

文章编号 1004-924X(2015)11-3026-07

利用实时光学图像特征提取法测量液相扩散系数

杨瑞芬, 翟 影, 孙丽存, 孟伟东, 普小云*

(云南大学 物理科学技术学院, 云南 昆明 650091)

摘要:介绍了一种利用非对称液芯柱透镜结合实时光学图像特征提取方法测量液相扩散系数(D)的方法。该方法基于图像采集系统的软件开发工具包对采集系统进行二次开发,并用自编应用软件对图像中特定区域进行亮度及宽度的特征提取。然后,依据图像特征自动寻找出实验所选液体折射率薄层清晰成像点的位置并记录该位置随时间的变化关系。最后,根据 Fick 第二定律计算出液相扩散系数。采用这种方法,实验研究了室温(25 °C)条件下乙二醇在纯水中的扩散过程,测得其扩散系数 $D=1.164\times 10^{-5}$ cm²/s,与文献报导值的相对误差为 0.34%。与直接观察测量法相比较,此方法实现了测量的自动化,避免了人为主观判断误差,具有测量快速、准确,计算耗时短,实验测量结果稳定的特点。

关键词:图像特征提取;亮度及宽度;液相扩散系数;自动测量

中图分类号:TQ021.4;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3026

Measurement of liquid diffusion coefficient by extracting and analyzing features of diffusion images

YANG Rui-fen, ZHAI Ying, SUN Li-cun, MENG Wei-dong, PU Xiao-yun*

(School of Physical Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, China)

* Corresponding author, E-mail: xypu@163.com

Abstract: A measuring method for liquid diffusion coefficients(D) was proposed by an asymmetric liquid-core cylindrical lens combined with a feature extracting method of optical images in real time automatically. Based on the Software Development Kit provided by a CMOS camera used, the application codes were programmed to extract and analyze the features of the brightness and width of a diffusion image. On the image features, the focal position corresponding to a specific liquid layer with a certain refractive index was found out, and the curve of focal positions varied with diffusion time was recorded automatically. Finally, the diffusion coefficient was calculated by using Fick's second law on the acquired experimental data. With the proposed method, the diffusion process of ethylene glycol with pure water was researched at the room temperature (25 °C) and the measured diffusion coefficient (D) is 1.164×10^{-5} cm²/s, the relative error is only 0.34% that of the literature value. As compared with traditional direction observation method, the obtained results demonstrate that the method avoids the error caused by reading focal position with human eye, implements measurement automation and is characterized by higher measuring speeds and accuracy, shorter computing time and stable measuring results.

收稿日期:2015-07-05;修订日期:2015-08-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11164033, No. 61465014);云南省应用基础研究基金资助项目(No. 2011FA006);云南省高校科技创新团队支持计划资助项目

Key words: extraction of image feature; brightness and width; liquid diffusion coefficient; automatic measurement

1 引言

扩散系数是研究传质过程、计算传质速率及化工设计中的重要参数。随着新型替代燃料、生物化工、环境污染控制以及同位素分离等行业的发展,关于扩散系数的理论计算和实验研究变得越来越重要^[1]。由于液体分子的平均间距远比气体分子小,又不及固体那样有规则排列,所以液相扩散系数的理论描述远比气体及固体困难,不同体系的液相扩散数据相当缺乏^[2-3]。目前,液相扩散系数主要由实验方法获得,通过间接地测量溶液在扩散过程形成的浓度随空间和时间的分布,根据描述扩散过程的 Fick 定律计算得到液相扩散系数^[4]。测量液相扩散系数的一种新方法是采用液芯柱透镜的等折射率薄层成像法^[5]。该方法通过控制图像采集设备定时采集扩散图像,再从扩散图像中人工提取并分析图像特征。不过,图像特征提取受人为主观因素影响,而且计时、采集、存盘、读数、计算实验结果都需要耗费一定时间,从而导致扩散系数测量数据的不稳定、测量过程耗时长。因此,图像特征提取以及数据处理的自动化是解决上述问题的有效途径。

数字图像处理技术是将图像信号转换为数字信号,并通过计算机对图像进行噪声去除、增强、复原、分割、图像特征提取等处理的过程^[6]。该技术能客观、快速地帮助人们更好地观察、理解图像信息,并已经成为一种重要的光学测量手段^[7]。本课题组基于大恒公司生产的 DH-HV3151UC 摄像机配备的 SDK (Software Development Kit)^[8],运用 VB (Visual Basic) 语言对它进行了二次开发,得到了一套可视化的实时光学图像特征提取的图像处理软件。本文将该软件引进液相扩散系数的测量,用它处理实时显示的扩散图像,避免了主观判断对测量结果的影响,提高了测量速度,基本实现了液相扩散系数的自动化测量,为快速、准确地测量液相扩散系数提供了一种有效的方法。

2 实验方法

图 1 为利用消球差的非对称液芯柱透镜成像法测量液相扩散系数的实验装置。中心波长 $\lambda = 580 \text{ nm}$ 的发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 光源经准直后,垂直于柱透镜轴向入射到液芯柱透镜上。在柱透镜芯区的下端注入透镜一半高度的大密度液体,静置 10 min 左右,再向柱透镜上半端缓慢注入密度小的液体,再静置 10 min 左右,此时柱透镜与芯区液体共同构成一个非对称的液芯柱透镜。平行光经过该液芯柱透镜折射后会聚在 DH-HV3151UC 摄像机的 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 像面 (像元数为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$), 像元大小为 $3.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 上,摄像机实时采集到的图像通过 USB 接口传输并显示在计算机终端。

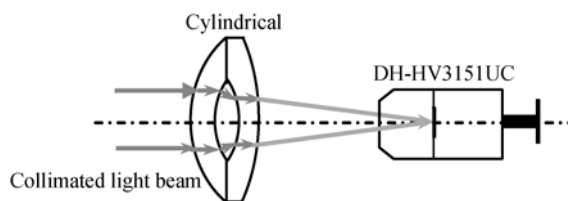
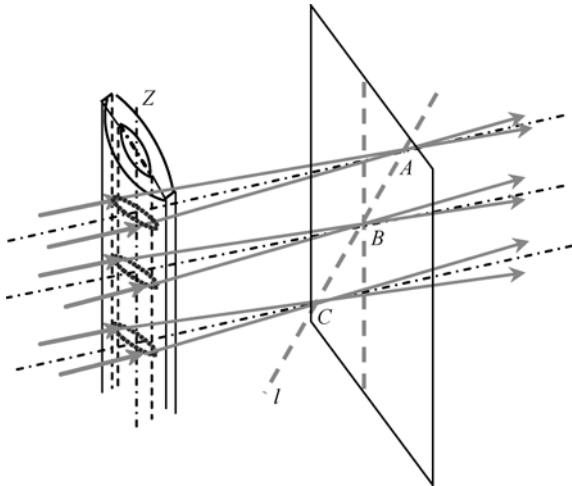


图 1 液相扩散系数测量实验装置图

Fig. 1 Setup of liquid diffusion coefficient measurement

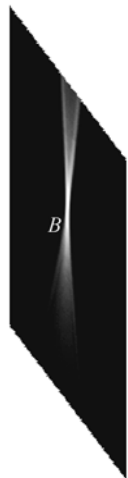
在非对称柱透镜中注入单一折射率的透明液体,调节 CMOS 像面与液芯柱透镜的相对位置,当 CMOS 像面处于透镜焦平面上时,在计算机显示屏上会看到一条细锐的“亮线”;当先后注入两种折射率不同的液体时,会在计算机显示屏上看到一段“亮线”和一段弥散的光斑。当两种折射率不同的液体相互接触并发生扩散时,如图 2(a)所示,液体折射率随着管轴 Z 方向形成一个动态的梯度分布 $n(Z, t)$, 平行光经柱透镜后汇聚的焦线 l 不再平行于 Z 轴。调节 CMOS 像面与液芯柱透镜的相对位置,在计算机显示屏上只能看到一个清晰成像点位于图像上最细最亮的位置,其它都是弥散的光斑,如图 2(b)所示。图 2(b)是实验

采集得到的扩散图像。实验测量采用等薄层观测法^[9],在液芯柱透镜中选定一个折射率确定的液体薄层,通过观测记录其清晰成像点的位置 Z 随扩散时间 t 的变化规律即 (Z_i, t_i) ,计算出液相扩散系数 D 。



(a) 成像原理示意图

(a) Illustration of imaging principle



(b) 实验扩散图像

(b) Experimental diffusion image

图 2 成像原理及实验图像

Fig. 2 Imaging principle and experimental image

3 液相扩散系数计算原理

在一维的自由扩散过程中,设两种扩散溶液分别为 A 和 B, A 在 B 中的摩尔浓度为 C_{AB} (简称为 C),则 C 沿着 Z 轴(扩散方向)的扩散遵循 Fick 第二定律^[4]。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dZ} \left[D \frac{dC(Z, t)}{dZ} \right], \quad (1)$$

式中: $C(Z, t)$ 表示在扩散方向位置 Z 处 t 时刻 A 的摩尔浓度, D 表示扩散系数。当浓度梯度较小时,将扩散系数 D 视为一个常数,即有:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2 C(Z, t)}{dZ^2}. \quad (2)$$

扩散开始前,即 $t < 0$ 时,设溶液 A 在界面 ($Z=0$) 两边的初始浓度分别为 C_1 和 C_2 ,则式(2)的解可用高斯误差函数表示为:

$$C(Z, t) = \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_1 - C_2}{2} \operatorname{erf} \left\{ \frac{Z}{2\sqrt{Dt}} \right\}. \quad (3)$$

为便于计算,式(3)可变为:

$$Z = 2\sqrt{D} \cdot \operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n(Z, t)] - \frac{C_1 + C_2}{2} \right] / \left[\frac{C_1 - C_2}{2} \right] \right\} \cdot \sqrt{t}. \quad (4)$$

考虑到扩散界面的初始测量误差 δZ ^[4],式(4)改写为:

$$Z = 2\sqrt{D} \cdot \operatorname{erfinv} \left\{ \left[f[n(Z, t)] - \frac{C_1 + C_2}{2} \right] / \left[\frac{C_1 - C_2}{2} \right] \right\} \cdot \sqrt{t + \delta Z}. \quad (5)$$

式中: $\operatorname{erfinv}(u)$ 是 $\operatorname{erf}(u)$ 的反误差函数, $f[n(Z, t)]$ 为液体折射率与浓度的关系式,可通过实验提前确定。此时 D 是关于 Z 和 \sqrt{t} 的一个线性相关系数。实验时,只需知道选定的液体薄层的清晰成像位置随扩散时间的变化规律 (Z_i, t_i) ,就可求出液相扩散系数 D 。

4 光学图像特征提取方法

从扩散图像上准确获取选定折射率薄层的清晰成像位置,是成像法测量液相扩散系数的关键。实验时,以扩散图像上最细最亮的点作为选定折射率清晰成像的位置,即观测的目标位置。用实验方法记录下该位置随扩散时间的变化规律,再计算出液相扩散系数。目标位置的判定与图像形态学相关^[10],本文采用数字图像特征提取^[11]法,通过亮度和宽度特征来确定目标位置。

4.1 亮度特征提取

一幅数字灰度图像可用一个二维函数 $f(x, y)$ 表示,其中 f 是图像在空间坐标 (x, y) 处的亮度值。实验用 DH-HV3151UC 型摄像机采集彩色图像,一副彩色图像可以分解为红、绿、蓝 3 幅灰度图像^[12]: $f_R(x, y)$, $f_G(x, y)$, $f_B(x, y)$ 。在计算图像上任一像素点 (x, y) 的亮度值时,采

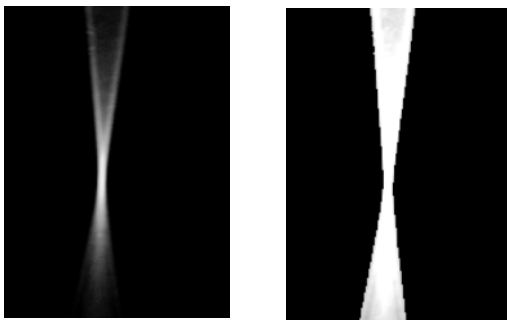
用亮度均值法^[13],即用 3 幅图像灰度的平均值作为亮度函数:

$$g(x, y) = [f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y)] / 3. \quad (6)$$

实验中采集到的扩散图像经过成像系统的传输和显示后存在噪声干扰,噪声会影响图像单个像素点亮度值的判断。为了避免这些噪声的影响,突出目标信息,采用自适应阈值法^[12,14]对图像进行去噪处理。自适应阈值法可以根据图像的亮度值特性选定一个合理的阈值 T ,将每个像素的亮度值与 T 进行比较,依据比较结果将图像上的像素点进行赋值分类,表达式如下:

$$G(x, y) = \begin{cases} g(x, y), & g(x, y) \geq T \\ 0, & g(x, y) < T \end{cases} \quad (7)$$

经过自适应阈值处理图像后,通过编程手段扫描出图像每一行 (x, x 取 $1 \sim 768$) 中 $G(x, y)$ 的最大值 $G_{\max}(x)$,即最大亮度分布函数。通过 $G_{\max}(x)$ 的集合就可以确定目标位置。



(a) 原图 (b) 亮度化及去噪处理结果
(a) Original image (b) Processed image

图 3 扩散图像的亮度化及去噪处理结果

Fig. 3 Brightness and de-noising of diffusive image

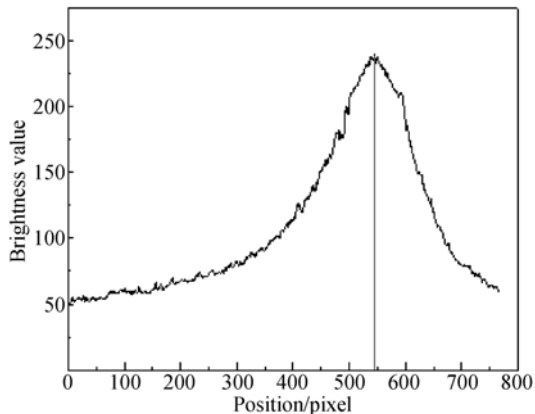


图 4 图像沿扩散方向的最大亮度分布函数

Fig. 4 Distribution function of maximum brightness for image along diffusion direction

图 3(a)是一幅未经处理的扩散图像,图 3(b)是图(a)经过亮度化及去噪处理后的扩散图像。图 4 是图3(b)沿扩散方向(Z 轴)的最大亮度分布函数,实线标明目标位置(折射率薄层清晰成像的位置)。但是,只运用单一的亮度特征定位目标存在抗噪声干扰能力差的缺点^[15]。

4.2 宽度特征提取

数字图像处理过程中,用图像的形状特征来区别物体是非常直观的。对于扩散图像,仅关心其横向(纵向)宽度,为此采用图像宽度特征来进行图像特征的分析处理。宽度与图像上任意两个像素点间的距离有关。因此,在提取图像宽度特征时只需同时从每一行(列)左右两边扫描出亮度值 $G(x, y) \neq 0$ 的第一个像素坐标 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$,按照欧几里德距离计算式^[16]得到宽度,即有:

$$d_e[A, B] = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

对于同一行像素的横向宽度,式(8)可变为:

$$d_e[A, B] = |x_1 - x_2|. \quad (9)$$

在图像宽度特征分析中,只需得出图像每一行(或每一列)的宽度,利用编程扫描的方式查出最小宽度分布函数 $\min(d_e[A, B])$ 及其对应的像素点的位置,即为实验所需的形状特征像素点。

图 5 是图 3(b)沿扩散方向(Z 轴)的最小宽度分布函数,虚线标明目标位置。从图中可以看出,图像的最小宽度并非一个像素点而是有一定范围(d 表示图像的最小宽度范围)。因此,用图像最小宽度定位目标观测点的方法存在一个位置的不确定范围。

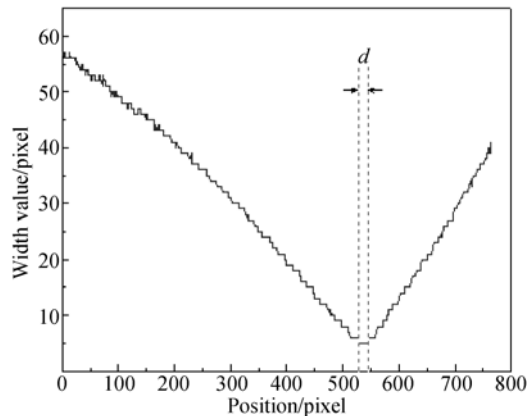


图 5 图像沿扩散方向的最小宽度分布函数

Fig. 5 Distribution function of minimum width for image along diffusion direction

4.3 亮度和宽度综合特征提取

综合亮度和宽度特征提取方法的特点,采用双特征提取法共同确定目标的观测位置。首先,用编程扫描的方式查出最小宽度分布函数 $\min(d_e[A, B])$;然后,在最小宽度分布值附近用最大亮度分布法准确定位目标观测点,结果如图 6 所示。

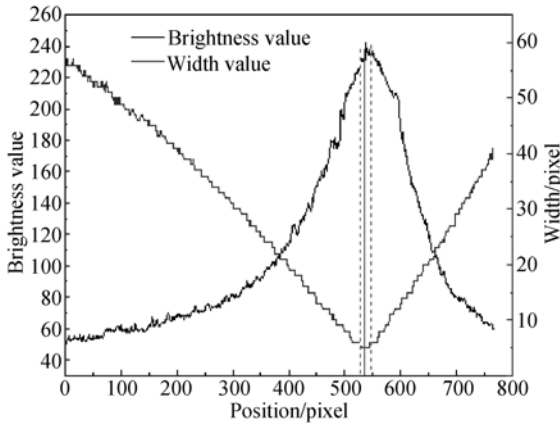


图 6 亮度和宽度特征提取的综合分析图

Fig. 6 Position determination in consideration of brightness and width features

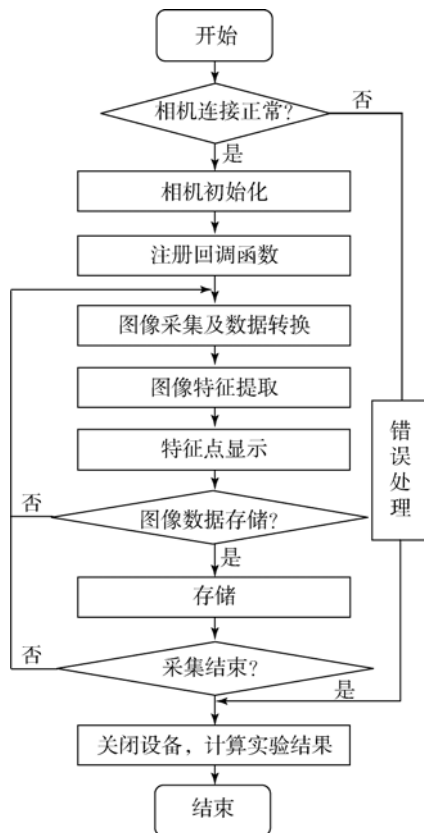


图 7 实时光学图像特征处理软件开发流程图

Fig. 7 Flowchart of optical image feature process in real time

5 实时光学图像特征提取及结果

本文将扩散实验中图像采集和数据解读工作从巨大的机械性重复劳动中解放出来,以提高图像采集的时间记录精度及节约数据换算时间,实现自动化测量。根据大恒图像公司生产的 DH-HV3151UC 摄像机提供的 SDK 实例,以微软的 Windows XP 作为操作系统并安装 Microsoft Visual Basic 以及摄像机自带的驱动程序和 SDK,采用可视化的软件开发工具—Microsoft Visual Basic 按照图 7 的开发流程对采集系统进行二次开发,得到了一个可视化的实时光学图像特征提取处理软件。图 8 是利用实时光学图像特征提取软件处理的一组扩散图像。

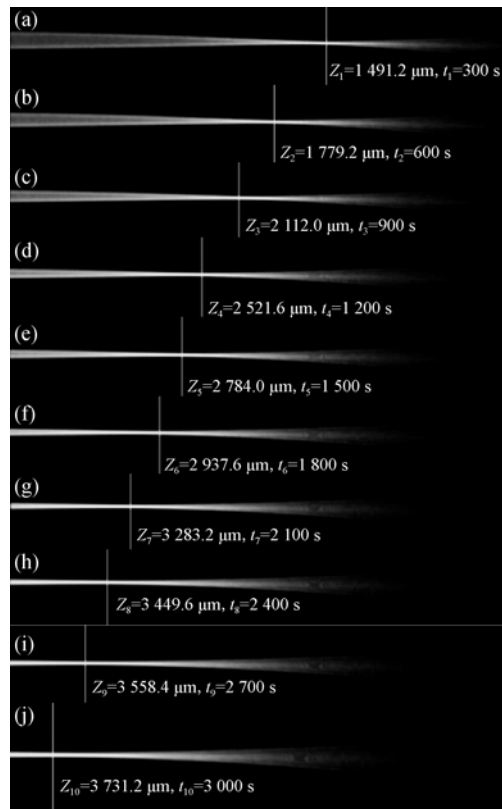


图 8 用特征提取方法标志后的扩散图像,白线标志折射率薄层的清晰成像位置和扩散时间 (Z_i, t_i)

Fig. 8 Diffusion images marked by feature extraction, Short lines denote position and diffusion time (Z_i, t_i) , where collimated beams are imaged clearly on CMOS plane

为了实现自动化测量,实时光学图像特征提取软件中设置了扩散图像和数据自动存储的功能。该软件处理一幅大小为 $768 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ 的扩散图像需耗时 0.608 s 。该测量方法无需手动输入实验数据,只需 1.218 s 便可得出实验结果。表 1 是 3 种测量方法在时效性上的比较,从表中可明显看出实时光学图像特征提取方法与直接观测法和静态图像处理分析测量法相比大大节省了测量时间。

表 1 不同测量方法的耗时比较

Tab. 1 Time-cost comparison among different measuring methods

测量方法	获取目标位置	计算实验结果
	信息耗时 t_1/s	耗时 t_2/s
直接观察测量法	≥ 10	≥ 120
静态图像特征提取法	6.297	≥ 120
实时图像特征提取法	0.608	1.218

6 实验测量

为验证实验方法的可靠性,用光学图像特征测量得出其折射率 n 和 C 满足线性关系:

$$C = f(n) = 10.0135n - 13.3439 \quad (R^2 = 0.9999) \quad (10)$$

实验选择折射率 $n_c = 1.3397$ 的液体薄层为观测薄层,并进行了 5 次独立实验测量,结果见表 2。

参考文献:

- [1] 赵长伟, 马沛生. 药物类水溶液扩散系数及相关热力学性质的测定与研究[D]. 天津: 天津大学, 2003. ZHAO CH W, MA P SH. *Measurement and Study on Diffusion Coefficient and Thermodynamic Property Aqueous Medicaments Solutions* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [2] 马友光, 朱春英, 何明霞, 等. 氨基酸在水溶液中扩散系数的实验研究 [J]. 激光技术, 2005, 29(2): 145-147. MA Y G, ZHU CH Y, HE M X, *et al.*. The experimental study about the diffusivities of amino acids in aqueous solution [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 145-147. (in Chinese)
- [3] 赵长伟, 马沛生, 何明霞. 液相扩散系数测定方法的近期研究进展 [J]. 化学工业与工程, 2002, 19

表 2 乙二醇在水中的扩散系数

Tab. 2 Measurement results of diffusion coefficients of ethylene glycol in water

实验编号	$Z \sim \sqrt{t}/\mu\text{m}$	R^2	$D/(10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	$Z = 72.850\sqrt{t} - 169.92$	0.998 1	1.167
2	$Z = 72.793\sqrt{t} - 395.30$	0.992 0	1.165
3	$Z = 72.752\sqrt{t} - 698.24$	0.994 5	1.164
4	$Z = 72.527\sqrt{t} - 619.16$	0.990 7	1.157
5	$Z = 72.891\sqrt{t} - 347.58$	0.996 1	1.168

5 次独立实验的扩散系数的测量平均值为 $1.164 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, 该值与室温下乙二醇在纯水中的扩散系数 $1.16 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ^[17] 的相对误差仅为 0.34%。

7 结 论

本文介绍了一种以实时光学图像特征提取为手段,用成像法测量液相扩散系数的方法。用这种方法在室温下测量了乙二醇在纯水中的扩散系数,测量值 $D = 1.164 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 与文献报导值之间的相对误差为 0.34%。该方法避免了主观判断对测量结果的影响,实现了实时自动化测量,具有计算耗时短、测量稳定的特点。

(5): 374-379.

ZHAO CH W, MA P SH, HE M X. Recent research and development of the liquid diffusion coefficient [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2002, 19(5): 374-379. (in Chinese)

[4] 李强. 液体折射率及液相扩散系数的测量方法研究 [D]. 云南: 云南大学, 2013.

LI Q. *Study on the Measurement of Liquids Refractive Index and Liquid Diffusion Coefficient* [D]. Yunnan: Yunnan University, 2013. (in Chinese)

[5] LI Q, PU X Y, YANG R F, *et al.*. Measurement of diffusion coefficient of liquids by using an asymmetric liquid-core cylindrical lens: Observing diffusion process directly [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(5): 054203-1-4.

[6] 贾永红. 数字图像处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

- JIA Y H. *Digital Image Processing* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 俞海, 郭荣鑫, 夏海廷, 等. 数字图像相关法在 WC/Cu 复合材料线膨胀系数测量中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2013, 10(21): 2696-2703.
- YU H, GUO R X, XIA H T, *et al.*. Application of digital image correlation method in measuring linear expansion coefficient of WC/Cu composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 10(21): 2696-2703. (in Chinese)
- [8] 李永红, 程耀辉, 隋海洋. 基于 SDK 的软件设计方法 [J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(6): 228-230.
- LI Y H, CHENG Y H, SUI H Y. A method of software design based on SDK [J]. *Scientific Technology Information Development & Economy*, 2006, 16(6): 228-230. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 王学娟, 罗海波, 魏永旺, 等. 一种采用 HOG 特征的直线段提取方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 513-518.
- WANG X J, LUO H Y, WEI Y W, *et al.*. Extracting line segments method with HOG feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 513-518. (in Chinese)
- [11] 彭皓. 局部不变特征提取算法的研究及其在图像识别中的应用 [J]. *电子测量技术*, 2009, 32(2): 136-139.
- PENG H. Local invariant descriptor applied in image recognition [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2009, 32(2): 136-139. (in Chinese)
- [12] 梁万国, 罗森林, 周思永, 等. 彩虹全息图的假彩色编码方法 [J]. *光学技术*, 1997, 11(6): 5-11.
- LIANG W G, LUO S L, ZHOU S Y, *et al.*. Pseudo color coding methods in the rainbow holography [J]. *Optical Technology*, 1997, 11(6): 5-11. (in Chinese)
- [13] 杨旭. 遥感影像的自适应阈值法水陆分割研究 [J]. *科技资讯*, 2013(5): 42-43.
- YANG X. Study on the adaptive threshold method of remote sensing image based on water and land segmentation [J]. *Science & Technology Information*, 2013(5): 42-43. (in Chinese)
- [14] 汪鲁才, 易锡年, 陈小天, 等. 自适应连续多级分区与初始阈值估计的快速模板匹配方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 1106-1111.
- WANG L C, YI X N, CHEN X T, *et al.*. Fast template matching algorithm based on AMSP and initial threshold estimation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1106-1111. (in Chinese)
- [15] 李平, 魏仲慧, 何昕, 等. 采用多特征融合的多视点目标识别 [J]. *光学精密工程*, 2014, 12(22): 3365-3376.
- LI P, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Object recognition based on shape feature fusion under multi-views [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 12(22): 3365-3376. (in Chinese)
- [16] 蔡菲, 蔡珣, 史同广, 等. 一种基于形状特征的图像检索方法 [J]. *计算机软件与应用*, 2005, 22(12): 98-99.
- CAI F, CAI X, SHI G T, *et al.*. An image retrieval method based on shape feature [J]. *Computer Applications and Software*, 2005, 22(12): 98-99. (in Chinese)
- [17] BAYER C H, KING C J. Liquid diffusivities in the glycol water system [J]. *Journal Physical Chemistry*, 1966, 70(8): 2499-2503.

作者简介:



杨瑞芬(1989—),女,云南昆明人,硕士,主要从事图像处理及液相扩散系数测量方面的研究。E-mail: fry5031261@126.com

导师简介:



普小云(1957—),男,云南昆明人,教授,博士生导师,1987年于中科院北京物理所获得硕士学位,2000年于香港中文大学获得博士学位,主要从事光学和光电子领域的科研和教学研究。E-mail: xypu@163.com