

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.04.010

## 基于 EIT 技术的智能可穿戴传感器的研究进展

王琦<sup>1,2</sup>, 王鑫<sup>1,2</sup>, 段晓杰<sup>1,2</sup>

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织未来技术研究中心, 天津 300387)

**摘要:** 基于电阻抗成像(EIT)技术的智能可穿戴传感器在工业、医疗和电子产品中有广泛的应用。本文概述了 EIT 成像原理, 总结了 EIT 智能可穿戴传感器在传感器材料、硬件结构设计、软件算法等方面的研究进展, 详细介绍了 EIT 智能可穿戴传感器在人机交互、智能机器人和医疗保健方面的应用, 并展望了其未来发展前景: 更轻薄柔软的传感器材料、软件算法的优化、物联网和 5G 技术的普及、成本的降低和制造工艺的改进, 将使得基于 EIT 的智能可穿戴传感器在更广泛的领域发挥其独特的优势, 为人们的健康生活和工业发展提供更有力的支持。

**关键词:** 智能可穿戴传感器; 电阻抗成像(EIT); 材料优化; 硬件设计; 软件算法

**中图分类号:** TP242; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2025)04-0071-12

### Research progress in smart wearable sensors based on EIT technology

WANG Qi<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>, DUAN Xiaojie<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Research Center for Future Textile Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Smart wearable sensors based on electrical impedance tomography (EIT) technology have wide-ranging applications across industrial, medical, and electronic domains. This paper first outlines the principles of EIT imaging, then summarizes recent research progress in sensor materials, hardware design, and software algorithms for EIT-based smart wearable sensors. It subsequently provides a comprehensive overview of their applications in human-machine interaction, intelligent robotics, and healthcare monitoring. Finally, the future development prospects are discussed, including lighter, thinner, and more flexible sensor materials; optimized software algorithms, integration with IoT and 5G technologies; and cost reduction through improved manufacturing processes. These will enable EIT-based smart wearable sensors to expand their applications, thereby providing enhanced support for healthy lifestyles and industrial development.

**Key words:** smart wearable sensors; electrical impedance tomography (EIT); material optimization; hardware design; software algorithm

智能可穿戴技术是材料科学、纺织学、服装设计、传感器技术、互联网、人工智能以及人机工效学等多个学科的交叉融合<sup>[1]</sup>。其中, 传感器技术在智能可穿戴产品中扮演着核心角色, 负责监测人体的生理参数并提供反馈和干预<sup>[2]</sup>。智能可穿戴技术在传感器方面的应用涵盖了健康监测、运动跟踪、环境感知、化学物质检测和人机交互等多个领域<sup>[3-5]</sup>。健康监测传感器能够实时跟踪用户的生理指标, 帮助管理和预防疾病<sup>[6]</sup>; 运动型传感器如加速度计和陀螺仪则用于记录运动数据和分析运动姿势, 支持健身和康复训练<sup>[7]</sup>; 环境传感

器能够监测温度、湿度、空气质量等, 帮助用户适应环境变化<sup>[8]</sup>; 化学传感器能够监测体液中的小分子和大分子, 如汗液、呼吸、唾液、眼泪和组织间液等, 提供更全面的健康信息<sup>[9]</sup>; 超声阵列柔性传感器利用超声波的多普勒效应, 可以持续、准确地检测人体血流情况<sup>[10]</sup>, 例如, 超声传感器能够直接监测人体血管中的血流速度, 检测心脏心室壁的收缩与舒张速度, 有助于医生诊断患者的心脏功能, 对于早期预测和诊断心血管疾病具有重要意义。此外, 传感器还支持手势识别等交互功能, 使可穿戴设备在提升用户体验和促进健康生

收稿日期: 2025-01-20 基金项目: 天津市科技计划项目(23JCQNJC01490)

通信作者: 王琦(1985—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向包括生物医学图像智能计算、嵌入式系统及应用。E-mail: wangqitju@163.com

活方式方面发挥重要作用<sup>[11]</sup>。

在当代科技的迅猛发展中,电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT) 技术作为一种非侵入性、无辐射的成像手段,已经在智能可穿戴传感器成像领域展现出了巨大的潜力和应用价值<sup>[12]</sup>。基于电阻抗成像技术的智能可穿戴传感器已经在多个领域取得明显进展。在工业领域,研究人员已经制造出基于电阻抗成像的磁性水凝胶复合材料智能可穿戴传感器,这种传感器因其高柔性和可拉伸性,在机器人、假肢和可穿戴电子产品中显示出广阔的应用前景,能够准确识别压力的数量、形状和空间分布<sup>[13]</sup>;在医疗领域,基于 EIT 的智能可穿戴传感器能够用于连续分布式应变传感和触觉成像<sup>[14]</sup>;在电子产品领域,研究人员已经开发出基于深度神经网络的电阻抗成像传感技术,可用于实现大面积机器人触觉传感<sup>[15]</sup>。这种基于 EIT 的智能可穿戴传感器凭借其独特的稀疏电极排布设计,在实际应用中现出 3 大核心优势:具备卓越的使用寿命;支持模块化扩展,可灵活适应不同尺度的检测需求;采用简化的工艺制造,具有显著的成本效益。

本文详细介绍了基于 EIT 技术的智能可穿戴传感器在材料、硬件电路和软件算法方面的研究进展,概述了基于 EIT 的智能可穿戴传感器在人机交互、智能机器人以及医疗方面的应用,并展望了其未来发展前景。

### 1 EIT 成像原理

EIT 的基本形式是在各个电极对之间依次注入一个安全的交流电,然后测量其余所有电极对之间的电压差<sup>[16]</sup>。电压信号经过放大、滤波和解调后,获得阻抗信号,再通过图像重构算法将测量的阻抗信号重构为阻抗分布图像,如图 1 所示。

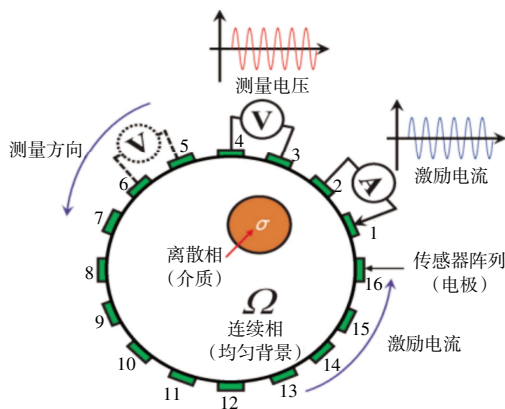


图 1 二维 16 电极 EIT 传感阵列与测量原理<sup>[16]</sup>

Fig.1 Principle of 2D 16-electrode EIT sensing array and measurement

电阻抗成像技术能够提供关于物体内部电阻率以及电容率分布的详细信息,能够提供实时、动态、连续的成像结果,且成像便捷无污染,使其在传感器领域大放异彩<sup>[17-19]</sup>。

为了进一步提升传感器性能,研究者们不断探索该领域的新型材料、结构设计和算法改进。

### 2 基于 EIT 的传感器材料

基于阻抗成像的传感器的性能受传感器材料的影响显著。水凝胶<sup>[20]</sup>、复合织物<sup>[21]</sup>、半导体和纳米材料<sup>[22]</sup>等不同材料会因其固有的电导率、力学性能、热稳定性和化学耐腐蚀性等物理化学性质的不同,而展现出不同的传感器性能<sup>[23-25]</sup>。例如:高导电性的金属材料可以提供快速的信号响应;高热稳定性的材料有助于在温度变化的环境中保持传感器性能的稳定<sup>[26]</sup>;材料的力学性能和耐用性直接影响传感器的使用寿命和可靠性。因此,在设计 EIT 传感器时,需要选择合适的材料以优化传感器的灵敏度、稳定性和耐用性。EIT 传感器主要选用水凝胶材料和复合织物材料,这 2 种不同的传感器材料各自具有独特的优势,在柔性智能可穿戴传感器领域发挥着其特殊的作用<sup>[27]</sup>。

#### 2.1 水凝胶材料

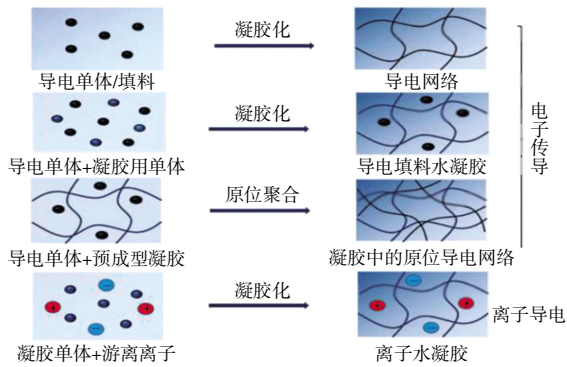
水凝胶材料因其优异的生物相容性<sup>[28]</sup>、柔韧性<sup>[29]</sup>、高含水量<sup>[30]</sup>以及可调节的力学性能,成为柔性智能可穿戴传感器的理想选择。水凝胶的网络结构是决定其力学性能、导电性能和传感性能的关键因素<sup>[31]</sup>。通过设计网络结构,可以调节水凝胶的力学性能和传感性能,以满足不同的应用需求。研究人员致力于通过材料配方的优化、加工技术的创新以及智能响应材料的集成,提高水凝胶传感器的性能,并增强其在多变环境条件下的稳定性和耐用性,从而拓展其应用潜力<sup>[32]</sup>。

基于 EIT 的智能可穿戴传感器所采用的水凝胶主要包括离子导电水凝胶、磁性水凝胶、自修复水凝胶、有机水凝胶和复合水凝胶等类型。离子导电水凝胶由高分子聚合物和电解质盐组成,内部含有大量水分子,具有良好的离子传导性、柔软性和生物相容性;磁性水凝胶通过将磁性颗粒(如羧基铁颗粒)与聚合物(如丙烯酰胺)进行交联合成,具有高灵敏度和良好的力学性能;自修复水凝胶由多种复合材料组成,具有独特的损伤自修复能力,并由此衍生出良好的弹性、韧性和环境响应性;有机水凝胶通过特殊的网络结构设计(如互穿网络)增强力学性能,同时具有抗冻、抗失水等特性;复合水凝胶通过将不同材料(如

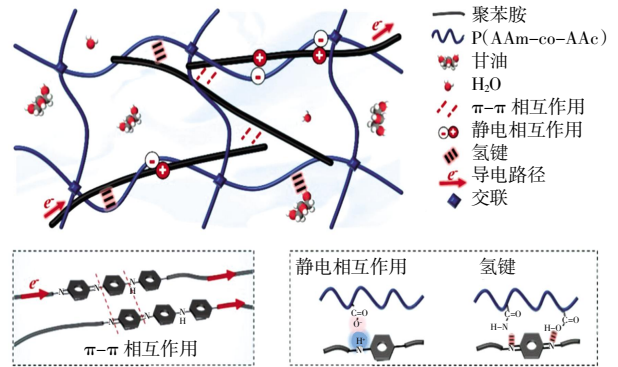
MXene、纤维素纳米纤维、聚乙烯醇等)与导电聚合物复合,提升其导电性、力学性能和抗压性能。

基于 EIT 技术的水凝胶基智能可穿戴传感器如图 2 所示。

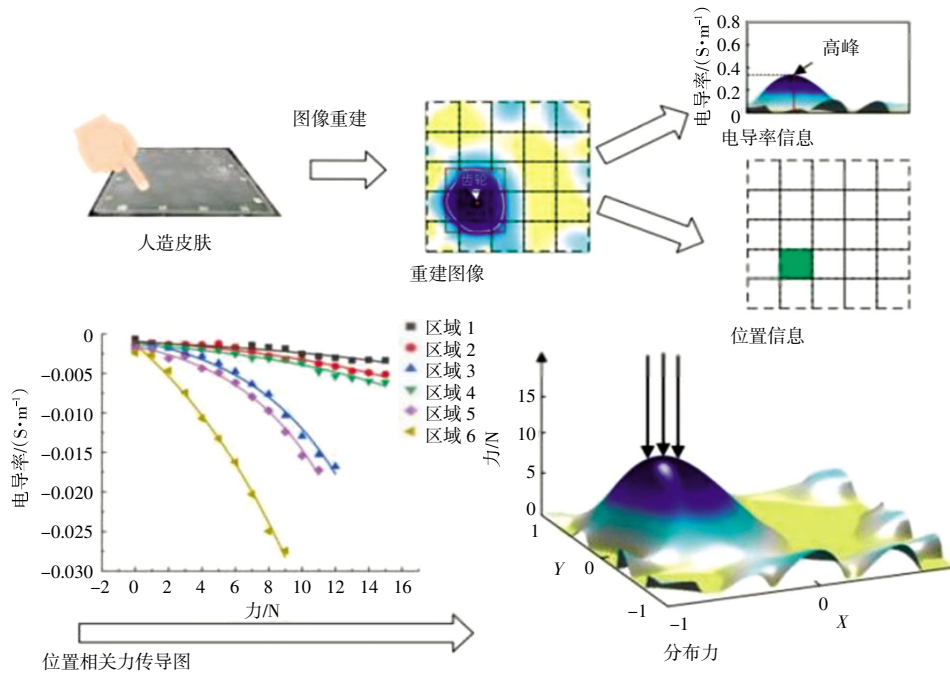
中山大学 Wu 等<sup>[33]</sup>通过将导电填料与水凝胶基质复合或在水凝胶网络中原位聚合导电聚合物来制备导电水凝胶,其具备优秀的力学性能和电导率,能够在受到应力或应变时改变其电导率或电阻率,从而实



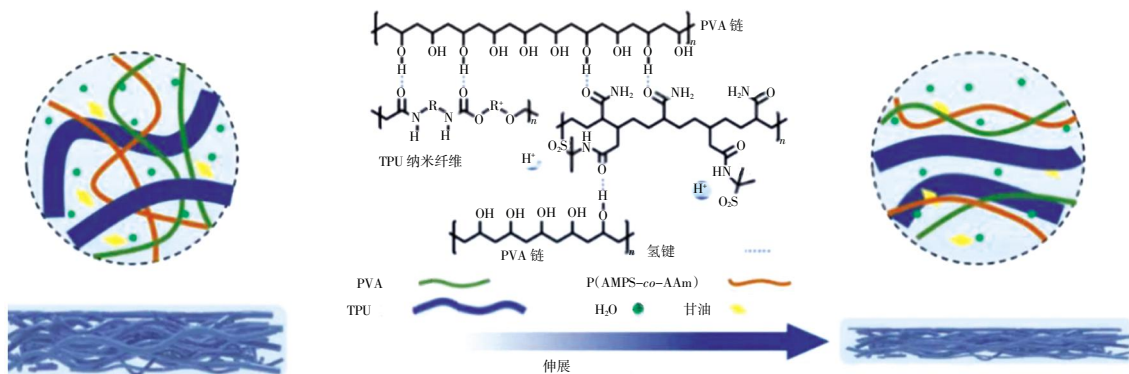
(a) 水凝胶混合传感器<sup>[33]</sup>



(b) 高性能导电水凝胶传感器 PAB-S<sup>[34]</sup>



(c) 基于 EIT 的压力水凝胶传感器<sup>[35]</sup>



(d) 一种超强韧、抗冻、抗失水的有机水凝胶薄膜应变传感器<sup>[36]</sup>

图 2 基于不同水凝胶的智能可穿戴传感器

Fig.2 Smart wearable sensors based on different hydrogels

现传感功能(图 2(a))。东北大学医学与生物信息工程学院 Cheng<sup>[34]</sup>开发了一种受蛹启发的高性能导电水凝胶传感器 PAB-S(图 2(b)),该传感器不仅具有优异的力学性能、柔韧性、高灵敏度和生物相容性,还具有抗冻性,能够实现无线远程智能控制、智能手势识别和基于深度学习的手指抓握障碍识别等功能。中国科学院 Chen<sup>[35]</sup>制造了一种通过 EIT 来反应压力大小的自修复水凝胶人造传感器(图 2(c)),外界给予传感器一定压力,水凝胶通过 EIT 成像将其反馈成三维立体图像,可明显体现各个空间坐标的压力大小。中山大学 Zhu 团队<sup>[36]</sup>提出一种创新的互穿网络策略,开发了一种超强韧、抗冻、抗失水的有机水凝胶薄膜应变传感器,这种传感器能够在极端的高温和低温条件下,实现对运动的长期稳定监测(图 2(d)),其主要材料包括聚氨酯纳米纤维膜(eTPU)作为耗能骨架提供高强度和韧性;2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)和丙烯酰胺(AAm)作为单体通过自由基聚合形成水凝胶网络;甘油/水二元溶剂用于提高薄膜的导电性。中山大学 Chen 等<sup>[37]</sup>开发了一种能够在极端温度条件下保持稳定性的有机水凝胶材料,并基于此构建了高性能的柔性应力应变传感器。这种高性能水凝胶传感器的低迟滞性和高灵敏度为机械手提供精细的人工触觉,使其能够识别运动和抓握物体,从而在自动化和智能机器人领域具有广泛的应用前景。该高性能有机水凝胶材料的主要成分包括含有大量可逆氢键和静电作用的有机水凝胶基质,以及适量的导电填料(如碳纳米管或石墨烯)以提高导电性,并通过静电纺丝技术制备聚氨酯纳米纤维膜用作耗能骨架,增强水凝胶的韧性和抗裂纹扩展能力。这种材料组合赋予了水凝胶优异的力学性能、自愈能力和耐高低温特性,同时保持了良好的保水性和与多种基底的强粘附性。安徽理工大学张晓勇团队<sup>[38]</sup>则制备出一种具有抗冻防干、表面粘附力强、力学性能原位可调的水凝胶功能材料,并将其组装成柔性应变传感器,可实时监测人体运动。

## 2.2 复合织物材料

复合织物材料因其卓越的电导性、优异的柔韧性、透气性和耐用性以及与人体的高度亲肤性,已经成为智能可穿戴传感器领域的关键材料。研究人员通过在复合织物材料结构与类型方面的创新来提升 EIT 传感器的高灵敏度、适应性和功能性。

Yang 等<sup>[39]</sup>开发了一种创新的智能可穿戴传感器,该传感器采用双层织物和纱线结构,能够精确地捕捉

压力变化,同时显著减少因面料拉伸引发的导电性波动。这种双层结构设计使得传感器在维持导电性与压力变化之间的线性关系的同时,降低了因面料物理形变引发的信号干扰。朱俊等<sup>[40]</sup>设计了由高精度电极阵列、敏感检测层、绝缘层及驱动层构成的导电复合纱基电阻耦合原理层析智能可穿戴传感器,利用导电复合纱线在拉伸时的电阻变化来感应压力,同时通过将织物嵌入弹性体基质来降低导电织物的电阻波动性;通过在检测层与驱动层间实现电阻耦合,从而在接触点产生与压力分布相对应的电位变化,随后这些电位变化被底部电极捕获并用于重建压力图像。该传感器的灵活性设计允许其与多种导电材料兼容。

Kim 等<sup>[41]</sup>基于电阻抗成像技术设计了一种不规则形状的人工皮肤三维模型,用于机器人的敏感皮肤应用,该人工皮肤能够适应复杂的三维表面如机器人的手臂,并提供大面积的触觉传感能力。Wu 等<sup>[42]</sup>提出一种柔性压力传感器的复合织物层,将聚氨酯非导电海绵状织物与以波纹图案编织的碳纳米管导电纱线相结合形成双层结构。当施加压力时,由于波纹结构的导电纱线相互接触,导致局部电导率增加,从而实现压力变化的敏感检测。孙纪焯等<sup>[43]</sup>利用三维传感皮肤晶格的 3D 打印制造多层复合传感器,分别将聚吡咯(PPy)、中空聚苯胺微球(PHMs)、氨基硅烷改性聚氨酯(Si-WPU)复合应用于织物表面,形成涂层结构,不仅显著提升了材料的摩擦正电性能,还增强了织物与功能层之间的界面结合力,使得这种复合材料传感器具有高灵敏度的线性响应、低漂移和快速响应。

## 3 基于 EIT 的智能可穿戴传感器硬件设计

硬件系统是执行 EIT 智能可穿戴传感器测量的核心部分,其采集信号的精确度对图像重建的清晰度至关重要。基于 EIT 成像的智能可穿戴传感器的硬件部分主要包括电极阵列、信号采集模块、微控制器和电源模块。其中,电极阵列用于与人体接触并施加电流;信号采集模块负责测量电压变化并转换为数字信号;微控制器处理信号并通过无线模块传输数据<sup>[44-45]</sup>。随着硬件技术的进步,通过对硬件模块的设计和集成,EIT 智能可穿戴传感器系统能够提供更精确的数据采集,从而实现对目标物体的高精度成像<sup>[46-47]</sup>。图 3 所示为基于 EIT 的传感器硬件系统。

在智能可穿戴传感器技术领域,电学特性的精确测量对于多种应用至关重要。为了实现这一目标,研究

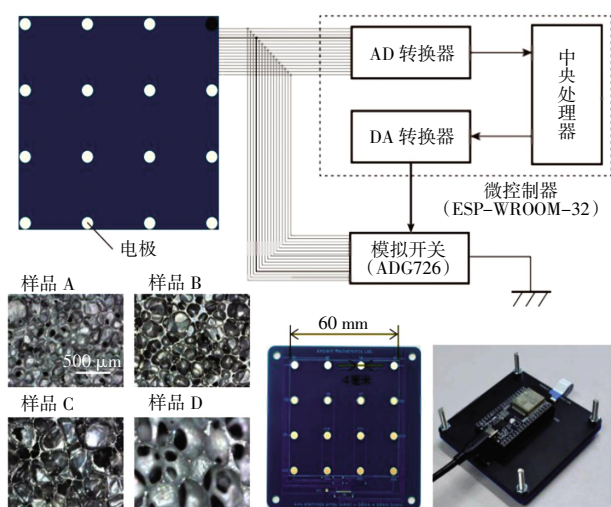
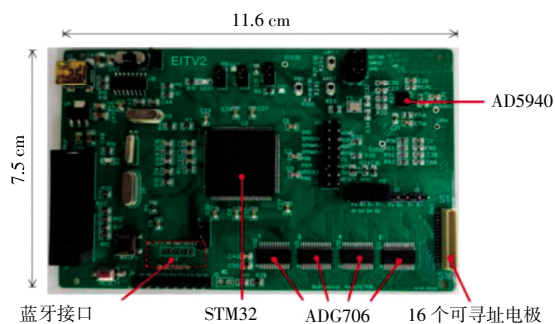
(a) 由多孔材料构成的多通道传感器<sup>[48]</sup>(b) 一种为水凝胶传感器定制的触觉数据采集电路设计<sup>[35]</sup>

图3 基于EIT的传感器硬件系统

Fig.3 Sensor hardware system based on EIT

人员开发了多种高精度的数据采集系统。Zhang 等<sup>[48]</sup>为基于 EIT 技术的智能可穿戴传感器设计了一个装有 16 通道 12 位模拟输入的微控制器(ESPWROOM-32)和模拟开关(ADG726),用于测量每个电极的电势(图 3(a))。

研究人员通过精准选择多样化且高效的硬件设备,显著提升了传感器的数据采集效率和采集效果。中国科学院 Chen 等<sup>[35]</sup>为水凝胶传感器定制了一种触觉数据采集电路(图 3(b)),该电路具有一个高精度、超低功耗的模拟前端系统阻抗测量芯片 AD5940,采用两线制方案以简化数据收集并提高实时成像能力。梁宁<sup>[49]</sup>针对柔性传感器的耐用性和稳定性问题,研究了基于 MXene/PU 复合材料的柔性传感机理,设计制备了一体化柔性传感单元,该单元具有高灵敏度、高响应速度和高稳定性;并在这个基础上进一步设计制作了可穿戴数据手套、智能护腕和智能护肘,设计了基于分压法的手势动作信号采集电路,并通过指数加权滤波、截止滤波和归一化算法处理数据,提高了数据准确性。罗霄华<sup>[50]</sup>采用多物理场耦合软件 COMSOL

Multiphysics 对电阻式传感器进行建模与仿真,模拟了放置在内含空气填充腔的导体立方体的单个电极,模型应用 AC/DC 模块的电流模式,电极上施加 1 A 的均匀分布电流源,通过控制方程和边界条件的设置,研究了电场和电位移的关系,以及传导电流和位移电流的连续性方程。

## 4 基于 EIT 的智能可穿戴传感器软件算法

在软件算法方面,EIT 传感器需要复杂的图像重建算法将电压数据转换为电导率分布图像,包括数据预处理、图像重建和后处理等步骤,以提升成像精度和稳定性。基于 EIT 的智能可穿戴传感器的成像效果涉及 2 个核心问题:正问题和逆问题。正问题涉及根据已知的体内电导率分布计算体表的电压分布,为成像技术提供理论基础和模拟手段;逆问题即确定内部电导率分布<sup>[12]</sup>。正问题为逆问题提供模拟和验证的基础,而逆问题是 EIT 技术的核心,它直接决定了成像的准确性和可靠性<sup>[9]</sup>。由于正问题求解边界电压与内部电导率之间的关系具有高度病态和非线性,这使得电导率的求解精度受限,所以在实际应用中,主要关注逆问题的解决,以实现内部结构的有效重建。逆问题的成像效果可以通过正则化技术、优化算法和机器学习方法等多种算法获得提升,提高成像的稳定性和精确度。

### 4.1 线性重建算法

在线性电阻抗成像中,线性重建算法是一类基于线性近似的方法,通过求解线性方程组来重建图像,适用于电阻抗分布均匀或变化不大的情况<sup>[51-52]</sup>。这些算法包括奇异值分解(singular value decomposition, SVD)、最小二乘法(least squares method, LQM)和局部二值模式(local binary patterns, LBP)。

SVD 算法通过分离信号和噪声来改善图像质量<sup>[53]</sup>。在实际应用中,SVD 可以与其他重建算法结合使用,以达到更好的成像效果。LQM 算法通过最小化数据误差的平方和来求解图像,通过不断减少重建过程中的误差平方和来精确求解物体内部的电阻抗分布<sup>[54]</sup>。此方法通过构建误差函数来评估模型预测值与实际测量值之间的偏差,并利用优化技术调整模型参数,以降低这一偏差。LBP 算法则通过直接反向投影测量的电压分布来重建电阻抗分布<sup>[34]</sup>。LBP 算法可用于纹理分析的特征提取,通过比较像素点与其周围邻域的相对灰度值来构建特征,有助于提高 EIT 图像的清晰度和稳定性。LBP 算法对噪声具有鲁棒性,能够提供有

关局部区域的重要信息,是提高 EIT 成像质量的有效工具之一<sup>[36]</sup>。

线性重建算法的优点是计算简单、快速,适合实时性要求高的应用,但可能无法准确重建复杂电阻抗分布,因此在处理复杂数据或噪声较大时需要更高级的非线性重建算法。这些算法通过不同的策略解决 EIT 成像中的不适定问题,提高成像质量<sup>[36]</sup>。

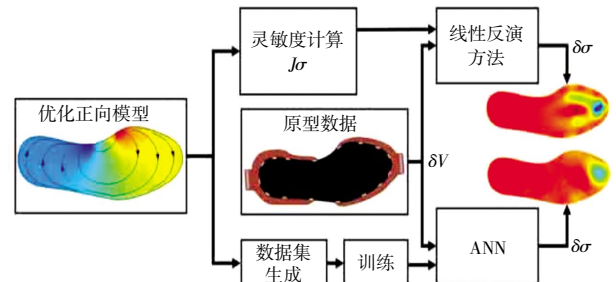
### 4.2 正则化算法

在电阻抗成像领域,为了解决逆问题的不适定性和非线性挑战,正则化技术被广泛应用。正则化通过构建一个稳定的替代问题来接近原始的不适定问题,通过在模型训练过程中添加约束来防止过拟合,提高模型的泛化能力<sup>[55]</sup>,增强问题的稳定性,并提高求解的准确性。正则化方法包括 Tikhonov 正则化、变分正则化、混合正则化、Landweber 算法以及代数重构技术 (ART)<sup>[56]</sup>,将其用于 EIT 图像重建可改善图像重构质量<sup>[38]</sup>,提高对比度和清晰度。

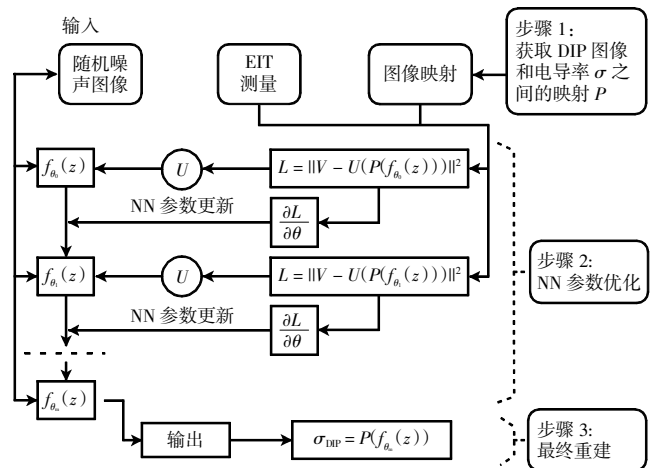
Tikhonov 正则化是一种解决不适定问题的有效方法,它通过在优化目标中添加 L2 范数的正则项来平衡噪声抑制<sup>[57]</sup>。变分正则化算法使用离散变差函数作为正则化罚函数,有效克服了连续罚函数的平滑效应,提升了重构图像的对比度和清晰度。混合正则化算法结合了变差罚函数和 Tikhonov 罚函数的特点,进一步提高了重构算法的收敛精度和抗噪性能<sup>[58]</sup>。Landweber 算法通过迭代过程稳定地求解不适定问题,采用预处理方法、自适应步长策略和深度学习技术,提高算法的收敛速度和成像质量<sup>[59]</sup>。代数重构技术 (ART)通过最小化数据误差的同时引入正则化项来解决不适定问题,逐步逼近真实电阻抗分布,适用于数据质量不高或存在较大噪声的情况<sup>[60]</sup>。

### 4.3 深度学习算法

深度学习算法,如人工神经网络 (artificial neural network, ANN),能够通过学习大量的数据集来识别模式和特征,从而提高 EIT 传感器的图像重建质量和分辨率<sup>[55]</sup>。例如,通过深度神经网络构建的 EIT 框架,可以具有高分辨率的触觉传感和良好的泛化能力,以应对复杂的触摸模式。深度学习在浅层学习基础上,加入更多层神经网络,能够更好地处理较为复杂或者非线性的数据。Silvera-Tawil 等<sup>[59]</sup>提出深度学习的独特之处在于其自我学习和处理非线性数据的能力,能够从本质上更深刻地刻画数据,并更准确地捕捉和表达数据的特征。图 4 所示为基于 EIT 的深度学习算法流程。



(a)有限元方法正演模型和人工神经网络的结合图<sup>[61]</sup>



(b) 基于 DeepEIT 的算法流程图<sup>[62]</sup>

图 4 基于 EIT 的深度学习算法流程

Fig.4 Flowchart of deep learning algorithms based on EIT

Yoshimoto 等<sup>[61]</sup>结合物理仿真和机器学习技术开发了一种基于电阻抗成像的智能可穿戴传感器,其算法流程如图 4(a)所示,利用有限元方法正演模型和人工神经网络 (ANN)解决了 EIT 逆问题,并通过场景解析网络 (S-PNet)后处理算法和动态网络 (D-Net)触觉电阻抗成像算法提高了图像重建的准确性和分辨率,显著提升了传感器在触摸位置检测方面的性能。中国科学技术大学 Liu 等<sup>[62]</sup>提出了将数字图像处理 (DIP) 与 EIT 结合的 DeepEIT 方法,第 1 层先构建 Deep-ELT 的 DIP 框架,如图 4(b)所示,第 2 层可加入任意神经网络优化算法,第 3 层输出结果,最终构建一种无需训练的深度电阻抗图像重建方法。这种方法能够实现高质量的电阻抗图像重建,并且具备轻量化潜力,适用于脑损伤、中风、肺气肿、乳腺癌等疾病的诊断。Park 等<sup>[63]</sup>提出了一种基于深度神经网络的电阻抗层析成像传感方法,用于大面积机器人触觉传感。该方法通过深度神经网络 (EIT-NN)高效的非线性重建属性,实现高分辨率触觉和良好泛化的重建能力,以解决任意复杂的触摸模式。王琦等<sup>[64]</sup>提出了一种基于 DK-SVD 的电阻抗块稀疏图像重建方法,该算法通过多层感知器

为每组测量数据提供最优的模型参数,以适应数据集的多样性,进一步提高成像质量,并在稀疏编码阶段采用迭代收缩阈值算法加快收敛速度。

将深度学习算法用于智能可穿戴传感器的 EIT 图像重建,不仅能够提高数据处理的效率和准确性,还能对人体行为识别等应用提供更强大的技术支持。Adler 等<sup>[65]</sup>提出了一种基于电阻抗的可穿戴传感器人体行为识别数据特征的提取方法,该方法利用深度学习中的神经网络分支结构,通过灵活设置卷积核来提取原始数据的多尺度深度特征,并在多个数据集上进行实验验证,结果表明,该方法可在多尺度提取数据特征的同时保持数据独立性,能够有效提升模型的检测能力。Cai 等<sup>[66]</sup>指出,深度学习已成为解决几乎所有科学和工程领域数据分析问题的主要方法,不同传感器系统收集的数据日益复杂和庞大,刺激了深度学习方法的发展,并从根本上改变了数据获取、处理、分析和解释的方式。

## 5 基于 EIT 的智能可穿戴传感器应用

智能可穿戴电阻抗传感器通过模拟人体皮肤并提供有效的触觉信息,在多个领域展现出巨大的应用潜力,为人们的生活和工作带来了更多便利和可能<sup>[19]</sup>。目前,基于电阻抗的智能可穿戴传感器已进入多个领域,包括人机交互、智能机器人和医疗保健。

### 5.1 人机交互

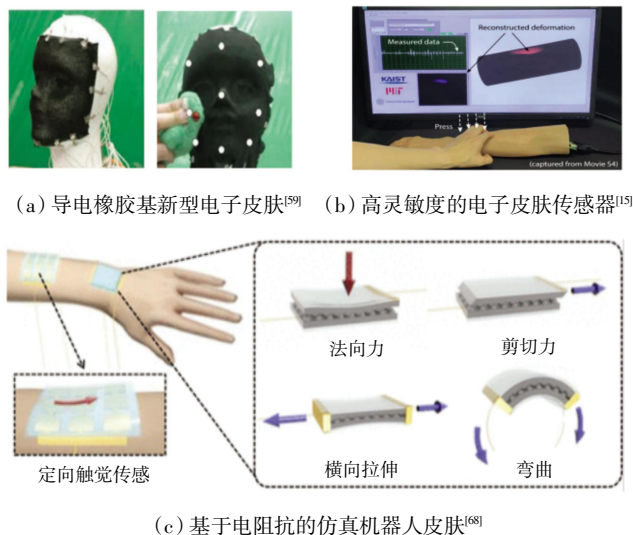
在人机交互方面,智能可穿戴传感器可以集成到智能设备中,提供更自然和直观的交互体验,如通过触觉反馈增强虚拟现实和增强现实的沉浸感。

可穿戴电子传感器在实时监测人体活动方面具有巨大潜力,并且能够有效识别和分析这些活动,展现出广阔的应用前景。Guo 等<sup>[67]</sup>开发了具有 8 个电极的可穿戴式电阻抗层析成像(weighted electrical impedance tomography, wEIT)传感器,利用机器学习算法实现手势识别,并比较采用不同材料和形状的电极所制备传感器的手势识别率,结果表明,利用多种复合材料和柱形电极的传感器对于手势的识别效果较好。

### 5.2 智能机器人

在智能机器人领域,智能可穿戴触觉传感器相当于机器人的“电子皮肤”,能够感知与环境的物理交互,使机器人能够安全地与人类交互并灵巧地操作各种物体<sup>[21]</sup>。近年来,随着智能机器人、可穿戴设备等领域的快速发展,对高性能智能可穿戴传感器的需求日

益增长。研究者们纷纷致力于开发新型电子皮肤,以赋予机器人、可穿戴设备等更接近人类皮肤的触觉感知能力。图 5 所示为基于 EIT 的智能可穿戴传感器在电子皮肤中的应用。



(a) 导电橡胶基新型电子皮肤<sup>[69]</sup> (b) 高灵敏度的电子皮肤传感器<sup>[15]</sup>

(c) 基于电阻抗的仿真机器人皮肤<sup>[68]</sup>

图 5 基于 EIT 的智能可穿戴传感器在电子皮肤中的应用

Fig.5 Application of EIT-based smart wearable sensors in electronic skin

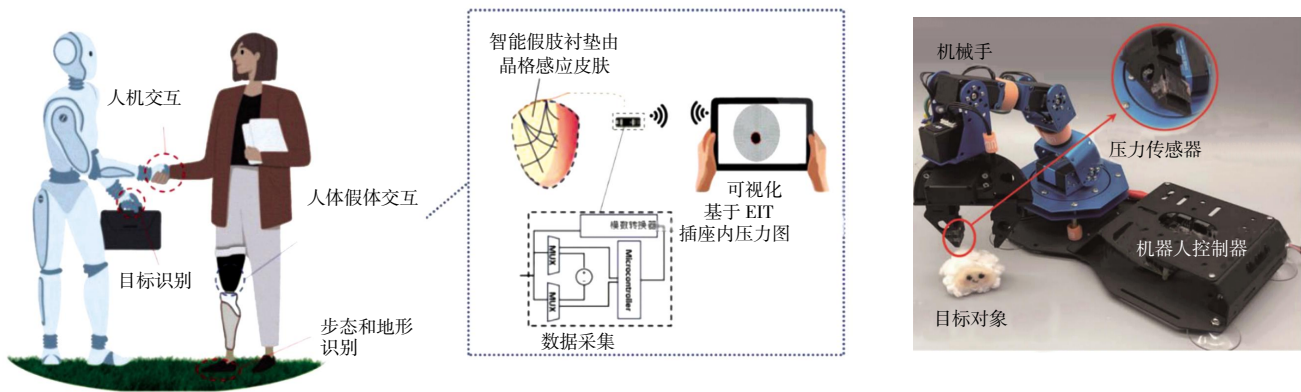
Chen 等<sup>[20]</sup>设计了一款智能可穿戴传感器,可利用其高灵敏度和高分辨率的弹性触觉传感平台,助力机器人在工业原型和人工智能等领域实现高精度的表面测量和成像。Silvera-Tawil 等<sup>[59]</sup>制作了一款由导电橡胶制作而成的人工皮肤,如图 5(a)所示,这种人工皮肤具有良好的柔性和拉伸性,能够在不同的三维表面上应用,并且能够实时感知压力变化,适用于机器人触觉感知等应用。Kim 等<sup>[41]</sup>设计了一款基于电阻抗层析成像技术的超薄耐用可穿戴软电子皮肤,是基于 EIT 的触觉界面的实际应用,可应用于手写识别和无人机控制。这种电子皮肤具有类似皮肤的柔软度和电性能,能够在施加各种压力时仍具有高灵敏度。

Park 等<sup>[15]</sup>将具有类似人手臂外观的仿生机器人皮肤应用于美容假肢(图 5(b)),该假肢能够通过 EIT 技术感知深度压力,对假肢手臂上的触觉感知进行反馈,而且该机器人皮肤在复杂形状和大型表面上具有良好的适应性,为失去感觉能力的人提供了与环境进行物理交互的手段。韩国蔚山国家科学技术研究所 Sadiq 等<sup>[68]</sup>受人类皮肤结构启发,制作了一种电子皮肤触觉传感器,如图 5(c)所示。该传感器采用碳纳米管和聚二甲基硅氧烷(PDMS)形成互相连锁的小型拱形结构,具有高灵敏度,能够感知较小的压力变化,同时具备感知空气流的方向、位置及强烈程度的能力。这

种电子皮肤触觉传感器的设计使其在功能上更接近人类皮肤,能够在多种应用场景中提供精确的触觉感知,如机器人触觉反馈、医疗设备的触觉监测等。

图 6 所示为基于 EIT 的智能可穿戴传感器在智能机器人中的应用。Park 等<sup>[15]</sup>侧重研究可穿戴电阻抗成像技术在假肢衬垫中的应用,开发了一种格子状传感皮肤,如图 6(a)所示。该传感皮肤由碳黑/硅胶复合材料构成的格子状网络嵌入在硅胶基底中,周围布置有 16 个电极用于测量电压和感知压力变化。通过将

这种传感皮肤集成到假肢衬垫中,可以实时监测假肢内部的压力分布,传感皮肤测量到的压力数据还可以无线传输到便携式电子设备上进行进一步分析,这对于调整假肢、改善步态和预防溃疡等方面具有重要意义。Jing 等<sup>[69]</sup>制作了一种基于相变凝胶的压力传感器用于人工触觉反馈系统,如图 6(b)所示。该系统包括压力传感器、机械手和控制面板,通过实时监测压力反馈来调节抓取动作,能够在高灵敏度模式下感知微妙的抓取力并抓起脆弱的物体,而不会造成损坏。



(a) 智能感知压力电阻抗传感器<sup>[15]</sup>

(b) 基于相变凝胶的压力传感器<sup>[69]</sup>

图 6 基于 EIT 的智能可穿戴传感器在智能机器人中的应用

Fig.6 Application of EIT-based smart wearable sensors in intelligent robots

### 5.3 医疗保健

在医疗保健领域,智能可穿戴传感器被应用于医疗手术操作辅助设备,帮助医生进行更精确的手术操作,同时在康复机器人中用于监测患者的康复进度<sup>[20]</sup>。近年来,电阻抗成像技术在医疗领域的应用不断拓展,与智能可穿戴传感器的融合更是为疾病的无创监测、精准诊断和个性化治疗提供了全新思路,通过无创、无辐射的方式,实时监测人体内部的生理变化,为疾病的早期诊断和治疗提供了重要支持。图 7 所示为电阻抗在医学方面的应用。

南京航空航天大学机电学院叶明团队<sup>[70]</sup>设计一款阻抗分析仪,如图 7(a)所示,负责采集关键的阻抗谱数据,为生物组织的检测和分类提供基础信息。在生物阻抗谱成像(built-in self-test, BIST)实验中,阻抗分析仪首先通过矩阵开关模块与水槽模型相连,配置好测量参数后,向模型中的电极施加多频激励电流。电流通过生物组织样本产生电压响应,探头采集选定电极对之间的电压信号,并进行信号处理后将阻抗数据传输给计算机。计算机接收数据,绘制阻抗谱图,提取电学特性参数,并结合模式识别算法对生物组织样本进行分类,实现精准识别。

复旦大学附属中山医院设计了一种基于电阻抗成像的智能监护可穿戴系统,能够实现对传染病、危重症患者生命体征的无创、远程监控,利用互联网技术将数据上传至云平台,供医生进行远程判读和指导。此外,电阻抗成像技术还被用于监测肺部通气分布,通过电极施加电流并测量电压来获取肺部的生物电特性图像,从而实现对肺部功能的连续监测。这些应用不仅提高了医疗监测的便捷性和准确性,还为患者提供了更加舒适和人性化的医疗服务体验。天津工业大学王琦教授团队<sup>[71]</sup>基于人体肺部的 CT 图像构建人体三维胸腔模型(图 7(b)),获得人体胸腔和肺部轮廓的相对准确的边界信息,为研究肺部电阻抗成像提供了重要的基础,使得后续的电极阵列优化和成像效果评估能够在更接近实际人体结构的情况下进行。天津大学岳士弘团队<sup>[72]</sup>将 EIT 系统用于监测肺部通气分布测量(图 7(c)),将电极放置在患者的胸壁周围,通过一对电极向身体施加微小的电流,同时在其他电极对上测量产生的电压,这些电压会随着患者胸腔中空气和血流量的变化而变化,从而实现对肺部功能的连续监测。

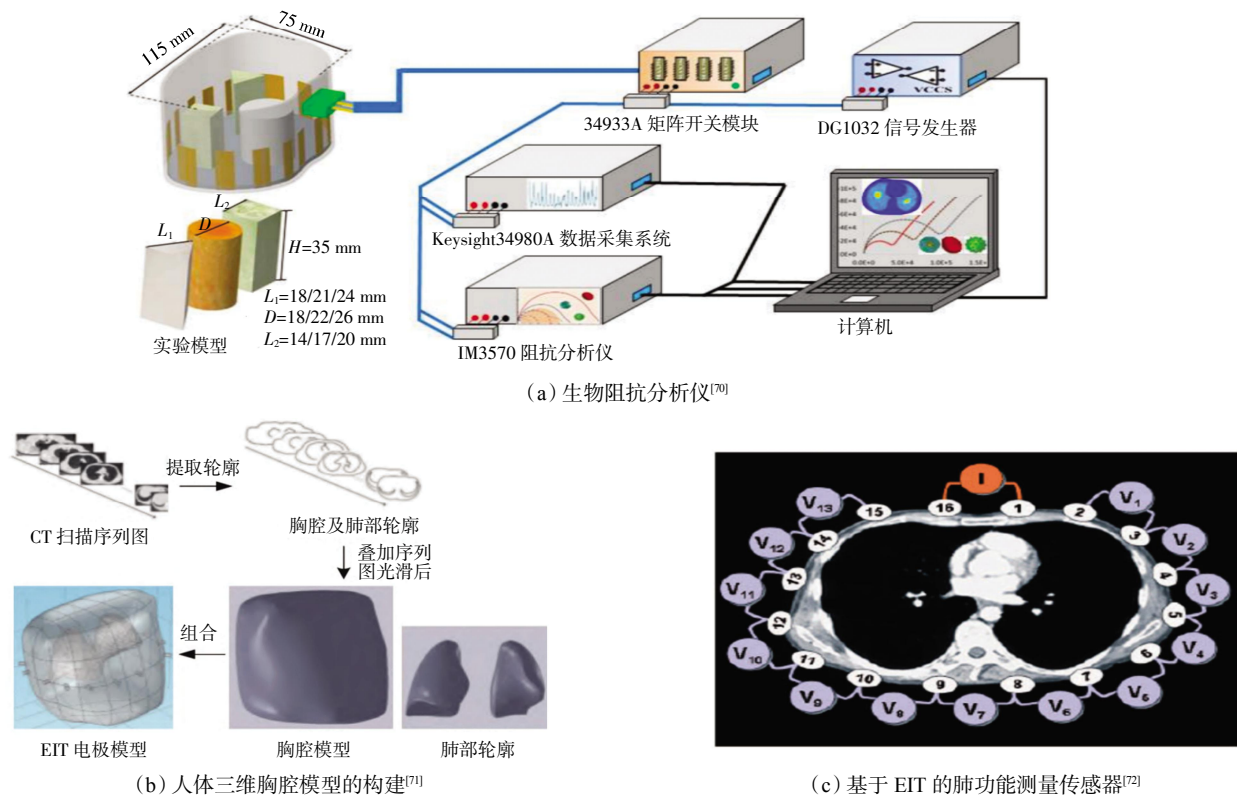


图7 电阻抗成像技术在医学方面的应用

Fig.7 Applications of EIT in medicine

## 6 结束语

近年来,基于电阻抗成像技术的智能可穿戴传感器的研究取得了重要突破。在原理方面,EIT技术通过测量人体表面的电压变化来重建内部电导率分布,为无创监测提供了新的途径。在材料方面,柔性高分子材料和纳米材料的引入,提升了传感器的舒适性和灵敏度。在结构设计方面,电极阵列的优化和软硬件的协同,使得传感器的性能更加稳定和高效。在应用层面,EIT传感器不仅在医疗领域用于监测肺部功能和心脏活动,还在人机交互和智能机器人等领域实现了创新应用,在工业、医疗、环境监测和电子产品等多个领域展现出广阔的应用前景。

未来,基于EIT的智能可穿戴传感器有望在多个方面实现进一步的发展:随着材料科学的进步,更轻薄、更柔软的传感器材料将被开发出来,以提高用户的佩戴体验;软件算法的优化将使得数据处理更加精准和快速,结合人工智能技术,能够实现更复杂的数据分析和智能诊断;随着物联网和5G技术的普及,EIT传感器将更好地实现数据的实时传输和远程监控,推动远程医疗和智能健康管理的发展;成本的降低和制造工艺的改进,将使得EIT传感器更易于大规模生产和应用,从而在更广泛的领域发挥其独特的优势,为人们的健康生活和工业发展提供更有力的支持。

模生产和应用,从而在更广泛的领域发挥其独特的优势,为人们的健康生活和工业发展提供更有力的支持。

### 参考文献:

- [1] KHAN T A, LING S H. Review on electrical impedance tomography: Artificial intelligence methods and its applications[J]. Algorithms, 2019, 12(5): 88.
- [2] LEE H, SUN H B, PARK H, et al. Predicting the force map of an ERT-based tactile sensor using simulation and deep networks[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(1): 425-439.
- [3] SONG X Z, XU Y B, DONG F, et al. An instrumental electrode configuration for 3-D ultrasound modulated electrical impedance tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8206-8214.
- [4] LIN Z C, GUO R, ZHANG K, et al. Feature-based inversion using variational autoencoder for electrical impedance tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 4504712.
- [5] ZHANG H, WANG H B, ZHOU Y J, et al. Research of electrical impedance tomography based on the modified particle swarm optimization[C]//2012 8th International Conference on Natural Computation. Chongqing, China: IEEE, 2012: 1216-1218.
- [6] GARG D, GOEL V. Design and development of electrical im-

- pedance tomography (EIT) based system[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2013, 74(7): 33–36.
- [7] BOVERMAN G, KAO T J, ISAACSON D, et al. An implementation of CalderOn's method for 3-D limited-view EIT[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, 28(7): 1073–1082.
- [8] LIU D, KOLEHMAINEN V, SILTANEN S, et al. Nonlinear difference imaging approach to three-dimensional electrical impedance tomography in the presence of geometric modeling errors[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2016, 63(9): 1956–1965.
- [9] BRASIER N, WANG J, GAO W, et al. Applied body-fluid analysis by wearable devices[J]. *Nature*, 2024, 636(8041): 57–68.
- [10] 刘皓, 李斌, 罗丹, 等. 可监测动脉血压波形的超声阵列柔性传感器[J]. *天津工业大学学报*, 2023, 42(6): 74–83.  
LIU H, LI B, LUO D, et al. Ultrasonic array flexible sensor for monitoring arterial blood pressure waveform[J]. *Journal of Tiangong University*, 2023, 42(6): 74–83(in Chinese).
- [11] 彭军, 李津, 李伟, 等. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(1): 57–62.  
PENG J, LI J, LI W, et al. Research progress and application of flexible wearable electronic strain sensor[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(1): 57–62(in Chinese).
- [12] ZHANG K, LI M K, YANG F, et al. Three-dimensional electrical impedance tomography with multiplicative regularization[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 2019, 66(9): 2470–2480.
- [13] REIN A, NGO C, VAN DEN BERG M, et al. Evaluation of lung function in a German single center cohort of young patients with sickle cell disease using EIT and standard techniques[J]. *Frontiers in Medicine*, 2023, 10: 1100180.
- [14] MELLENTHIN M M, MUELLER J L, DE CAMARGO E D L B, et al. The ACE1 electrical impedance tomography system for thoracic imaging[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(9): 3137–3150.
- [15] PARK K, YUK H, YANG M, et al. A biomimetic elastomeric robot skin using electrical impedance and acoustic tomography for tactile sensing[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(67): 7187–7198.
- [16] 王子辰, 陈晓艳, 王倩, 等. 基于残差自注意力连接的深度电学层析成像方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5): 288–301.  
WANG Z C, CHEN X Y, WANG Q, et al. Electrical tomography imaging method based on Deep CNN with residual self-attention skip connection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5): 288–301(in Chinese).
- [17] FRERICHS I, AMATO M B P, VAN KAAM A H, 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(1): 83–93.
- [18] DE CASTRO MARTINS T, SATO A K, DE MOURA F S, et al. A review of electrical impedance tomography in lung applications: Theory and algorithms for absolute images[J]. *Annual Reviews in Control*, 2019, 48: 442–471.
- [19] CUI Z Q, YU Y K, WANG H X. Recent developments in impedance-based tactile sensors: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(3): 2350–2366.
- [20] CHEN L R, XU Y Q, LIU Y F, et al. Flexible and transparent electronic skin sensor with sensing capabilities for pressure, temperature, and humidity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(20): 24923–24932.
- [21] DODD M, MUELLER J L. A real-time D-bar algorithm for 2-D electrical impedance tomography data[J]. *Inverse Problems & Imaging*, 2014, 8(4): 1013–1031.
- [22] GOW C H, CHANG M Y, ZHAO Z Q, et al. Patient-ventilator asynchrony identified with electrical impedance tomography[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(27): 52–55.
- [23] AVERY J, DOWRICK T, WITKOWSKA-WROBEL A, et al. Simultaneous EIT and EEG using frequency division multiplexing[J]. *Physiological Measurement*, 2019, 40(3): 034007.
- [24] WOO E J, HUA P, WEBSTER J G, et al. A robust image reconstruction algorithm and its parallel implementation in electrical impedance tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1993, 12(2): 137–146.
- [25] LIU D, SMYL D, DU J F. A parametric level set-based approach to difference imaging in electrical impedance tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2019, 38(1): 145–155.
- [26] FERREIRA H R, BUSTOS H I A, FIGUEROLA W B. Simulation inverse problems of reconstruction of image data using patterned electrical impedance tomography female breast[C]//2014 IEEE 16th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom). Natal, Brazil: IEEE, 2014: 1–6.
- [27] LIU K, YANG F, ZHANG S Y, et al. Research on grounding grids imaging reconstruction based on magnetic detection electrical impedance tomography[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(3): 4600204.
- [28] LIU S H, JIA J B, YANG Y J. Image reconstruction algorithm for electrical impedance tomography based on block sparse Bayesian learning[C]//2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). Beijing, China: IEEE, 2017: 1–5.
- [29] DAI Y X. Research on EIT image reconstruction algorithm based on deep learning[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017.
- [30] BIASI N, GARGANO A, ARCARI L, et al. Physics-based simulation and machine learning for the practical implementation of EIT-based tactile sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 4186–4196.

- [31] LIU D, WANG J W, SHAN Q X, et al. DeepEIT: Deep image prior enabled electrical impedance tomography[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, 45(8): 9627–9638.
- [32] ZHAO Z Q, STEINMANN D, MÜLLER-ZIVKOVIC D, et al. A lung area estimation method for analysis of ventilation inhomogeneity based on electrical impedance tomography[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2010, 18(2): 171–182.
- [33] WU Y, LIU K, CHEN B, et al. Adaptive particle swarm optimization algorithm to optimize radial basis function neural network for electrical impedance tomography image reconstruction[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 41(6): 240–249.
- [34] CHENG Y G, FU S M, JIN K M, et al. Chrysalis-inspired high-toughness low-modulus conductive hydrogel sensor for intelligent sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498: 155475.
- [35] CHEN H F, YANG X X, GENG J L, et al. A skin-like hydrogel for distributed force sensing using an electrical impedance tomography-based pseudo-array method[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2023, 5(3): 1451–1460.
- [36] ZHU C J, CHEN G Q, LI S N, et al. Breathable ultrathin film sensors based on nanomesh reinforced anti-dehydrating organohydrogels for motion monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2411725.
- [37] CHEN G Q, ZHANG Y T, LI S N, et al. Flexible artificial tactility with excellent robustness and temperature tolerance based on organohydrogel sensor array for robot motion detection and object shape recognition[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(45): 2408193.
- [38] ZHANG X Y, LIANG S Y, LI F, et al. Flexible strain-sensitive sensors assembled from mussel-inspired hydrogel with tunable mechanical properties and wide temperature tolerance in multiple application scenarios[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(43): 50400–50412.
- [39] YANG Y D, CHEN Y, LIU Y, et al. Programmable and scalable embroidery textile resistive pressure sensors for integrated multifunctional smart wearable systems[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2025, 7(2): 574–586.
- [40] 朱俊, 郑文栋, 葛泉波, 等. 基于多帧重建的电阻抗动态成像的触摸跟踪[J]. *智能系统学报*, 2024, 19(6): 1458–1467. ZHU J, ZHENG W D, GE Q B, et al. Dynamic imaging of touch tracking based on multi-frame reconstruction in electrical impedance tomography[J]. *CAA Transactions on Intelligent Systems*, 2024, 19(6): 1458–1467(in Chinese).
- [41] KIM K, HONG J H, BAE K, et al. Extremely durable electrical impedance tomography-based soft and ultrathin wearable e-skin for three-dimensional tactile interfaces[J]. *Science Advances*, 2024, 10(38): 1099.
- [42] WU W Q, JIN X, TILIMAN A, et al. A flexible, highly sensitive, and anti-strain interference sensing fabric based on conjugated electrospinning core-shell conductive nanofiber yarns for ultra-stable pressure sensing and human-machine interaction[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 503: 158602.
- [43] 孙纪焯, 吴志, 夏季波, 等. 3D打印聚吡咯纳米管/聚二甲基硅氧烷应变传感复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(4): 1978–1990. SUN J Y, WU Z, XIA L B, et al. Preparation and properties of 3D printed polypyrrole nanotube/polydimethylsiloxane strain sensing composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(4): 1978–1990(in Chinese).
- [44] MAYSHA F N. Design and simulation of a voltage controlled current source for electrical impedance tomography applications[D]. New York: State University of New York at Albany, 2019.
- [45] 姚纪阳, 郑晓钊, 李华军, 等. 基于改进Landweber算法的光学层析成像研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(16): 1611003. YAO J Y, ZHENG X Z, LI H J, et al. Research on optical tomograph based on optimized landweber algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(16): 1611003.
- [46] SUN X, YAO F L, LI J J. Nanocomposite hydrogel-based strain and pressure sensors: A review[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(36): 18605–18623.
- [47] SOLEIMANI M, FRIEDRICH M. E-skin using fringing field electrical impedance tomography with an ionic liquid domain[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 5040.
- [48] ZHANG H Y, KALRA A, LOWE A, et al. A hydrogel-based electronic skin for touch detection using electrical impedance tomography[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1571.
- [49] 梁宁. 基于MXene/PU柔性传感器的可穿戴动作识别设备的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023. LIANG N. Research on wearable motion recognition equipment based on MXene/PU flexible sensor[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023(in Chinese).
- [50] 罗霄华. 基于COMSOL Mutiphysics电阻抗传感器的建模及仿真[J]. *科技与创新*, 2016(23): 85, 87. LUO X H. Modeling and simulation of electrical impedance sensor based on COMSOL Multiphysics[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2016(23): 85, 87(in Chinese).
- [51] KHANBAREH H, DE BOOM K, SCHELEN B, et al. Large area and flexible micro-porous piezoelectric materials for soft robotic skin[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263: 554–562.
- [52] LIU K, WU Y, WANG S, et al. Artificial sensitive skin for robotics based on electrical impedance tomography[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, 2(4): 1900161.
- [53] PYO S, LEE J, BAE K, et al. Recent progress in flexible tactile sensors for human-interactive systems: From sensors to advanced applications (adv. mater. 47/2021)[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(47): 2170373.

- [54] DU T, ZHU Z H, CHEN M W, et al. Functional hydrogel strain sensors for smart electronic devices: Strategies and recent progress[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(8): 5402–5428.
- [55] GONG Y, CHENG Y Z, HU Y C. Preparation of polymer conductive hydrogel and its application in flexible wearable electronic devices[J]. *Progress in Chemistry*, 2022, 34(3): 616–629.
- [56] SCHMITZ A, MAIOLINO P, MAGGIALI M, et al. Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(3): 389–400.
- [57] CHEN K, LIANG K W, LIU H, et al. Skin-inspired ultra-tough supramolecular multifunctional hydrogel electronic skin for human-machine interaction[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 102.
- [58] BÜSCHER G H, KÕIVA R, SCHÜRMAN C, et al. Flexible and stretchable fabric-based tactile sensor[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 63: 244–252.
- [59] SILVERA-TAWIL D, RYE D, SOLEIMANI M, et al. Electrical impedance tomography for artificial sensitive robotic skin: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2001–2016.
- [60] KE K, MCMASTER M, CHRISTOPHERSON W, et al. Highly sensitive capacitive pressure sensors based on elastomer composites with carbon filler hybrids[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 126: 105614.
- [61] YOSHIMOTO S, SAKAMOTO K, TAKEDA R, et al. Design of a high-performance tomographic tactile sensor by manipulating the detector conductivity[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(12): 16783–16791.
- [62] LIU F, LIN X, YAN Y T, et al. Self-powered programmable van der waals photodetectors with nonvolatile semifloating gate[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(24): 11645–11654.
- [63] PARK H, PARK K, MO S, et al. Deep neural network based electrical impedance tomographic sensing methodology for large-area robotic tactile sensing[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1570–1583.
- [64] 王琦, 杨雨晗, 李秀艳, 等. 基于 DK-SVD 的深度学习电阻抗块稀疏成像方法研究[J]. *计量学报*, 2024, 45(9): 1370–1377.
- WANG Q, YANG Y H, LI X Y, et al. Study on the electrical impedance block sparse imaging method of deep learning based on DK-SVD[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2024, 45(9): 1370–1377(in Chinese).
- [65] ADLER A, GUARDO R. Electrical impedance tomography: Regularized imaging and contrast detection[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(2): 170–179.
- [66] CAI G F, WANG J X, QIAN K, et al. Extremely stretchable strain sensors based on conductive self-healing dynamic cross-links hydrogels for human-motion detection[J]. *Advanced Science*, 2017, 4(2): 1600190.
- [67] GUO X H, HONG W Q, ZHAO Y N, et al. Bioinspired sandwich-structured pressure sensors based on graphene oxide/hydroxyl functionalized carbon nanotubes/bovine serum albumin nanocomposites for wearable textile electronics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 163: 107240.
- [68] SADIQ H, HUI H, HUANG S, et al. A flexible pressure sensor based on PDMS-CNTs film for multiple applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3033–3039.
- [69] JING H C, XU L, WANG X Q, et al. A phase-change gel based pressure sensor with tunable sensitivity for artificial tactile feedback systems[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(35): 19914–19921.
- [70] 尹鸿润, 叶明, 吴阳, 等. 基于生物阻抗谱成像的生物组织检测方法[J]. *物理学报*, 2022, 71(4): 367–373.
- YIN H R, YE M, WU Y, et al. Biological tissue detection based on electrical impedance spectroscopic tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(4): 367–373(in Chinese).
- [71] 王琦, 尹鑫铭, 李晓捷, 等. 肺部电阻抗成像电极阵列优化方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(6): 55–65.
- WANG Q, YIN X M, LI X J, et al. Optimization of electrode array for lung electrical impedance imaging[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(6): 55–65(in Chinese).
- [72] HAO Z H, YUE S H, SUN B Y, et al. Optimal distance of multi-plane sensor in three-dimensional electrical impedance tomography[J]. *Computer Assisted Surgery*, 2017, 22(S1): 326–338.

## 本文引文格式:

王琦, 王鑫, 段晓杰. 基于 EIT 技术的智能可穿戴传感器的研究进展[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(4): 71–82.

WANG Q, WANG X, DUAN X J. Research progress in smart wearable sensors based on EIT technology[J]. *Journal of Tianjin University*, 2025, 44(4): 71–82(in Chinese).