

激光与光电子学进展

基于紫外-可见光谱的水质 COD 在线检测系统设计

蔡嘉城¹, 邓霄^{1,2*}, 阚崇轩¹, 赵爽¹

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

²太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024

摘要 基于紫外-可见光谱技术,设计了一种可用于水质参数溶解氧(COD)实时在线检测的系统,介绍了系统的测量原理和总体结构(光路和电路)的设计。通过对水体 COD 的检测,测得了 COD 溶液的光谱数据,利用光谱数据建立了 PLS 算法预测模型和电压解算模型,并对两种模型的预测精度进行了对比。同时考虑到水体中的环境干扰因素,重点分析了浊度、温度对 COD 测量结果的影响,并对所构建模型进行了补偿和校正,提高了系统的检测精度。实验结果表明,相比传统的水质 COD 检测方法,该系统实现了快速、高精度和实时在线检测的目的。

关键词 紫外光谱; 水质检测; 实时在线; 偏最小二乘回归; 电压解算

中图分类号 X853

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0130001

Design of Water Quality COD Online Detection System Based on Ultraviolet-Visible Spectroscopy

Cai Jiacheng¹, Deng Xiao^{1,2*}, Kan Chongxuan¹, Zhao Shuang¹

¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract Based on ultraviolet-visible spectroscopy technology, a system that can be used for real-time online detection of water quality parameters dissolved oxygen (COD) was designed, and the measurement principle and overall structure (light path and circuit) design of the system were introduced. By detecting the COD of the water body, the spectral data of the COD solution was measured, the partial least squares regression (PLS) algorithm prediction model and the voltage solution model were established using the spectral data, and the prediction accuracy of the two models was compared. At the same time, considering the environmental interference factors in the water body, the impact of turbidity and temperature on the COD measurement results was analyzed, and the constructed model was compensated and corrected, which improved the detection accuracy of the system. The experimental results show that, compared with the traditional water quality COD detection method, the system achieves the purpose of fast, high-precision and real-time online detection.

Key words ultraviolet spectrum; water quality testing; real-time online; partial least squares regression; voltage solution

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 山西省重点研发计划资助项目(201903D321001)

通信作者: *dengxiao@tyut.edu.cn

1 引言

近年来,随着工农业的发展,排放了越来越多的废水。这些废水未经处理排入水体后导致 pH、溶解氧(COD)和浊度等水质参数值发生变化,造成了水资源恶化,破坏生态平衡。水质状况是由相关指标参数来表明的,通常包括五个参数,即浊度、COD、pH、电导率和温度^[1]。其中 COD 被列为我国水污染控制最重要的执行指标,也是水环境质量的核心评价指标,反映水体中的还原性物质污染程度^[2]。紫外-可见光谱法是常用的水质 COD 检测方法,它是利用水中物质对紫外光和可见光的吸收特性,从吸收光谱推算物质含量并建立优势波长处吸光度与水质参数关系的一种水质检测方法^[3-6]。宋建军等^[7]利用多波长紫外吸收光谱法与偏最小二乘回归(PLS)相结合算法预测水样中的 COD 值,同时考虑了浊度对建模所用吸光度的影响,使用线性方程对浊度的影响进行了补偿。Brito 等^[8]基于紫外光谱结合偏最小二乘回归算法对污水的 COD 进行了检测,建立了标定模型,用于总悬浮固体值和 COD 值的预测。Mrkva 等^[9]针对市政和工业污水建立了利用 545 nm 处的吸光度作为浊度数据补偿计算出 COD 的模型,提高了实际污水的检测精度。汤斌等^[10]利用多元散射校正法消除了浊度对水质检测参数中 COD 的影响,不仅提高了光谱法检测水质 COD 的信噪比,而且还为化学计量法建立准确、有效的水质检测 COD 分析模型进行数据预处理提供了一种新途径。紫外光谱检测方法具有系统结构简单、光源稳定性强且能实现实时在线检测的优点,但在实际水样检测过程中,检测结果还会受到环境因素例如水体浊度和温度等的影响,因而在使用紫外光谱法检测水体 COD 时,需要对干扰因素进行分析并给出相应的校正模型,以达到更高的测量精度。

本文介绍了一种基于紫外-可见光谱技术的水质 COD 在线检测系统,通过现场可编程门阵列(FPGA)作为主控制器对 AD 芯片采集到的透射光光强数据建立 COD 浓度-电压数学模型,实现系统的连续在线检测,并以光谱仪采集到的数据作为标准,检验所建立模型的精度。最后对水样中可能出现的干扰因素对水质 COD 测量结果的影响做了分析讨论。

2 检测系统设计

2.1 检测原理

根据朗伯比尔定律,当一束平行单色光垂直通过某一均匀、无散射的吸光溶液时,其吸光度 A 与透射比 T 成反相关关系,与透射光程 b 和吸光物质浓度 c 的乘积成正比例关系^[11],公式表示为:

$$A = \log \frac{I_0}{I_t} = \log \frac{1}{T} = Kbc, \quad (1)$$

式中, A 是吸光度, I_0 是入射光光强, I_t 是透射光光强, T 是透射比, K 是摩尔吸光常数, b 是透射光程, c 是吸光物质浓度。由(1)式可知,当入射光强保持不变时,透射光 I_t 越大,吸光度 A 越小,则 COD 溶液的浓度 c 也就越小,从而可以通过对标准 COD 溶液的测量,建立 COD 浓度-吸光度的数学模型,实现对 COD 浓度的检测。

2.2 系统设计

系统由光路和电路两部分组成,其中光路部分包括氙灯光源(D2000)、比色皿和光谱仪(MAX200-Pro),光谱仪的检测范围是 185~642 nm,信噪比为 450:1,分辨率达到 0.95 nm,用于对待测水质样品光谱数据的采集;电路部分主要包括光电探测器(PDA25K2)、AD 采集模块(AD9226)、FPGA 控制单元和上位机,用于对水质 COD 的光谱数据进行光电转换,并实现数据的采集、存储和显示(图 1)。

光谱仪和光电探测器作为两种不同的数据采集功能模块通过光开关进行分时控制,以保证所获取数据的一致性。AD9226 负责采集透射光光强被光电探测器(PDA25K2)转换成的电压值,然后利用电压值与对应 COD 的浓度值来建立浓度-电压的数学模型,进而实现系统的连续在线检测,但考虑到 AD 采集芯片的精度问题,故需要利用光谱仪采集到的光谱数据作为标准,以检验所建立模型的精度。

电路采集部分采用 Xilinx 公司的 Artix-7 系列 FPGA 作为主控制器构成控制单元,实现对所需信号及状态的采集,通信部分使用 KSZ9031RNX 以太网 PHY(Physical Layer)芯片与上位机进行通信,存储部分采用 Micron 公司的 DDR3(Double Data Rate 3)颗粒 MT41J256M16HA 芯片。AD 采集到透射光光强的电压信号后,FPGA 先将 AD 采集到的数据通过 MIG(Memory-Information Register)的 IP(Intellectual Property)核存储到 DDR3 中,之后

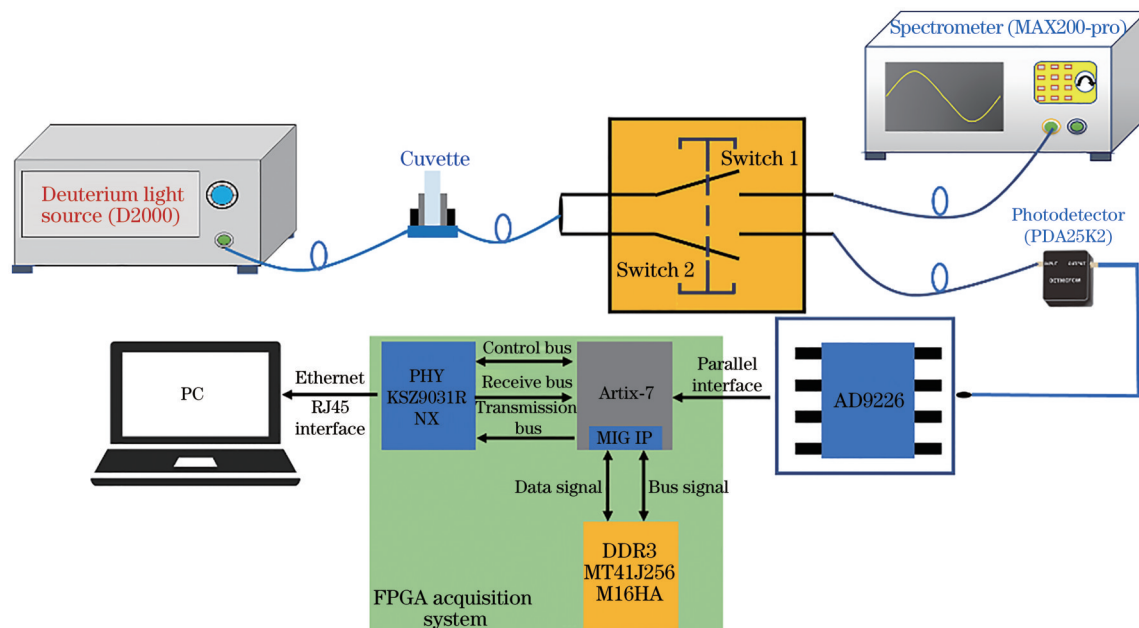


图 1 系统总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall system structure

FPGA 将存储到 DDR3 中的数据通过 RGMII (Reduced Gigabit Media Independent Interface) 接口发送给 PHY 芯片,PHY 芯片会将数据通过 RJ45 接口传输到上位机进行实时显示。

3 水质 COD 的检测与分析

3.1 COD 溶液的光谱数据分析与 PLS 算法模型

以 5 mg/L 的梯度间隔分别配置了 5~50 mg/L 的 10 组标准 COD 溶液,其在紫外波段 190~400 nm 的吸收光谱如图 2 所示。可以看出,随着 COD 浓度

的增大,对应的透射光强度依次减小,样品对紫外光谱吸收逐渐增强[图 2(a)]。由图 2(b)可知,随着 COD 浓度的增大,其吸光度的值依次变大,样品在 200~300 nm 之间有比较明显的吸收特性,溶液的吸收光谱存在两个特征峰,第一个吸收峰在 230 nm 附近,第二个吸收峰在 280 nm 附近,样品的吸光度在 300 nm 之后几乎为零。所以,对于同一种 COD 标准溶液,当浓度不同时,吸收峰的波长位置不会变化,只是吸收峰的绝对高度随浓度呈单值递增趋势。

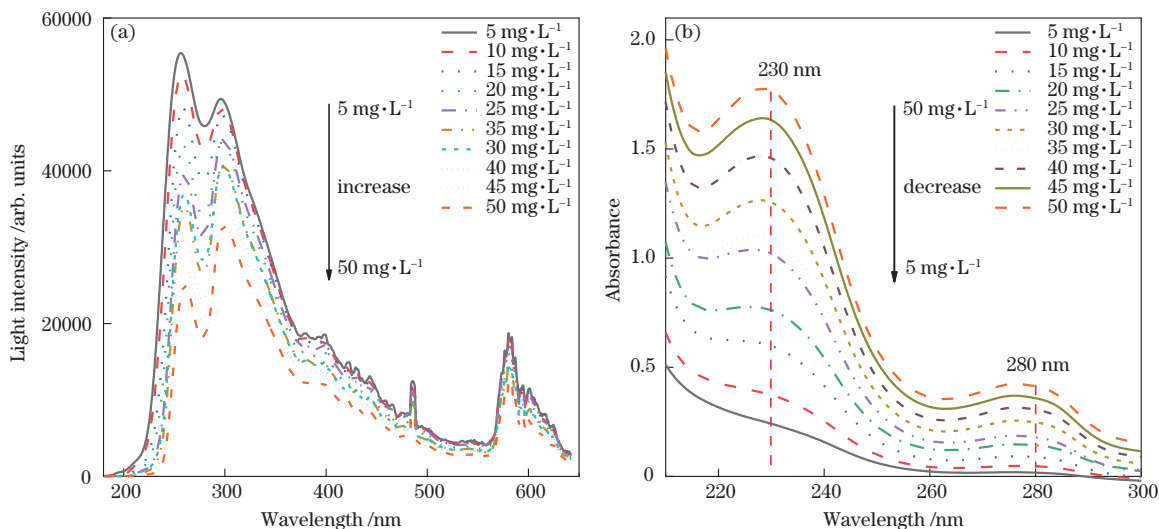


图 2 COD 标准溶液的吸收光谱。(a)透射光光强曲线;(b)吸光度曲线

Fig. 2 Absorption spectrum of COD standard solution. (a) Transmitted light intensity curve; (b) absorbance curve

利用 COD 吸光度数据, 选用 230 nm 和 280 nm 特征峰附近的光谱数据进行 PLS 算法建模, 如图 3 所示。以 1 个因变量和 5 个自变量进行 PLS 数据建模, 选用溶液 COD 的值作为因变量, 220~245 nm (5 nm 间隔) 与 260~285 nm (5 nm 间隔) 波长下的吸

光度作为自变量, 结果分别如图 3(a) 和 (b) 所示。可以看出, 220~245 nm 波段下 PLS 预测模型明显优于 260~285 nm 波段下的预测模型, 因而 220~245 nm 波段下 PLS 预测模型可作为电压解算模型的参考。

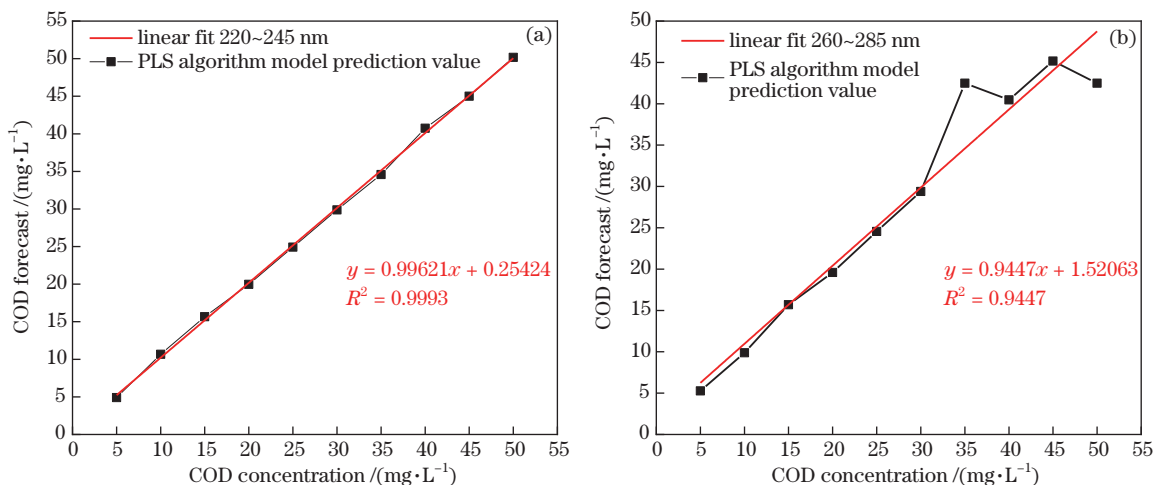


图 3 光谱数据预测回归模型。(a) 220~245 nm 波段; (b) 260~285 nm 波段

Fig. 3 Spectral data prediction regression model. (a) 220~245 nm band; (b) 260~285 nm band

3.2 COD 溶液的电压数据分析与电压解算模型

系统通过 AD 芯片对采集到的透射光光强数据建立 COD 浓度-电压数学模型, 由于电压解算模型中需要考虑不同浓度 COD 溶液是否适合建立线性回归模型的问题, 因而将 COD 溶液的吸光谱进行归一化处理。根据归一化理论, 若不同浓度样品的组成成分相同或相似, 那么它们的归一化光谱重叠, 并且不同样品的光谱波段变化趋势是一致的, 适合建立线性回归模型^[12-13], 其计算方法为

$$\varphi_{(\lambda)} = \frac{A_N(\lambda) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \quad (2)$$

式中, $A_N(\lambda)$ 是不同波长下的吸光度, A_{\min} 和 A_{\max} 分别是吸光度的最小值和最大值。对浓度为 5~50 mg/L COD 溶液的吸光谱进行归一化处理, 将吸光度的值转化为 0 到 1 的无量纲值, 如图 4(a) 所示。从图中可以看出, 归一化光谱在 190~300 nm 波段基本重叠, 因而 190~300 nm 波段的吸光度适合建立线性回归模型。

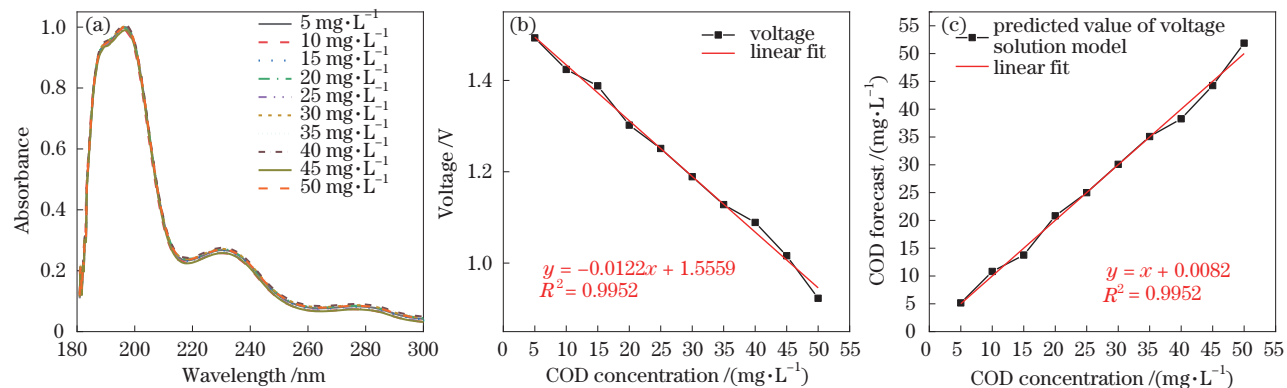


图 4 COD 浓度-电压数据模型。(a) 归一化光谱曲线; (b) 电压回归模型; (c) 电压解算模型

Fig. 4 COD concentration-voltage data model. (a) Normalized spectral curve; (b) voltage regression model; (c) voltage solution model

分别采集 5~50 mg/L COD 溶液的透射光光强所转换成的电压信号, 对测得结果进行线性分析,

计算出 COD 浓度-电压模型, 如图 4(b) 所示。可以看出, 随着 COD 溶液浓度的上升, 对应的电压值下

降。将实际测量的电压值带回(2)式,可计算出线性回归方程下的 COD 反演值,从而建立电压解算模型,如图 4(c)所示。对光谱数据 PLS 算法模型与电压解算模型进行比较发现(表 1),220~245 nm 的

PLS 算法模型预测值的相对误差在 6.0% 以内,而电压解算模型的相对误差在 8.2% 以内,两者的误差比较接近,所以电压解算模型可作为 COD 溶液浓度的预测模型进行应用。

表 1 不同算法模型下 COD 浓度预测值的相对误差

Table 1 Relative error of the predicted value of COD concentration under different algorithm models

COD/ (mg·L ⁻¹)	220~245 nm wavelength PLS algorithm model		260~285 nm wavelength PLS algorithm model		Voltage solution model	
	Predictive value / (mg·L ⁻¹)	Relative error / (mg·L ⁻¹)	Predictive value / (mg·L ⁻¹)	Relative error / (mg·L ⁻¹)	Predictive value /(mg·L ⁻¹)	Relative error / %
5	4.9118	-0.0178	5.2664	0.0533	5.1557	0.0311
10	10.6633	0.0663	9.8818	-0.0118	10.8115	0.0811
15	15.6599	0.0440	15.6939	0.0463	13.7623	-0.0825
20	19.9684	-0.0016	19.5969	-0.0202	20.8115	0.0406
25	24.9227	-0.0031	24.5523	-0.0179	24.9918	-0.0003
30	29.8816	-0.0039	29.3947	-0.0202	30.0738	0.0025
35	34.5830	-0.0119	42.4895	0.2140	35.0738	0.0021
40	40.7377	0.0184	40.4746	0.0119	38.2705	-0.0432
45	45.0068	0.0002	45.1604	0.0036	44.2541	-0.0166
50	50.1648	0.0033	42.4895	-0.1502	51.8771	0.0375

4 环境参数对水质 COD 测量结果的影响

上述实验中,所采用的样品溶液是标准的 COD 溶液,其浊度可忽略不计,并且实验过程中,环境温度基本处于恒温状态。但考虑到在实际水样的检测过程中会有多种干扰因素例(如浊度、温度和 pH 等),因而需要对 COD 溶液进行干扰实验分析。

4.1 浊度对 COD 溶液检测的影响

由于浊度会对 COD 溶液检测时产生干扰^[13],因而选用 COD 浓度为 50 mg/L 的标准溶液、标准浊度溶液 10~50 NTU (间隔 10 NTU) 以及浓度为 50 mg/L 且浊度分别为 10~50 NTU (间隔 10 NTU) 进行浊度干扰实验,如图 5 所示。由图 5(a)可知,随着 COD 溶液浊度的增加,其混合溶液的吸光度也是逐渐增大的;从图 5(c)分析可知,光谱不重叠部

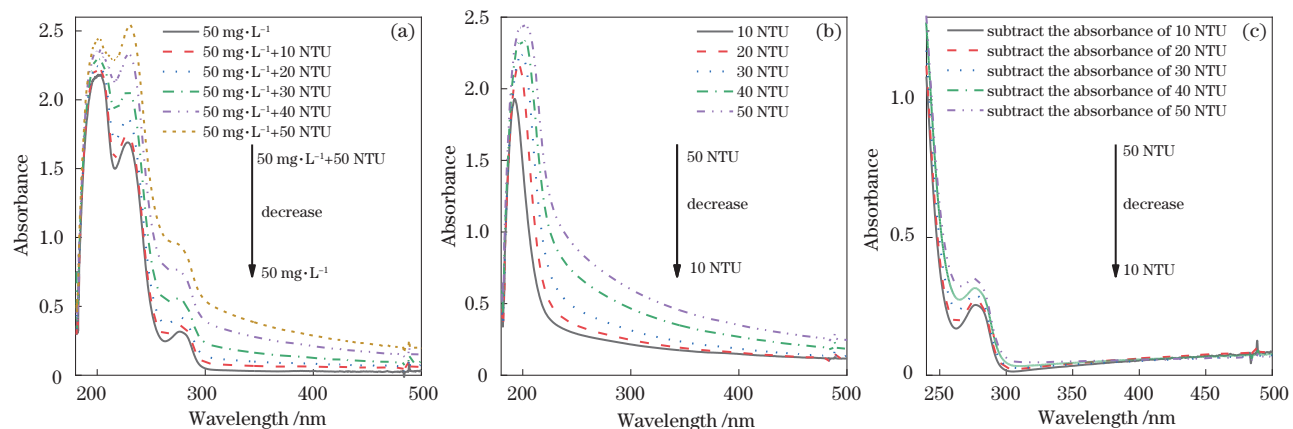


图 5 混合溶液的吸光光谱。(a) COD 浓度为 50 mg/L 且不同浊度混合溶液的吸光度曲线; (b) 标准浊度溶液的吸光度曲线;

(c) 混合溶液吸光度减去浊度溶液吸光度的值

Fig. 5 Absorption spectrum of mixed solution. (a) Absorbance curve of mixed solution with COD concentration of 50 mg/L and different turbidity; (b) absorbance curve of standard turbidity solution; (c) absorbance of the mixed solution minus the absorbance of the turbidity solution

分主要在 240~270 nm 处,且吸收峰在 270 nm 附近,说明了混合溶液吸光度曲线并不符合叠加定律。为了描述混合溶液的实际吸光度偏离叠加定律的程度,在叠加定律中加入介于 0 和 1 之间的系数 $K_N(\lambda)$:

$$A(\lambda) = K_N(\lambda)A_{\text{COD}}(\lambda) + A_{\text{tur}}(\lambda), \quad (3)$$

式中, $A(\lambda)$ 、 $A_{\text{COD}}(\lambda)$ 和 $A_{\text{tur}}(\lambda)$ 分别是混合溶液、COD 标准溶液和浊度标准溶液的吸光度。可以通

过(3)式计算出不同波段下的 K_N 值。

如图 6(a) 所示,若混合溶液的吸光度曲线符合叠加定律,那么 K_N 的值随着波长的变化而保持值为 1 不变,而 K_N 的值是随着波长的增大而减小,因而进一步说明了混合溶液吸光度曲线并不符合叠加定律。根据(3)式,可以计算出不同浊度下 K_N 与波长之间的拟合公式,如表 2 所示。

表 2 不同浊度下 $K_N(\lambda)$ 的拟合公式

Table 2 Fitting formula of $K_N(\lambda)$ under different turbidities

Turbidity (NTU)	$K_N(\lambda)$	R_2
10	$y = -0.0003966x^2 + 0.16503x - 15.77201$	0.99363
20	$y = -0.00045692x^2 + 0.19838x - 20.44448$	0.99385
30	$y = -0.00050976x^2 + 0.23691x - 26.59873$	0.99542
40	$y = -0.00056239x^2 + 0.26968x - 31.41166$	0.99611
50	$y = -0.00065806x^2 + 0.32548x - 39.25635$	0.99817

进一步通过 K_N 与波长之间的关系来计算补偿后的吸光度光谱曲线:

$$A_{\text{COD}}(\lambda)' = \frac{A(\lambda) - A_{\text{tur}}(\lambda)}{K_N(\lambda)}, \quad (4)$$

式中, $A_{\text{COD}}(\lambda)'$ 是浊度补偿后的吸光度值, $A(\lambda)$ 是混合光谱的吸光度, $A_{\text{tur}}(\lambda)$ 是标准浊度的吸光度

值。用该方法对不同浊度溶液混合的 COD 的吸收光谱进行了补偿,如图 6(b) 所示。对比图 5(c) 浊度补偿之前的数据,结果显示,在 240~260 nm 范围内,补偿后的光谱吸收曲线与 0NTU 的 COD 溶液的光谱吸收曲线基本一致。因而在实际水样检测过程中,可采用这种模型进行浊度补偿。

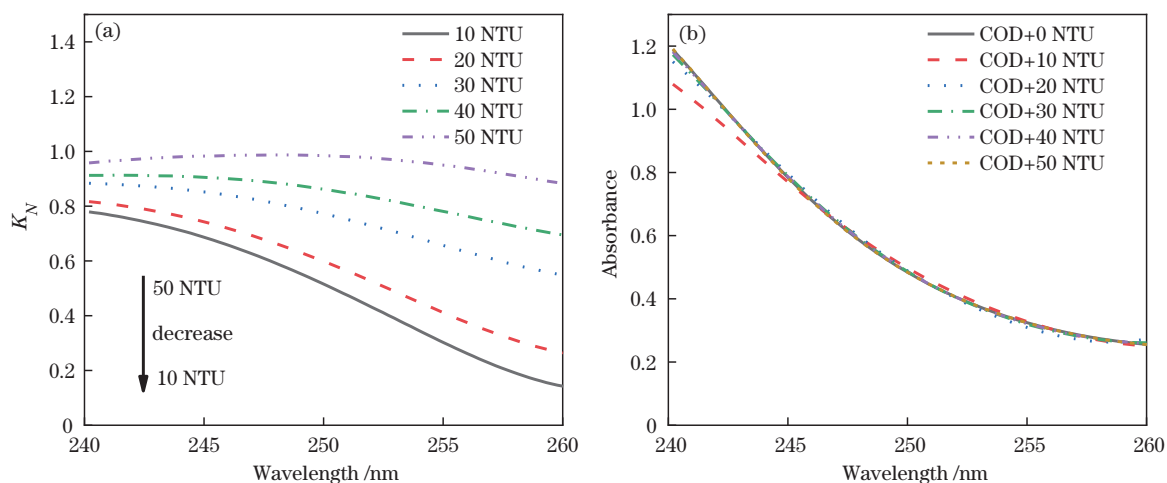


图 6 补偿模型。(a) 不同浊度下 K_N 与波长的关系; (b) 补偿后的吸光度曲线

Fig. 6 Compensation model. (a) Relationship between K_N and wavelength under different turbidity; (b) compensated absorbance curve

4.2 温度对 COD 溶液检测的影响

由于温度的变化会影响溶液对紫外吸收光谱的吸收,因而探究了温度对紫外吸收光谱的影响问题^[14]。选用 50 mg/L 的 COD 标准溶液,改变溶液的温度,温度范围在 14.8 °C~50.1 °C,吸收光谱如图 7 所示。可以看出,随着温度的升高,COD 溶液的透

射光光强数值逐渐降低[图 7(a)],而对应吸光度的值逐渐增大[图 7(b)],但吸光度值的变化幅度并不大。溶液的吸收光谱存在两个特征峰,第一个吸收峰在 227 nm 附近,第二个吸收峰在 278 nm 附近。由于 278 nm 处波峰的光谱曲线没有重叠部分,因而选用 250~295 nm(间隔 5 nm)波长处的吸光度数据

建立一元线性回归模型,建模时以溶液的温度作为横坐标,吸光度值作为纵坐标[图 7(c)]。

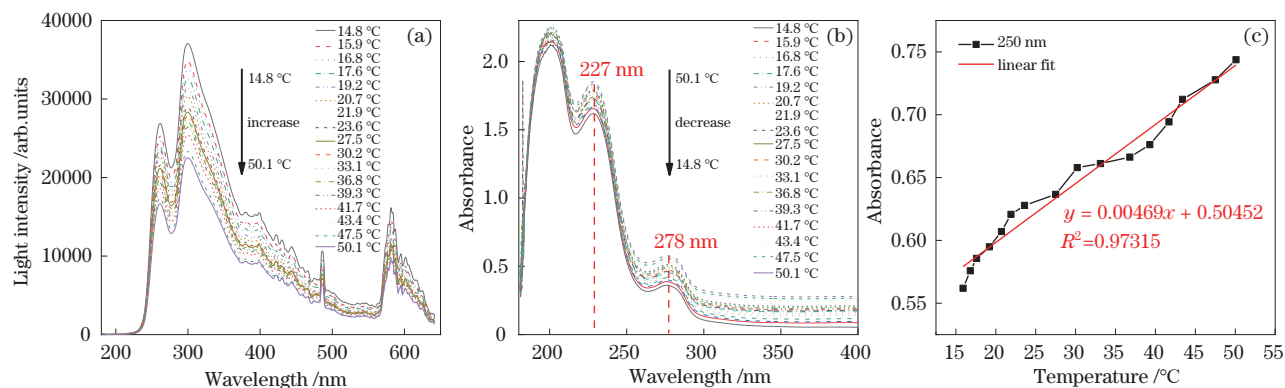


图 7 50 mg/L COD 溶液在不同温度下的吸收光谱。(a) 透射光光强曲线; (b) 吸光度曲线; (c) 250 nm 波长处拟合方程
Fig. 7 Absorption spectra of 50 mg/L COD solution at different temperature. (a) Transmitted light intensity curve; (b) absorbance curve; (c) fitting equation at 250 nm wavelength

经过比较,当波长为 250 nm 的光谱数据进行建模时,回归方程为 $y = 0.00469x + 0.50452$, 相关系数 r 为 0.9865, 决定系数 R_2 为 0.97315, 均方误差 (MSE) 为 0.0008, 此时拟合效果最佳, 为最佳检测

波长^[15], 如表 3 所示。在实际水样检测过程中, 当选定好参考温度时, 可利用此模型校正由于温度的变化而引起吸光度值的偏差。

表 3 不同波长下线性回归方程的统计结果

Table 3 Statistical results of linear regression equation at different wavelengths

Characteristic wavelength /nm	Evaluation index			Characteristic wavelength (nm)	Evaluation index		
	r	R_2	MSE		r	R_2	MSE
250	0.98650	0.97315	0.00008	275	0.98295	0.96619	0.00012
255	0.98640	0.97299	0.00009	280	0.98195	0.96422	0.00012
260	0.98580	0.97172	0.00009	285	0.98036	0.96111	0.00013
265	0.98500	0.97026	0.00010	290	0.97771	0.95591	0.00014
270	0.98430	0.96874	0.00010	295	0.97461	0.94986	0.00016

5 结 论

针对传统水质 COD 检测技术测量周期长、操作复杂和不能进行实时检测等问题, 设计了一种基于紫外-可见光谱的水质 COD 在线检测系统, 以 FPGA 作为主控制器对 AD9226 芯片所采集透射光光强被光电探测器 (PDA25K2) 转换成的电压值, 然后利用电压值与对应 COD 的浓度值来建立浓度-电压的数学模型, 并以光谱仪采集到的光谱数据作为标准, 对所建立模型精度进行了验证。从结果可以看出, 相对于标准值, 所建立的电压解算模型预测值与 220~245 nm 的 PLS 算法模型预测值的相对误差分别在 8.2% 和 6.0% 以内, 所以电压解算模型可作为 COD 溶液浓度的预测模型进行使用。对标准 COD 溶液的干扰实验结果表明, 水体溶液的浊度会对 COD 检测产生干扰, 需要建立模型进行浊

度补偿; 水体的紫外光谱吸收度会随温度升高而增大, 但其变化的幅度并不大, 可以通过确定 COD 溶液的最佳检测波长并建立补偿模型来校正其偏差。与传统 COD 检测方法 (化学、生物等) 相比, 本系统实现了对 COD 的实时、快速检测, 同时考虑到水体中的环境干扰因素 (浊度和温度) 对测量结果的影响, 对所构建的模型进行补偿和校正, 提高了系统的检测精度, 为现场水样的 COD 实时在线检测提供了一种快速、高精度的解决方案。

参 考 文 献

- [1] Li H. Research on application of SN-200Y-5 portable multiparameter water quality fast detector in metallurgical industrial wastewater monitoring[J]. Sichuan Environment, 2020, 39(5): 1-7.
李华. 便携式五合一水质多参数测定仪在冶金废水监测中的应用研究[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 1-7.

- [2] Zhu H T, Zeng F. The recent development for determination of COD[J]. *Industrial Safety and Dust Control*, 2003, 29(7): 17-19.
朱洪涛, 曾芳. 化学需氧量测定方法的研究进展[J]. *工业安全与环保*, 2003, 29(7): 17-19.
- [3] Wei K L, Wen Z Y, Wu X, et al. Research advances in water quality monitoring technology based on UV-vis spectrum analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(4): 1074-1077.
魏康林, 温志渝, 武新, 等. 基于紫外-可见光谱分析的水质监测技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(4): 1074-1077.
- [4] Xiong J F. Research on water quality COD detection technology by ultraviolet-visible spectroscopy[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2017, 45(12): 54-56.
熊金锋. 紫外-可见光谱法水质 COD 检测技术研究: 以大凌河水质检测为例[J]. *黑龙江水利科技*, 2017, 45(12): 54-56.
- [5] Huang L K, Wen Q, Wen Z Y, et al. Micro-ultraviolet spectrometer analysis system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 053003.
黄良坤, 温泉, 温志渝, 等. 微型紫外光谱仪分析系统的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 053003.
- [6] Zhang X S, Liu L X, Zhang L, et al. Nondestructive spectroscopic methodologies of flammable liquids: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(2): 0200002.
章学仕, 刘丽娴, 张乐, 等. 易燃液体无损光谱检测技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(2): 0200002.
- [7] Song J J, Zhao L. Detection method of COD by ultraviolet absorption spectroscopy[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(5): 30-33.
宋建军, 赵凌. 紫外吸收光谱法检测化学需氧量的方法[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(5): 30-33.
- [8] Brito R S, Pinheiro H M, Ferreira F, et al. *In situ* UV-Vis spectroscopy to estimate COD and TSS in wastewater drainage systems[J]. *Urban Water Journal*, 2014, 11(4): 261-273.
- [9] Mrkva M. Evaluation of correlations between absorbance at 254 nm and COD of river waters[J]. *Water Research*, 1983, 17(2): 231-235.
- [10] Tang B, Wei B, Wu D C, et al. Experimental research of turbidity influence on water quality monitoring of COD in UV-visible spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 3020-3024.
汤斌, 魏彪, 吴德操, 等. 一种紫外-可见光谱法检测水质 COD 的浊度影响实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 3020-3024.
- [11] Li X, Sheng Y B, Jiang J G, et al. Wavelength optimization and temperature compensation in COD spectrometry detection[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(6): 690-695.
李鑫, 盛宇博, 姜吉光, 等. COD 光谱法检测中的波长优化及温度补偿实验研究[J]. *光学技术*, 2019, 45(6): 690-695.
- [12] Hu Y T, Wen Y Z, Wang X P. Novel method of turbidity compensation for chemical oxygen demand measurements by using UV-vis spectrometry[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 227: 393-398.
- [13] Ma Y J, Gong Y, Chen M. Target tracking based on normalized cross-correlation matching algorithm and Kalman predictor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181023.
马永杰, 龚影, 陈敏. 基于归一化互相关匹配算法和 Kalman 预测器的目标跟踪[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181023.
- [14] Liu J, Feng P, Wei B, et al. Design of acquisition and transmission system for water COD monitoring based on UV-VIS spectroscopy and wireless sensor networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013002.
刘娟, 冯鹏, 魏彪, 等. 基于 WSN 的紫外-可见光谱水质 COD 监测仪采传系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1): 013002.
- [15] Li X, Su C Z, Yu D Y, et al. Study on the influence of wavelength and low temperature on COD detection by ultraviolet spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(8): 2403-2408.
李鑫, 苏成志, 于丹阳, 等. 紫外光谱法检测 COD 时波长和低温影响的探究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(8): 2403-2408.