

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106380

基于露点温度的“回南天”器测方法设计^{*}

黄飞龙 陈冰怀 何艳丽

(广东省气象探测数据中心 广州 510080)

摘要: 针对日前“回南天”天气现象只能通过人工观测的现状设计了一种自动监测方法。该方法的硬件系统由气温、地板温度、湿度传感器和基于STM32的在线标校数据采集器组成,采用了开尔文四线检测设计和差分自校准等方法,精确测量空气温度、相对湿度和地板表面温度,再通过新马格拉斯公式进行露点温度的反算,结合发展趋势综合判断的方法,实时监测“回南天”天气的生消过程。试验结果表明,该方法能够准确判断“回南天”的出现和消失时间,当趋势线夹角 $A \leq 15^\circ$ 时发出轻度告警,当 $15^\circ < A \leq 30^\circ$ 时发出中度告警,当 $A > 30^\circ$ 时发出重度告警,对提前做好防潮防水措施具有参考价值。本设计可以为复杂的和精细化的环境和气象监测提供参考。

关键词: 回南天;露点温度;开尔文四线检测

中图分类号: TP216;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

A measurement design of Moistening Weather phenomena
based on dew-point

Huang Feilong Chen Binghuai He Yanli

(Guangdong Meteorological Observation Data Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In view of the current situation that the Moistening Weather phenomena can only be observed by man, an automatic monitoring method is designed. In the system of temperature, humidity sensors and online calibration data monitor based on STM32, Kelvin four-terminal sensing and differential self-calibration are adopted. Air temperature, relative humidity and surface temperature of floor can be measured accurately. And dew-point temperature is calculated by inverse function of New-Magnus formula. Then "Moistening Weather" process can be monitored in real time. Experiments show that the measurement can prompt the exact time of generation and disappearance. Light warning is sent when trend angle $A \leq 15^\circ$, moderate warning is sent when $15^\circ < A \leq 30^\circ$, and severe warning is sent when $A > 30^\circ$. It is important reference for waterproofing measures. The design can provide reference for the development of particular weather phenomenon monitoring.

Keywords: Moistening Weather; dew-point temperature; Kelvin four-terminal sensing

0 引言

“回南天”是华南和江南地区的季节性潮湿天气现象,除了对日常生活带来不便,还会造成较大的经济损失和危害。宋惠安^[1]研究了在这种潮湿天如何保存种子和花生的方法。任宏霞等^[2]指出了“回南天”对粮食储备工作的重大影响。郑家稳^[3]则指出“回南天”对城市排涝泵站电气装备短路故障的影响并提出应对措施。刘晶东等^[4]所做的电气绝缘实验证实了潮湿天气凝露对电力设备的损害。林伟等^[5]提出“回南天”输配电系统安全的防凝露研究课题。荣保华^[6]则从消防安全监督的角度指出潮湿空气对易燃易爆

化学品的危害。实现“回南天”天气现象监测和预警,提前采取措施消除潮湿天气带来的影响,能够减少经济损失和避免灾害的发生。

“回南天”在国内气象研究、气象服务中逐渐受到关注。王庆国等^[7]利用建筑物内壁温度和15 cm地温之间的相关性研究“回南天”的天气影响系统和特征。余江华等^[8]总结了低温阴雨天气和“回南天”出现的规律,提出了分等级预报的观点。陈见等^[9]、罗小莉等^[10]均研究了该天气发生时局部的大气环流特征,并提出预报方法。但是该天气现象一直没有自动化的观测方法,对于其预报的准确性还是采用人工观测的方法验证。由于天气现象的监测准确性受多

收稿日期:2021-04-14

^{*} 基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B0101130021)资助

种因素影响,单纯依靠更快的控制器、更大的存储空间和位数更多的模数转换器不一定能获得具有代表性的真实值,王雨畅等^[11]、朱杰等^[12]研究表明,观测技术必须将电子信息技术、现象发生原理和测量方法紧密结合。

本文在介绍“回南天”发生原理和综合判断方法的基础上,设计一种实时监测方法,通过测量仪器对代表性环境连续、稳定的测量和反算,准确地监测“回南天”的发生,并且进一步判断该天气现象的严重程度。

1 原理及计算

当室外暖湿空气遇到较冷的物体便发生热量交换,物体表面附近的空气温度(简称气温)降低,空气容纳水汽的能力下降,达到过饱和时,多余的水汽便析出附着在物体表面。张东等^[13]通过研究室内地板温度、气温、相对湿度(简称湿度)和露点温度等资料,对多个“回南天”天气过程的特征做了分析,指出经过前期低温天气持续一段时间,建筑物及其内部物体充分降温,当气温快速回升,空气的凝露点高于室内物体温度,这是“回南天”出现的充分必要条件。气温回升的时候,回升速度越快或者空气湿度越大,在物品上水汽凝结得越多。李晴岚等^[14]使用建筑地板温度、气温和湿度建立的回归模型也证实了“回南天”形成的条件。

如图 1 所示,随着气温和湿度的升高,露点温度逐步上升,当露点温度曲线和地板温度曲线相交的时候,与地板接触的空气达到水汽过饱和条件,析出的水汽便附着在地板的表面,由于接触面的空气是流动的,不断有高温高湿的空气触碰温度较低的地板,地板的表面便凝聚更多的水珠,出现明显可见的“回南天”现象。图 1 中夹角 A 越大,说明气温回升速度快或者空气中水汽含量高,“回南天”现象越严重。

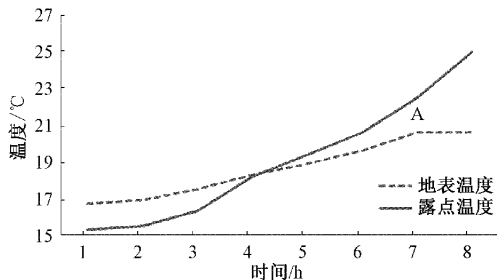


图 1 “回南天”发生条件

为监测“回南天”现象,需要 3 个直接测量要素:气温 T 、湿度 U 和地板表面温度 TG ,再加上一个间接测量要素:露点温度 T_d 。根据中国气象局^[15]的《地面气象观测规范》,采用新系数的马格拉斯公式通过逐步逼近方法求露点温度。

马格拉斯公式为:

$$E_w = E_0 \times 10^{\frac{a \times T_d}{b + T_d}} \quad (1)$$

其转换形式为:

$$T_d = [b \times \lg(E_w/E_0)]/[a - \lg(E_w/E_0)] \quad (2)$$

式中: E_w 为饱和水汽压(hPa); E_0 为 0 °C 时的饱和水汽压,等于 6.107 8 hPa;系数 a 取 7.69;系数 b 取 243.92。而饱和水汽压的计算采用戈夫-格雷奇(Goff-Gratch)公式:

$$\begin{aligned} \log E_w = & 10.79574(1 - T_1/T) - 5.028 \log(T/T_1) + \\ & 1.50475 \times 10^{-4} [1 - 10^{8.2969(T/T_1 - 1)}] + 0.42873 \times \\ & 10^{-3} [10^{4.76955(1 - T_1/T)} - 1] + 0.78614 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $T_1 = 273.16$ K(水的三相点温度); T 为当前时刻的绝对温度(K)。而相对湿度和饱和水汽压之间具有关系:

$$U = \frac{e}{E_w} \times 100\% \quad (4)$$

其中, e 为当前水汽压。

露点温度是气压一定条件下空气冷却饱和时的温度,当空气中水汽达到饱和时,湿度 U 为 100%,由于 e 保持不变,因此饱和水汽压等于当前的实际水汽压,可用当前水汽压代入式(2)求得露点温度。

根据“回南天”产生的充分必要条件,对实时监测数据采用“回南天”判断流程如图 2 所示,对实际监测地板温度和反算的露点温度进行综合判断,提供直观的指数作为告警信息。

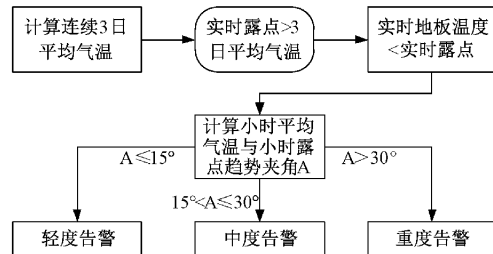


图 2 综合判断程序

由于气温和湿度的变化是一个缓慢但趋势明确的过程,“回南天”现象的产生和消失至少以小时作为单位来度量,平均气温和平均露点温度作为判断程序中的计算趋势的参数,要求使用小时平均或者日平均。

2 数据采集方法

如图 3 所示,器测所需要的实时数据由数据采集器、气温传感器、地板温度传感器和相对湿度传感器组成的系统提供。气温传感器通过热敏电阻的变化反映环境温度的变化,相对湿度输出 0~1 V 的直流电信号对应环境中相对湿度 0%~100% 的变化,通过新马格拉斯公式反算得到实时的露点温度。地板温度传感器通过热敏电阻的变化反映地板表面温度的变化。“回南天”综合判断程序可以在采集器实现,也可以在后端数据服务中实现。

图中电路包括信号处理部分和环境感知部分,主电路元器件具体参数设计如下。黄宏智等^[16]采用主频为 120 MHz

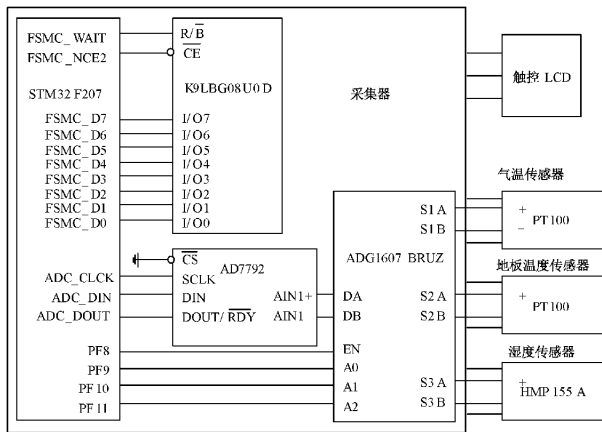


图3 数据采集架构

的运算处理器 STM32 作为信号处理内核,同时配置大容量的程序存储 ROM 和内存 RAM 的方法为本设计提供了参考;配备 4G 容量的闪存芯片 K9LBG08 满足试验长时间在线监测存储实时数据的需要,便于数据下载分析;16 位 $\Sigma-\Delta$ 型模拟数字转换芯片 AD7792,对输入的 0~5 V 模拟电压信号进行数字转换;8 通道的高速电子开关芯片 ADG1607,可根据处理器的控制信号将不同的传感器信号轮询切换到模数转换芯片的测量端口。环境感知部分采用气象观测专用传感器,包括 2 个高精度铂电阻传感器,其测量精度为 0.1 °C,最大误差为 ± 0.2 °C;1 个 HMP155A 湿度传感器,测量精度为 1%,在高湿度环境中最大误差为 $\pm 5\%$ 。

在本设计中,气温和地板温度的测量准确性要求较高,图 4 所示温度信号通道在采集的过程中采用了开尔文四线检测法、嵌入式自校准、差分自校准等方法。首先,PT100 传感器采用四线制,供电回路和测量回路相对独立,由于测量回路电流微弱,极大降低了信号线上的压降和 ADC 输入端的共模干扰,降低气温和地板温度的测量误差。其次,模数芯片每次开始信号转换之前均执行在线的零点校准和范围校准,确保本通道采样不会被其他通道的输入信号干扰。最后,由于对被测传感器电压信号进行采样后直接转换为温度值的方法,当供电或者接地波动时容易出现系统性测量误差,黄飞龙等^[17]专门设计了基于参考信号的在线差分自校准方法,具体实现如下:设计 PT100 传感器与参考元件串联在同一个环路中,对传感器的被测信号 U_T 和参考元件的参考信号 U_R 进行同步采样,将被测信号按参考信号进行归一化和差值运算,消除了两个信号同比例变化的扰动,实现供电和接地干扰自校准的功能。运算得到被测的温度值 T 为:

$$T = k(U_T - U_R)/U_R \quad (5)$$

其中,常量系数 k 由 PT100 铂电阻的特性决定, $k=255.885$ 。

3 测量方法

为了使环境气象要素的测量结果具有准确性和代表

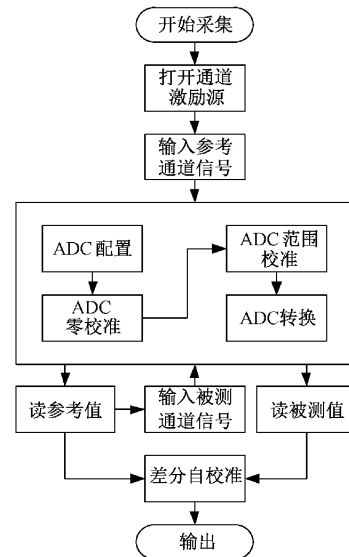


图4 温度通道在线标校

性,测量方法与电子仪器性能一样重要。根据易于产生“回南天”场所的分析,传感器应当安装在相对阴暗潮湿但是又足够通风的场所。具体条件如下:楼房第 1 层(地面层)的北向房间,具有混凝土地面,房内环境不受太阳直接辐射影响,房内空间保持自然通风状态。传感器安装的位置要求:离人员聚集和活动的区域有一定的距离,避免测量数据受到干扰。气温和相对湿度传感器安装在防辐射通风罩内,感应部分离地面高 1.50 ± 0.05 m,地板温度采用单一传感器嵌入安装方法,其铂电阻传感器感应金属棒主体埋入地板表面(卧式),上沿与地板表面平齐,如图 5 所示。

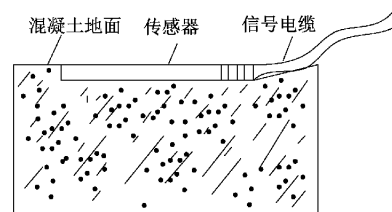


图5 地板温度传感器安装要求

测量流程如图 6 所示。系统程序首先完成嵌入式时钟模块初始化、STM32 处理器 I/O 端口和通信端口初始化、检测模数转换芯片 ADC 和 FLASH 存储模块,随即进入软件循环。在每分钟的任务中,采集器对气温、地板温度和湿度信号进行高速的轮询采样,根据传感器的转换公式将电压信号计算为相应的温度、湿度值,并且按照传感器校准系数表对计算值进行分段数据订正。当时钟进入下一分钟,将触发分钟任务对上一分钟所有的气温采样数据进行数据质量控制:根据气象观测相关规范,剔除相邻采样值差值异常数据和差值错误数据,计算气温的分钟气象瞬时值;同理实现相对湿度的分钟气象瞬时值计算,然后根据式(2)~(4)计算露点温度。在得出地板温度分钟气象瞬时值之后,绘制数据变化趋势曲线,计算曲线夹角,并根据“回南天”发生的

综合判断程序,得到“回南天”监测结果。

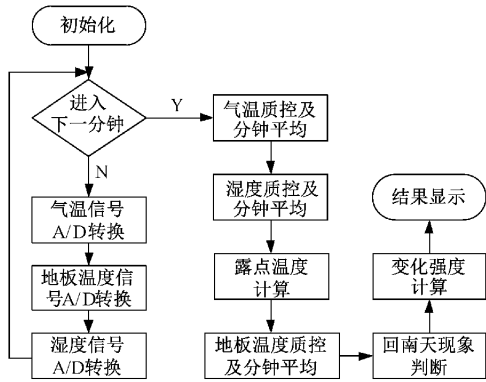


图 6 嵌入式软件控制流程

4 试验及分析

试验样机如图 7 所示,左部为气温和湿度传感器,右部为数据采集器内部组件。

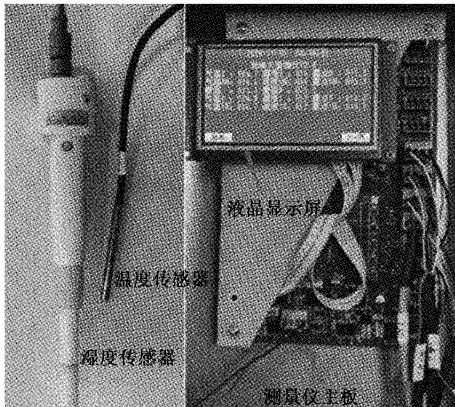


图 7 样机实物

经过一年时间的试验运行,共监测到 4 次回南天现象,其中两次比较典型现象的监测曲线如图 8、9 所示。为方便观察露点温度和地板温度的变化,图中曲线采用了 5 min 间隔的数据点。4 月 1 日 6:10 开始出现中度“回南天”现象,持续时间 2.5 日,由于前期地板温度较低且持续时间较长,气温迅速回升的时候地板温度上升速度缓慢,而且空气中含水量较多,导致出现较严重的凝露的现象。7 月 2 日 23:19 开始出现轻度“回南天”现象,由于前期地板温度相对露点温度而言并不是特别低,且露点温度升高回落的速度较快,持续时间短,产生的影响有限。

试验结果表明本方法能够准确判断“回南天”的出现和消失时间,并且根据趋势夹角判断“回南天”严重的程度。

此外,器测曲线在露点温度上升的时候趋势线比较陡,预期凝露严重,后期趋于平缓之后露点温度与地板温度的差值仍然较大且在 1℃ 以内波动,但实际观察到的凝露水平比理论预期偏低,显示本测量方法对“回南天”生消的时间点判断准确无误,但综合判断“回南天”严重性的时候出

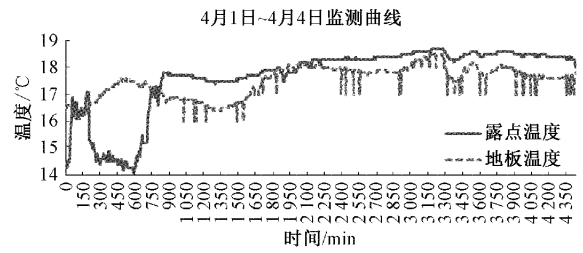


图 8 中度回南天曲线

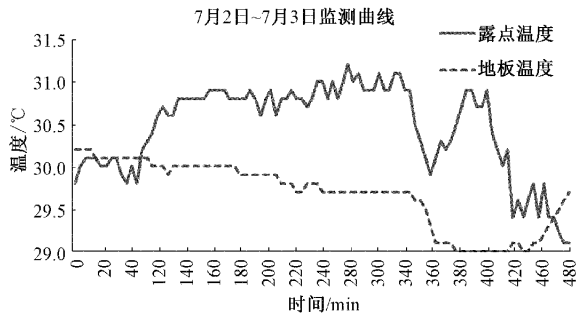


图 9 轻度回南天曲线

现“过冲”。分析凝露过程在现实中受到的影响因素,原因如下。

- 1) 由于试验所在场所只是采取自然通风,并非强制通风,暖气团锋面经过之后风力趋于平缓,使得与地板最接近的接触层空气难以被新的湿润的空气替代,阻碍了凝露的速度;
- 2) 接触空气层一旦凝露释放水汽,需要从周围的空气补充新的水汽才能源源不断析出水珠,这一扩散过程比较慢;
- 3) 接触层空气的温度与地板逐渐接近,其实际露点温度与试验反算所得的值不完全一致。

5 结 论

本文根据“回南天”天气现象形成的原理设计并实现了自动化监测该天气现象的方法。系统采用开尔文四线检测设计和差分自校准等方法实现精确测量温度和湿度,嵌入式软件基于露点温度反算和“回南天”综合判断程序实现了自动化监测。为了提高本方法的观测准确性,未来拟从两方面改进:采用微型传感器测量地板表面接触层空气的气温和相对湿度,取得实际发生凝露的空气层的露点温度;其次,引入接触层空气流速作为参数,反映水汽补充的速度。

参考文献

[1] 宋惠安,花生果的安全储藏[J]. 科学种养,2013(1): 59-59.
 [2] 任宏霞,安晓鹏,赖新华,等.“回南天”大批量玉米入库安全度夏探索[J]. 粮油仓储科技通讯,2011(3):10-13.
 [3] 郑家稳.“回南天”对洋关泵站机组影响分析[J]. 科技展望,2016(23):100.

- [4] 刘晶东,吴宏伟,周密,等.潮湿天气绝缘试验[J].农村电气化,2010(12):24-25.
- [5] 林伟,汪金刚.采用模糊控制技术的电气设备防凝露控制器[J].哈尔滨理工大学学报,2012,17(2):36-39.
- [6] 荣保华.易燃易爆危险化学品储存场所的消防监督检查[J].中国西部科技,2013(6):84-86.
- [7] 王庆国,黄归兰,黄增俊,等.“回南天”的客观分析方法研究[J].气象研究与应用,2014,35(2):1-6.
- [8] 余江华,邓明,王成,等.广东回南天等级划分及与前期低温阴雨的关系[J].广东气象,2014,36(2):61-63.
- [9] 陈见,李佳颖,高安宁,等.广西“回南天”发生特征及预报着眼点[J].气象,2015,41(3):372-379.
- [10] 罗小莉,古明悦,钟利华,等.近年广西典型“回南天”现象成因分析[J].气象科技,2015,43(4):659-665.
- [11] 王雨畅,张国玉,孙高飞,等.日照计的研究概况与发展趋势[J].仪器仪表学报,2020,41(12):1-14.
- [12] 朱杰,行鸿彦,迎春.闪电和降水关系动态可视化研究平台开发[J].电子测量与仪器学报,2019,33(11):65-72.
- [13] 张东,汪瑛,冯业荣,等.广东“回南天”现象分析及其预报[J].气象科技,2014,42(2):303-308.
- [14] 李晴岚,武杨,曹春燕,等.深圳“回南天”天气预报探讨[J].热带气象学报,2014,30(5):971-976.
- [15] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003:129-130.
- [16] 黄宏智,黄飞龙,黄海莹,等.基于STM32单片机的鱼塘气象综合观测系统[J].电子测量技术,2019,42(7):104-107.
- [17] 黄飞龙,黄晓云,黄海瑾.基于温度补偿的高精度超声波蒸发测量仪设计[J].国外电子测量技术,2019,38(8):137-140.

作者简介

黄飞龙,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为气象及环境探测传感器研发、大规模监测组网和观测方法。
E-mail: chasellong@126.com