

文章编号: 2096-1618(2017)03-0247-07

200 kHz 超声波二维风速测量系统设计

魏 玮¹, 卢会国^{1,2}, 张福贵^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 成都信息工程大学 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 风速是天气预报中需要观测的重要气象要素, 精确的风速测量影响着人类的生产生活。二维超声波风速传感器在各领域应用广泛。时差法是超声波进行风速测量常用的方法之一。应用此方法, 并对各种因素造成的误差进行校准, 设计基于 MSP430 微处理器的 200 kHz 超声波二维风速测量系统, 系统软件、硬件均采用模块化设计, 提高了系统的灵活性和稳定性。通过测验, 该系统能够实时测量风速的大小及方向。

关键词: 超声波; 时差法; MSP430; 模块化; 风速测量

中图分类号: TP212

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.03.003

0 引言

风速数据在众多行业领域都有重要的价值及广泛的应用^[1]。目前测量风速的仪表多种多样, 例如风杯式风速计、超声风速计等, 风杯式风速计较为常用。各种风速计都有一定的优缺点, 如热敏风速计测量风速时, 需要人为干预, 在各种天气环境中对测量的准确性也有很大的影响。目前应用超声波传感器制成的超声波风速计与其他种类的仪表相比, 有精度高、工作稳定、安装维护简单方便等优点^[2]。行业中超声风速计大多数的频率为 40 kHz 或 100 kHz, 且这些仪器仪表基本上采用 8 位或者 16 位的核心微处理器, 某些可能具有与上位机通信的功能, 实现把测量数据实时传递给计算机。由于电子技术的不断发展, 各行业对测量风速仪器仪表的要求越来越高, 例如速度、体积、功耗等^[3]。

早期超声波测量流体流量只是应用在液体, 由于科学技术的限制, 应用于气体流量测量还只是停留在理论阶段。随着数字电子电路技术的发展, 到 20 世纪 90 年代超声波气体流量计才得以实现^[4]。相对于中国, 国外对超声波应用的研究相对较早, 所以已经有了成熟的产品, 国内对于超声波应用的研究开展的较晚, 但通过科技工作者的努力学习与创造, 国内的超声波流量计产品也已经投入生产使用。

因为此设计是属于仪器仪表类, 所以系统是一个完整的设计, 但主要偏重于硬件的设计。对各个模块进行方案选定、设计, 选择精度更高、性能更好的芯片,

尽量满足系统的精度要求等, 能够真正的应用到实际生产中去^[5]。系统的设计采用模块化结构, 最后将各个模块整合在一起, 形成所需要的系统。系统分为如下模块: MSP430 核心控制模块、超声波发射驱动模块、超声波信号接收处理模块、TF 卡数据存储模块、串口通信模块、电源模块等。独立的模块组成的系统有助于调试, 使各模块之间的关系更加清晰。

1 基本原理

超声波在空气介质中传播时, 其速度会受到瞬时风的影响, 在顺风与逆风的情况下, 若超声波传播固定距离, 则会产生时间差, 再用此时间差就可以计算出瞬时风速。该设计使用具有两对呈正方形分布的且固定距离的 200 kHz 超声波探头的欧赛龙传感器, 采用频率为 200 kHz 的正弦波信号进行激励。对传感器探头进行标号为 A_1 和 B_1 、 A_2 和 B_2 。因为是对二维风速的测量, 所以两对超声波头是对不同坐标上的风速分量的测量。用坐标轴 x 与 y 对二维空间进行区分, A_1 和 B_1 测量 x 坐标轴上的风速分量, A_2 和 B_2 测量 y 坐标轴上的风速分量。测量原理如图 1。

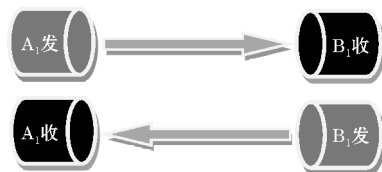


图1 时差法测量 x 轴风速分量原理

顺风时, 超声波头 A_1 发射, 超声波头 B_1 接收, 可得如下^[6]关系:

$$\frac{L}{T_{x1}} = C + V_x \quad (1)$$

式中, L 为对角线上超声波头间的固定距离, C 为无风时超声波的传播速度, T_{x1} 为超声波在 x 坐标轴上顺风时传播 L 距离的时间, V_x 为实测的 x 坐标轴上风速分量。

逆风时, 超声波头 A_1 接收, 超声波头 B_1 发射, 可得如下关系:

$$\frac{L}{T_{x2}} = C - V_x \quad (2)$$

其中, T_{x2} 为超声波在 x 坐标轴上逆风时传播 L 距离的时间。

将式(1)与式(2)相减, 便可得风速在 x 坐标轴的分量与顺风和逆风时传播固定距离所需时间的关系, 即:

$$V_x = \frac{L(T_{x2} - T_{x1})}{2T_{x1}T_{x2}} \quad (3)$$

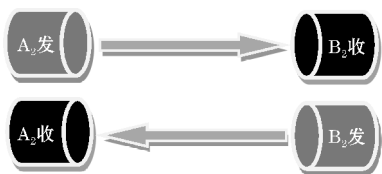


图2 时差法测量 y 轴风速分量原理

顺风时, 超声波头 A_2 发射, 超声波头 B_2 接收, 可得如下关系:

$$\frac{L}{T_{y1}} = C + V_y \quad (4)$$

其中, L 为对角线上超声波头间的固定距离, C 为无风时超声波的传播速度, T_{y1} 为超声波在 y 坐标轴上顺风时传播 L 距离的时间, V_y 实测的 y 坐标轴上风速分量。

逆风时, 超声波头 A_2 接收, 超声波头 B_2 发射, 可得如下关系:

$$\frac{L}{T_{y2}} = C - V_y \quad (5)$$

其中, T_{y2} 为超声波在 y 坐标轴上逆风时传播 L 距离的时间。

将式(4)与式(5)相减, 便可得风速在 y 坐标轴的分量与顺风和逆风时传播固定距离所需时间的关系, 即:

$$V_y = \frac{L(T_{y2} - T_{y1})}{2T_{y1}T_{y2}} \quad (6)$$

风沿 x 坐标轴或 y 坐标轴吹来时, 测得的分量 V_x 或者 V_y 就是当前风速; 而风斜向吹来时, 需将分量 V_x 与 V_y 进行再计算, 而得当前风速 V , 即:

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (7)$$

当风吹过传感器时, 因为在 x 坐标轴和 y 坐标轴存在两对传感器, 计算 $A1$ 发射与 $B1$ 接收、 $B1$ 发射与 $A1$ 接收时的两个时间, 可以判断风在 x 坐标轴分量的传播方向; 计算 $A2$ 发射与 $B2$ 接收、 $B2$ 发射与 $A2$ 接收时的两个时间, 可以判断风在 y 坐标轴分量的传播方向。通过公式(3)和公式(6), 得到在两个坐标轴上的风速分量值, 从而应用公式(8)能够判断实际风向。

$$\theta = \arctan\left(\frac{|v_y|}{|v_x|}\right) \quad (8)$$

在空气中, 超声波的传播速度与温度、水汽压、大气压力有一定的关系, 通过这个关系可以间接地计算出当前的温度 t 。即:

$$C = 20.067 \sqrt{(1 + 0.3192e/p)T} \quad (9)$$

式中, C 为超声波的速度, 单位为 m/s ; e 为水汽压, 单位为 hPa ; p 为大气压力, 单位为 hPa ; T 为绝对温度, 单位为 K , 摄氏温度 $t = T - 273.6$ 。水汽压可使用相应公式进行计算, 大气压力可由相关仪器测量。计算温度时, 首先要通过时延估计算法计算得到瞬时的超声波速度, 再将其带入公式(9), 得到瞬时温度。

2 系统设计

通过仔细思考、设计, 将系统大体分为如下模块: MSP430 核心控制模块、超声波发射驱动模块、超声波信号接收处理模块、TF 卡数据存储模块、串口通信模块、电源模块等^[7]。MSP430 作为系统的核心, 主要作用有产生方波脉冲, 对返回信号进行接收, 与上位机进行通信, 对测量的数据进行存储, 以及对测得数据进行显示等^[8]。系统的大体结构关系如图3所示。

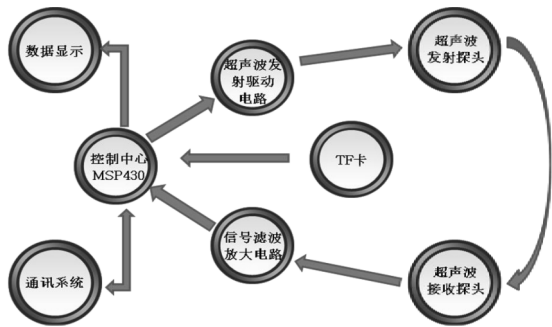


图3 系统硬件结构图

系统结构较为完备, TF 卡作为系统的数据库, 系统测得的数据实时的存储到卡里面, 当系统掉电时, 可以通过此卡来查看之前的数据。TF 卡也可作为手机里面的内存卡, 所以数据可以通过手机就能查看得到, 既方便又快捷。

2.1 电源电路

系统需要的电压主要有+5 V与-5 V,主要为超声波发射、接收电路中的滤波、放大、比较、模拟开关电路提供供电。因为滤波、放大与模拟开关电路中的 OPA2830、OPA1611、CD4051 等芯片必须要用正负电源供电,所以需要产生-5 V的电压。为减少对系统工作的干扰,系统采用了线性电源芯片,即由意法半导体公司生产的 L7805 与 L7905 芯片,两款芯片都是当提供输入所需要的电压时,输出就为固定的+5 V与-5 V。这两款芯片的纹波极低,工作稳定,输入电压范围广,内置有短路与热保护电路,最大输出电流为 1.5 A,能够承受系统所产生的电流。电源电路分别如图 4、图 5 所示。

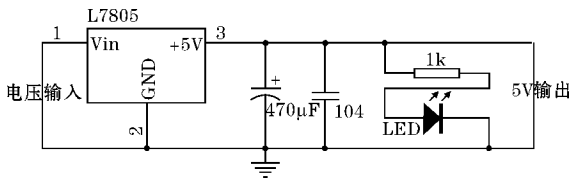


图 4 L7805 电源电路

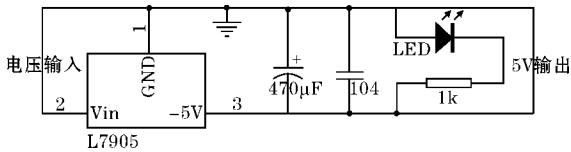


图 5 L7905 电源电路

2.2 超声波发射电路设计

2.2.1 方波脉冲及正弦波转换电路

超声波传感器可以用方波信号进行激励,也可以用正弦波信号进行激励;可以用交流信号进行激励,也可以用直流信号进行激励。因为超声波探头为无源器件,所以当直接给发射探头上输入一定电压的信号,接收探头能够直接接收到信号。当使用方波进行激励时,接收到的信号质量较差,接收到的方波在上升沿处会有杂波的干扰,虽然用微处理器能够很容易的产生方波,但是最后采集时需要更多的处理,否则对测量的精度会产生影响。系统采用正弦波作为发射信号,频率为 200 kHz。由微处理器产生一路 200 kHz 的方波,然后通过一个正负电源供电的滤波器输出 200 kHz 的正弦波。电路设计时,指标分别为带宽 80 kHz,中心频率 200 kHz,带宽增益 1 dB。滤波器为切比雪夫类型。电路如图 6 所示。

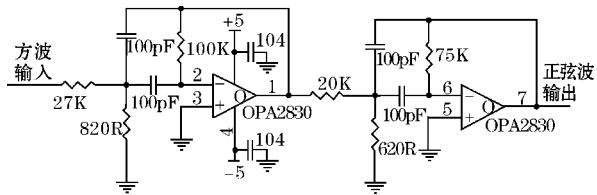


图 6 方波转化为正弦波电路

2.2.2 发射放大电路

发射放大电路采用同相比拟放大器进行交流信号的放大,同相比拟放大器为电压串联负反馈电路,输出电压与输入电压幅值存在正比关系,并且相位相同。该放大电路的放大倍数是可调的,最大放大倍数为 10 倍。当调节 10 K 的滑动变阻器时,放大倍数也会一同变化。在应用此电路时,要适当调节滑动变阻器。放大电路如图 7 所示。

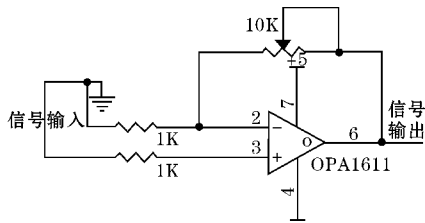


图 7 发射信号放大电路

2.2.3 发射模拟开关电路

模拟开关与实际工程中应用的机械开关没有太大区别,只不过模拟开关是一种数字芯片,一种可以用单片机控制的开关,可以用单片机控制导通哪一路。实际应用中常见的模拟开关有单刀单掷型、单刀双掷型、单刀四掷型与单刀八掷型。当选择导通哪一路时,模拟开关内部的导通电阻非常小,所以对于通过的信号几乎没有衰减。模拟开关可以用于交流信号的导通选择,也可以用于直流信号的导通选择。系统采用由 TI 公司生产的 CD4051BM 模拟开关,由于系统有 4 个探头,只需要有 4 路通道用于选择导通就可以了,所以在系统应用中 C 地址码被拉到地,一直被置为低。A、B 两位地址码用于选择通道 0、1、2、3^[9]。

2.3 超声波接收电路设计

2.3.1 接收模拟开关电路

接收部分的模拟开关同样用的 TI 公司生产的 CD4051BM 芯片,因为超声波探头为收发一体的,所以发射与接收分别用模拟开关来控制,没有选择一个模拟开关。分开来控制来编写程序时,思路比较清晰,理解起来容易。CD4051 为双向开关,3 脚可以作为输入,也可以作为输出。在发射电路中时,3 脚作为

输入口,其他8通道作为输出脚;在接收电路中时,3脚作为输出口,其他8脚作为输入口。超声波探头接收到的正弦信号峰峰值(V_{p-p})在2~3 mV,由于模拟开关的导通内阻小,所以即使 V_{p-p} 为很小也能通过模拟开关进入前置放大电路。

2.3.2 接收信号前置放大电路

前置放大电路主要作用是将接收到的信号进行放大,在放大的同时将其他部分干扰信号滤除掉。放大电路提高了信噪比,为后级滤波电路打下了更好的基础。前置放大电路实际为两级放大,每级的放大电路都是相同的,最大放大倍数在100倍左右。采用日本电气公司生产的双栅管作为放大电路的核心,通过与电阻、电容、电感进行组合,实现放大功能。双栅管的两个栅极一个用于正弦波信号的输入,另一个栅极用于增益的调节。漏极用于输出,漏极上的支路电感与电容主要用于选频,当频率在200 kHz左右时信号直接输出,当频率比200 kHz相差很大,会通过电感、电容输出到地中去。前置放大电路如图8所示。

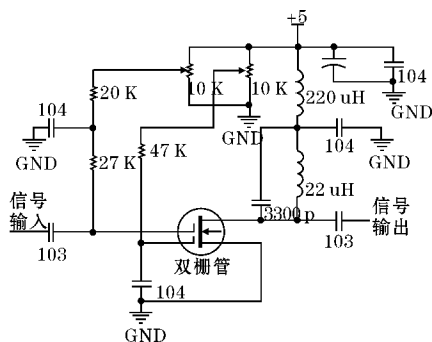


图8 前置放大电路

2.3.3 接收信号滤波电路

系统采用正弦波作为发射信号,虽然比方波作为发射信号效果要好,但是在接收到信号的时候仍然会有干扰,所以滤波电路仍然是必不可少的。正弦波通过滤波电路,使正弦波中的杂波成分尽量减小到最少。接收端滤波电路仍然采用的是TI公司的OPA2830芯片,接收信号滤波电路仍然是切比雪夫型,带宽设置为20 kHz,中心频率为200 kHz,截止频率为220 kHz,带宽增益为1 dB。通过前置放大电路到达滤波电路的正弦信号的 V_{p-p} 电压大约为300 mV左右,通过滤波器后,信号会有衰减,而且衰减较大,输出的正弦波 V_{p-p} 电压在600 mV左右。滤波器可以设计成带有增益型的,后级就可以减小放大倍数,所以本系统应用的滤波器有设计成自带增益型的,滤波出来信号仍然较小,后级需要加入放大电路。接收端滤波电路如图9所示^[10]。

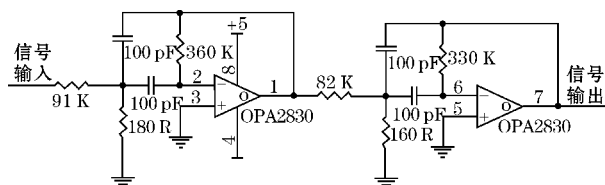


图9 接收信号滤波电路

2.3.4 接收放大电路

接收放大电路也采用同相比例放大器进行接收到的正弦波信号的放大,输出电压与输入电压幅值成正比关系。该放大电路的放大倍数也是可调的,反馈电阻采用一个50 kΩ的滑动变阻器,所以最大放大倍数为50倍。此电路同样采用TI生产的OPA1611运放芯片,采用正负5 V双电源供电。正弦波从有一定衰减的滤波器出来后, V_{p-p} 较小,经过放大,最大 V_{p-p} 电压可以达到10 V,足可以满足后级比较器电路的使用。

2.3.5 比较器电路

电压比较器用于对输入信号幅值进行鉴别、比较,从而输出高、低电平比较结果。电压比较器在工程中应用比较广泛,可以用于波形整形、波形产生等。系统应用的比较器类似于过零同相电压比较器,此比较器的反相端的输入电压为2.5 V固定参考,当同相端输入的信号正向电压超过2.5 V时,运放输出既为高,没有超过2.5 V时,输出就一直为低,这样比较出来的就为方波。此电路的运放采用单电源供电,所以输出的方波为直流。比较器电路^[11]如图10所示。

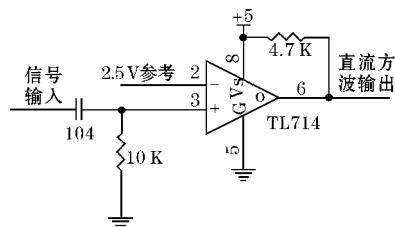
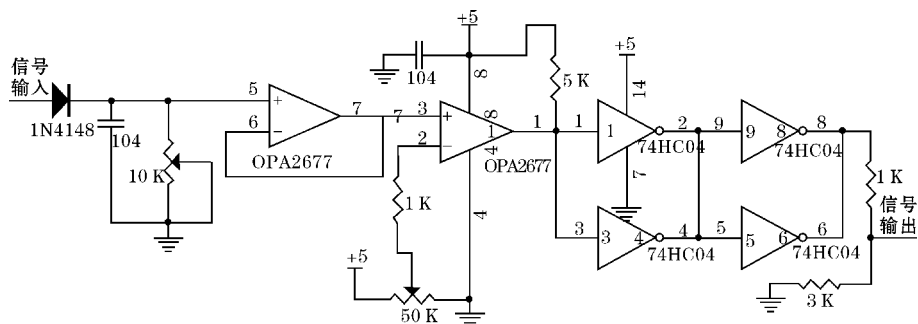


图10 比较器电路

2.3.6 检波整形电路

由于通过前级比较器输出的直流方波信号高电平的持续时间比较短,对于微处理器内置的A/D转换器来说采集起来有点困难,所以需要加入检波电路,检波电路主要用于获取输入信号的包络,当输入间断的脉冲信号后,输出的信号为频率较低的高电平持续时间较长的方波脉冲信号,但是波形非常难看。后级加入比较器电路,主要是对检波输出的信号进行初级整形,输出波形较好的方波,后级加入由74HC04^[12]组成的终极整形电路,因为非门数字芯片只识别高低电平,不能识别高电平的具体电压,所以经过非门后输出的波形较好。检波整形电路如图11所示。



3 系统软件设计

系统程序设计主要有初始化、数据采集处理、数据液晶显示、PWM 波发生、串口通讯 5 个部分。编程的调试环境为 IAR5.3, 采用常用的 C 语言编程开发, 因为 C 语言是较常用的计算机语言, 所以用 C 语言编写程序增加了程序的可读性。程序采用模块化编写, 有利于程序的搬移, 也有助于增加程序的可读性^[13]。将微处理器连接到计算机, 应用 IAR5.3 编程软件可以进行在线仿真调试, 可以实时的查看某个程序模块运行的结果, 这样有助于程序中错误的排查。每次上电时, 系统复位一次, 开始重新执行程序。系统程序流程图如图 12 所示。

程序中有一个子程序为测量子程序,用于接收信号的采集与风速、风级和温度的换算。一个子程序用于显示,当系统上电后,液晶一直显示风速、风向、温度、风级,并实时更新。程序中处理采集信号子程序,算法运用基本原理章节中的公式(3)、(6)、(7)、(9)得到。

数据采集模块功能在软件系统中为核心部分,系统上电复位后,内置 A/D 转换器开始初始化,初始化完成后,使用芯片内部默认的参考电压进行数据的采集。初始化中设定 P6.0 口为数据采集口,设置采样周期,配置 A/D 转换器时钟,设定存储器 0 为首存储地址,最后使能 A/D 转换器。A/D 转换器采集输入信号时,设定一个高电平的电压范围,从而确定是否为系统发出的信号。A/D 转换器部分程序如下:

P6SEL |= BIT0+BIT1+BIT2+BIT3+BIT4+BIT5;

```
ADC12CTL0 |= SHT0_2+ADC12ON+MSC;//开启
A/D 转换器,多次转换
```

ADC12CTL1 |= SHP;//由 A/D 转换时钟来触发
和维持 A/D 转换采样、转换

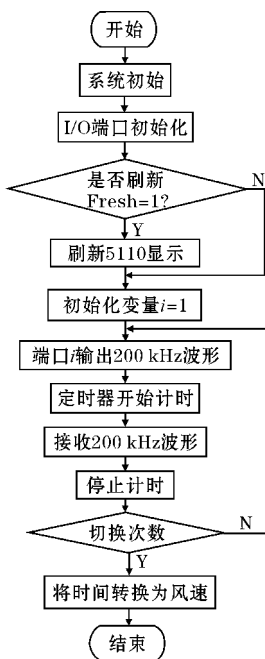
ADC12CTL1 |= CONSEQ_1; //序列通道单次模式

```
ADC12CTL1 |= CSTARTADD_0; //选择存储器 0
作为首存储地址
```

```
ADC12MCTL0 |= INCH_0+EOS;//顺序为各存储  
器选择输入通道
```

```
ADC12CTL0 |= ENC; //转换使能(但不是开始转换)
```

```
ADC12CTL0 |= ADC12SC; //启动 A/D 转换
```



4 系统测试与误差分析

4.1 系统测试

对系统的整体联调测试,验证各个模块之间是否是正常的工作。主要选择了3个节点进行信号的查看,分别为发射电路中方波转化成的正弦波信号、超声波探头接收到的经过滤波后的信号及接收电路最后比较出来的信号。方波信号经过转化电路后,变成了交流的正弦波信号,但是幅值变小,频率仍为200 kHz。波

形如图 13 所示。接收到的信号幅值比较小,经过前置放大、滤波电路的处理,信号幅值有很大增加,再经过后级放大电路,满足比较器的幅值输入要求,最后经过比较器变成直流的 200 kHz 方波脉冲信号。信号如图 14 所示。

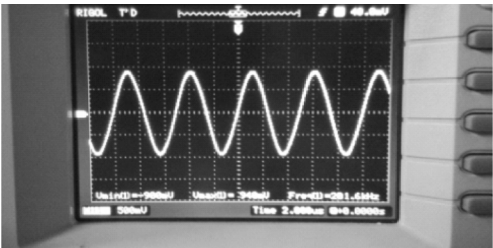


图 13 发射方波转化成的正弦波信号



图 14 接收端最终输出的信号

4.2 误差分析

在系统中,外界环境,硬件电路的性能、传播过程中的延时,软件的算法都会对测量产生影响^[14]。信号传播时,会引入噪声,从而造成系统的随机误差,这种误差无法消除,只能通过长时间的测量,统计出其变化规律。除此之外,系统还存在一些固定因素引起的误差。如由于信号从微处理器发出到最后发射出去,以及从接收到信号经过各种处理到达单片机 I/O 口,都会对信号有一定的时延,从而使测得的时间略长于实际的时间,虽然时延比较小,但是对于系统的精度却是影响很大,足可以影响到测量风速的大小。这种固定因素引起的计算误差,可通过多次测量校准的方法来修正。校准时,多次试验得到多个数据,通过对这些数据的处理得到系统时延,然后进行测量值修正。系统测量数据与风洞实际风速对比见表 1。

表 1 测量风速值与实际风速值对比

| 风洞实际风速值/(m/s) | 系统测量风速值/(m/s) | 偏差/(m/s) |
|---------------|---------------|----------|
| 2.00 | 2.56 | 0.56 |
| 4.10 | 5.01 | 0.99 |
| 6.50 | 7.94 | 1.44 |
| 8.50 | 9.84 | 1.34 |
| 10.00 | 11.85 | 1.85 |

5 结束语

对 200 kHz 超声二维风速测量系统的硬件电路进行详细的设计,对软件系统进行思路阐释,给出较为详细的程序流程图。最终系统软件与硬件综合运行时,能够测得风速的大小,以及风向。硬件电路和软件系统都采用模块化设计,提高了系统的灵活性和稳定性。随着技术的发展,后续需要完善的方面可能越来越多,使系统更加健全并能够得到更广泛的应用。

参考文献:

[1] 赵振宇. 基于 FPGA 的超声波风速测量系统的设计[D]. 成都:成都理工大学, 2012.

[2] 金晶. 基于 ARM 的超声波风速测量系统设计[D]. 南京:南京信息工程大学, 2008.

[3] 全丽希. 基于温度压力补偿的风速计的研究[D]. 南昌:东华理工大学, 2015.

[4] 张革. 超声波流量计在气体计量的应用[J]. 黑龙江造纸, 2003, 31(1):47-48.

[5] 林茂疆. 嵌入式机电仪器仪表平台化硬件系统设计研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.

[6] 王葵军, 谢扩军. 基于时差法超声波风速风向传感器误差的分析[J]. 中国电子商情:通信市场, 2010, (1):17-21.

[7] 杨明欣. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 2012.

[8] 王鹏飞, 王保强. 基于 MSP430 单片机的直流电机 PWM 调速系统的研究[J]. 成都信息工程学院学报, 2003, 18(2):105-109.

[9] 卢毅. VHDL 与数字电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2001.

[10] 马德群, 崔福良. 低功耗自适应跨导-电容带通滤波器电路实现[J]. 半导体学报, 2004, 25(9):1186-1191.

[11] 乜国荃. 集成运放和电压比较器[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2006, (2):48-49.

[12] 汤山俊夫. 数字电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[13] 谭浩强 张基温. C 语言程序设计教程(第 3 版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

[14] 辜新宇. 多通道精密时间间隔测量系统的研制[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.

Design of 200 kHz Ultrasonic Two-dimensional Wind Speed Measurement System

WEI Wei¹, LU Hui-guo^{1,2}, ZHANG Fu-gui^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chengdu University of Information Technology, CMA. Key Laboratory of Atmospheric Sounding-KLAS, Chengdu 610225, China)

Abstract: The wind speed is one of the important meteorological elements in weather forecast accurate wind speed measurement affects the production and living of human beings. The sensors of two-dimensional ultrasonic wind speed are widely used in various fields. The time difference method is one of the commonly used methods for ultrasonic wind speed measurement. Using this method and calibrating the error caused by various factors, we designed the system of 200 kHz ultrasonic two-dimensional wind speed measurement based on the MSP430 microprocessor. The hardware and software of the system adopt the modular design, which can improve the flexibility and stability of the system. Through the test, the system can be used for the real-time measurement of the wind speed and the direction.

Keywords: ultrasonic; time difference method; MSP430; modular; wind speed measurement