

基于低功耗蓝牙传输的电位型 嵌入式无线传感监测系统的研制

曹 忠 李文锋 刘 陈 彭与煜 黄 颖 肖忠良*

(长沙理工大学化学与生物工程学院, 电力与交通材料保护湖南省重点实验室,
微纳生物传感与食品安全检测协同创新中心, 长沙 410114)

摘 要 设计并制作了一种可用于电位型传感器的小型嵌入式无线监测系统,此系统以精密双路运放 TLC4502 为前置放大器,低功耗蓝牙(BLE)芯片 CC2541 作为主控制器,主控制器集成 14 位模数转换器(ADC)。此系统使用 BLE 开发应用程序(App),与 CC2541 建立蓝牙连接,实现对传感电位的无线实时读取。监测系统软件部分由嵌入式开发软件 IAR Embedded Workbench 在 BLE-CC254X-1.41 协议栈基础上开发。为验证系统可靠性与精度,采用精密稳压电源进行模拟电位采集测试,并使用 pH 复合电极对 pH 值变化进行监测。测试结果表明,此系统能对电位进行实时测量,信号放大 3 倍,精度达到 0.4 mV,对 pH 值变化能快速输出一致性响应,监测响应的线性相关系数 $R^2=0.9994$;同时,应用自制的 L-半胱氨酸(L-cys)传感器结合本系统对 L-cys 浓度变化进行实时检测,动态响应变化与商品化数字万用表的结果一致,进一步表明此蓝牙监测系统可实现电位型传感信号的快速传输与实时监测。

关键词 低功耗蓝牙; 嵌入式系统; 电位型传感器; 无线传感; 监测

1 引言

近年来,基于电化学原理的传感器由于其结构简单、成本低廉,被广泛地应用于化工、环保、医疗、生物等领域^[1~4]。根据产生的电信号类别,电化学传感器主要可分为电位型和电流型两大类,电位型传感器或离子选择电极是一类利用膜电位测定溶液中离子活度或浓度的电化学传感器^[5~8],其实质是由电极和电解液形成的原电池体系,理论依据为能斯特方程,一般由参比电极与对某离子有选择性吸附结合的膜电极组成^[8~10]。传统的基于有机载体等敏感膜的电学传感器^[11~13]及传感器阵列^[14~16]具有较高的灵敏性和选择性,通过结合电子技术及仪器技术逐渐发展并实现了离子、生物物质等的原位、实时和现场检测^[17~22]。2015 年,蔡新霞等^[23]研制了一种用于多巴胺检测的无线电化学仪器,该仪器系统采用快速循环伏安法,检测的响应电流与多巴胺浓度在 $5.0\times10^{-7}\sim7.0\times10^{-5}$ mol/L 范围内呈线性关系;2016 年,该研究组^[24]研制了一种可用于肿瘤标志物癌胚抗原(CEA)现场快速检测的便携式仪表,采用差分脉冲伏安法(DPV),其峰电流与 CEA 浓度对数在 1~500 $\mu\text{g/L}$ 范围内呈线性关系,线性相关系数为 0.998,检出限为 10 pg/mL ;2017 年,研制了一种生物神经电信号检测系统^[25],该检测系统采用微丝电极作为信号采集传感器,经过微弱信号调理仪器对微弱神经信号进行放大、滤波等处理,可实现对微弱神经电信号的实时检测。

然而,随着嵌入式技术的发展,作为一种完全嵌入受控器件内部,为控制、监视辅助设备或用于机器运行而设计的专用计算机系统^[26],嵌入式系统已广泛应用于物联网、自动驾驶、智能家居、室内定位、医疗保健等领域^[27~29]。将嵌入式技术与电化学传感器相结合,可大大拓宽其应用范围,更使远距离的实时在线监测成为可能,如毛兰群研究组研制了一种应用于电位型传感器的嵌入式遥测系统^[30],可系统采集电压信号,范围为 $-1.17\sim+1.17$ V,测试的 pH 响应与商品化电分析仪器一致;该研究组还研制了一种电流型电化学传感嵌入式遥测系统^[31],可在线实时检测缺血过程中抗坏血酸浓度的变化。此外,Nemiroski 等^[32]开发了一种廉价的手持设备,将电信技术与最常用的电分析方法组合,能够实现有限资

2018-10-28 收稿;2018-12-06 接受

本文系国家自然科学基金项目(Nos. 31527803, 21545010)和中国科学院科技服务网络 STS 计划项目(No. KFJ-SW-STS-173)资助

* E-mail: xiaozhongliang@163.com

源下的临床诊断测试与环境监测等。Kaisti 等^[33]设计了一个结合晶体管复用平台和传输信息检测器的手持传感系统,该检测器可将电化学信息无线发送到智能手机上。Gu 等^[34]开发了一个拇指大小的电化学仪器系统(MiniEC),该系统采用丝网印刷电极,对镉、铅的检出限分别为 1.0 和 0.5 $\mu\text{g/L}$,可应用于实验室、农村或野外的现场环境监测。

嵌入式系统在化学传感检测的应用大大方便了传感数据的远程实时测量与控制,但为满足数据采集与传输要求,多数系统设计了复杂的信号处理电路与模块,且数据接收需通过不同的无线数据收发芯片进行,这使得系统结构较复杂,体积增大,通用化程度不高,限制了其使用场所。近来,低功耗蓝牙(BLE)技术发展迅速,将 BLE 技术应用于电化学传感检测的研究也逐渐引起研究者的关注。Ainla 等^[35]设计了一个开源的通用无线电化学探测器,该探测器通过 BLE 连接智能手机实时传输测量数据。Jung 等^[36]发展了一种便携、三电极电化学测量电流的分析器,其电流分辨率为 0.4 nA,可通过蓝牙连接将数据传输到电脑。Fan 等^[37]设计了一种用于神经元特异性烯醇酶(NSE)的无线即时检测系统,该系统由微流控纸基分析装置、电化学检测器和 Android 智能手机组成,NSE 浓度在 1 ~ 500 ng/mL 范围内,其对数与检测峰电流呈良好的线性关系,系统检出限为 10 pg/mL。基于 BLE 技术的嵌入式电化学系统直接使用智能手机或平板电脑作为数据接收端,简化了系统结构,增强了系统通用性,但目前所报道的研究工作大多聚焦于电流型传感检测,而检测信号更为直接的电位型传感检测系统的研究报道较少。

本研究设计并发展了一种基于 BLE 技术的嵌入式电位型传感检测系统,此系统结构精简,体积仅为一元硬币大小,便于携带,使用纽扣电池供电,无需外接电源,可在野外使用。将其成功应用于 pH 值的实时监测及 L-半胱氨酸的动态响应检测,在生命科学等领域具有较好的应用前景。

2 实验部分

2.1 仪器与试剂

PHSJ-4A 型酸度计(上海雷磁仪器厂); 34465A 数字万用表(美国安捷伦科技有限公司); LA850350 型程控精密直流稳压电源(上海老 ALAOA 工具有限公司); CJJ78-1 型磁力搅拌器(金坛市大地自动化仪器厂); KQ3200B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); TLC4502AC 高级自校准精密双路运算放大器、CC2541 低功耗蓝牙芯片(美国德州仪器公司); E-201-C 型 pH 复合电极和 217 甘汞电极(上海雷磁仪器厂)。电阻为贴片电阻,电容为贴片电容。

聚二硫二丙烷磺酸钠(DTPS, MW = 354.4, 美国 Sigma-Aldrich 公司); L-半胱氨酸(L-cys)、 HgNO_3 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 NaCl(上海国药集团化学试剂有限公司); 乙醇、HCl、 Na_2SO_4 和 NaOH(湖南试剂厂(株洲))。所用试剂均为分析纯,实验用水为超纯水(电阻率 $\geq 18.3 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

2.2 传感监测系统设计

传感监测系统整体结构设计如图 1 所示,系统由电位型传感器、信号采集板、信号接收设备组成,其中信号采集板为系统硬件部分,即蓝牙采集板,包括电压放大模块、控制传输模块和电源模块,信号接收设备为带低功耗蓝牙(BLE)的智能手机或平板电脑。以低功耗蓝牙芯片 CC2541 为主控制器,通过设计的板载天线发送数据,带蓝牙 4.0 或以上版本的智能手机或平板电脑接收数据, BLE 开发应用程序(App)对数据进行实时读取与写入。电位型传感器采集的传感电位信号经放大处理后,通过蓝牙无线传输,实时发送给接收端。

2.3 蓝牙采集板设计

系统硬件(蓝牙采集板)由电压放大模块、控制传输模块、电源模块组成,实物如图 2 所示。电压放大模块使用美国德州仪器公司研制生产的精密双路运放 TLC4502 作为前置放大器,对电位型传感器采集的电位信号进行放大处理。放大电路原理

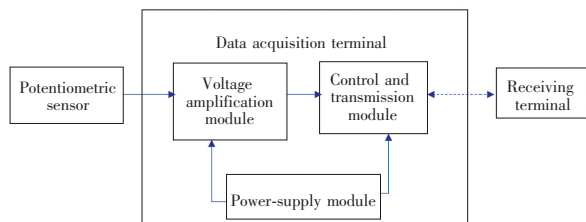


图 1 传感监测系统整体结构设计图

Fig.1 Schematic diagram of whole structure design for sensor monitoring system

为：零点温度漂移和时间漂移常会对微弱信号的放大过程产生重要影响,本电位放大模块通过自动校准技术,通电后首先激活 RC 振荡器,以提供逐次逼近算法的时钟信号。此时,运算放大器输入端短路,输出失调电压,电压接入片内,并通过 A/D 转换器转换后,存入寄存器 SAR 内。然后,再通过片内 D/A 转换器转换后,送到运算放大器内进行失调对消。经过若干个时钟周期后,失调电压逐次逼近零点。此时,控制逻辑电路自动断开,并接通正常放大电路,经校准后,运算放大器失调电压的误差为零,从而提高放大器的稳定性。而且,所采用的 TLC4502 精密型双运算放大器以 3 级拓扑结构为核心,能实现高直流增益、大带宽、高共模抑制比和电源抑制比以及良好的驱动能力^[38]。

控制传输模块的主控制器为 CC2541 蓝牙芯片,此芯片集成了传统蓝牙、高速蓝牙和低功耗蓝牙三大技术,支持 0 dBm 的可编程输出功率,以及 4 种传输速率(250 kbps、500 kbps、1 Mbps 和 2 Mbps),兼具高速传输与低功耗特点,且在低功耗模式下,工作电流可低至 0.5 μA ^[39,40]。CC2541 集成了 14 位的模数转换器(ADC),支持高达 12 位有效数字。传感电位经电压放大模块处理后,输入 CC2541 的 ADC 引脚进行 A/D 转换,ADC 配置了可编程的四路参考电压,本研究设置参考电压为 AVDD 引脚电压。CC2541 带有一个 C8051F120 型单片机(Cygnal 公司生产的可与 8051 兼容的高速 SOC 单片机),集成了 4.0 蓝牙协议。蓝牙采集板与接收端成功建立通信连接后,传感信号数据由 CC2541 芯片通过板载天线无线蓝牙传输给接收端。

电源模块使用 3.3 V 纽扣电池供电,且整个系统硬件部分结构精简,体积仅为一元硬币大小,便于携带。根据不同任务,系统正常工作时的工作电流在 0.1 ~ 2.0 mA 之间,待机电流小于 10 μA 。使用纽扣电池供电,综合续航时间约为 500 h,信号传输距离达 20 m。系统电位测量范围为 0 ~ 0.75 V,差分输入模式下可设置负电位测量,根据本实验的实际使用需求未设置负电位测量。系统采用蓝牙芯片上的 ADC 进行信号采集,对芯片测量误差的校准过程分为两步:首先设置 ADC 进行 10 次信号采集,取平均值作为输出信号;然后,使用监测系统与万用电表测定几十组电压值,再转换为 ADC 值,进行对比校准,对测量误差进行校正,使其达到精度要求。

2.4 系统软件设计

系统软件由 IAR 嵌入式开发软件(IAR Embedded Workbench 9.10.3, IAR Systems Co., Sweden)在 BLE-CC254x-1.4.1 协议栈基础上开发而来,协议栈编程语言为 C 语言,BLE 协议栈数据包格式列于表 1。其中,前同步码用于接收器执行频率同步、符号定时估计和自动增益控制,所有链路层数据包都有 8 位前同步码。存取地址指明了设备广播通道数据包与数据通道数据包地址。协议数据单元为不同通道数据传输定义了不同结构,数据存放于单元内的有效载荷中。循环冗余校验为 24 位的数据校验段。

数据接收通过智能设备 App 进行,软件发送流程如图 3 所示。对于系统运行流程,系统通电后,运行 main 函数,初始化相关硬件与驱动,在初始化的最后调用 osal_start_system() 函数,使协议栈运转起来。此段初始化过程部分代码见电子版文后支持信息(SI-1)。

协议栈运转后,配置 ADC 差分输入通道 A4A5,14 位转换率及 AVDD 引脚为参考电压,定时 1 s,周期性读取 ADC 指定通道数据,并存放于数据缓冲数组 newValue[len++] 中。此段定时读取存放过程部

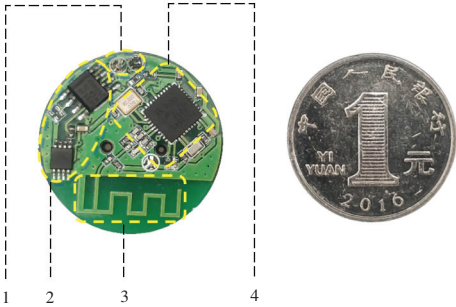


图 2 蓝牙采集板实物图
1. 电位传感器接口; 2. 电压放大模块; 3. 蓝牙天线; 4. 控制传输模块
Fig.2 Physical picture of bluetooth acquisition plate
1. Potentiometric sensor interface; 2. Voltage amplification module; 3. Bluetooth antenna; 4. Control and transmission module

表 1 蓝牙 4.0BLE 数据包格式
Table 1 Data packet format of Bluetooth 4.0BLE

前同步码 Preamble	存取地址 Access address	协议数据单元 PDU	循环冗余校验 CRC
1 字节长度 1 byte	4 字节长度 4 byte	2 ~ 39 字节长度 2 ~ 39 byte	3 字节长度 3 byte

PDU: Protocol data unit; CRC: Cyclic redundancy check.

分代码见电子版文后支持信息(SI-2)。

当设备成功连接时,协议栈转换 ADC 值后,调用通知函数,将数据发送给接收端主机,接收端为自行开发的数据接收 App,可用于 BLE 开发,能读取蓝牙设备名、广播地址、特征值属性等,并可对特征值进行读取、写入,以及接收特征值通知操作。此段数据发送与接收通知过程部分代码见电子版文后支持信息(SI-3)。

2.5 实验方法

2.5.1 电位模拟信号测试 将蓝牙数据采集板的信号输入端的正极与稳压电源正极相连,负极与稳压电源负极相连,而信号发射端通过蓝牙与手机或平板电脑连接。调节稳压电源使输出电压从 0 V 逐渐增大到 0.6 V,在接收端 App 读取电压数据;进行多次测量,另由稳压电源接上数字万用表,记录系统与数字万用表的电位信号数据。

2.5.2 pH 响应变化测试 以 pH 复合电极作为氢离子传感电极,复合电极使用前在 3.0 mol/L KCl 溶液中浸泡 24 h 活化处理。取 50 mL 磷酸盐缓冲液(PBS, pH 4.74)于小烧杯,磁力稳速搅拌。将活化后的复合电极置于 PBS 溶液中,然后逐步滴加 1.0 mol/L NaOH 溶液,使用本系统并结合 pH 计实时监测电位与 pH 值的变化。

2.5.3 L-半胱氨酸电极的制备与测试 将金电极依次使用粒径为 1.0、0.3 和 0.05 μm 的 Al_2O_3 粉抛光呈镜面,将抛光后的金电极依次在超纯水、无水乙醇、超纯水中超声清洗 10 min。金电极首先在 1.0 mmol/L DTSP 溶液中浸泡 48 h 进行自组装,取出洗净,再置于 1.0 mmol/L Hg^{2+} 溶液中继续浸泡 48 h,洗净、干燥,保存备用。

以饱和甘汞电极为参比电极,DTSP/Hg 修饰金电极为工作电极,在 pH=6 的 PBS 缓冲溶液中加入不同浓度的 L-半胱氨酸,实时记录传感电位变化,绘制响应电位与浓度的关系曲线。

3 结果与讨论

3.1 监测系统的性能

为验证系统可靠性与精度,采用程控精密稳压电源输入一系列电压信号,模拟电位型传感器采集的电位信号,对系统电学性能进行测试。如图 4 所示,蓝牙监测系统读出的测量电压值(E_b , V)与商品化数字万用表显示的实际电压值(E_p , V)呈线性关系,相关系数 $R^2=0.99993$,线性方程可拟合为:

$$E_b = 3.007E_p + 2.943 \quad (1)$$

此系统对采集的电信号进行了放大处理,由式(1)知,信号放大倍数为 3.007。采用此系统对同一电压连续监测 2 h,电压波动为 ± 0.38 mV,表明此系统对电位变化的监测稳定,抗噪能力强,精度达 0.4 mV。

因此,利用此蓝牙监测系统测量电化学传感体系的测量电位值(E_b'),可知电位型传感器界面的实际膜电位值(E_p'),即:

$$E_p' = \frac{E_b' - 2.943}{3.007} \quad (2)$$

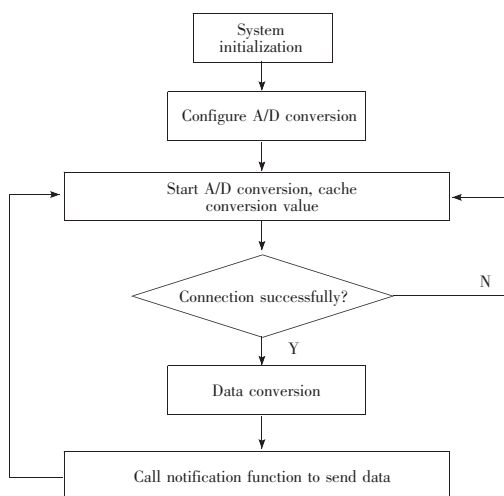


图 3 软件发送流程图

Fig. 3 Flowing chart of software

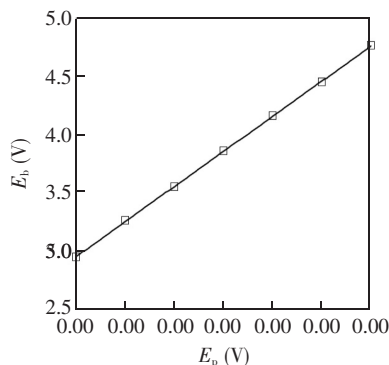


图 4 蓝牙监测系统与数字万用表测试的关系比较

Fig. 4 Comparison of bluetooth low energy (BLE) monitoring system and digital multimeter

3.2 监测溶液电位和 pH 值变化

将 pH 复合电极接头做微调后接入蓝牙采集板,将活化后的 pH 复合电极置于 PBS 溶液 (pH 4.74) 中,逐步滴加适量的 1.0 mol/L NaOH 溶液,采用本系统实时监测电位与 pH 值变化(图 5)。图 5A 为监测系统手机终端界面实时响应图,随着 NaOH 溶液的滴加,pH 值增大,电位迅速下降,5 s 后基本稳定,表明本系统对 pH 值变化能够快速实时响应,输出电位值稳定性好,因此本系统可用于 pH 值相应电位的实时监测。

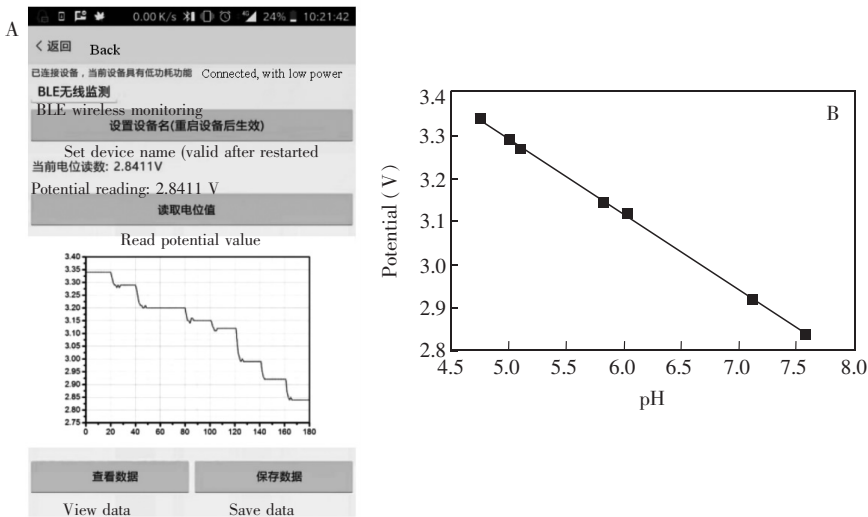


图 5 蓝牙系统应用于溶液电位和 pH 变化的监测: (A) 监测系统手机终端界面实时响应图; (B) 监测电位响应值与 pH 值的关系

Fig. 5 Bluetooth system for monitoring variation of potential and pH of solution; (A) Real-time response towards pH value recorded by cellphone terminal of monitoring system; (B) Relationship between potential response and pH value

为进一步验证系统的应用性能,向缓冲溶液中滴加 NaOH 时,结合 pH 计,同步记录 pH 值与系统采集的电位值,得到电位响应值随 pH 值变化的关系曲线(如图 5B 所示),回归方程式为: $E_b = 4.1669 - 0.1746\text{pH}$, 相关系数 $R^2 = 0.9994$, 即响应电位与实际 pH 值具有很好的线性关系,表明本系统可对 pH 值变化进行实时定量监测。

3.3 L-半胱氨酸的监测应用

为了进一步表征此监测系统应用不同传感器进行定量测定的准确性,采用自制的 L-半胱氨酸传感器与商品化的数字万用表进行对照测试。在 pH=6 的 PBS 缓冲液中,以 DTPS/Hg 修饰金电极作为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,两电极插入溶液同一液面,接入蓝牙无线监测系统;逐步加入不同浓度的 L-半胱氨酸 ($5.0 \times 10^{-7} \sim 5.0 \times 10^{-5}$ mol/L),结合数字万用表同步记录传感电位变化,发现两个系统输出的响应信号比较一致(图 6A),而且二者的传感电位随 L-半胱氨酸浓度对数的增加而逐渐降低,经拟合可得到线性关系一致的两条响应曲线(图 6B),表明二者的灵敏性一致。所以,此蓝牙监测系统可用于不同电位型传感器对传感信号变化的准确实时监测。

4 结论

设计并制作了一种可用于电位型化学传感的嵌入式蓝牙监测系统,并进行了 pH 值变化响应与 L-半胱氨酸浓度的实时监测测试,结果表明,本系统可对 pH 值变化与 L-半胱氨酸浓度做出实时快速的定量监测。基于此,本系统结合其它不同的电位型传感器,可望对不同物质浓度进行无线监测,并且由于蓝牙 4.0 技术在智能设备上的普及,只需在智能设备中安装相应 App,即可实现数据的实时采集、无线发送与接收,简化了操作流程,具有较好的实际应用潜能。

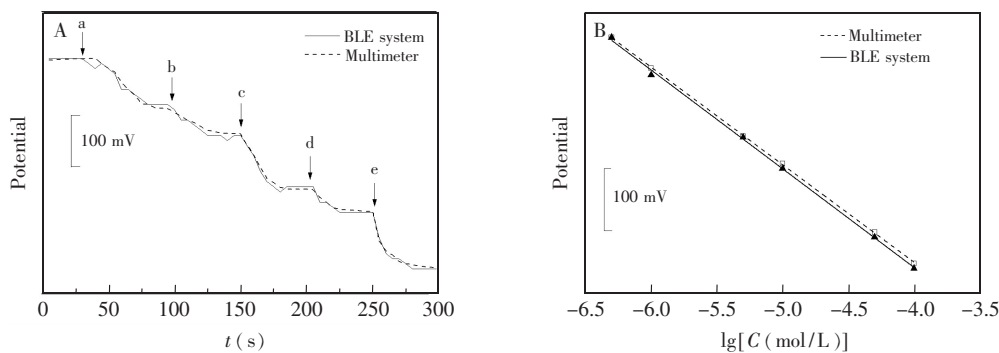


图 6 采用蓝牙系统和数字万用表实时监测 *L*-半胱氨酸: (A) 实时监测曲线; (B) 拟合响应曲线

Fig. 6 Real-time monitoring of *L*-cysteine by using BLE system (solid line) and multimeter (dash line): (A) Real-time potential response curves recorded with time; (B) Calibration curves of potential vs. logarithm of concentration of *L*-cysteine

a: 5.0×10^{-7} mol/L, b: 1.0×10^{-6} mol/L, c: 5.0×10^{-6} mol/L, d: 1.0×10^{-5} mol/L, e: 5.0×10^{-5} mol/L.

References

- Kassal P, Steinberg M D, Steinberg I M. *Sens. Actuators B*, **2018**, 266: 228–245
- XIE Sai-Dan, LIU Yang, WU Zhao-Yang, SHEN Guo-Li, YU Ru-Qin. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2015**, 43 (11): 1648–1655
谢赛丹, 刘洋, 吴朝阳, 沈国励, 俞汝勤. *分析化学*, **2015**, 43(11): 1648–1655
- AN Qing-Bo, JIA Fei, XU Jia-Nan, LI Feng-Hua, NIU Li. *Scientia Sinica Chimica*, **2017**, 47(5): 524–531
安清波, 贾菲, 许佳楠, 李风华, 牛利. *中国科学: 化学*, **2017**, 47(5): 524–531
- Crespo G A. *Electrochim. Acta*, **2017**, 245: 1023–1034
- YU Ru-Qin. *Ion Selective Electrode Analysis*. Beijing: People's Education Publishing House, **1980**
俞汝勤. *离子选择性电极分析法*. 北京: 人民教育出版社, **1980**
- Yu X, Zhou Z, Wang Y, Liu Y, Xie Q, Xiao D. *Sens. Actuators B*, **2007**, 123(1): 352–358
- CAO Ting-Ting, CAO Zhong, HE Jing-Lin, LIANG Hai-Qin, XIAO Zhong-Liang. *Chem. J. Chinese Univ.*, **2014**, 35(7): 1388–1395
曹婷婷, 曹忠, 何婧琳, 梁海琴, 肖忠良. *高等学校化学学报*, **2014**, 35(7): 1388–1395
- CUI Guang-Wen, HE Run-He, YAO Jian, WANG Jian-Ping, ZHANG Xing-Xiang. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2018**, 46(10): 1669–1676
崔光文, 何润合, 药健, 王建平, 张兴祥. *分析化学*, **2018**, 46(10): 1669–1676
- Ma Y H, Yuan R, Chai Y Q, Wu X, Zhou W, Liu X L, Deng F. *Anal. Lett.*, **2009**, 42(15): 2411–2429
- Li X Q, Liang H Q, Cao Z, Xiao Q, Xiao Z L, Song L B, Chen D, Wang F L. *Mater. Sci. Eng. C*, **2017**, 72: 26–33
- Bakker E. *Anal. Chem.*, **2016**, 88 (1): 395–413
- Cao Z, Gong F C, Li H P, Xiao Z L, Long S, Zhang L, Peng S J. *Anal. Chim. Acta*, **2007**, 581(1): 19–26
- Cao Z, Zheng Y L, Gong F C, Long S, Chen P, He X C. *Microchem. J.*, **2007**, 86 (1): 71–79
- Bakker E, Qin Y. *Anal. Chem.*, **2006**, 78(12): 3965–3984
- Cao Z, Lin H G, Wang B F, Chen Z Z, Ma F L, Wang K M, Yu R Q. *Anal. Lett.*, **1995**, 28 (3): 451–466
- Toczyłowska-Mamińska R, Kloch M, Zawistowska-Deniziak A, Bala A. *Talanta*, **2016**, 159: 7–13
- Cai Q Y, Zeng K F, Ruan C, Desai T A, Grimes C A. *Anal. Chem.*, **2004**, 76(14): 4038–4043
- Sheng Y Y, You Y, Cao Z, Liu L, Wu H C. *Analyst*, **2018**, 143: 2411–2415
- Shantaram A, Beyenal H, Veluchamy R R A, Lewandowski Z. *Environ. Sci. Technol.*, **2005**, 39(13): 5037–5042
- Curto V F, Fay C, Coyle S, Byrne R, O'Toole C, Barry C, Hughes S, Moyna N, Diamond D, Benito-Lopez F. *Sens. Actuators B*, **2012**, 171–172(8): 1327–1334
- Kasasbeh A, Lee K, Bieber A, Benneta K, Chang S Y. *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, **2013**, 91(3): 141–147

- 22 XIAO Qing, CHEN Lin, LI Wen-Feng, YANG Li-Qin, CAO Zhong, YU Xin-Yao, LONG Shu, HE Jing-Lin, XIAO Zhong-Liang. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2018**, 46 (12): 1886–1894
肖 情, 陈 琳, 李文锋, 杨丽琴, 曹 忠, 于鑫垚, 龙 姝, 何婧琳, 肖忠良. 分析化学, **2018**, 46 (12): 1886–1894
- 23 LIN Nan-Sen, WANG Li, WANG Mi-Xia, XU Sheng-Wei, YU Wei-Dong, CAI Xin-Xia. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2015**, 43(1): 93–97
林楠森, 王 力, 王蜜霞, 徐声伟, 禹卫东, 蔡新霞. 分析化学, **2015**, 43(1): 93–97
- 24 FAN Yan, WANG Yang, LIU Jun-Tao, LUO Jin-Ping, XU Hui-Ren, XU Sheng-Wei, CAI Xin-Xia. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2016**, 44(7): 1148–1154
樊 艳, 王 杨, 刘军涛, 罗金平, 徐辉任, 徐声伟, 蔡新霞. 分析化学, **2016**, 44(7): 1148–1154
- 25 SONG Xian-Teng, XU Sheng-Wei, WANG Mi-Xia, ZHANG Song, WANG Li, CAI Xin-Xia. *Transducer and Microsystem Technologies*, **2017**, 36(4): 117–120
宋先腾, 徐声伟, 王蜜霞, 张 松, 王 力, 蔡新霞. 传感器与微系统, **2017**, 36(4): 117–120
- 26 ZENG Li-Zhi. *Software*, **2013**, 34 (7): 63–64
曾立志. 软件, **2013**, 34 (7): 63–64
- 27 ZHENG Gui-Lin, TAO Zhi-Hao. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, **2017**, 30(2): 167–173
郑贵林, 陶志浩. 传感技术学报, **2017**, 30(2): 167–173
- 28 Filho G P R, Villas L A, Freitas H, Valejo A, Guidoni D L, Ueyama J. *Computer Networks*, **2018**, 135: 54–69
- 29 de Blasio G, Quesada-Arencibia A, García C R, Molina-Gil J M, Caballero-Gil C. *Sensors*, **2017**, 17(6): 1299–1327
- 30 QIN Tai-Chun, LI Xiao Gang, HAO Jie, YU Ping, MAO Lan-Qun. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2015**, 43(3): 457–462
秦泰春, 李晓钢, 郝 洁, 于 萍, 毛兰群. 分析化学, **2015**, 43(3): 457–462
- 31 LI Xiao-Gang, GUO Bin-Qian, QIN Tai-Chun, HAO Jie, YU Ping, MAO Lan-Qun. *Chinese J. Anal. Chem.*, **2016**, 44(9): 1465–1470
李晓钢, 郭彬乾, 秦泰春, 郝 洁, 于 萍, 毛兰群. 分析化学, **2016**, 44(9): 1465–1470
- 32 Nemiroski A, Christodouleas D C, Hennek J W, Kumar A A, Maxwell E J, Fernández-Abedul M T, Whitesides G M. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2014**, 111(33): 11984–11989
- 33 Kaisti M, Boeva Z, Koskinen J, Nieminen S, Bobacka J, Levon K. *ACS Sensors*, **2016**, 1(12): 1423–1431
- 34 Gu Z, Liu H X, Ying Y L, Xiu G L, Long Y T. *Analyst*, **2018**, 143(12): 2760–2764
- 35 Ainla A, Mousavi M P S, Tsaloglou M N, Redston J, Bell J G, Fernández-Abedul M T, Whitesides G M. *Anal. Chem.*, **2018**, 90(10): 6240–6246
- 36 Jung J, Lee J, Shin S, Kim Y T. *Sensors*, **2017**, 17(10): 2416–2424
- 37 Fan Y, Liu J T, Wang Y, Luo J P, Xu H R, Xu S W, Cai X X. *Biosens. Bioelectron.*, **2017**, 95: 60–66
- 38 TLC4502 Data Manual, Texas Instruments Inc, 2001. <http://www.ti.com/product/cn/TLC4502A>
- 39 CC2541 Data Manual, Texas Instruments Inc, 2013. <http://www.ti.com.cn/product/cn/cc2541>
- 40 OU Yang-Jun, CHEN Zi-Long, HUANG Ning-Lin. *Bluetooth 4.0 BLE Development Complete Manual: Internet of Things Development Technology*. Beijing: Chemical Industry Press, **2013**
欧阳骏, 陈子龙, 黄宁淋. 蓝牙 4.0 BLE 开发完全手册: 物联网开发技术实战. 北京: 化学工业出版社, **2013**

Design and Fabrication of Embedded Wireless Monitoring System Based on Bluetooth Low Energy Transmission for Potentiometric Sensors

CAO Zhong, LI Wen-Feng, LIU Chen, PENG Yu-Yu, HUANG Ying, XIAO Zhong-Liang*

(Collaborative Innovation Center of Micro/Nano Bio-sensing and Food Safety Inspection, Hunan Provincial Key Laboratory of Materials Protection for Electric Power and Transportation, School of Chemistry and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract A small embedded wireless monitoring system for potentiometric sensors was designed and fabricated. The system employed a dual precision op amp of TLC4502 as the preamplifier and a bluetooth low

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31527803, 21545010) and the Science and Technology Service-net (STS) Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-SW-STS-173).

同时, BioAccord 系统现已开始向全球供货。如需深入了解全新 BioAccord LC-MS 系统, 请访问: www.waters.com/bioaccord。