

# 基于超声波的溶液浓度测量系统设计\*

兰 羽 汪晓红 周 茜

(陕西工业职业技术学院 咸阳 712000)

**摘要:** 在超声波时差法检测溶液浓度系统中,时间参量的检测精度只能达到微秒级,从而影响系统精度,为了提高溶液浓度检测精度,提出了超声波相位差法检测溶液浓度。在建立超声波相位差法模型的基础上,以单片机 MSP430F2272 作为处理器,采用双超声波收发为检测装置,设计了一种超声波的溶液浓度测量系统,选用数字鉴相器 AD9901 检测超声波通过标准样液与待测溶液相位差对应,经转换由单片机计算得到溶液浓度。实验表明,系统误差小于 1%,并且装置性能稳定,结构简单,符合预期设计要求。

**关键词:** 溶液浓度;超声波传感器;单片机 MSP430F2272;数字鉴相器 AD9901

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Design of solution concentration measurement system based on ultrasonic

Lan Yu Wang Xiaohong Zhou Qian

(Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** In the detection of the concentration of the solution system of ultrasonic time difference method, only the detection precision time parameter reaches microsecond, which influence the accuracy of the system, in order to improve the detection accuracy of solution concentration, the ultrasonic phase difference method to detect the concentration of the solution. Based on the ultrasonic phase difference model, with MSP430F2272 MCU as the processor, dual ultrasonic transceiver for detection device design solution concentration measurement system of ultrasonic, the digital phase detector AD9901 ultrasonic detection by standard sample solution and the solution to be measured by the corresponding phase difference, converted by the SCM calculated concentration. The experiment shows that the system error is less than 1%, and the device has stable performance and simple structure, which meets the requirements of the expected design.

**Keywords:** solution concentration; ultrasonic sensor; MCU MSP430F2272; digital phase detector AD9901

## 1 引言

在制药、食品、化工、造酒等行业中,需要对某些溶液浓度进行检测和分析<sup>[1]</sup>。超声波是一种频率高于 20 kHz 的机械波,其指向性好,具有光波折射、反射等特征,优于光波穿透性好<sup>[2]</sup>。其在液体介质中传播时,受液体介质的浓度、温度、比重、黏性度等诸多因素影响,只要液体介质的温度、比重、黏性度等参数已知,就可通过检测声波来检测溶液的浓度。目前超声波法溶液浓度检测仪大多是基于时差法。时差法是根据不同浓度溶液对超声波声阻抗不同,检测声波通过浓度溶液时间参量,计算得到溶液浓度,这种方法构成的检测系统电路复杂,受系统自身因素限制,系统检测精度较低<sup>[3]</sup>。

有实验表明,声波通过两种不同浓度溶液,接收探头处

的两路信号可观察到明显的相位差,将这两路信号通过滤波放大和整形,再经检相模块取出两路信号的相位差,该信号经转换后送入处理器,经运算处理能够获得待测液体的浓度<sup>[4]</sup>。本文利用传感器技术结合单片机技术,通过检测超声波相位差法和环境温度,再由溶液浓度函数模型计算出溶液浓度值。

## 2 创建数学模型

不同介质声阻抗不同,因此超声波在不同介质中波速会产生变化,同理声速在不同浓度溶液中传输也随溶液浓度的变化而发生变化,该信号的相位差的也随着变化,即溶液浓度与声波相位差成一定函数关系。本文通过检测声波相位差,从而得到被测溶液浓度<sup>[5]</sup>。为了确定影响声速变化的具体因素,需要建立关于溶液浓度、声波波速、相位差

和温度 4 个量关系的数学模型。

本系统针对葡萄糖溶液,建立浓度测量模型。选择两支直径完全相同玻璃容器,分别装纯净水和待测溶液,即创建两对声程完全相同,间距为  $L$  的超声波收、发射架构。设溶液温度为  $T$ ,超声波在纯净水中传播速度为  $C_t$ ,在待测溶液中的传播速度为  $C_{tx}$ ,待测溶液的浓度为  $x$ ,那么:

$$\begin{cases} C_t = C_0(1 + K_1 T) \\ C_{tx} = C_t(1 + K_2 x) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_0$  为  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时超声波在纯净水中的传播速度, $K_1$  为超声波在纯净水中的温度系数, $K_2$  为待测溶液的浓度比例系数。则超声波在纯净水中和待测葡萄糖溶液中传播时间时间差  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = \frac{L}{C_{TX}} - \frac{L}{C_t} \approx -\frac{K_2 L x}{C_t} \quad (2)$$

由于  $\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t$ ,其中  $\Delta\varphi$  为两路接收信号的相位差, $f$  为超声波发射频率,根据测量得到的相位差  $\Delta\varphi$  即可计算出液体的浓度  $x$ 。

令  $\varphi = \Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}$ ,则有  $\varphi = -\frac{K_2 L x}{C_t}$ ,从而得到溶液浓度:

$$x = \frac{\varphi C_0(1 + K_1 T)}{K_2 L} \quad (3)$$

当标定  $x_1$  点浓度时  $n$  即  $T = T_1, x = x_1, \varphi = \varphi_1$ ,则:

$$K_2 L = -\frac{\varphi_1 C_0(1 + K_1 T_1)}{x_1} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$x = \frac{x_1 \varphi(1 + K_1 T)}{\varphi_1(1 + K_1 T_1)} \quad (5)$$

式中: $T_1, K_1, \varphi_1, x_1$  均可预置调整,其表明溶液浓度  $x$  是溶液温度  $T$  和相位差  $\Delta\varphi$  的函数,即只要检测出超声波通过标准液与被测溶液的相位差,以及被测溶液温度  $T$ ,代入到式(5)就可计算出被测溶液的浓度值  $x$ 。

### 3 系统硬件设计

根据创建的超声波溶液浓度检测模型,系统选择单片机 MSP430F2272 为核心,超声波水浸探头作为检测传感器,总体方案框架如图 1 所示。该系统主要包含:单片机最小系统、两组同型号超声波收、发模块,检相模块,温度检测模块等。系统工作原理:单片机产生 200 kHz 方波,同时加到两组发射探头,通过标准样液和待测溶液,另一侧接收探头将接收到的两路信号进行调理(滤波、放大、整形)后,经检相得到相位差参量再转换成电压信号输出,同时温度传感器检测出温度参量,由程序处理计算得到被测溶液浓度值,输出到 LCD 显示模块。

#### 3.1 单片机 MSP430F2272

系统处理器采用德州仪器 TI 公司生产的系列单片机 MSP430F2272,其驱动电压范围宽: $+1.8\sim+3.6\text{ V}$ ,封装形式采用 40 脚 QFN。MSP430F2272 有 32 个 I/O 口,集

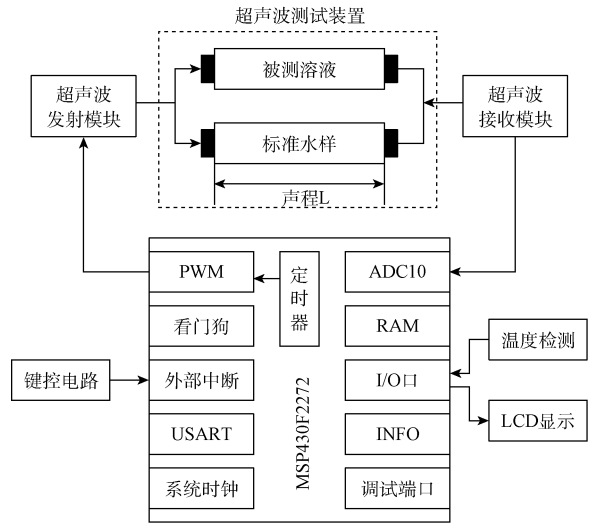


图 1 系统结构

成有参考电压电路、10 位 A/D 转换器、2 个带比较/捕获功能的 16 bit 定时器、两个以上通用运放和通用串行接口。并且集成调试接口和 I<sup>2</sup>C 接口,以及 32KB+256BFLASH 的存储器及 1 Kbit RAM<sup>[6]</sup>。MSP430F2272 管脚排列如图 2 所示。由其为核心构成的最小系统极为简单,主要包括电源模块、时钟电路、复位电路、串口通信模块、存储模块。

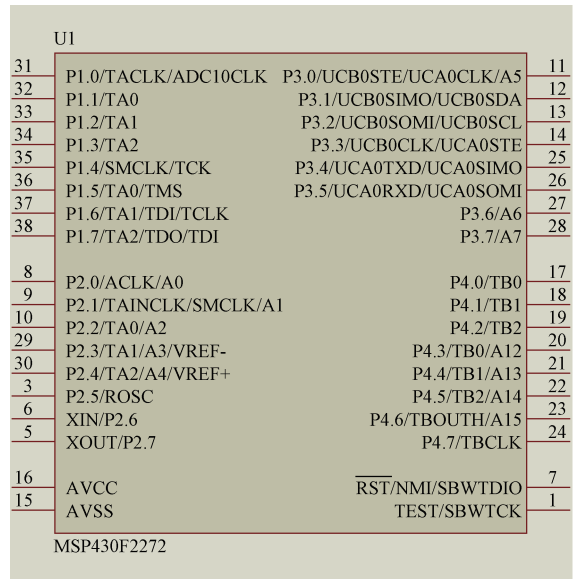


图 2 MSP430F2272 管脚结构

#### 3.2 超声波发射模块

超声波收、发射模块中发射信号的精准性决定了测量结果的精度,直接影响测量结果,因此对发射电路要求较高<sup>[7]</sup>,发射电路如图 3 所示。MSP430F2272 内部定时器产生 200 kHz 占空比固定为 50% 的 PWM 调幅波。该方波经电容  $C_1$  隔直和偏置电阻  $R_1$  后变为 0 为基准,幅度位 3 V 的方波。经过电容  $C_2$  和电阻  $R_4$  转换为三角波,最后经过

电容  $C_4$  和电阻  $R_5$  在变为频率为 200 kHz 正弦波,再经由 TLE2142 构成的放大器放大分成两路,同时加到超声波探头  $B1$ 、 $B2$  上。接收探头收到回波信号经调理送数字鉴相器 AD9901。

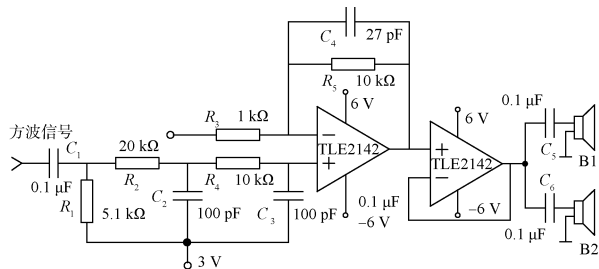


图 3 超声波发射电路

### 3.3 检相电路

系统检相电路采用 AD9901 高速数字鉴相/鉴频芯片。AD9901 能识别频率达 200 MHz,因此鉴相时无对输入信号分频,其性能稳定可靠。当整形后输入两路信号频率相同时,AD9901 自动切换到鉴相模式<sup>[8]</sup>,AD9901 工作时,首先将输入的两路信号进行二分频,然后通过异或门进行比较输出,从而得到待比较两路信号的相位差,再将该相位差信号经过占空比电压转换电路转换为电压信号<sup>[9]</sup>。该信号再经低通滤波转换成直流电压送入单片机 MSP430,检相测量原理如图 4 所示。

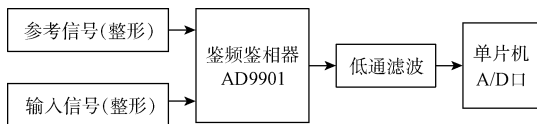


图 4 相位差测量原理

### 3.4 温度检测模块

超声波在溶液中波速不仅与溶液浓度有关,而且还与溶液温度有关,因此在现场实时检测溶液浓度时,需要监测溶液温度的波动。数字温度传感器 DS18B20 是一种新型的温度传感器,具有精确高、抗干扰能力强、测温范围宽等优点<sup>[10]</sup>。其输出串行数字信号,无需 A/D 转换,单片机可以直接识别,使用方便。DS18B20 温度传感器与单片机接口电路如图 5 所示。DS18B20 的数据端口 DQ 接单片机的 I/O 口,单片机发出的读写指令,温度转换指令都是通过数据线 DQ 传入 DS18B20。另外数据线 DQ 需接 4.7kΩ 上拉

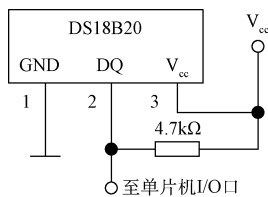


图 5 温度检测电路

电阻,使得数据线 DQ 在保持高电平,便于及时响应数据传输<sup>[11]</sup>。传感器检测到的溶液温度值以固定的格式通过数据线 DQ 串行直接输入单片机 MSP430F2272。

## 4 软件设计

系统软件采用模块化结构,包含主程序、A/D 转换模块、200kHz 方波发生模块、环境温度检测和 LCD 显示模块等。为了方便程序的可移植性和可读性,整个软件系统采用 c 语言进行编写。系统主程序流程如图 6 所示。

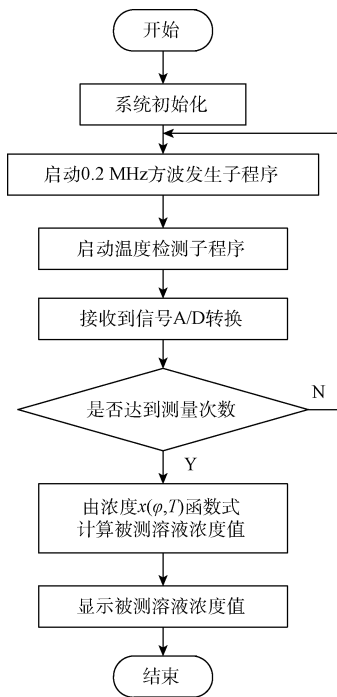


图 6 系统主程序流程

系统通电时,首先完成初始化设置,然后程序上通过方波发生模块产生占空比 50% 的 200 kHz 方波作为发射电路的触发信号,当接收探头接收到的信号,经调理后由数字鉴相器 AD9901 得到相位差信号,经低通滤波得到相应电压信号,最后单片机 MSP430F2272 计算出当前糖溶液浓度值并将返回值送给显示电路进行浓度值显示。

## 5 系统测试

传感器选用水浸式聚焦超声波探头:直径 15 mm,高 12 cm,引线长 1.5 m。测试时溶液温度保持 20 °C,声程  $L=12$  cm,超声波发射频率为 200 kHz。实验选用葡萄糖溶液作为测试对象进行实验和分析的,预先配置好 10.0%、20.0%、30.0%、40.0%、50.0% 的葡萄糖溶液,测试时,首先系统调零,即在系统装标准液,与被测液的试管内都装纯净水,观测相位差和浓度值是否为 0,如不为 0,重新调整相位差参量,为零后依次对每种标准液检测,每种样液测量 5 次取平均值。测试数据相位差与浓度数据如表 1 所示。

表1 葡萄糖溶液实验数据

配置样品 浓度/%	测得相 位差/rad	浓度测试 结果/%	误差/%
10	0.72	10.1	1.0
20	2.42	20.2	1.0
30	3.80	29.8	0.7
40	5.28	40.2	0.5
50	7.02	50.3	0.6

测量结果,表明超声波相位差法测量葡萄糖溶液浓度的误差不超过1%,说明超声波相位差法的测量的精度可以满足测量要求。测量过程中如果环境温度发生了较大变化,要及时进行温度补偿,以减少环境温度变化的影响。

## 6 结 论

本系统在超声波时差法液体浓度测量的基础上,利用检相法的测量原理实现了超声波对糖溶液浓度的测量,采用两对收发一体的200 kHz超声波传感器分别放在待测糖溶液和纯净水中,通过检测两种浓度的相位差值实现糖溶液浓度的测量,简化了系统设计,提高了测量准确度。经测试系统符合预期设计要求,可用来做浓度监测、浓度测量、纯度控制、产品检测等。

## 参考文献

- [1] 邹明,陈晓. 超声波检测技术研究进展[J]. 世界科技研究与发展,2010,32(2):198-199.
- [2] 汪飞,宋天添. 新型医用超声波氧气流量计[J]. 电子

测量技术,2015,38(12):100-103.

- [3] 陈建,孙晓颖,林琳,等. 一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11):2422-2428.
- [4] 赵继飞,牛法富,周丽霞,等. 基于超声相位差法的乙醇汽油浓度测量仪的研制[J]. 大学物理,2012,31(2):51-54.
- [5] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(9):925-933.
- [6] 胡玲. 超声波液体浓度计的研制[D]. 上海:同济大学声学研究所,2006:4-5.
- [7] 李田泽,胡志新,顾晓晨,等. 一种新型液体浓度检测系统研究[J]. 光子学报,2009,38(4):937-940.
- [8] 张卫华. 用超声法测量葡萄糖溶液浓度[J]. 青海大学学报:自然科学版,2011,29(4):23-25.
- [9] 兰羽,张顺星. 一种直射式光电浊度计的设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(1):53-55.
- [10] 兰羽. 具有温度补偿功能的超声波测距系统的设计[J]. 电子测量技术,2013,36(2):85-87.
- [11] 喜波,陈晨,张任,等. 基于超声波相位差的气体浓度测量方法[J]. 高技术通讯,2014,24(2):189-192.

## 作者简介

兰羽,1975年出生,硕士、副教授,主要研究方向为传感器技术与应用。

E-mail:kaisalm2000@163.com