

林登贝格2022国际探空系统比对试验过程介绍

■ 杨加春 王柏林 徐浩 李京辉

世界气象组织 (WMO) 2022国际探空系统比对试验于2022年2月—2023年1月在德国林登贝格观象台举办。本文回顾了往届国际探空比对试验主要特点和取得的成果,介绍了本届探空比对实验室测试和外场比对详细过程。通过此次比对试验,初步了解目前世界主要无线电探测系统的性能,为进一步完善与提高我国探空系统观测质量带来启示。

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.012

2022年2月—2023年1月世界气象组织 (WMO) 在德国林登贝格举行探空系统国际比对试验活动 (UAII 2022), 来自芬兰、德国、法国、南非、日本、中国、印度和韩国共8个国家和地区的10个无线电探空仪制造商参加。自1984年, WMO根据探测技术的发展情况, 共举办了9届各国不同探空系统之间的国际探空比对试验, 一方面评估各国业务探空仪的水平, 另一方面针对探空新技术与新设备进行测试与评估, 为探空业务发展奠定技术基础。

截至2024年5月5日, WMO尚未公布UAII 2022参试探空仪的试验数据和最终排名, 但从此次国际探空系统的比对试验中, 也可管中窥豹世界各国探空仪研制和实验室测试技术发展态势。

1 往届探空仪国际比对情况

1984年以来, WMO仪器与观测方法委员会 (CIMO) 已经成功主办了9届国际探空系统比对试验 (表1)。

表1 WMO历届探空仪国际比对试验举办时间、参试国家和主要成果

届别	举办国家和地区	年份	参试国家和地区	主要特点/取得结果
1	英国	1984	英国、美国	WMO第一次举办探空比对, 采用雷达测风系统
2	美国	1985	芬兰、美国、英国、澳大利亚、印度	采用FPQ-6和FPS-16两种不同雷达进行高度和风测量, 杆状热敏电阻辐射误差较大, 大部分都符合WMO制定的标准
3	苏联	1989	芬兰、美国、英国、苏联、中国	第三阶段的主要目的是确定苏联、中国探空仪与芬兰、美国在第一和第二阶段使用的探空仪的观测结果之间的系统偏差, 发现低温时各国传感器数据差异较大; 提出要大力研发高空气象探测软件的指导思想
4	日本	1993	芬兰、美国、韩国、日本	使用GOS (全球观测系统) 进行探空仪比对, 加入新研制的热敏电阻探空仪作为参考结果
5	俄罗斯、美国	1995—1997	芬兰、美国、英国、俄罗斯、乌克兰、瑞士	开展探空仪湿度传感器比对, 采用湿度基测箱模拟环境进行实验室比对, 发现在低温环境下湿度传感器数据差异较大, 提出需要加大湿度采样算法和传感器表面涂层研发
6	巴西	2001	芬兰、美国、英国、法国、德国、瑞士、巴西	通过相互比对, 深入了解探空仪与地面遥感辅助设备数据; 采用GPS分析探空仪数据
7	毛里求斯	2005	芬兰、美国、法国、德国、瑞士、日本	采用新一代GPS探空仪, 高度测量更加准确; 温度和湿度传感器在原基础上更加精准
8	中国	2010	芬兰、美国、法国、德国、瑞士、南非、日本、韩国、中国	使用新一代天气雷达, 激光云高仪等辅助遥感观测设备作为比对参考; 采用湿敏电容传感器、珠状热敏电阻温度传感器, 改善传感器金属涂层

1984年首届比对试验, 由于技术和生产力不足, 当时的探空仪采用雷达测风, 温度和湿度传感器误差也很大。1995—1997年推出了新型探空湿度传感器, 采用当时最先进的湿度基测箱, 通过模拟仿真确立了湿度传感器未来的发展方向。

到2005年第七届毛里求斯国际探空比对时, 参试探空仪已经全部为电子探空系统, 代表了今后国际探空技术发展趋势, 而且比对全部采用GPS探空系统, 自此GPS更广泛地应用于气象探测活动之中。此外, 湿度传感器开始由湿敏电阻转为湿敏电容, 低温性能

收稿日期: 2023年12月3日; 修回日期: 2024年5月5日
第一作者: 杨加春 (1982—), Email: yangjiachun@cnhyc.com
通信作者: 王柏林 (1979—), Email: 37806887@qq.com

有所改善，数据接收继续沿用P波段400 MHz频点。法国、日本和芬兰提供了探空仪发射机频带宽度技术数据，他们的探空仪发射机频带为20~30 kHz，占用无线电频段窄，可以为高空探测提供一个更为稳定的环境，具有重要意义。

2010年在中国阳江举办的国际比对试验，测试比对了高质量业务探空仪与高质量研究型探空仪性能。比对试验首次采用RSKOMP标准分析软件对参试探空仪获取的观测数据进行分析处理。从比对结果来看，一些高质量探空仪的温度观测已经非常接近满足气候观测需求，但是湿度仍然是一个挑战性的课题，特别反映在对流层中层与高层的低温性能上。随着卫星导航测风体制的应用，由于其高精度的位势高度测量结果，高空气压可以采用反算方式，气压传感器已不是

必备元件。国产探空仪在温、湿度订正算法，探空仪结构设计以及湿度传感器低温表现上仍与国际先进水平存在差距。

2 UAII 2022 情况介绍

2.1 UAII 2022 探空仪介绍

参加林登贝格2022国际探空系统比对试验的各国探空仪均为带有GPS测风功能的数字电子探空仪，由感应元件、转换电路、编码装置、无线电发射机和电源组成。来自8个国家和地区的10个厂商的产品外观如图1所示，表2给出了相关产品性能概要。

温度传感器从涂层来看有白色涂层和金属镀层两种。芬兰Vaisala公司的RS41探空仪采用棒状电阻式温度传感器，其他产品都采用珠状电阻式温度传感器。温度传感器体积非常小，特别是瑞士Meteolabor公司



芬兰Vaisala公司的RS41



德国Graw公司的DFM-17



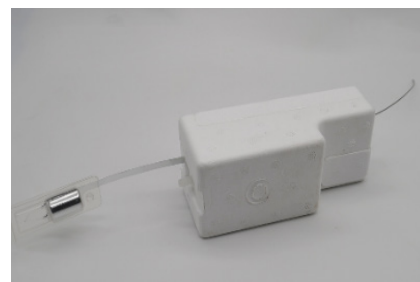
法国Modem公司的M20



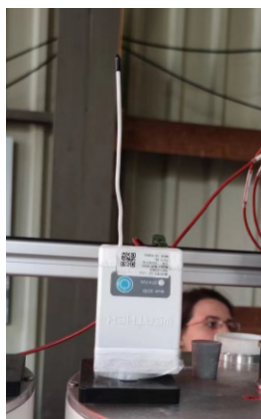
印度Azista公司的ATMS-3710



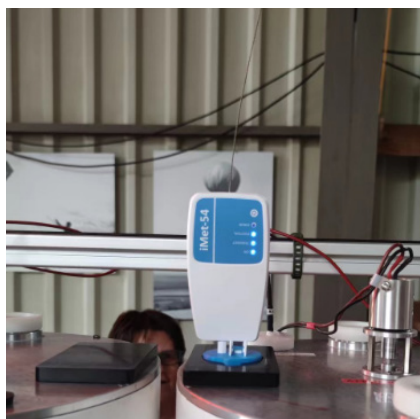
中国航天新气象公司的CF-06-AH



中国华云天仪公司的GTH3



韩国Weathex公司的WxR-301D



南非InterMet公司的iMet-54



日本Meisei公司的iMS-100



印度Vikram公司的VSSC-PS-B3

图1 UAII 2022参试探空仪外观

表2 UAII 2022参试产品性能

产品类型	温度传感器	湿度传感器	气压传感器	遥测距离	定位接收系统
Vaisala RS41 (芬兰)	铂电阻, 精度: 0.01 °C	薄膜电容式	高度反算	传输距离350 km	采用GPS, 48个通道数, 冷启动时间35 s
Graw DFM-17 (德国)	陶瓷传感器, 精度: 0.01 °C	电容式聚合物	高度反算	传输距离大于250 km	采用GPS, 72个通道数
Modem M20 (法国)	热敏电阻, 精度: 0.01 °C	电容式湿度传感器	硅压阻传感器	地势高度可达45 km	采用GNSS全球导航卫星 系统, 24个通道数
Meisei iMS-100 (日本)	热敏电阻, 精度: 0.1 °C, 测量范围: -95~60 °C	电容式湿度传感器	高度反算	地势高度为 -500 m~40 km	卫星导航系统, 拥有24个 通道数
Weathex WxR-301D (韩国)	双温度传感器, 测量范围: -90~60 °C	电容式湿度传感器	压力传感器	测量地势高度可达40 km	卫星导航系统
InterMet iMet-54 (南非)	热敏电阻, 测量范围: -100~60 °C	电容式薄膜聚合物	高度反算	最大范围可达250 km	采用GNSS全球导航卫星 系统, 99个通道数
华云天仪GTH3 (中国)	珠状热敏电阻, 测量范围: -90~50 °C	湿敏电容	硅压阻; 导航定位高度和气 压传感器共同提供数据	测量地势高度可达36 km; 探测斜距大于200 km	采用GPS+北斗联合导航, 采用单通道或者双通道
Azista ATMS-3710 (印度)	珠状热敏电阻, 测量范围: -120~80 °C	电容式湿度传感器	陶瓷气压传感器	测量地势高度可达45 km; 水平探测350 km	采用GPS全球导航卫星
Vikram VSSC-PS-B3 (印度)	珠状热敏电阻, 测量范围: -90~60 °C	电容式湿度传感器	高度反算	遥测距离资料无显示	采用GPS全球导航卫星, 使用双通道接收
航天新气象CF-06-AH (中国)	珠状热敏电阻, 测量范围: -90~60 °C	电容式薄膜聚合物	高度反算	传输距离大于200 km	采用GPS卫星导航系统

的探空仪使用了发丝级的细金属线传感器。减小体积能提高温度响应速度、减小测量滞后性以提高测量精度。国内温度传感器都是珠状电阻式传感器。

湿度传感器可分为电容测湿传感器和电阻测湿传感器。参加此次比对的探空仪均采用电容式湿度传感器, 可分为加热型和无加热型。芬兰Vaisala公司的RS41探空仪采用加热式电容型湿度传感器, 该传感器的湿度观测数据被WMO推荐作为比对参考。目前国内基本是使用电容型湿度传感器。

GPS定位模块用于提供与测风、高度、经度、纬度相关的信息, 发射机将数字信息变成射频信号发送给地面接收系统。GPS定位系统与原先的地面导航系统相比, 可以覆盖全球, 无线电导航信号的传播不受地形、地物干扰。部分探空仪厂商研发的GPS带宽压缩器, 将探空仪信号带宽从原先的2 MHz压缩到1 MHz, 占用无线电电频带宽, 性能更加趋于稳定。

2.2 UAII 2022 实验室测试

2022年2月进行的实验室测量活动标志着UAII 2022活动的正式开始。10个无线电探空仪制造商最后分为7组。

实验室测试阶段, 主要测试与无线电探空仪温度和湿度传感器相关的测量误差和不确定性信息, 测试内容如下:

2.2.1 室温下温度和湿度传感器校准的不确定性测试

UAII 2022首次使用了标准湿度箱(SHC), 提供了一种简单方法验证室温下无线电探空仪的性能和校准。SHC内部空气的水蒸气含量处于热力学平衡状

态, 在箱内产生空间均匀稳定湿度环境, 相对湿度为0~100%, 不确定度小于0.5%。

2.2.2 温湿度传感器在低温下的时滞性测试

当代无线电探空仪湿度传感器采用电容式聚合物型传感器, 在寒冷条件下, 它们对湿度变化响应有相当大的延迟, 这种效应通常被称为“时间滞后”。特别是在环境温度较低且经常出现较大湿度梯度的对流层上部和对流层顶, 湿度传感器时间常数的典型值范围从20 °C时的约1 s到温度低于-60 °C的100 s以上。湿度传感器的延后性能不仅取决于其结构设计, 还受到聚合物和电极所用材料以及形状和厚度等参数影响。因此, 正确表征传感器“时间滞后”, 对无线电探空仪温度和湿度观测数据质量至关重要。

林登贝格观象台开发了一个专用装置, 用于表征湿度传感器在明确定义的低温下的响应时间, 评估湿度传感器的校准不确定度。该测试装置在UAII 2022实验室活动期间用于评估湿度传感器的“时间滞后”行为, 并检查温度传感器在20 °C和对流层顶区域采集温度的能力。

通过这种装置, 可同时操作和测试两个无线电探空仪, 两个无线电探空仪都暴露在相同的气流中(即干燥或潮湿), 并可随意在干燥和潮湿空气之间切换。

2.2.3 温度测量的太阳辐射误差测试

在探空过程中温度传感器测量大气温度时会吸收一些太阳辐射, 影响白天的大气温度测量。加热量随高度而变化, 在30000 m高空以上探测的温度不确定度可能超过1 K。林登贝格观象台GRUAN中心开发了

一个实验室装置，无线电探空仪太阳温度误差研究模拟器 (SISTER)，用以模拟类似于无线电探空仪上升期间遇到的大气条件，并可以研究辐射的通量和入射角、气压和气流速度等关键参数对温度传感器受太阳辐射的影响。

2.3 UAII 2022 外场比对

在此阶段进行了5次培训放球试验，验证所有系统是否正常运行，获得的测试数据不用于比对。在4

周半的时间内完成了79次探测，并用CFH（低温霜点湿度计）进行了4次参考探测。进行探空气球放飞试验时，天气条件多变，试验初期处于盛夏，温度远高于30℃，但到试验结束时，气温已经下降到20℃（夜间约13℃）。大部分时间都是晴天，但也有几个阴天和雨天，包括短暂但强烈的雷暴伴随着冰雹。无线电探空测活动于9月13日23:07（地方时）最后一次气球释放后结束（图2）。



图2 UAII 2022外场同球比对观测

3 参加国际探空比对试验对我国探空观测发展的启示

通过本次在林登贝格开展的UAII 2022国际探空系统比对，WMO掌握了当前各国主要探空系统的性能，2024年UAII 2022将向会员国和仪器制造商反馈提高探空系统性能、改进探空仪器和观测方法的建议。

通过参与UAII 2022，我们对国产探空仪不同要素性能进行了评估，找出自己的不足，对进一步完善与提高我国探空系统观测质量有如下启示。

1) 大力发展基于北斗卫星导航系统的下一代探空系统。建立以卫星导航定位测风系统为主要特征的下一代探空系统，是我国气象探空“十四五”阶段发展

的主要目标。

2) 建立全球高空基准网 (GRUAN) 站点。在国内建立GRUAN站点将有利于获得有气候代表性、长时间序列、质量可溯源的气候观测数据，既是探空仪未来发展的技术方向，也是加强对气候变化科学认知的迫切需要。

3) 建设健全探空仪测量实验室。建立太阳辐射、湿度、风、气压要素高精度检测实验室，可有效描述探空仪特性，促进探空仪性能改进提升。

4) 不断提升探空传感器国产化水平。继续推动我国自主研发湿度和气压传感器的业务应用，使探空仪整体装备技术达到国际先进水平。

深入阅读

李柏, 李伟, 2011. 阳江第八届国际探空系统比对试验综述[J]. 气象科技进展, 1(3): 6-13.

马舒庆, 李峰, 邢毅, 2006. 从毛里求斯国际探空系统对比看全球探空技术的发展[J]. 气象科技, 34(5): 606-609.

宋连春, 李伟, 2008. 综合气象观测系统的发展[J]. 气象, 34(3): 3-9.

von Rohden C, Sommer M, Naebert T, et al, 2022. Laboratory characterisation of the radiation temperature error of radiosondes and its application to the GRUAN data processing for the Vaisala RS41[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 15(2): 383-405.

World Meteorological Organization (WMO), 1986. WMO International Radiosonde Comparison, Phase I, Beaufort Park,

UK, 1984[R]. Geneva: World Meteorological Organization-Library.

World Meteorological Organization (WMO), 1988. WMO International Radiosonde Intercomparison Phase II, 1985, Wallops Island, Virginia USA, 4 February 1985—15 March 1985[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Kats A, Krestyannikova N, et al, 2006. TWMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison: final report of Phase I and Phase II[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Kats A, Kurnosenko S, et al, 1991. WMO International Radiosonde Comparison, Phase III, Dzhambul, USSR, 1989: final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Mita A, Inoue N, 1996. WMO International Radiosonde Comparison, Phase IV, Tsukuba, Japan, 15 February—12 March 1993: final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization (WMO), Fisch G F, Machado L A

T, et al, 2006. The WMO Intercomparison of GPS Radiosondes (20 May—10 June 2001): final report[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

Nash J, Oakley T, Vömel H, et al, 2011. WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems. Yangjiang, China, 12 July—3 August 2010[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

Nash J, Smout R, Oakley T, et al, 2006. WMO Intercomparison of Radiosonde Systems. Vacoas, Mauritius, 2—25 February 2005[R]. Geneva: World Meteorological Organization.

(作者单位: 杨加春, 华云升达(北京)气象科技有限责任公司; 王柏林, 中国华云气象科技集团有限公司、南京信息工程大学江苏省
大气环境与装备技术协同创新中心; 杨加春、徐洁、李京辉, 天津华云天仪特种气象探测技术有限公司)

(编辑: 卢冰)

(上接64页)

对舒适的是淮北一带。

本文还存在一定不足之处,在模型设计上,部分站点太阳辐射数据是通过各城市气象资料估算的,在一定程度上会降低人体舒适度指数计算的准确性。未来,可在全国范围内选择有太阳辐射实测值的站点进行舒适度模型研究,以进一步提高舒适度模型的精准性。

参考文献

- [1] Shindell D, Kuylenstierna J C I, Vignati E, et al. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security[J]. *Science*, 2012, 335(6065): 183-189.
- [2] 高焕妍, 沈新勇, 董伟, 等. 城市化和西太平洋副热带高压增强对中国复合热浪的协同作用[J]. *大气科学学报*, 2023, 46(1): 119-131.
- [3] 梁梅, 吴立广. 中国东部地区夏季极端高温的特征分析[J]. *气象科学*, 2015, 35(6): 701-709.
- [4] 邵颀, 廖要明, 柳艳菊, 等. 2015年全球重大天气气候事件及其成因[J]. *气象*, 2016, 42(4): 489-495.
- [5] 王倩, 翟盘茂, 余荣. 2018年7月北半球极端天气气候事件及环流特征分析[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(1): 28-35.
- [6] 范进进, 秦鹏程, 史瑞琴, 等. 气候变化背景下湖北省高温干旱复合灾害变化特征[J]. *干旱气象*, 2022, 40(5): 780-790.
- [7] 冯宝飞, 邱辉, 纪国良. 2022年夏季长江流域气象干旱特征及成因初探[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 6-15.
- [8] 官学文, 曾明. 2022年长江流域枯水特征分析与启示[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 1-5, 36.
- [9] 邹旭恺, 高荣, 陈鲜艳, 等. 2022年长江流域夏伏旱监测评估[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(10): 12-16.
- [10] Fanger P O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [11] Fanger P O. *Thermal Comfort*[M]. Malabar: Robert E Krieger Publishing Company, 1982.
- [12] Jones T S, Liang A P, Kilbourne E M, et al. Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St Louis and Kansas City, Mo[J]. *The Journal of the American Medical Association*, 1982, 247(24): 3327-3331.
- [13] Ellis F P, Nelson F, Pincus L. Mortality during heat waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973[J]. *Environmental Research*, 1975, 10(1): 1-13.
- [14] Ellis F P, Princé H P, Lovatt G, et al. Mortality and morbidity in Birmingham during the 1976 heatwave[J]. *Quarterly Journal of Medicine: An International Journal of Medicine*, 1980, 49(1): 1-8.
- [15] Applegate W B, Runyan J W, Brasfield L, et al. Analysis of the 1980 heat wave in Memphis[J]. *Journal of the American Geriatrics Society*, 1981, 29(8): 337-342.
- [16] Wainwright S H, Buchanan S D, Mainzer H M, et al. Cardiovascular mortality—the hidden peril of heat waves[J]. *Prehospital and Disaster Medicine*, 2000, 15(1): 87.
- [17] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index based on human physiology and clothing science[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979a, 18(7): 861-873.
- [18] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part II: effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979b, 18(7): 874-885.
- [19] 王远飞, 沈愈. 上海市夏季湿温效应与人体舒适度[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1998(3): 60-66.
- [20] 于波, 刘梅, 严明良, 等. 凉爽条件下体感温度模型的建立及风速、水汽压、辐射的影响[J]. *气象科学*, 2002, 22(3): 304-312.
- [21] 马丽君, 孙根年, 王洁洁. 中国东部沿海城市旅游气候舒适度评价[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 713-722.
- [22] 谈建国. 气候变暖、城市热岛与高温热浪及其健康影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [23] 郑有飞, 尹继福, 吴荣军, 等. 热气候指数在人体舒适度预报中的适用性[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 709-715.
- [24] 余永江. 基于人体与环境热量平衡模型的中暑等级预报[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [25] 喻丽, 申双和, 陶苏林, 等. 基于空气污染指数的太阳日总辐射计算方法[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(3): 291-299.
- [26] 于庚康, 徐敏, 于莹, 等. 近30年江苏人体舒适度指数变化特征分析[J]. *气象*, 2011, 37(9): 1145-1150.
- [27] Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—why another thermal index[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 421-428.
- [28] 李琼. 系统聚类分析中的遗传算法[J]. *武汉交通科技大学学报*, 2000, 24(3): 301-304.
- [29] 张惟皎, 刘春煌, 李芳玉. 聚类质量的评价方法[J]. *计算机工程*, 2005, 31(20): 10-12.

(编辑: 卢冰)