

超声波相位比较法的风速风向传感器设计

牛昊东^{1,2}, 施云波^{1,2}, 王 天^{1,2}, 时后衡^{1,2}

(1. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对自然环境中风速风向的准确识别, 利用超声波原理设计了风速风向双参数传感器检测系统。系统中超声波产生以及接收采用频率为 213 kHz 的超声波换能器, 超声波传感器利用超声波相位差法测量风速风向, 详细阐述了二维相位差法的测量原理和计算方式, 并通过 Lissajous 曲线验证了该方法的可行性。系统中运用功能相同的数字芯片替换复杂模拟电路提高了传感器的集成度。在风箱中的测试结果表明, 信号经鉴相电路处理并通过与 ZRQF 铂电阻丝式风速传感器进行对比测量后, 验证了其处理速度和精度, 所设计的超声波风速风向测试系统在气体流向检测以及环境监测等方面具有实际有效的使用价值。

关键词: 风速测量; 超声波传感器; 相位差; STM32; CD4046

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.01.017

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)01-0122-08

Design of Wind Speed and Direction Sensor Based on Ultrasonic Phase Comparison Method

NIU Hao-dong^{1,2}, SHI Yun-bo^{1,2}, WANG Tian^{1,2}, SHI Qi-heng^{1,2}

(1. School of Measurement-control Technology and Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. The Higher Educational Key Laboratory for Measuring and Control Technology and Instrumentations of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the accurate identification of wind speed and direction in the natural environment, the wind speed and direction two-parameter sensor detection system was designed by ultrasonic principle. The ultrasonic wave is generated in the system and the ultrasonic transducer with frequency 213 kHz is used. The ultrasonic sensor uses the ultrasonic phase difference method to measure the wind speed and direction. The measurement principle and calculation method of the two-dimensional phase difference method are elaborated. The method is verified by Lissajous curve. Feasibility. Replacing complex analog circuits with the same digital chip in the system improves sensor integration. The test results in the bellows show that the signal is processed by the phase-detection circuit and compared with ZRQF platinum resistance wire type wind speed sensor to verify the processing speed and accuracy. The designed ultrasonic wind speed and direction test system in the gas flow direction detection and environment monitoring and other aspects have practical and effective detection and environmental monitoring.

Keywords: wind speed measurement; ultrasonic sensor; phase difference; STM32; CD4046

收稿日期: 2019-09-08

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2017412C003).

作者简介: 牛昊东(1993—), 男, 硕士研究生;

王 天(1988—), 男, 博士研究生.

通信作者: 施云波(1966—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, E-mail: shiyunbo@126.com.

0 引言

近年来,国家推出一系列环保措施,加大了对新能源产业的扶持力度,风电产业发展迅速。为了提高发电机组运行稳定性,就要准确获取风速风向作为控制参数^[1-2]。不光在新能源领域,在传统工业中,风速风向传感器可以配合气体传感器对化工厂内有毒有害气体的流向进行检测^[3],降低灾害损失。风速的准确测量对于灾害预防、风力发电等领域具有很重要的意义。

目前获取风速的主要方法有热线式、皮托管式、机械式以及超声波式等方法^[4]。在国内,周海坤提出的基于皮托管式风速传感器被广泛应用于煤矿风速检测领域^[5],虽然这类传感器功耗较低,但是引压管长期暴露在空气中,容易造成堵塞,造成测量误差,利用压差原理制成的风速传感器易于测量高风速段,由于存在启动风速,对低风速段测量较为困难。国外,A. St. Marinov 等提出一种基于 PVDF 的风速风向传感器^[6],这类传感器响应速度快,反应灵敏,但受制于材料的温度敏感特性,环境温度对其测量结果影响较大,对使用环境要求较为苛刻。热线式和机械式风速风向传感器响应时间长,在测量过程中可能丢失关键信息而且机械部件存在磨损老化等问题^[7-8],相较于其他风速风向传感器,超声波风速风向传感器具有维护简单寿命长,无接触式测量、无启动风速、测量范围广、工作稳定、响应迅速等优点,适用于复杂环境的测量^[9-11]。随着电子技术的发展,风力发电以及环境监测等行业对风速风向测量提出更高要求,如何准确获得超声波在两传感器间的传递时间,提高测量精度成为待解决问题^[12-14]。

本文所设计的风速风向传感器具有相位鉴别功能,它可将两信号时间差转化为相位差,并直接输出与两信号相位差有确定关系的方波,方波占空比越大,两信号相位差越大,主控芯片只需接收方波,通过简单计算即可得到风速风向信息,为确保实验数据准确性,在不同风场强度条件下与热线式风速传感器进行对比测量以得到更精确数据。

1 传感器测量原理

利萨茹(Lissajous)曲线是两信号沿着互相垂直方向正弦振动的合成的闭合曲线^[15]。无风时,两信

号 Lissajous 图如图 1 所示,有风时,两信号 Lissajous 图如图 2 所示,通过观察可以发现两信号相位发生明显改变,充分说明风速改变了信号相位。

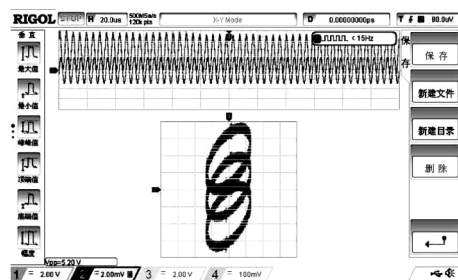


图1 无风时两信号利萨茹图

Fig. 1 Lissajous in wind

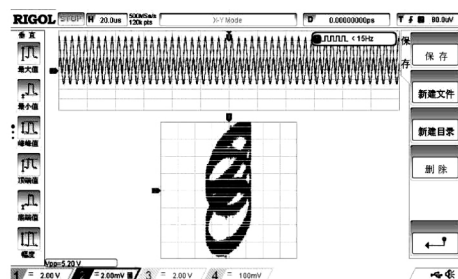


图2 有风时两信号利萨茹图

Fig. 2 Lissajous without wind

若要同时获取风速风向两种信息,就要采集不同方向信号相位差信息相互比较,这个方法称为二维相位差法,该方法采用两对收发一体的超声波探头正交放置于同一水平面上构成 X 轴和 Y 轴,将风速进行分解转化为分布在 X 轴和 Y 轴上的两个矢量进行测量, V_x 和 V_y 分别表示 X 轴和 Y 轴上的速度分量, V_x 与 V_y 间的夹角 α 为实际风向角,形成如图 3 所示的风速矢量图。

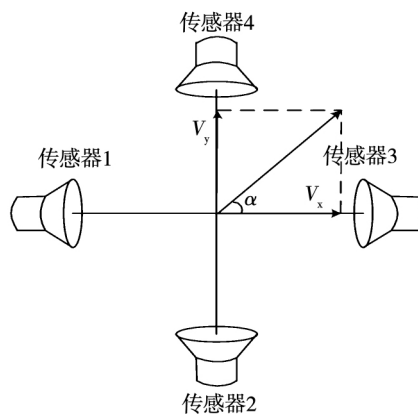


图3 风速矢量图

Fig. 3 Wind speed vector

两对传感器正交安装在同一水平面上,如图4所示,超声波在传感器1和传感器3间超声波的传播路径如图5所示。



图4 传感器分布图

Fig. 4 Distribution of sensors

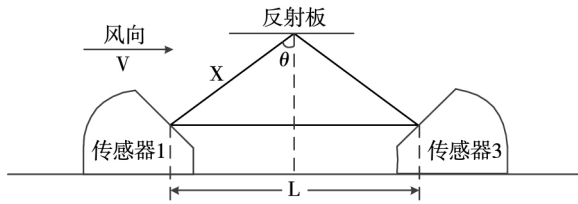


图5 超声波传播路径

Fig. 5 Ultrasonic propagation path

由图4可知超声波的传播距离为 $2x$,为确保4个传感器位置精准,可使用高精度激光测量仪对传感器位置进行定位。设 T_{13} 为超声波从传感器1发出到传感器3接收所经过的时间, T_{31} 为传感器3产生超声波到传感器1接收所需要的时间。超声波在空气中的传播速度受风速影响,所以假设超声波在无风的空气中传播速度为 C ,顺风时和逆风时的风速均为 V_x ,超声波将这两种状态下的风速进行表示,联立后可得风速与风向角以及超声波传导时间差的关系,如式(1)所示。

$$\left. \begin{aligned} T_{12} &= \frac{2x}{C + \frac{V_x}{\sin\theta}} \\ T_{21} &= \frac{2x}{C - \frac{V_x}{\sin\theta}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\Delta t = T_{31} - T_{13}$$

$$\Delta t = \frac{2x}{C - \frac{V_x}{\sin\theta}} - \frac{2x}{C + \frac{V_x}{\sin\theta}} \quad (2)$$

由于 $V_x < C$,故

$$V_x \approx \frac{4\Delta t C^2}{x} \quad (3)$$

传感器发出超声波信号时记为 t_0 时刻,传感器接收到信号时记为 t_1 时刻, $\Delta t = t_1 - t_0$,即为超声波在两传感器间的传递时间,时间差与相位差的关系如图6所示。

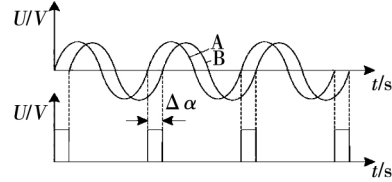


图6 时间差与相位差的关系图

Fig. 6 The relationship of time difference and phase difference

$$\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t \quad (4)$$

$$V_x = \frac{2\Delta\varphi C^2}{\pi f x} \quad (5)$$

其中 $\Delta\varphi$ 为两信号相位差,由图3及式(5)可得出两信号相位差与风速的关系。

将传感器4对向正北方,可设风向为南北向时两信号相位差为 $\Delta\varphi_1$,风向为东西向时传感器接收相位差分别为 $\Delta\varphi_2$,则可以得到 X 轴与 Y 轴上的速度分量与相位差关系。

$$V_x = \frac{2\Delta\varphi_1 C^2}{\pi f x} \quad (6)$$

$$V_y = \frac{2\Delta\varphi_2 C^2}{\pi f x} \quad (7)$$

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (8)$$

$$V = \sqrt{\left(\frac{2\Delta\varphi_1 C^2}{\pi f x}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\varphi_2 C^2}{\pi f x}\right)^2} \quad (9)$$

$$V = \frac{2C^2}{\pi f x} \sqrt{\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2} \quad (10)$$

在得到 X 轴与 Y 轴的速度分量后,由图3可得风向角 α 的信息,如式(11)所示。

$$\alpha = \arctan \frac{V_y}{V_x} \quad (11)$$

2 传感器节点设计

经翻阅资料以及根据实际需求,将传感器节点分为以下几个部分:STM32F103 主控芯片、激励信号放大电路、多路模拟开关、信号接收放大电路、滤波电路、方波转换电路、鉴相电路、屏幕以及电源模

块。其中 STM32F103 作为整个系统的主控芯片,其主要功能是产生正弦波,控制模拟开关按顺序驱动超声波传感器,接收鉴相电路输出的相位差信号通过计算后可得到风速风向信息,系统的结构图如图 7 所示。

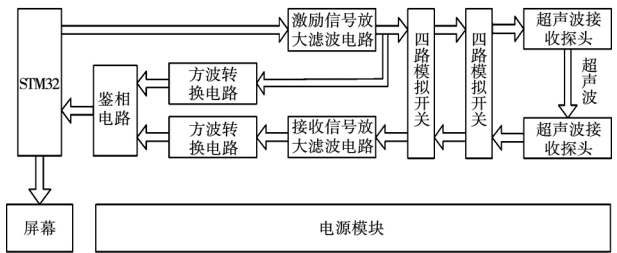


图 7 系统结构图

Fig. 7 System structure diagram

2.1 超声波发生电路设计

波形的产生可以由模拟电路来生成,例如文式桥等,也可以由 DDS 芯片来产生,但是模拟电路所产生信号易受外界干扰,而 DDS 芯片成本太高,不利于批量生产。综合考虑后,本文使用集成于 STM32F103 内部的模拟数字转换(DA)模块来生成激励信号。

超声波传感器的激励信号可以是方波也可以是正弦波,将方波信号展开成傅里叶级数后,其中包含多个谐波分量,信号成分复杂,而正弦信号构成相对简单,故本文采用正弦信号驱动传感器。信号分为两路,一路经过放大与滤波后输入模拟开关,作为超声波传感器的激励信号,另一路正弦波信号经由比较器变为方波后输入鉴相电路与激励信号进行相位比较。

从 DA 模块输出的信号为幅值在 0 ~ 3.3 V 的阶梯波,但是在阶梯波的边沿处有较多干扰,为方便后续电路对信号进行处理,应将阶梯波中的高次谐波以及直流分量滤除,本文采用中心频率为 213 kHz,截止频率为 218 kHz,带宽为 10 kHz 的六阶贝塞尔滤波器对信号进行处理。信号通过滤波器后有明显衰减,幅值衰减至 -0.25 ~ 0.25 V,因此还需对信号进行放大处理,为更好地驱动超声波传感器,信号应放大至 -5 ~ 5 V,放大倍数为 20 倍,放大电路中的运放采用 NE5532,该芯片是一款高性能运算放大器,具有出色的直流和交流特性以及极低的噪声,输出驱动能力高,失真低^[9],这些特性使得该芯片十分适合作为本系统的放大电路,电路如图 8 所示。

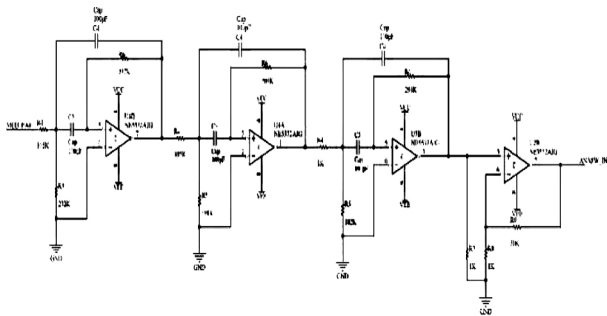


图 8 发射端滤波器

Fig. 8 The transmitting end filter

2.2 模拟开关电路设计

模拟开关可以将激励信号按顺序依次驱动传感器,当传感器工作状态为发送信号时记为 1,当为接收信号时记为 0,四枚超声波传感器的收发状态如表 1 所示。本系统所使用的模拟开关为 ADG1334,其内置 4 个采用 CMOS 工艺设计的独立可选单刀双掷(SPDT)开关。当这些开关接通时各开关在两个方向的导电性能相同,输入信号范围可扩展至电源电压范围。芯片设计本身具有低电荷注入特性,当切换数字输入时,可实现最小的瞬变^[19]。

表 1 传感器工作状态
Tab. 1 Sensor working state

传感器 1	传感器 2	传感器 3	传感器 4
1	1	0	1
0	1	1	1
1	1	1	0
1	0	1	1

为减少后续电路对传感器的干扰,需对传感器进行隔离设计,所以本系统的模拟开关电路由两片 ADG1334 构成,模拟开关电路图如图 9 所示。第一片模拟开关 ADG1334A 用以改变传感器的工作状态,可使传感器工作在激励状态或是接收状态。激励信号产生的同时,两片 ADG1334 接收主控芯片发出的通道选通信号,将激励信号发送至相应传感器产生超声波,相对传感器接收超声波信号,所接收信号通过两片 ADG1334 构成的接受通道将信号传输至后续电路。当传感器处于非工作状态时与后续电路完全隔离,如图 10 所示,消除了电路对传感器的干扰。

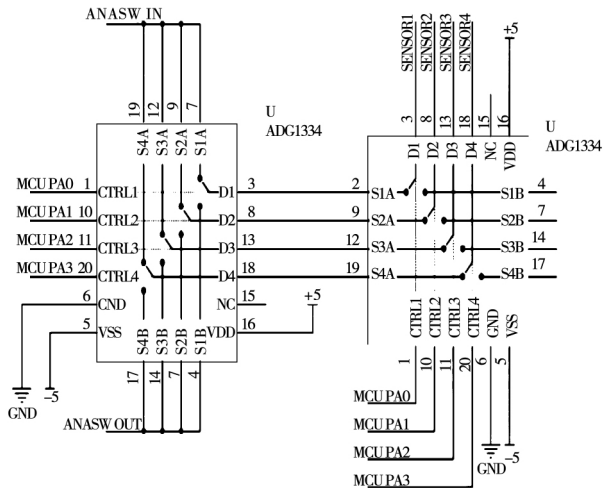


图9 模拟开关电路图

Fig. 9 Analog switch circuit diagram

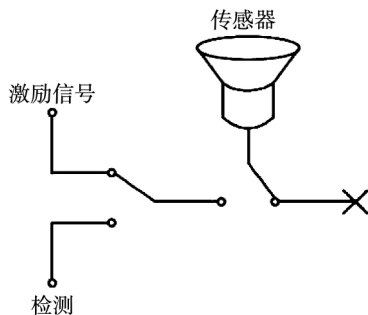


图10 隔离电路

Fig. 10 Isolation circuit diagram

2.3 超声波接收电路设计

前置放大电路主要作用是将所接收信号的幅值放大,提高信噪比。传感器所接收到的信号幅值约为 0.01 V , 为方便后级滤波电路对信号进行处理,需将信号放大 30 倍,得到幅值为 0.3 V 的信号再对其进行滤波。为得到更好的波形,提高衰减量,滤波电路采用四阶巴特沃斯带通滤波器,带宽设置为 10 kHz , 中心频率为 213 kHz , 截止频率为 218 kHz , 由两个二阶巴特沃斯带通滤波器串联而成。电路图如图 11 所示。为减少滤波器对前置电路的影响,滤波器输入端还需加入电压跟随器进行隔离。信号通过滤波器后有明显衰减,输出信号幅值 40 mV 左右,后级还需加入放大电路。

2.4 比较器电路设计

电压比较器可以用来对输入信号幅值进行鉴别、比较并以高低电平来表示比较结果,这使得电压比较器可以用来实现波形整形、波形产生等功能。

本系统所使用的电压比较器应将电压控制在 0 V 到 3.3 V 以内,比较器采用肖特基二极管构成,当信号幅值在 0 V 以上时,二极管截止,信号通过,

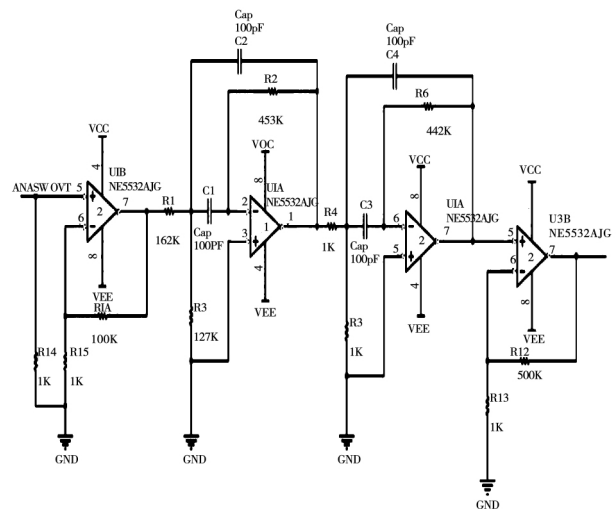


图11 接收端滤波器

Fig. 11 Receiver end filter

当信号幅值降到 0 V 以下时,二极管导通,信号接地,这样就可得到幅值在 $0 \sim 3.3\text{ V}$ 内的信号。但是在比较器输入端信号在 0 V 附近有抖动,导致比较器输出信号有较多干扰,为消除干扰在比较器后端接入施密特触发器,施密特触发器是一种阈值开关电路,可以防止因输入电压有微小变化而引起的输出点电压的变化,输出信号的干扰被有效滤除,便于相位比较器进行相位比较。为减少后级电路对前一级电路的干扰,在比较器前串联一个电压跟随起到隔离作用,比较器电路如图 12 所示。

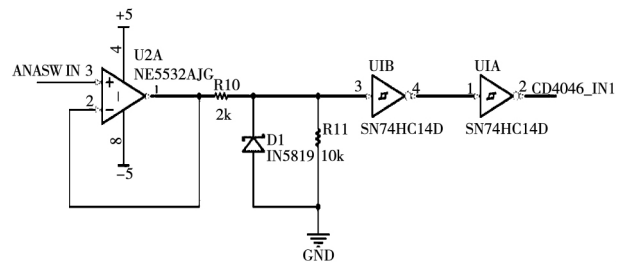


图12 比较器电路图

Fig. 12 Comparator circuit diagram

2.5 相位比较电路设计

为便于主控制器更好的分辨出两传感器间超声波信号的传递时间差,本系统将激励信号与传感器接收信号的时间差转换为相位差,相位比较器能够识别输入信号相位差并输出与两信相位差有确定关系的方波信号。CD4046BE 是一款 CMOS 锁相环集成电路,电压范围宽 ($3 \sim 18\text{ V}$), 输入阻抗高,工作在 10 kHz 时其功耗仅为 $600\text{ }\mu\text{W}$, 它可以输出与两信号的相位差有确定关系的方波信号, CD4046BE 中集成有两个比较器,比较器 1 要求两输入信号的占空比必须为 50% , 比较器 2 对输入信号无特殊要

求^[2],故采用比较器 2 输出相位差信号。引脚 SIG_IN 和 COMP_IN 分别用以接收超声波传感器的激励信号和接收信号,鉴相电路如图 13 所示。

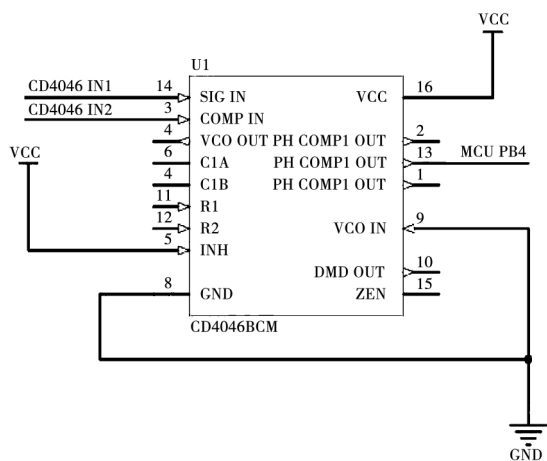


图 13 相位比较器电路图

Fig. 13 Phase comparator circuit diagram

3 系统软件设计

本文主控芯片采用 STM32F103 作为系统的主控芯片,STM32F1 系列微控制器最高主频为 72 MHz,使用 ARM Cortex - M3 内核,具有丰富的外设资源可供使用,便于本系统的开发使用。开发语言用 C 语言进行开发。图 14 为超声波风速风向测试系统的程序流程图

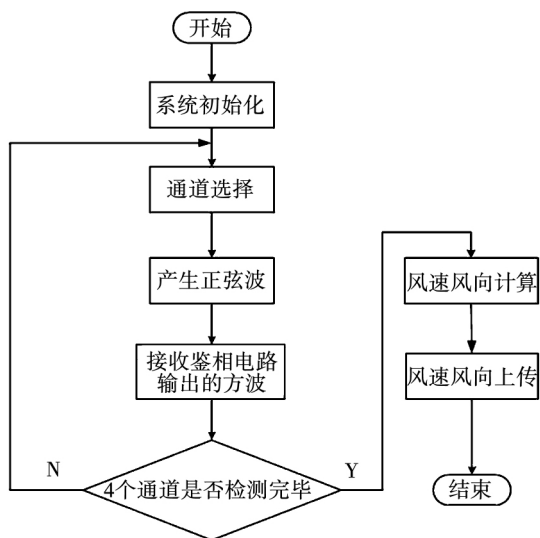


图 14 程序流程图

Fig. 14 Program flow chart

开机之后,系统复位,初始化各个外设模块如(中断、定时器、DMA 控制器,SPI 与屏幕串口等),初始化完成后,进入风速检测主函数,先进行通道选

择,再控制 STM32DA 模块产生正弦波,定时器定时,DMA 向 DA 给数,控制 STM32 中的 DA 模块产生正弦波,检测端接收鉴相电路输出的方波信息并测量其占空比,再进入通道选择程序,驱动另一组传感器并接收鉴相电路发出的方波,同理依次驱动传感器,得到四组方波信号,通过检测这四个方波的占空比信息计算这一时刻风速风向信息,并将所测结果输出至屏幕。

4 结果与分析

测试用风箱前后各有六台风机如图 15 所示,风机有高低两档可调,通过控制进风口与出风口风机转速高低可获得六种不同风场强度,六枚传感器节点放置位置如图 16 所示,传感器对六种不同强度风场中的六个不同位置进行测量,为作比较,用 ZRQF 铂电阻丝式风速传感器对风场强度进行对比测量。ZRQF 铂电阻丝式风速传感器测量范围: 0.05 - 30 m/s,涵盖本次实验风速范围,其精度为: $\pm(读数的 3\% + 0.2)$ m/s。可作为高精度量具对本文所设计的超声波风速风向传感器进行标定。



图 15 风机实物图

Fig. 15 Fan physical diagram

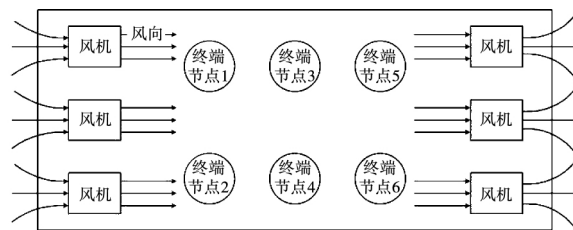


图 16 风速测量环境示意图

Fig. 16 Wind speed measurement environment diagram

风箱内环境温度为 25.6℃,湿度为 30%,气压为 1 kPa,超声波风速风向传感器测试结果如表 2 所示,ZRQF 铂电阻丝式风速传感器测量结果如表 3 所示。

表2 超声波传感器测量数据

Tab. 2 Ultrasonic sensor measurement data / (m/s)

风场大小	位置编号					
	1	2	3	4	5	6
高/高	10.39	11.73	3.27	2.49	1.78	1.92
高/低	9.37	10.83	2.73	2.46	1.90	1.96
高/关	7.87	9.06	1.65	1.20	0.62	0.40
低/高	8.70	9.84	3.42	2.01	2.27	0.74
低/低	8.54	9.49	2.42	2.59	1.33	0.65
低/无	6.97	7.27	1.81	1.28	0.62	0.12

表3 ZRQF 铂电阻丝式风速传感器测量数据

Tab. 3 ZRQF platinum resistance wire wind speed sensor measurement data / (m/s)

风场大小	位置编号					
	1	2	3	4	5	6
高/高	10.13	10.68	3.09	2.63	2.03	2.01
高/低	9.54	11.14	2.89	2.60	2.02	1.98
高/关	8.01	9.13	1.61	1.23	0.65	0.51
低/高	8.64	9.75	3.41	1.95	2.12	0.81
低/低	8.60	9.61	2.51	2.50	1.35	0.59
低/无	7.04	7.30	1.92	1.35	0.62	0.15

图18是将风速调为最大时,两传感器在不同位置测量结果对比图,通过计算可以得出测量结果最小相差4.48%,最大相差9.83%。误差在10%以内。图19是将风速调到最小,两传感器在不同位置测量结果对比图,测量结果最大相差5.72%。由此可以看出,超声波风速风向传感器的测量结果与ZRQF铂电阻丝式风速传感器的测量结果相差在10%以内,测量结果准确。

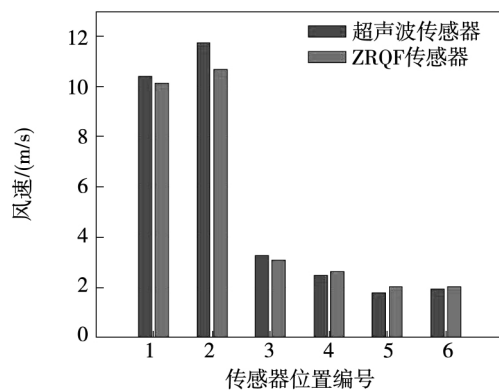


图17 风速最大时测量结果对比图

Fig. 17 Comparison of measurement results when wind speed is maximum

对于风向的测量,将传感器置于如图17所示的风向测试环境中,该风箱具有八个风口,风口1吹出的风对应风向为0°,风口2吹出的风对应风向为45°,以此类推,该风箱可产生八个风向的风对应角度分别为0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°、0°。超声波风速风向传感器测试结果如表4所示。

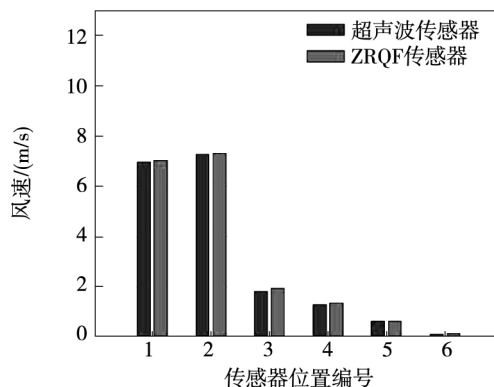


图18 风速最小时测量结果对比图

Fig. 18 Comparison of measurement results when wind speed is minimum

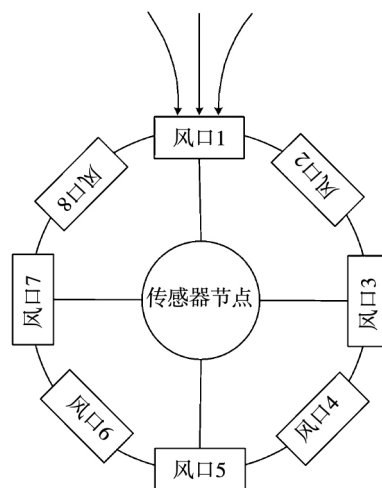


图19 风向测试环境示意图

Fig. 19 Wind direction measurement environment diagram

表4 风向测量数据

Tab. 4 Wind direction measurement data / (°)

理论角度	0	45	135	180	225	270	315	0
实际角度	1.5	46.2	134.6	182.1	228.4	272.6	315.3	358.1

5 结论

本文对超声波风速风向传感器的测量方法提出了改进,相较于时间差信号,相位差信号更易获取,

通过相位比较器输出的方波信号可直接由主控芯片采集,降低了电路的复杂程度,提高了运算速率,对测试系统的软件设计思路进行阐释并对测试环境进行了详细描述。系统中所产生超声波频率为 213 kHz,周期为 0.004 7 ms,四枚传感器轮流产生超声波的系统延时为 0.019 ms,超声波在传感器内传播距离为 14 cm,传播速度为 340 m/s,所以系统理论最大延迟仅为 1.67 ms,与具有启动风速的传感器相比超声波风速风向传感器响应速度优势明显。与 ZRQF 铂电阻丝式传感器的测量结果比较最大误差不超过 10%,至此可看出文所设计的超声波风速风向传感器响应速度快,实时性好,可同时对风速及风向进行精确测量,误差在 10% 以内,使用数字芯片对模拟电路进行替换,提高了传感器的集成度,模块化设计提高了系统的灵活度和可靠性。最终测试系统通过软件与硬件的结合实现了对风速风向进行精准测量的目标。

参考文献:

- [1] 朱程辉,张倩,王建平,等. 基于 ATS 风电机故障诊断与偏航控制系统研究[J]. 电子测量与仪器学,2016,30(12):1949.
ZHU C H, ZHANG Q, WANG J P, et al. Research on Fault Diagnosis and Yaw Control System Based on ATS Wind Turbine[J]. Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12):1949.
- [2] 赵剑波. 风力发电并网技术电能质量控制措施[J]. 电子技术与软件工程,2019,8(15):234.
ZHAO Jianbo. Power Quality Control Measures for Gridconnected Technology of Wind Power Generation[J]. Electronic Technology and Software Engineering,2019,8(15):234.
- [3] 郑豪男,陈珍珍,施佩影,等. 气体流速流向传感器及其温度补偿的研究[J]. 传感器技术,2005,24(11):15.
ZHENG Haonan, CHEN Zhenzhen, SHI Peiying, et al. Research on Gas Flow Velocity and Flow Direction Sensor and Its Temperature Compensation[J]. Sensor Technology,2005,24(11):15.
- [4] 任晓华,陈晓,郭研. 基于 Fluent 和 LSTM 神经网络的超声波测风仪阴影效应补偿研究[J]. 计算机应用与软件,2019,36(7):90.
REN Xiaohua, CHEN Xiao, GUO Yan. Fluent and LSTM Neural Network Based Shadow Effect Compensation for Ultrasonic Anemometer[J]. Computer Applications and Software, 2019,36(7):90.
- [5] 周海坤. 基于皮托管原理的风速传感器[J]. 煤矿安全,2018,49(8):99.
ZHOU Haikun. Wind Speed Sensor Based on Pitot Tube Principle[J]. Coal Mine Safety, 2018,49(8):99.
- [6] 行鸿彦,吴红军,徐伟,魏佳佳. 三维超声波换能器测风阵列研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):2945.
XING Hongyan, WU Hongjun, XU Wei, et al. Research on Three-dimensional Ultrasonic Transducer Wind Measurement Array[J]. Journal of Instrumentation, 2017,38(12):2945.
- [7] A. ST. MARINOV, E. BEKOV, V. C. VALCHEV. PVDF Based Wind Direction and Speed Sensor for Weather Assessment Relevant to Renewable Energy Generation[C]//15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia.
- [8] BUCCI G, CIANCETTA F, FIORUCCI E, et al. A Low-cost Ultrasonic Wind Speed and Direction Measurement System[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2013:505.
- [9] XIE K, WANK K. Measurement of Wind Speed and Direction with Ultrasonic Sensor Using FPGA[J]. Energy Procedia,2011:837.
- [10] 张东明,曹晓钟,马尚昌. 二维超声波风速风向计设计[J]. 传感器与微系统,2015,34(10):110.
ZHANG Dongming, CAO Xiaozhong, MA Shangchang. Two-dimensional Ultrasonic Anemometer Design[J]. Sensors and Microsystems, 2015,34(10):110.
- [11] 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.
CHEN Jian, SUN Xiaoying, LIN Lin, et al. A High-precision Ultrasonic Arrival Time Detection Method[J]. Instrumentation, 2012, 33(11):2422.
- [12] 吴宗玲,闫连山,曾德兵,等. 基于 ARM + CPLD 的高精度超声波风速仪的设计[J]. 传感器与微系统,2012,31(6):101.
WU Zongling, YAN Lianshan, ZENG Debing, et al. Design of High Precision Ultrasonic Anemometer Based on ARM + CPLD[J]. Sensors and Microsystems, 2012,31(6):101.
- [13] 楚航,赵佳佳. 基于 STM32 的超声波测风速风向仪的设计[J]. 自动化技术与应用,2017,36(7):133.
CHU Hang, ZHAO Jiajia. Design of Ultrasonic Anemometer for Wind Speed Measurement Based on STM32[J]. Automation Technology and Applications, 2017,36(7):133.
- [14] 刘润博,李玉军,何晓亮,等. 基于 DSP 的超声波式风度风向检测仪的设计[J]. 传感器与微系统,2012,31(6):101.
LIU Runbo, LI Yujun, HE Xiaoliang, et al. Design of an Ultrasonic Wind Direction Detector Based on DSP[J]. Sensors and Microsystems, 2012,31(6):101.
- [15] 李春玉,丁喜波,邹一风. 相位差法超声波三维风速测量方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(4):46.
LI Chunyu, DING Xibo, ZOU Yifeng. Phase Difference Method for Three-dimensional Ultrasonic Wind Speed Measurement[J]. Journal of Harbin University of Technology,2016,21(4):46.
- [16] 王国峰,赵永生,范云生. 风速风向测量误差补偿算法的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(4):786.
WANG Guofeng, ZHAO Yongsheng, FAN Yunsheng. Research on the Error Compensation Algorithm for Wind Speed and Wind Direction Measurement[J]. Instrumentation, 2013,34(4):786.
- [17] 燕斌,苑伟政,乔大勇,等. 一种新型谐振式微机电系统扫描及其莉萨茹图形显示[J]. 光学学报,2012,32(5):0523003-5.
YAN Bin, YUAN Weizheng, QIAO Dayong, et al. A New Type of Resonant MEMS Scanning and Its Lissajou Graphics Display[J]. Optics, 2012, 32(5):0523003.
- [18] 王皓,余丹妮. 基于单片机的低频功率放大器[J]. 仪表技术,2012(2):16.
WANG Zhi, SHE Danni. Low-frequency Power Amplifier Based on Microcontroller[J]. Instrumentation Technology,2012(2):16.
- [19] 张金玉,行鸿彦,冯茂岩. 青藏高原冻土温度 64 通道检测系统[J]. 传感技术学报,2019,32(7):1110.
ZHANG Jinyu, XING Hongyan, FENG Maoyan. 64-channel Detection System for Permafrost Temperature on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Sensing Technology,2019,32(7):1110.
- [20] 刘志强. 倍频技术在测角上的应用[J]. 计量与测试技术,2016,43(12):51.
LIU Zhiqiang. Application of Frequency Doubling Technology on Goniometry[J]. Measurement and Testing Technology, 2016,43(12):51.

(编辑:温泽宇)