

摘要: 介绍了一种基于分布式光纤传感器的溶液浓度的自动监测系统。该系统采用单片机作为系统的信号处理单元,以发光二极管(LED)为光源,利用脉冲宽度调制(PWM)方式控制发光脉冲,通过光纤传递光信号,用测量反射光的光纤探头作为敏感元件,对雪崩光电二极管(APD)接收到的采样信号进行处理,通过光纤将多个光纤溶液浓度传感器联成分布式测量网络,可以实现溶液浓度的大面积实时智能监控。通过对氯化钠(NaCl)溶液进行检测,得出系统的浓度检测灵敏度为0.1%,在1%浓度梯度下,其误差范围不大于0.7%。

关键词: 分布式; 光纤传感器; 溶液浓度; 自动监测

中图分类号: TP212; TP277 文献标识码: A 文章编号: 1006-883X(2018)03-0013-05

收稿日期: 2018-01-18

基于分布式光纤传感的溶液浓度自动监测系统

王燕飞 丁楠 程跃

中国电子科技集团公司第八研究所, 安徽合肥 230051

一、前言

浓度是表征介质溶液特征的重要参量之一,浓度测量的必要性日益凸显,在造纸、化工、制糖、食品、制药、水体监测等行业有着重要的应用。在以液体为主的生产工艺中有的需要将原料分离,有的需要投入中间原料,在这种生产线上,对溶液浓度的测量与控制变得非常重要,否则产品的质量难以保证,甚至会造成巨大的经济损失。为了控制生产过程,提高产品的质量和产量,提高经济效益,进行科学管理,液体浓度的在线监测就显得尤为重要。

有关测量浓度的方法有很多种,目前技术已经比较成熟并且得到应用的方法有电容法、光电法、超生光栅法、掠入射法等。但是在溶液的监测方面,尤其是在在线溶液浓度的监测与控制方面还处于较落后的状态。在食品、化工、生物、医药等方面的试剂生产过程中,需要对多组分的溶液进行定量分析,这就要求对溶液浓度进行实时监测。

光纤传感技术是伴随着光纤通信的发展而出现的

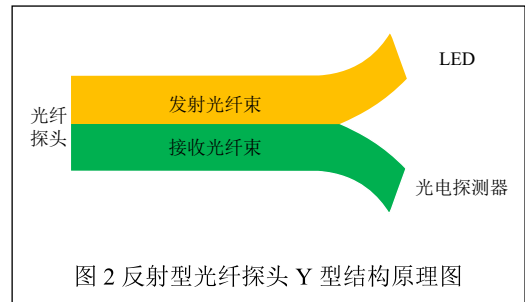
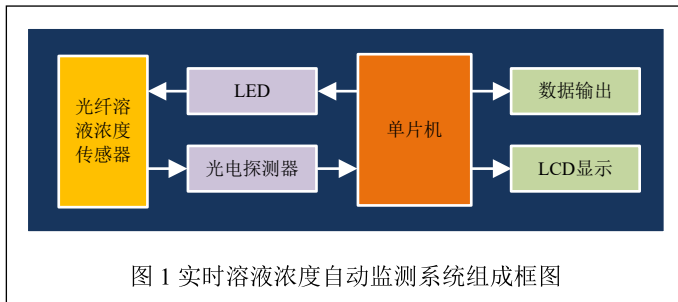
一门崭新的技术^[1]。与传统传感器相比,光纤传感器有着耐腐蚀,抗电磁干扰,灵敏度高等优点,对于浓度的测量更加实用和精准,有着很好的市场前景和良好的发展趋势。随着时代的需要,在高电压、大噪声、高温、强腐蚀性等很多特殊环境下进行浓度测量,基于光纤测浓度更是突显它的优势^[2-3]。

本文基于对光纤技术的分析,提出了一种基于光纤传感器的浓度实时智能监测系统,以单片机作为数据处理和系统监测控制部件,以反射结构的光纤探头作为敏感元件和光纤作为光通路,并能通过合理的软件算法,实现系统对溶液浓度的分布式实时监测。

二、实时溶液浓度自动监测系统

1、系统组成

实时溶液浓度自动监测系统组成框图如图1所示。主要由光纤溶液浓度传感器、LED光源、光电探测器、单片机、LCD显示等构成。采用单片机调节LED的工作电流,提高信噪比,提高仪器的抗干扰能力。系



统采用单片机控制 PWM 发光方法，即在每测量一次数据的周期内，LED 发光时间固定，同时光信号由光电探测器转换为电信号，放大后进行取样保持^[4]。一旦采集完成，则单片机进行数据处理，此时 LED 不发光。由于 LED 处于占空比较小的 PWM 发光状态，使 LED 工作在物理特性最好的阶段，从而保证 LED 光源稳定的发光，且可延长 LED 的实际使用寿命。

2、主要元件

(1) 光纤溶液浓度传感器

光纤传感器是通过被测物理量（例如液体浓度、折射率等）对光纤内传输的光进行调制，使传输光的强度、相位、频率或偏振态等特性发生变化，然后对被调制过的光信号进行监测的一类新型传感器，具有远程和抗化学腐蚀性。

由光折射和反射的 Snell 定律可知，当光波入射到两种媒介的交界面时，反射率与相邻两种媒介的折射率（纤芯 n_1 、包层 n_2 ）有关。当包层为待测溶液，即待测溶液的浓度发生变化时，其折射率 n_2 必然发生变化，从而使通过反射回到纤芯的光也发生变化，通过测量接收端光强的大小，就可以得到待测溶液的浓度变化。

光纤溶液浓度传感器^[5]常采用 Y 型结构，如图 2 所示。Y 型结构的光纤是由两束光纤束组成，一端合并在一起组成光纤探头，另一端分为两支，分别作为发送光纤束和接收光纤束。其基本传感原理是：光从光源耦合到发送光纤束，通过光纤传输，射向反射体，再被反射到接收光纤束，最后由光电探测器接收，光电探测器接收到的光强度与反射体溶液浓度、光纤探头的结构有关。根据工作的原理，再结合溶液浓度监测的要求可知

光纤反射型敏感元件是整个实验装置的关键部件，用光纤熔接器进行熔接制成，以和被测溶液直接接触的探头熔融部分作为反射体。

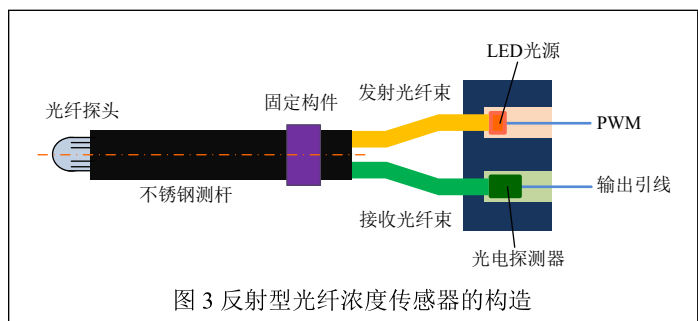
LED 发出来的光通过发送光纤束传输到光纤探头，经过光纤探头发送到待测溶液，有一部分光透过，而其余的光被反射回来。当待测溶液浓度恒定时，透射光强度和反射光强度恒定；当待测溶液的浓度发生变化时，其折射率也发生变化，此时反射回光纤的光强度也发生变化。因此，利用光电探测器测量光纤探头探测到的反射光强度^[6]，通过反射光强度可计算出待测溶液的浓度，从而获得待测溶液浓度变化的信息。

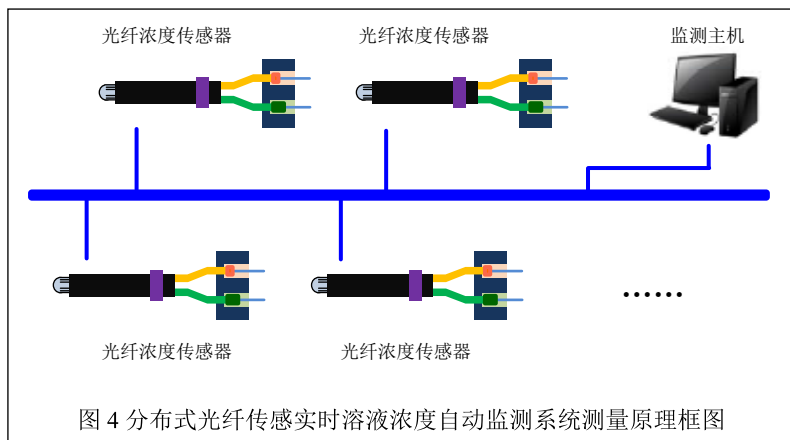
光纤浓度传感器的构造如图 3 所示。LED 光源发出的脉冲光经光纤传输后发生到待测液体中，经过光纤探头探测后，通过接收光纤束传输到光电探测器中，光电探测器将光信号转换为电信号，再通过数据分析处理，得出检测结果。

光纤传感器的测量单元安装在监测待测溶液的现场，光电转换箱、二次仪表、电源和计算机系统安装在仪表控制室，两者之间通过光缆连接，完全做到待测溶液现场无电监测^[7]。

(2) 光源的选择

一般所使用的光源是半导体激光器，其发光是利





用光的受激辐射原理，耦合效率高、响应速度快，但价格比较高。半导体发光二极管（LED）具有体积小、易于集成、能耗低、输出功率稳定；从近红外到可见光以及紫外都有相应波段的产品，波长选择范围广；工作电压低、功耗小；驱动简单、使用寿命长、性能稳定可靠、工作寿命长而且发光响应速度快等优点，作为微型化光源受到广泛的关注。同时可以采用精密的光学及芯片加工技术将某些单元集成在芯片上，使整个光路进一步微型化。

（3）光电探测器的选择

经过比较多种光电探测器后，选择雪崩光电二极管（APD）比较合理，因为当电压等于反向击穿电压时，电流增益可达 106，即产生所谓的“雪崩”。这种管子现场标定简单，另外响应速度特别快，带宽可达 100GHz，是目前响应速度最快，灵敏度很高的一种光电二极管。理论证明，APD 的雪崩增益（响应度）是环境温度和偏置电压的函数^[8]，其稳定性直接影响了整个实验装置的测量灵敏度。为了使 APD 能以恒定的增益工作，通过单片机调节 APD 的偏置电压使其随环境温度的变化而按一定比例改变，可保持 APD 增益不变。

（4）单片机

溶液浓度受温度等因素影响，监测时还要注意外界光的干扰因素、被控制的反馈量等对监测信号的作用，采用单片机可以灵活地编程，实现复杂的监测控制。选用凌阳 SPCE061A 单片机，具有 8 通道的 10 位 A/D 转换器，并具有 ISP（在系统可编程）/IAP（在应用可编程）。SPCE061A 具有两路 PWM 输出功能，利用单片机 I/O 端口输出 PWM 信号即可控制 LED，采用软件生成 PWM 的方法，通过分频产生 4Hz 的时基信号，利用时基中断，改变 I/O 端口的电平

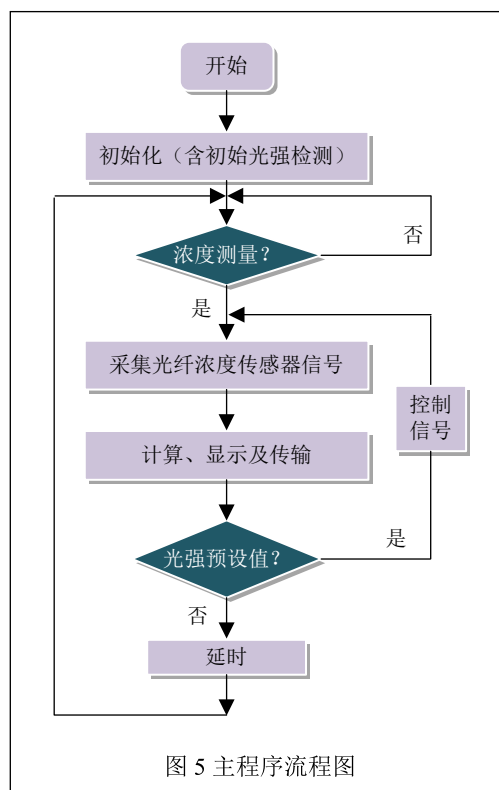
状态，从而模拟特定占空比的 PWM 波形，输出 4 位可调脉宽比 PWM 信号。另外采用中断方式定时，让定时开启 LED 发光电路。为了给 LED 提供足够的电流，将 PWM 信号发给 LED 驱动芯片^[9]，由驱动芯片直接控制驱动 LED。

三、分布式光纤传感实时溶液浓度自动监测系统

分布式光纤传感实时溶液浓度自动监测系统测量原理框图如图 4 所示，系统采用多个光纤浓度传感器组网，利用光纤作为信号传输通道，可以实时测量多个不同位置的浓度值。测量值同时反馈到监测主机，可以对较大范围内溶液浓度进行实时监控。

四、软件设计

根据要处理的信息，编写的单片机主程序



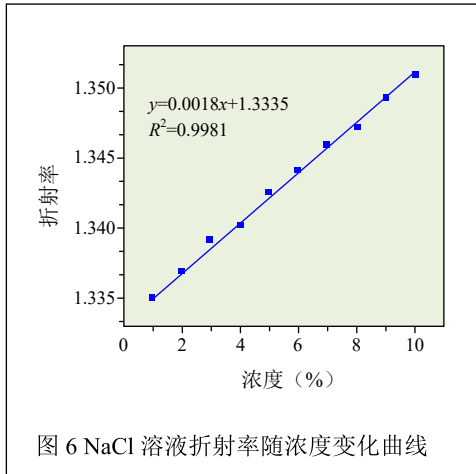


图 6 NaCl 溶液折射率随浓度变化曲线

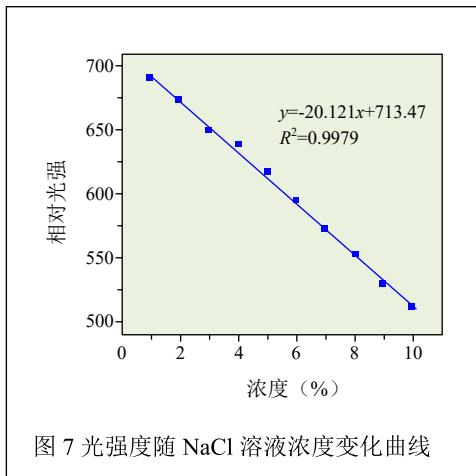


图 7 光强度随 NaCl 溶液浓度变化曲线

流程如图 5 所示。程序开始后，通过初始化，对检测到的光信号进行归一化，随后单片机控制光源向溶液发射光信号，光电探测器检测反射光信号，并与数据库中的原始数据进行对比分析，当测量到的光信号超过光强预设值时，系统发出报警信号。

程序中包含定时的常规监测，如果接近监测浓度的临界值时加大测量频率，这样间断测量和连续测量相结合，既满足实时测量的要求，又有利于提高 LED 和光电探测器的使用寿命。监测部分程序的关键是采用合理的算法。根据待测溶液浓度控制的特点，设定多个测量点^[10]，根据溶液浓度、温度对溶液的影响、溶液中颗粒的散射、外界光的干

扰因素等，调节算法的权重，得到合适的计算参数。

五、系统性能测试

(1) 误差范围

在室温条件（25℃）下，使用高精度电子天平称量，依次配制 1%、2%、3%、4%、5%...10% 的 10 种不同浓度的 NaCl 溶液，测量不同浓度 NaCl 溶液折射率，如图 6 所示。利用光纤溶液传感器检测不同浓度的 NaCl 溶液，得出光强度与信号随 NaCl 溶液浓度变化曲线，如图 7 所示。为了减小外界因素的干扰（如机械振动、空气扰动等），实际测量取 5 次测量的平均值。

从图可以看出，NaCl 溶液折射率与溶液浓度变化曲线呈正相关，其相关系数为 0.9981，检测到的光强度与 NaCl 溶液浓度呈负相关，其相关系数为 0.9979。由图 7 数据可知，系统测量误差不大于 0.7%。由于光强度与溶液浓度之间的高度相关，因此可以通过检测光强度信号计算出溶液浓度。通过建立不同温度及流速条件下的溶液浓度数据库，可以实时得出待测溶液浓度。

(2) 检测灵敏度

在室温条件（25℃）下，采用高精度电子天平称量，依次配制 3 组不同浓度的 NaCl 溶液，如表 1 所示。利用光纤溶液传感器检测不同浓度的 NaCl 溶液，得出光强度随 NaCl 溶液浓度变化曲线，实验值取 5 次测量的平均值。

表 1 不同浓度 NaCl 溶液检测误差

组别	浓度 (%)					误差范围 (%)
1	1	2	3	4	5	≤ 0.7
2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	≤ 1.5
3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	≤ 12.3

从表 1 可知，光纤溶液传感器对浓度梯度为 1% 的溶液误差小于 0.7%，对浓度梯度为 0.1% 的溶液误差小于 1.5%，对浓度梯度为 0.01% 的溶液，检测结果出现较大误差。因此，光纤溶液传感器对 NaCl 溶液的检测灵敏度为 0.1%。

六、总结

分布式光纤传感智能浓度测量系统将单个光纤溶液传感器分布式组网，以单个光纤传感器为敏感元件，构建了一个溶液浓度实时测量系统。通过对 NaCl 溶液进行检测，得出系统的浓

度检测灵敏度为 0.1%，在 1% 浓度梯度下，其误差范围不大于 0.7%。系统操作方便、实用性强。通过光来检测和传输信息，因而现场可以不用电信号，灵敏度高、响应速度快、动态范围大，可适用于远距离遥感，便于推广使用。利用光纤传感器具有很强的抗干扰能力、耐高温、耐腐蚀的优点，及以光纤作为信息传输的通道，构建溶液监测的多测量点网络系统，以 LED 作为光源，节约设备生产成本及使用成本。在造纸、化工、制糖、食品、制药、水污染监测、石油化工等行业有着重要的应用前景。

参考文献

- [1] 李炳炎. 光纤液体浓度传感器的研究 [J]. 山东电子, 1998, (4): 5-6.
- [2] 王颖. 棱镜型光纤液体折射率传感器关键技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [3] 马健, 郑羽, 余海湖. 基于腐蚀光纤的温度及葡萄糖溶液浓度传感器 [J]. 光子学报, 2017, 46(4): 136-143.
- [4] 张娜, 李秀媛. 基于 8031 单片机的智能化液体浓度测量系统的研究 [J]. 电子器件, 2003, 29(1): 227-230.
- [5] 张娜. 光纤传感器液体浓度检测系统的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [6] 方宏, 秦曦. 光纤传感器中光源的选用及比较 [J]. 传感器世界, 2004, (11): 13-17.
- [7] 杨帆. 传感器技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [8] 赵洪志, 李乃吉, 赵达尊. 基于背向喇曼散射的分布式光纤温度传感器 APD 最佳雪崩增益的分析 [J]. 传感器技术学报, 1997, 10(3): 27-31.
- [9] 张毅刚. 单片机原理及接口技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [10] 雷芬芬, 骆青君, 周斌. 基于 OTDR 的光纤液体泄漏检测的研究 [J]. 华南师范大学学报 (自然科学版), 2017, 49(3): 17-21.

An Automatic Real-time Monitoring System for Solution Concentration Based on Distributed Optical Fiber Sensors

WANG Yan-fei, DING Nan, CHENG Yue

(The No.8 Research Institution, China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230051, China)

Abstract: An automatic real-time monitoring system for solution concentration based on distributed optical fiber

sensor is introduced in this paper. The system uses MCU as the signal processing unit, light emitting diode (LED) as the light source, and pulse width modulation (PWM) as the control way of light pulses. With optical fiber as transmission media of optical signals and optical probe as sensitive element for the measurement of reflected light, the system processes the sampled signals received by the avalanche photodiode (APD). Several optical fiber solution concentration sensors are combined into a distributed measuring network through optical fibers, so the solution concentration can be monitored in a large area in real time. The concentration of NaCl solution is measured with the system, and the results show that the sensitivity of the system is 0.1%, and the error range is less than 0.7% under the concentration gradient of 1%.

Key words: distributed; fiber optic sensor; solution concentration; automatic monitoring

作者简介

王燕飞: 中国电子科技集团公司第八研究所, 博士, 主要从事光电检测和光电系统研究。

通讯地址: 安徽省合肥市包河区大连路 6666 号中国电子科技集团公司第八研究所传感部

邮编: 230051

邮箱: wangyf365@163.com

丁楠: 中国电子科技集团公司第八研究所, 高级工程师, 主要从事光纤传感研究。

程跃: 中国电子科技集团公司第八研究所, 博士, 主要从事光纤传感研究。