

基于 LabVIEW 和浊度传感器的扩散系数测量装置的研发与应用

县 涛 邸丽景 孙小锋 孙晨洋 李佳悦

(青海师范大学物理与电子信息工程学院, 青海 西宁 810016)

摘 要 近年来,大学物理实验教学内容和模式的改革成为各高校实验工作者研究的焦点。特别的,利用虚拟仿真技术和单片机技术设计的具有实验效率高、测试项目广和操作简单等特点的实验设备得到广大师生的关注。本文研发出一种基于 LabVIEW 虚拟仿真平台和浊度传感器的新型扩散系数测量装置,该装置具有结构简单、操作方便和成本低廉的优点,为物质扩散系数的测量开辟了一条新途径。以牛奶在水中的扩散为例,测试了牛奶的扩散系数,并对实验结果进行了详细的误差分析,得到牛奶在室温下的扩散系数测量值为 $D = (8.28 \pm 0.06) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

关键词 扩散系数;浊度传感器;LabVIEW

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DIFFUSION COEFFICIENT MEASUREMENT DEVICE BASED ON LABVIEW AND TURBIDITY SENSOR

XIAN Tao DI Lijing SUN Xiaofeng SUN Chenyang LI Jiayue

(College of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008)

Abstract Recently, the innovation of the teaching content and mode for university physics experiment has been considered to be the focus of the investigation. Particularly, employing virtual simulation technology and single-chip microcomputer technology designed experimental equipment with high experimental efficiency, wide measurement range and simple operation characteristics has been attracted a great deal of attentions. In this paper, a new diffusion coefficient measurement device based on the LabVIEW and turbidity sensor is developed, which has the advantages of simple structure, convenient operation and low cost. This device provided a novel route for the measurement of material diffusion coefficient. Milk was selected as a target sample, and its diffusion coefficient in water was measured based on this device. The error analysis of the result was performed, and the diffusion coefficient of milk at room temperature was obtained to be $(8.28 \pm 0.06) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ in the present work.

Key words diffusion coefficient; turbidity sensor; LabVIEW

收稿日期: 2021-04-28; 修回日期: 2022-04-20

基金项目: 2020 高等学校教学研究项目(DJZW202012xb);青海师范大学校级教学研究项目(qhnujy2021116)。

作者简介: 县涛,男,副教授,主要从事光催化和虚拟仿真技术研究,研究方向为虚拟仿真技术,xiantao1984@126.com。

通讯作者: 邸丽景,女,副教授,主要从事大学物理实验研究,研究方向为虚拟仿真技术,dlj0308@sina.com。

引文格式: 县涛,邸丽景,孙小锋,等. 基于 LabVIEW 和浊度传感器的扩散系数测量装置的研发与应用[J]. 物理与工程,2023,33(1):120-127.

Cite this article: XIAN T, DI L J, SUN X F, et al. Development and application of diffusion coefficient measurement device based on LabVIEW and turbidity sensor[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 120-127. (in Chinese)

大学物理实验课程是教育部独立设置的六门主要基础课程之一,教育部对大学物理实验课程教学改革要求指出,要逐步利用数字化与计算机技术推动教学内容的改革、加快综合实验的开发、培养学生分析问题和解决问题的能力,进一步拓展学生的创新型思维、要充分发挥多元化教学模式,利用包括网络技术和虚拟仿真技术等在内的现代教育技术推动教学模式和方法改革^[1-4]。然而,目前大多数本科院校开设的大学物理实验主要以基础性实验为主,综合设计性实验较少。随着大学物理实验教学不断改革,教学技术逐步改进,虚拟实验仪器的设计、现有仪器的改进和新实验设备的开发成为当下研究的焦点。

近年来,广大高校实验教学人员主要开展了虚拟仪器的开发和现有仪器改进这两方面的研究。一方面利用 LabVIEW, MATLAB, Flash 和 Unity 3D 等软件进行虚拟仿真实验的设计,例如:基于 LabVIEW 的大学物理实验教学系统^[5]、基于 Matlab 的激光脉宽测量实验^[6]和基于 Unity3D 的光栅自成像虚拟仿真实验^[7]。另一方面,针对牛顿环实验的改进、拉伸法测杨氏模量设备的改进和毛细管法测流体黏度实验装置的设计与改进等成果相继被报道^[8-10]。然而,对于新实验设备的开发还很少涉及。

物质分子从高浓度区域向低浓度区域转移直到均匀分布的现象称为扩散现象。广泛出现在生物化工、煤炭生产和环境污染控制等领域^[11]。扩散系数是分子扩散与分子浓度梯度之间的比例常数,它是影响扩散现象的一个重要因素^[12]。因此,准确测量扩散系数对于扩散现象的研究至关重要。目前,实验室主要采用毛细管成像法和激光干涉法等传统方法实现扩散系数的测量^[13,14]。其中用毛细管成像法是采用透明毛细管作为液相扩散池,通过其独特的折射率空间分辨测量性能,可以直接观察和记录扩散介质在毛细管中的移动规律。基于此完成了对丙三醇和纯水间的扩散过程的研究^[13]。然而,这些测量方法存在步骤繁杂、取样量大和取样间隔不均匀等缺点。为了弥补以上不足,本文基于 LabVIEW 开发平台和浊度传感器设计并研发出一套扩散系数测量装置,该装置具有响应时间短、易于操作和自动化程度高等特点。并以室温下牛奶在水中的扩散为例,利用该实验装置对牛奶的扩散系数进行测量。

1 设计原理

1.1 理论分析

已知物质的扩散遵循菲克第二定律^[13]

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} = D \frac{d^2 C(x, y, z, t)}{dx^2 dy^2 dz^2} \quad (1)$$

其中, $C(x, y, z, t)$ 为 t 时刻待测溶液在空间 $R(x, y, z)$ 处的浓度, D 表示扩散系数。

$$C(x, y, z) = \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_1 - C_2}{2} \operatorname{erf} \frac{x, y, z}{2\sqrt{Dt}} \quad (2)$$

其中, C_1 和 C_2 分别为溶液在 (x, y, z) 处扩散前后的浓度。误差函数为

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-t^2) dt \quad (3)$$

对式(2)中 $\operatorname{erf}(u)$ 求反函数得 $\operatorname{erfinv}(u)$, 即

$$\operatorname{erfinv} \frac{C(x, y, z) - \frac{C_1 + C_2}{2}}{\frac{C_1 - C_2}{2}} = \frac{(x, y, z)}{2\sqrt{Dt}} \quad (4)$$

对式(4)两边取平方化简得到扩散系数与物质浓度之间的关系式为

$$4Dt = \frac{(x, y, z)^2}{\operatorname{erfinv}^2 \frac{C(x, y, z) - \frac{C_1 + C_2}{2}}{\frac{C_1 - C_2}{2}}} \quad (5)$$

众所周知,物质浓度对其物性影响较为明显,导致物质的浓度与浊度往往会在较大范围内呈现出非线性关系。然而,在一定范围内物质的浓度与浊度会表现出线性关系^[15]。因此,假设某溶度浓度 $C(x, y, z)$ 在某范围内与溶度浊度($T_{\text{浊度}}$)之间的关系为

$$C(x, y, z, t) = f[T_{\text{浊度}}(x, y, z)] = kx + b \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得到

$$4Dt = \frac{(x, y, z)^2}{\operatorname{erfinv}^2 \frac{f[T_{\text{浊度}}(x, y, z)] - \frac{C_1 + C_2}{2}}{\frac{C_1 - C_2}{2}}} \quad (7)$$

取^[13] $C_1=1$ 和 $C_2=0$,得

$$4Dt = \frac{R^2}{\operatorname{erfinv}^2\{f[T_{\text{浊度}}(x,y,z)] - 0.5\} \times 2} \tag{8}$$

对式(8)化简得到浊度与扩散系数的关系式为

$$D = \frac{R^2}{4t \times \operatorname{erfinv}^2\{f[T_{\text{浊度}}(x,y,z)] - 0.5\} \times 2} \tag{9}$$

本实验以 25℃ 条件下纯牛奶(标准号:GB 25190)在水中的扩散为例,测试一定浓度范围内牛奶的扩散系数。由理论分析式(6)可知,要求解牛奶在水中的扩散系数,必须要建立牛奶浓度与其浊度的关系式。为了获得此关系,本实验组分别配置了不同浓度的牛奶溶液,测定其浓度与浊度之间的关系(标准曲线)。分别配置体积浓度为 0%,2%,4%,6%,⋯,18%和 20%的牛奶溶液 100mL,将浊度传感器置于其中,测定与浓度对应的浊度值,如表 1 所示。

以牛奶的浓度为横坐标,浊度平均值为纵坐标作图(图 1)。由图 1 可知,当牛奶浓度处于 2%~8%之间时,浓度与浊度呈现出正比例关系。然而,当牛奶浓度大于 8%时,浓度与浊度之间出现非线性关系。可见实验结果与理论部分分析相一致。因此,选择在 2%~8%区间内进一步细化牛奶浓度梯度,并测量其浊度。实验数据如表 2 所示。同样获得浊度与牛奶浓度的关系图,如图 2

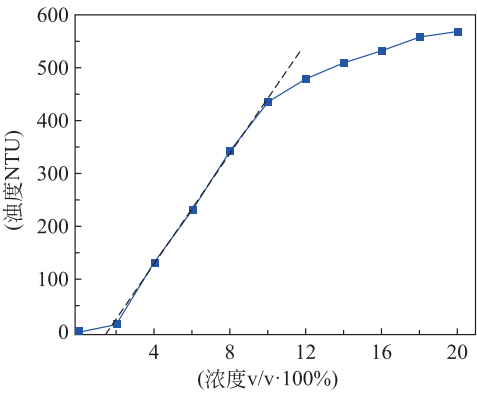


图 1 牛奶浓度与其浊度的关系图

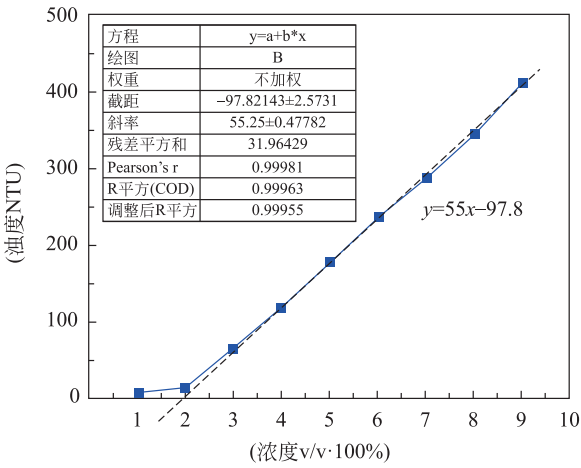


图 2 细化后牛奶浓度与其浊度的关系图

所示。
对图 2 中牛奶浓度为 2%~8%区间内的数据

表 1 牛奶浊度与浓度的关系

浓度	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	纯牛奶
实验次数												
第一次浊度测试	0	14	138	233	342	454	489	514	525	566	577	698
第二次浊度测试	0	16	128	237	340	433	481	511	539	560	560	696
第三次浊度测试	0	16	130	229	348	420	470	505	533	549	572	699
平均值	0	15.3	132.0	233.0	343.3	435.6	480	510	532.3	558.3	569.7	697.7

表 2 牛奶浊度与浓度的关系

浓度	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%
实验次数									
第一次浊度测试	11	16	61	125	181	243	297	339	410
第二次浊度测试	8	17	70	111	178	240	275	349	415
第三次浊度测试	7	14	65	128	173	228	289	345	409
平均值	8.6	15.7	65.3	121.3	177.3	237	287	344.3	411.3

进行拟合,绘制标准曲线获得

$$y = 55x - 97.8 \quad (2 < x < 8) \quad (10)$$

其中 y 为牛奶浊度, x 为其浓度可得

$$T_{\text{浊度}} = 55C - 97.8 \quad (2 < x < 8) \quad (11)$$

对式(11)求解反函数

$$C = \frac{1}{55} T_{\text{浊度}} + 1.8 \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)得到牛奶扩散系数与其浊度的关系式

$$D = \frac{(\sqrt{2}r)^2}{16t \times \left(\frac{1}{55} T_{\text{浊度}} + 1.3 \right)^2} \quad (13)$$

其中 r 为水槽半径: $R = \sqrt{2}r$, t 为扩散时间。

化简得

$$D = \frac{3025r^2}{8t \times (T_{\text{浊度}} + 71.5)^2} \quad (14)$$

1.2 仪器设计方案

由理论推导可知,物质的扩散系数与其在溶液中的浊度平方成反比例关系。因此,要获知物质的扩散系数可通过测量其在溶液中的浊度来实现。根据上述分析,本实验组设计出一套基于浊度传感器和 LabVIEW 开发平台的扩散系数测量装置,设计示意图如图 3 所示。本装置由浊度传感器(12 个)、数据采集器、水槽和上位机系统等组成。12 个浊度传感器分布于仪器支架上。数据采集模块处于支架顶端,高出水槽一定的距离。本实验是在一个直径为 20cm 的水槽中进行。12 个浊度传感器中 A,B 和 C 三个传感器距样品注入口距离最小且相等,可视安装在同一圆周上,称之为第一测量梯度,同理 D,E 和 F 浊度传感器称之为第二测量梯度,G,H 和 I 浊度传感器称之为第三测量梯度,J,K 和 M 浊度传感器称之为第四测量梯度。每个梯度的测量值是三个浊度传感器获得数据的平均值。当待测溶液滴入样品注入口后,

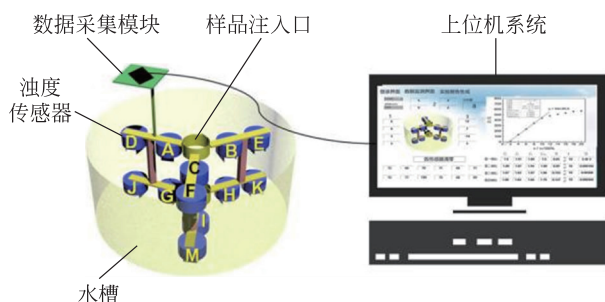


图 3 扩散系数测量装置设计示意图

上位机开始采集数据并计时,此过程中可观察物质的扩散现象,同时四个测量梯度采集到的浊度数据实时传输给上位机系统。一定时间后数据趋于稳定,此时读取实验相关数据并计算实验结果。

2 装置的实现

本实验装置(见图 4)所需硬件包括:数据采集器、浊度传感器、水槽和支架等。所需软件包含 C 语言编写的下位机操控程序和利用 LabVIEW 平台设计的上位机系统。

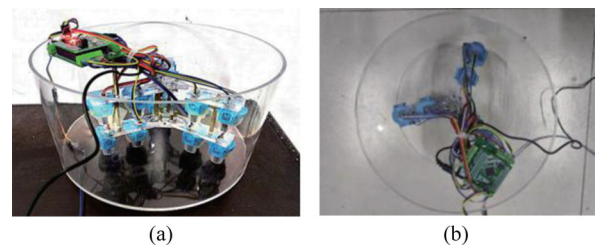


图 4 (a)和(b)实验装置的主视和俯视照片

2.1 数据采集模块

本模块利用 STM32F10X 型开发板进行设计(见图 5),开发板由供电模块、数据采集模块和 12 个浊度传感器接线端组成,通信协议为串口通信。图 5(a)和图 5(b)为 STM32F10X 型开发板的电路图和结构示意图。由图可知,开发板具有充足的端口,能够满足本系统的研发。图 5(c)和图 5(d)是本文设计的数据采集模块电路图和电路板结构图。图 5(e)为数据采集模块实物照片。

利用 C 语言编写数据采集模块的操控程序。为使程序结构简单、任务明确、易于编写、调试和修改,本系统采用模块化程序设计。具体包含以下几个功能模块:初始化模块、传感器检测模块、AD 转换模块、数据发送/接收模块和串口通信模块等。

2.2 浊度传感器

浊度传感器是利用光学原理,测试溶液的透光率和散射率,综合判断溶液的浊度。由于浊度值是渐变量,通常在动态环境下对其进行检测。该传感器采集的数据经由外接控制进行 AD 转换,换算得到相应环境下的浊度值。本装置所用浊度传感器(见图 6)的型号为 TSW-30,该传感器具有响应时间短($< 500\text{ms}$),测试范围广($0 \sim 1000\text{NTU}$)和适应环境性强(工作温度: $-30 \sim 80^\circ\text{C}$)等特点。

2.3 上位机系统开发

本文利用 LabVIEW 开发平台设计出实验装

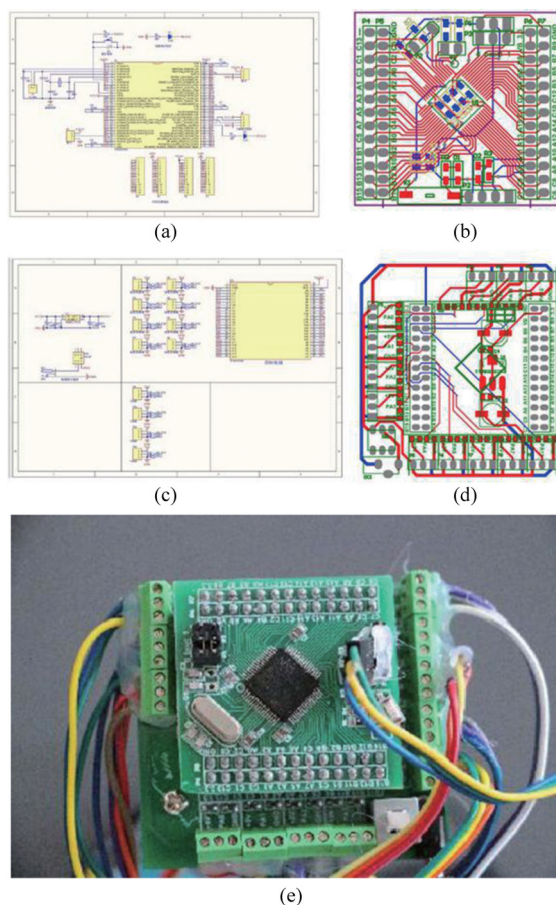


图5 STM32F10X型数据采集模块电路图和结构示意图(a)~(d)以及实物图(e)



图6 TSW-30型浊度传感器的实物照片

置的上位机系统。本系统由三部分组成:登录界面(图7(a))、数据监测界面(图7(b))和实验报告界面(图7(c))。图7(d)是本系统的程序运行图。登录界面主要是提醒用户在实验开始前输入个人信息,一方面记录使用者的信息,另一方面为生成实验报告做准备。数据监测界面主要完成浊度值显示、数据调零、平均值计算、时间记录和数据转

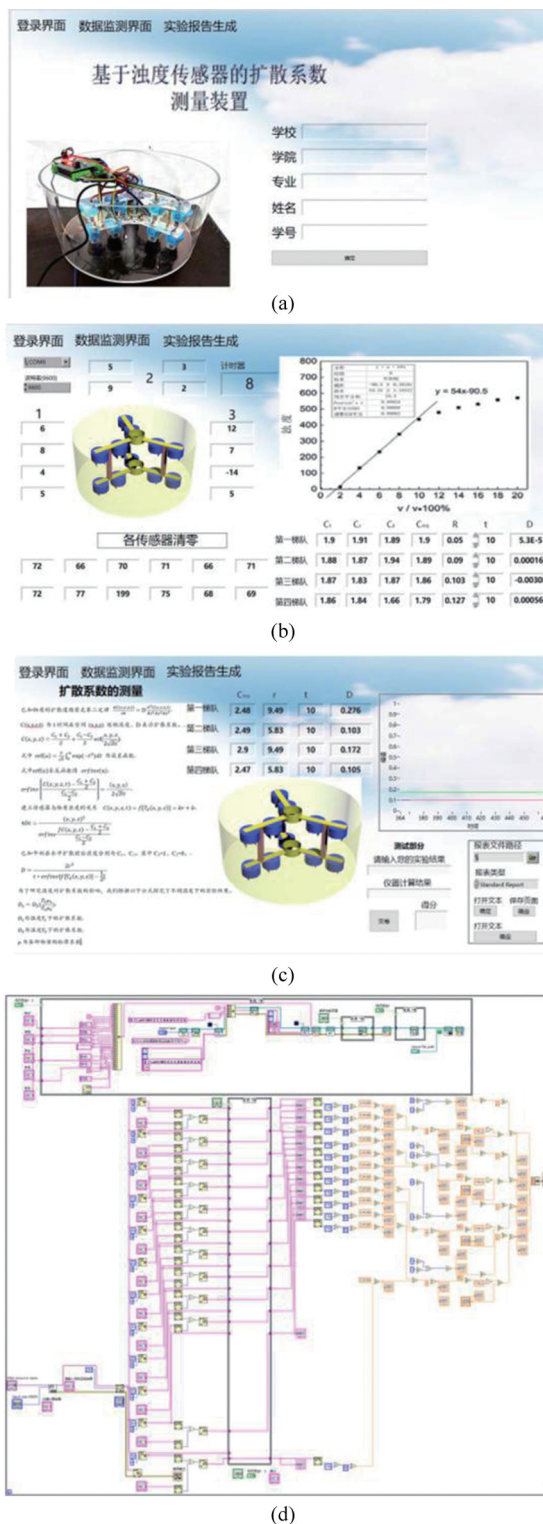


图7 上位机界面

(a) 上位机系统登录界面; (b) 数据监测界面;
(c) 实验报告界面; (d) 程序运行图

换处理等功能。实验报告界面主要显示所涉及公式、实验参数和实验结果,兼具学生成绩输出和实验报告生成功能。

3 实验步骤与数据处理

(1) 向水槽中注入 2.35L 蒸馏水(此时液面已没过顶层传感器),将实验装置与电脑建立连接,打开仪器电源,启动上位机系统,预热 10 分钟。

(2) 待预热结束,在上位机系统中调零。

(3) 向装置的样品注入口加入 150mL 的纯牛奶(在蒸馏水中扩散均匀后,其牛奶浓度处于标准曲线区间内),同时上位机启动时间计时器。

(4) 观察牛奶在水中的扩散现象,当计时器达到 3600 秒时上位机自动停止采集数据,在数据监测界面上读取浊度数据。

表 3 不同梯度下的浊度测量值

次数 \ 浊度	第一梯度	第二梯度	第三梯度	第四梯度	平均值
1	289	246	311	297	285.8
2	270	254	320	299	285.8
3	267	244	315	301	281.8
4	267	247	316	299	282.3
5	274	256	323	296	287.3
6	269	252	311	289	280.3
7	276	254	317	292	284.8
8	265	254	326	293	284.5
9	270	249	322	298	284.8
10	268	255	319	301	285.8
11	273	253	327	299	288.0

(5) 将测量浊度数据代入扩散系数化简公式(14)得到牛奶的扩散系数 D。

$$\bar{D} = \frac{3025\bar{r}^2}{8\bar{t} \times (\bar{T}_{\text{浊度}} + 71.5)^2} = 8.28 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \quad (15)$$

(6) 对系统误差和测量结果进行不确定度分析。

(7) 将实验结果输入上位机实验报告界面,提交实验结果,系统会自动将输入的实验结果与上位机计算结果进行对比,点击报告生成按钮获得实验报告。

(8) 实验结束退出上位机系统,断开仪器电源和数据连接线,将测试仪器从水槽中取出,倒出水槽中的溶液,将仪器和水槽清洗干净。

表 4 实验数据

次数 \ 待测量	1	2	3	4	5	6
浊度	285.8	285.8	281.8	282.3	287.3	280.3
r/mm	100.1	100.2	100.1	99.9	100.2	99.8
t/s	3600	3600	3600	3600	3600	3600

次数 \ 待测量	7	8	9	10	11	平均值
浊度	284.8	284.5	284.8	285.8	288.0	284.7
r/mm	100.0	100.1	99.8	100.0	100.1	100.0
t/s	3600	3600	3600	3600	3600	3600

4 不确定度分析

4.1 仪器示值误差不确定度分析

4.1.1 数学模型

建立示值误差数学模型如下^[16]

$$\Delta = \frac{\bar{T}_m - T_s}{T_s} \times 100\% \quad (16)$$

其中, Δ 为示值误差, $\bar{T}_m$ 为浊度标准溶液测量平均值, T_s 为配置的标准溶液标称值。

4.1.2 影响不确定的来源与计算结果

1) 测量重复性实验引入的标准不确定度

表 5 浊度为 100 NTU 的 Formazine

标准溶液(未稀释)测量数据

次数 \ 待测量	1	2	3	4	5	6
浊度	98	98	98	99	99	97

次数 \ 待测量	7	8	9	10	平均值
浊度	98	98	98	97	98.0

浊度算数平均值的标准偏差为

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.2 \text{ NTU} \quad (17)$$

连续测量 3 次算数平均值为测量结果,则

$$U(T_{m1}) = \frac{S(\bar{x})}{\sqrt{3}} = 0.1 \text{ NTU} \quad (18)$$

2) 仪器分辨率引入的标准不确定度

本仪器分辨率为 1NTU,所引起的极限误差为 0.5NTU,服从均匀分布,包含因子 $k=\sqrt{3}$,则

$$U(\bar{T}_{m2}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.3NTU \quad (19)$$

3) $U(\bar{T}_m)$ 的不确定度为

$$U(\bar{T}_m) = \sqrt{U(\bar{T}_{m1})^2 + U(\bar{T}_{m2})^2} = 0.1UTN \quad (20)$$

4) $U(T_s)$ 的不确定度为

从 Formazine 标准溶液证书可知, 扩展不确定度为 3%, $k=2$, 有

$$U(T_s) = \frac{100 \times 3\%}{2} = 1.5NTU \quad (21)$$

4.1.3 灵敏系数

$$\Delta = \frac{\bar{T}_m - T_s}{T_s} \times 100\% \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{\Delta}{\bar{T}_m} = \frac{1}{T_s} = 0.01NTU^{-1} \quad (23)$$

$$C_2 = \frac{\Delta}{T_s} = -\frac{\bar{T}_m}{T_s^2} \approx -0.01NTU^{-1} \quad (24)$$

4.1.4 以上各输入量彼此独立, 互不影响, 所以仪器的示值误差测量结果不确定度

$$U_c(\Delta) = \sqrt{C_1^2 U(\bar{T}_m)^2 + C_2^2 U(T_s)^2} \approx 1.5\% \quad (25)$$

4.1.5 在大学物理实验中, 根据我国规定通常取置信概率 $P=0.95$, $k=2$, 则扩展不确定度

$$U_{rel} = k \cdot U_c(\Delta) \approx 3\% \quad (26)$$

4.2 对扩散系数测量结果不确定度分析

4.2.1 A 类标准不确定度^[17]

$$U_A = t_p s(\bar{x}) = t_p \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

本实验测量次数 $n=11$, 查表可知 $P=0.683$ 时, $t_p \approx 1$, 在大多数多数物理实验中, 一般取 $t_p=1$, 则

$$U_A(\bar{x}) \approx \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

有

$$U_A(r) \approx \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \approx 0.04\text{mm} \quad (29)$$

$$U_A(T_{\text{浊度}}) \approx \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \approx 0.7NTU \quad (30)$$

$$U_A(t) \approx \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0s \quad (31)$$

4.2.2 B 类标准不确定度^[18]

取置信概率 $P=0.683$, 本实验仪器误差服从均匀分布, c 为 $\sqrt{3}$, 则 B 类不确定度为

$$U_B(r) = \frac{\Delta_r}{\sqrt{3}} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \approx 0.3\text{mm} \quad (32)$$

$$U_B(t) = \frac{\Delta_t}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.6s \quad (33)$$

由式(25)可知 $\Delta_{T_{\text{浊度}}} = 0.03NTU$

$$U_B(T_{\text{浊度}}) = \frac{\Delta_{T_{\text{浊度}}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.03}{\sqrt{3}} \approx 0.02NTU \quad (34)$$

4.2.3 各待测量的合成标准不确定度

$$U(r) = \sqrt{U_A(r)^2 + U_B(r)^2} \approx 0.3\text{mm} \quad (35)$$

$$U(t) = \sqrt{U_A(t)^2 + U_B(t)^2} \approx 0.6s \quad (36)$$

$$U(T_{\text{浊度}}) = \sqrt{U_A(T_{\text{浊度}})^2 + U_B(T_{\text{浊度}})^2} \approx 0.7NTU \quad (37)$$

4.2.4 扩散系数的相对不确定度分析

对式(13)两边取对数并偏微分得

$$\ln \bar{D} = \ln \frac{3025r^2}{8\bar{t} \times (\bar{T}_{\text{浊度}} + 71.5)^2}$$

$$\ln \bar{D} = \ln(3025r^2) - \ln 8\bar{t} - \ln(\bar{T}_{\text{浊度}} + 71.5)^2 \quad (38)$$

$$\frac{\ln \bar{D}}{\bar{r}} = \frac{2}{\bar{r}} \quad (39)$$

$$\frac{\ln \bar{D}}{\bar{t}} = \frac{1}{\bar{t}} \quad (40)$$

$$\frac{\ln \bar{D}}{\bar{T}_{\text{浊度}}} = \frac{2}{\bar{T}_{\text{浊度}} + 71.5} \quad (41)$$

则相对不确定度为

$$\frac{U_{\bar{D}}}{\bar{D}} = \sqrt{\left(\frac{\ln \bar{D}}{\ln \bar{r}} U_r\right)^2 + \left(\frac{\ln \bar{D}}{\bar{t}} U_t\right)^2 + \left(\frac{\ln \bar{D}}{\bar{T}_{\text{浊度}}} U_{T_{\text{浊度}}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2}{\bar{r}} U_r\right)^2 + \left(\frac{1}{\bar{t}} U_t\right)^2 + \left(\frac{2}{\bar{T}_{\text{浊度}} + 71.5} U_{T_{\text{浊度}}}\right)^2}$$

$$= 0.7\% \quad (42)$$

4.2.5 扩散系数的测量结果不确定度为

$$U_D = \bar{D} \times 0.7\% = 0.06 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s} \quad (43)$$

4.3 牛奶扩散系数测量结果为

$$D = \bar{D} \pm U_D = (8.28 \pm 0.06) \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s} \quad (44)$$

5 结语

本文首先通过理论分析与推导,发现物质的扩散系数与其在溶液中的浊度平方成反比例关系,并推导出一定浓度范围内(2%~8%)具体物质(牛奶)的扩散系数与其浊度的关系式。基于理论分析,设计并研发出一套基于浊度传感器和LabVIEW仿真平台的扩散系数测量装置。以牛奶在水中的扩散为例,进行数据测量,并开展了结果的不确定度分析,最终获得牛奶在室温下扩散系数的测量值为 $D=(8.28\pm0.06)\times10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$ 。本扩散系数测量装置具有结构简单、操作方便和成本低廉的特点,为物质扩散系数的测量提供了一种新的方法和设备。

参 考 文 献

- [1] 彭川来. 民办高校大学物理实验模块式教学改革与探索——以闽南理工学院为例[J]. 大学物理实验, 2018, 31(3): 112-114.
PENG C L. The reform and exploration of modular teaching in physics experiment of private university[J]. Physical Experiment of College, 2018, 31(3): 112-114. (in Chinese)
- [2] 李薇, 刘海涛, 袁昊劼. 高等数学翻转课堂教学模式的设计与实践[J]. 高教学刊, 2021, (8): 109-112.
LI W, LIU H T, YANG H J. Design and practice of flipped classroom teaching mode in advanced mathematics[J]. Journal of Higher Education, 2021, (8): 109-112. (in Chinese)
- [3] 罗劲明, 罗裕霞, 邓定南, 等. 激发兴趣为导向的工科专业理论课程教学改革探讨[J]. 大学教育, 2021, (3): 100-102.
LUO J M, LUO Y X, DENG D N, et al. Discussion on the reform of the theory course teaching of engineering specialty based on arousing interest[J]. University Education, 2021, (3): 100-102. (in Chinese)
- [4] 郑雪丽, 李巧梅, 汪涛, 等. 关于密立根油滴实验数据处理的新探讨[J]. 大学物理, 2021, 40(2): 32-35.
ZHENG X L, LI Q M, WANG T, et al. New discussion on data processing of Millikan oil droplet experiment[J]. College Physics, 2021, 40(2): 32-35. (in Chinese)
- [5] 孙小锋, 县伟, 何晓明. 基于LabVIEW的大学物理实验教学系统[J]. 物理实验, 2020, 40(6): 48-52.
SUN X F, XIAN W, HE X M. College physics experiment teaching system based on LabVIEW[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(6): 48-52. (in Chinese)
- [6] 张刚, 焦志勇, 黄小灿, 等. 基于Matlab的激光脉宽测量实验[J]. 物理实验, 2016, 36(10): 1-4.
ZHANG G, JIAO Z Y, HUANG X C, et al. Measuring the envelope width of Q-switched laser pulse based on Matlab[J]. Physics Experimentation, 2016, 36(10): 1-4. (in Chinese)
- [7] 徐芊歆, 唐芳. 基于Unity3D的光栅自成像虚拟仿真实验[J]. 物理实验, 2020, 40(6): 53-56.
XU Q X, TANG F. Virtual simulation experiment system of grating self-imaging based on Unity3D[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(6): 53-56. (in Chinese)
- [8] 朱晓梅, 向伟铭, 姜向东. 牛顿环实验的数据处理改进及图像分析[J]. 物理与工程, 2019, 29(3): 55-58.
ZHU X M, XIANG W M, JIANG X D. Data processing's improvement and image analysis of newton ring experiment[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(3): 55-58. (in Chinese)
- [9] 王一有, 马凤翔. 单缝衍射法测量玻璃板的杨氏模量[J]. 物理实验, 2016, 36(7): 36-38.
WANG Y Y, MA F X. Electrical property of vanadium oxides films prepared by reactive RF sputtering[J]. Physics Experimentation, 2016, 36(7): 36-38. (in Chinese)
- [10] 唐笑年, 诸挥明, 唐笑迪. 毛细管法测流体黏度实验装置的设计与改进[J]. 大学物理实验, 2018, 31(6): 25-27.
TANG X N, ZHU H M, TANG X D. Design and Improvement of experimental facility using capillary method to measure fluid viscosity[J]. Physical Experiment of College, 2018, 31(6): 25-27. (in Chinese)
- [11] VIGNES A. Diffusion in binary solutions. Variation of diffusion coefficient with composition[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1966, 5(2): 189-199.
- [12] SHAFIKHANI M, CHIDIAC S E. A holistic model for cement paste and concrete chloride diffusion coefficient[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 133: 106049.
- [13] 李强, 普小云. 用毛细管成像法测量液相扩散系数等折射率薄层测量方法[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094206.
LI Q, PU X Y. Measuring the diffusion coefficient of liquids by capillary imaging method: Equivalent refractive index method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094206. (in Chinese)
- [14] 马友光, 段志青, 朱春英, 等. 激光实时全息干涉法测量甘氨酸水溶液扩散系数[J]. 应用激光, 2004, (2): 99-101.
- [15] 董亮, 朱磊, 何鹏. 光纤牛奶浓度传感器的设计与仿真[J]. 农机化研究, 2010, 32(4): 136-138.
- [16] 李红莉. CMM尺寸测量不确定度模型与评定方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [17] 陈凌峰. 标准不确定度A类评定中极差法的深入讨论[J]. 计量学报, 2019, 40(2): 347-352.
CHEN L F. The further discussion of the range method in the type A evaluation of standard uncertainty[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(2): 347-352. (in Chinese)
- [18] 滕文盛, 程亚杰, 滕颖, 等. 质量法液体流量标准装置测量不确定度评定[J]. 工业计量, 2013, 23(4): 64-65.
TENG W S, CHENG Y J, TENG Y, et al. Uncertainty evaluation of liquid flow standard device for static mass method[J]. Industrial Measurement, 2013, 23(4): 64-65. (in Chinese)