

·测试、试验与仿真·

基于光纤 Fresnel 反射原理的溶液浓度测量方法研究

刘颖刚¹, 张 伟²

(1. 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要:针对传统溶液浓度测量方法的不足,提出了一种基于光纤端面反射原理的溶液浓度测量方法。通过 Fresnel(菲涅耳)定律以及折射率与溶液浓度关系,建立了反射光强同溶液浓度的函数关系,分析了反射光强变化的规律特征,指出反射光强随溶液浓度变化应具有保持线性关系。并且通过蔗糖溶液和葡萄糖溶液的实验研究,验证了反射光强随溶液浓度变化符合线性关系特性,线性拟合度达到99%以上。该方法可用于蔗糖、葡萄糖等溶液浓度的在线测量,具有线性度高、操作简单、易于实现特点。

关键词:光纤传感;溶液浓度;折射率;功率

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-05-0067-04

Research on Measuring Solution Concentration Based on Fresnel Reflection Principle in Optical Fiber

LIU Ying-gang¹, ZHANG Wei²

(1. Key Laboratory of Photo-electricity Gas & Oil Logging and Detecting Education Department, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: For the improvement of traditional measurement method for solution concentration, a method of measuring concentration is proposed, which is based on the Fresnel principle in optical fiber. Through the Fresnel reflection formula and the relationship between refractive index and concentration, the concentration-dependent power changes are demonstrated, and the characteristics of the reflected power changes are also analyzed correspondingly. The reflected power should change with the variation of solution concentration and keep a good linearity. Furthermore, the experimental research prove the linearity between the power and solution concentration by using the sucrose solution and glucose solution, and the linear fitting factor is more than 99%. This method can be used for on-line measurement of the concentration of sucrose, glucose and other solutions, which has high linearity, simple operation, and easy to be operated.

Key words: fiber sensing; solution concentration; refractive index; power

浓度测量在基础研究、生化分析、环境污染评估、医疗诊断以及食品和化学工业中有着广泛的应用^[1-2]。生产实践中,人们已经提出了多种测试方法,如滴定分析法、分光光度法、比重计法和旋

光度法以及基于这些原理演变而成的其他诸多方法^[3-7]。这些方式各有优点,但不足的是均是对一定量测试对象进行分析的,不能完全实现在线式实时测量的。伴随光纤传感技术在生化传感领域的应

收稿日期:2015-10-08

基金项目:陕西省自然科学基金(2013JM8032)和陕西省教育厅科研计划(14JK1423)资助项目。

作者简介:刘颖刚(1977-),男,陕西西安人,副教授,主要从事光纤传感技术研究。

用与发展,基于光纤技术的物质参数的测量成为了研究热点^[2-3,8],这些光纤传感器件不仅具有体积小、耐腐蚀、不易受电磁环境干扰等特点,还具有灵敏度高、响应速度快、易于网络化、能够实现在线式实时测量等诸多功能,在化工产品生产、食品加工以及环境监测等领域有着广泛的应用前景。文中提出了一种建立在光纤端面反射原理基础上的溶液浓度测试方法,并且通过实验验证了该方法的可行性,可为相关研究工作提供一定参考。

1 基本原理

当光由一种介质进入另一种介质时,将在分界面处被反射。由 Fresnel 定律可知,若光保持垂直入射,则反射光强与入射光强以及两种介质的折射率关系可以表示为^[8-9]

$$I_r = I_0 \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强; I_r 为反射光强; n_1 和 n_2 分别为两种介质的折射率。若已知其中一种介质的折射率,则通过对入射和反射光强的测量可推出另一种介质的折射率。

实验中,所用测试装置原理图如图 1 所示。激光器发射的单色光经光纤由光纤环形器的端口 1 进入环形器,由于环形器对光的传输方向的限制,进入环形器的光在经光纤由端口 3 出射而进入待测溶液,此时由于光纤端面的反射,再次进入端口 3 原路反向传向端口 2,通过对端口 2 测量前后输出功率的测量即可确定出待测溶液浓度。此过程中,假设光由端口 1 到 3 和 3 到 2 的光损耗系数分别为 k_1 和 k_2 ,当装置一定时,其大小则是恒定的。同时,由于光是由光纤进入待测溶液的,所以根据式(1)关系,功率计测到的光强可表示为

$$I = k_1 k_2 I_r = k_1 k_2 I_0 \left[\frac{n_{\text{纤}} - n}{n_{\text{纤}} + n} \right]^2 \quad (2)$$

其中, $n_{\text{纤}}$ 是光纤纤芯的折射率; n 代表待测介质的折射率。

不过对于溶液而言,其折射率与测试光波长、温度和浓度间存在一定的关系^[10-11],当波长和温度保持恒定时,溶液折射率将与浓度近似呈线性关系,即满足下式

$$n = AC + B \quad (3)$$

其中, A 、 B 为常数,大小与溶液的种类有关; C 为溶液的质量百分比浓度。将式(3)代入式(2)可得

$$\frac{I}{I_0} = k_1 k_2 \left[\frac{n_{\text{纤}} - B - AC}{n_{\text{纤}} + B + AC} \right]^2 \quad (4)$$

因此,通过对反射功率的测量,可求得反射功率与光源输出比同待测溶液浓度间的关系。只不过,由于式(4)中功率比并非溶液浓度 C 的简单函数,在定标后才可进行浓度的绝对测量。

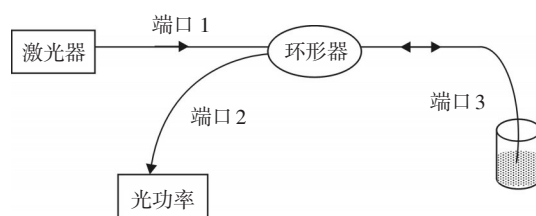


图 1 溶液浓度测试装置原理图

2 传感特性分析

由于式(4)的复杂函数关系,反射功率比同溶液浓度变化间的关系特性不能直接体现。因此,有必要对这一特性进行探讨。对于式(4)中相关系数的确定可通过实验完成。

在 19 °C 的室温条件下,用阿贝折光仪对质量浓度为 10%、20%、30%、40%、50%、60% 和 70% 蔗糖溶液的折射率进行了测量,其折射率分别 1.347 8、1.363 8、1.381 2、1.399 8、1.420 0、1.441 9 和 1.465 5。蔗糖溶液浓度随折射率变化关系曲线如图 2 所示,基本保持线性关系。通过线性拟合有浓度 $n = 0.001 9C + 1.325 7$,拟合度达到 99% 以上,得 A 和 B 的取值分别为 0.001 9 和 1.325 7。

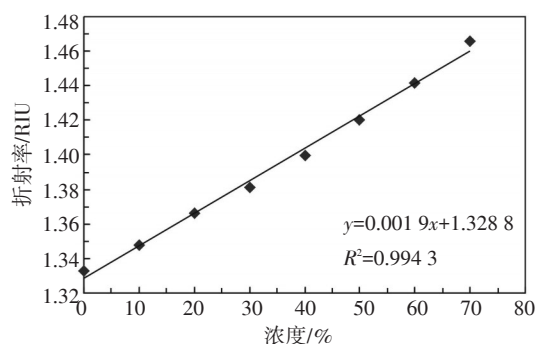


图 2 蔗糖溶液折射率随浓度的变化关系

在式(4)中,取 $n_{\text{纤}} = 1.468 2$ 后,可得式(5)

$$\frac{I}{I_0} = k_1 k_2 \left[\frac{0.142 5 - 0.001 9C}{2.793 9 + 0.001 9C} \right]^2 \quad (5)$$

通过数值计算,并进行归一化处理,其中 k_1, k_2 可取大于零小于1的值。可得功率 I/I_0 与溶液浓度 C 的关系如图3所示。其线性拟合度达到了99.99%。所以理论上,反射功率/入射功率值随溶液浓度的变化应该具有线性关系。因此,通过图1所示测量系统,用标准浓度液体进行定标以后,就可以利用此种线性关系进行溶液浓度的测量。

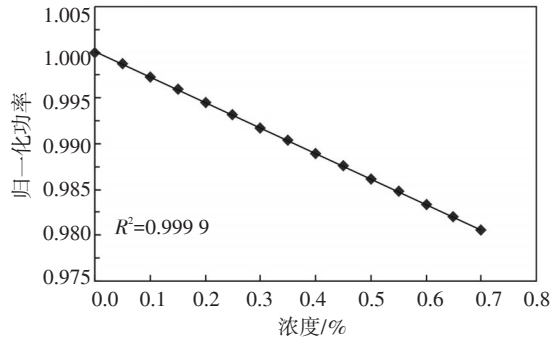
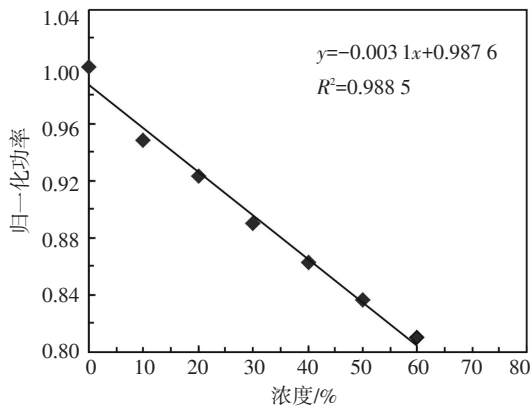


图3 功率随浓度的变化的数值模拟曲线

3 实验结果与分析

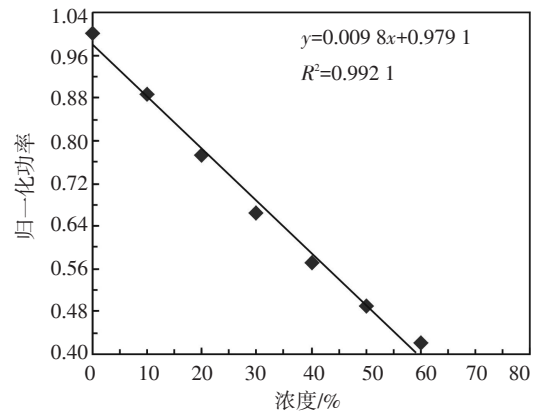
为了从实验上验证反射功率随溶液浓度的变化关系,利用图1所示实验装置进行了蔗糖溶液和葡萄糖溶液浓度的测试实验。每次测量前,先对纯水进行测量,并以测得的反射功率为参考,计算出换用不同浓度溶液时反射功率与纯水时反射功率比。

实验获得的蔗糖溶液和葡萄糖溶液对应的功率随测试溶液浓度变化关系如图4所示。其中图4a是蔗糖溶液的,图4b是葡萄糖溶液的。由图可见,两种溶液测试过程中的功率均随浓度变化呈现了良好的线性关系,其线性拟合度分别达到了98.85%和99.21%。对于蔗糖溶液反射功率随溶液浓度变化的拟合公式为 $y = -0.0031x + 0.9876$, 葡萄糖溶



(a)蔗糖溶液

液的则为 $y = -0.0098x + 0.9791$, 其中 y 和 x 分别代表反射功率比和溶液浓度。



(b)葡萄糖溶液

图4 功率随溶液浓度变化实验曲线

实验结果与理论分析结论完全吻合,即反射功率随浓度的变化可按照 $y = q_1x + q_0$ (q_1 和 q_0 为待定常数)线性关系来处理,只不过对于不同种类的溶液, q_1 和 q_0 取不同的值。

4 结论

提出了一种新型的溶液浓度测试方法,通过利用溶液浓度与折射率间的线性关系,建立了基于光纤端面菲涅耳反射原理的溶液浓度检测方法的理论模型。理论分析表明,光纤端面反射功率与溶液浓度间存在线性关系。利用已知浓度的蔗糖溶液和葡萄糖溶液进行实验研究,实验证明,光纤反射端光强随溶液浓度变化均符合线性关系,反射功率与初始功率的比值分别可表示为 $y = -0.0031x + 0.9876$ 和 $y = -0.0098x + 0.9791$, 其线性拟合度均达到99%以上。该测量系统不仅可以测量溶液的浓度,稍作改进后,还可以对溶液密度、折射率以及热光系数等物理量进行测量。具有线性度高、操作简单,易于实现等特点,在生化分析传感领域实现网络化在线实时监测方面具有非常广阔的应用前景。

参考文献

[1] Gennarelli G, Romeo S, Scarfi M R, et al. A microwave resonant sensor for concentration measurements of liquid solutions[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(5) :1857-1864.

- [2] WU Yi T, HUANG Xu G, SU Hui. A quasi-distributed fiber optic sensor for solute concentration measurement based on Fresnel reflection[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(13):1101.
- [3] 姜德生,魏仁选. 基于光纤F-P干涉波长的溶液浓度测量系统研究[J]. 中国激光, 2004, 9(9):1127-1131.
- [4] 张志伟, 武志芳. 一种测量溶液浓度的光纤传感器[J]. 中北大学学报, 2005, 26(3): 216-218.
- [5] 曾捷, 梁大开. 基于SPR光谱分析的液体折射率测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 723-727.
- [6] 张季熊, 张梅. 利用临界角附近光能量的变化测量溶液浓度[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4):386-389.
- [7] 王正彦, 于正河, 范延滨. 液体浓度测量 FFP 传感系统的设计与应用[J]. 青岛大学学报, 1998, 13(1):24-26.
- [8] 黄振健, 黄旭光, 陈基焕, 等. 基于光纤折射率传感原理的溶液密度测定方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 409-413.
- [9] HUI Su Author Vitae, XU Guang-huang, Author Vitae. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions[J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2007, 126(2):579-582.
- [10] 白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. 延安大学学报, 2004, 3(23): 33-34.
- [11] 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, 2009, 33(3): 281-285.

(上接第41页)

实验需要校定的嵌入式容栅精度为0.01%。本校定装置的精度为0.001%。从表1实测数据可以看出,容栅传感器虽然分辨率较高,但其利用容栅的电容周期性变化测转速,当转速较大时,容易被电路的噪声所干扰,文中校定装置采用光栅经过信号调理,经FPGA在50 MHz系统频率下将光栅信号转化为脉冲并计数,分辨率较高,故能对光栅进行很好的校定。

5 结 论

虽然容栅传感器借助电容的周期性变化以及差动电容的相位差来加载转速信息和扭矩信息,但是在转速较大的情况下,容栅电信号容易受到电路噪声的干扰。文中主要针对嵌入式容栅传感器,设计了一款容栅转速校定装置,本装置的精度高于容栅传感器,可以对容栅传感器测得的速度进行校定。在后续的扭矩信号处理中,经过校定的容栅传感器可更精确地测得转动转置的扭矩。

参考文献

- [1] 翁睿, 张海峰, 刘晓为. 悬浮转子式微陀螺的反电动势转速检测[J]. 光学精密工程, 2013, (10):2566-2573.
- [2] 吴鸿, 陈冲, 李超, 等. 一种基于PSD的转速测量新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, (9):1033-1039.
- [3] 曾祥楷, 陈阳, 朱志雄, 等. 空间滤波转速遥测中旋转方向的辨识方法[J]. 光学学报, 2015, (6):120-128.
- [4] 张慧, 曹咏弘, 马铁华, 等. 基于线圈式地磁传感器的高速旋转弹转速测试[J]. 战术导弹技术, 2009, (4):64-67.
- [5] 谢锐, 马铁华, 武耀艳, 等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, (4):844-849.
- [6] 裴东兴, 王文武, 崔春生. 利用转速测试弹丸炮口速度的方法研究[J]. 兵工学报, 2013, (1):125-128.
- [7] 刘双红, 靳鸿, 张海龙, 等. 分离式差分结构容栅传感器转速扭矩测试系统[J]. 探测与控制学报, 2013, (5):49-52.
- [8] 岳晗, 裴东兴, 张瑜, 等. 弹丸转速-炮口速度无线弹载测试系统设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, (1):71-74.
- [9] 郑谭. 高速旋转轴的动态扭矩测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [10] 胡家华, 徐鹏, 郑昌雨, 等. PL2303单片机串口转USB口实现串行通信[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2013, (4):76-77+81.
- [11] 于海. 小型绝对式光电编码器动态误差检测系统及方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [12] 李曼, 许宏. 激光栅栏探测技术[J]. 光电技术应用, 2015, 30, (3):11-13.
- [13] 杨鹏, 范迪, 曹茂永. 基于单片机的智能压控PWM发生器设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, (1):65-67.
- [14] 曹李莉, 王有春, 周雷. 通用化数据采集处理系统的LabVIEW实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, (4):1375-1377+1384.
- [15] 李锋, 祝玉芳, 程坤. 基于FPGA的电容式编码器数据采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, (1): 195-197.