

# 基于液体旋光效应的葡萄糖浓度测量

黄 贞, 梁恩恩, 林雪桂, 黄明俊, 曾志明, 钟惠婵

岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江 524048

**摘要** 葡萄糖浓度是溶液的主要参量之一。根据葡萄糖溶液的旋光效应, 结合电机调制检偏器, 通过双光路同步检测, 测量两路调制信号的相位差从而得到待测葡萄糖溶液的浓度。实验结果表明: 对于浓度范围为 0%~50% (质量分数) 的葡萄糖溶液, 测量最大相对误差约为 6.48%。本设计解决了旋光角度测量受机械转动装置限制的问题, 测量装置具有结构简单、测量快捷、抗干扰性强等优点。

**关键词** 测量; 葡萄糖浓度; 旋光效应; 激光

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.061203

## Glucose Concentration Measurement Based on Liquid Optical Rotation Effect

Huang Zhen, Liang En'en, Lin Xuegui, Huang Mingjun, Zeng Zhiming, Zhong Huichan  
*School of Physics Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 524048, China*

**Abstract** The glucose concentration is one of the main characteristics of solution. Based on the optical rotation effect of glucose solution, motor modulation analyzer, and dual light path simultaneous detection, glucose concentration is obtained from the phase difference of the two modulation signals. Experimental results show that the maximum relative error is about 6.48% with glucose concentration from 0% to 50% (mass fraction). The proposed method solves the problem that rotation angle measurement is limited by mechanical rotation equipment. The measurement equipment has the advantages of simple structure, rapid measurement and strong anti-interference.

**Key words** measurement; glucose concentration; optical rotation effect; laser

**OCIS codes** 120.5410; 120.3930; 140.2020

## 1 引言

液体浓度是表征介质溶液特性的主要参量之一, 对液体浓度的测量与控制在造纸、化工、制糖、食品、制药、环境监测等行业中有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。旋光性是糖类物质等手性化合物的重要性质, 利用手性化合物物质溶液的旋光效应可以实现对液体浓度的测量<sup>[4-5]</sup>。旋光法测定糖浓度可应用到许多方面, 例如在饮料生产方面, 可以利用旋光法对果汁和碳酸饮料等的品质进行检测, 实现饮料的品质管理和发货前检验; 在农业方面, 糖浓度是衡量产品质量的一个重要依据, 可以准确便捷地测定水果的收采时期以及给水果的甜度作分级分类, 对农业市场的发展具有举足轻重的意义<sup>[6-7]</sup>。在医学领域, 血糖浓度的测量对病情的分析、合理用药等方面都具有重要的指导意义<sup>[8-9]</sup>。较传统的抽血测量, 利用旋光性测量血糖具有无创伤、快速、准确的特点<sup>[10]</sup>。简而言之, 旋光法在糖浓度测量方面应用广泛, 具有重要的研究意义。轻工部甘蔗糖业研究所研制的 AR-L 自动折光仪测量精度可达 0.3%<sup>[11]</sup>; 萧璋等<sup>[12]</sup>研制的糖浓度自动测量仪利用线阵 CCD 作为传感器, 测量精度达到 0.1%, 测量范围为 0~20%; 张伟刚等<sup>[13]</sup>研制的强度型光纤浓度传感器测量分辨率达

**收稿日期:** 2017-01-06; **收到修改稿日期:** 2017-02-19

**基金项目:** 广东省科技计划项目(2016A040403124)、湛江市科技攻关计划(2013B01160, 2013B01049)、广东省创新强校工程青年创新人才项目(2015KQNCX093)

**作者简介:** 黄 贞(1981—), 女, 博士, 实验师, 主要从事激光光电检测方面的研究。E-mail: zhuangzhen@163.com

$2.67 \times 10^{-4}$ , 测量范围为  $1\% \sim 20\%$ ; 赵勇等<sup>[7]</sup> 提出一种具有光学参考差动测量和基于位置敏感器件测量技术的结构方法, 测量分辨率达  $10^{-5}$ , 测量范围为  $0\% \sim 35\%$ ; 王洪等<sup>[14]</sup> 利用正交双偏振光实现无创血糖检测, 并以 LX-20 全自动生化分析仪的测量数据为标准进行对比实验, 得出  $4\% \sim 50\%$  范围内葡萄糖溶液实验的相关系数为 0.9777, 该方法具有较高的检测灵敏度和准确度。然而目前大多数基于光学测量方法的糖浓度测量仪采用手持式目视结构, 主要存在人为读数误差大、读数环境对光线有较高要求、无法实现快速便捷及自动化测量、旋光角度测量受转动装置限制等问题<sup>[7]</sup>。针对这些问题, 本文利用糖溶液的旋光效应, 结合电机调制检偏器, 通过双光路同步检测, 从测量光电转换后的两路电信号的相位差得到待测葡萄糖溶液的浓度。

## 2 实验原理

根据旋光效应, 半导体激光器发出的光经过起偏器形成线偏振光, 透过旋光物质后, 出射光的振动面相对于入射偏振光的振动面将以光的传播方向为轴线发生旋转, 可知旋光度  $\varphi$  与激光透过液体的厚度  $L$  以及溶液的浓度  $C$  成正比。同时, 偏振光旋转的角度  $\varphi$  还与溶液的温度  $T$  以及光的波长  $\lambda$  有关, 如下式所示:

$$\varphi = [\alpha]_{\lambda}^T CL, \quad (1)$$

式中  $[\alpha]_{\lambda}^T$  为旋光率,  $C$  为液体浓度(单位: %, 质量分数, 下同),  $L$  为液体厚度(单位: mm)。

本装置采用小功率半导体激光器作为光源,  $\lambda = 650 \text{ nm}$ 。就大多数物质来讲, 温度对旋光率所造成的误差可以忽略不计<sup>[15]</sup>。即对同种旋光液体而言, 在波长恒定的情况下, 其旋光率基本上为一恒定值。因此, 液体的旋光度与其浓度之间的比值为一个固定常数, 用  $A$  表示。则溶液的浓度  $C$  与旋光度  $\varphi$  的线性关系可以表示为

$$C = A\varphi + A_0, \quad (2)$$

式中  $A_0$  为常数。

设有已知浓度  $C_2$  的葡萄糖溶液和浓度为  $C_1$  的待测葡萄糖溶液, 由(2)式可知, 对于待测葡萄糖溶液有:

$$C_1 = A\varphi_1 + A_0, \quad (3)$$

对于已知浓度葡萄糖溶液有:

$$C_2 = A\varphi_2 + A_0, \quad (4)$$

可得:

$$C_1 - C_2 = A(\varphi_1 - \varphi_2) = A\Delta\varphi, \quad (5)$$

故:

$$C_1 = A\Delta\varphi + C_2, \quad (6)$$

式中  $\Delta\varphi$  为两种浓度糖溶液的旋光角度差。

由(6)式可知, 只要得到两种浓度糖溶液的旋光角度差  $\Delta\varphi$  以及比例系数  $A$  即可得出待测葡萄糖溶液浓度  $C_1$ 。对于旋光度的测量, 早期主要采用手动消光系统和目视读数, 这种方法比较粗糙, 测量精度较低。随着光电子技术的发展, 多采用旋转位移台带动检偏器转动, 通过旋转位移台的旋转角度直接得到待测液体的旋光度; 这种方法受到机械转动装置的限制, 测量精度难以提高。为了解决旋光角度测量受转动装置精度限制的问题, 本设计通过直接测量两路光电转换后电信号的相位差的方法, 实现待测葡萄糖溶液的浓度测量, 装置原理图如图 1 所示。

图 1 中 A 槽装已知浓度葡萄糖溶液, B 槽装待测葡萄糖溶液。半导体激光器(LD)发出的光经过偏振片、光束分束器(BS)后, 分成两束线偏振光 a、b。a 光经平面镜反射后, 与 b 光平行。两束光分别穿过 A、B 两槽照射到匀速旋转的检偏器, 并被其后的光电池接收, 通过光电转换并转送到数据处理系统(DAQ)。设穿过 A、B 两槽前, 两束光的电场强度为  $E_0$ 。

1) 若检偏器静止, 且 A、B 两槽液体的浓度相同, 则经过检偏器后, 两束光的电场强度均为  $E_0 \exp(-i\theta + \varphi)$ , 其中  $\theta$  为检偏器透振方向与两束光电矢量振动方向的夹角。因此经光电转换后, 两路信号为直流信号, 如图 2 所示。

2) 若检偏器匀速旋转, 且 A、B 两槽液体的浓度相同, 造成旋光角度相同, 则经过检偏器后, 两束光的电场强度均为  $E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi)]$ , 其中  $\omega$  为检偏器转动角频率,  $t$  为时间。因此采集到的光电转换信号将为两条类正弦波, 相位差  $\Delta\phi = 0$ , 如图 3 所示。

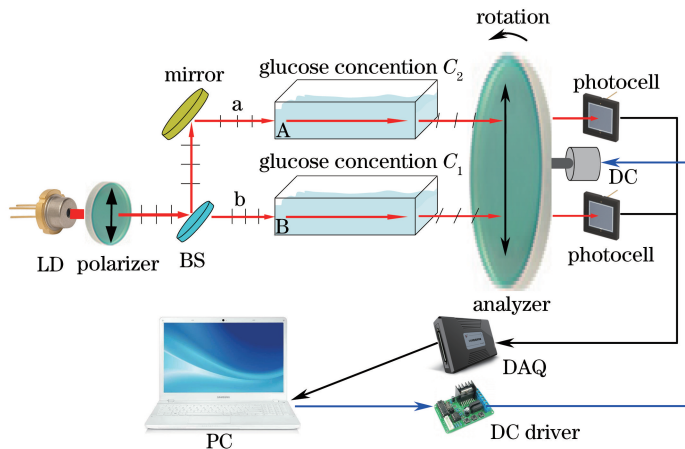


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

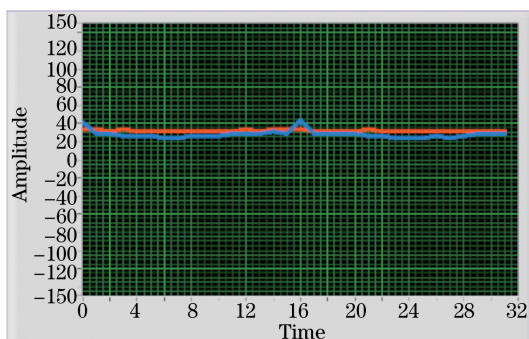


图 2 检偏器静止时的波形

Fig. 2 Waveforms when the analyzer is static

3) 若检偏器匀速旋转,且 A、B 两槽液体的浓度不同,造成旋光角度不相同,则经过检偏器后,两束光的电场强度分别为:  $E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi_1)]$ 、 $E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi_2)]$ , 因此采集到的光电转换信号将为两条相位不同的类正弦波,相位差  $\Delta\phi = \varphi_1 - \varphi_2$ , 如图 4 所示。

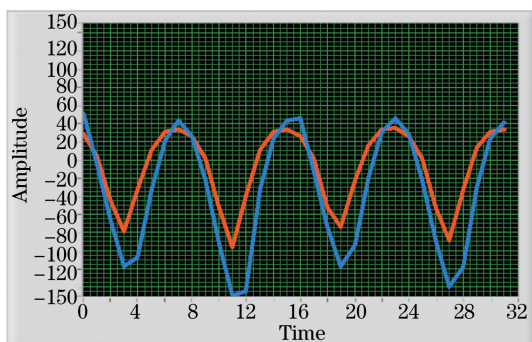


图 3 检偏器匀速旋转且  $C_1 = C_2$  时的波形

Fig. 3 Waveforms when the analyzer is rotating uniformly and  $C_1 = C_2$

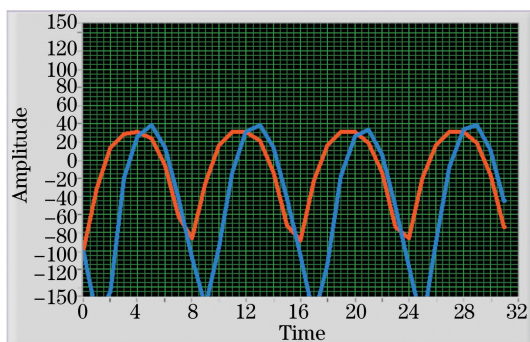


图 4 检偏器匀速旋转且  $C_1 \neq C_2$  时的波形

Fig. 4 Waveforms when the analyzer is rotating uniformly and  $C_1 \neq C_2$

因此本装置利用光经过 A、B 两槽后,所采集的两类正弦波的相位差  $\Delta\phi$  来确定待测浓度溶液引起的旋光度。同时利用光束分束器把光路一分为二,实现标准液体与待测液体旋光度的同时测量,减少了由于分步测量所造成的误差,大幅度降低了环境干扰对实验结果所造成的影响。

由旋光液体的旋光效应可知,同种液体的旋光度与浓度的比值为—常数,即对同种旋光液体而言,比例系数 A 为一恒定值。因此本装置利用标准溶液进行标定得到比例系数 A。

### 3 测量结果与分析

如图 5 所示,实验装置主要由功率小于 5 mW 的红色激光笔、偏振片、平面镜、光束分束器、电机旋转系统、光电接收装置、USB2832 数据采集卡以及基于 LabVIEW 的信号处理系统所组成。

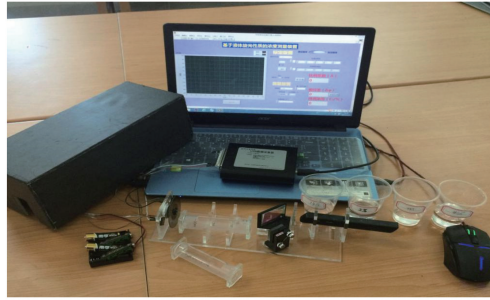


图 5 实验装置实物图

Fig. 5 Physical photograph of the experimental device

#### 3.1 标定比例系数 A

选择浓度分别为 0%、5%、10%、30% 的葡萄糖溶液,进行比例系数 A 的标定。实验结果如表 1 所示。

表 1 标定比例系数 A 时的测量结果

Table 1 Experiment results to calibrate the ratio coefficient A

Reference concentration / %	$\Delta\phi$
0	1.456
5	6.515
10	10.337
30	26.713
50	40.505

将表 1 数据利用最小二乘法线性拟合曲线,如图 6 所示( $R^2$  是趋势线拟合程度),可得比例系数  $A = 1.2828$ 。

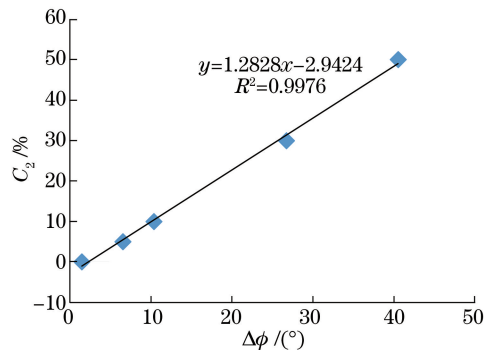


图 6 比例系数 A 的标定

Fig. 6 Calibration of the ratio coefficient A

根据上述分析,待测溶液的浓度如下式所示:

$$C_2 = 1.2828\Delta\phi - 2.9424. \quad (7)$$

设定直流电机转速为  $\omega = 10$  r/min、每通道采样率  $F_s = 30$  kS/s,则相位差测量分辨率为  $0.0002^\circ$ ,对应浓度测量分辨率约为  $2.56 \times 10^{-3} \%$ 。可以通过降低直流电机转速和提高数据采集率来提高测量分辨率<sup>[7]</sup>。

#### 3.2 葡萄糖溶液浓度测量

将 A 值标定结果记录在程序数据库中之后,以蒸馏水( $C_2 = 0\%$ )为标准溶液,利用本装置对多个浓度的葡萄糖溶液进行实验测量,结果如表 2 所示。从表 2 中可以看到测量结果与实际溶液浓度存在微小的差别,最大相对误差约为 6.48%。根据测量理论,这一差别是由于实际实验信号存在噪声干扰所致。其中最主要的原因是信号噪声造成所采集的两类正弦波波形形变,从而导致相位差存在误差。



表 2 葡萄糖溶液浓度测量结果  
Table 2 Measurement results of the glucose concentration

%

Reference concentration	Measurement concentration	Relative error
5	5.324	6.48
10	9.861	1.39
15	14.485	3.43
20	20.787	3.93
25	26.302	5.21
30	30.366	1.22
35	34.922	2.23
40	42.365	5.91
45	44.816	0.41
50	50.836	1.67

由上述分析可得,对于其他溶液来说,只需要进行该种溶液比例系数  $A$  的标定,即可利用本装置进行浓度测量。

## 4 结 论

利用旋光液体的旋光性质,结合电机驱动检偏器匀速转动,设计了一种新型便捷式葡萄糖浓度快速测量装置。装置利用双光路同步检测和电机驱动检偏器转动,通过直接测量光电转换后电信号的相位差获得旋光角度,解决了旋光角度测量受机械转动装置限制的问题。实验结果表明:对于浓度范围为  $0\% \sim 50\%$  的葡萄糖溶液,测量最大相对误差约为  $6.48\%$ 。本装置具有测量快捷、抗干扰性强等优点。

## 参 考 文 献

- [1] Rea I, Iodice M, Coppola G, *et al.* A porous silicon-based Bragg grating waveguide sensor for chemical monitoring[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2009, 139(1): 39-43.
- [2] Mao Rui. Research on liquid concentration measurement system based on fiber Bragg grating [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 15-45.  
毛蕊. 光纤光栅液体浓度测量系统研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 15-45.
- [3] Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. Study on photoacoustic noninvasive detection for blood glucose concentration based on tunable pulsed laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0204001.  
任重, 刘国栋, 黄振. 基于可调谐脉冲激发的血糖浓度光声无损检测研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0204001.
- [4] 侯传斌. 手性分子族光机理浅释——一种确定  $r$ 、 $S$  构型的简便方法[J]. *临沂大学学报*, 1994(5): 24-27.
- [5] Yu Zhenfang, Qiu Qi, Guo Yong. Dual modulation optical polarimetry for glucose monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0117001.  
余振芳, 邱琪, 郭勇. 双调制光学偏振法葡萄糖浓度检测[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0117001.
- [6] Cheng Li. Quantitative analysis of myclobutanil and indoxacarb enantiomers residue in vegetable and fruit[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010: 23-34.  
程莉. 手性农药腈菌唑和茚虫威在蔬菜水果中的残留分析方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010: 23-34.
- [7] Zhao Yong, Li Borui, Mo Fangzheng, *et al.* Accurate sugar concentration measurements based on optical inspection technology[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2006, 46(4): 477-479.  
赵勇, 李波睿, 莫方政, 等. 高精度光学糖浓度测量技术研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(4): 477-479.
- [8] Yu Zhenfang, Qiu Qi, Guo Yong, *et al.* Optical polarimetry for glucose sensing[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(5): 57-59.  
余振芳, 邱琪, 郭勇, 等. 光学旋光法的血糖浓度测量[J]. *激光杂志*, 2013, 34(5): 57-59.
- [9] Cao Chenrong. Non-invasive method study on blood glucose through tear measurement [D]. Guangzhou: Jinan University, 2011: 20-34.

- 曹陈荣. 通过泪液无创测量血糖的方法研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011: 20-34.
- [10] Wang Hong, Jiang Mingfeng, Cui Jianguo, *et al.* Microdegree polarimetry for glucose detection[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(1): 80-81.
- 王 洪, 蒋明峰, 崔建国, 等. 基于光学旋光法的血糖浓度测量[J]. *激光杂志*, 2006, 27(1): 80-81.
- [11] 谭 程, 朱石雄, 钟剑平, 等. Ar-L 自动折光仪[J]. *甘蔗糖业*, 1987(2): 36-42.
- [12] Xiao Zhang, Liu Guangchang, Lei Zhaoyi, *et al.* Design of a high accuracy automatic instrument for the sugar solution concentration measuring[J]. *Microelectronics & Computer*, 1997(3): 49-52.
- 萧 璋, 刘光昌, 雷兆宜, 等. 饮料糖浓度自动测量仪的研制[J]. *微电子学与计算机*, 1997(3): 49-52.
- [13] Zhang Weigang, Xu Zhaowen, Kai Guiyun, *et al.* Design and realization of fiber intensity-type sensor of solution contribution[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(3): 272-274.
- 张伟刚, 许兆文, 开桂云, 等. 强度型光纤浓度传感器的设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(3): 272-274.
- [14] Wang Hong, Wu Baoming, Liu Ding. A non-invasive glucose measurement method based on orthogonal twin-polarized light and its pilot experimental investigation[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2010, 27(2): 278-282.
- 王 洪, 吴宝明, 刘 丁. 基于正交双偏振光的无创血糖检测方法及初步实验研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2010, 27(2): 278-282.
- [15] 蔡福林, 王晓春. 探讨温度对旋光度测定法的影响[J]. *中国现代应用药学*, 2001, 18(s1): 86-87.