

水凝胶柔性电子研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.3001

汤 力 蒋康伟
张子丹 汤建新

湖南工业大学
生物与医学工程学院
湖南 株洲 412007

摘 要: 导电水凝胶是一种具有软-湿三维结构的新型功能高分子材料, 具有高含水率、良好的生物相容性及优良导电性。水凝胶应用于柔性电子, 克服了传统刚性元件的局限性, 实现了直接、连续、精确的监测。水凝胶传感器在构建柔性可穿戴系统方面涉及电生理、人体运动、机器学习和呼吸检测等多个领域, 但水凝胶柔性电子存在灵敏度低、检测限大、稳定性差等问题。未来应开发高灵敏度、长稳定性、多孔结构、多刺激响应的水凝胶柔性传感器, 并利用机器学习技术实现智能感知。

关键词: 水凝胶; 柔性电子; 可穿戴; 健康监测

中图分类号: TP212.9; TB324

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)03-0001-09

引文格式: 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(3): 1-9.

随着健康问题的日益凸显, 可穿戴式健康监测设备受到了广泛关注。然而, 目前可穿戴设备大多是刚性元件, 弹性模量高、延展性和贴合性均较差, 在肌肉及关节活动部位, 器件难以与皮肤稳定锚定, 尤其是在对外界拉伸、压缩、弯曲、扭转及内部关节运动自由度要求高的应用场景, 易出现贴合度欠佳、测量精确度差等问题^[1,2]。以高性能柔性导电材料(如导电水凝胶、导电纤维、导电弹性体等)为研究核心的柔性可穿戴传感技术为解决此类问题提供了可能。其中, 导电水凝胶作为一种具有软-湿三维结构的新型功能高分子材料, 具有极高的含水率、较低的模量及优良的导电性, 是构建全柔性可穿戴设备的理想候选材料^[3]。

近年来, 导电水凝胶作为新型柔性电子材料的代表, 在性能优化与功能拓展方面取得了长足进展。然而, 要实现其在健康监测领域的广泛应用, 关键在

于将基于导电水凝胶构建的柔性传感器与先进的电子元件(如高效数据收集模块和无线信号传输技术)深度融合, 形成一体化、智能化的监测系统。这不仅需要克服材料兼容性和接口设计的技术难题, 还需确保整个系统在保持柔韧性的同时, 具备良好的生物相容性和长期稳定性。当前, 水凝胶柔性电子技术在电生理监测、人体运动追踪及呼吸状态分析等领域已展现出广阔的应用前景, 而机器学习的引入更为其赋予了强大的数据处理与分析能力, 使得系统能够自主学习、预测健康状况并识别潜在的健康风险, 为精准医疗和远程健康管理提供了强有力的技术支持(见图1)。

本研究首先对水凝胶柔性材料进行简单的介绍, 然后阐述了近年来柔性水凝胶与电子电路集成及可穿戴系统构建的进展, 并对本领域的发展趋势进行了展望。

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40263, 2023JJ50184)

作者简介: 汤 力, 男, 副教授, 主要从事多功能凝胶材料体系、水凝胶基柔性可穿戴系统、水凝胶伤口敷料研究,

E-mail: tangli_352@163.com

通信作者: 汤建新, 男, 教授, 主要从事生物医用材料、生物芯片与传感器件研究, E-mail: jxtang0733@163.com



图 1 水凝胶柔性电子健康监测

Fig. 1 Hydrogel flexible electronic for health monitoring

1 导电水凝胶

导电水凝胶是一种新颖的“软-湿”复合材料，它通过将具有导电特性的物质，包括电解质^[4-6]、金属纳米粒子^[7]、导电高分子聚合物^[8]和碳基材料^[9]等，融入到具有三维网络结构的亲水性高分子凝胶中，赋予水凝胶导电能力。根据导电机制的不同，导电水凝胶主要分为两大类：离子导电水凝胶^[10]和电子导电水凝胶^[11]。离子导电水凝胶则通过凝胶网络中离子的高效传输来完成导电过程；而电子导电水凝胶主要依赖于导电填料之间电子的自由迁移来实现其导电功能。

1.1 离子导电水凝胶

离子导电水凝胶是一种将离子电解质和亲水性凝胶复合的多功能材料，其网络间富水结构保证了凝胶内部离子的自由迁移，实现了高导电性、良好生物相容性和卓越抗冻性能的兼容^[12, 13]。常见的离子电解质有酸、盐和离子液体等含自由离子的物质。化学掺杂的离子不仅在水凝胶中自由移动，还可以作为交联剂，固化水凝胶网络间的高分子链结构^[14]。如丙烯酸、 γ -聚谷氨酸当作氢键的供体和受体^[15, 16]；金属离子也能通过与高分子聚合物链上的基团（如羧基）形成配位键，在增强水凝胶机械韧性的同时，赋予其优良的导电性^[17]。此外，引入的正负离子，可与水分子形成水合离子，降低水分子的冰点，从而提高水凝胶的抗冻保湿性能^[18]。

1.2 电子导电水凝胶

电子导电水凝胶是将导电填料巧妙地分散在水凝胶基质中制备得到的，其核心是在水凝胶内部构建连续电子导电网络。当导电填料，如银纳米线、石墨

烯、碳纳米管或高分子导电聚合物^[19]等，被均匀地分散在水凝胶的基质中，并通过桥接作用和隧穿效应形成一条连续的电子传输路径时，水凝胶便展现出了优异的导电性能^[20]。制备电子导电水凝胶的策略主要涵盖两个方面：一是通过物理掺入或化学交联的方式，将电子导电的纳米颗粒引入水凝胶体系内，这些纳米颗粒不仅增强了水凝胶的导电性，还有助于改善其机械性质；二是利用导电聚合物，如聚吡咯（PPy）、聚噻吩（PTh）、聚苯胺（PANI）和聚（3,4-乙烯-二氧噻吩）（PEDOT）等，作为构建导电水凝胶网络的单体^[21]。这些导电聚合物具有 π - π 共轭结构，能够传导电子并承载溶剂离子。

2 水凝胶柔性可穿戴的集成

在深入探索水凝胶传感器性能的研究中，一个核心挑战在于如何高效地将此类传感器融入先进的电子架构中，特别是与数据收集及无线信号传输技术的无缝集成，以赋能现实世界的持续健康监测。尽管传统集成电路技术已趋成熟，但实现导电水凝胶传感器与硬质电路板之间的系统级集成仍是关键。近年来，研究人员已报道了多种高性能单模态柔性电子器件^[22, 23]，然而，聚焦于水凝胶传感器为核心的多功能集成式可穿戴系统的研究报道尚显稀缺。构建一个理想的水凝胶柔性可穿戴系统（见图 2），通常需精心整合水凝胶传感器、信号调理电路、微控制器（MCU）、无线传输芯片及上位机等多个模块^[24]。其中，MCU 作为系统的中枢神经，集成了处理器、存储单元及通讯接口^[25]，负责执行复杂的信号处理任务、数据的有效存储及与其他集成电路的顺畅沟通^[26]。鉴于水凝胶传感器原始信号中常伴随高频噪声、信号幅度超限等不利因素^[27]，精心设计的电路策略显得尤为重要。这包括采用惠斯通电桥以增强电阻测量的精准度，利用运算放大器对微弱信号进行有效放大以便于后续处理，以及部署滤波电路以剔除不必要的频段干扰，从而确保信号质量^[28, 29]。此外，可穿戴设备还需借助高效的无线通信技术，如低功耗的 Bluetooth 或 NFC 技术，以实现与远端设备的稳定数据传输。这既确保了数据传输的实时性，又兼顾了设备的续航能力^[30]。这一综合解决方案不仅推动了水凝胶传感器技术在健康监测领域的实际应用，也为未来柔性可穿戴设备的发展开辟了更广阔的前景。

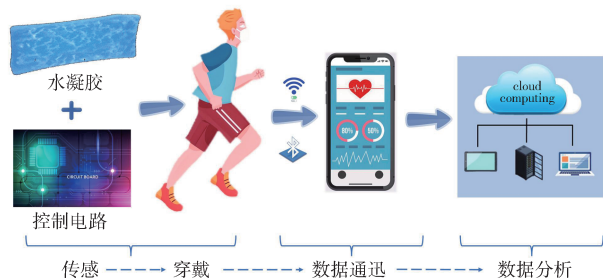


图2 水凝胶柔性可穿戴设备示意图

Fig. 2 Schematic of hydrogel flexible wearable device

2.1 电生理监测

人体的电生理信号是评估健康状况的关键指标, 它们与大脑、心脏和神经系统的功能紧密相关。例如, 表面肌电 (sEMG)、心电 (ECG)、眼电 (EOG) 和脑电 (EEG) 等信号, 能够反映肌肉、心脏、眼球及大脑的电生理活动^[31]。通过采用无创技术记录这些信号, 能够精确地监测这些重要器官的生理状态。在无创记录技术中, 高性能生物电极的制备是核心环节。然而, 传统生物电极大多是硬质金属电极材料, 不能完全贴合柔软的人体皮肤, 在监测过程中会因与皮肤接触摩擦而引起皮肤不适, 并且对环境变化极为敏感, 依赖特定的耦合剂来降低皮肤与电极之间的界面阻抗, 以减少噪声和外界干扰, 从而提高信号质量。

相比之下, 通过引入导电聚合物和离子液体, 水凝胶的导电性能显著提升, 能够捕捉微弱的电生理信号。此外, 通过在凝胶网络中引入动态共价键 (如席夫碱键) 或物理作用 (如氢键、离子键), 可实现材料在机械损伤后的快速自修复。更重要的是, 上述策略的引入也有助于水凝胶实现良好的黏附性能, 显著降低电极与皮肤之间的界面阻抗, 并为之提供稳定的接触界面, 有效减少运动过程中的监测伪影^[32]。这些优势极大地扩展了水凝胶在医疗监测、运动科学和神经科学研究等领域的应用潜力^[33]。

2.1.1 表面肌电信号监测

sEMG 是一种在皮肤表面记录的电生理信号, 它能捕捉肌肉活动时神经肌肉系统产生的生物电变化。由于 sEMG 信号的采集过程是非侵入性的, 并且能够实时反映肌肉的动态活动, 因此, 将导电水凝胶生物电极与器件组装构建可穿戴肌电监测设备, 已广泛应用于临床医学、康复医学和体育科学等多个领域。

分子工程使聚合物水凝胶具备可调机械性、多样化特性和优异离子传导性, 但作为离子皮肤 (i-skins), 其在实际应用中仍面临多重挑战, 如延

展性与接触黏附性不佳、功能性欠缺及传感能力不足等。Yang C. C. 等^[34]使用多重动态相互作用策略设计了一种基于 PG-BT2 水凝胶的便携式 i-skin 设备。捕获的信号随后通过内置微控制器进行高效处理, 并借助蓝牙模块与显示终端进行无线传输, 从而实现了对人体电生理活动的即时、远程监测。

为了进一步拓宽柔性 sEMG 检测设备的应用场景, 水下表面肌电 (UW-sEMG) 的长期高质量采集对水下活动至关重要。然而, 大多数 UW-sEMG 电极, 尤其是水凝胶电极, 由溶胀引起的机械、电学和黏附性的退化, 导致其性能显著下降。Ye Y. M. 等^[35]根据海星利用管足在岩石上不断地附着和脱离原理, 设计了一种仿海星管足的 UW-sEMG 电极, 并基于此自主研发了腕戴式肌电信号记录系统 (见图 3)。该电极构造精妙, 结合了外部硅胶吸盘的强附着力、内部微膨胀水凝胶的舒适贴合以及顶部高导电性的 Ag/AgCl 电极, 共同构成了能在水下环境中稳定捕获更高质量 sEMG 信号的装置。这种仿生海星管足电极凭借其增强的皮肤黏附性与卓越的抗噪声特性, 与无线化、小型化及防水型肌电信号采集系统相集成, 为实际应用中的水下监测场景提供了强有力的技术支持。

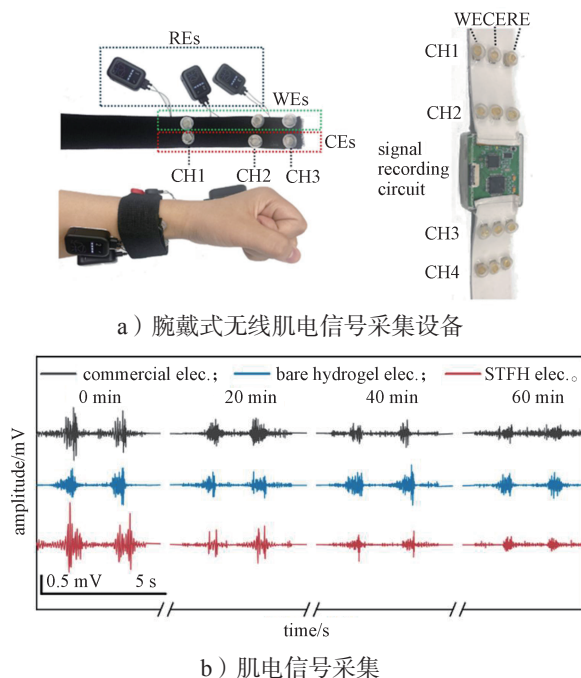


图3 腕戴式无线肌电信号采集设备及其水下表面肌电信号采集

Fig. 3 Wrist-worn wireless EMG acquisition device and underwater surface EMG acquisition

2.1.2 心电信号监测

ECG 是心脏活动中产生的电信号,能够揭示心脏的收缩与舒张状态。在医疗健康领域,心电信号的监测对于心脏疾病的预防、诊断和治疗至关重要。Liu J. C. 等^[36]通过创新的工艺,在聚乙烯醇(PVA)水凝胶表面镀上金属,成功制备出了一种名为 Ag-PVA 水凝胶(AgPH)的半干电极。高柔韧性和良好的生物相容性使其能够紧密贴合皮肤,显著减少了电极与皮肤之间的空气层,从而有效降低了接触阻抗。配合全集成的心电图模拟前端 AD8232 传感器和 Arduino-UNO R3 微控制器,该系统能够实现对心脏电活动的精准监测。在长达 24 h 的连续测试中,该系统的心电信号信噪比始终保持在 28 dB 以上,充分展示了其卓越的稳定性和可靠性。之后, Liu R. J. 等^[37]在此基础上进一步拓展了水凝胶的应用范围,开发出了一种集成自增强离子导电水凝胶的可穿戴紧急报警系统。该系统由鞋垫底部的自增强水凝胶应变传感器、表皮电生理信号监测器以及报警无人机控制模块三大部分组成(见图 4)。通过对水凝胶力学、电学性能和生物相容性的深入研究,团队成功设计了高灵敏度的应变传感器和电生理信号监测器。鞋垫传感器内置了运算放大器和继电器,能够准确捕捉足底压力变化并转换为电信号;而表皮监测器则负责实时监测心电活动,一旦发现异常如 ST 段抬高等紧急情况,将立即向处理器发送警报。只有当两者同时发出警报时,系统才会启动紧急报警程序,如控制无人机起飞并在室外发出鸣笛声等。这一创新设计不仅提高了急救响应的准确性和及时性,更为挽救患者生命提供了有力的技术支持。

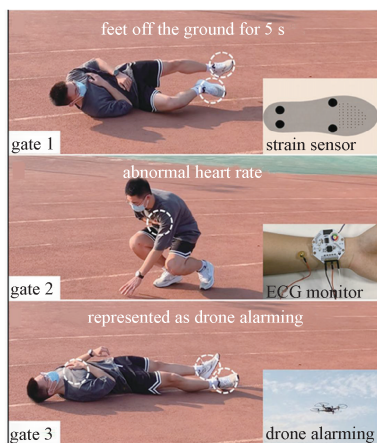


图 4 基于自增强水凝胶传感器的应急报警系统

Fig. 4 Emergency alarm system based on self-reinforcing hydrogel sensor

2.1.3 脑电信号监测

相较于其他电生理信号, EEG 信号幅度微小且易受干扰。传统脑机接口(BMI)数据采集设备大多采用多通道刚性电极脑电图帽,限制了便携性与佩戴舒适度。Yang G. G. 等^[38]通过创新工艺,利用逐层浇注与光引发聚合技术,成功合成了兼具黏合剂与疏水特性的双层水凝胶(AHBHs),并嵌入高拉伸导电复合材料(ECC)层,开发出 AHBH-ECC 皮肤生物传感器。该传感器不仅能有效抑制大运动伪影,还适用于长时间 EEG 信号监测。此外,团队还设计了一款便携式、无线、皮肤贴合的脑电图头带,集成了低功耗微处理器、柔性电路、3 个 AHBH-ECC 电极及锂电池,实现了单通道头皮脑电图的便捷监测。特别是,通过将工作电极与参考电极巧妙布置于耳后, Fp2 位点安置 AHBH-ECC 电极,有效规避了头发干扰。采集的 EEG 信号经电路滤波、微处理器处理后,通过蓝牙无线传输至移动终端,为实时情感识别提供了可能。如图 5 所示,采集受试者的 3 种目标情绪(积极、中性和消极),以微分熵(DE)与 EEG 功率谱密度(PSD)为特征,通过迁移学习中的域自适应方法,减少了情感识别中的领域转移影响。在交替优化算法的支持下, DANN 模型参数得以自动优化,使得系统分类准确率达 90%(范围在 81%~98%),展现了在脑机接口、神经系统疾病诊断及情感智能领域的巨大潜力。这一创新不仅提升了 EEG 监测的便捷性与舒适度,也为精准医疗与人机交互开辟了新路径。

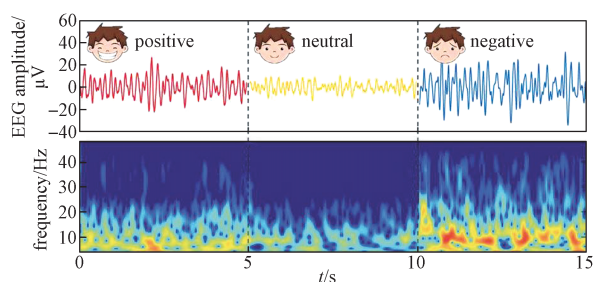


图 5 不同情绪状态下采集的脑电图信号及其能谱

Fig. 5 EEG signals and their energy spectra collected under different emotional states

2.2 人体运动监测

导电水凝胶电极以其优异的机械匹配性和生物相容性,解决了电子与生物组织间的适应难题,其柔软质地减少机械失配,生物相容性降低不良反应,提升应用安全性^[39, 40]。导电性是水凝胶捕捉人体运动信号的关键,采集形变引发的电信号变化是运动传

传感器的主要监测机制。因此,水凝胶传感器需具有高电子或离子导电性能,以及快速响应与高灵敏度,一般响应时间低于 100 ms,灵敏度达到 0.1~5.0 的量级 ($\Delta R/R_0$)。具备这些特性的导电水凝胶传感器将为健康监测、运动分析及医疗康复等领域带来创新解决方案。Zhu K. R. 等^[41]开发了基于多组分交联共聚 (P(AMMA)-PEI) 水凝胶的双重封装结构摩擦纳米发电机 (DES-TENG), 将 DES-TENG 作为传感装置集成在拖鞋的底部, 并结合 STC89C52 单片机编写代码, 设计了智能步态传感系统, 实现了对人行走步数和步速的实时监控。然而, 传统开发板设计的局限性使得该系统在便携性和可穿戴性方面仍有待提升。与传统的有线传输传感器相比, 无线传输系统具有实时信号采集和远程信号传输的优点, 避免了电线和距离的限制。Huang H. L. 等^[42]设计了一种超可拉伸可回收双网聚合物导电水凝胶 (SA-Zn), 并结合 Wi-Fi 技术实现了对人体运动的远程监测。SA-Zn 水凝胶与 Wi-Fi 电子设备的结合, 不仅克服了电线和距离的限制, 还通过将水凝胶传感器黏附在膝关节上成功监测了爬楼梯时的步态变化, 并使用 3 种不同的上楼梯方式来评估 SA-Zn-W 的性能。Ma M. L. 等^[43]将柔性应变传感器与硅集成电路技术相融合, 并采用了低功耗蓝牙技术进行无线数据传输。这种设计不仅使得监测设备更加小巧便携, 还实现了手机端实时接收并显示运动数据的功能, 极大地提升了用户体验。如图 6 所示, 该集成电路板的高度集成化和低功耗设计, 使得无需笨重的测试设备即可实现对人体运动的连续、实时监测, 为运动科学、康复训练等领域提供了强有力的技术支持。

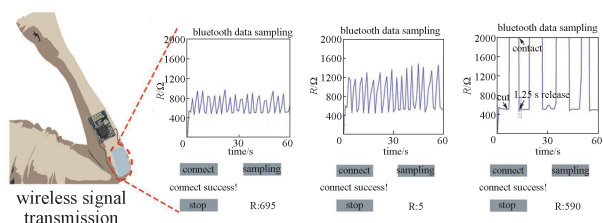


图 6 水凝胶传感器在人体运动监测的应用

Fig. 6 Applications of hydrogel sensors in human motion monitoring

2.3 呼吸监测

呼吸监测主要用于评估个体的呼吸功能、呼吸模式与与呼吸相关的生理状况。它对于诊断呼吸系统疾病、评估治疗效果以及监测患者在特定状态下的呼吸状况具有重要意义。人体呼出的气体中含有许

多可检测的生理信号, 湿度作为呼吸最明显的指标, 通过无创、非接触的湿度监测可以快速、方便地评估个人的健康体征。通常在水凝胶中加入亲水性高分子 (如聚丙烯酸、聚乙烯醇) 或者吸湿材料 (如氧化石墨烯), 可赋予水凝胶快速吸附和释放水分的能力, 并可引起其电学或机械性质发生明显变化。因此, 通过检测呼气和吸气时的湿度差, 可以实时捕捉呼吸频率与深度。Ni Y. M. 等^[44]以聚乙烯醇和聚丙烯酰胺作为水凝胶骨架材料, MXene 作为湿度传感材料, 甘油和水作为二元溶剂合成的有机水凝胶, 具有优异的耐低温和耐干燥性能。将水凝胶传感器同时放置于腹部和口腔, 独立监测呼吸变化。在呼吸停止时, 能观察到一条几乎平坦的曲线, 提示发生呼吸阻塞。该研究为基于水凝胶的湿度传感器在呼吸监测中的应用提供了新的思路, 对医疗领域可穿戴电子设备的发展具有重要意义。

为了监测设备便携、数据可视化, Liang Y. N. 等^[45]基于水凝胶膜湿度传感器开发具有蓝牙传输功能的无线呼吸中断检测面罩。将传感器与无线电路集成, 构建具有蓝牙传输功能的无线睡眠呼吸暂停检测报警系统。该系统通过 DDS 芯片为湿度传感器提供 600 mV、200 Hz 的交流信号。湿度传感器输出的电流信号经跨阻抗放大器转换为电压信号并放大, 然后由单片机模数转换器收集信号, 并对其进行分析, 提取呼吸的波形、频率和周期, 并将数据通过蓝牙发送到移动终端 (见图 7)。该便携式口罩可应用于日常生活中, 预防人们睡眠时因呼吸暂停危及生命的风险, 实现了无创、舒适的实时呼吸监测。

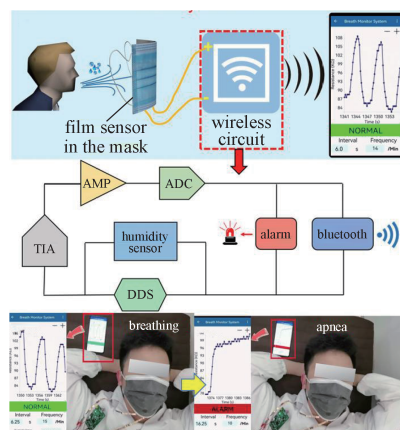


图 7 水凝胶传感器在人体呼吸监测的应用

Fig. 7 Application of hydrogel sensor in human respiratory monitoring

2.4 机器学习在水凝胶传感技术的应用

机器学习在水凝胶传感技术的应用中开辟了一个充满无限可能的研究前景。通过深度挖掘并分析海量传感数据,机器学习能够精准识别影响水凝胶传感器性能的核心要素,进而在传感器的设计、制造工艺及使用条件上实现精准优化,显著提升传感器的精度与稳定性。这一数据驱动的优化策略,正引领着柔性可穿戴设备领域的创新浪潮,为实时监测人体健康状况、运动数据等提供了前所未有的技术支持,极大地促进了个性化医疗与健康管理的发展。

当前,机器学习已在水凝胶应变传感器与表面肌电信号的手势识别领域展现出卓越的应用成效。Zhou L. J. 等^[46]开发了基于水凝胶应变传感器的手语翻译系统。将 5 个水凝胶应变传感器连接到手指第二掌指关节上,制成传感器阵列,通过 Arduino Nano 微控制器捕获信号,串口传输数据到电脑端,形成丰富的数据集。随后,利用主成分分析(PCA)方法,从海量数据中提取出每个手势的 60 个关键特征,这些特征累计方差贡献率高达 95.5%,确保了信息的全面性与准确性。在训练阶段,采用五重交叉验证策略,结合分类学习器进行深度训练,最终通过 Logistic 回归算法进行验证。该系统展现出了惊人的识别能力,验证准确率高达 99.2%,测试最高准确率也达到了 98.6%,为手语翻译技术的实用化迈出了坚实的一步。Wang H. 等^[47]将研究聚焦于提升手势识别的舒适性与精准度,成功地将水凝胶传感器与自主研发的柔性印刷电路板融为一体,设计出了贴合手臂皮肤的 HMI 系统。该系统不仅能够紧密贴合皮肤,减少运动伪影,还能稳定地捕捉手臂在不同手势下的肌电图(EMG)和力图(FMG)信号。在数据传输与处理方面,该系统引入了先进的 AI 算法,实现了对复杂信号的自动分割、特征提取与高效分类识别,从而能够准确分析用户的运动意图,并快速生成相应的控制命令(见图 8)。这一创新成果不仅显著提升了手势识别的用户体验,也为智能穿戴设备、虚拟现实及增强现实等领域的发展提供了强有力的技术支持。

除了手势识别系统,Guo R. 等^[48]为婴儿全方位运动监测创新性地研发了一种基于深度学习辅助的可食用摩擦电水凝胶传感器。系统精心布局,在床沿部署了 12 个高精度摩擦电传感器,并与即时报警系统无缝对接,一旦婴儿接近床边危险区域,即刻触发警报,为监护人提供即时预警。而在婴儿身体各部位

安装的 11 个传感器,构建了一个全面覆盖的人体区域传感器网络,能够精准捕捉婴儿的各种运动信号。通过多通道数据采集系统,这些传感器能够实时收集婴儿在翻身、抱婴、拍背、鼓掌等动作中产生的峰值电压信号。由于不同动作产生的信号特征各异,团队成员巧妙地运用了深度学习算法,对海量数据进行深度挖掘与分析,实现了对婴儿运动模式的快速、准确识别。这一创新成果不仅为婴儿安全监护提供了强有力的技术支持,也充分展示了深度学习在生物传感领域的巨大潜力。

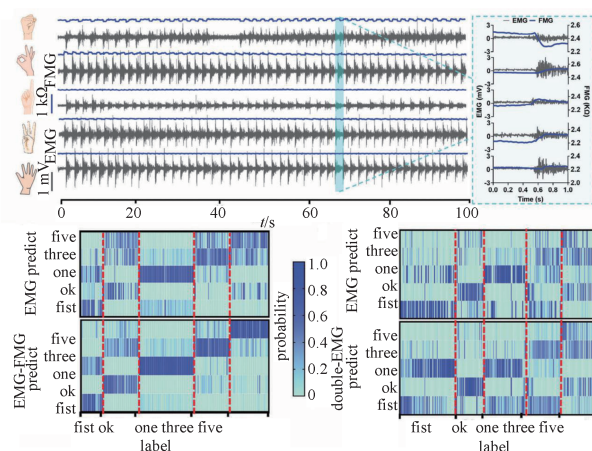


图 8 不同动作意图下的 EMG 和 FMG 信号及其预测概率分布

Fig. 8 EMG and FMG signals under different action intentions and their predicted probability distributions

3 结论与展望

水凝胶出色的导电性、极高的生物相容性和环境稳定性,为其在柔性电子产品中的广泛应用奠定了坚实基础。具体而言,水凝胶已展现出在应变传感器、温湿度传感器、电生理监测设备及导电电极等领域的巨大潜力。这些应用不仅丰富了柔性电子产品的功能多样性,还显著提升了其在医疗健康领域的实用性。在医疗领域,基于导电水凝胶的柔性可穿戴健康监测设备已成为生理信号监测、运动康复指导及疾病早期诊断的得力工具。这些设备通过精准捕捉心率、血压、血氧饱和度等关键生理指标,为用户的健康管理、疾病预防与病情控制提供了全面而深入的数据支持。尤为值得一提的是,水凝胶应变传感器凭借其高拉伸性、完美的皮肤贴合度及与皮肤相似的弹性特性,在人体运动状态监测中表现出色。它们能够实时捕捉并分析用户的动作模式,为运动康复训练提供科学依

据,同时也为扁平足、帕金森症及阻塞性睡眠呼吸暂停综合征等疾病的监测与诊断开辟了新途径。

导电水凝胶虽备受关注并展现出巨大潜力,但仍面临多重技术挑战。首先,水凝胶传感方面存在灵敏度低、检测限大、稳定性差等问题,限制了其实际应用。未来研究需聚焦于开发高灵敏度柔性传感器,优化结构设计以增强信号处理精准度,并结合先进电路设计与机器学习算法提升数据解析能力。其次,水凝胶传感器的长期性能稳定性受水分蒸发和凝结影响,即使采用溶剂替代策略也无法完全解决在使用过程缓慢失水的问题。再者,水凝胶透气性不足,长期皮肤贴合使用可能引发不适或炎症,开发多孔结构或者薄膜水凝胶能有效解决此问题^[49,50]。最后,现有水凝胶传感器多局限于单一刺激响应,难以满足复杂环境中的多元监测需求,需研发新型传感机制或利用机器学习技术实现更高级别的智能感知。

尽管水凝胶传感器当前的应用领域面临诸多挑战与局限,但随着全球科研力量的持续深耕与不懈探索,这些难题终将一一破解。随着技术的不断突破,我们有望迎来智能复合水凝胶传感器应用场景的广泛拓展与革新。在此背景下,功能化导电水凝胶作为一股新兴力量,以其独特的性能与优势,展现出无限的探索潜力和发展空间。

参考文献:

- [1] 苏炳添,李健良,徐慧华,等.科学训练辅助:柔性可穿戴传感器运动监测应用[J].中国科学:信息科学,2022,52(1):54-74.
- [2] 陈一,李朔,李佳新,等.导电水凝胶在柔性电子器件领域的研究进展[J].包装学报,2023,15(6):91-98.
- [3] LI G, LI C L, LI G D, et al. Development of Conductive Hydrogels for Fabricating Flexible Strain Sensors[J]. Small, 2022, 18(5): 2101518.
- [4] ZHOU Y H, FEI X, TIAN J, et al. A Ionic Liquid Enhanced Conductive Hydrogel for Strain Sensing Applications[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 606: 192-203.
- [5] DIAO W J, WU L L, MA X F, et al. Highly Stretchable, Ionic Conductive and Self-Recoverable Zwitterionic Polyelectrolyte-Based Hydrogels by Introducing Multiple Supramolecular Sacrificial Bonds in Double Network[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(29): 47783.
- [6] XIONG L H, JIN S C, ZHANG F D, et al. Bioinspired Fabrication of Self-Recovery, Adhesive, and Flexible Conductive Hydrogel Sensor Driven by Dynamic Borate Ester Bonds and Tannic Acid-Mediated Noncovalent Network[J]. European Polymer Journal, 2022, 180: 111636.
- [7] 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.
- [8] ZHOU N, WANG T, CHEN S H, et al. Conductive Polyaniline Hydrogel Enhanced Methane Production from Anaerobic Wastewater Treatment[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 581: 314-322.
- [9] WU Y, SUN S M, GENG A B, et al. Using TEMPO-Oxidized-Nanocellulose Stabilized Carbon Nanotubes to Make Pigskin Hydrogel Conductive as Flexible Sensor and Supercapacitor Electrode: Inspired from a Chinese Cuisine[J]. Composites Science and Technology, 2020, 196: 108226.
- [10] 谢蒙蒙,刘健,党蕊,等.离子导电水凝胶的制备及在柔性电子领域的应用[J].化工进展,2024,43(6):3128-3144.
- [11] 章炜,夏欢,陈鹏宇,等.电子导电水凝胶电极在柔性储能系统中的应用研究进展[J].高分子学报,2024,55(3):255-274.
- [12] LIU Y Q, LIU Q Y, ZHONG L, et al. Tough, Antifreezing, and Conductive Double Network Zwitterionic-Based Hydrogel for Flexible Sensors[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139314.
- [13] CHEN S X, HUANG J R, ZHOU Z X, et al. Highly Elastic Anti-Fatigue and Anti-Freezing Conductive Double Network Hydrogel for Human Body Sensors[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(17): 6162-6172.
- [14] CUI W, ZHENG Y, ZHU R J, et al. Strong Tough Conductive Hydrogels via the Synergy of Ion-Induced Cross-Linking and Salting-Out[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(39): 2204823.
- [15] YAO J L, YANG H, ZUO D Y, et al. Facile Preparation and Adsorption Behavior Studies of Poly(Acrylic Acid)-Based Hydrogels Reinforced by Hydrogen Bonds for Methylene Blue Dye[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2023, 31(2): 552-564.
- [16] ZHANG C Y, WANG M X, JIANG C H, et al. Highly Adhesive and Self-Healing γ -PGA/PEDOT: PSS Conductive Hydrogels Enabled by Multiple Hydrogen Bonding for Wearable Electronics[J]. Nano Energy,

- 2022, 95: 106991.
- [17] LUO Y C, YU M L, ZHANG Y T, et al. Highly Sensitive Strain Sensor and Self-Powered Triboelectric Nanogenerator Using a Fully Physical Crosslinked Double-Network Conductive Hydrogel[J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107955.
- [18] JIAN Y K, HANDSCHUH-WANG S, ZHANG J W, et al. Biomimetic Anti-Freezing Polymeric Hydrogels: Keeping Soft-Wet Materials Active in Cold Environments[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(2): 351–369.
- [19] WANG M C, ZHOU H W, JIN X L, et al. Highly Compliant and Low Strain Hysteresis Sensory Electronic Skins Based on Solution Processable Hybrid Hydrogels[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(5): 1822–1828.
- [20] JI D, PARK J M, OH M S, et al. Superstrong, Superstiff, and Conductive Alginate Hydrogels[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3019.
- [21] LI G, HUANG K X, DENG J, et al. Highly Conducting and Stretchable Double-Network Hydrogel for Soft Bioelectronics[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(15): 2200261.
- [22] BOUTRY C M, NEGRE M, JORDA M, et al. A Hierarchically Patterned, Bioinspired E-Skin Able to Detect the Direction of Applied Pressure for Robotics[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(24): eaau6914.
- [23] IMANI S, BANDODKAR A J, VINU MOHAN A M, et al. A Wearable Chemical-Electrophysiological Hybrid Biosensing System for Real-Time Health and Fitness Monitoring[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11650.
- [24] 尹锡轩, 李荣彬, 郭伟东, 等. 基于柔性传感器阵列信号采集系统设计与应用 [J]. *电脑知识与技术*, 2024, 20(12): 8–11.
- [25] 蔡 浩, 童辛芳, 杨 军. 采用新兴隧穿器件的低功耗微控制器设计与实现 [J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(5): 2264–2273.
- [26] LING Y Z, AN T C, YAP L W, et al. Disruptive, Soft, Wearable Sensors[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(18): 1904664.
- [27] HAN Q Q, ZHANG C, GUO T M, et al. Hydrogel Nanoarchitectonics of a Flexible and Self-Adhesive Electrode for Long-Term Wireless Electroencephalogram Recording and High-Accuracy Sustained Attention Evaluation[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(12): 2209606.
- [28] MAURER J H M, GONZÁLEZ-GARCÍA L, REISER B, et al. Templated Self-Assembly of Ultrathin Gold Nanowires by Nanoimprinting for Transparent Flexible Electronics[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(5): 2921–2925.
- [29] HONG Y J, JEONG H, CHO K W, et al. Wearable and Implantable Devices for Cardiovascular Healthcare: From Monitoring to Therapy Based on Flexible and Stretchable Electronics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(19): 1808247.
- [30] ZHENG Y P, WANG J W, CUI T Y, et al. Advancing High-Performance Tailored Dual-Crosslinking Network Organo-Hydrogel Flexible Device for Wireless Wearable Sensing[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 653: 56–66.
- [31] YANG G G, ZHU K H, GUO W, et al. Adhesive and Hydrophobic Bilayer Hydrogel Enabled On-Skin Biosensors for High-Fidelity Classification of Human Emotion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(29): 2200457.
- [32] NIU X, DOU R X, SUN H B, et al. Multifunctional Sensors for Surface Synchronized Monitoring of Pressure/Biopotential Signals and Motion Recognition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154214.
- [33] LI X B, HE L Z, LI Y F, et al. Healable, Degradable, and Conductive MXene Nanocomposite Hydrogel for Multifunctional Epidermal Sensors[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(4): 7765–7773.
- [34] YANG C C, HE G G, XU B, et al. Polymer Hydrogel Electronics with Adhesive, Self-Healing, and Anti-Ultraviolet Capabilities for Machine Learning-Promoted Electrophysiological Detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498: 155766.
- [35] YE Y M, GUO J, WANG A, et al. Starfish Tube Feet Inspired Hydrogel Electrode for Durable Underwater sEMG Acquisition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 153882.
- [36] LIU J C, LIU K Z, PAN X L, et al. A Flexible Semidry Electrode for Long-Term, High-Quality Electrocardiogram Monitoring[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 6(1): 13.
- [37] LIU R J, WANG T J, LI G F, et al. Self-Reinforced Hydrogel-Based Skin-Contactable Flexible Electronics for Multimodal Electrophysiological Signal Monitoring and Emergency Alarming System[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(24): 2214917.
- [38] YANG G G, ZHU K H, GUO W, et al. Adhesive and Hydrophobic Bilayer Hydrogel Enabled On-Skin Biosensors for High-Fidelity Classification of Human Emotion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022,

- 32(29): 2200457.
- [39] YUK H, LU B, ZHAO X. Hydrogel Bioelectronics[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(6): 1642–1667.
- [40] YANG C H, SUO Z G. Hydrogel Ionotronics[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(6): 125–142.
- [41] ZHU K R, WU L X, LIU M N, et al. Triboelectric Nanogenerator Based on Multi-Component Crosslinked Network Hydrogel for Intelligent Human Motion Sensing[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486: 149948.
- [42] HUANG H L, HAN L, LI J F, et al. Super-Stretchable, Elastic and Recoverable Ionic Conductive Hydrogel for Wireless Wearable, Stretchable Sensor[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(20): 10291–10300.
- [43] MA M L, SHANG Y H, SHEN H D, et al. Highly Transparent Conductive Ionohydrogel for All-Climate Wireless Human-Motion Sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 129865.
- [44] NI Y M, ZANG X R, YANG Y, et al. Environmental Stability Stretchable Organic Hydrogel Humidity Sensor for Respiratory Monitoring with Ultrahigh Sensitivity[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(38): 2402853.
- [45] LIANG Y N, DING Q L, WANG H, et al. Humidity Sensing of Stretchable and Transparent Hydrogel Films for Wireless Respiration Monitoring[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14(1): 183.
- [46] ZHOU L J, ZHAO B, LIANG J Y, et al. Low Hysteresis, Water Retention, Anti-Freeze Multifunctional Hydrogel Strain Sensor for Human-Machine Interfacing and Real-Time Sign Language Translation[J]. Materials Horizons, 2024, 11(16): 3856–3866.
- [47] WANG H, DING Q L, LUO Y B, et al. High-Performance Hydrogel Sensors Enabled Multimodal and Accurate Human-Machine Interaction System for Active Rehabilitation[J]. Advanced Materials, 2024, 36(11): 2309868.
- [48] GUO R, FANG Y S, WANG Z S, et al. Deep Learning Assisted Body Area Triboelectric Hydrogel Sensor Network for Infant Care[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(35): 2204803.
- [49] LIU X T, LIU Y M, DU J T, et al. Breathable, Stretchable and Adhesive Nanofibrous Hydrogels as Wound Dressing Materials[J]. Engineered Regeneration, 2021, 2: 63–69.
- [50] CHENG S M, LOU Z R, ZHANG L, et al. Ultrathin Hydrogel Films Toward Breathable Skin-Integrated Electronics[J]. Advanced Materials, 2023, 35(1): 2206793.

(责任编辑: 李玉华)

Progress of Flexible Electronics in Hydrogels

TANG Li, JIANG Kangwei, ZHANG Zidan, TANG Jianxin

(School of Biological Science and Medical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Conductive hydrogels are a new type of functional polymer materials with a soft and wet three-dimensional structure, featuring high water content, good biocompatibility and excellent electrical conductivity. The hydrogel based flexible electronics overcome the limitations of traditional rigid components and achieve direct, continuous and precise monitoring. Hydrogel sensors are involved in multiple fields such as electrophysiology, human motion, machine learning and respiratory detection in the construction of flexible wearable systems. However, hydrogel flexible electronics face issues such as low sensitivity, large detection limit and poor stability. In the future, high-sensitivity, long-stable, porous and multi-stimuli-responsive hydrogel flexible sensors should be developed, and machine learning technology should be utilized to achieve intelligent perception.

Keywords: hydrogel; flexible electronics; wearable; health monitoring