

基于 STM32 单片机的在线恒温光谱分析系统研制与测试

黄超^{1,2}, 赵宇红¹, 张洪明^{2*}, 吕波^{2,3}, 尹相辉¹, 沈永才^{4,5}, 符佳², 李健康^{2,6}

1. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001
2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031
3. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031
4. 合肥师范学院物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230601
5. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽 合肥 230031
6. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001

摘要 近红外波段(NIR, 波长范围: 780~2 500 nm)在线光谱分析技术具有小型化、快速检测、结果稳定可靠等优点, 在工业现场检测领域有着广泛的应用。由于近红外光谱分析系统受温度影响较大, 传统的光栅分光在线光谱分析系统所采用的光谱仪通常仅对探测器制冷, 光路部分仍然会受到温度影响产生波长漂移等测量误差。此外, 系统也多采用 PC 计算机来进行数据采集和控制, 并通过配备独立的工业通讯模块实现光谱分析系统与产线总控系统的通讯, 不仅增加了设备成本与体积, 也显著降低了系统的稳定性。针对这些问题, 基于 STM32 单片机开展了在线恒温光谱分析系统研制与测试。系统采用 STM32 单片机来控制近红外光谱仪, 通过设定和修改采集间隔时间并采集光谱数据, 对光谱数据进行预处理, 来计算得到目标样品的理化指标。对于温度控制, 开发了在 STM32 单片机上运行的基于比例-积分-微分(PID)控制算法的恒温控制系统, 对光谱仪整体(包含光路和电路部分)实现了闭环恒温控制。同时, 开发了基于 STM32 单片机的工业通讯接口(包含 Modbus 协议通讯和 4~20 mA 电流信号通讯)。系统实验测试结果表明, 该设计能够长时间稳定运行, 并有效降低了环境温度变化对光谱数据带来的干扰。在长达 48 小时的系统运行过程中, 光谱仪温度稳定控制在 5℃左右, 温控精度优于 0.25℃。相对于未恒温控制的运行模式, 恒温控制条件下的平均吸收光谱强度相对标准差显著减小, 并实现了数据采集、预处理、样品理化指标计算、工业信号通讯及温度控制的一体化设计, 以满足工业现场在线检测需求。

关键词 在线光谱分析系; STM32 单片机; 比例-积分-微分控制; 数据采集控制

中图分类号: O439 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2023)09-2734-06

引言

近红外(near infrared, NIR, 波长范围: 780~2 500 nm)光谱分析技术具有方便、快速、高效、准确等优点, 广泛应用于食品加工、化工和制药等工业现场的在线检测^[1-2]。相对于传统实验室或化验室离线使用的光谱分析系统, 工业在线检测对光谱分析系统的稳定性和可靠性要求更高。在线光谱分析系统的光谱仪主要由分光光路和用于光谱信号检测的半导体探测器组成。温度变化容易引起微型光谱仪内半导体

器件的参数变化和光学器件的变形, 从而导致探测器上谱线中心位置发生偏移, 造成谱线漂移, 而且温度升高还会增加探测器的暗电流噪声, 降低测量精度^[3-4]。除此之外, 温度过高还会影响光谱仪器件的使用寿命, 试验表明, 温度每增加 25℃, 器件的寿命会减小一半^[5], 因此控制光谱仪的工作温度非常重要。由于在线检测对设备的稳定性要求较高, 需要在线光谱分析系统运行过程中对系统进行恒温控制, 以降低环境温度变化对系统的干扰。但目前的光谱仪大多采用仅对传感器进行恒温制冷的方式, 而外界温度变化仍会对光路部分及探测器电路产生影响, 测量结果受环境温度变化的影响

收稿日期: 2022-04-20, 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202104a06020021), 中国科学院等离子体物理研究所科学基金项目(DSJ-202002), 安徽高校协同创新项目(GXXT-2021-029)资助

作者简介: 黄超, 1998年生, 南华大学电气工程学院硕士研究生 e-mail: chao.huang@ipp.ac.cn

*通讯作者 e-mail: hmzhang@ipp.ac.cn

仍然比较大,在一定程度上降低了检测结果的稳定性^[6-8]。

此外,为了方便开展数据处理程序的设置及调试,在线光谱分析系统多采用计算机来进行数据采集和控制。目前许多微型光谱仪的控制系统主要采用 PC 主机,系统体积庞大、功耗高,而且在工业检测领域,PC 主机系统长时间运行的稳定性较低,难以应用到工业现场长时间在线检测的工作模式^[9]。在采集光谱再完成样品的理化指标计算之后,需将计算结果通过独立的工业通讯模块实现与产线总控系统的通讯。这种架构不仅增加了设备成本与体积,也显著降低了系统的稳定性。因此,使用更加一体化、稳定性高的控制系统,并降低温度对光谱仪光路和电路部分的影响,以降低光谱的噪声和温漂,延长光谱仪使用寿命,从而达到提升在线光谱分析系统稳定性的目的。

STM32 单片机系统作为工业级的单片机控制系统,其运行稳定性远高于 PC 计算机,且能较好地断电重启恢复,适合用于工业现场的在线控制。此外,STM32 系统成本较低,适合于在工业现场大量布置。因此,国内外也有尝试基于 STM32 单片机系统进行光谱仪数据采集的相关研究。魏旭可等^[10]、周安萌等^[11]实现了 STM32 控制微型光谱仪,如控制光谱采集、改变单次采集积分时间、实现上位机的显示。袁晨^[12]等采用 STM32 实现光谱数据采集、光谱仪与激光器工作状态控制和系统工作环境参数监测。但对于应用于工业领域长时间检测的光谱仪,保持较高的测量稳定性更为重要,所以对光谱仪冷却控温抑制温漂也得到越来越多的重视。目前国内外许多团队对微型光谱仪恒温控制方面做了大量研究。周安萌等^[11]基于 STM32 实现了对光谱仪探测器的制冷,中国台湾超微光学开发的 SW8 与 SW9 系列制冷光谱仪,以及美国海洋光学(Ocean Optics)公司设计的制冷型微型光谱仪 NIRQUEST,都能将温度降到 -20°C 。但是,前人的研究都只是针对探测器部分制冷,这种制冷方式虽然能较好地降低传感器的暗噪声,但光谱仪的光路部分仍然会受到环境温度变化的影响,光学器件的温漂问题仍未完全彻底解决。此外,制冷型探测器成本远高于非制冷型探测器,因此,采用制冷型探测器的光谱仪成本通常较高,极大增加了企业装配在线光谱检测设备的成本。

综上,上述研究目前均未全部实现光谱仪数据采集、恒温控制和工业信号通讯功能的一体化设计。针对这一问题,本文基于 STM32 单片机开展了在线恒温光谱分析系统的研制与测试^[13-15]。本系统使用 STM32 单片机控制近红外光谱仪,设定和修改采集间隔时间并采集光谱数据,对光谱数据进行预处理,并计算得到目标样品的理化指标。开发了在 STM32 单片机上运行的基于比例-积分-微分(PID)控制算法^[16-19]的恒温控制系统,对光谱仪整体(包含光路和电路部分)实现了闭环恒温控制。开发了基于 STM32 单片机的工业通讯接口(包含 Modbus 协议通讯和 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号通讯)。对系统性能进行了测试。

1 系统总体设计与工作原理

1.1 在线光谱分析系统整体介绍

本研究采用了基于数字微镜(DMD)微型近红外光谱仪来开展在线光谱分析系统研制。该光谱仪为基于德州仪器(TI)的 DLP 技术所设计的微型光谱仪,采用了 TI 的数字微镜 DMD 与单点探测器的组合来替代价格昂贵的线阵探测器,在不降低光学性能的前提下,大幅度降低了设备成本,便于开展多通道分布式在线检测。本款光谱仪输入端为标准的 SMA905 光纤接口,便于开展光学调试与系统装配。其波长观测范围约为 $900\sim 1700\text{ nm}$,波长分辨率约为 10 nm ,单次数据采集时间通常约为 2 s ,基本可以满足工业在线检测的需求。光谱仪可以通过 MiniUSB 或 UART 串口与计算机或 STM32 单片机系统连接,以实现光谱仪数据采集控制与光谱数据传输。

由于光谱仪采用的探测器为非制冷探测器,在环境温度变化的条件下会有较为明显的温度漂移。因此,本研究中为了降低外界环境的干扰,为此光谱仪设计了一款微型恒温腔室,如图 1 所示。本设计可以将光谱仪整体放置在恒温腔室内,以实现光路与探测器的整体恒温控制,降低环境温度变化对光路和电路产生的干扰。制冷系统采用内外风扇散热,使用半导体制冷片对微型光谱仪进行制冷,为实现光谱仪制冷效果最大化,在腔室内外表面添加保温层。

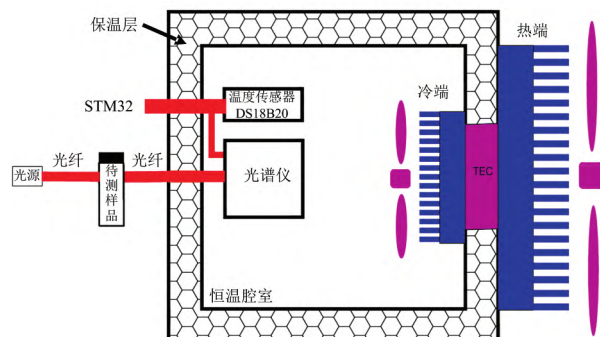


图 1 在线光谱分析系统整体布局

Fig 1 The schematic diagram of the on-line spectroscopic analysis system

1.2 系统电路结构框图

如图 2 所示,在控制电路设计部分,本研究采用 STM32F407 作为主控芯片,主频率达到 168 MHz ,能实现光谱仪的控制与数据的预处理,同时也能在主程序中运行增量式 PID 算法,以实现光谱的恒温控制。

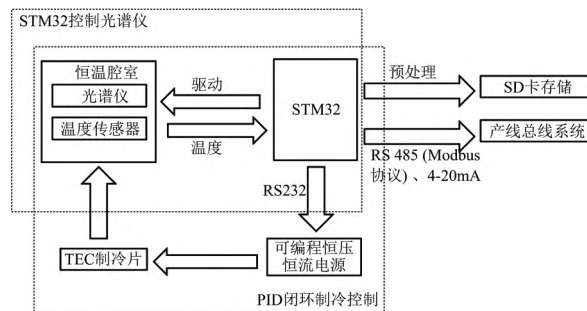


图 2 系统电路结构整体框图

Fig 2 The block diagram of integrated circuit system

由图 2 可知, 电路控制系统主要由 STM32 单片机系统、光谱仪、可编程恒压恒流电源和 TEC 制冷片组成。主要功能可以分为两部分: 首先是 STM32 单片机系统控制光谱仪采集数据, 并开展目标样品的理化指标计算, 并通过 Modbus 协议和 4~20 mA 电流信号将计算得到的理化指标实时地反馈给产线的总控系统; 其次是通过在 STM32 单片机系统上运行 PID 算法来实现光谱仪整体的恒温控制。

STM32 系统通过 UART 串口与光谱仪相连, 采集的光谱数据通过 RS232 串口回传给 STM32 系统并将数据存储在 SD 卡中。在 STM32 系统对光谱数据进行预处理, 并计算目标样品的理化指标, 通过 Modbus 协议和 4~20 mA 电流信号将数据结果传送给产线总控系统。

STM32 单片机通过放置在恒温腔室内的 DS18B20 温度传感器进行温度的实时监测, 并将实时温度作为输入量, 输入给 PID 算法。单片机通过 RS232 串口与可编程恒压恒流电源相连, 恒压恒流电源的输出端与半导体制冷片相连。根据 PID 的计算结果, 可以实时调整恒压恒流电源的输出电压, 进而调整半导体制冷片的制冷功率, 最终实现对光谱仪温度的闭环控制。

1.3 主程序设计

本研究采用 Keil5 实现了 STM32 系统程序的开发, 程序主要流程如图 3 所示。程序设置有定时器, 可以设定循环周期时间。在每个循环开始之初, 首先对 STM32 的 UART 串口和用于 Modbus 协议通讯的 RS485 串口等进行初始化; 然后读取配置文件, 完成设定温度和光谱仪采集参数设定。之后 STM32 系统读取温度传感器 DS18B20 所采集的恒温腔室的实时温度, 将实时温度作为输入量输入系统运用 PID 算法, PID 算法经过计算后来调整可编程恒压恒流电源的输出电压, 以调整制冷片制冷功率, 最终实现腔室的恒温控制。在光谱仪数据采集方面, 在完成光谱仪参数设置之后, STM32 系统发送数据采集指令并等待光谱仪完成光谱数据采集。

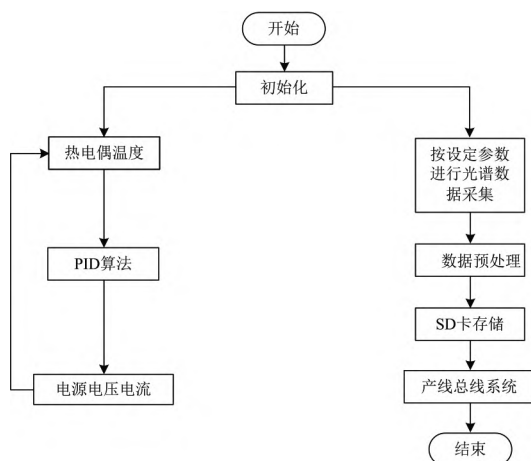


图 3 主程序流程图

Fig. 3 The flow diagram of Main program

如图 4 所示, 所用到的 PID 控制算法的核心公式为

$$U(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

式中, K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数; $U(t)$ 为 PID 控制器的输出信号; $e(t)$ 为控制器输入与设定值之间的误差。

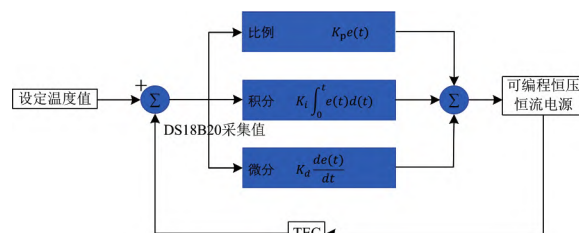


图 4 PID 程序框图

Fig. 4 The framework diagram of PID program

在收到光谱仪回传的光谱数据之后, STM32 系统开展光谱数据预处理, 所采用的预处理的方法由从配置文件读取的配置参数决定。主要的预处理方法包含平滑、标准正态变换(SNV)、一阶求导、二阶求导和多元散射校正(MSC)等。在完成数据预处理之后, 将预处理后的光谱数据代入模型, 计算目标样品的理化指标。最终, 通过 RS485 串口以 Modbus 协议和 4~20 mA 模块以电流信号将计算结果发送到产线的总控系统。

2 实验部分

2.1 系统部件参数

在完成系统搭建与程序开发之后, 对系统进行了实验测试。在实验中, 采用宽谱卤素灯作为光源, 其可提供波段为 360~2 500 nm, 寿命约 10 000 h。采用的可编程恒压恒流电源最大输出电压为 60 V, 最大功率为 1 440 W, 可以满足半导体制冷片的供电要求。制冷片采用双层 TEC 半导体制冷片, 最高电压与最大电流分别为 12 V 和 6 A, 最大制冷功率为 72 W。经过测试发现, 在室温为 20 °C 情况下, 恒温腔室内的温度可以恒定控制在 -10 °C, 实现腔室内外温差 30 °C。

2.2 测试方法

为测试所研制的在线光谱分析系统的稳定性, 以及温度变化对微型光谱仪采集数据的影响, 对所研制的系统分别进行了有温控和无温控 48 h 的数据采集。有无温控数据采集系统程序相同, 二者唯一区别在于是否对采集系统进行恒温制冷控制。光谱仪采集数据间隔时间设置为 30 s, 放置在恒温腔室内的温度传感器的采集频率设置为 1 Hz。选用的测试样品为蒸馏水, 且在测试期间其各项理化指标保持不变。在线光谱分析系统分别在室温无恒温控制和恒温控制在 5 °C 的条件下连续运行采集 48 h 的光谱数据, 然后分别对数据进行预处理(数据平滑), 并对有温控和无温控的光谱数据求平均值、标准差、相对标准差等指标进行对比分析, 以评估系统在有无恒温控制条件下的系统稳定性差异。

3 结果与讨论

3.1 温度控制效果

在有恒温控制条件下温度传感器检测的光谱仪腔室内的温度变化如图5所示。图5(a)是在无温控的条件下腔室内的温度变化曲线,起始温度值为 24.75°C 。此后的5 h内,随着光谱仪的持续运行,腔室内温度一直在上升,最高达到 29.25°C 。随着外界环境温度的降低,当测试时间为24 h时,光谱仪温度回落到 26°C 左右,表明无温控的腔室内温度变化较大,最大温差约 4.5°C ,温度波动周期时间达到24 h。这有可能是既受到光谱仪运行所产生的热量累积的影响,

也受到外界环境温度变化所产生的影响。后24 h由于环境温度变化不大,光谱仪温度基本稳定在 26°C 左右。可以推知,在无温控条件下,如果环境温度变化较大,对采集光谱结果产生较大误差,会影响光谱仪的稳定性,尤其是长时间在线测量时,温度的变化通常是比较大的。

图5(b)展示了在恒温控制条件下腔室内温度的变化。系统设定温度值为 5.0°C 。在系统启动后约5 min左右,腔室内温度开始稳定在 5.0°C ,波动范围在 $4.75\sim 5.25^{\circ}\text{C}$ 之间,有少数温度值到达 4.5 或 5.5°C ,总体的温度差值在 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 左右。在48 h的测试过程中,外界环境温度依然有变化,但是未对腔室内的温度产生影响。

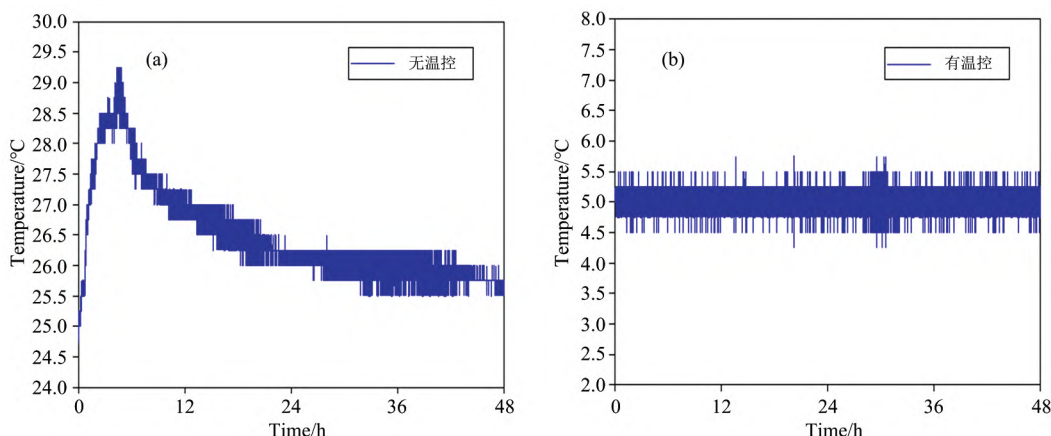


图5 有无温控时光谱仪温度测试

Fig 5 Temperature of the Spectrometer within 48 hours in case of no-cooling and cooling situation

3.2 光谱数据对比分析

在对比了系统的温度控制效果之后,对系统所采集的测试样品蒸馏水的吸收光谱数据进行了分析。图6展示了在有/无温控的条件下连续采集48 h的吸收光谱强度的平均值对比。可以发现,两种情况下其谱峰位置基本相同。可以看出,在 985 、 1364 与 1416 nm 位置有较为明显的吸收峰。由于采用的光谱仪分辨率较低,因此, 1157 与 1226 nm 位置的吸收峰重叠较为严重,在谱线上无法直接分辨。但是通过化学计量学方法建立模型后^[20],可以较好的进行分析。在无

温控条件下,除了强度有一定差异之外,还可以发现谱线的吸收峰的非高全宽和波长位置均有较为明显的差异,说明温度的变化不仅影响了探测器的光电转换效率也对系统的光路结构产生了一定的影响,导致产生了一定的波长漂移。实验结果显示了对光谱仪光学部分进行恒温控制的必要性,突出了本研究的重要意义。

通过分析连续测量的多个光谱数据的相对标准差来表征在线光谱分析系统的稳定性。如图7所示,分别分析了有/无温控条件下连续采集48 h的光谱数据的相对标准差。整体上,无温控时光谱相对标准差较大,有温控时相对标准差要小得多,尤其在 $900\sim 1300\text{ nm}$ 波段之间的光谱。在 $1300\sim 1650\text{ nm}$ 波段之间,光谱相对标准差都较小,主要是因为这个波段内吸收光谱强度较大,测量相对标准差小,而 $900\sim 1300\text{ nm}$ 之间的光谱强度相对较弱,测量误差偏大。表1给出了有无温控条件下几个典型的波长位置的相对标准差,可以发现在采用温控的条件下吸收光谱强度的相对标准差数值显著降低。结果表明在有温控的条件下系统的测量结果更为稳定,尤其是当测量强度较弱的谱线信号时,温度变化对谱线强度测量产生的干扰更为明显。因此,在测量谱线强度较弱的情况下对在线光谱分析系统进行恒温控制就更为重要。实验测试结果表明,采用本文提出的对光谱仪整体进行恒温控制的方法可以有效地降低温度变化对光谱测试产生的影响,

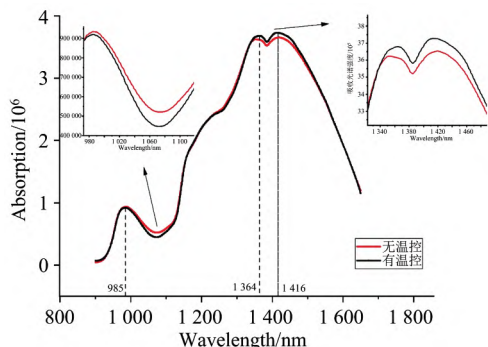


图6 48 h内有无温控的平均吸收光谱强度

Fig 6 Average absorption spectrum within 48 hours in case of no-cooling and cooling situation

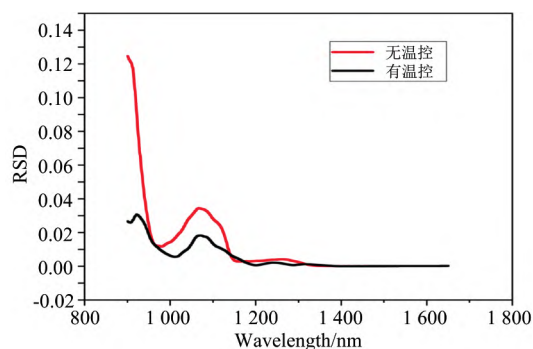


图 7 有无温控吸收光谱强度相对标准差

Fig 7 RSD of the intensity of absorption spectra within 48 hours in case of no-cooling and cooling situation

表 1 不同波长下有无温控吸收光谱强度相对标准差

Table 1 RSD of the intensity of absorption spectra within 48 hours in case of no-cooling and cooling situation at several different wavelengths

波长/nm	无温控	有温控	波长/nm	无温控	有温控
901	0.124 5	0.0266	1 227	0.003 5	0.001 7
945	0.032 3	0.022 3	1 300	0.002 4	0.000 9
987	0.012 4	0.008 0	1 421	0.000 052	0.000 049
1 076	0.033 8	0.017 9	1 650	0.000 23	0.000 19

可以显著提升系统的稳定性。

4 结 论

针对传统的在线光谱分析系统采用的仅对探测器制冷的恒温控制方式、计算机用来进行系统数据采集和控制及通讯方式等带来的系统不稳定性问题,本研究基于 STM32 单片机开展了在线恒温光谱分析系统研制,并对系统进行实验测试以验证其性能。本设计基于 STM32 单片机实现光谱仪的数据采集,数据预处理,样品理化指标计算和工业通讯,实现了控制和通讯系统的一体化设计,提升系统的稳定性。此外,自主开发了在 STM32 单片机上运行的基于 PID 控制算法的恒温控制系统,对光谱仪整体实现了闭环恒温控制。系统测试结果表明,本设计能够在无上位机的条件下独立稳定地运行,并且发现恒温控制有效降低了环境温度变化对光谱数据产生的干扰。在 48 h 的运行过程中,光谱仪温度稳定控制在 5℃ 左右,温控精度优于 0.25℃。相对于未恒温控制的运行模式,恒温控制条件下的平均吸收光谱强度相对标准差显著减小。本研究基于 STM32 单片机实现了光谱仪控制、光谱数据处理、工业信号通讯和温度控制的一体化设计,显著提升了在线光谱分析系统的稳定性,对促进在线光谱分析技术在工业检测领域的应用有较好的参考意义。下一步将基于本光谱仪系统所获得的数据开展近红外光谱数据建模等工作。

References

- [1] CHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(褚小立,袁洪福,陆婉珍). Analytical Instrumentation (分析仪器), 2006, (2): 1.
- [2] Ramsay S J, Gomersall C D. Anaesthesia, 2002, 57(6): 615.
- [3] ZHOU Feng-bo, ZHU Hong-qiu, LI Chang-geng, et al(周风波,朱红求,李长庚,等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2022, 59(3): 0307001.
- [4] WANG Shun-kuan, LÜ Bo, ZHANG Hong-ming, et al(万顺宽,吕波,张洪明,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2021, 41(10): 3111.
- [5] DONG Zhao, GAO Wei, GAN Yu-quan(董钊,高伟,甘玉泉). Chinese Journal of Electron Devices(电子器件), 2009, 32(4): 855.
- [6] Guo X, Bai H, Ma X, et al. Analytica Chimica Acta, 2020, 1098: 66.
- [7] YU Fan, WEN Quan, LEI Hong-jie, et al(庾繁,温泉,雷宏杰,等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2018, 55(10): 100003.
- [8] Yang Z, Albrow-Owen T, Cai W, et al. Science, 2021, 371(6528): 480.
- [9] WANG Su-hui, ZHANG Xu, ZHANG Gen-wei, et al(王宿慧,张旭,张根伟,等). Infrared Technology(红外技术), 2020, 42(7): 688.
- [10] WEI Xu-ke(魏旭可). Master Dissertation(硕士论文). Ocean University of China(中国海洋大学), 2012.
- [11] ZHOU An-meng, LIU En-chao, LI Xin, et al(周安萌,刘恩超,李新,等). Journal of Applied Optics(应用光学), 2019, 40(4): 557.
- [12] YUAN Chen, QI Fu-jun, GUO Jin-jia, et al(袁晨,齐夫军,郭金家,等). Periodical of Ocean University of China(中国海洋大学学报), 2019, 49(S2): 170.
- [13] WANG Yi-lei, GAO Peng-fei, HUANG Fei, et al(王毅磊,高鹏飞,黄斐,等). Electronic Science and Technology(电子科技), 2017, 30(2): 1.
- [14] ZHOU Hai-bin, LEI Xin-zhuo, ZHOU Wang, et al(周海彬,雷新卓,周望,等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2016, 53(6): 063001.
- [15] QI Xing-pu, CHEN Tong, CHEN Bin(祁兴普,陈通,陈斌). Journal of Food Safety & Quality(食品安全质量检测学报), 2016, 7(5): 1864.
- [16] LI Jian, CHEN Chen, XUE Ding-zhu, et al(李健,陈晨,薛顶柱,等). Laser Journal(激光杂志), 2015, 36(4): 38.
- [17] HUANG Qi, HAN Guang-yuan, WU Rui-dong, et al(黄琦,韩广源,吴瑞东,等). Instrument Technique and Sensor(仪表技术与传

感器), 2017, (5): 71.

[18] HE Chun-gui, ZHANG Yu-jun, LIU Guo-hua, et al(贺春贵, 张玉钧, 刘国华, 等). Electronic Measurement Technology(电子测量技术), 2017, 40(8): 27.

[19] WU Feng, WU Bai-kun, YU Wen-zhi, et al(吴锋, 吴柏昆, 余文志, 等). Instrument Technique and Sensor(仪表技术与传感器), 2015, (8): 82.

[20] DU Yi-ping, PAN Tie-ying, ZHANG Yu-lan(杜一平, 潘铁英, 张玉兰). Application of Chemometrics(化学计量学应用). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2008. 163.

Development and Test of On-Line Spectroscopic System Based on Thermostatic Control Using STM32 Single-Chip Microcomputer

HUANG Chao^{1,2}, ZHAO Yu-hong¹, ZHANG Hong-ming^{2*}, LÜ Bo^{2,3}, YIN Xiang-hui¹, SHEN Yong-cai^{4,5}, FU Jia², LI Jian-kang^{2,6}

1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

2. Institute of Plasma Physics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

3. Science Island Branch Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China

4. School of Physics and Materials Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China

5. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China

6. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China

Abstract Near-Infrared (NIR, wavelength range: 780~2 500 nm) on-line spectral analysis technique has the advantages of miniaturization, rapid detection, and stable and reliable results. Therefore, this technique is widely used in the field of industrial detection. Because the spectroscopic system is significantly affected by ambient temperature, the detector is always cooled in traditional on-line spectroscopic systems. However, measurement errors, such as wavelength drift, are still generated from the optical components when temperature changes. In addition, PCs are always used for system control and spectra acquisition, which significantly increase system instability. In order to solve these problems, this paper proposes an on-line thermostatic control spectroscopic system based on an STM32 single-chip microcomputer. Firstly, STM32 single-chip microcomputer is used to control the near-infrared spectroscopy for spectra data acquisition, configuration setting, preprocessing of the spectral data, and calculation of the physical and chemical parameters of the sample. Secondly, a constant temperature control system has been developed based on the STM32 single-chip microcomputer, in which the proportional-integral-differential (PID) control algorithm is used. The closed-loop thermostatic control has been realized for the whole spectrometer, including the optical and the circuit part. At last, an industrial communication interface including Modbus protocol communication and 4~20 mA current signal communication has also been developed based on the STM32 single-chip microcomputer. The system test results show that the whole system can be operated stably without PC for a long time. The measure errors originating from the changing of ambient temperature also reduce obviously. During a test of 48-hour system operation, the temperature of the spectrometer is controlled stably at around $(5 \pm 0.25) ^\circ\text{C}$. A much smaller relative standard deviation of absorption spectra is obtained when the thermostatic control is applied. The system integrates spectra acquisition, pretreatment, calculation of physical and chemical parameters, industrial communication and thermostatic control, which can satisfy the requirements of industrial on-line detection.

Keywords On-line spectroscopic system; STM32 single-chip microcomputer; Proportional-integral-differential (PID) control; Spectra data acquisition

(Received Apr. 20, 2022; accepted Oct. 19, 2022)

* Corresponding author