

# 从毛里求斯国际探空系统对比看 全球探空技术的发展

马舒庆<sup>1</sup> 李峰<sup>2</sup> 邢毅<sup>1</sup>

(1 中国气象局大气探测技术中心, 2 中国气象局监测网络司, 北京 100081)

**摘要** 文章介绍了 2005 年 2 月 7~25 日在毛里求斯举行的由芬兰、日本、美国、法国、英国、德国、瑞士 6 个国家的厂商生产的探空系统参加的探空系统国际对比试验, 本次对比试验堪称高精度探空系统对比。文中主要介绍分析了这些探空系统技术结构和性能特点。这些探空系统具有体积小、重量轻、信号接收和数据处理自动化、通信频道窄, 采用 GPS 技术测风、传感器体积小、响应速度快的技术特点, 体现了全球探空技术发展趋势。

**关键词** 探空系统 测风 GPS

## 引言

各种探空系统的国际对比是提高全球探空的探测精度和一致性的主要手段。2005 年 2 月 7~25 日, 世界气象组织(WMO)在毛里求斯举行了有芬兰、日本、美国、法国、英国、德国和瑞士 6 个国家厂商生产的探空系统参加的探空系统国际对比试验<sup>[1]</sup>。本次对比试验堪称高精度探空系统对比。主要目的: 改善订正方法, 提高白天探空仪温度和相对湿度测量精度; 检验 GPS 测风的精度和有效性; 评估 GPS 探空仪获得的位势高度和几何高度的有效性; 评估广泛使用的探空仪的温度、气压和湿度与新开发的高性能传感器的差别; 为 GCOS 和卫星定标推荐最好的可用探空仪; 评估遥感设备在对比中的价值和开发流程; 确定探空仪施放前所需要做的准备工作。本文旨在介绍此次国际探空系统对比的情况以及国际探空系统技术结构和性能特点, 并对全球探空技术和发展趋势进行分析。

## 1 探空系统国际对比的基本情况

这次共有 6 家探空仪参加对比, 它们是芬兰 Vaisala 公司 RS92 探空仪、美国 Sippican Inc 公司的 MARK II A 探空仪、法国 Mide m 公司的 M2 K2 探空仪、日本明星公司(Meisei Electric Co. Ltd)的 RS-01 G 探空仪、德国 Graw Radiosondes GmbH 公司

DFM97 探空仪、瑞士 Meteolabor AG 公司的 SRS C34 型探空仪和英国探空仪, 其中瑞士探空仪作为参考。芬兰 Vaisala 公司生产的探空系统约占全球的 67%。参加本次对比的全部都是 GPS 探空系统, 所用无线电频率在 400~406 MHz 之间。毛里求斯站探空系统参与放球参考。

### 1.1 对比施放情况

2005 年 2 月 7~25 日, 除 13 日、20 日休息外, 对比探测 17 天, 共施放了 66 个球。每个气球悬挂 4 个探空仪, 其中芬兰 RS92 型探空仪作为参照性仪器, 每次对比都施放, 其余 3 种型号探空仪采用轮流排班形式。除了 2 月 7 日、25 日施放 3 个气球外, 其余 15 天每天施放 4 个气球。放球时间为: 09:00、14:00、19:00 和 22:00(当地时间), 既有太阳高仰角照射的时间(09:00、14:00), 又有太阳低仰角照射的时间(19:00)和夜间(22:00 或 23:00)。

### 1.2 对比试验方法

(1) 分组方法。参加对比的探空仪分为 2 组, 每组 4 个探空仪, 为了使 2 组探空仪探测结果有可比性, 2 组探空仪中都有 RS92 探空仪。

(2) 系挂方法。由 2 根长 3 m 左右的竹竿固定为十字交叉的支架, 4 个探空仪在施放前分别挂在竹竿端头, 十字交叉的支架由一个日本 Totex 公司生产的 2000 g 型号的气球携带, 气球与十字交叉的支架相距 40 m。

(3)无线电频段分配。参加对比试验的探空系统全部采用 400 ~ 406 MHz 频段。由参加对比试验的厂家给出参加对比的探空仪无线电频率特性,组织者给参加对比的探空仪在 400 ~ 406 MHz 范围内分配固定的无线电频段,每种探空仪的中心频率之间间隔 0.5 ~ 0.7 MHz。

(4)施放场地和仪器架设。放球场地是毛里求斯气象局的高空观测场,大约长宽各 80 m。所有 8 套探空系统(包括毛里求斯气象局的探空系统)和遥感探测仪器(云高仪、微波辐射仪)安置在一间约 40 m<sup>2</sup> 的工作室内。探空系统天线都安装在工作室所在平房房顶上。

(5)数据格式。所有探空系统提供统一格式的数据,供对比分析使用。数据格式:时间、温度、气压、湿度和风向风速数据资料。

(6)增加传感器和使用特殊传感器。美国公司的探空仪安装了 5 个温度传感器,传感器的防辐射涂层不同,有黑色、白色涂层等,用于研究防辐射效果。瑞士公司的探空仪安装了细丝状温度传感器,这是一种受辐射影响很小、时间响应很快的传感器,对于分析辐射影响和测温滞后是有帮助的。

对比结果由专门的数据管理组进行处理分析后,形成对比报告,由 WMO 的仪器与观测方法委员会(CIMO)在 2005 年 5 月罗马尼亚召开的会议上公布,在此前对比资料均是保密的。

## 2 探空系统总体结构和技术性能

参加对比的探空系统代表了全球最新的探空系统,无论从探空仪传感器的精度、测风技术上,还是资料处理技术、设备集成度和可靠性等都代表了当今世界最高水平。

### 2.1 探空仪结构

采用电子传感器和电子测量电路构成的探空仪称为电子探空仪。电子探空仪又分为模拟电子探空仪和数字电子探空仪,前者未进行数字编码和数值处理。与模拟电子探空仪相比,数字探空仪包含数值处理,可提高测量精度,并且抗干扰能力强。本次对比的探空仪都是带有 GPS 测风功能的数字电子探空仪(简称 GPS 探空仪)。探空仪由传感器、测量电路、处理器、GPS 单元、发射机、电池、包装盒组成。图 1 是带有气压传感器的 GPS 探空仪结构框图。处理器是探空仪的核心,它由单片机和接口电

路构成,完成数据采集、控制、处理、发送。测量电路完成信号转换。本次对比的探空仪的传感器有两类:电阻型和电容型,因此有与电阻型传感器接口电路和与电容型传感器接口电路。除 Vaisala 公司的 RS92 探空仪外,其余探空仪只带有温度、湿度传感器,采用高度反算气压。有的探空仪测量模块还可与其他传感器(如臭氧传感器)接口。GPS 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。

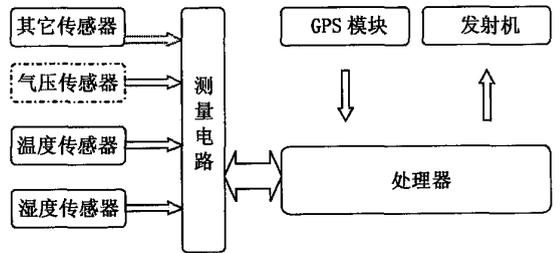


图 1 GPS 探空仪结构框图

芬兰 Vaisala 公司的探空仪采用硅气压传感器测量气压<sup>[2]</sup>,其他公司的探空仪都采用 GPS 测高反算气压<sup>[3]</sup>,没有气压传感器。本次对比试验的一个重要目的是评估两种测压方式的差别和有效性。

温度传感器从涂层来看,有白色涂层和金属镀层两种。从电性能可分为电容测温传感器和电阻测温传感器。除了芬兰探空仪采用电容式温度传感器外,其他产品都采用电阻式温度传感器。温度传感器体积非常小,特别是瑞士 Meteolabor AG 公司的 SRS C34 型探空仪使用了一种很细的细金属线传感器。体积的减小能提高温度响应速度,减小温度测量的滞后性,提高测量精度。

湿度传感器可分为电容测湿传感器和电阻测湿传感器。除美国、瑞士产品使用电阻式湿度传感器外,芬兰、日本、法国、德国等产品使用电容式湿度传感器。为评估用于业务观测的湿度传感器的测量精度,瑞士 Meteolabor AG 公司的 SRS C34 型探空仪安装了一种高精度的湿度传感器。这种传感器的资料可以作为一种参考。

### 2.2 测风原理

在探空系统中采用 GPS 技术测风。GPS 是全天候全球导航定位系统。将它用于高空气象探测具有测量精度高、地面系统结构简单、自动化程度高的

优点。用 GPS 技术测速有两种方式。一种是测多普勒频移,测量 GPS 卫星发出的信号到达探空仪时,由于探空仪与 GPS 卫星的相对运动而产生的多普勒频移,并由此计算风向风速。另一种为定位方式, GPS 系统采用扩频通信技术,测量 GPS 卫星到接收机的距离(伪距),卫星的位置(即轨道)是已知的,可列出方程:

$$[(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2]^{1/2} = R_i$$

$$(i = 1, 2, 3, 4 \dots)$$

式中  $X_i, Y_i, Z_i$  是第  $i$  颗卫星的坐标,  $R_i$  是  $t$  时刻第  $i$  颗卫星到接收机的距离。只要有 3 颗卫星就能计算出接收机所在的位置。但在实际应用中,由于接收机时钟与卫星上时钟的偏差,常常用 4 颗或 4 颗以上卫星的资料计算探空仪在特定坐标系中的坐标,然后通过探空仪位置的变化计算风向风速。

采用测多普勒频移方式不用码相关器,这在 GPS 未曾或者刚进入民用,码相关器这类专用器件较贵时,显然是一种降低造价的途径, Vaisala 公司早期探空仪产品 RS80 采用测多普勒频移方式测风。RS80 的最大问题是测风数据丢失率过高。参加这次对比的探空系统都采用定位方式测风,有很高的测风数据获取率。虽然参加对比系统都采用了 GPS 进行测风,但有着两种不同的体制。

GPS 接收机由接收通道、相关器和计算机组成,计算机包括 RAM、ROM 和 CPU,接收通道完成对 GPS 卫星信号的接收、放大、变频(图 2)。相关器对 GPS 卫星信号进行解扩处理。计算机承担的任务有,对相关器进行设定、监控,从相关器采集测量数据,进行定位计算处理以及对外通信。第一种体制的探空仪采用通用 GPS OEM 接收机,这种接收机包括接收通道、相关器和计算机。法国公司和日本公司采用第一种体制。

将包括浮点运算的定位处理移到地面处理系统,就可将计算机降格成为单片机,使 GPS 测风模块大幅度降价。图 3 为 GPS 模块中通道部分完成 GPS 卫星信号的接收、放大,相关器在单片机的控制下,完成 GPS 卫星到测风单元的时延测量,将时延测值通过探空仪发射机传送到 GPS 探空系统的接收机, GPS 探空系统的终端根据基站 GPS 给出的卫星坐标参数以及基站 GPS 的差分参数,解算出探空仪的位置、速度。位置、速度参数移交给现已开发出来的软件,进行测风和压高转换等探空处理。这

是第二种体制,芬兰公司采用的是第二种体制<sup>[1]</sup>。

上述两种体制虽然不同,但都采用定位方式进行测风,而不是像芬兰公司上一代产品 RS80 采用多普勒频移方式测风。

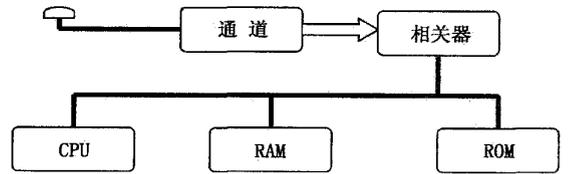


图 2 GPS 接收机框图

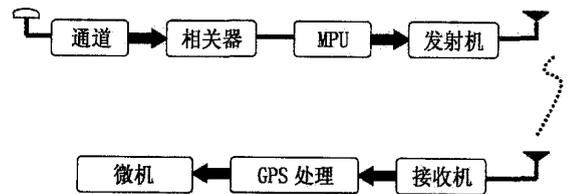


图 3 GPS 控空系统工作原理图

2.3 主要技术性能指标

参加对比的高空探测系统的技术指标如下:

- 探测距离范围: 0 ~ 200 km
- 温度精度: 0.2 ~ 0.5 °C
- 湿度精度: 3% (相对湿度)
- 气压精度: 2 hPa (地面至 500 hPa)  
1 hPa (500 ~ 5 hPa)
- 风向精度: 2° ~ 3°
- 风速精度: 0.1 ~ 0.3 m/s
- 发射频率: 400 ~ 406 MHz
- 发射功率: 80 ~ 200 mW
- 信道带宽: 20 ~ 30 kHz
- 数据速率: 400 ~ 2400 bps

2.4 地面接收处理系统

地面接收系统包括天线、接收机、计算机和软件。接收机基本上都是窄带接收机,软件除个别系统仍然是在 DOS 系统下编写的程序,其余系统都是在 Windows 环境下的软件。地面系统的天线有 3 种,八木天线、鞭状天线和组合天线。第 1、2 种适合试验用,携带方便,但在接收时需要人工调整。第 3 种是全自动天线,适合业务使用,美国公司和芬兰公司采用后一种天线。

### 3 探空系统的发展趋势

参加对比的探空系统代表了全球最新的探空系统,全部是电子探空系统,预示着今后国际探空技术发展的趋势。这些系统具有共同的特点:

(1) GPS 探空技术代表探空系统发展方向。参加此次对比的全部是 GPS 探空系统,随着 GPS 应用技术不断发展,产品的可靠性越来越高,成本越来越低,预示 GPS 探空系统将得到广泛的使用。《中国气象事业发展战略研究》提出集成探空系统的策略是将 GPS 技术引入我国业务探空系统,使我国业务探空系统中测风技术与国际探空技术同步发展的思路。

(2) 探空系统的集成化、自动化越来越高。采用了 GPS 技术,使系统体积小、重量轻、信号接收和数据处理实现自动化。如法国的地面接收设备就是一个旅行箱,携带非常方便。由于实现了自动化,整个探空过程一个人就能轻松地完成。

(3) P 波段的频点仍然不能扔掉。参加对比的探空系统都采用 P 波段 400 MHz 频点,采用这个频段的优点一是通信部分的造价低,二是与 GPS 接收的无线电兼容性问题相对容易解决。目前我国的业

务探空系统主要使用的无线电频率有两种:一是 701 二次雷达探空系统使用的 400 MHz;二是 L 波段二次雷达系统使用的 1675 MHz。

(4) 占用无线电频带宽。从各个系统无线电频带间隔(0.5~0.7 MHz)可以初步了解这一点。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。这在频率资源日益紧张的情况下,为高空探测获得一个稳定环境,具有重要意义。

(5) 探空仪传感器精度、性能及可靠性越来越高。温度传感器精度达到 0.2 °C;湿度传感器将提高低温下的湿度测量精度,将由湿敏电阻向湿敏电容发展。由于温度测量精度和利用 GPS 定位测高精度的大大提高,利用压高方程反算气压已被广泛使用,这将大大降低探空仪成本。

### 参考文献

- [1] CIMO Expert Team. Upper air Systems Intercomparisons [C]. WMO Commission for Instruments and Methods of Observation, First Session, 2004.
- [2] Vaisala 公司. Vaisala-Radiosonde-Rs92 [R], 2004.
- [3] Kaneko N, Kaneko H. Differential GPS Radiosonde Observation System [R]. Meisei Electric Co., Ltd., Japan, 2002.

## Development of Upper Air Sounding Technology

Ma Shuqing<sup>1</sup> Li Feng<sup>2</sup> Xing Yi<sup>1</sup>

(1 Atmospheric Observation Technology Center, CMA, 2 China Meteorological Bureau, Beijing 100081)

**Abstract:** An intercomparison of radiosondes was held in Mauritius in February 2005. Manufactures from Finland, Japan, USA, France, UK, Germany, and Switzerland brought their products. It is in fact an international intercomparison of high-accuracy and high-technological sounding systems. These sounding systems adopt GPS wind-finding technology and have the features of slight volume, light weight, automatic signal-receiving and data-processing, and narrow communication channel. The sensors of these systems have distinctly small volume and high responding speed. In general, the technological features embody the development of global sounding technology. Analysis and introduction are made of the technological structures and functions of these sounding system.

**Key words:** upper air sounding system, wind finding, GPS