

水质光学检测 DIS 实验仪器的 LabVIEW 控制系统的研制

国泽镭 李浩源 邓莉 马彬 景培书

(华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 200241)

摘要 自主研发了一套水质光学检测 DIS 实验仪器控制系统, 实现对含氧量、表面张力系数、折射率、浊度四个水质物理光学参数的动态采集与处理, 从而形成对水质的综合诊断。基于 LabVIEW 编程实现 DIS 实验控制系统数据的采集与分析功能, 具有采集速度快、分析准确、交互性强等特点。该实验操作系统软件已经对 Matlab 模拟的 CCD 实验数据进行采集与分析, 其结果与 Matlab 的模拟理论数据一致, 说明该控制系统已经实现了数据采集、处理、分析功能。该控制系统将控制水质光学综合检测 DIS 实验设备, 实现数据的动态采集与分析, 形成对水质的诊断。

关键词 LabVIEW 控制; 水质检测; DIS 数据采集系统

DESIGN AND DEVELOPMENT OF LABVIEW CONTROL SYSTEM FOR DIS EXPERIMENTAL INSTRUMENT FOR WATER QUALITY OPTICAL DETECTION

GUO Zerong LI Haoyuan DENG Li MA Bin JING Peishu

(East China Normal University, School of Physics and Electronic Science, Shanghai 200241)

Abstract A set of DIS experimental instrument control system for optical detection of water quality is independently developed to realize the dynamic acquisition and processing of four optical parameters of water quality, including oxygen content, surface tension coefficient, refractive index and turbidity, which realizes the comprehensive diagnosis of water quality. The data acquisition and analysis function of DIS experimental control system is based on LabVIEW programming. It has the advantages of fast acquisition speed, accurate analysis and strong interaction. The experimental operating system has analyzed the CCD experimental data simulated by Matlab, and the results are consistent with the simulated theoretical data of Matlab, indicating that the control system has reached the functions of data acquisition, processing and analysis. The control system will manipulate the DIS experimental equipment for optical comprehensive detection of water quality, realize the dynamic collection and analysis of data, and form the diagnosis of water quality.

Key words LabVIEW control; water quality testing; DIS data acquisition system

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2022-01-13

通讯作者: 邓莉, 女, 副教授, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为超快激光与微纳加工, ldeng@phy.ecnu.edu.cn。

引文格式: 国泽镭, 李浩源, 邓莉, 等. 水质光学检测 DIS 实验仪器的 LabVIEW 控制系统的研制[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 101-109.

Cite this article: GUO Z R, LI H Y, DENG L, et al. Design and development of LabVIEW control system for DIS experimental instrument for water quality optical detection[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 101-109. (in Chinese)

水质检测,是检查测定水体中污染物的种类、浓度及变化趋势,评价水质状况的过程,是环境与生态工程的一个重要研究课题。诊断水质状况的检测指标有:色度、浊度、pH 值、电导率、悬浮物、溶解氧等^[1]。采用光学手段检测水质,相比于传统的化学、生物等方法,无二次污染,方便快捷^[2]。我们利用全光学手段,测量水质的含氧量、表面张力系数、折射率、浊度等指标实现水质物理测量。我们利用激光器、CCD、光纤光谱仪即可实现四个水质物理全光学测量,集约化程度高。其中,高分辨率、动态成像的面阵 CCD 替代传统数字传感器^[3,4],提高了光学检测的精度和可视化效果。该研究成果将应用于物理理论与实验教学,对于环境工程、环境生态工程等专业的学生可以提供物理实验训练与专业化培训,物理与环境跨学科融合的实验系统设计,符合“新工科”建设培养复合型创新人才^[5]的理念。

LabVIEW 是一种图形化编程软件,开发效率高,对硬件的支持性好^[6]。因此,我们自主研发水质光学检测数字化信息实验系统(DIS),利用 LabVIEW 实现该实验系统的控制。该控制系统具备集成化、直观性、交互性等特点,可实现数据快速采集、分析、处理,并能实时展示实验现象,揭示实验规律,提高了实验的效率。为了验证该控制系统的的功能,利用 Matlab 模拟实验 CCD 采集数据,用该系统显示动态数据采集与展示、实时分析与处理,检验其实验结果处理的正确性。

1 研究思路

基于 LabVIEW 开发水质光学 DIS 实验仪器控制系统,综合实现数据的采集、分析、显示功能,如(a)所示。用 Matlab 模拟的 CCD 采集数据验证该控制系统的正确性。如图 1(b)所示,先明确实验所需采集数据,根据预设的待测参数值,利用 Matlab 对光强的分布进行模拟;利用 LabVIEW 算法,采集 Matlab 模拟的数据,并对数据进行实时分析和动态输出,进而得到待测参数;将 LabVIEW 得到的待测参数值与预设值进行对比,若利用 LabVIEW 得到的待测参数值与 Matlab 的预设值自洽,说明控制系统具备实时采集、分析和显示数据的功能。

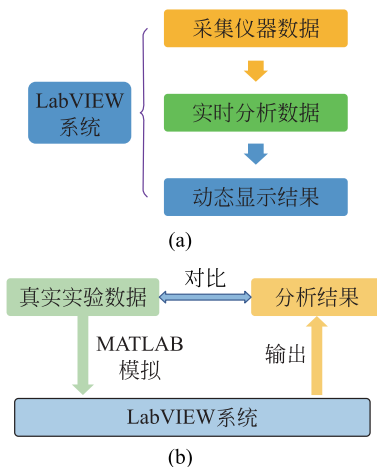


图1 水质光学测量 DIS 实验仪器控制系统计的基本研究思路

(a) LabVIEW 设计的实验控制系统的功能; (b) 验证控制系统的功能

2 物理参数的测量原理

2.1 表面张力系数

表面张力系数可以反映液体黏度、杂质等性质,对于与容器浸润的液体,可以采用插板法测量其表面张力系数。如图 2 所示,浅色部分代表液体,在液体中插入一插板,由于表面张力的作用液面会上升一定高度形成弯曲液面。深色部分表示激光覆盖范围。

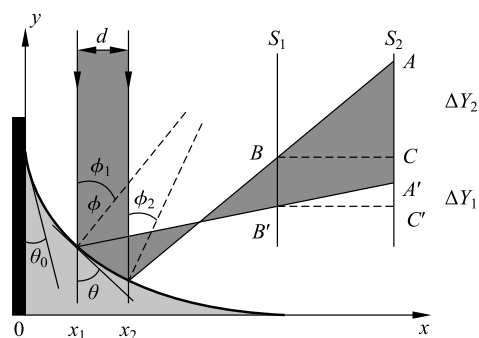


图2 插板法测表面张力系数原理

表面张力系数由如下公式求出^[7]

$$\gamma = \frac{\rho g (x_2 - x_1)^2}{\left[-\ln\left(\tan \frac{\Phi_2}{4}\right) - 2\cos \frac{\Phi_2}{2} + \ln\left(\tan \frac{\Phi_1}{4}\right) + 2\cos \frac{\Phi_1}{2} \right]^2} \quad (1)$$

其中, γ 为表面张力系数, ρ 为液体密度, g 为重力加速度, $d = x_2 - x_1$ 为激光束宽度。

Φ_1 与 Φ_2 满足以下几何关系

$$\Phi_1 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{L}{\Delta Y_1} \right) \quad (2)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{L}{\Delta Y_2} \right) \quad (3)$$

其中, L 为 S_1 与 S_2 两竖直光屏间的距离, ΔY_1 为近板与远板激光范围下边缘坐标之差 $A'C'$, ΔY_2 为近板与远板激光范围上边缘坐标之差 AC 。因此需要在远处放置一光屏测量其在不同距离对应的 Δy_1 与 Δy_2 。水的表面张力计算中, 需要用到液体密度、重力加速度。根据液体密度的定义利用较高测量精度的仪器进行质量与体积的多次测量, 并计算其平均值与不确定度; 重力加速度采用当地的重力加速度值。在测量待测液体前, 通过对标准液体的表面张力测量, 并对结果进行校正, 对相关参数进行必要修正, 以保证表面张力系数测量的准确性。

2.2 折射率

溶液的折射率随溶质含量的变化而变化, 从而可以间接反映水质情况。利用迈克耳孙干涉仪可以测量液体的折射率, 如图 3 所示。用白光进行实验, 在迈克耳孙干涉仪两臂上放置乘溶液的容器和空容器, 得到中央白条纹两旁有数条对称分布的彩色条纹的图样, 若容器乘溶液与不乘溶液两种情况下, 迈克耳孙干涉仪的动臂移动距离 Δx , 则由下式计算液体的折射率^[8]

$$n = \frac{\Delta x}{d} + 1 \quad (4)$$

其中, n 为液体折射率, d 为光透过溶液的厚度。

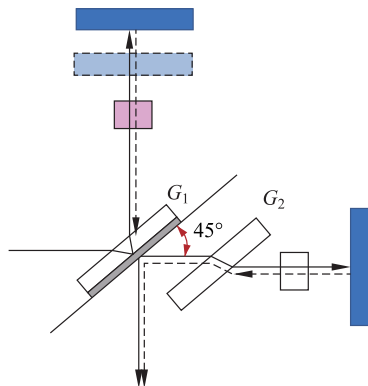


图3 迈克耳孙干涉仪测量液体的实验装置

2.3 浊度

通过测量液体浊度, 可以反映液体中溶质或杂质的浓度。利用朗伯—比尔定律可以实现对待

测液体浊度或吸光度的测量, 如图 4 所示。

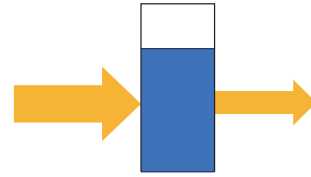


图4 朗伯-比尔定律

根据朗伯—比尔定律, 在单色光和稀溶液的条件下, 吸光度 A 满足如下数学表达式^[9]

$$A = Kbc \quad (5)$$

$$A = \lg \frac{I_0}{I} \quad (6)$$

其中, K 为常数, b 为吸收层厚度, c 为溶液的浓度, I_0 为入射光强度, I 为透射光强度。当吸收层厚度不变时, 吸光度与溶液的浓度呈线性关系。

若用浊度 T 表达以上关系^[10]

$$I = I_0 e^{-CbT} \quad (7)$$

其中, C 为常数。可推得浊度 T 的表达式

$$T = \frac{1}{Cb} \ln \frac{I_0}{I} \quad (8)$$

2.4 含氧量

溶解氧反映液体中溶解氧气的多少, 可作为水质自净能力的判断依据。依据斯特恩—沃尔默公式, 采用荧光淬灭法测量溶液中溶解氧的浓度。

实验装置如图 5 所示^[11], 入射光通过光纤进入含有荧光物质的溶液, 产生激发荧光, 荧光物质在氧气作用下发生猝灭现象。出射光经过分光光纤谱仪, 并由计算机分析。根据斯特恩—沃尔默公式可以计算出液体含氧量^[11]

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + Kc \quad (9)$$

其中, I_0 和 τ_0 分别是无氧气的荧光光强和荧光分子寿命, I 和 τ 分别是有氧气情况下的荧光光强和荧光分子寿命, K 为常数, 由特定的荧光物质性质

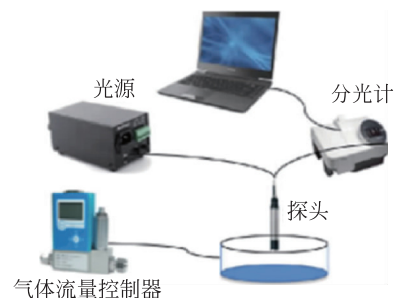


图5 含氧量实验装置

决定, c 为氧气浓度。

3 LabVIEW 控制的实现

3.1 界面的创建

使用选项卡控件构建界面的框架, 共有“表面张力”“折射率”“浊度”“含氧量”四个选项, 在每个选项下放置相应控件并合理布局, 实现了四个水质物理参数测量的人机交互界面, 如图 6 所示。便于用户从四个方面综合评价水质。

插板法测表面张力系数	迈克耳孙干涉仪测折射率
朗伯-比尔定律测浊度	斯特恩-沃尔默公式测含氧量

图 6 四个物理参数的测量选项

3.2 水质物理参量测量的实现

3.2.1 表面张力系数

表面张力测量界面如图 7(a)所示。主要包括如下 4 个部分:

(1) 光强显示部分: 由于平移台精度为 0.001mm , 每经过 0.001mm 读取中间行光强的最大值, 输入波形图表, 对波形图表 x 轴设置 0.001 倍缩放系数, 则 x 轴以 mm 作为单位。程序框图如图 7(b)所示。

(2) 平移台控制部分: 根据平移台要求, 输入指令控制平移台。

(3) 读取数据部分: 对测试数据求最大值, 计算第一次大于 $1/2$ 最大值的位置“上 1”和最后一个大于 $1/2$ 最大值的位置“下 1”。“上 2”“下 2”同理。由上下之差可计算半高宽。程序通过属性、历史数据、While 循环、数组最大值最小值等功能实现, 如图 7(c)所示。

(4) 计算结果部分: 用户输入图中的液体密度, 重力加速度、激光宽度、两次测量间距, 通过 LabVIEW 代入式(1)计算表面张力系数, 并显示结果。

LabVIEW 将采集的数据输入光强显示部分, 动态显示图形。此方法的优点是数据显示直观, 演示效果好; 缺点是采集并显示每个新数据时需要时间, 虽然很短, 但积累起来会带来一定误差。

3.2.2 折射率

折射率测量界面如图 8(a)所示。主要包括以下 4 个部分:

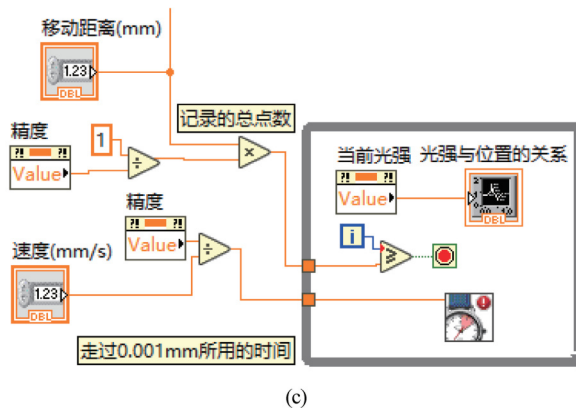
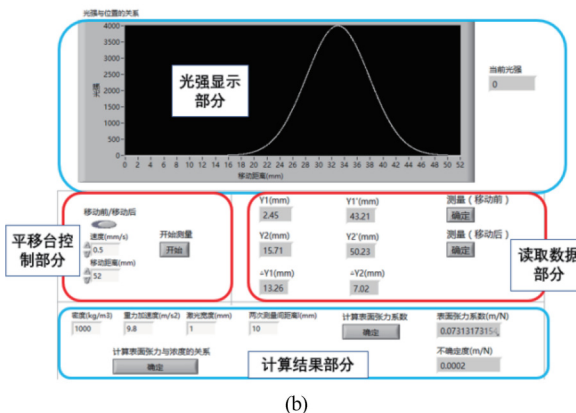
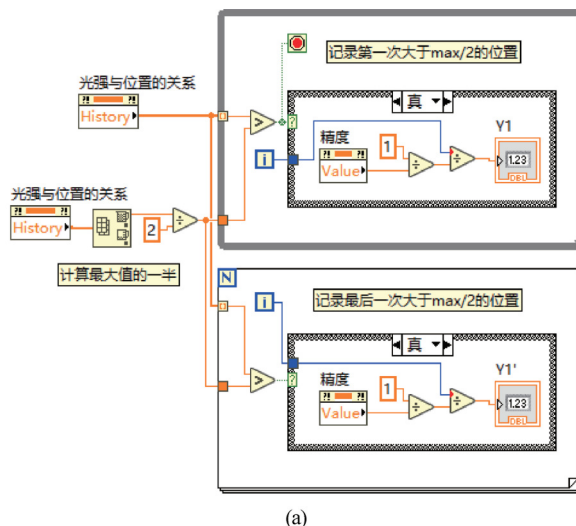


图 7 表面张力系数测量的 LabVIEW 实现

(a) 表面张力系数前面板; (b) 光强显示部分程序框图;

(c) 读取数据部分程序框图

(1) 观察图样部分: 左上角的图像显示框实时显示随着迈克耳孙动臂移动干涉图样的变化。

(2) 数据处理部分: 包括有控制平移台操作的部分和计算结果部分。容器内不放溶液时, 用白光作为光源, 寻找彩色条纹图样。将动臂置于中央位置, 选择“移动距离初始化”; 加入溶液后,

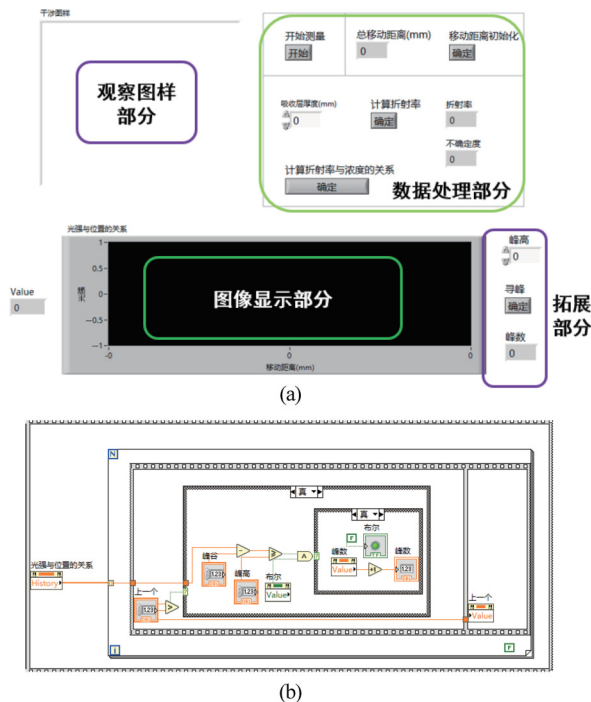


图8 折射率测量的 LabVIEW 实现
(a) 前面板; (b) “寻峰”功能程序框图

设置速度和距离,再寻找彩色条纹图样,调整于屏幕中央,程序可以自动计算总位移。输入玻璃片厚度后,由式(4)计算折射率。

(3) 图像显示部分:下方的图像可显示光强与位置的关系,代码与表面张力系数该部分相同。

(4) 拓展部分:“寻峰”功能,可计算超过“设定峰值”的干涉峰的数量,部分程序框图如图 8(b)所示。

3.2.3 浊度

浊度测量界面如图 9 所示。主要包括以下 2 个部分:

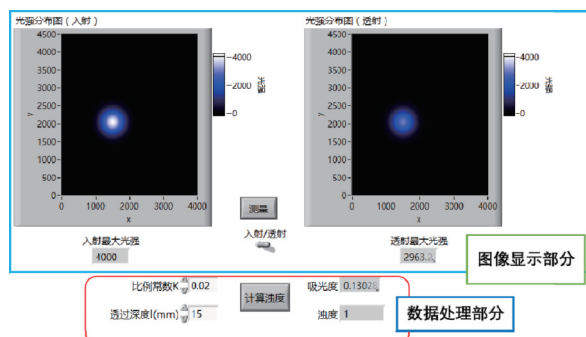


图9 浊度测量的 LabVIEW 实现

(1) 图像显示部分:通过两个强度图控件直观显示了入射与透射光的光强分布,并分别计算

其最大值。程序框图内,直接将读取的数组与强度值联系,即可在强度图上显示图样,使用“数组的最大值与最小值”函数可得到其最大值。

(2) 数据处理部分:输入比例系数 K、吸收层厚度 b,根据入射、出射最大光强,通过 LabVIEW 代入公式(6)、式(8)可以计算出吸光度和浊度的值。

3.2.4 含氧量

界面如图 10(a)所示。主要包括以下 2 个部分:

(1) 光谱显示部分:读取光纤光谱仪的数据,直接输入 XY 图即可得到。

(2) 数据处理部分:本例中这部分界面主要用于对 Matlab 模拟数据的处理,实际使用时,会转化为多组不同含氧量液体测量的对比。每组测量只需分别对无氧气和有氧气的光谱进行测定,并分别读出最大光强,再根据已知的 K 值,即可由式(9)计算出含氧量。如图 10(b)所示。

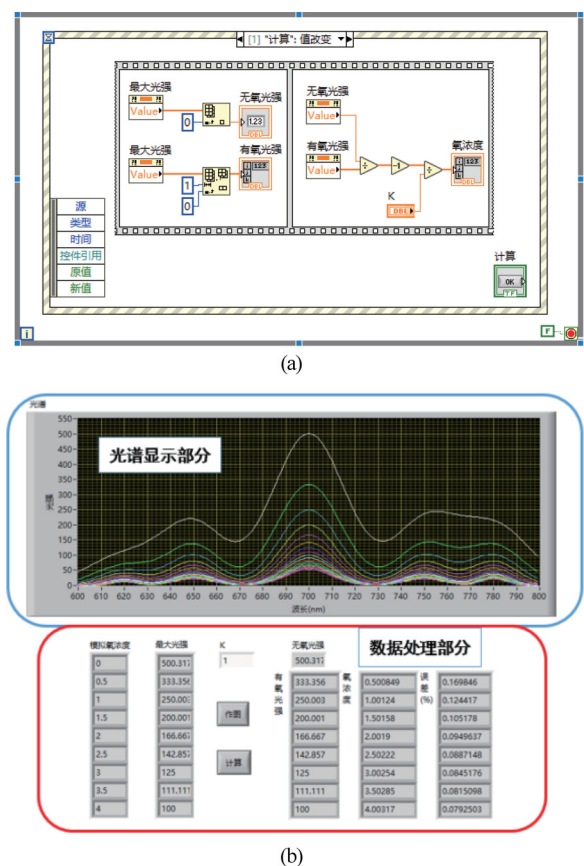


图10 氧量测量的 LabVIEW 实现
(a) 前面板; (b) 数据处理部分程序框图

3.3 对不同条件下的测量结果绘图

3.3.1 程序编写

以表格和图像显示溶液表面张力系数、折射

率、吸光度随溶液浓度的变化,含氧量随温度的变化。浓度或温度为自变量 X ,溶液表面张力系数、折射率、吸光度、或含氧量为因变量 Y 。

作图流程图如图 11(a)所示,输入不同实验条件下的 X 与 Y 。利用创建数组功能,使本次输入的输入次数和 X 、 Y 参量形成一维数组。利用 While 循环、移位寄存器、创建数组等功能使不同条件下的上述一维数组形成二维数组。利用表格控件,显示该二维数组。索引二维数组的 X 列与 Y 列,利用 XY 图控件,这两列数据以图像形式呈现。

利用事件结构,用户点击“确定输入”按钮,二维数组中新增本次实验的参数,并输入表格和图像;点击“删除上一组数据”,使用删除数组元素功能删除上一次输入的参数,再重新输入表格和图像;若用户停止输入新参数,可点击“停止并初始化”按钮,各个输入与显示控件初始化为默认值。程序框图如图 11(b)所示,前面板如图 11(c)所示。

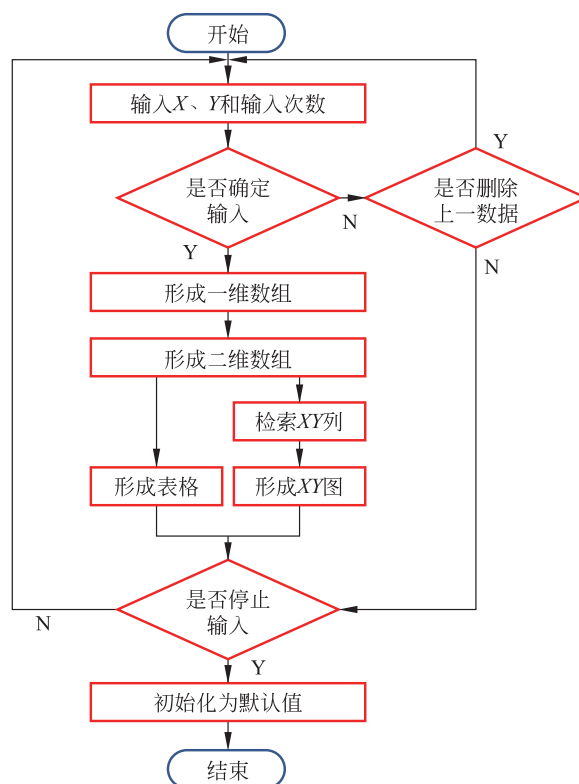
关于浊度,控制界面除了显示吸光度随溶液浓度的变化外,还在图像控件中显示不同的溶液浓度与其吸光度线性拟合结果,以比对实际测得的曲线与线性拟合得到的曲线,进而验证了朗伯-比尔定律。

3.3.2 功能验证

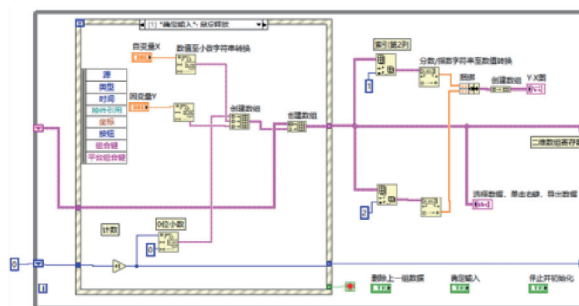
为验证该功能的可用性,将相关实验的文献数据输入表格进行处理。图 12(a)、图 12(b)、图 12(c)分别显示了蔗糖、NaCl 溶液、酒精在不同质量分数($C\%$)下的表面张力系数(单位: $N/m \times 10^{-3}$)。图 12(a)输入了不同浓度百分比的 NaCl 溶液的折射率,二者有线性关系^[12]。图 12(b)输入了我们通过荧光淬灭法测量的不同氧浓度下的荧光光强,用于演示斯特恩-沃尔默公式。图 12(c)输入了蔗糖溶液的表面张力系数与浓度关系,二者亦近似为线性关系^[13]。图 12(d)输入了硫酸铜溶液的吸光度与浓度的关系,从而验证朗伯-比尔定律^[14]。图中红点为数据点,白线为线性拟合的直线,表格最后一列为各物理量测量值与线性拟合值的百分差。

3.4 利用 Matlab 模拟数据进行验证

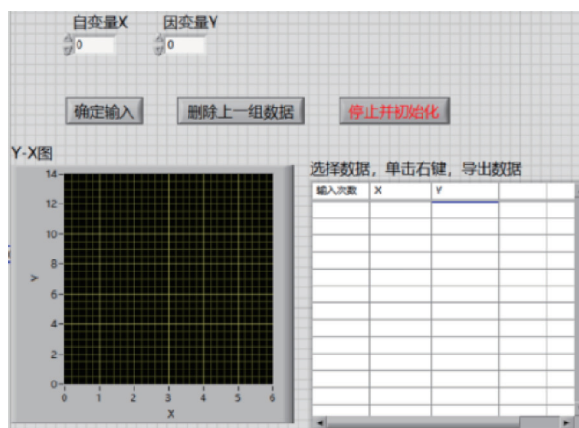
以下通过 Matlab 模拟数据对表面张力、浊度、含氧量三部分的数据处理功能进行验证控制系统的功能。



(a)



(b)



(c)

图 11 程序图

(a) 流程图; (b) 程序框图; (c) 前面板

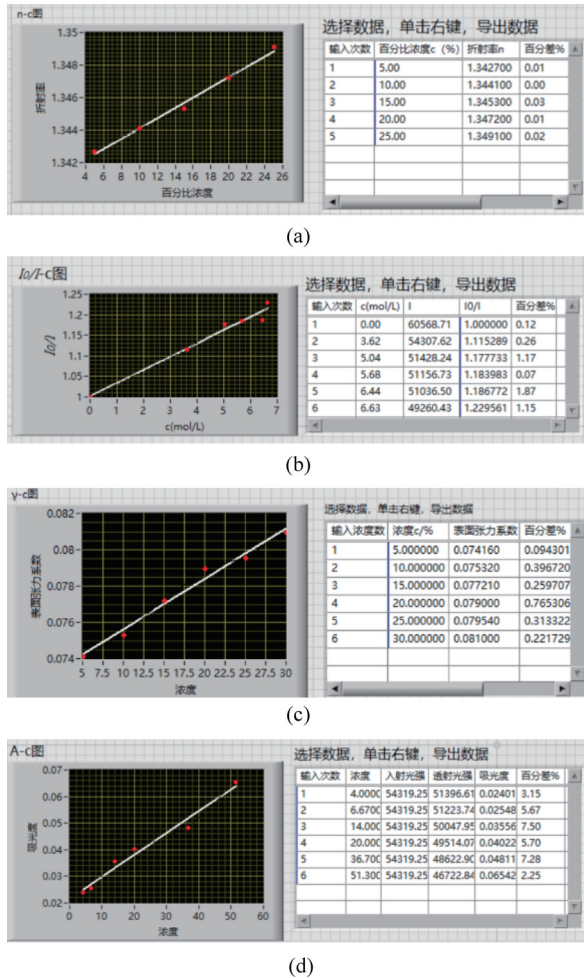


图 12 不同浓度下的水质参数

(a) NaCl 溶液折射率随浓度的变化；(b) 荧光光强随氧浓度的变化；(c) 蔗糖溶液表面张力系数随浓度的变化；(d) 硫酸铜溶液吸光度随浓度的变化

3.4.1 LabVIEW 采集 Matlab 的数据

将 Matlab 模拟的数据输出到 Excel 表格中。使用创建报表、处置报表以及 Excel Get Data. vi 将 Excel 表格中的数据以二维数组的形式输出，如图 13 所示。

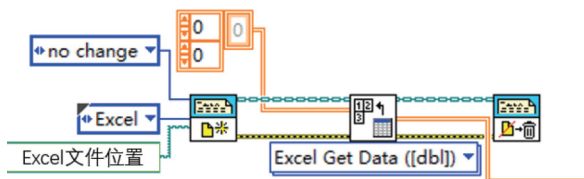


图 13 LabVIEW 采集 Matlab 的数据

3.4.2 表面张力系数

假设样品为纯水，其表面张力系数为 0.0725m/N ，再假设图 2 中 S_1 与 S_2 屏上接收到

的为高斯型光强分布。用 Matlab 根据真实文献数据模拟 CCD 上像素点的光强。所模拟的 CCD 的名称为 USB 3.1 相机，型号为 MC124CG-SY-UB。模拟的数据的形式是 4112×3008 的矩阵，矩阵中每个点的值代表这个像素点的相对光强。如下图 14 所示。上方两灰线为 Matlab 模拟的高斯型光强分布，下方图为 LabVIEW 得到的光强分布。

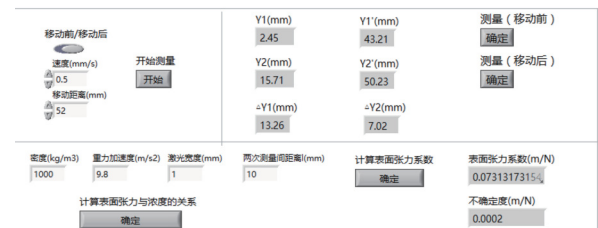
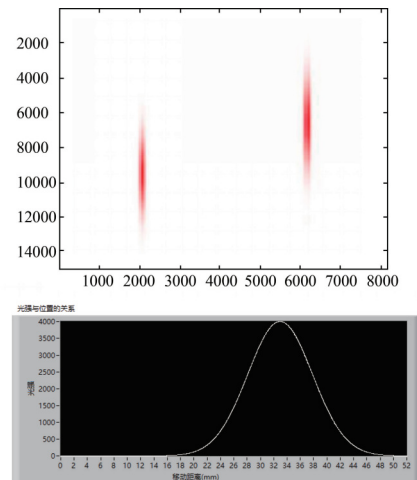


图 14 表面张力系数控制系统功能验证

程序计算表面张力系数得到的结果为 0.07313m/N ，仅存在 0.6% 的误差。可见，此部分的 Matlab 模拟的数据与 LabVIEW 采集、分析、显示的数据是相互自洽的。

3.4.3 浊度

模拟的数据的形式与表面张力相同，也是 4112×3008 的矩阵。

按照国家自来水标准，设浊度为 1NTU ，用 Matlab 模拟，用 LabVIEW 采集处理，如下图 15 所示。上方两图为 Matlab 模拟的光强分布，下方两图为 LabVIEW 得到的光强分布。得到的结果为 1NTU ，与预设相符。可见该计算机处理过程不会产生额外误差。

3.4.4 含氧量

Matlab 模拟了含氧量按 $0.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升的

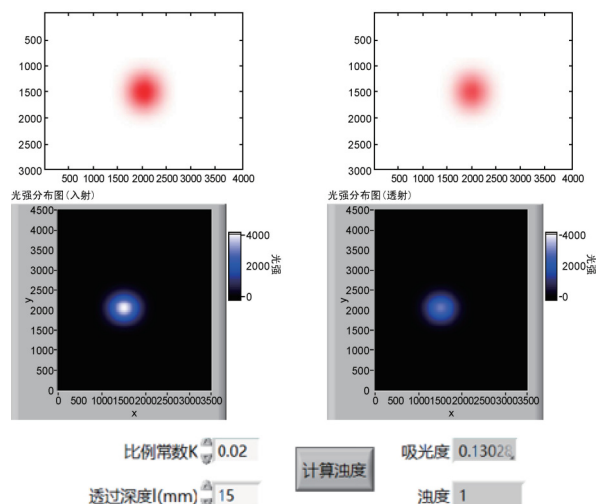


图 15 浊度控制系统功能验证

一系列光纤光谱仪得到的光强随波长的变化,用 LabVIEW 采集处理。如图 16 所示,上方图为 Matlab 模拟的光强随波长的变化,下方图为 LabVIEW 得到的光强随波长的变化。得到各个模拟含氧量曲线的最大光强,进而计算含氧量的测量结果,也是按 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 递增。由计算结果可知,误差均不超过 0.2%,可验证软件的可靠性。

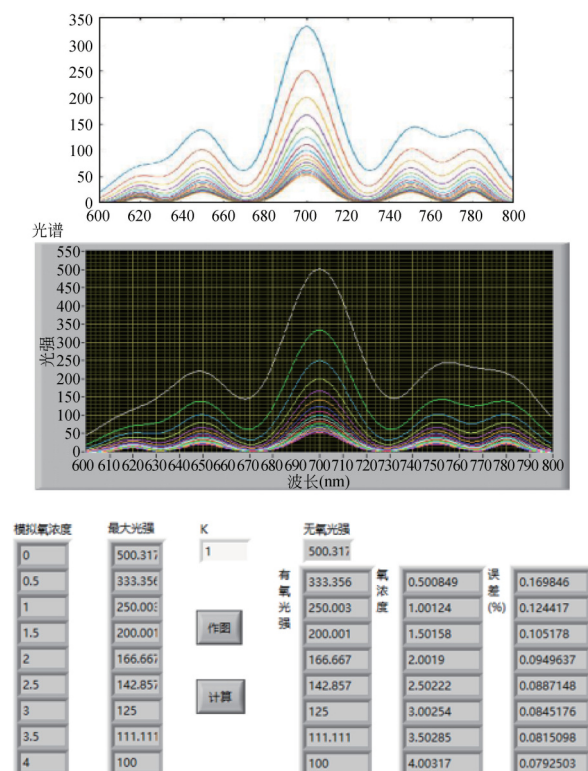


图 16 含氧量控制系统功能验证

4 结语

基于 LabVIEW 编程,我们自主开发了水质光学检测 DIS 实验仪器的控制系统,实现实验数据实时采集、动态展示、综合分析等功能,具备数据采集快且交互性强的优点。该控制系统通过对 Matlab 模拟的 CCD 实验数据的处理分析,验证了其实时采集、分析、显示的功能。Matlab 预设的参数与 LabVIEW 采集分析后得出的结果自洽,说明控制系统的功能可以实现。下一步,水质光学检测 DIS 实验仪器将应用于实验系统的控制,通过 LabVIEW 控制 CCD、光纤光谱仪、电动平移台等仪器,采集、分析实验获得数据,形成集动态演示、精确测量、快速分析于一体的水质光学检测 DIS 实验仪器。

参 考 文 献

- [1] 刘伟天,宁斌.水质监测对环境保护的价值探究[J].科技风,2019(26):153-153.
LIU W T, NING B Research on the value of water quality monitoring to environmental protection [J]. Science and technology wind, 2019(26):153-153. (in Chinese)
- [2] 赵贤德,董大明,高振,等.便携式多参数光学水质检测仪设计[J].仪表技术与传感器,2020(1):53-57.
ZHAO X D, DONG D M, GAO Z, et al. Design of portable multi parameter optical water quality detector [J]. Instrument technology and sensors, 2020(1):53-57. (in Chinese)
- [3] 李静.微纳 CT 面阵 CCD 探测器数据采集与传输系统研制[D].重庆大学,2018.
- [4] 张国军,郭振海,章振海.基于 LABVIEW 的 CCD 道路运动成像系统[J].计算机系统应用,2011,20(6):34-37.
ZHANG G J, GUO Z H, ZHANG Z H. CCD road motion imaging system based on LabVIEW [J]. Computer system application, 2011, 20(6):34-37. (in Chinese)
- [5] 张师平,吴平,闫丹,等.将 LED 光谱测量引入大学物理实验[J].物理与工程,2021,31(1):104-108.
ZHANG S P, WU P, YAN D, et al. Led spectrum measurement is introduced into college physics experiment [J]. Physics and Engineering, 2021, 31(1): 104-108. (in Chinese)
- [6] 程丽平.基于 LabVIEW 的虚拟实验教学系统开发[J].中国科技信息,2012(20):84-85.
CHENG L P Development of virtual experiment teaching system based on LabVIEW [J]. China Science and technology information, 2012(20):84-85. (in Chinese)
- [7] 庄其仁,龚冬梅,陶海敏,等.液体表面张力激光快速测量法[J].光学精密工程,2007(5):662-667.
ZHUANG Q R, GONG D M, TAO H M, et al. Rapid measurement of liquid surface tension by laser [J]. Optical

- precision engineering, 2007(5): 662-667. (in Chinese)
- [8] 雷春雨, 李金环, 刘华. 利用迈克耳孙干涉仪检测薄膜玻璃厚度一致性[J]. 物理实验, 2017, 37(11): 21-25.
LEI C Y, LI J H, LIU H. The thickness consistency of thin film glass is measured by Michelson interferometer[J]. Physical experiment, 2017, 37 (11): 21-25. (in Chinese)
- [9] 辛伍红. 朗伯-比尔定律的适用条件与限制[J]. 化工时刊, 2020, 34(7): 49-51.
XIN W H Applicable conditions and limitations of Lambert Beer law[J]. Journal of chemical engineering, 2020, 34(7): 49-51. (in Chinese)
- [10] 张恺, 张玉钧, 殷高方, 等. 综合散射法与透射法测量水浊度的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 06(2): 100-105.
ZHANG K, ZHANG Y J, YIN G F, et al. Study on measuring water turbidity by comprehensive scattering method and transmission method[J]. Journal of atmospheric and Environmental Optics, 2011, 06 (2): 100-105. (in Chinese)
- [11] 张彪, 吴朋军, 郑华丹, 等. 基于荧光淬灭原理的光纤氧传感器的实验研究[J]. 应用光学, 2019, 40(4): 704-709.
ZHANG B, WU P J, ZHENG H D, et al. Experimental study on optical fiber oxygen sensor based on fluorescence quenching principle[J]. Applied optics, 2019, 40(4): 704-709. (in Chinese)
- [12] 张志伟, 尹卫峰, 温廷敦, 等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 281-285.
ZHANG Z W, YIN W F, WEN T D, et al. Theoretical and experimental study on the relationship between solution concentration and refractive index[J]. Journal of Zhongbei University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2009, 30(3): 281-285. (in Chinese)
- [13] 刘竹琴, 冯红侠. 几种液体表面张力系数与其浓度关系的实验研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2008(2): 34-36.
LIU Z Q, MA H J. Experimental study on the relationship between surface tension coefficient and concentration of several liquids[J]. Journal of Yan'an University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2008 (2): 34-36. (in Chinese)
- [14] 朱达. 朗伯比尔定律在硫酸铜溶液浓度中的应用[J]. 考试周刊, 2017(A5): 178.
ZHU D. Application of Lambert Beer's law in the concentration of copper sulfate solution[J]. Examination weekly, 2017 (A5): 178. (in Chinese)
- [15] 周科卫, 邓莉, 忻静, 等. 水质物理参量测量 DIS 演示虚拟仿真实验[J]. 物理实验, 2020, 40(9): 37-43.
ZHOU K W, DENG L, XIN J, et al. Dis demonstration virtual simulation experiment of water quality physical parameter measurement[J]. Physical experiment, 2020, 40(9): 37-43. (in Chinese)

(上接第 100 页)

- [4] 李明达, 袁哲诚, 罗锻斌. 一种非线性动力学系统混沌现象的深入研究[J]. 大学物理, 2020, 39(1): 33-37+60.
LI M D, YUAN Z C, LUO D B. In-depth study of chaos in a nonlinear dynamical system[J]. College Physics, 2020, 39(1): 33-37+60. (in Chinese)
- [5] 卢元元, 薛丽萍. 蔡氏电路实验研究[J]. 电气电子教学学报, 2003(3): 67-69+87.
LU Y Y, XUE L P. Experimental study on Chua's circuit[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2003(3): 67-69+87. (in Chinese)
- [6] 程敏熙, 曾碧芬, 刘惠娜, 等. 周期性外力驱动的混沌摆[J]. 物理实验, 2009, 28(1): 7-13.
CHENG M X, ZENG B F, LIU H N, et al. Chaotic pendulum driven by periodic external force[J]. Physics Experimentation, 2009, 28(1): 7-13. (in Chinese)
- [7] 朱桂萍, 王健. 混沌摆系统的动力学分析和数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2008(3): 27-30+34.
ZHU G P, WANG J. Analysis and simulation of dynamic properties of the chaotic pendulum[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2008(3): 27-30+34. (in Chinese)
- [8] 韩晓茹, 傅筱莹, 彭可鑫, 等. 基于 PASCO 系统的混沌摆实验[J]. 物理实验, 2011, 31(11): 5-9.
HAN X R, FU X Y, PENG K X, et al. Chaotic pendulum experiment based on PASCO system[J]. Physics Experimentation, 2011, 31(11): 5-9. (in Chinese)
- [9] 李明达, 董乔南, 杨亚利, 等. 利用非线性动力学系统研究混沌现象[J]. 物理与工程, 2019, 29(6): 77-84+88.
LI M D, DONG Q N, YANG Y L, et al. Study of chaos with nonlinear dynamical system[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(6): 77-84+88. (in Chinese)
- [10] 王烁皓, 王廷振, 张培正, 等. 一种简易的自组混沌摆装置[J/OL]. 物理与工程, 2022: 1-8.
WANG S H, WANG T Z, ZHANG P Z, et al. A simple self-organizing chaotic pendulum[J/OL]. Physics and Engineering, 2022: 1-8. (in Chinese)
- [11] 刘雨龙, 俞晓明. 非磁性旋转导体盘阻尼效应的定量研究[J]. 大学物理, 2016, 35(12): 30-33.
LIU Y L, YU X M. Quantitative study of dampening effect on the nonmagnetic revolving metal plate[J]. College Physics, 2016, 35(12): 30-33. (in Chinese)