

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107752

## 嵌入式自动气象站故障检测系统研究\*

陈晓<sup>1,2</sup> 张凯<sup>1</sup>(1.南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学 大气环境与  
装备技术协同创新中心 南京 210044)

**摘要:** 针对自动气象站故障快速检测的需求,研制了一种基于嵌入式的便携式自动气象站故障检测仪。它集成了低功耗微控制器、高精度电子元件和高速数据通信模块,通过四通道数字隔离器将微控制器数据总线和气象要素处理电路总线隔离提升信号间的抗干扰性,实现风向、风速、雨量、温湿度、气压信号的模拟和采集,实现对自动气象站的故障检测。试验表明该仪器能快速定位自动气象站传感器、采集器、电源模块、通讯模块的故障点,输出模拟气象信号误差最大不超过0.3,信号采集平均误差稳定在0.2上下。

**关键词:** 嵌入式系统;自动气象站;故障检测;传感器

**中图分类号:** TN98-34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Fault detector for automatic weather stations based on embedded system

Chen Xiao<sup>1,2</sup> Zhang Kai<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The portable embedded-based automatic weather station fault detector has been developed to meet the demand for rapid diagnosis of automatic weather station faults. It integrates a low-power microcontroller, high-precision electronic components and high-speed data communication module in a unified way. It isolates the microcontroller data bus and the weather element processing circuit bus through a four-channel digital isolator to enhance the anti-interference between signals, and realizes the simulation and acquisition of wind direction, wind speed, rainfall, temperature and humidity, and barometric pressure signals to realize the fault detection of automatic weather stations. The test results enlighten that the instrument can quickly locate the fault point, which comes from the automatic weather station sensor, collector, power module, communication module, etc. The error of the output analog weather signal is not more than 0.3, and the average error of signal acquisition is stable around 0.2.

**Keywords:** embedded system; automatic weather station; fault detection; sensor

## 0 引言

自动气象站作为我国地面气象主流观测设备,可实时检测环境的温度、湿度、风向风速、雨量、蒸发量、辐射量等气象要素值<sup>[1]</sup>,在综合气象观测系统中发挥着重要作用<sup>[2-3]</sup>。

自动气象站主要由采集器、传感器、供电系统、通信设备组成,由于自动气象站常年在野外24 h昼夜不间断工作,在实际使用过程中各部件经常发生故障<sup>[4]</sup>。通常的检测方法是手动拆卸自动气象站部件将其搬运至实验室内进行故障排查工作<sup>[5-6]</sup>。这样的方法存在两个主要问题:一是

虽然有精度高的特点,但由于测得的电信号需要由人工根据相应的函数关系才能转换得到气象量,对检测效率和准确度产生很大影响<sup>[7]</sup>;另外对于那些布置在复杂地形环境的自动气象站,传统的检测方法往往难以实现。

为了填补自动气象站快速故障检测这一空白,国内已经有团队开展便携式现场检测设备的研究工作。杨维发等<sup>[8]</sup>设计的便携式自动气象站故障检测仪主要采用STC12C5A60S作为主控芯片实现对气象传感器故障检测,但该仪器仅仅依据气象传感器输出信号数据是否缺失判断其是否故障,无法对故障位置进行精确定位,忽略对数

收稿日期:2021-09-01

\* 基金项目:江苏高校优势学科建设工程项目资助

据精度起同样影响的自动气象站数据采集器故障检测,无法对气象站整体进行检测;而裴建勋等<sup>[9]</sup>设计的装备由显示模块、信号采集模块、转接板部分组成,虽实现了对自动气象站各个模块的故障检测,但对于采集器的故障检测,仅仅依靠读取整体数据,进行分析判断,而未通过模拟生成相对应气象信号与原信号进行比对,依然无法准确有效判断采集器内部具体故障部位;郭宗凯等<sup>[10]</sup>设计的自动气象站故障检测仪内置数据质量控制模块和预先设定观测数据极值,通过比对回显观测数据,依然存在只能判断传感器是否正常工作的问题,而对于自动气象站内部电路具体故障部位无法做到精准判断;王明辉等<sup>[11]</sup>研发的现场式自动气象站故障检测系统,将气象信号采集电路与基于测试数据分析的传感器故障判断方法结合,实现了对自动气象站传感器故障的精准定位,但其系统仅仅对传感器进行信号采集故障判断,并未涉及气象站另一个核心部件采集器的故障检测,该方法仍存在对气象站核心部件检测不全的问题;侯飙等<sup>[12]</sup>设计的分布式数据处理方案通过软件定时向采集器发送命令来读取主、分采集器状态仅仅达到监测状态的目的,无法做到对其内部故障位置的精准定位。

鉴于以上不足之处,本文设计了一种嵌入式自动气象站故障检测系统,不仅集成低功耗微控制器、高精度电子元器件和高速数据通信和存储模块,而且采用触摸屏结合气

象站故障检测软件系统进行显示和控制,能够实现各类气象信号采集、模拟,与自动气象站故障检测方法结合实现对自动气象站传感器、采集器、通信设备等核心部件故障部位的精确定位,方便操作人员分析数据,提升了检测效率。系统测试表明,该自动气象站故障检测系统具有故障诊断准确、信号输出精度高、操作简便、便携性强等优点。

### 1 自动气象站故障检测系统设计

自动气象站故障检测系统采用嵌入式系统开发,由两大部分组成,包括故障检测硬件装置和软件。其中故障检测装置由电缆和故障检测仪主机组成。故障检测仪主机包含工控主板、电源模块、MCU 主控单元模块、虚拟示波器模块、探测数据通信模块和触摸显示模块。其中工控主板是气象站故障检测系统的控制中心,通过其来协调整个系统各部件的有序工作;MCU 主控单元模块芯片采用 STM32F103 作为核心芯片,具备 12 位 A/D 转换器和多个 DMA 通道<sup>[13-14]</sup>,其核心微控制器逻辑运算速度、功耗能够满足本系统设计所需;虚拟示波器模块负责对整个自动气象站供电系统电压信号进行检测;电源模块提供 +5 V、12 V 的电源,用于系统供电和气象站部件供电;触摸显示模块将检测数据和结果显示,结合触屏操作完成人机交互。自动气象站故障检测系统结构如图 1 所示。

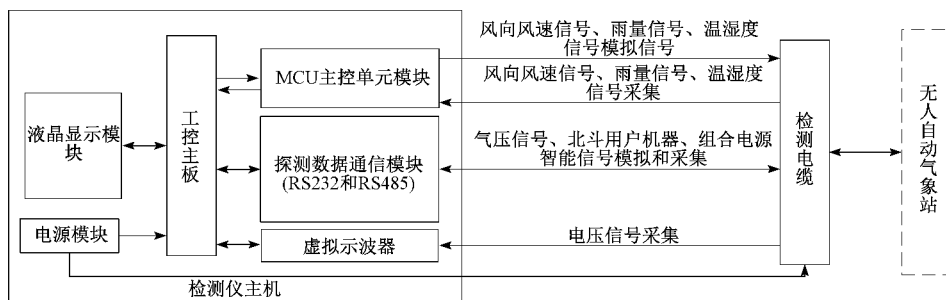


图 1 自动气象站故障检测系统结构

自动气象站故障检测系统工作流程如图 2 所示。首先用户通过对检测仪主机设置,选用相应的检测电缆,并接入被检测设备;然后在检测仪主机上的故障检测软件选择对应测试按钮并启动检测,此时检测仪主机按照相应的协议开始控制 MCU 主控单元模块、虚拟示波器和探测数据通信模块工作以实现对被检测部件的快速故障诊断,并在检测仪主机上显示检测的过程和结果;当故障推理信息不够时,检测仪主机会自动提示用户对故障的进一步确定。最后检测仪主机会根据故障现象和所处的部位,向维修人员提供一步一步地维修方法和步骤。

为了能够保证自动气象站故障检测系统满足各类气象站的需求,通过调研分析了各类气象站气象传感器输出电信号的形式和误差范围。目前主流自动气象站包括维萨拉公司的 MI-LOS500 型、华云公司的 CAWS600 型、江苏省无线电研究所有限公司的 ZQZ-A、ZQZ-C 型、广东气

象研究所的 WP3103 型、天津气象仪器厂的 DZZ1 型等。本系统输出信号范围和最大允许误差要求如表 1 所示。

表 1 气象信号输出类型特征

气象要素	电参量	范围	最大允许误差
温度	电阻信号	-50 ℃~80 ℃	±0.3 ℃
湿度	数字信号 (RS-232)	0% RH~100% RH	±0.3%
气压	数字信号 (RS-232)	500 hPa~1 100 hPa	0 hPa
雨量	脉冲	0 mm/min~ 10 mm/min	0 mm/min
风速	脉冲	0 m/s~50 m/s	±0.01 m/s
风向	格雷码	0°~360°	0°

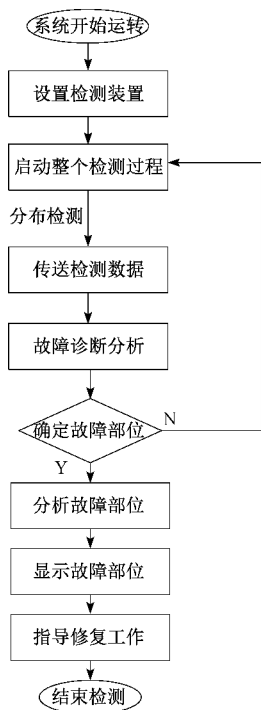


图 2 自动气象站故障检测系统工作流程

## 2 系统硬件设计

### 2.1 MCU 主控单元模块

系统关键的部分之一是对传感器输出信号的精准采样和模拟。但是通常情况下由于气象信号种类多,包括数字信号、不同频率的脉冲信号以及模拟信号等,采集时各个气象要素之间会发生互相串扰问题;同时在模拟时还需保证气象要素的高精度。因此 MCU 主控单元模块作为气象站故障检测系统装置的核心模块之一,主要功能被设计为如下两部分。

1) 采样来自气象站的风向风速、雨量、温湿度信号并由单片机对获得的数据通过电缆发送到工控主板;为了提升微弱信号间的抗干扰性,采用的线性隔离器件 ADUM5401 除具有数据总线隔离功能外,内部还集成了 DC-DC 电源隔离功能,利用该芯片实现 SPI 总线和电源的同时隔离,无需其他电源隔离芯片。

2) 利用高度集成芯片内部 DAC 和电阻输出模块稳定结合相应的温度补偿输出高精度模拟气象信号,由电缆发送至采集器以便检测采集器。

MCU 主控单元模块运行流程如图 3 所示。

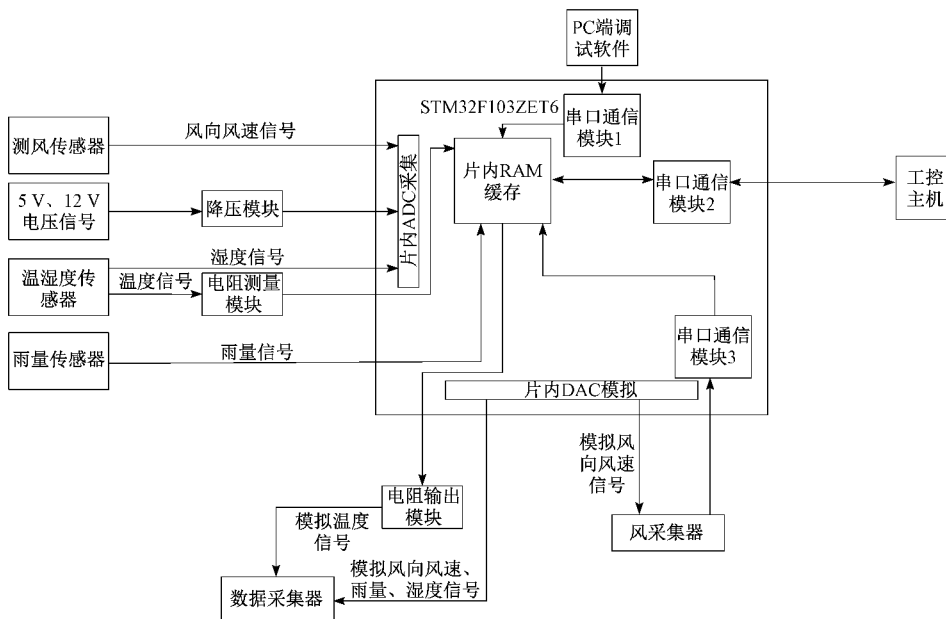


图 3 MCU 主控单元模块运行流程

### 2.2 自动气象站故障检测方法

#### 1) 风向风速传感器故障检测

自动气象站测风传感器的风向输出一般为 0~5 V 的 5~7 位格雷码电压信号,风向信号由微处理器内部 A/D 转换器转换为数字信号,形成相应位数的并行格雷码数据,由格雷码和风向转换关系得出风向值。

旋转式风速传感器在风力驱动下旋转,通过主轴带动磁棒盘旋转,其上的数十只小磁体形成若干个旋转的磁

场,通过霍尔磁敏元件感应输出脉冲信号,信号频率随风速的增大而线性增加<sup>[15]</sup>。通过微控制器对风速脉冲进行脉冲计数计算风速的具体值,表示为  $F_s$  值,如式(1)所示。

$$F_s = 0.1F \tag{1}$$

式中:  $F$  为测得脉冲频率,单位为 Hz。

手动拨动测风传感器,通过检测风向信号电平是否存在高低电平变换判断是否正常;通过检测风速信号脉冲宽度来判断风速传感器是否正常。若相邻两个脉冲宽度大

于 20%，则风速传感器内部霍尔元件脱落。

2)雨量传感器故障检测

雨量计一般采用翻斗式,内部的翻斗每翻一次,触发干簧管通断一次,表示 0.1 mm/min 降水<sup>[16]</sup>。雨量信号的采样处理电路与风速风向处理电路类似,不同的是,在对雨量信号采样时,考虑到脉冲计数的延迟,采样过程中设置 10 ms 的间隔,以此保证采样信号的准确性。在检测时手动翻动小翻斗,记下翻斗次数,与采样的翻斗次数进行比较。若翻斗次数相同,则传感器正常,否则进行干簧管检测;将小翻斗靠近干簧管,检测输出电压,若为低电平,则正常,否则有故障。

3)温湿度传感器故障检测

自动气象站常用的温湿度传感器为 HMP 系列一体式温湿度传感器<sup>[17]</sup>,利用传感器内置的微形铂电阻阻值正比于温度变化的原理,从而测得温度值。自动气象站故障检测系统测温硬件电路由信号调理和 A/D 转换电路测量铂电阻阻值<sup>[18]</sup>。通过 AD 内部 OUT1 输出为 1 mA 的电流流过铂电阻  $R_2$  和标准电阻  $R_1$ 。AD 的通道 1 测量铂电阻两端电压。测温硬件电路如图 4 所示。通过电压比来测量电阻值,进而得到当前温度值。设  $R_1$  为标准电阻值,两端电压为  $V_1$ ,被测 PT100 阻值为  $R_2$ ,采样电压为  $V_2$ ,温度表示为  $T$ ,如式(2)所示。

$$T = \frac{100(V_2 R_1 - 100V_1)}{392V_1} \quad (2)$$

提高测量精度方法主要为:(1)测温硬件电路采用的 AD7793 芯片为 24 位  $\Sigma-\Delta$  型 ADC,功耗仅为 400  $\mu$ A,具有低功耗、低噪声的特点,非常适合精密测量;(2)总线采用光耦隔离的方法,从而减少对测温电路干扰提升测量的精度。

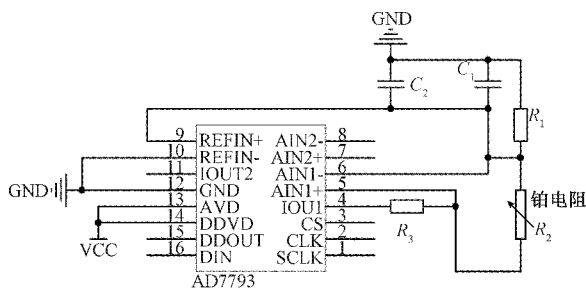


图 4 测温硬件电路

温湿度传感器的测温元件采用聚合物薄膜电容传感器 HUMICAP180,电参数输出为 0~1 V 电压信号,对应的湿度值为 0%RH~100%RH<sup>[19]</sup>。湿度信号送入 A/D 转换接口,根据湿度-电压函数转换得到湿度值。

4)气压传感器故障检测

气压传感器一般采用 PTB 系列数字气压仪<sup>[20]</sup>,能够根据自身通信协议对观测数据自动进行采集、运算、传输。检测时通过探测通信模块的 RS232 接口<sup>[21-22]</sup>发送数据检测指令“# send data”进行故障检测,若接收到“# errs”指令,表明传感器故障;否则传感器正常。

5)风采集器故障检测

在检测风采集器时检测电缆给风采集器发送模拟信号;并同时检测风采集器转换出的 +5 V 电压。气象站故障检测系统按照协议通过发送指令读取数据,比较模拟发送的风向风速数据与接收的风向风速数据判断风向风速转换电路是否正常,通过测量 +5 V 信号是否正常判断风采集器内部电源转换模块是否正常。

6)数据采集器故障检测

对数据采集器进行故障检测时,由于风采集器、气压传感器与数据采集器的通信方式为 RS232 总线形式,因此根据数据采集器通信协议编码完成风采集器、气压传感器模拟数据的发送与接收;模拟降水信号和湿度信号由微处理器芯片内部 DAC 进行气象信号的模拟;温度信号电参数一般为电阻信号,因此若要模拟温度信号就需要模拟相应的电阻信号,再根据电阻与温度之间的关系转换输出模拟温度信号。而四线制电阻输出方法虽能达到输出不同电阻信号目的,但其无法避免内部继电器模块电阻对输出电阻组成的影响。因此从硬件和软件两个方面提出一种改进型模拟温度信号方法,在硬件方面,对传统四线制电阻输出电路进行改进,采用精度为万分之一、温漂系数  $\pm 2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的 UPR 型电阻。通过集成模拟开关切换每个特征电阻的四线输出,模拟开关本身的接触电阻不会计入到输出电阻中;电流信号  $I$  通过输出电阻两端产生电压差,测得电阻  $R$  值,如式(3)所示。

$$R = \frac{U_H - U_L}{I} \quad (3)$$

$U_H$ 、 $U_L$  分别为电阻两端的电压通过软件控制集成模拟开关即可控制输出不同高精度电阻信号,再根据温度-电阻函数转换关系得到相应的温度值;现在常用的铂电阻都是按照统一标准设计的,其温度电阻特性固定,但由于自身电阻精度和电路设计影响,若直接套用对精度影响较大。为了提高输出电阻的精度,通过故障检测软件运用分段最小二乘法对 PT100 温度传感器进行拟合提升精度,根据拟合后的误差平方和最小的原则来衡量拟合的效果从而达到最佳的拟合效果。

最后通过通信模块的 RS232 通信接口接收数据采集器发送的探测数据。根据探测数据与模拟发送的数据的比较,判断数据采集器内部具体各个气象信号转换电路故障情况。

2.3 通信模块

探测数据通信模块用于对通信设备进行故障检测,为满足不同接线要求使用 RS232 和 RS485 两种串口传输接口。RS232 接口转换电路如图 5 所示。气象站内的通信设备具有定位、短报文通信等功能<sup>[23]</sup>,遵循通信系统传输格式协议,通过 RS232 接口自发自收模拟探测数据,检测通信设备是否工作正常。

2.4 电源模块

电源模块由 3 组可充电锂电池组串联通过内部转换

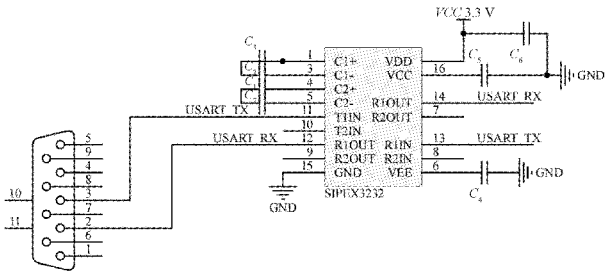


图 5 RS232 接口转换电路

电路将电源转换为 +12 V、+5 V，锂电池组的额定电压为 3.7 V。除了为整个自动气象站故障检测系统提供电力供应外，还要在检测时为气象站检测部件单独供电。供电系统框图如图 6 所示。

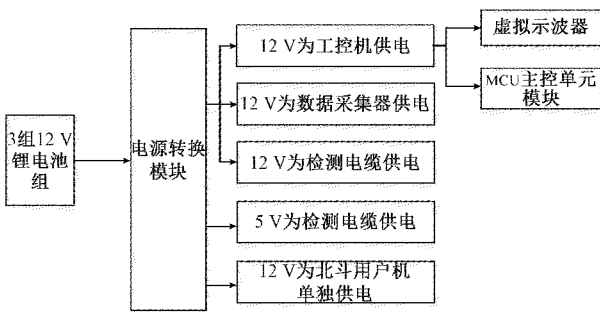


图 6 供电系统框图

### 3 检测装置的软件结构

自动气象站故障检测系统实现气象站各类气象信号的采样、模拟、数据传输等功能，故障检测软件通过 QT 进行编写，负责对数据进行处理分析。首先，系统初始化各个模块和接口，根据用户需求，在软件总界面选择被测对象，然后根据被测对象的功能选择相应的子界面，依据具体情况选择相应被测对象的故障诊断模式，故障检测软件的运行流程图如图 7 所示。

自动气象站故障检测软件通过控制四大任务的运行来实现对自动气象站故障的快速诊断，包括对电源模块和整个系统电压的测定；对采集器模拟气象信号的输入和故障诊断；对传感器信号的采集、解析和故障诊断；对通信设备功能的检定。

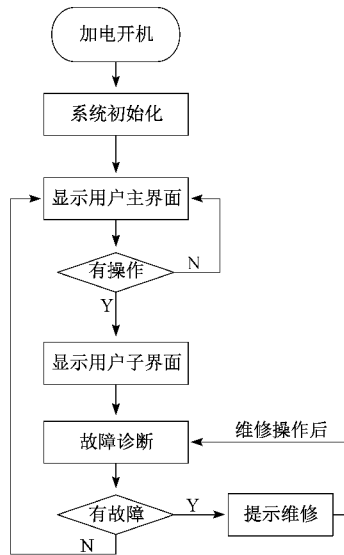


图 7 故障诊断软件的运行流程

### 4 系统测试

根据外壳尺寸，设计内部各个模块和电路板布局；设计触摸显示屏、电源显示、线缆接口以及开关按键开口布局位置。自动气象站故障检测系统如图 8 所示。

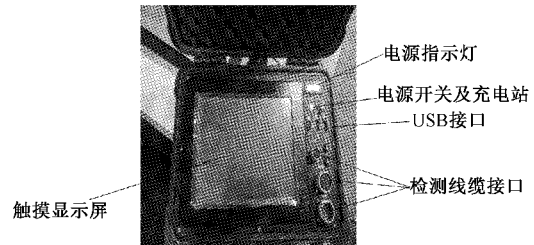


图 8 自动气象站故障检测仪实物图

系统测试地点位于南京信息工程大学气象实验基地，主要进行 3 个测试。测试 1 为利用该装置，设定气象输出要素，为检测本系统输出模拟气象信号是否达到实际检测所需要求，通过高精度 6 位半台式万用表、示波器测量各气象要素通道输出的电信号，通过比对系统实际输出值和高精度仪器测量值，验证系统性能。检测系统模拟输出测量结果对比如表 2 所示。

表 2 模拟输出测量结果对比

测量参数	模拟值			测量值			误差 $\delta$			平均误差
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
风向/ $^{\circ}$	90	180	300	90	180	300	0	0	0	0
风速/ $(m \cdot s^{-1})$	10	30	50	10	30	50	0	0	0	0
温度/ $^{\circ}C$	-50	10	30	-49.75	10.23	29.80	0.25	0.23	0.2	0.23
湿度/%RH	20	50	80	19.75	49.72	79.70	0.25	0.28	0.30	0.28
气压/hPa	950	1 000	1 060	950	1 000	1 060	0	0	0	0
雨量/ $(mm \cdot min^{-1})$	0.5	1	3	0.5	1	3	0	0	0	0

测试 2 设计分别利用该装置和传感器实验室检定设备,连接气象实验基地内的自动气象站,在 2021 年 11 月 18 日 10:00、15:00、22:00 采集气象站的气象要素数据,通过比对两者采集值,验证系统性能。检测系统信号采集测量对比如表 3 所示。

表 3 信号采集测量结果对比

测量参数	采集值			检测值			误差 $\delta$			平均误差
	10:00	15:00	22:00	10:00	15:00	22:00	10:00	15:00	22:00	
风向/ $^{\circ}$	149	166	94	149	166	94	0	0	0	0
风速/ $(m \cdot s^{-1})$	0.9	2.2	0.7	1.0	2.2	0.7	0	0	0	0
温度/ $^{\circ}C$	16.77	19.18	15.75	16.91	19.45	15.98	0.14	0.27	0.23	0.21
湿度/ $\%RH$	68.18	55.54	71.23	68.34	55.62	71.09	0.16	0.08	0.14	0.13
气压/hPa	1 015.1	1 013.27	1 014.7	1 015.1	1 013.27	1 014.7	0	0	0	0
雨量/ $(mm \cdot min^{-1})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

测试 3 设计通过两种方法对事先选择损坏的风速传感器进行测试,记录两者的检测结果和检测时间。方法 1:通过检测电缆将其与自动气象站检测装置进行连接,因为检测对象为风速传感器,故选择传感器故障检测界面中风向风速功能,通信速率默认为 115 200 bits/s。通信连接正常后,点击故障检测按钮开始风速传感器故障检测,片刻后显示当前磁铁掉落个数以及在诊断结果内表明当前风速传感器故障信息。方法 2:采用传统检测方法对损坏风速传感器进行检测,具体操作为通过连接数字示波器采集风速传感器信号,记录风速信号参数,根据相应规则判断故障情况。检测系统测试和结果界面如图 9、10 所示,两种检测方法结果对比如表 4 所示。

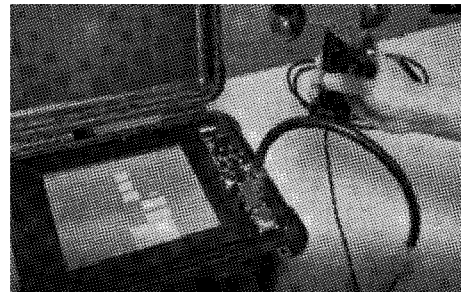


图 9 系统测试图

5 测试结果分析

本系统采用误差  $\delta$  来评判输出模拟信号的精度和采集气象信号准确度,表示为模拟输出值  $f_{模拟}$  和高精度仪器测量值  $f_{测量}$  之间的绝对误差以及气象信号采集值  $f_{采集}$  和气象信号实际值  $f_{实际}$  之间的绝对误差,其中模拟值表示为系统模拟输出值,测量值用高精度仪器测量值表示;采集值为系统信号采集值,实际值为使用传统实验室检定装置测量值表示。测量对比结果如表 2、3 所示。

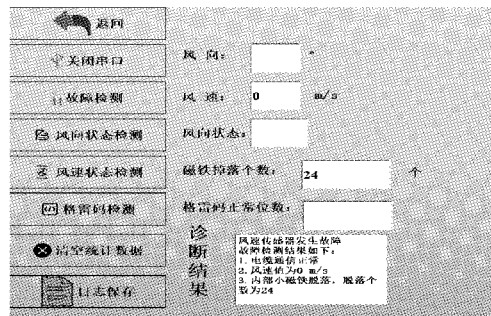


图 10 检测系统界面图

表 4 检测结果对比

检测传感器类型	风速传感器
电信号类型	脉冲信号
故障检测结果	1. 根据风速传感器脉冲波形,相邻两个脉冲宽度不大于 20%, 计算得出内部小磁体脱落个数为 24。
检测时间(包括线缆连接时间)/min	8

分析表 2 可知,在对每个模拟气象信号输出值进行精密测量的结果中,由于风向、风速、气压、雨量传感器输出量为数字量,因此能够达到 0 误差,温度模拟信号误差能稳定在 0.3  $^{\circ}C$  以内,平均误差为 0.23  $^{\circ}C$ ;湿度模拟信号误差同样稳定在 0.3% 左右波动,各个气象模拟信号平均误

差在可控范围内,满足在表 1 气象站气象信号误差范围内,满足采集器模拟输入信号精度要求,验证了自动气象站故障检测系统模拟信号的高精度性;在对自动气象站气象信号进行采集后,其采集误差不大于 0.27,平均误差稳定在 0.2 左右,气象信号误差有浮动,但其采集精准度仍

在可控范围内,充分验证了系统采集气象信号的准确度。

分析表 4 可知,测试 3 则是根据实际运用来操作检测系统对损坏的风速传感器进行故障诊断。由图 9 可见其操作简便,且接口形式存在多样化,能够满足各种不同类型的气象站的需求。最后检测结果由图 10 和表 4 分析可知,与传统检测方法根据风速信号人工进行计算分析判断传感器内部情况相比,自动气象站故障检测系统将检测时间缩短 69%,同时检测界面定位出风速传感器内部具体损坏部分,能够实现故障损坏部件快速准确的定位,给工作人员提供便利条件。

综上所述,该自动气象站故障检测系统所输出的模拟气象信号数值与高精度仪器所测以及采集气象信号与实际值基本一致,其故障检测功能能够满足不同类型气象站故障检测需求,具有很强的实用性。

## 6 结 论

本系统以自动气象站作为测试对象,通过低功耗控制器、自动控制、微电子技术等,采用便携式结构、锂电池供电,对其施加模拟的标准气象信号,综合分析其运行状态,进行故障辅助分析实现对气象站部件的故障检测和状态监控,快速定位故障位置,实现气象观测系统工作状态的现场判断,提高气象站维护人员的工作效率。测试表明,系统能够稳定输出主流气象要素信号且误差不大于 0.3,准确采集气象信号分析气象站内部组件损坏情况。因此本系统可实现对国内主流自动气象站故障检测。未来可以结合其他智能算法<sup>[24-27]</sup>进一步提高测量的精度。

## 参考文献

- [1] 李伟雄. 自动气象站数据采集器的常用校准方法[J]. 中国计量, 2008(5): 83-84.
- [2] 敖振浪, 刘艳中. 自动气象站多功能电源的设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 18-22, 33.
- [3] 邢玉品, 陈晓. 基于 TDC-GP22 的超声波测风仪设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(21): 128-131.
- [4] 汪玲. 新型自动气象站日常运行故障诊断与检修[J]. 农业与技术, 2019, 39(11): 137-138.
- [5] 孙嫣, 杨宗波, 韩广鲁, 等. 移动气象计量现场校准核查信息系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1633-1640.
- [6] 蒋涛, 于平, 刘宇, 等. 区域自动气象站蓄电池在线监测系统的研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 85-89.
- [7] 陈佳楠, 马永涛, 李松, 等. 嵌入式存储器动态故障诊断数据压缩设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 203-209.
- [8] 杨维发, 张冰松, 秦运龙, 等. 便携式自动气象站故障检测仪的设计与研发[J]. 气象科技, 2017, 45(6): 1106-1111.
- [9] 裴建勋, 姚继东, 赵雪明. 新型自动气象观测站故障检测仪的研发[J]. 气象灾害防御, 2018, 25(2): 44-48.
- [10] 郭宗凯, 郭飞, 刘旭, 等. 便携式自动站故障检测仪的研制[J]. 吉林农业, 2018(4): 93.
- [11] 王明辉, 陈冰杯, 黄海, 等. 自动气象站常规传感器现场检测系统设计[J]. 气象科技, 2019, 47(3): 402-407.
- [12] 侯飙, 韩书新, 徐嘉, 等. 新型自动站故障诊断系统的研究与设计[J]. 现代化农业, 2017(6): 59-60.
- [13] 鲁慧琦, 张国平, 杨晓霞, 等. 基于 AES 的 STM32 在应用升级设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 141-146.
- [14] 荣百川, 陈晓. 基于蓝牙的智能防摔监测系统的设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(7): 32-34.
- [15] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 超声波测风换能器对风速的影响研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 118-124.
- [16] 胡苍龙, 李晓红. 自动气象站雨量传感器现场校准方法计量性能要求合理性探讨[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(5): 79-80.
- [17] 张莉莉, 沙奕卓, 行鸿彦. 自动气象站现场温度校准系统的设计及实现[J]. 测控技术, 2014, 33(3): 6-10.
- [18] 徐伟, 杨绪森, 张光宇, 等. 手持式气象传感器现场测量仪的开发[J]. 现代电子技术, 2014, 37(22): 131-134.
- [19] 陈为超, 范雪波. 湿度传感器检定条件的影响[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 693-696.
- [20] 陈华, 沈旭. PTB220 气压传感器的校准及误差分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(3): 20-22.
- [21] 杨雷, 李广明. 基于多周期测量方法的气压传感器信号采集[J]. 仪器仪表报, 2007(4): 687-691.
- [22] 陈晓. 基于压电传感器和个人计算机构成的脉搏信号实时监测系统[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(35): 6847-6850.
- [23] 陈晓. 基于无线通信的脉搏信号采集系统[J]. 通信技术, 2008, 41(12): 268-270.
- [24] 孙超文, 陈晓. 基于多尺度特征融合反投影网络的图像超分辨率重建[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1689-1700.
- [25] 朱娟, 陈晓. 改进胶囊网络的有序重叠手写数字识别方法[J]. 激光杂志, 2019, 40(7): 43-46.
- [26] 沈千里, 陈晓, 支亚京, 等. 一种新的人脸图像去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(11): 133-136.
- [27] 胡春杰, 陈晓, 郭银. 基于多混沌映射的光学图像加密算法[J]. 激光杂志, 2017, 38(1): 110-114.

## 作者简介

陈晓(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为现代电子系统设计、信号与信息处理、图像处理、超声成像等。

E-mail: chenxiao@nuist.edu.cn

张凯, 硕士, 主要研究方向为信号处理和嵌入式系统开发。

E-mail: 1846496240@qq.com