perfusion with electrical impedance and positron emission tomography: an experimental comparative study in pigs [J]. *British Journal of Anaesthesia*, 2019, 123(2): 246-254.
- [24] STAMATOPOULOU V, AKOUMIANAKI E, VAPORIDI K, et al. Driving pressure of respiratory system and lung stress in mechanically ventilated patients with active breathing [J]. *Critical Care*, 2024, 28(1): 19.
- [25] JONKMAN A H, ALCALA G C, PAVLOVSKY B, et al. Lung recruitment assessed by electrical impedance tomography (RECRUIT): a multicenter study of COVID-19 acute respiratory distress syndrome [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2023, 208(1): 25-38.
- [26] SONGSANGVORN N, XU Y H, LU C, et al. Electrical impedance tomography-guided positive end-expiratory pressure titration in ARDS: a systematic review and meta-analysis [J]. *Intensive Care Medicine*, 2024, 50(5): 617-631.
- [27] HEINES S J H, DE JONGH S A M, DE JONGH F H C, et al. A novel positive end-expiratory pressure titration using electrical impedance tomography in spontaneously breathing acute respiratory distress syndrome patients on mechanical ventilation: an observational study from the MaastrICU cohort [J]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2025, 39(1): 127-139.
- [28] FRERICHS I, SCHÄDLER D, BECHER T. Setting positive end-expiratory pressure by using electrical impedance tomography [J]. *Current Opinion in Critical Care*, 2024, 30(1): 43-52.
- [29] KALLIO M, RAHTU M, VAN KAAM A H, et al. Electrical impedance tomography reveals pathophysiology of neonatal pneumothorax during NAVA [J]. *Clinical Case Reports*, 2020, 8(8): 1574-1578.
- [30] MIEDEMA M, ADLER A, MCCALL K E, et al. Electrical impedance tomography identifies a distinct change in regional phase angle delay pattern in ventilation filling immediately prior to a spontaneous pneumothorax [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2019, 127(3): 707-712.
- [31] YANG Y Y, HE H W, 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]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2023, 37(2): 629-637.
- [32] GIRRBACH F, LANDECK T, SCHNEIDER D, et al. Detection of posttraumatic pneumothorax using electrical impedance tomography - an observer-blinded study in pigs with blunt chest trauma [J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227518.
- [33] DI PIERRO M, GIANI M, BRONCO A, et al. Bedside selection of positive end expiratory pressure by electrical impedance tomography in patients undergoing veno-venous extracorporeal membrane oxygenation support: a comparison between COVID-19 ARDS and ARDS from other etiologies [J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2022, 11(6): 1639.
- [34] PERIER F, TUFFET S, MARAFFI T, et al. Electrical impedance tomography to titrate positive end-expiratory pressure in COVID - 19 acute respiratory distress syndrome [J]. *Critical Care*, 2020, 24(1): 678.

(下转第 149 页)

- compatibility[C]//ASME Turbo Expo 2004; Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria; 2008:127-137.
- [9] 魏巍,任思源,达兴亚. 边界层吸入对方转圆进气道、风扇耦合影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9): 1943-1953.
- [10] CUI R, LI Q S, PAN T Y, et al. Streamwise-body-force-model for rapid simulation combining internal and external flow fields [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1205-1212.
- [11] 夏欢,王英锋. 低雷诺数条件对风扇/压气机效率的影响[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(3): 11-15.
- [12] 王志强,沈锡钢,胡骏,等. 大涵道比涡扇发动机风扇转子叶片优化[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2202-2209.
- [13] 郑覃,杨小贺,叶俊,等. 内涵工况对风扇增压级双涵匹配的影响[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 177-192.
- [14] 张皓光,吴俊,楚武利,等. 进口畸变对轴流压气机流场影响的全通道数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1056-1063.
- [15] 赵清伟,孟德君,陈业辉. 压力畸变对某三级风扇性能影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(12): 111-120.
- [16] XU L. Assessing viscous body forces for unsteady calculations[C]//ASME Turbo Expo 2002; Power for Land, Sea, and Air, Amsterdam; The Netherlands; 2009: 323-331.
- [17] XIE T B, URANGA A. Capturing aero-propulsive coupling effects with a body-force propulsor model[C]//AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia; AIAA, 2021: 3456.
- [18] 刘超,宁方飞. 黏性彻体力建模方法及其应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 128-135.
- [19] 张亚飞,刘涛,冷林涛,等. 基于多流路体积力模型的翼身融合布局飞机计算方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1169-1176.
- [20] 徐诸霖,达兴亚,范召林,等. 一种适用于进气道/风扇一体化计算的体积力模型[J]. 推进技术, 2019, 40(4): 732-740.
- [21] 郭晋,胡骏,屠宝锋. 多级轴流压气机彻体力模型:理论方法及简化应用[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1954-1963.

收稿日期:2023-12-07

(上接第 119 页)

- [35] NGUYEN MINH D, DUONG TRONG L, MCEWAN A. An efficient and fast multi-band focused bioimpedance solution with EIT-based reconstruction for pulmonary embolism assessment; a simulation study from massive to segmental blockage[J]. Physiological Measurement, 2022, 43(2): 025003.
- [36] KUK W J, WRIGHT N R. Bedside diagnosis of pulmonary embolism using electrical impedance tomography: a case report[J]. A&A Practice, 2022, 16(7): e01606.
- [37] WANG X C, ZHAO H, CUI N. The role of electrical impedance tomography for management of high-risk pulmonary embolism in a postoperative patient[J]. Frontiers in Medicine, 2021, 8: 773471.
- [38] PRINS S A, WELLER D, LABOUT J A M, et al. Electrical impedance tomography As a bedside diagnostic tool for pulmonary embolism[J]. Critical Care Explorations, 2023, 5(1): e0843.
- [39] 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 Journal, 2021, 21(7): 9277-9287.
- [40] BORSIC A, HALTER R, WAN Y, et al. Electrical impedance tomography reconstruction for three-dimensional imaging of the prostate[J]. Physiological Measurement, 2010, 31(8): S1-16.
- [41] TAN H, ROSSA C. Electrical impedance tomography for robot-aided internal radiation therapy[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 698038.
- [42] HUBBARD R A, KERLIKOWSKE K, FLOWERS C I, et al. Cumulative probability of false-positive recall or biopsy recommendation after 10 years of screening mammography: a cohort study[J]. Annals of Internal Medicine, 2011, 155(8): 481-492.
- [43] AKHTARI-ZAVARE M, LATIFF L A. Electrical impedance tomography as a primary screening technique for breast cancer detection[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2015, 16(14): 5595-5597.
- [44] LEE J, GWEON S, LEE K, et al. A 9.6-mW/ch 10-MHz wide-bandwidth electrical impedance tomography IC with accurate phase compensation for early breast cancer detection[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(3): 887-898.

收稿日期:2025-07-26