

基于水凝胶柔性传感器的呼吸监测系统研究进展

吕心予 王艳玲

浙江水利水电学院, 计算机科学与技术学院, 中国·浙江 杭州 310018

摘要: 柔性传感器凭借其出色的柔韧性、导电性与生物相容性逐步取代传统的刚性传感器, 成为下一代智能感知技术的核心载体。本研究以水凝胶柔性传感器为研究基础, 从水凝胶传感器、数据传输、数据处理三个角度出发总结了水凝胶呼吸监测传感器一体化模型。

关键词: 水凝胶; 传感器; 多模态; 呼吸监测

Research Progress on Respiratory Monitoring Systems Based on Hydrogel Flexible Sensors

Lv Xinyu, Wang Yanling

Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, School of Computer Science and Technology, China Zhejiang Hangzhou 310018

Abstract: Flexible sensors, with their excellent flexibility, conductivity, and biocompatibility, are gradually replacing traditional rigid sensors and becoming the core platform of next-generation intelligent sensing technologies. This study focuses on hydrogel-based flexible sensors and presents an integrated model for hydrogel respiratory monitoring sensors, summarized from three perspectives: hydrogel sensor design, data transmission, and data processing.

Keywords: Hydrogel; Sensor; Multimodal; Respiratory monitoring

1 研究背景

呼吸, 是我们生命中最自然、最频繁的动作。每一次吸气与呼气, 都在为身体输送氧气、排出废气, 维持着生命的基本运转。然而呼吸问题的发展往往是缓慢而隐蔽的。老年人是慢性呼吸系统疾病比如慢性阻塞性肺疾病、睡眠呼吸暂停综合征和心血管疾病的高发群体。此外庞大的青壮年人群也面临压力、焦虑、睡眠障碍等问题, 人们处于亚健康状态但缺乏客观数据来量化评估和跟踪改善。相比于传统医院监护通常使用多导睡眠监测仅能捕捉短时、静态数据, 难以反映呼吸疾病的昼夜节律和长期演变规律, 人们迫切期待呼吸监测也能如同血糖仪能够从医院走向社区, 普及到个人手中。随着可穿戴技术的发展, 彻底摆脱线缆和大型固定设备的束缚, 允许用户在居家、办公、运动等自然生活状态下接受连续、动态的呼吸监测成为了可能。其中应用于可穿戴设备中的柔性传感器因其具有轻薄、柔软、可贴合皮肤的特性, 并可结合物联网的无线传输能力, 可以客观记录夜间鼾声、呼吸暂停事件、睡眠阶段的呼吸节律, 以此来评估睡眠质量^[1,2]。因此基于柔性传感器的多模态数据采集、深度融合已成为呼吸监测的核心技术手段, 将为后续的个性化健康、远程诊断等研究提供丰富的数据基础。

2 水凝胶柔性传感器

2.1 水凝胶柔性传感器

水凝胶材料以其高含水量、与人体软组织高度匹配的弹性模量、出色的生物相容性及可调控降解性, 成为柔性电子领域备受瞩目的前沿材料。这类材料能够与人体皮肤形成安全、舒适且稳定的共形界面, 制备成贴片后可以为长期、无扰的健康监测提供理想的物质基础。集成了导电介质的水凝胶天然具备多模态感知能力的优势, 可通过电阻或电容变化检测呼吸运动引起的应变; 利用亲水网络吸附水分子感知呼吸气流湿度变化; 基于温敏相变或热电/离子热电效应响应温度波动; 还可通过微结构设计捕获声学振动信号, 如咳嗽、鼾声等生理信号^[3]。这种集多种感知机制于一身的特性, 使水凝胶成为构建新一代多模态呼吸监测系统的核心材料, 也推动了柔性传感技术从单一参数检测向智能化、集成化方向的发展。

2.2 柔性水凝胶制备

水凝胶柔性传感器因其优异的柔韧性、导电性、生物相容性以及可调的物理化学特性而广泛应用于医疗健康监测、可穿戴电子与人机交互、农业与环境监测等领域。水凝胶的制备方法主要包括物理交联和化学交联两大类, 其中物理交联法无需使用化学交联剂, 生物相容性更优; 化

学交联法则需使用化学交联剂来形成更稳定的三维网络结构。物理交联法（冻融循环法、自组装法、离子交联法）主要是通过非共价作用力（如氢键、范德华力、离子键、疏水作用等）形成三维网络结构，通常具有较好的生物相容性，非常适合用于可穿戴及生物医学领域^[3,4]。

水凝胶作为柔性传感器的关键敏感材料是传感器实现实际运行的核心保障，其导电性能直接决定了传感器的响应灵敏度、检测精度与稳定性。水凝胶的导电性能主要依赖于其内部的电荷传输路径，根据导电机制的不同，水凝胶传感器可分为离子导电型、电子导电型以及混合型三大类，并适配不同的应用场景。（1）离子导电是水凝胶最常见的导电方式，主要依靠水凝胶网络中游离的阳离子（ Na^+ 、 Li^+ 、 Al^{3+} ）和阴离子（ Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 TFSI^- ）在外电场作用下的定向移动实现电荷传输。当外加电场时，阳离子和阴离子分别向阴极和阳极定向移动，从而形成电流，这种以离子为载流子的导电机制与人体神经信号传导方式相似，该类水凝胶表现出优异的界面阻抗匹配特性，能显著提升心电、肌电等弱生理电信号的信噪比和保真度，已成为生物电子接口电极的理想选择。（2）电子导电型水凝胶依靠体系内的自由电子或空穴实现电荷传输，主要通过在网络中引入导电填料（比如碳纳米管、石墨烯、金属纳米线以及导电聚合物）来构建连续的电子传输通路。与离子导电相比，电子导电水凝胶具有更高的电导率与更好的环境稳定性，不受含水量变化的显著影响。导电填料的种类、含量与分散状态是决定电子导电水凝胶性能的核心因素。当导电填料含量达到临界值时，填料之间相互接触形成连续导电网络，水凝胶的导电性能会出现数量级的跃升，但过高的填料含量会导致水凝胶的柔韧性下降，甚至出现脆性断裂，因此在制备电子导电型水凝胶时需要综合考虑其导电性能与机械性能。（3）混合型导电水凝胶同时具备了离子导电与电子导电双重机制，通过将离子导电组分与电子导电填料复合，实现优势互补。通过调控两种导电组分比例与分布，可以实现对水凝胶导电性能的精准调控，满足复杂场景下的传感器需求。

2.3 柔性水凝胶结构构建

为同步实现水凝胶应变传感器的灵敏度与长期信号稳定性的双重提升，当前主要通过“微纳结构精准设计”或者“宏观结构强化”两种途径。首先，通过在微观尺度构建特定裂纹、多孔或褶皱等微纳结构，可有效调控其在外界刺激下的导电通路变化，从而显著提升传感器的灵敏度。同时，合理的微纳结构还能增加离子迁移的有效路径，减

少应变过程中离子的局部富集与耗散，进而提升信号的稳定性。

宏观结构强化从水凝胶的整体力学性能入手，通过构建双网络结构、引入增强相等手段来提升水凝胶的机械性能和环境稳定性。例如，传统水凝胶的聚合物网络多为单一的化学交联结构，在反复应变作用下易出现网络断裂和性能衰减，而双网络水凝胶通过将刚性的第一网络与柔性的第二网络相结合，利用网络间的能量耗散机制来显著增强其机械性能^[5]。此外，向水凝胶中引入纳米纤维素、石墨烯等纳米增强相，不仅能提升水凝胶的力学性能，还能进一步优化离子导电通路，减少外界环境（如温度、湿度变化）对传感器信号的干扰，保障传感器在长期使用过程中的信号稳定性。

3 多模态传感机制

3.1 应变传感：监测胸腹呼吸运动

应变传感通过监测水凝胶在形变过程中电阻或阻抗的变化来感知机械应变，是实现呼吸运动监测的核心机制。聚乙烯醇/明胶双网络离子导电水凝胶凭借其优异的韧性和稳定的导电性能，能够准确捕捉胸部起伏引起的微小形变，在呼吸监测中表现出高信噪比和良好的循环稳定性^[5,6]。另一方面，聚苯胺复合水凝胶则利用导电聚合物的压阻效应，对关节运动和呼吸动作均有灵敏响应，其灵敏度可通过填料浓度和分散状态进行调节^[7]。此外，胶原基水凝胶复合材料也被广泛应用于运动监测中，其良好的生物相容性和可调力学性能使其能够与人体皮肤形成紧密贴合，从而可靠地提取呼吸波形和频率信息^[8,9]。这些应变水凝胶传感器均已成功应用于呼吸健康监测系统中。

3.2 湿度传感：捕捉鼻息气流变化

湿度传感依赖于水凝胶的亲水性网络对水分子的吸附作用，进而引起介电常数或离子电导率的可逆变化。聚乙烯醇基复合薄膜因其富含羟基的亲水特性和可调控的多孔结构，对呼吸气流引起的湿度变化极为敏感，能够快速、可逆地响应呼气 and 吸气过程中鼻腔附近湿度的周期性变化^[10]。这种传感器无需直接接触皮肤即可工作，避免了运动伪影的干扰，特别适用于长期、无感的呼吸监测场景。通过优化聚乙烯醇的交联度和孔隙率，可以进一步提高传感器的响应速度和使用寿命。

3.3 温度传感：区分呼吸气流与体温

温度传感主要基于水凝胶的热敏特性，当温度变化时其电阻或体积会随之发生相应改变。例如 PNIPAM 温敏水凝胶利用其低临界相变温度（LCST）特性，在接近人体温

度的区域表现出显著的电阻变化,可用于区分呼出气体与吸入气体的温度差异^[11]。此外,温敏变色水凝胶将温度信息转化为可视化的颜色变化,为呼吸状态监测提供了一种直观的补充手段。

3.4 生物电信号传感:捕捉心电与肌电活动

生物电信号传感利用水凝胶电极与皮肤之间形成的离子-电子转换界面,采集心电(ECG)和肌电(EMG)等生理电信号。水凝胶传感器由于高粘附性确保了其与皮肤的稳定接触,减少了运动伪影;离子导电性与人体组织高度相容,能够提供高保真的信号采集^[12];而优异的柔软性则保证了佩戴的舒适性。在实际应用中,心电信号不仅可反映心脏活动,还可通过提取呼吸性窦性心律不齐信号间接获得呼吸率,与应变传感器的结果形成交叉验证^[12],提升测量的准确性。同时,肌电信号可用于监测辅助呼吸肌的活动强度,客观评估呼吸努力程度,为呼吸功能障碍的诊断提供重要参考^[5]。这种多参数同步监测能力使水凝胶传感器在呼吸系统的综合评估中发挥着越来越重要的作用。

4 呼吸监测系统集成与实现

水凝胶多模态呼吸监测系统的实现需重点解决能源供给、数据通信与智能数据处理等相关问题,可通过自供能技术、无线数据传输、大数据计算有机融合实现呼吸健康监测领域的应用。

4.1 能源层:实现能量采集与管理的自供能技术

自供能技术通过高效收集并管理环境能量,为实现可穿戴传感器的持续运行提供了根本解决方案。该技术主要依赖摩擦纳米发电机和热电发电机:杨龙^[13]的研究通过静电纺丝技术制备了PVDF、TPU等压电/摩擦电纳米纤维,将其织入织物或制成薄膜集成于胸贴或腹带中,利用人体呼吸或运动导致材料形变,通过摩擦起电或压电效应产生交流电能;另一方面,聚乙烯醇/明胶基热电水凝胶^[6]则将呼吸气流与体表间的微小温差直接转换为电能,实现对呼吸监测过程的自驱动供电。然而,这些能量采集方式输出的电能通常具有微弱、不稳定的特性,需结合高效的能量管理策略方可实用。姚玉坤^[14]提出的分簇路由算法可进一步优化能耗,通过将纳米纤维摩擦纳米发电机与传感电极层共贴于胸部,可实现“呼吸即供电”,最终构建出与自供能技术高度匹配、可长期稳定工作的呼吸监测系统。

4.2 网络层:实现无线数据传输与云端通讯架构

为实现监测数据的可靠、低功耗传输与云端交互,需构建适应不同应用场景的无线通讯架构。低功耗蓝牙

(BLE)技术作为主流短距离无线方案,是实现与智能手机便捷交互的首选;张太鹏^[15]的研究提供了一个经过验证的工程范例,其智能胸贴系统通过BLE将多模态呼吸数据上传至手机App,再由手机转发至云端平台,实现了数据的实时处理与远程监控,该架构兼顾了低功耗与易用性。

4.3 算法层:实现多模态信号处理与自学习的深度算法

为实现长期的呼吸健康评估,算法层在边缘端完成毫秒级信号预处理与特征提取,在云端完成大规模数据的自监督预训练与模型迭代,最终生成可服务于临床解读的日常健康评估报告。具体实施包含:(1)高精度同步采集。(2)混合机器学习特征融合:在呼吸事件识别方面,采用一维卷积神经网络(1D-CNN)提取局部特征(如血氧下降斜率、呼吸间隔),结合长短期记忆网络(LSTM)建模长程依赖关系。(3)自监督学习与迁移学习:针对标注数据稀缺的现实挑战,采用在大型公开临床数据集上预训练的模型作为基础,在自有呼吸数据集上进行微调,显著降低对标注数据量的依赖,实现在有限标注条件下仍达到高精度模型性能。

5 总结与展望

水凝胶柔性传感器凭借其优异的柔韧性、导电性及良好的生物相容性已成功应用于呼吸运动的实时连续监测。传感器可同步采集呼吸应变、温度及湿度信号,为呼吸疾病诊断提供多维数据。然而,多种信号的相互干扰及耦合解析仍将面临挑战。

参考文献:

- [1] 崔小静, 聂钰又, 吴瑞敏等. PVA/明胶双网络热电水凝胶制备及自驱动呼吸监测应用[J]. 微纳电子技术, 2023,60(09):1422-1428.
- [2] 刘玉岗. 多模态智能化睡眠监测系统的设计[D]. 燕山大学, 2023.
- [3] 汤力, 蒋康伟, 张子丹等. 水凝胶柔性电子研究进展[J]. 包装学报, 2025,17(03):1-9.
- [4] 杨月莹. 水凝胶强韧界面设计及其在植入式医疗器械的应用[D]. 华中科技大学, 2023.
- [5] 娄元万. 双网络水凝胶式柔性可穿戴生理压力监测传感器的研究[D]. 太原理工大学, 2024.
- [6] 崔小静, 聂钰又, 吴瑞敏等. PVA/明胶双网络热电水凝胶制备及自驱动呼吸监测应用[J]. 微纳电子技术, 2023,60(09):1422-1428.
- [7] 马晓茹. 聚苯胺改性水凝胶传感器制备及脉搏检测

效果测试研究[J]. 粘接, 2024,51(10):57-60.

[8] 王春秀. 胶原基水凝胶复合材料在运动监测中的应用研究[J/OL]. 中国皮革, 1-6.

[9] 曾涛, 高伟宸, 苏纯珍等. 聚 N- 异丙基丙烯酰胺水凝胶的相变温度调控及性能研究[J]. 化工技术与开发, 2025,54(03):21-27.

[10] 张昕泽. PVA 基复合薄膜的设计与应用: 湿度传感与能量收集[D]. 东华大学, 2025.

[11] 黄紫璇, 黄玓琛, 陈子敬等. 可视化温敏变色型实时体温监测复合水凝胶的制备与应用[J]. 当代化工研究, 2023,(18):43-45.

[12] 彭继伟. Janus 不对称粘附水凝胶的制备及声学性能研究[D]. 郑州轻工业大学, 2025.

[13] 杨龙. 面向智能传感和自供能检测的纳米纤维可穿戴传感器研究[D]. 吉林大学, 2025.

[14] 姚玉坤, 王冠, 任智等. 能耗均衡的自供能无线传感器网络分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2013,26(10): 1420-1425.

[15] 张太鹏. 便携式智能胸贴生命体征监护系统的研究[D]. 兰州理工大学, 2022.

基金项目: 浙江水利水电学院大学生创新创业训练计划项目资助(项目编号:S202411481106, 2024 年)。