

我国探空测湿传感器的温、湿特性试验与分析

李峰¹ 杨荣康¹ 邢毅¹

摘要

通过改进湿度传感器温湿特性实验室测试方法,对国产 GPS 探空系统和 RS92 探空仪湿度传感器的温湿特性进行了测试分析.结果表明:国产电子探空仪的湿度传感器在低温状态下探测滞后性明显,给高空湿度的动态测量带来了较大误差,尤其是在低温升湿过程测量比低温降湿过程更为显著.试验还表明环境空气流量的变化会对湿度的测量造成明显的影响,结果有助于改进探空仪湿度传感器测湿算法和防雨帽工艺设计,提高高空湿度测量能力.

关键词

探空;湿度传感器;湿度特性;测试方法

中图分类号 TH71;TG803

文献标志码 A

0 引言

高空气象观测系统是获取地球大气立体结构和演变的常规业务观测系统,是现代探测技术发展最活跃的前沿领域^[1].以前,国内外一直采用气球悬挂探空仪技术探测大气气象要素垂直廓线^[2],目前,国际上普遍采用基于卫星导航技术的电子探空仪,观测精度和准确性非常高^[3].20世纪80年代,我国自主研发的701二次测风雷达——59型机械式探空仪成为常规高空探测业务主力,后通过新技术和新型电子元器件的应用,二次测风探空仪探测性能不断提高^[1].自2006年开始,我国致力于GPS探空仪的研制^[4],通过不断地改进和试验,目前在温、风、气压测量方面基本达到国际先进水平,但在大气湿度的测量方面由于技术和工艺的不足仍存在一定差距.湿度测量在自然环境下要经历环境温度从地面温度到零下九十多度的变化,往往出现传感器挂水霜冻等问题,传感器本身的电气性能也受到影响,因此常常造成测量误差或失败^[5].探空的误差来源包括传感器电子元件性能、标定过程、操作流程以及测量时间常数、关联要素测量误差和相关算法修订等^[6-9],其中湿度传感器的误差来源更为复杂^[10-11],需要对每一环节进行细致分析.为了提高探空仪实际测量湿度的能力必须先了解传感器的温度变化特性,以通过算法改进和误差订正提高湿度测量的准确性.本文根据在实际试验过程发现的湿度传感器的变化特性设计了实验室方法对其进行测试,拟通过实验了解湿度传感器的温度变化特征以进行改进.

1 探空试验湿度传感器的温度响应概况

我国GPS探空仪探测空间一般从地面到几个百帕高度,大约3万多米高,传感器经历温度从零上几十度到零下九十多度,湿度从100%到0的变化,量程宽,跨度大.因此,对传感器的稳定性,尤其耐低温,承受剧烈变化的要求比较高.从实际探空试验的统计结果来看,在地面到200 hPa高度温度较高(-30℃以上)的空间量程内,国产探空仪湿度传感器的系统差和标准差均较小,且变化不大,体现出较好的探测性能.但在200 hPa以上的高度,随温度降低(低于-30℃),标准差出现较大的增长直至对流层顶(70~100 hPa)(图1).中国气象局对国产探空仪外场试验结果^[5]表明:湿度传感器在-35~-20℃温度区间(300~100 hPa)且高湿环境下(RH超过50%),4个型号的国

收稿日期 2011-12-23

资助项目 公益性行业科研专项(GYHY201106002);中国气象局气象关键技术集成与应用(重点)项目(CMAGJ2011Z19)

作者简介

李峰,男,博士,主要从事灾害性天气机理、高空探测技术及试验方法研究.

lif04@cma.gov.cn

¹ 中国气象局气象探测中心,北京,100081

产仪器相较于 RS92,系统差(RH)平均达到 2.89%,测量误差的标准差(RH)平均达到 6.25%,明显高于常温环境,尤其,其湿度“高湿上不去,低湿下不来”现象较为普遍.经初步分析,湿度迟滞可能是导致误差增大的主要因素,其主要影响来自于温度变化.

RS92 型探空仪(芬兰 Vaisala 公司生产)的湿度传感器在 -30 ℃时的相对湿度测量准确度.通过在低温环境下湿度传感器随环境湿度变化情况,检查高空湿度传感器在低温下的测量灵敏度,研究湿度受低温影响导致吸湿和放湿的滞后性误差.

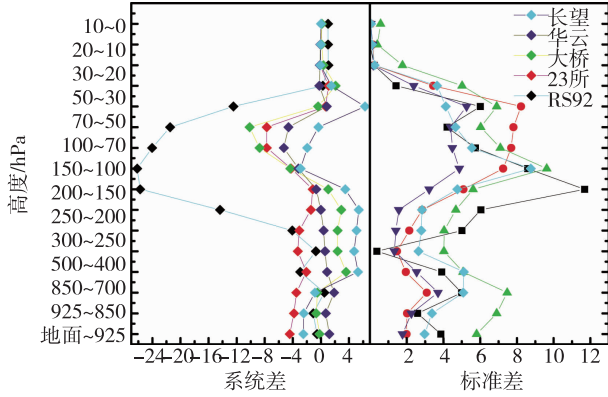


图1 国产 GPS 探空仪湿度传感器的测湿系统差和标准差随高度变化

Fig.1 System error and standard error of humidity measured by China-made radiosounding humidity sensor

2 湿度传感器温度特性实验室研究

2.1 试验目的

为了定量分析湿度传感器在低温环境下性能变化情况,以针对性改进低温下测湿订正算法,本文利用实验室试验模拟高空低温环境,检验中国航天科工集团二院 23 所生产的国产探空仪及国际先进

2.2 试验设计

为了实现试验目标,利用湿度发生器制造湿度和低温环境,通过相对湿度的阶跃,记录湿度传感器探测数据的动态变化,评估湿度传感器的动态响应能力,同时通过露点仪来检测湿度传感器在低温下的测量准确度.

在具体试验中发现,在低温下露点仪动态性能较差,为避免因等待露点仪稳定时间过长导致高空湿度传感器性能发生变化,将方案改为由双压法湿度发生器测值代替露点仪作为相对湿度标准,考虑到 RS92 型探空仪发热导致传感器测试舱温度升高会造成相对湿度有偏差,将双压法湿度发生器的温度检测设备铂电阻温度计置入传感器测试舱内,通过温度修正检测传感器测试舱内的实际相对湿度.

为了实现传感器测试舱内相对湿度的变化,通过两相三通阀的控制将湿度发生器内的发生湿气通过另一路导管导出至测试舱.随着发生器开始变化,当生成指定的稳定湿气后,通过两项三通阀切换到传感器测试舱,完成测试舱内的相对湿度阶跃(图2).

2.3 试验方法及可行性分析

图3给出了常温下 RS92 探空仪湿度传感器的

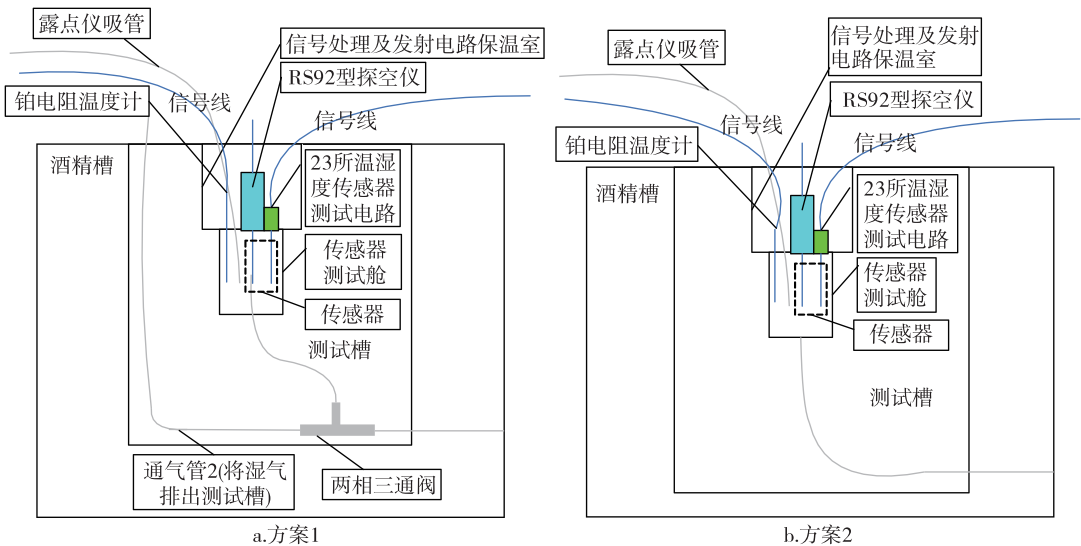


图2 湿度传感器低温性能测试试验方案示意

Fig.2 Design schemes of low temperature performance test for humidity sensor

试验湿度响应变化. 可见, 温度降低阶段, 湿度缓慢上升并达到初始设定的 35%, 当湿气切换为测量初始的 25% 时, 可以看到 RS92 相对湿度随发生器的变化迅速降低, 降低速度基本与发生器变化速度相符, 表明常温下 RS92 的湿度传感器探测性能良好. 但当温度降为低温状态 (小于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 从湿度变化的响应来看, 在进行湿度切换过程中, 由于存在停气阶段, 导致外界常温下湿气泄露入测试室, 造成传感器结霜变坏, 试验数据丢失, 试验没能反映出 RS92 在低温下的动态性能.

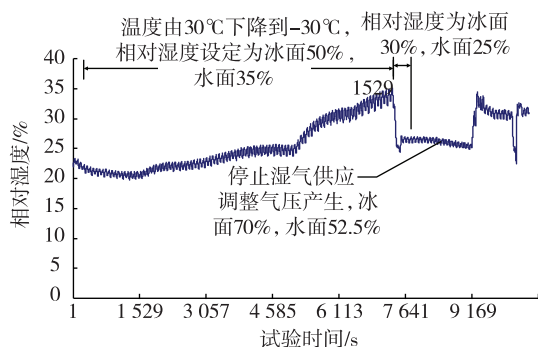


图3 常温下 RS92 湿度响应变化试验及结果

Fig. 3 Relative humidity variation of RS92 radiosounding humidity sensor tested in ambient temperature

根据试验失败的经验, 在现有设备条件下无法进行瞬间低温的湿气切换, 因此调整试验方法, 检查湿度传感器跟随湿度发生器湿度的变化, 采用双压法湿度发生器, 变化湿度较快, 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 1 ~ 2 min 内可以在冰面 30% ~ 70% (RH) 间进行变化, 因此可以考察在此情况下湿度发生器的动态响应性能是否达到要求.

按照方案 1 进行试验时, 利用双压法湿度发生器制造连续湿度变化, 保证传感器测试舱内始终有相当流量的湿气供应, 检查湿度传感器在湿度变化时的动态跟随情况, 同时通过经温度订正后的双压法湿度发生器相对湿度示值检查湿度传感器在低温下的测量准确度 (图 2a).

本次试验在考察湿度传感器的响应性能前, 首先要确定湿气流量是否对湿度传感器的响应有影响. 设计一组试验给出了湿度传感器与湿气流量的相应关系 (图 4). 环境湿度稳定在 37.5% (水面湿度), 将测试仓内的湿气流量设定为 29 L/min, 可以看到, 传感器湿度发生变化, 由最初的 15% 逐渐上升, 将流量增加为 39 L/min 以后, 湿度迅速下降, 然后再缓慢上升, 将流量调整为 30 L/min 时, 湿度迅

速上升达到平衡. 由此可见, 湿度变化与流量大小有关, 主要是因为流量改变了测试仓内的压力, 从而导致饱和和气不饱和造成的, 湿气流量在一定条件下可以达到气压稳定, 保证湿度平衡.

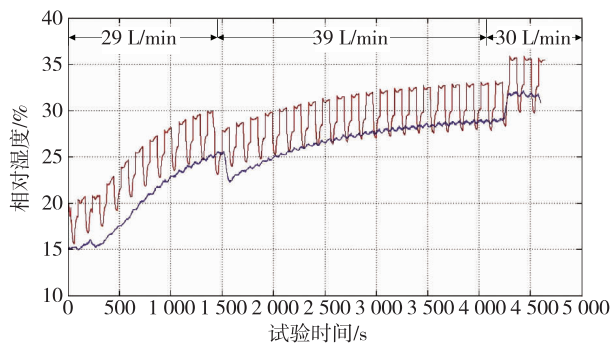


图4 国产 GPS 探空仪 (曲线) 和 RS92 (折线) 湿度传感器湿度与湿气流量的响应曲线

Fig. 4 Response curves of relative humidity measured by China-made GPS (curve line) and RS92 (fold line) radiosounding humidity sensor to humid airflow

3 传感器试验分析

在试验方法和试验条件确定后, 可以开展传感器性能测试实验. 图 5 给出了在湿气流量控制在 30 L/min 时, 相对湿度从 37.5% 降到 11.2% 过程中湿度传感器的响应变化. 可以看到, 在初始时刻 RS92 测取的湿度为 38.5%, 偏高 1%, 国产探空仪测得 34.4% 偏低 3.1%, 而随着环境温度、湿度缓慢下降, 2 种传感器测值结果也都逐渐降低. RS92 探空仪采用双加热片轮流加热的方法进行湿度测量, 湿度变化趋势与国产 GPS 探空仪基本保持一致, 在达到目标量程的 63% 的湿度 (即 20.93%) 时, RS92 测得结果为 20.67%, 接近环境湿度, 国产探空仪为 15.41%, 比环境湿度偏低约 5.52%, 与 RS92 相差 5.26%, 因此, 国产探空仪的测量准确度明显低于 RS92. 但在时间响应方面国产探空仪要快一些, 达到 63% 的目标量程时, 国产探空仪用时 1 279 s, 比 RS92 快了 185 s. 具体数据见表 1.

为了考察低温高湿环境下, 湿度升高过程给传感器的响应变化, 给出了图 6 和表 2. 从结果来看, 国产探空仪在初始湿度 (30%) 测量上就存在较大误差, RS92 测得的值为 31.8%, 国产探空仪仅为 25.5%, 在测试仓相对湿度从 30% 升到 51.5% 过程中 (湿气流量控制在 30 L/min), 初始阶段湿度较低时, RS92 和国产 GPS 探空仪湿度传感器均响应较

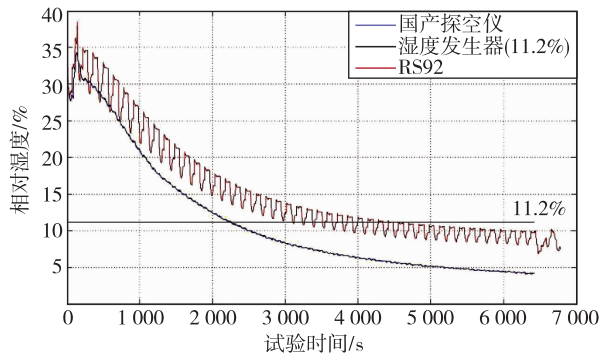


图5 低温降湿试验国产 GPS 探空仪(曲线)和 RS92(折线)湿度传感器湿度随湿度变化的响应曲线(流量设定 30 L/min)

Fig. 5 Response curves of relative humidity measured by Chinamade GPS (curve line) and RS92 (fold line) radiosounding humidity sensor in humidity decrease process

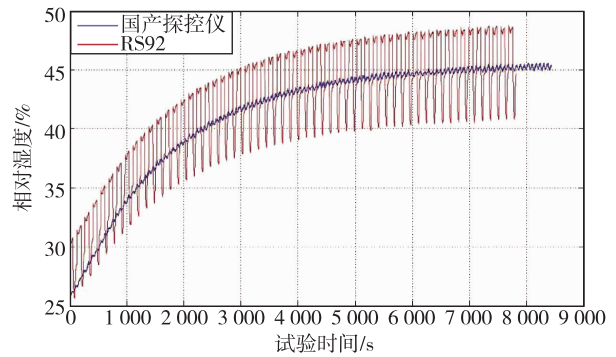


图6 低温增湿试验国产 GPS 探空仪(曲线)和 RS92(折线)湿度传感器湿度随湿度变化的响应曲线(流量设定 30 L/min)

Fig. 5 Response curves of relative humidity measured by Chinamade GPS (curve line) and RS92 (fold line) radiosounding humidity sensor in humidity increase process

表1 低温环境(-30℃)下环境降湿过程传感器响应的准确性及时间常数

Table 1 Humidity response accuracy and time constant in humidity decrease process at low temperature of -30℃

测试仪器	初始湿度/%	最终湿度/%	63%下降湿度/%	终止时间/s	63%下降时间/s
RS92	38.5	10.2	20.67	5 585	1 474
国产探空仪	34.4	4.27	15.41	5 585	1 279

快,变化趋势一致,之后,湿度越大,传感器响应越慢,且很难达到高湿测量,两者都反映了这种特点.在具体测试响应过程中,国产探空仪湿度传感器仍表现比 RS92 要差一些,在跟随湿度发生环境到达目标湿度的 63% (即 43.55%) 的时候时间响应上要比 RS92 滞后 92 s, RS92 的相对湿度测试值仅偏低 0.95%,而国产探空仪偏低达 5.58%.

表2 低温环境(-30℃)下环境升湿过程传感器响应的准确性及时间常数

Table 2 The same as table 1 but in humidity increase process

测试仪器	初始湿度/%	最终湿度/%	63%上升湿度/%	终止时间/s	63%上升时间/s
RS92	31.8	48.9	42.6	7 618	1 811
国产探空仪	25.5	45.3	37.9	7 618	1 903

从两类试验结果可以看出,在低温降湿或升湿过程中,国产探空仪与 RS92 探空仪湿度传感器都存在测量值偏低的特点,国产探空仪比 RS92 误差明显,但从误差的分布看基本为线性变化,可以利用系统偏差得到订正.

4 结论与讨论

1) 国产探空仪低温环境下湿度测量准确度与国外先进仪器存在一定差距.这是由于探空仪生产时未开展低温校准或仅采用批量抽检湿度传感器低温补偿系数,在湿度传感器的温度补偿系数的确定、数学模型的建立方面还存在不足.利用本文结果可以对国产传感器的测湿算法进行订正,以改进测量准确性.

2) 在 -30℃ 温度环境下,当湿度传感器未受水污染时,国产探空仪湿度传感器动态响应能力与 RS92 型探空仪相差不大,但受水污染时,国外传感器采用双加热技术迅速除湿,湿度测量响应快,准确性高,国产探空仪除湿较慢,测量误差较大.另外,试验表明传感器的响应能力在升湿过程中要弱于降湿过程.

3) 在 -30℃ 温度条件下,通风量对湿度传感器的灵敏度起到了关键的作用,因此我国探空仪在实际放球时, -30℃ 环境下出现的灵敏度下降与防雨帽导致的通风量下降有直接关系.试验中证明 30 L/min 的通风量是一个稳定指标,可以利用试验结果对防雨帽通风量建立算法模型改进系统误差.

4) 在试验测试方法方面,由于国内成型产品中几乎没有能够营造低温的可控制湿度变换的环境模拟装置,本文通过改进测试舱,利用两相三通阀的控制将湿度发生器内的湿气通过导管导出至测试舱,在发生器内的湿气稳定后,通过两项三通阀切换到传感器测试舱,实现测试舱内的相对湿度阶跃,从而

完成试验测试。但是,由于露点仪的湿度标准器在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的响应时间过长,同时当进行不同湿气切换时,无法有效保证湿度环境的迅速切换,因此对于 $-40\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境区域还无法进行有效模拟,这将需要进一步改进试验方法。

参考文献

References

- [1] 李柏,李伟. 高空气象探测系统现状分析与未来发展[J]. 中国仪器仪表,2009(6):19-23
LI Bai, LI Wei. Present condition and future development analysis in upper air meteorological observation system [J]. China Instrumentation, 2009(6): 19-23
- [2] WMO. 气象仪器和观测方法指南[R]. 2005:3-15
WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation[R]. Geneva: WMO, 2005: 3-15
- [3] Nash J, Smout R, Oakley T, et al. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems, final report[R]. Va-coas, Mauritius, 2005
- [4] 马舒庆,赵志强,邢毅. VAISALA 探空技术及中国探空技术的发展[J]. 气象科技,2005,33(5):390-393
MA Shuqing, ZHAO Zhiqiang, XING Yi. VAISALA's radiosonde technology and advancement in radiosonde technology in China[J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(5): 390-393
- [5] 中国气象局气象探测中心. 国产 GPS 探空系统第三阶段试验考核报告[R]. 2010:1-47

- Meteorological Observation Center, CMA. The 3rd evaluation report on China-made radiosounding system [R]. 2010:1-47
- [6] Luers J K. Estimating the temperature error of the radiosonde rodthermistor under different environments [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(6):882-895
- [7] Miloshevich L M, Paukkunen A, Vömel H, et al. Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(9):1305-1327
- [8] Schmidlin F J. Derivation and application of temperature corrections for the United States radiosonde [C] // The 7th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentations, New Orleans, LA, 1991:227-231
- [9] Immler F J, Dykema J, Gardiner T, et al. Reference quality upper-air measurements: Guidance for developing GRUAN data products [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(5):1217-1231
- [10] Suortti T M, Kivi R, Kats A, et al. Tropospheric comparisons of Vaisala radiosondes and balloon-borne frost-point and Lyman- α hygrometers during the LAUTLOS-WAVVAP experiment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(2):149-166
- [11] Vömel H, David D E, Smith K. Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer: Instrumental details and observations [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D08305, doi:10.1029/2006JD007224

Temperature & humidity characteristics test and analysis of China-made radiosounding humidity sensor

LI Feng¹ YANG Rongkang¹ XING Yi¹

¹ Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The temperature and humidity characteristics of humidity sensor on China-made GPS and RS92 radiosounding system are studied through a modified test method under controlled temperature and humidity environment in a laboratory. The results show that hysteretic detection occurred under low temperature, especially during the process of humidity increase, which brings obvious error to the dynamic measurement of aerological humidity. The change of airflow also influences the humidity measurement. The obtained results are useful for the modification of humidity measurement algorithm of radiosounding sensor, and the improvement of the measurement performance of aerological humidity sensor.

Key words sounding; humidity sensor; temperature characteristics; test methods