

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107784

区域自动气象站多传感器冗余观测技术设计与实现*

甘志强^{1,2} 高涛^{1,2} 匡昌武^{1,2} 陈泰星^{1,2}

(1.海南省气象探测中心 海口 570203; 2.南海气象防灾减灾重点实验室 海口 570203)

摘要:为实现区域自动气象站探测设备级数据质量控制,从观测源头提高气象探测数据的稳定性、真实性和可靠性,基于现有区域自动气象站技术架构,利用3个气温传感器、3个雨量传感器、2个风传感器及智能控制单元对现有区域自动气象站进行改造,主要实现对气象观测非线性变量(温度、雨量、风向、风速)的多传感器冗余观测,通过设置采集器端前置算法,对同一时刻、同一要素多个探测数据进行阈值交叉验证,得出最优的探测数据。试验结果证明,多传感器冗余观测技术能有效改进单传感器测量结果的不确定性和不稳定性,提高区域自动气象站探测数据的可用率和准确率具有重要意义。

关键词:自动气象站;多传感器;冗余;前置算法;数据质量控制

中图分类号: P414;P412 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design and implementation of multi-sensor redundant observation technology in regional automatic weather station

Gan Zhiqiang^{1,2} Gao Tao^{1,2} Kuang Changwu^{1,2} Chen Taixing^{1,2}

(1. Hainan Province Meteorological Center, Haikou 570203, China;

2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Haikou 570203, China)

Abstract: In order to achieve the quality control of the detection equipment-level data of the regional automatic weather station, and to improve the stability, authenticity and reliability of the weather detection data from the observation source, based on the existing technical architecture of the regional automatic weather station, using 3 temperature sensors, 3 rainfall sensors, 2 wind sensor and an intelligent control unit transform the existing regional automatic weather station, which mainly realizes the multi-sensor redundant observation of the non-linear variables (temperature, rainfall, wind direction, wind speed) of the meteorological observations. By setting the front-end algorithm of the collector, perform threshold cross-validation on multiple detection data of the same element at the same time to obtain the optimal detection data. The test results prove that the multi-sensor redundant observation technology can effectively improve the uncertainty and instability of single-sensor measurement results, and it is of great significance to improve the availability and accuracy of detection data from regional automatic weather stations.

Keywords: automatic weather station; multi-sensor; redundant; front-end algorithm; data quality control

0 引言

区域自动气象站(以下简称“区域站”)是一种野外无人值守自动观测设备,作为地面观测能力的重要补充,因其覆盖范围广、信息量大等优势,其观测资料在强降水、高温、大风等区域性灾害天气分析和数值天气预报中得到广泛应用^[1-2]。由于区域站多为无人值守站,探测设备和探测环境维护保障及时性不高,造成区域站的数据质量参差不齐,制约着资料的深入应用。当前我国的区域站多采用单传感器

通过信号电缆与采集器连接,由采集器完成观测要素的采集,采集要素主要包括温度、湿度、气压、雨量、风速、风向等,这种模式也带来了一定的难题,主要体现在:1)单一传感器探测,一旦传感器发生故障,观测数据就缺失,观测数据的连续性和稳定性难以保证;2)当存在外部干扰,而不超过极值时,往往需要人工进行判断、确认,数据的可用性、真实性难以保证;3)当传感器在使用过程中电气性能发生改变,维护人员很难及时发现,数据准确性难以保证。

2017年,中国气象局启动国家级地面天气站建设及升

收稿日期:2021-09-05

* 基金项目:海南省气象局科研项目(HNQXJS2020009)资助

级改造工作^[3],海南省气象局逐步完成对全省 101 套区域站升级改造,实现对地面观测站网进行优化,建设及改造了一批具有代表性的区域站,旨在提供真实、稳定、可靠的探测数据。根据《综合气象观测业务发展规划(2016-2020 年)》中提出的“建立并优化技术装备的设备端数据质量控制方法和技术标准”的要求,必须要加强装备的设备端数据质量控制,从数据源头入手提高区域站探测数据准确性和可靠性。在实际业务过程中,目前我国区域站数据质控主要依靠后端数据中心的气象资料业务系统(简称 MDOS 系统)实现对气象观测资料的数据层级质量控制^[17],而针对装备设备采集端数据质量控制手段比较单一,效果不明显。MDOS 系统质控主要通过软件质控算法挑选出疑误信息^[18-12],并通过人工进行确认、反馈,再根据历史观测数据及邻近站点观测数据进行人工订正,无法有效保证观测数据的真实性和有效性。目前自动气象站设备采集端的设备级质控基本处于起步研究阶段,何艳雨等^[13]提出了基于数据融合的多传感器自动站设计方案,该方案提出利用气候极限值检查及权重分配的数据融合^[14]策略开展设备级质控,取得了较为理想的试验效果。但该方案主要应用于国家级地面观测站,相较于区域站,国家级地面观测站的历史气象资料较完备,具备开展历史极值检查的基础,同时采用基于权重分配的数据融合策略,方案的计算量也对自动站供电及采集器运算性能提出了更高要求。

本文结合现有区域站业务运行现状^[14],提出一种全新的区域站设备观测架构,通过对现有区域站观测设备进行改造,构建一套 3 支温度传感器、3 个雨量传感器,2 套风传感器的多传感器冗余观测区域站,通过设置新的采集端数据算法,从传感器测量精度和业务规范要求定义测量误差,进而对同一时刻多传感器观测值进行交叉验证比较,挑选计算得出一个最真实、最可靠的测量值作为该时刻的观测值。试验数据验证,经改造后的冗余观测区域站数据稳定性、连续性、可靠性均得到提高,区域站的业务质量明显改善。区域站的多传感器冗余观测自动站设备端数据质量控制策略提出,对后期区域站观测改进及观测站网的优化均有明显的借鉴作用,对提高现有区域站观测数据质量及观测资料的可用率等方面有很大的参考价值。

1 功能框架

本设计综合考虑现有区域站观测结构^[15]特点,针对常规的六要素区域站进行改造。由于湿度和气压观测线性变化情况好、设备工作相对稳定^[16],故考虑对温度、雨量和风观测进行多传感器冗余观测改造。通过引进 3 支温度传感器、3 只雨量传感器、2 套风传感器,设置温度智能单元和雨量智能单元完成温度和雨量多传感器观测数据的采集测量,数据采集完成后通过 CAN/RS485 总线接口与主采集器通信,并由主采集器完成数据质量控制和测量输出。系统架构如图 1 所示。

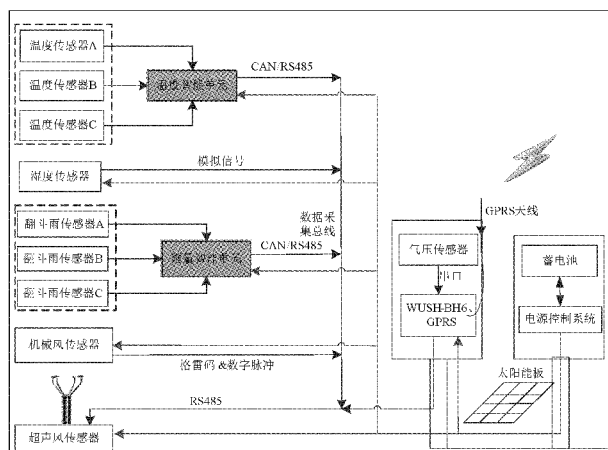


图 1 系统总体架构

系统搭建完成后,风观测项目采用 2 套风传感器:1 套机械风和 1 套超声风,数据以机械式风传感器数据为准,当发生缺测或故障时以超声风传感器数据为准,同时超声风数据可为机械风数据质控提供参考,避免伪数据产生。

温度观测选用 3 支高精度气温传感器安装在百叶箱中并接入温度智能单元,温度智能单元采集 3 个通道温度值,并通过数据总线传递给主采集器,经温度质控算法处理生成一个标准气温数据作为本时刻温度输出值。

雨量观测相比于温度观测受地域环境及风场影响较大,不同的风场,不同的安装位置,雨量传感器测得的降水值存在一定的差异。同一传感器在同一地点不同时间段的观测数据具有一定的突变性,有可能前一分钟是暴雨,后一分钟是小雨。降水的这两个特性决定了每分钟的雨量观测在空间上的横向比较和在时间上的纵向比较的差异比较大,同时翻斗式雨量计在大雨强情况下,由于翻斗来不及翻动造成雨量流失而使得观测值有较大误差的情况也存在;雨量传感器上方有树叶等遮挡、杂物堵塞、人为浇水破坏以及维护不当等因素均可以造成雨量测量的误差。在本方案设计中雨量冗余观测选用两支分辨率为 0.1 mm 的 SL3-1 型翻斗雨量传感器,一支分辨率为 0.5 mm 的 SL3-1 型翻斗雨量传感器接入雨量智能单元,智能单元完成雨量测量值测量并通过数据总线上传至主采集器,由主采集器智能算法处理生成一个可靠的雨量数据作为对应时刻的雨量测量值输出。在设备安装上让 3 只雨量传感器互成 120°布局在 3 个不同方位上,减小因风场和安装位置造成的误差。同时为防止大雨量雨量翻斗翻转不及时造成的测量误差,引进一只分辨率为 0.5 mm 的翻斗,确保大雨强暴雨观测数据的准确性。

2 数据质控算法研究

2.1 多温度质控算法的研究

为保证区域站温度测量数据的真实性和可靠性,选用 3 支测量误差接近、趋势相同的高精度温度传感器接入温

度智能单元并使用传感器检定数据进行订正,温度智能单元通过采集算法采集3个通道的温度值,由主采集器对采集的温度数据进行交叉验证,进而利用可信温度数据进行计算,最终得出当前时刻站点探测的温度数据。

1) 3个传感器间相互计算偏差:

$$\begin{cases} D_{12} = |T_1 - T_2| \\ D_{23} = |T_2 - T_3| \\ D_{31} = |T_3 - T_1| \end{cases} \quad (1)$$

其中, T_1, T_2, T_3 分别为3支温度传感器的测量温度($^{\circ}\text{C}$),若3支传感器出现缺测,则该时刻值缺测。 D_{12}, D_{23}, D_{31} 分别为传感器测量值两两之间的差值($^{\circ}\text{C}$)。

2) 定义传感器两两间偏差允许范围:

$$Tol(i, j) = \begin{cases} 0.2^{\circ}\text{C}, & |T_i| \leq 50.0^{\circ}\text{C} \text{ 且 } |T_j| \leq 50.0^{\circ}\text{C} \\ 0.5^{\circ}\text{C}, & |T_i| > 50.0^{\circ}\text{C} \text{ 或 } |T_j| > 50.0^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

(1) 如果 $D_{ij} \leq Tol(i, j)$, D_{ij} 在允许范围之内;

(2) 如果 $D_{ij} > Tol(i, j)$, D_{ij} 在允许范围之外。

3) 计算结果:

(1) 如果 D_{ij} 均在允许范围之内,取 T_1, T_2, T_3 的中间值作为结果;

(2) 如果 D_{ij} 有2个在允许范围之内,取 T_1, T_2, T_3 的中间值作为结果;

(3) 如果仅有1个 D_{ij} 在允许范围之内,取形成该 D_{ij} 两支温度传感器测量值的平均值作为结果;

(4) 如果所有 D_{ij} 都不在允许范围之内,结果标识为缺测。

2.2 多雨量质控算法研究

雨量测量值质控判断算法采用雨量周期累计算法进行。通过测量3个雨量传感器周期累计值,根据降水情况,选取可用雨量累计值,经对比、交叉验证计算得出当前雨量值输出。由于针对不同的雨强,雨量传感器的分辨率不同,根据《新型自动气象(气候)站功能规格需求书(修订版)》规定仪器性能,现用翻斗雨量传感器的测量范围和分辨率如表1所示。

表1 雨量传感器测量性能指标

传感器类型	范围	分辨率	最大允许误差
0.1 mm 翻斗雨量传感器	强度 0~	0.1 mm	$\pm 0.4 \text{ mm}$
	4 mm/min		$(\leq 10 \text{ mm});$ $\pm 4\% (> 10 \text{ mm})$
0.5 mm 翻斗雨量传感器	强度 0~	0.5 mm	$\pm 0.5 \text{ mm}$
	10 mm/min		$(\leq 10 \text{ mm});$ $\pm 5\% (> 10 \text{ mm})$

雨量质控算法根据小时降水大小分情况进行计算,以确保测量值真实可靠性。

1) 当1 h降水量 $Pre < 0.5 \text{ mm}$ 时:

$$Pre = (Pre_1 + Pre_2) / 2 \quad (3)$$

Pre_3 不参与计算,其中 Pre_1, Pre_2, Pre_3 分别为2只 SL3-1(0.1)和1只 SL3-1(0.5)雨量传感器累计1 h测得的降水量。

2) 当1 h降水量 $0.5 \text{ mm} \leq Pre < 1 \text{ mm}$ 时:

若 $Pre_1 \geq Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$, 且 $Pre_2 \geq Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$ 时, $Pre = (Pre_1 + Pre_2) / 2$, Pre_3 不参与计算。

若 $Pre_1 \geq Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$, $Pre_2 < Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$ 时, $Pre = Pre_1$ 。

若 $Pre_2 \geq Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$, $Pre_1 < Pre_3 = 0.5 \text{ mm}$ 时, $Pre = Pre_2$ 。

3) 当1 h降水量 $Pre \geq 1 \text{ mm}$ 时:

第1步:计算两两偏差

$$\begin{cases} D_{12} = |Pre_1 - Pre_2| \\ D_{13} = |Pre_1 - Pre_3| \\ D_{23} = |Pre_2 - Pre_3| \end{cases} \quad (4)$$

其中, D_{12}, D_{13}, D_{23} 分别为两两之间的差值(mm),若降水量出现缺失,则相关 D_{ij} 按缺失处理。

第2步:定义两两偏差允许范围

其中2只0.1 mm翻斗雨量传感器 SL3-1(0.1)的最大允许误差为 $Ep1 = Ep2 = 4\%$, 1只0.1 mm翻斗雨量传感器 SL3-1(0.5)的最大允许误差为 $Ep3 = 5\%$, 则 $Tol(i, j) = Pre_i * Epi + Pre_j * Epj$ 。

(1) 若 $D_{ij} \leq Tol(i, j)$, D_{ij} 在允许范围之内;

(2) 若 $D_{ij} > Tol(i, j)$, D_{ij} 在允许范围之外;

(3) D_{ij} 缺失时,按在允许范围之外处理。

第3步:计算结果

(1) 若 D_{ij} 均在允许范围之内,取 Pre_1, Pre_2, Pre_3 的中间值作为结果;

(2) 若 D_{ij} 有2个在允许范围之内,取 Pre_1, Pre_2, Pre_3 的中间值作为结果;

(3) 若仅有1个 D_{ij} 在允许范围之内,取形成该 D_{ij} 的两个降水量的平均值作为结果;

(4) 若所有 D_{ij} 都不在允许范围之内,结果标识为缺测。

3 设备运行及效果分析

根据实验设计,在海南三亚六道岭气候气象台实验基地完成多传感器冗余区域站的改造,设备采用航天新气象有限公司 DZZ1 型区域站进行改装,设计温度、雨量智能单元完成温度、雨量采集,超声风传感器通过 RS232 接入采集器。改造完成的区域站安装在 M1067 区域站旁边,距离三亚国家基准气候站(站号 59948)站约 5.8 km, 站点海拔高度相差约 400 m, 设备于 2021 年 1 月 17 日安装调试完毕,数据通过无线网络上传至中心站数据库,本文选取 2021 年 1 月 20 日~2021 年 7 月 31 日共 6 个多月的数据进行数据对比分析。

3.1 设备运行稳定性

设备安装完成后,自 2021 年 1 月 20 日正式运行,设备运行期间中心站未出现数据缺报丢失现象,数据到报率 100%。在设备运行期间,为验证设备运行稳定性,对温度观测进行过故障模拟试验,共计产生 20 条试验数据,但试验数据未对测量结果产生影响。期间 1 只雨量传感器出现设备故障,但未影响整体数据采集。采集数据经与三亚国家基准气候站和 M1067 区域站数据对比,设备运行稳定,数据变化趋势基本一致,一致性较好。

3.2 观测数据一致性

1) 温度观测数据分析

温度观测数据选取 2021 年 1 月 25 日 00:00~2021 年 3 月 10 日 23:59,共计 45 天 67 680 条分钟采集数据,将 3 路温度测量值与站点综合输出气温值进行比较,分别计算彼此之间的偏差,统计结果如表 2 所示,取相互间误差范围为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,当偏差值在误差允许范围内时,则两个测量值一致。由表 2 可以看出 3 个采集通道间数据偏差 98% 保持在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 偏差以内,采集数据具有高度的一致性。对比结果可以得出,3 支传感器和综合输出气温值完全一致,测量精度满足试验设计要求,没有异常测量值产生,数据采集算法可靠、准确率高。

表 2 温度传感器测量偏差统计

偏差	=0	=0.1	=0.2	=0.3	>0.3	缺测
D_{12}	57 497	10 151	32	0	0	0
D_{13}	42 470	20 837	3 599	736	38	0
D_{23}	45 729	17 446	3 578	905	72	0

在设备运行期间,分别选取融合站点、59 948 业务站和 M1067 站 2 月 1 日~2 月 28 日,共计 4 032 条小时数据进行对比如图 2 所示。

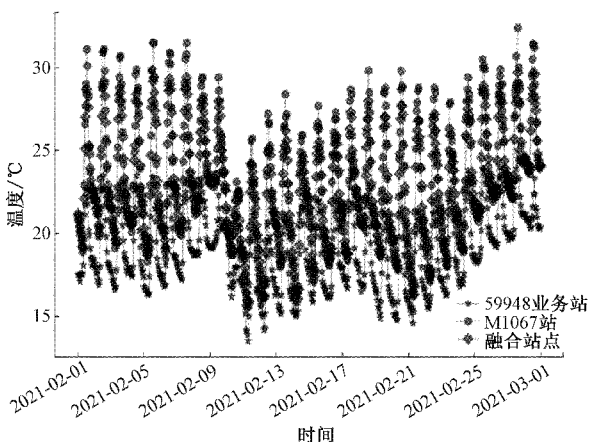


图 2 站点温度数据一致性统计

由图 2 可以看出 3 套站的数据变化趋势基本一致,但由于与业务站(59 948)存在站点环境差异和站点海拔高度

差异,观测数据值大小存在一定的差异,但各时间段内,数据的总体变化趋势相对一致。

取融合站点与 M1067 站数据对比,对比结果如图 3 所示,两站输出温度数据值基本一致,但由于百叶箱比防辐射罩具有更好的通风性,在每天 9:00~16:00 之间融合站点测得的温度值比 M1067 区域站测量值偏大,能更好地反映环境温度的变化。试验对比结果证明融合质控后的数据准确性较高,可更精准的反应环境温度的变化。

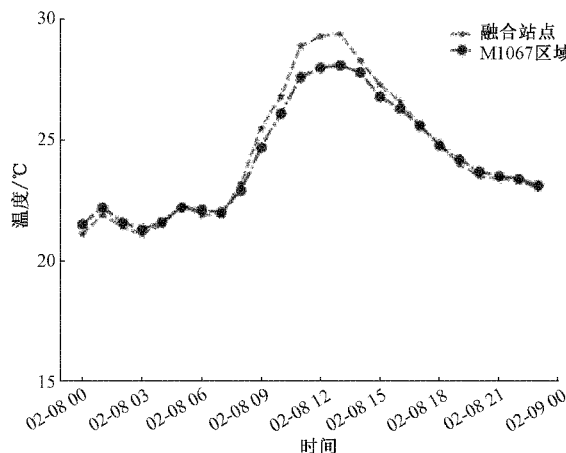


图 3 温度测量变化对比

由试验对比可以看出,与传统区域站对比,改造完成的多温度传感器融合观测区域站,在温度观测上采用百叶箱搭建模式,更能精准反映环境温度的变化,测量结果更具代表性。通多传感器冗余观测模式,在野外观测环境下,能更好的保证观测的准确性及探测设备的稳定性。

2) 雨量数据分析

由于降水具有时间和空间的不连续性,在实验对比中选取 2~7 月共计 6 天 M1067 区域站和融合站点的累计降水值,如表 3 所示。从表 3 中可以看出 M1067 区域站降水与融合站点测量的降水值基本保持一致,从累计雨量绝对值差值来看,差值的平均值为 0.43 mm ,满足雨量观测雨量传感器最大误差范围,测量值准确性可以保证。

2 月 9 日,降水-1 号传感器输出值较其他两路降水测量值存在较大的差异,但是站点降水输出值未受影响,相比于现有区域站,在单传感器发生故障或存在干扰时,站点测量性能不收影响,充分表明多传感器融合降水具有较强的抗干扰能力。

3) 风观测数据对比情况分析

在本设计方案中风速、风向观测采取机械风与 3 维超声风备份冗余观测模式,当机械风数据正常时,观测数据仪以机械风数据为准,当机械风发生故障时,自动切换到超声风数据观测。在风观测数据质控时,超声风数据为机械风数据提供数值参考,确保数据观测的连续性和稳定性。

本设计方案中选取 1 月 25 日~3 月 11 日站点机械风和超声风观测数据进行分析,两组风向数据风频率玫瑰图

表3 降水量一致性统计分析表

日期	M1067 站降水/ mm	融合降水/ mm	降水-1号/ mm	降水-2号/ mm	降水-3号/ mm	D_{12}	D_{13}	D_{23}
2月9日	44.0	42.6	23.0	42.3	43.0	19.3	20.0	0.7
4月18日	0.6	0.6	0.6	0.7	0	0.1	0.6	0.7
5月27日	7.6	7.5	7.0	7.8	7.5	0.4	0.4	0.8
6月9日	37.3	37.0	36.8	37.1	37.5	0.5	0.6	0.1
6月13日	14.0	13.6	13.6	14.2	13.5	0.6	0.1	0.7
7月7日	103.6	104.0	104.0	104.8	103.5	0.8	0.5	0.3

如图4所示,由图4可以看出,机械风和超声风之间风向的频率分布基本一致,1~3月盛行风均为偏东风,符合三亚地区春季盛行偏东风的特征,实验结果表明超声风作为机械风的冗余备份,在机械风发生故障时,能保证站点风观测的稳定性。

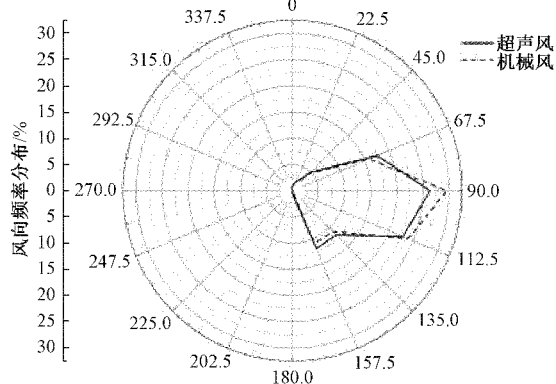


图4 风向频率分布玫瑰图

两组风速小时平均数据对比如图5所示,由图5可以看出两套风速测量值的变化趋势一致,但超声风风速整体比机械风略大约0.3 m/s。

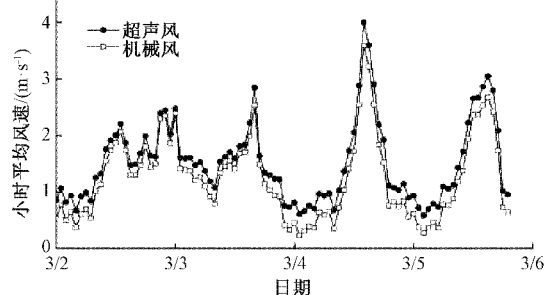


图5 风速小时平均值对比图

3.3 观测数值异常结果分析

为验证多温度传感器观测质控算法的可靠性,在设备运行期间,对温度观测进行了故障模拟试验,在1月20日16:30~16:50,分别断开气温-2号传感器并对气温-3号传感器进行加热处理,站点综合温度输出值和各传感器温度输出值如图6所示。由图6分析可看出:在单个温度传感

器出现故障时,站点的综合输出温度不受影响,保证站点采样的连续性;在某个传感器受外界干扰或性能改变时,其测量值不影响测量结果,保证测量结果的稳定性。

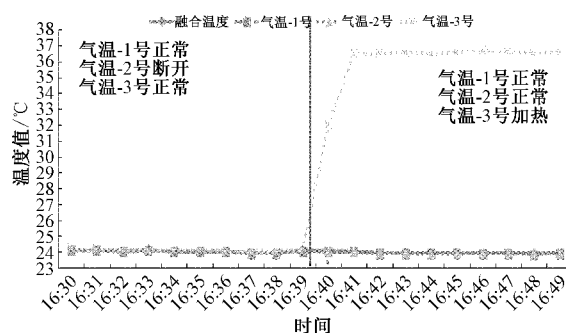


图6 站点故障模拟输出比较

对于多降水融合观测,在2月9日降水-1号传感器测量的降水值与降水-2号、降水-3号传感器降水值存在较大的偏差,降水时段分小时数据统计如图7所示。

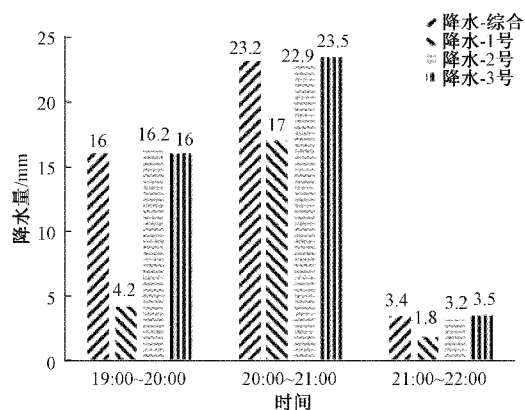


图7 雨量观测故障分析

图7中选取降水时段20:00~22:00小时统计数据,可以看出2号、3号雨量传感器降水量基本保持一致,而1号传感器小时累计降水值明显偏小,且日累计降水量也偏小,基本可以判断1号雨量传感器出现故障或出现堵塞情况。经维护人员现场确认,1号雨量传感器干簧管出现接触不良问题,导致测得累计降水明显偏小,但站点综合输

出降水值与实际情况相符,保证了站点观测数据的准确性。通过上述数据分析可以看出,多雨量传感器融合测降水,经站点设备级质控,能很好地保证数据的连续性和可靠性,与现有自动站观测相比,减少疑误数据产生,并能对设备的性能指标进行有效的监测,保证设备高效运行。

4 结 论

针对传统区域自动气象站单传感器测量带来的测量结果的不确定性,提出采用多传感器冗余观测的设备架构,计算同一气象要素3个测量值,通过对同一时刻、同一要素多个探测数据进行交叉验证融合得到一个更具有代表性,更加准确的数据作为该气象要素的观测值。该方法的提出,有效地实现了区域站设备端数据质控,从探测数据源头进行数据质量的控制,提高了探测设备采集端数据可靠性。通过试验对比分析结果证明,多传感器融合结果与业务观测数据一致性比较高,数据准确率可满足业务要求。从探测数据结果和异常数据进行分析,显示多传感器冗余观测较传统观测具有如下优势:在某一传感器故障时,可保障观测数据连续不间断,提高了数据的到报率和可用率;同时可有效剔除由信号干扰或者外部环境干扰引起的错误数据;通过观测数据变化规律可及时反映单个传感器性能变化。因此多传感器冗余观测自动站对提高设备可靠性、数据完整性和数据质量方面具有较大的优势,能很好的弥补传统区域站数据质量不高、设备状态不稳定的问题具有重要的意义。

参考文献

- [1] 胡苍龙,陈涛. 区域自动气象站风向风速现场核查方法解读[J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35(4):24-27.
- [2] 田世芹,刘非,孙亚丽. 区域气象站现场核查设备工作原理及使用方法研究[J]. 自动化仪表, 2019, 40(5): 104-106.
- [3] 中国气象局. 国家地面天气站布局方案[Z]. 2017.
- [4] 中国气象局综合观测司. 新型自动气象(气候)站功能需求书(修订版)[Z]. 2012.
- [5] WOLFSON N, EREZ J, ALPERSON Z. Automatic

real-time quality control of surface synoptic observation [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 17(4):449-457.

- [6] 刘小宁,任芝花. 地面气象资料质量控制方法研究概述[J]. 气象科技, 2005, 33(3):199-203.
- [7] HAO H, ZHANG G, ZHAO K, et al. A hybrid method to estimate specific differential phase and rainfall with linear programming and physics constraints[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 55(1):1-16.
- [8] 江益,王立俊,羊清雯,等. 南海区域站气象资料质量控制方法改进[J]. 气象科技, 2018, 46(3):474-478,496.
- [9] 刘宇,陈洋勤,张稳,等. 一种地面气温的空间插值方法及其误差分析[J]. 大气科学, 2006, 30(1):146-152.
- [10] 任芝花,熊安元. 地面自动站观测资料三级质量控制业务系统的研制[J]. 气象, 2007(1): 19-24.
- [11] 井高飞,罗丽,肖辉,等. 双偏振雷达在地面自动雨量观测资料质量控制中的应用研究[J]. 气象, 2020, 46(9): 1189-1198.
- [12] 吴书成,魏爽,王丽吉,等. 自动气象站降水实时快速质控算法设计[J]. 气象科技, 2016, 44(6):882-888.
- [13] 何艳丽,黄飞龙. 多传感器自动站的数据融合效果及优势分析[J]. 气象, 2015, 41(8): 1028-1035.
- [14] 李硕,王国涛,李超然,等. 多传感器数据融合的航天装置多余物检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 124-131.
- [15] 熊峰,潘雪,刘颖,等. 自动气象站线缆故障测试仪的研究与设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(1): 111-116.
- [16] 刘宇,王硕飞,蒋涛. 河北省气象计量站关于全国气象温度计量比对试验的结果分析[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4):136-139.

作者简介

甘志强,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为大气探测信息处理。

E-mail:ganzhiqiang1986@163.com