

化工企业职业卫生评估中可穿戴式生物传感器应用

王佳丽 莫智高 董琦敏

浙江新鸿检测技术有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8493

[摘要] 化工企业职业环境存在多种高危暴露因素, 传统职业卫生评估手段难对个体状态实时监测与动态分析, 本文针对高温、高湿、有毒气体等复杂作业条件, 构建基于可穿戴式生物传感器的监测系统。通过酶传感模块定向固定、信号链路优化、无线通信嵌合及多参数评估模型开发, 系统实现生理指标与环境参数的高频采集和稳定传输。实测数据显示, 在高干扰条件下, 传感器信号偏移小于8mV, 数据传输误码率低于 2.1×10^{-5} , 平台可支持128节点并发部署, 为工程化推广提供技术基础。

[关键词] 可穿戴传感器; 生物识别; 数据融合; 职业暴露; 系统集成

Application of Wearable Biosensors in Occupational Health Assessment of Chemical Enterprises

Wang Jiali Mo Zhigao Dong Qimin

Zhejiang Xinhong Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] There are multiple high-risk exposure factors in the occupational environment of chemical enterprises, and traditional occupational health assessment methods are difficult to monitor and dynamically analyze individual status in real time. This article constructs a monitoring system based on wearable biosensors for complex working conditions such as high temperature, high humidity, and toxic gases. Through targeted fixation of enzyme sensing modules, optimization of signal links, wireless communication integration, and development of multi parameter evaluation models, the system achieves high-frequency acquisition and stable transmission of physiological indicators and environmental parameters. Experimental data shows that under high interference conditions, the sensor signal offset is less than 8mV, and the data transmission error rate is less than 2.1×10^{-5} . The platform can support 128 nodes for concurrent deployment, providing a technical foundation for engineering promotion.

[Key words] wearable sensors; biometric recognition; data fusion; occupational exposure; system integration

引言

传统评估模式多依托阶段性抽样及环境固定点位监测, 往往难以体现个体真实暴露程度与生理反应, 若想提升职业卫生评估的即时性与精确性, 需纳入具备动态感知和持续记录功能的生物检测手段。可穿戴生物传感器拥有柔性构造、长时间稳定性以及多参数识别的特点, 在复杂工业环境中的适用性和工程转化可能性正不断提升。从传感原理架构、酶模块功能规划、数据路径优化到系统平台整合等方面, 均需探究其在化工企业

中的实际应用效能。

1 传感器检测原理与结构构型

1.1 多参数识别机制

传感器内部一般设有针对目标分子的特异性识别区域, 如用于辨识小分子化合物、金属离子或代谢标志物的识别探头^[1]。检测期间, 这些识别结构会通过电化学、电导率或光学途径产生相应信号, 信号经集成电路放大与调制后, 转化为具有时间关联特性的连续电信号, 此识别机制既能对生理指标变化实施

实时追踪,也可支持对液体、气体及环境中微量成分的同时分析,以保障多参数数据的并行获取。借助界面修饰材料对识别部位进行选择强化,可提升特定目标物的亲和力与捕获效率,进而增进监测的灵敏度和精准度,强化传感器在复杂工业暴露场景中的适用能力。

1.2 集成传感结构与微型化趋势

整体架构往往基于柔性基底搭建多层传感构造,同一芯片或基片上沉积多种功能材料,以此形成传感区域、电极阵列与处理电路的一体化排布,微型化发展借助光刻、喷墨打印、激光蚀刻等工艺方式达成,将信号采集与处理电路封装至毫米级乃至微米级尺度。传感区域常运用纳米材料实施功能化修饰,旨在增强目标物识别效能及响应稳定性,整体封装着重考量透气性、耐腐蚀性与生物相容性,可适配汗液、皮脂、温度变化等人机交互环境。导电通道采用高分子导电复合材料或微电极阵列搭建,既保障柔韧性又维持电传输的稳定性,以确保在长时间穿戴场景下的稳定采集性能,传感器最终可在弯曲、拉伸等机械形变状态中保持功能输出的稳定性。

2 酶传感模块的定向功能设计

2.1 酶基活性材料的筛选与改性

筛选环节中需根据待检测生物标志物的分子属性挑选相应催化酶,例如针对羟基苯乙酸代谢产物可选用芳香族羟化酶,借助酶-底物特异性反应释放电子信号^[2]。为增强酶在工作环境中的稳定性,需对天然酶开展改性操作,具体改性环节包含氨基酸位点定点突变、酶表面以聚乙烯醇或壳聚糖包覆,以及引入 NAD⁺或 FAD 等辅助因子以提升其电活性,经改性后的酶在 pH 7.4、温度 37°C 条件下的活性可维持在 35 U/mg 以上,热稳定时长能够超过 72 小时。为调控电子转移距离,需使酶分子结构中的电活性中心显露于固定界面附近,可通过在酶 C 端引入 Cys 残基,并利用巯基-金属相互作用将其固定于金纳米颗粒修饰层上,酶与电极界面的接触电阻需控制在 1.2~3.6 kΩ 范围,如此才能保证电信号在毫秒级时间内做出响应。

2.2 定向固定与微界面传导

构建功能基团导向层时,可利用自组装单分子层(SAMs)形成羧基、醛基或巯基活化表面,通过化学共价键或配位作用实现酶分子单点锚定,以酶表面引入的 Cys 残基作为连接位点,与修饰马来酰亚胺的碳纳米电极表面形成稳定共价键,界面结合力可达-25 kJ/mol。完成定向固定后,借助原子力显微镜

(AFM)测定表面粗糙度,可见酶分子分布密度大于 2×10^{11} 分子/cm²,排列间距不超过 50 nm。随后运用循环伏安法检测酶催化电流响应,电流密度峰值可达 28 μA/cm²,在 0.2 V 偏压下稳定信号漂移小于 0.8 μA。微界面电子传导以酶活性位点与电极间的 π-π 堆积或氢键辅助电子隧穿为主要机制,通过 EIS 检测发现,酶定向固定后界面电荷转移电阻(R_{ct})从 3.2 kΩ 降至 1.1 kΩ,表明电子传输通畅性明显提升,可满足高频动态监测需求。

3 数据获取与传输路径优化

3.1 信号采集链路抗干扰机制

传感单元基于电化学酶反应输出微弱电信号,幅度通常处于 μA 至 nA 量级,需通过运算放大器构建的电流-电压转换电路将其转换为稳定电压信号^[3]。电路选用低漂移、高共模抑制比的仪用运放芯片 OPA2333,其输入失调电压低于 5 μV,可有效维持信号原始特性。信号输出端接入高阶低通滤波器实施噪声抑制,截止频率设定为 3 Hz,以滤除电源频率噪声及工频干扰。ADC 模块采用分辨率不低于 16 bit 的逐次逼近式转换器,在 3.3 V 供电环境下将采样误差控制在 ±1 LSB 范围内,采样频率稳定于 500 Hz,系统整体信噪比保持在 68 dB 以上,输入信号电压幅度在 0.1~2.5 V 区间内呈现稳定线性响应。

针对复杂化工环境内电磁干扰、静电耦合及温漂影响,采集模块需采用共地隔离设计,通过光电隔离器件分隔模/数电路,并在采集通道输入端设置 RC 低通网络以实现高频削波。封装层利用导电屏蔽膜与传感区域形成闭合电磁屏蔽层,可有效减少外部场耦合导致的基线漂移。系统级测试显示,在 500 V/m 射频干扰环境下,输出误差低于 5 mV,且能保持稳定连续数据输出逾 48 小时。

3.2 无线通信模块嵌合

常用嵌合技术多选用低功耗短距离无线协议模块,例如 Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0,其最大传输速率可达 2 Mbps,实测显示,在 4 米传输距离内,数据包丢失率低于 0.03%。模块采用 SoC 结构集成芯片如 nRF52832,封装尺寸为 3×3 mm,内部集成 32 位 ARM Cortex-M4 处理器,可完成基础数据缓存与前端预处理,同时内嵌 64 KB RAM 及 512 KB Flash,能够实现简易协议栈管理。无线通信过程中采用 GFSK 调制方式,工作频率处于 2.402~2.480 GHz 区间,支持 40 个信道并发连接,模块发射功率为 +4 dBm,接收灵敏度为 -96 dBm,可在高密度传感设备环境下保障数据独立传输。

功耗管理中通信周期设为 500 ms 间隔, 单次传输功耗 5.3 mW, 待机功耗减至 1.2 μ W, 信号发射端天线采用陶瓷贴片式, 驻波比控制在 1.3 以内以保障频谱匹配性与能量利用率。通信协议层设计时数据采用 CRC-16 循环冗余校验机制进行误码校验, 同时在物理层与链路层完成双向握手确保数据完整性。在干扰较强的工业无线环境中结合 RSSI 动态功率调节与跳频机制实现抗干扰优化, 测试显示在 2.4 GHz 带宽同时存在 6 个无线节点通信条件下系统传输误码率控制在 2.1×10^{-5} , 稳定性满足实时职业监测需求。

4 应用于化工环境的稳定性与适应性评估

4.1 高温高湿与有毒气体干扰响应

在典型作业环境中, 传感器长期处于温度波动 20°C 至 65°C 、相对湿度达 95% 的条件, 同时受高浓度挥发性有机化合物 (VOCs)、硫化氢 (H_2S)、氨气 (NH_3) 等刺激性气体干扰^[4]。其稳定性测试需在上述复合条件下开展环境仿真实验, 借助恒温恒湿箱与气体混合装置构建多场交叠干扰环境。实际操作时, 传感器预热时间设为 15 分钟, 测试周期为连续 168 小时。温湿应力作用下采用热循环方式将环境温度控制在 25°C 至 60°C 间, 每循环周期 3 小时并同时保持湿度 90% 以上, 传感器响应电位变化在全周期内保持 $\pm 8\text{mV}$ 以内, 电流信号偏移幅度不超 $2.3\ \mu\text{A}$, 活性位点保留率达初始值的 91%。

气体干扰响应评估中利用动态气体稀释系统设定目标浓度, H_2S 注入浓度为 20 ppm, NH_3 浓度 30 ppm, VOCs (以苯为代表) 设为 10 ppm 水平, 同时保持气体流速 200 mL/min, 传感区域采用聚四氟乙烯薄膜封装以阻隔液态水蒸气对反应界面的干扰。响应监测以信号基线漂移为评价依据, 在 72 小时持续暴露情况下, 传感电流变化率控制在 $\pm 5\ \mu\text{A}$, 电极表面未出现明显腐蚀迹象, 为进一步评估响应恢复能力实施停机再启动测试, 关断电源 48 小时后重新激活, 采样稳定时间为 28 秒, 恢复后灵敏度波动不超过初始值的 4.2%。界面材料选用氟化聚合物与石墨烯复合涂层构建防渗透隔离层, 电镜观察显示气体暴露后界面结构无显著塌陷, 微孔分布均匀, 孔径控制在 $80\sim 100\text{nm}$, 热分析结果显示复合材料分解温度达 320°C , 可满足高温暴露下的结构完整性需求。

4.2 与个人防护装备集成兼容性

集成位置优先选择颈部、腕部及胸前区域, 根据不同防护装备的表面张力、机械柔顺性和透气率实施区域适配。以典型

防护服为例采用聚乙烯-聚丙烯复合膜材, 其表面粗糙度 R_a 值约 $1.2\ \mu\text{m}$, 传感模块底层封装选用热压成型的聚酰亚胺柔性基材, 于 45°C 条件下进行热熔粘结, 粘接面积 2cm^2 , 拉伸破断试验中最大剥离力达 2.7 N, 实现稳定附着状态。结构设计上传感模块厚度控制在 $180\ \mu\text{m}$ 以下, 弯曲半径小于 5 mm, 保障在屈伸动作频繁场景下不出现材料疲劳开裂。为避免设备厚度给佩戴者带来压迫感, 传感器电极区域采用多孔微结构阵列设计, 孔径 $60\sim 90\ \mu\text{m}$, 单元密度 400 点/ cm^2 , 有效增强了机械透气性。

在动静态穿戴测试里, 穿戴时人体动作范围包括肩部旋转、肘部弯曲、腰部侧屈, 运用三轴加速度计监测模块应变响应, 在最大屈曲角度 30° 内信号输出峰值偏差控制于 $\pm 6\text{mV}$ 以内。环境同步响应测试中, 佩戴者活动引发的汗液扩散速率为 $1.1\ \text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$, 传感器水汽透过率达 $600\ \text{g}/\text{m}^2 \cdot 24\text{h}$, 符合长时间穿戴情形下的舒适性要求, 接口兼容性方面, 连接线采用超细同轴线材, 直径 0.3 mm, 信号衰减小于 1.2 dB/m, 且接头反复插拔 1500 次后接触电阻无明显变化, 保障在动态运动场景中的电连接稳定性。整机重量控制在 18 g 以内, 不给穿戴者带来额外负荷, 模块整体尺寸 $32 \times 25\ \text{mm}$, 封装厚度 $160\ \mu\text{m}$, 具备良好的人机工学适应性。

结语

可穿戴生物传感器于化工企业职业卫生评估中彰显出优异的环境适配性与多参数辨识能力, 经结构设计优化及工程集成验证, 系统达成高频监测、低误差传输与风险动态评估功能。综合性能测试显示, 此类传感系统可在复杂暴露环境中维持长期稳定运行, 为化工作业健康管理供给了可落地的技术路径, 且具备在更广范围推广部署的技术根基与工程条件。

[参考文献]

- [1]王玉奉, 丁丽娜, 肖爱民. 可穿戴技术在女性内衣中的应用进展[J]. 上海纺织科技, 2025, 53(05): 15-20+25.D
 - [2]吴官庭, 郭荣辉. 柔性可穿戴电子应变传感器的研究现状与应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2025, 42(02): 77-83.
 - [3]陈柏文, 黄继伟, 凌新龙. 智能可穿戴产品用柔性传感器的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2025, 42(02): 63-76.
- 作者简介: 王佳丽(1992—), 身份证号码: 330482199211063065, 女, 汉族, 浙江嘉兴, 本科, 中级工程师, 从事工作为化工安全技术与安全管理。