

基于线阵 CCD 的液位测量系统设计

陈成¹ 杨海马^{1,2} 涂建坤² 刘瑾¹ 乐燕芬¹ 毕继耀¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 上海电缆研究所 上海 200093)

摘要: 在化学试剂定容测量领域,试剂的液位高度是重要的被测参数之一。传统的液位测量方法存在测量精度不高、测量数值不连续、难以实现非接触测量等缺陷。通过研究透明化学试剂液位的在线检测方法,设计了一种高精度非接触式的光电液位检测系统,以 FPGA 为主控制器,驱动线阵 CCD 进行液位传感,接收经过平行光束透射的光信号,在驱动时序的作用下进行自扫描转换成便于处理的一维图像信号,送 PC 机中进行处理,对实际液位和图像边缘像素点之间的关系进行分析,实现了液位高度的测量。经实验验证,本系统绝对精度达到 $10\ \mu\text{m}$,测量分辨率优于 $2\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 定容;液位高度;精度高;FPGA;线阵 CCD

中图分类号: TN386.5; TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of liquid level measurement system based on linear CCD

Cheng Chen¹ Yang Haima^{1,2} Tu Jiankun² Liu Jin¹ Le Yanfen¹ Bi Jiyao¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Electric Cable Research Institute, Shanghai 200093, China)

Abstract: Traditional liquid level measurement methods have many defects, such as measurement accuracy is not high, measurement is not continuous, non contact measurement is difficult to achieve. By studying the transparent reagent liquid level online detection method, the paper designs a kind of non-contact photoelectric liquid level detection system, The system mainly uses FPGA as the main controller, FPGA drives linear array CCD for liquid level sensor, CCD receives the light signal, which is transmitted through the parallel light beam. Under the action of the driving sequence, the optical signal is converted into one dimension image signal which is easy to be processed by the self scanning mode. Then, the image signal is sent to the PC machine for processing. Last, by analyzing the relationship between the actual level and the image edge pixels, so the measurement of liquid level is realized. The experimental prove that the absolute accuracy of the system can reach $10\ \mu\text{m}$, and the measurement resolution is better than $2\ \mu\text{m}$.

Keywords: stant volume; liquid level; high precision; FPGA; linear CCD

1 引言

针对一些场合对液面高度的测量精度要求很高,比如绝大多数医药及化学试剂具有腐蚀性,易挥发性,且对试剂的纯度有严格的应用要求。而接触式测量仪器(如浮子式液位计,压阻式液位变送器等)有着易出故障,价格高等特点,同时,由于检测器与被测液体直接接触,造成检测器件本身侵蚀,一定程度限制了其应用^[1]。

非接触式液位检测,其测量方法主要有超声波、红外线、激光等。这些方法的测量精度较高,但是,这些方式对检测环境要求高,并且成本高,通用性不强,自动化程度低,实际应用并不广泛。针对以上,开发一种高精度、高速度、智能化、小型化的液位测量系统成为液位检测领域的一个

研究重点。为了实现液位的在线自动测量^[2],本文提出了一种光电液位检测方法,该方法利用线阵 CCD 采集信号的精度高,在一些非接触测量领域有着一定的应用。本文设计了一种基于激光和线阵 CCD^[3]的非接触式液位测量系统,通过 FPGA 驱动线阵 CCD,以线阵 CCD 接收光信号并转换成电信号,将电信号数字化后输入计算机中,经过处理得到液位信息。这种方法具有非接触和高精度的特点,很大程度上解决了传统测量方法的弊端。

2 光学成像系统的设计

2.1 光路整体结构

通过在光学工程软件 ZEMAX 软件中辅助下进行非序列液面监测系统的模拟,创建了光路整体模型。整体模型

如图 1 所示。在这个系统中,激光二级管点光源经过平凸面镜整形扩束为平行光,此平行光通过小缝隙成为线平行光。线平行光照射“透明试剂”后,探测器模拟线阵 CCD 接收光信号,在探测器上可明显观察到液面处上下的光通量不同,并且可以精确的得出液面的高度。其中,透明试剂用装有水的试管模拟。本设计根据实际物体大小和距离的比例设置。例如,实际物体长为 20 mm,则在仿真过程中设置该物体长 2 个单位。图中所标定的参数都是仿真时所设置的。在 ZEMAX 软件中模拟出整体模型,3D 模型如图 2 所示。

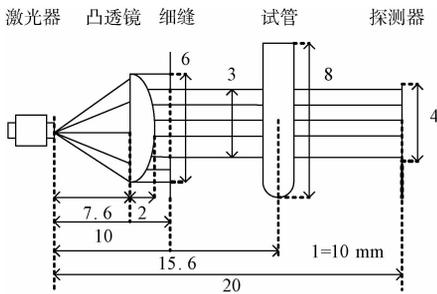


图 1 整体模型

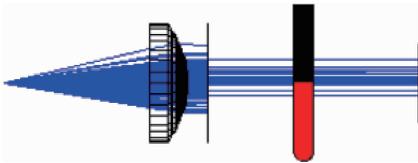


图 2 3D 模型

2.2 方案可行性分析

在整体光路搭建后,通过观察探测器接收到的光斑的伪彩色图形(图 3)和横截面光通量大小的图形(图 4),判断出光照射到液体后有无变化产生。发现经过光线追迹后,在伪彩色图中可观察到某个位置的左右光通量明显不同,且光线到达探测器的位置也不同,由此确定此处为液面处。因为存在这种物理现象,若选线阵 CCD 作为图像传感器,则可以根据线阵 CCD 光敏单元的像素值梯度可以确定液位。在横截面图中,可观察到看到探测器中间横截面的光通量大小,因此在每一点坐标对应着不同的液位高度,反映了液位高度的变化,由此可以看出,此方案测量液位是合理、可行的。

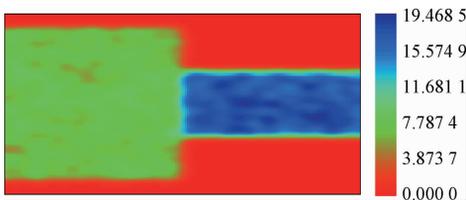


图 3 液位上边缘信息伪彩色图

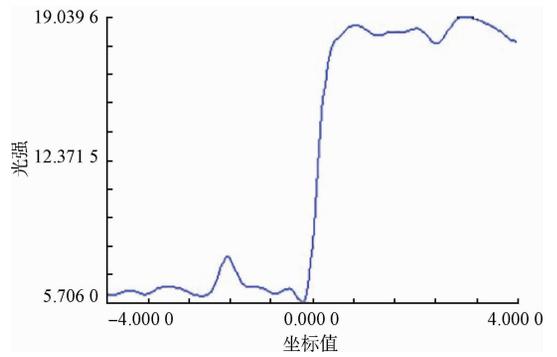


图 4 横截面图

3 线阵 CCD 检测系统设计

3.1 液位高度检测原理

本文所采用的是透光式光电检测^[4-5],由于空气和溶液对光线的透射率不同,所以通过试管中溶液部分与空气部分形成的光强就不同,当平行垂直入射光线通过试管溶液部分和空气部分后,图像传感器光敏单元表面的像素值会有明显不同^[6]。图像传感器将光敏单元的光强信号转换成电荷信号输出,在驱动和开关信号作用下输出一帧视频信号,经信号处理后可以得到被测对象的尺寸结果。

通过分析可知不同像元幅值对应被测对象不同的部分,线阵 CCD 的像元间的间距为固定值,而被测对象在一定范围内所覆盖的光敏像元的个数是可以确定的,因此可以得到液位的测量值,通过测量值与约定真值之间的误差分析,可以确定系统误差,从而找到对应的补偿系数。

$$L = knp + b \tag{1}$$

式中: p 为像元中心距离, n 为像素点的个数, k 和 b 为对应的补偿系数, L 为高度示值。

3.2 检测系统结构

如图 5 所示,其为设计的检测系统整体架构。系统中采用 FPGA 作为主控制器为线阵 CCD,ADC 和 USB 提供驱动信号;图像传感器选用了型号为 TCD1304DG 的线阵 CCD,具有 3 648 个像元,每个像元的尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,有效感光长度为 29.1 mm 灵敏度高。输出稳定性好,最短积分时间可以缩至 $10 \mu\text{s}$;ADC 采集模块是 16 位

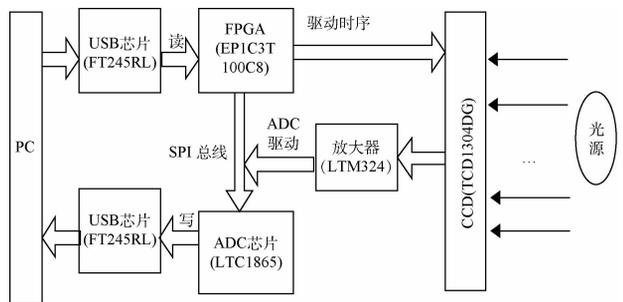


图 5 检测系统硬件架构

逐次逼近型,有 8 个通道,3 线 SPI 兼容串行接口通信。由于采集的数据点比较多,选用了一种专用的 USB 转并口通信芯片来保证上,下位机数据传输的速度和稳定性。

3.3 软件程序流程

主程序流程如图 6 所示。

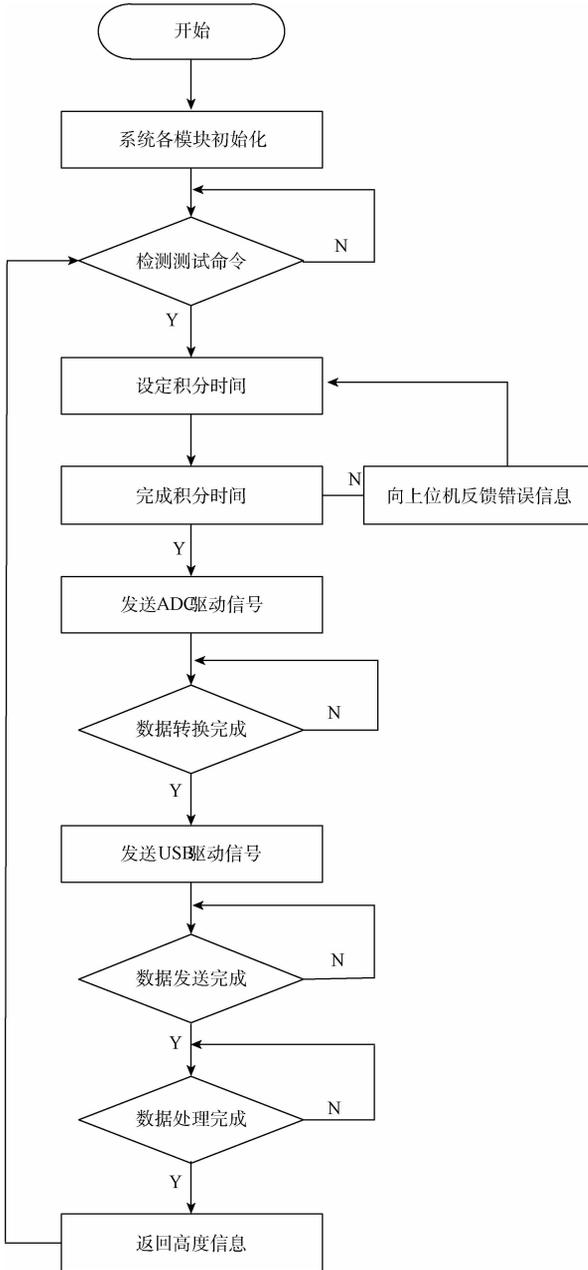


图 6 程序流程

在系统中,由于时序控制时 CCD 需要的 MCLK 信号是 500 kHz,而线阵 CCD 与 ADC 的时序频率的整数倍易于保持同步,取 ADC 的采样频率为 125 kHz 符合要求。而在数据传输时为了降低数字信号的误码率,FPGA 接收的数字信号不会立刻传输到上位机,将延迟一个数据

周期,保证传输的稳定性和正确性^[7]。

4 数据处理

4.1 液位高度的计算

由于液体比空气的折射率大,会造成液位处的上,下两部分的光的汇聚能力产生差异,这样会使得线阵 CCD 采集到的光强信号在液位对应处产生变化,也就是说线阵 CCD 采集到的光强图像信号中的突变部分反映了试管中的液面位置,所以,线阵 CCD 采集的信号突变部分对应着待测液体的液位高度。为了找到其数学模型,需要对图像边缘进行提取。在获取单帧 CCD 数据(共 3 648 个点)后,将其像素点分别标记为 $n_0, n_1, n_2, n_3, \dots, n_{3647}$, 对应的灰度值为 $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{3647}$ 。为了抑制图像中的噪声,便于后续信号的分析与处理,采用了局部均值滤波方法去噪,根据目标点和目标点前后两点做均值替换目标点的值。

$$p_0 = \frac{1}{3}(2 \times p_0 + p_1)$$

$$p_i = \frac{1}{3}(p_{i-1} + p_i + p_{i+1}) \quad (2)$$

$$p_{3647} = \frac{1}{3}(2 \times p_{3647} + p_{3646})$$

因此,对实际 CCD 输出的信号进行分析与处理。为了得到液位的高度,需要对一维图像进行边缘提取。为了提高边缘提取的精确性和稳定性,采用阈值比较方法^[8]与基于梯度算子的直线拟合法^[9]相结合进行液位边缘提取。实际边缘信号及液位变化曲线如图 7 所示。

通过阈值比较法设定上阈值 p_d 和下阈值 p_s ,将其表示为:

$$p_d = p_l + 0.75(p_h - p_l) \quad (3)$$

$$p_s = p_l + 0.25(p_h - p_l)$$

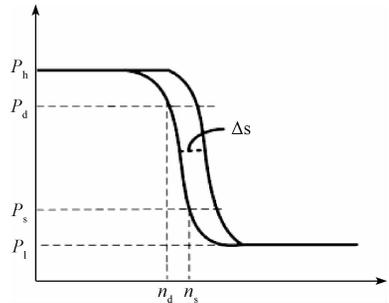


图 7 实际边缘信号及液位变化曲线

将从 $n_d \sim n_s$ 的像素点作为直线拟合的区域,求出这些点中相邻点的梯度幅:

$$R(i) = |f(i) - f(i-1)| \quad (4)$$

找到 $R(i)$ 的最大值,在最大值的两侧各取 2 个像素值。假设在 $i, i+1$ 两像素之间,对应的像素值为 p_i 和 p_{i+1} 。以点 i 为中心,选 4 个点,分别为 $i-2, i-1, i+1, i+2$ 用最小二乘法对这 5 个点进行直线拟合,设拟合直线为

$p_x = an_x + b$, 即求取参数 a, b , 使误差平方和 e^2 最小。

$$e^2 = \sum_{i=-2}^{i+2} (an_i + b - p_i)^2 \quad (5)$$

将 e^2 对 a, b 分别求偏导数, 并分别令其为 0, 有:

$$\frac{\partial e^2}{\partial a} = \sum_{i=-2}^{i+2} 2(an_i + b - p_i)x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial e^2}{\partial b} = \sum_{i=-2}^{i+2} 2(an_i + b - p_i) = 0 \quad (7)$$

由(6)和(7)得到

$$a = \frac{\sum_{i=-2}^{i+2} n_i \sum_{i=-2}^{i+2} p_i - 5 \sum_{i=-2}^{i+2} n_i p_i}{\left(\sum_{i=-2}^{i+2} x_i\right)^2 - 5 \sum_{i=-2}^{i+2} x_i^2} \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum_{i=-2}^{i+2} n_i \sum_{i=-2}^{i+2} n_i p_i - \sum_{i=-2}^{i+2} p_i \sum_{i=-2}^{i+2} n_i^2}{\left(\sum_{i=-2}^{i+2} n_i\right)^2 - 5 \sum_{i=-2}^{i+2} n_i^2} \quad (9)$$

由式(8)和(9)计算出 a, b , 可以得出拟合的直线。选取梯度最大值两点 i 与 $i+1$ 的像素值均值 p_e 作为阈值。

$$p_e = \frac{p_i + p_{i+1}}{2} \quad (10)$$

于是, 阈值与拟合直线的交点即为图像的边缘点, 得到:

$$n_e = \frac{p_e - b}{a} \quad (11)$$

即 n_e 为边缘像素点。

从而得到了液位高度表达式:

$$s = pkn_e + b \quad (12)$$

其中, p 是像元的尺寸大小 $8 \mu\text{m}$, n_e 为当前帧液位边缘像素点, k, b 为修正系数。

4.2 实验结果及数据分析

检测系统所采用的线阵 CCD 有效像素点是 3 648 个, 每个像素点间隔是 $8 \mu\text{m}$, 总计长度是 29.184 mm。通过对 3 648 个原始像素值分析知道, 液位边缘大约覆盖 200 个像素点, 在边缘提取时, 高低电平分别最少有 200 个像素点保证边缘提取的正确。因此量程为 5~25 mm, 在此区间液位边缘可以正确的提取。

通过注射器向试管内缓慢注入液体, 连续进行 20 次注入实验, 以水和乙醇为例, 每次添加溶液使液位上升 1 mm 左右。设测量系统的积分时间^[10]为 30 ms。

利用 MATLAB 对表 1 和表 2 的数据进行曲线拟合, 对待测的不同液体的液位值与图像信号中的像素点建立关系, 即对系统标定, 多次拟合后发现线性拟合误差最小, 得到的标定曲线如图 8 所示。

表 1 添加水的前 10 次实验数据

(mm)

实际液位	6.322	7.380	8.244	9.186	10.302	11.162	12.388	13.364	14.402	15.344
边缘像素点	87.0	101.4	113.2	125.4	139.8	151.4	166.2	179.6	193.0	205.4

表 2 添加乙醇的后 10 次实验数据

(mm)

实际液位	15.240	16.324	17.364	18.202	19.306	20.422	21.462	22.548	23.482	24.262
边缘像素点	222.2	238.6	254.4	267.2	284.0	301.2	316.4	332.8	346.4	358.2

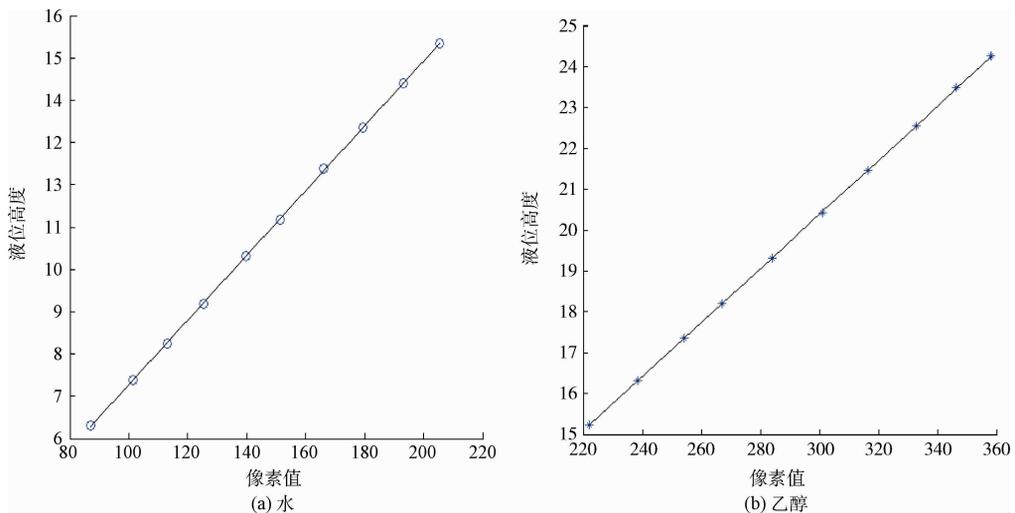


图 8 水和乙醇的标定曲线

不同试剂对液面高度的测量是有一定的影响的,因此对不同液体的测量,需要对其进行标定,对液位高度和相关的参量建立数学模型,根据数学模型能确定出液位的高度。

在对系统标定数据后,需要将系统测出的液位和实际液位相比较,以乙醇为例,取 10 次数据对比如表 3 所示。

表 3 数据验证

测量值/mm	5.402	7.706	9.452	11.734	13.086	14.262	16.436	19.104	22.432	24.548
实际值/mm	5.393	7.694	9.461	11.720	13.072	14.277	16.423	19.095	22.422	24.556
误差	0.009	0.012	-0.009	0.014	0.014	-0.015	0.013	0.009	0.010	-0.008

5 结 论

本文提出了一种高精度非接触式的液位测量系统的设计,利用了线阵 CCD 高分辨率等特点,结合 FPGA 和光学相关技术,设计了一种液位测量装置,体现了光电检测技术的应用广泛。经实验验证,该系统可以适用于不同液体的测量,有着量程大,精度高,成本低,有着广泛的应用前景,对测试测量技术有着积极的推动作用。

参考文献

- [1] 葛君山. 液位检测技术的现状与发展趋势[J]. 船电技术, 2013, 33(2): 43-45.
- [2] 田学隆, 林芳钦. 基于光电传感器的液位检测方法装置[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(10): 73-74, 78.
- [3] 阎树田, 王定祥, 张娜等. 基于 FPGA 的线阵 CCD 高速非接触检测系统的研究[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 95-97.
- [4] CHEKHOVSKIY A, TOSHIYOSHI H. The use of laser burst for volumetric display inside transparent liquid [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(8): 6790-6793.
- [5] 梅丹阳, 焦明印. 变焦距投影光学系统中的远心光路设计[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 264-267.
- [6] 郭万强, 康玉婷. 高精度玻璃管液位自动检测装

通过表中数据分析可知,该液位测量系统的分辨率优于 $2\ \mu\text{m}$,测量值与实际值得最大误差小于 $0.02\ \text{mm}$,绝对精度达到 $10\ \mu\text{m}$ 。因此系统的精度较高,满足测量要求。系统的误差是由多方面原因引起的,包括光源的照射效果,待测液体的密度大小和透光性,CCD 像元间距的不均匀和提取边缘像素点所引起的误差等这些原因。

置[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42(6): 645-648.

- [7] 陈健, 凌振宝, 陈鹏飞, 等. 近红外光谱仪数据采集系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 72-77.
- [8] LAZZARO D, MONTEFUSCO L B. Edge-preserving wavelet thresholding for image denoisy[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, 210(1): 222-231.
- [9] 翟青涌, 黄建国, 程玉华. 基于梯度算子的线阵 CCD 图像边缘检测方法研究[J]. 电子质量, 2009(10): 1-2, 12.
- [10] 毕继耀, 张大伟, 杨海马, 等. 线阵 CCD 光谱分辨率检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1086-1092.

作者简介

陈成, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统设计。

E-mail: 2274703503@qq.com

杨海马, 1979 年出生, 博士, 主要研究方向为光电智能仪器设计。

E-mail: snowyhm@sina.com.cn