

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.03.012

## 柔性湿度传感器的研究进展

贾正伟

(北京机械设备研究所, 北京 100006)

**摘要:** 为推进智能可穿戴设备的核心传感单元柔性湿度传感器的研究与应用, 重点剖析了高分子聚合物基、纸基、织物基、纱线基等柔性材料的设计策略, 以及湿法纺丝、浸渍、喷涂、喷墨打印、印刷、折叠、缝纫、刺绣、编织等制造技术对传感器灵敏度与响应速度的提升机制, 并系统综述了柔性湿度传感器在呼吸监测、汗液监测、伤口监测、运动监测等领域的应用进展, 同时指出未来研究需聚焦多功能异质集成、自供电技术融合、生物相容性优化等方向, 结合人工智能算法实现数据驱动的智能感知, 以推动柔性湿度传感器在个性化医疗、智能运动装备等场景的深度应用。

**关键词:** 柔性湿度传感器; 柔性材料; 制造技术; 可穿戴设备; 智能监测

中图分类号: TP212.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)03-00100-09

### Research progress in flexible humidity sensors

JIA Zhengwei

(Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100006, China)

**Abstract:** To advance the research and application of core sensing units in intelligent wearable devices—flexible humidity sensors, this study focuses on analyzing the design strategies of various flexible materials, such as polymer-based materials, paper-based materials, textile-based materials, and yarn-based materials. It also explores how manufacturing techniques like wet spinning, impregnation, spraying, inkjet printing, printing, folding, sewing, embroidery, and weaving can enhance the sensitivity and response speed of sensors. Additionally, the study systematically reviews the application progress of flexible humidity sensors in areas such as respiration monitoring, sweat monitoring, wound monitoring, and motion monitoring. It highlights that future research should concentrate on the integration of multifunctional heterogeneity, the fusion of self-powered technology, and the optimization of biocompatibility. Moreover, it emphasizes the need to combine artificial intelligence algorithms to achieve data-driven intelligent perception, thereby promoting the in-depth application of flexible humidity sensors in personalized medical care and intelligent sports equipment.

**Key words:** flexible humidity sensor; flexible material; manufacturing technology; wearable device; intelligent monitoring

柔性湿度传感器作为智能可穿戴设备中的关键组件, 正逐渐成为材料科学、电子技术与传感技术深度融合的前沿热点<sup>[1-2]</sup>。这类传感器凭借其独特的柔性设计, 能够紧密贴合人体皮肤或其他复杂曲面, 实现对环境湿度及人体生理湿度(如呼吸湿度、汗液湿度等)的高精度、实时监测<sup>[3-6]</sup>。随着智能穿戴设备市场的快速扩张以及大众对健康监测需求的日益增长, 柔性湿度传感器在健康监测、运动健身、伤口护理等多个领域展现出巨大的应用潜力<sup>[7]</sup>。例如, 在健康监测方

面, 柔性湿度传感器能够精准检测呼吸频率和汗液分泌情况, 为早期疾病预警和个性化健康管理提供重要数据支持; 在运动健身领域, 则可通过监测运动过程中的皮肤湿度变化, 评估运动强度和体能消耗, 辅助用户科学规划训练计划<sup>[8-9]</sup>。

为全面把握柔性湿度传感器领域的最新进展与技术趋势, 本文对柔性湿度传感器的研究现状、材料创新、制造工艺以及在智能穿戴领域的应用实例进行系统综述。基于对现有文献和研究成果的深入分析,

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1203903); 国家自然科学基金项目(52473219)

通信作者: 贾正伟(1985—), 男, 副高级工程师, 主要研究方向为仿生机械、电液系统、液压阀件的设计与研究。E-mail: ustbjzw206@163.com

本文重点探讨了高分子聚合物基、纸基、纱线基及织物基等不同类型的柔性湿度传感器在性能提升、结构设计及功能集成方面的最新突破;概述湿法纺丝、浸渍、喷涂、喷墨打印等制造技术在柔性湿度传感器制备中的应用,以及这些技术对传感器性能优化的关键作用;分析当前柔性湿度传感器在灵敏度、稳定性、响应速度等方面面临的挑战,并展望未来的发展趋势,如多功能集成、智能化以及与其他新兴技术的深度融合,旨在为柔性湿度传感器的研究与应用提供有价值的参考与指导。

## 1 湿度传感器工作原理

图1所示为电阻型和电容型湿度传感器的工作原理。

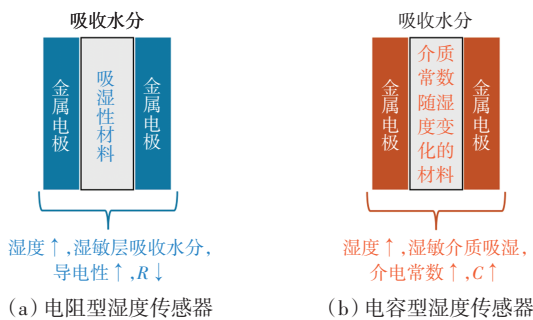


图1 电阻型与电容型湿度传感器的工作原理

Fig.1 Schematic diagram illustrating working principles of resistive and capacitive humidity sensors

### 1.1 电阻型湿度传感器

电阻型传感器(如图1(a))的核心为吸湿敏感材料,其电阻值随环境湿度变化呈现规律性改变。当吸湿材料吸附水分子时,材料内部的离子解离度增加或载流子迁移率提升,导致电阻值显著降低<sup>[10]</sup>。典型敏感材料包括聚电解质、金属氧化物(如 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ )及碳基复合材料等<sup>[11]</sup>。此类传感器具有结构简单、制造成本低、易于微型化等优势,但其响应速度受限于水分子的吸附-解吸动力学过程,且在高湿环境下可能因离子迁移饱和和导致灵敏度下降。近年来,通过引入多孔结构或纳米复合材料可有效提升其动态响应特性。

### 1.2 电容型湿度传感器

电容型湿度传感器(如图1(b))通过检测介电层电容值变化实现湿度测量,其典型结构由叉指电极与介电敏感层构成<sup>[12-14]</sup>。当环境湿度升高时,吸湿性介电层(如聚酰亚胺(PI)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )吸附水分子导致介电常数增大,进而引起电容值与湿度呈近似线性关系变化。得益于高精度的电容检测电路设计,此类传感器具备

更优的灵敏度和毫秒级响应速度,且在宽湿度范围内表现出良好的长期稳定性<sup>[15]</sup>。目前已在工业过程控制、气象监测及医疗设备等领域获得广泛应用。

两类传感器的核心差异在于信号转换机制:电阻型依赖材料导电特性的体效应变化,而电容型则基于界面介电常数的改变。两者均需配置信号调理电路实现电阻/电容值到电信号的转换。值得注意的是,敏感材料的性能参数(吸湿容量、化学稳定性、滞后效应等)直接决定传感器性能边界。

## 2 湿度传感器用柔性材料

### 2.1 高分子聚合物基柔性湿度传感器

高分子聚合物基柔性湿度传感器因其优异的柔韧性和生物相容性,在可穿戴设备及环境监测领域极具应用潜力。其工作原理依赖于聚合物与水分子的相互作用引发的介电/导电特性变化。Chen等<sup>[16]</sup>构建了聚(二甲基二烯丙基氯化铵)/交联聚乙烯醇/氧化石墨烯(GO)半互穿网络体系,借助激光直接写入技术将GO原位还原为石墨烯电极。该柔性传感器在相对湿度(RH)为10%~90%宽域范围内呈现3个数量级的阻抗变化。与之形成技术互补,Malinský等<sup>[17]</sup>采用碳离子束刻蚀工艺在GO和PI基底上直接制备微结构传感单元,系统揭示了2种材料的差异化响应机制:GO微结构表现出典型的电容型湿度响应(相对湿度与电容值正相关),而PI微结构则呈现电阻型传感特征(相对湿度与电阻率负相关)。值得注意的是,PI材料在长期稳定性测试中展现出显著优势,其微结构在反复吸/脱附循环后仍保持稳定的电学响应,这对实际应用中的耐久性需求具有重要工程意义。

### 2.2 纸基柔性湿度传感器

纸基柔性湿度传感器凭借其环境友好、低成本及易加工特性备受关注。Ji等<sup>[18]</sup>采用全氟磺酸树脂/银纳米线(Nafion/AgNWs)杂化电极体系,通过喷涂-电镀工艺将 $\text{Au@AgNWs}$ 电极嵌入滤纸基底。该设计通过Nafion粘合层实现电极与基底的强效结合,不仅将基底电阻降低至0.3 k $\Omega$ ,更利用纸张固有的吸湿膨胀特性,构建出基于导电网络变化的湿度响应机制。实验数据显示,该传感器在1 V直流电压下可实现相对湿度为33%~100%的宽域检测,响应值 $I/I_0$ 高达1 958,同时展现出优异的线性度( $R^2 = 0.996 62$ )与滞后特性。针对响应速度的优化,Pan等<sup>[19]</sup>采用近场电喷雾直写技术,在纸基上构建了碳纳米管/纳米纤维素(CNTs/

CNF)网格状导电薄膜。该结构通过双重响应机制实现性能突破:一方面水分子与CNTs的电子转移效应引起电阻变化;另一方面纤维素吸水膨胀导致的导电网络破坏效应协同增强响应信号。这种复合机制使传感器在相对湿度为95%的环境下灵敏度达到101%,响应时间缩短至10 s(17%响应值),较传统纸基传感器提升显著。

### 2.3 纱线基柔性湿度传感器

纱线基材因其独特的三维多孔结构、优异的柔韧性和生物相容性,在柔性湿度传感器领域展现出显著优势<sup>[20]</sup>。其纤维间互联孔隙不仅为水分子吸附提供了丰富的活性位点,还可通过编织工艺实现与纺织品的无缝集成,为可穿戴传感系统提供了理想的载体平台。Li等<sup>[21]</sup>利用棉纱的层级孔隙结构和纤维素分子链上的亲水基团(—COOH/—OH)构建了湿度传感器。该传感器通过水分子在纤维表面的动态吸附/脱附机制实现湿度响应:当环境湿度升高时,棉纱的多级孔隙结构显著提升水分子捕获效率,而纤维素链上的极性基团则通过氢键作用诱导水分子的定向吸附。这一过程引起传感层离子传导率的变化,进而通过电阻信号实现湿度检测。实验数据表明,该传感器在相对湿度为33%~97%的宽检测范围内呈现优异的线性响应特性( $R^2 = 0.995\ 34$ ),且在不同湿度环境暴露20 min后仍保持稳定的信号输出。值得注意的是,棉纱基材的柔韧性使器件在弯曲条件下仍能维持良好的灵敏度,充分验证了纱线基材在复杂形变场景下的适用性。

### 2.4 织物基柔性湿度传感器

柔性湿度传感器的基底材料创新是提升其可穿戴性能的关键突破口。相较于传统刚性基底,织物材料凭借其优异的柔韧性、透气性及生物相容性,为可穿戴健康监测系统提供了理想的物质载体。近年来,研究者通过结构设计与功能化修饰,不断推进织物基湿度传感器在灵敏度、稳定性和集成化方面取得突破性进展。Singh等<sup>[22]</sup>采用牛仔布料作为柔性基底,构建了基于氧化石墨烯的织物天线传感器,其非接触式检测机制通过石墨烯与水分子间的介电响应实现,展现出203 MHz/10%RH的频率灵敏度和40°/10%RH的相位灵敏度双重传感特性。为解决实际应用中的环境干扰问题,Wu等<sup>[23]</sup>开发了具有夹层结构的智能传感器:以壳聚糖/聚乙烯醇/纤维素纳米颗粒(CS/PVA/CNP)复合膜为敏感核心,通过上下层疏水织物封装形成选择性透气界面,在保证穿戴舒适度的同时实现83.3%的汗液阻隔率。该器件通过集成微型化无线模

块,实现了人体多部位汗液分泌速率的连续动态监测,标志着可穿戴系统向实用化迈出重要一步。在响应性能优化方面,Zhang等<sup>[24]</sup>基于多尺度协同效应构建了复合传感材料,通过丝绸蛋白的—OH、—COOH官能团与CNTs、MXene的协同作用形成多重氢键网络,使其灵敏度提升至0.23( $\Delta R/R_0$ )。特别值得关注的是,该材料在11 s响应/12 s恢复的快速动态平衡机制支持下,可精准区分鼻呼吸(0.4~0.6 kPa)与口呼吸(0.8~1.0 kPa)的湿度特征差异,为呼吸模式识别提供了新型解决方案。

## 3 湿度传感器用制造技术

### 3.1 湿法纺丝技术

湿法纺丝凭借其独特的相转化成型机制,在柔性湿度传感器制备中展现出显著优势。该技术通过精确调控凝固浴条件,可实现纤维微观结构与功能组分的协同优化。He等<sup>[25]</sup>通过湿法纺丝结合溶剂交换工艺,构建了具有超快速响应特性的单壁碳纳米管/聚乙烯醇/氯化锂(SWNT/PVA/LiCl)纳米复合纤维传感器。在此三元体系中,SWNT构筑的三维导电网络与PVA基体协同作用,在确保结构稳定性的同时显著提升了电荷传输效率,而LiCl作为湿度敏感活性组分,通过溶剂交换诱导的离子扩散过程均匀嵌入纤维内部,形成了梯度分布的湿度响应位点。这种独特的结构设计使传感器在湿度检测性能上取得突破:当环境相对湿度从100%骤降至40%时,其电阻值呈现约6倍的变化幅度,且响应时间缩短至5 s以内。进一步研究表明,溶剂交换工艺不仅优化了LiCl的分布状态,更通过调控纤维内部微孔结构显著增强了水分子吸附/脱附动力学,这一发现为开发实时监测用高性能湿度传感器提供了重要的理论依据和技术路径。

### 3.2 浸渍技术

浸渍技术通过基材浸润-干燥成膜原理,在柔性湿度传感器制备中展现独特优势。其设备简易、成本低廉的特点,特别是对复杂结构基材的强适应性,使其成为研究热点。Xu等<sup>[26]</sup>通过精密控制浸渍工艺将氧化石墨烯(GO)溶液均匀涂覆于改性聚酯(Coolmax)纤维表面,构建具有三维多孔结构的GO-Coolmax传感器。该器件展现出亚秒级的超快响应/恢复特性(均低于0.6 s),其独特结构赋予其对温度/压力扰动的优异抗干扰性——由温压变化引起的电阻波动始终低于10%,而湿度响应信号变化幅度超过80%,形成显著信

噪比优势。此外, Beniwal 等<sup>[27]</sup>采用梯度浸渍法在可生物降解棉织物上构建湿度敏感层, 实现了 RH 为 25.0%~91.5% 宽域范围内 26.1%/RH 的高线性灵敏度 ( $R^2 > 0.99$ )。该生物基传感器展现出  $\pm 1.98\%$  的测试一致性、超过 135 d 的长期稳定性以及卓越机械耐久性——经历  $30^\circ\sim 150^\circ$  多级弯曲形变后仍保持信号完整性, 其环保特性与性能稳定性的协同突破为可穿戴传感提供了新范式。

### 3.3 喷涂技术

喷涂技术通过雾化沉积方式在柔性基底构建微纳结构, 其工艺简便性、成膜高效性与基底兼容性优势显著。Lu 等<sup>[28]</sup>采用喷涂工艺将 GO 均匀涂覆于尼龙织物 (NF) 基底, 构建兼具多孔网络结构和固态电解质功能的 NF@GO 复合敏感层。该自供电传感器基于纽扣电池原理工作: 在湿度环境中, GO 电离产生的自由  $H^+$  与锌电极氧化生成的  $Zn^{2+}$  形成离子迁移通道, 质子通过电解质定向迁移至铜电极后发生析氢反应, 由此产生 0.83 V 的最大输出电压。得益于 NF@GO 的三维多孔架构, 传感器不仅获得 0.78 s/0.93 s 的超快响应/恢复时间, 还具备 150 次循环稳定性及优异透气性, 完美契合皮肤表面健康监测需求。此外, Maity 等<sup>[29]</sup>也通过喷涂法将多壁碳纳米管 (MWCNT) 网络精准构筑于纺织品表面, 其湿度响应机制源于水分子与 MWCNT 表面  $-COOH$  和  $-OH$  的化学吸附/脱附过程。这种动态相互作用引起导电网络电阻变化, 使传感器在 RH 为 19%~93% 宽湿度范围内表现出稳定响应特性, 其中在 RH 为 57% 时展现出  $(4 \pm 2)$  s 的快速响应和  $(14 \pm 2)$  s 的恢复能力。

### 3.4 喷墨打印技术

喷墨打印作为数字化非接触制造技术, 通过微米级墨滴精确沉积功能材料, 在柔性湿度传感器领域展现显著优势, 其兼具工艺简便、成本可控及可大面积制备特性, 为器件性能调控提供了创新解决方案。Lin 等<sup>[30]</sup>采用商用办公喷墨打印机, 以原装黑色墨水构建电极, 配合饱和氯化钠溶液作为敏感材料, 在纸质基底上制备出经济型湿度传感器。通过简单调控传感层打印次数即可实现性能调控: 随着打印次数增加, NaCl 晶体在纤维素表面形成梯度沉积, 促使传感器灵敏度提升 3.2 倍, 最终器件在 RH 为 54%~95% 宽湿度范围内表现出优异的响应特性。该技术路径将单件传感器成本控制在 0.5 美元以下, 凸显了喷墨打印技术的产业化潜力。在高端器件开发方面, Jin 等<sup>[31]</sup>采用柔性液晶聚合物基底, 结合印刷电路工艺制备铜叉指电

极, 并通过喷墨打印将  $MoS_2$ /聚乙烯吡咯烷酮纳米复合材料精确图形化。得益于喷墨技术  $0.1 \mu m$  的定位精度, 所得传感器展现出 0.98 的线性度、0.8 s/0.7 s 的超快响应恢复动力学, 以及长达 30 d 的环境稳定性, 实现了可穿戴设备所需的机械柔性 with 检测精度的统一。

### 3.5 印刷技术

印刷技术通过功能性浆料的精确图案化沉积, 为柔性湿度传感器提供了规模化与定制化兼容的制造方案。研究者采用喷墨/丝网印刷将敏感材料精准负载于柔性基底, 通过微观结构调控优化传感性能。例如, Zhang 等<sup>[31]</sup>通过 LiF/HCl 混合溶液刻蚀  $Ti_3AlC_2$  MAX 相制备二维过滤金属碳/氯化物 (MXene) 纳米片后, 采用 PEI/AgNO<sub>3</sub> 交联改性策略重构纳米片层间结构, 不仅提升了材料机械稳定性, 还通过表面官能团调控增强了亲水性。基于此, 通过精密印刷工艺将改性后的 PMX6-A7 复合材料集成于纸基铜电极表面, 构建出具有梯度孔隙结构的湿度敏感层。所得传感器在相对湿度为 97% 的高湿环境下表现出 819.9% 的卓越电容响应率, 其 6.9 s 的快速响应与 11.9 s 的完全恢复特性, 印证了印刷工艺对敏感层微观结构的精准调控效果。特别值得关注的是, 经过 100 次机械弯曲循环后, 器件电容响应衰减率始终低于 3%。

### 3.6 折叠技术

折叠技术通过几何形变调控赋予材料特殊力学与功能特性, 为柔性湿度传感器设计提供了新思路。该技术通过二维平面向三维结构的可控转换, 在增强器件机械耐久性的同时优化传感性能。Chen 等<sup>[32]</sup>将折纸工程应用于纸基湿度传感器的开发, 通过将空气层压纸基材与折纸结构一体化设计, 构建出具有双重功能特性的可拉伸纸基湿度传感器 (POHS)。该传感器基材不仅作为柔性载体, 其层间空气腔体更通过折叠形变形成动态传感界面, 实现了灵敏度 (RH 为 65.3%~97.6% 线性响应)、响应速度 (155 s 响应/58 s 恢复) 与机械稳定性的协同提升。实验验证表明, POHS 在经历 300 次折叠-展开循环后仍能精准监测呼吸频率, 且在 1 000 次拉伸形变及多角度弯曲测试中保持信号稳定性 (相对误差  $< 3.2\%$ )。

### 3.7 缝纫技术

缝纫技术通过导电材料与纺织基底的结构化集成, 为柔性湿度传感器提供了高设计自由度和规模化生产可能。Agcayazi 等<sup>[33]</sup>通过精密缝制工艺开发了全纺织传感器阵列, 采用导电纱线 (银/不锈钢) 与介电织物 (棉针织、PET 针织、苯乙烯系热塑性弹性体 (Kraton))

熔喷非织造布)的层叠结构。在制造过程中,导电纱线通过预设图案被精准缝纫至介电基底,形成具有空间分辨能力的交叉导电网络,其中每个网格交叉点构成独立的电容传感单元。该设计利用了纺织材料的多孔特性——环境湿度变化会动态调控孔隙中的水分含量,从而改变介电常数并引发电容信号响应。实验数据显示,当RH升高时,棉基样品由于高达8.5%的吸湿率(显著优于PET的0.4%和Kraton的<0.1%),其介电常数变化幅度可达其他材料的20倍以上,最终反映为更优异的灵敏度(0.34 pF/%RH)和0.5 s级的快速响应。这种基于材料本征吸湿特性的传感机制,结合缝纫技术赋予的三维结构可设计性,不仅突破了传统刚性传感器在穿戴舒适性方面的局限,更通过纺织工艺兼容性为智能服装的大规模集成提供了可行性路径。

### 3.8 刺绣技术

刺绣技术通过数控设备或手工将功能性纱线以特定针法集成于柔性基底,形成导电结构,在湿度传感器制造中展现独特优势。Sinha等<sup>[34]</sup>基于刺绣工艺开发的可集成口罩式呼吸监测传感器,通过银镀聚酰胺导电线在一次性口罩表面刺绣叉指电极阵列,并采用2种聚酯线作为感湿介质填充电极间隙。当环境湿度变化时,聚酯线吸湿引起的介电常数变化会调制电极间电容值,该传感器在1 Hz~100 kHz宽频域内呈现良好线性响应( $R^2 = 0.983$ ),且经多次干湿循环仍保持97.8%的初始灵敏度。Estrada等<sup>[35]</sup>的系统性研究进一步揭示了基底材料对传感器性能的关键影响:棉基传感器因纤维多孔特性展现出最高阻抗变化幅度,其在高湿区呈现的电阻特性使其在水泄漏检测中实现快速响应;而聚酯基传感器凭借稳定的介电特性在宽湿度范围保持电容主导机制,特别适用于需长期连续监测的汗液传感场景。值得注意的是,基底吸水膨胀引发的几何形变可使棉基传感器灵敏度提升,但会降低聚酯基器件的长期稳定性。这些研究共同表明,刺绣技术通过参数化调控电极结构、感湿材料和基底特性,可实现传感器灵敏度、响应时间和耐久性的精准适配,为医疗监护、环境监测等差异化应用场景提供了兼具高性价比和良好机械柔性的解决方案。

### 3.9 编织技术

编织技术通过经纬纱线交叠结构实现柔性湿度传感器一体化制造,其直接将功能材料编织入织物基底,避免了复杂连接工艺,能显著提升器件结构可靠性。该技术赋予传感器优异的类型物特性,兼具高拉

伸强度与皮肤适形性,在可穿戴领域优势显著。其规模化生产特性更降低了制造成本,加速商业化进程。Wendler等<sup>[36]</sup>开发的多层编织结构湿度传感器,采用吸湿性纺织材料作为介电层,金属导线编织电极构成圆柱形电容结构,在RH为22%~94%范围内展现出高达135%的电容变化率,其独特的力学适应性使其可直接编织入服装面料。另外,Estrada等<sup>[14]</sup>则通过编织工艺将导电纱线嵌入织物形成叉指电极,构建的全纺织电容传感器在RH为30%~90%区间呈现优异线性响应( $R^2 > 0.98$ ),相较传统刺绣工艺,其重复性精度提升约40%,数据离散度降低至 $\pm 3.5\%$ 以内。这些研究表明,编织技术通过结构设计与工艺参数的协同优化,能够实现灵敏度、机械性能与可制造性的多维平衡,为新一代智能纺织品开发提供了重要技术路径。

## 4 柔性湿度传感器在智能穿戴领域的应用

柔性湿度传感器凭借其优异的机械柔性和生物相容性<sup>[27,37]</sup>,成为智能可穿戴设备的关键感知元件,可精准贴合人体曲面并实现微环境湿度实时监测。该技术通过多模态感知机制已应用于健康监测(如皮肤水分分析)和运动监测(如汗液流失追踪)等场景,为穿戴式健康管理提供了创新解决方案,如图2所示。

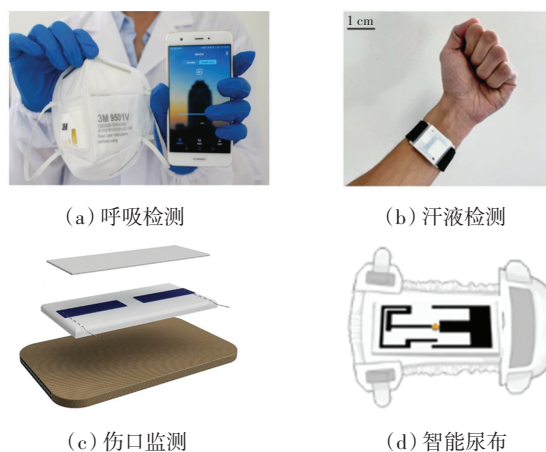


图2 湿度传感器在智能穿戴领域的应用

Fig.2 Application of humidity sensors in field of smart wearables

### 4.1 呼吸监测

呼吸监测是评估呼吸系统功能的重要生理指标检测手段,其频率变化可直观反映人体健康状况<sup>[38-40]</sup>。传统监测技术依赖专业设备且操作复杂,而基于柔性材料的湿度传感器凭借轻量化、可穿戴特性,为呼吸监测提供了革新性解决方案。这类传感器通过实时检

测呼吸气流引起的环境湿度变化实现监测功能:呼气时湿度显著升高,吸气时则降低,通过分析这种周期性波动的频率和幅度即可精确计算呼吸频率<sup>[5,12,41-42]</sup>。实际应用中,柔性传感器通常集成于口鼻附近的智能口罩或衣领贴片中<sup>[8]</sup>,采集的呼吸信号通过蓝牙等无线技术传输至终端进行分析。为提高监测精度,研究者采用了滑动平均滤波消除随机噪声、快速傅里叶变换提取特征频率及机器学习算法识别异常呼吸模式等信号处理技术。当前研究趋势正朝着多模态传感方向发展,通过整合温度、气流等传感器构建更全面的呼吸健康监测系统<sup>[7]</sup>。柔性湿度传感器已在多个应用场景展现显著价值<sup>[43]</sup>:①智能口罩可实时监测呼吸频率并在异常时触发警报<sup>[8,41]</sup>;②睡眠呼吸暂停监测系统通过分析夜间呼吸模式曲线,有效识别呼吸暂停事件;③基于 Kevlar/MXene 复合纤维的传感器兼具高灵敏检测与自清洁功能,为远程医疗提供可靠数据支持<sup>[8]</sup>;④水凝胶薄膜无线传感系统与口罩集成后,构建出便携式呼吸中断监测平台<sup>[15]</sup>。

#### 4.2 汗液监测

作为非侵入式健康监测的重要手段,汗液分析通过检测电解质( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ )、代谢物(乳酸、尿素)及蛋白质等生物标志物的动态变化,可实时反映人体生理状态<sup>[7,44]</sup>。柔性湿度传感器突破传统实验室分析的局限性,通过表皮贴片、智能手环或纺织集成等形态与皮肤形成共形接触,基于汗液分泌引发的微环境湿度变化构建湿度-时间响应曲线,不仅能实时评估汗液分泌与蒸发动力学,还可间接反映皮肤水合状态<sup>[44]</sup>。在技术革新方面,多功能集成传感器通过整合电化学检测模块,实现了对  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  等电解质浓度的原位分析,显著提升了运动生理监测中水合状态与电解质平衡的评估精度。当前研究正致力于将湿度传感与生物标志物检测技术相融合,拓展对葡萄糖、皮质醇等关键指标的同步监测能力。应用场景已覆盖三大核心领域:在运动科学中,通过动态监测汗液流失量和电解质变化,可优化训练强度和制定个性化补水方案;在健康管理领域,连续监测数据为脱水或电解质紊乱的早期预警提供依据;在皮肤护理领域,基于客观量化的皮肤水合状态评估可指导精准护肤。值得关注的是,通过集成微流控技术构建的智能系统,实现了汗液采集与分析功能的一体化设计,大幅提升了检测可靠性,为未来开发兼具高灵敏度与多参数检测能力的可穿戴设备开辟了新路径。

#### 4.3 伤口监测

柔性湿度传感器在伤口监测中的应用为临床诊疗提供了革命性技术突破。作为评估组织愈合进程及感染风险的关键生物标志物,伤口湿度状态的传统监测手段主要依赖医护人员视觉观察和敷料检查,存在主观性强、无法连续监测创面微环境等局限性<sup>[45-46]</sup>。柔性湿度传感器通过其优异的机械柔韧性和生物相容性,能够与创面形成共形贴合,实时捕捉渗出液的湿度动态变化,从而实现伤口愈合过程的智能监测。该技术的工作原理基于渗出液湿度特征与愈合阶段的强相关性:在炎症期渗出液量多导致高湿度环境;而进入增殖期和重塑期后湿度随渗出液减少逐渐降低。通过持续监测这一动态过程,传感器不仅能量化评估愈合阶段,还能在湿度异常升高(可能提示感染或炎症恶化)时及时预警。在技术实现层面,柔性湿度传感器系统通过3个核心要素构建智能监测体系:首先,材料设计采用兼具高吸湿性与透气性的高分子材料如聚(3,4-乙炔二氧噻吩)/聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚苯乙醇(PVA)作为敏感层,确保高效捕获渗出液的同时维持创面透气性;其次,通过嵌入式无线传输模块实现湿度数据的实时远程传输,打破传统监测的时空限制;最后,结合机器学习算法对采集信号进行去噪处理和模式识别,显著提升监测数据的可靠性。这种与功能性敷料集成的创新方案,不仅实现了伤口微环境的连续动态监测,更为精准医疗和远程监护提供了重要技术支撑,标志着创面管理从经验判断向数据驱动的智能转型。

#### 4.4 运动监测

运动监测作为人体健康管理的重要场景,其核心在于实时捕捉由运动引发的生理参数变化。当人体进行运动时,心率加速、呼吸增强、体温升高及排汗量增加等系列生理反应可被柔性湿度传感器协同其他传感装置构建多维监测网络。此类传感器通过检测皮肤表面湿度动态变化(反映代谢强度与能量消耗水平)与呼出气体湿度特征(评估呼吸状态),为科学调控运动强度、预防运动损伤提供量化依据<sup>[47]</sup>。值得关注的是,湿度梯度分布特征还可作为评估运动服装透气性能与穿着舒适度的创新指标。为实现无感化监测,研究者通常将柔性湿度传感器集成于运动服饰、智能手环或表皮贴片等可穿戴设备<sup>[48]</sup>,借助低功耗蓝牙技术实现数据无线传输,并运用数字滤波和动态校准算法消除环境干扰,显著提升监测数据的可靠性。近年来

材料科学的突破为动态湿度监测带来革新,例如基于点击化学构建的聚酯-氨纶混纺针织传感器,凭借优异的机械顺应性和环境稳定性,在剧烈运动中仍能保持精准响应<sup>[9]</sup>。实际应用表明,该监测系统可实时反馈使用者的排汗速率、呼吸频率等关键参数,通过机器学习算法生成个性化训练建议,帮助用户优化训练方案、规避过度训练风险,同时为运动装备的智能化设计提供数据支撑。这种集生理监测、数据分析与决策支持于一体的系统,正推动运动科学向精准化、智能化方向发展。

## 5 结束语

柔性湿度传感器作为智能可穿戴技术的核心感知单元,凭借其优异的机械柔性 with 多场景适应性,已在健康监测、运动科学及医疗护理领域展现出变革性潜力。本文系统综述了高分子聚合物基、纤维素基、纺织基等柔性材料的创新设计策略,以及湿法纺丝、喷墨打印、编织等先进制造技术对传感器性能的协同优化机制。研究表明,通过材料-结构-工艺的协同创新,柔性湿度传感器在灵敏度、响应速度及集成化方面已取得显著突破,成功应用于呼吸模式识别、汗液动力学分析及创面微环境监测等场景,推动了可穿戴设备从单一参数检测向智能多维感知的跨越。当前本领域研究仍面临 3 大核心挑战:①灵敏度与选择性的平衡难题,复杂环境中交叉干扰易导致信号失真;②长期稳定性不足,敏感材料的水解、氧化及机械疲劳会显著缩短器件寿命;③规模化制造工艺与个性化需求的矛盾,现有技术难以兼顾高精度与低成本。

未来研究需聚焦以下方向。

(1) 异质集成与多功能化:通过微机电系统工艺融合温/湿/压多模态传感单元,结合 AI 算法实现数据驱动的生理状态解析。

(2) 自供电与可持续性:开发摩擦纳米发电机或生物燃料电池驱动的无源传感系统,并推广可降解材料(如壳聚糖、细菌纤维素)以减少电子废弃物。

(3) 临床转化与标准化:建立传感器性能评价体系,开展跨学科临床验证以加速其在远程医疗与个性化健康管理中的应用。

## 参考文献:

- [1] BAYSAL G. A review on textile-based humidity sensors for wearable physical monitoring[J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2024, 36(2): 189-211.
- [2] 潘亚芳. 柔性湿度传感器制备及其敏感特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [3] PAN Y F. Preparation of flexible humidity sensors and investigation of their sensing characteristics[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024(in Chinese).
- [4] CHEN X Y, LIU C, HUA Z Q, et al. Ferroelectric polarization and oxygen vacancy synergistically induced an ultrasensitive and fast humidity sensor for multifunctional applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(44): 49965-49974.
- [5] JIN X F, ZHA L, WANG F, et al. Fully integrated wearable humidity sensor for respiration monitoring[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 1070855.
- [6] 马丽芸. 基于皮芯结构复合纱的柔性传感器和纳米发电机的研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [7] MA L Y. Research on flexible sensors and nanogenerators based on sheath-core structured composite yarns[D]. Shanghai: Donghua University, 2021(in Chinese).
- [8] SINHA A, STAVRAKIS A K, SIMIĆ M, et al. Wearable humidity sensor embroidered on a commercial face mask and its electrical properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 58(4): 1680-1693.
- [9] LI S, LI H, LU Y C, et al. Advanced textile-based wearable biosensors for healthcare monitoring[J]. *Biosensors*, 2023, 13(10): 909.
- [10] CHENG B C, WU P Y. Scalable fabrication of kevlar/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene intelligent wearable fabrics with multiple sensory capabilities[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5): 8676-8685.
- [11] LIU L X, NI Y M, MAO J J, et al. Flexible and highly conductive textiles induced by click chemistry for sensitive motion and humidity monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(33): 37878-37886.
- [12] SUN J Z, CHOI H, CHA S, et al. Highly enhanced triboelectric performance from increased dielectric constant induced by ionic and interfacial polarization for chitosan based multi-modal sensing system[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(7): 2109139.
- [13] GUO P W, TIAN B, LIANG J, et al. An all-printed, fast-response flexible humidity sensor based on hexagonal-WO<sub>3</sub> nanowires for multifunctional applications[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(41): e2304420.
- [14] SINHA A, STAVRAKIS A K, SIMIĆ M, et al. Polymer-thread-based fully textile capacitive sensor embroidered on a protective face mask for humidity detection[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(49): 44928-44938.
- [15] KOMAZAKI Y, UEMURA S. Stretchable, printable, and tun-

- able PDMS-CaCl<sub>2</sub> microcomposite for capacitive humidity sensors on textiles[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 297: 126711.
- [14] ESTRADA M M, VENTURA H, GIL I, et al. A full textile capacitive woven sensor[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(1): 2200284.
- [15] 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.
- [16] CHEN H Z, HAN K Y, LI Y. Laser-direct-writing assisted preparation of flexible humidity sensors based on semi-interpenetrating polymer network for applications in non-contact human-machine interaction[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 394: 134486.
- [17] MALINSK P, ROMANENKO O, HAVRÁNEK V, et al. Graphene oxide and polymer humidity micro-sensors prepared by carbon beam writing[J]. *Polymers*, 2023, 15(5): 1066.
- [18] JI Y J, TANG G Q, ZHAO C, et al. High-performance paper-based humidity sensors with Nafion/AgNWs hybrid electrodes[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(41): 28613-28622.
- [19] PAN T Y, YU Z H, XUE H, et al. Paper-based humidity sensor for wearable based on near-field electrohydrodynamic direct writing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 412: 135826.
- [20] 林晓萍, 刘皓. 包缠纱湿度传感器的制备及其性能研究[J]. *棉纺织技术*, 2025, 53(4): 1-7.
- LIN X P, LIU H. Preparation and performance research of wrapped yarn humidity sensors[J]. *Cotton Textile Technology*, 2025, 53(4): 1-7 (in Chinese).
- [21] LI X Q, LI X K, WANG M J, et al. Flexible and strain conductive cotton yarn enabled by low-temperature sintering of silver paste with multifunctional sensing capability in human motion detection and wearable applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144843.
- [22] SINGH V P, KRISHNAMOORTHY K, RAHMAN M R. Graphene-oxide-coated flexible fabric antenna sensor for contact-free H<sub>2</sub>O sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(2): 1175-1182.
- [23] WU Z T, LIU R F, XING S H, et al. Fabric-based hydrophobic humidity sensors for measuring human insensible sweat rate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, 387: 116405.
- [24] ZHANG L, ZHOU M Y, HE Y X, et al. Flexible porous non-woven silk fabric based conductive composite for efficient multimodal sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154445.
- [25] HE Z, ZHOU G, OH Y, et al. Ultrafast, highly sensitive, flexible textile-based humidity sensors made of nanocomposite filaments[J]. *Materials Today Nano*, 2022, 18: 100214.
- [26] XU L L, ZHAI H, CHEN X, et al. Coolmax/graphene-oxide functionalized textile humidity sensor with ultrafast response for human activities monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 412: 128639.
- [27] BENIWAL A, KHANDELWAL G, MUKHERJEE R, et al. Eco-friendly textile-based wearable humidity sensor with multi-ode wireless connectivity for healthcare applications[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2024, 7(7): 4772-4784.
- [28] LU W Z, ZHANG Q X, LIU N S, et al. Nylon fabric/GO based self-powered humidity sensor based on the galvanic cell principle with high air permeability and rapid-response[J]. *Small*, 2024, 20(10): e2306463.
- [29] MAITY D, RAJAVEL K, RAJENDRA KUMAR R T. MWCNT enabled smart textiles based flexible and wearable sensor for human motion and humidity monitoring[J]. *Cellulose*, 2021, 28(4): 2505-2520.
- [30] LIN X Z, XUE H, LI F, et al. An electrolyte-mediated paper-based humidity sensor fabricated by an office inkjet printer[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, 45(2): 244-247.
- [31] ZHANG H W, XU X, HUANG M L, et al. Interlayer cross-linked MXene enables ultra-stable printed paper-based flexible sensor for real-time humidity monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 495: 153343.
- [32] CHEN X R, LI Y K, WANG X Y, et al. Origami paper-based stretchable humidity sensor for textile-attachable wearable electronics[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(31): 36227-36237.
- [33] AGCAYAZI T, TABOR J, MCKNIGHT M, et al. Fully-textile seam-line sensors for facile textile integration and tunable multi-modal sensing of pressure, humidity, and wetness[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 2000155.
- [34] SINHA A, STAVRAKIS A K, SIMIĆ M, et al. Polymer-thread-based fully textile capacitive sensor embroidered on a protective face mask for humidity detection[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(49): 44928-44938.
- [35] ESTRADA M M, GARCÍA R F, GIL I. Experimental analysis of fabric substrate on a moisture sensor[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2020, 112(6): 1-6.
- [36] WENDLER J, MARAITE D, NOCKE A, et al. Novel textile moisture sensors based on multi-layered braiding constructions[J]. *Textile Research Journal*, 2020, 90(3/4): 469-477.
- [37] SHI Q F, YANG Y Q, SUN Z D, et al. Progress of advanced devices and internet of things systems as enabling technologies for smart homes and health care[J]. *ACS Materials Au*, 2022, 2(4): 394-435.

- [38] AHSAN M, TEAY S H, SAYEM A S M, et al. Smart clothing framework for health monitoring applications[J]. *Signals*, 2022, 3(1): 113–145.
- [39] PAN M X, ZHOU J M, WENG S C, et al. Flexible chitosan-based capacitive humidity sensors for respiratory monitoring[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1352.
- [40] 马士腾, 郗广帅, 张冬至, 等. 可穿戴柔性湿度传感器开发及在人体呼吸模式检测中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2024, 43(9): 29–32.
- MA S T, XI G S, ZHANG D Z, et al. Fabrication of wearable flexible humidity sensor and its application in human breathing pattern detection[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2024, 43(9): 29–32(in Chinese).
- [41] KIM H S, KANG J H, HWANG J Y, et al. Wearable CNTs-based humidity sensors with high sensitivity and flexibility for real-time multiple respiratory monitoring[J]. *Nano Convergence*, 2022, 9(1): 35.
- [42] MA L Y, WU R H, PATIL A, et al. Full-textile wireless flexible humidity sensor for human physiological monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(43): 1904549.
- [43] LV R H, LI S, JIN T X, et al. Hybrid core-shell nanofibers as moisture sensors for human breath monitoring[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 162: 58–63.
- [44] AGGARWAL A, DAUTTA M, AYALA-CARDONA L F, et al. Wearable humidity sensor for continuous sweat rate monitoring[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(17): 2300385.
- [45] TESSAROLO M, POSSANZINI L, GUALANDI I, et al. Wireless textile moisture sensor for wound care[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 722173.
- [46] HASANPOUR S, KARPERIEN L, WALSH T, et al. A hybrid thread-based temperature and humidity sensor for continuous wound monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 370: 132414.
- [47] UNO M O, OMORI M, MORITA S, et al. Moisture-insensitive force sensor yarns and fabrics to monitor biological motion[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(24): 2301124.
- [48] BAYSAL G. A review on textile-based humidity sensors for wearable physical monitoring[J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2024, 36(2): 189–211.
- [49] 周金利, 王政, 周知艇, 等. 基于智能柔性织物传感器的漏尿频次监测系统研究[J]. *现代纺织技术*, 2024, 32(3): 91–101.
- ZHOU J L, WANG Z, ZHOU Z T, et al. Research on the urine leakage frequency monitoring system based on intelligent flexible fabric sensors[J]. *Advanced Textile Technology*, 2024, 32(3): 91–101(in Chinese).
- [50] 刘皓, 毛照斐. 可充电 Ni-Zn 电池在智能可穿戴领域的研究及应用进展[J]. *天津工业大学学报*, 2021, 40(4): 52–59, 66.
- LIU H, MAO Z F. Research and application of rechargeable Ni-Zn battery in intelligent wearable field[J]. *Journal of Tiangong University*, 2021, 40(4): 52–59, 66(in Chinese).

#### 本文引文格式:

贾正伟. 柔性湿度传感器的研究进展[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(3): 100–108.

JIA Z W. Research progress in flexible humidity sensors[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(3): 100–108(in Chinese).