

国内外常规高空观测技术发展 近况综述

黄炳勋

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

对国内外高空观测技术在近几年来的进展情况作了综述。述及的内容包括: 探空仪的各种传感器和电路, 各种测风设备, 测量精度、自动化与经济有效性等。

关键词: 无线电探空仪 传感器 测风设备 测量精度 经济效益

引 言

卫星遥感及地基遥感技术的迅速发展, 改变了高空探测的面貌, 但气球法常规高空观测, 由于能以较低的成本, 就地获取精细的大气层结资料, 在今后相当长时期内仍不会失去其重要性。为了更好地满足用户的需要, 常规观测也在不断地以新技术、新工艺改变自己的面貌。现代电子技术和计算机技术使常规高空观测在精确高速采样、准确可靠传递和自动处理计算等方面走上了一个新的台阶。但随着高精度、自动化而来的探空仪和地面设备价格的上涨, 使发展中国家站网的维持出现困境。因而发展既高精度又经济有效的高空观测系统, 是近年来国际气象界特别关注的问题。由于各国发达程度不同, 对高精度、自动化程度的追求或接受的能力是不同的。这几年和今后几年内, 日本、中国、俄罗斯、美国都有新系统投入业务, 美国和芬兰等厂商也有新产品问世。本文将对国内外常规高空观测技术在高精度、高度自动化及经济有效等方面进展的情况作一综述。

1 探空仪传感器的进展

提高传感器本身的测量精度, 历来是探

空仪发展的重点。但与探空仪及其地面设备的自动化发展相比, 敏感元件的进展一直较慢。

1.1 测温元件

热敏电阻(容)由于灵敏度高, 对测量电路要求低, 是目前常规探空仪普遍采用的测温元件。为了减小辐射误差和滞后误差, 元件尺寸越小越好。但尺寸太小, 生产使用难度高, 成本也高。60年代, 美国军用探空仪 AMT-4 上使用的 ML-419 杆状热敏电阻的直径只有 0.5mm。而 70 年代后美国生产(并供应许多国家)的阻体直径一直是 0.95mm。但近年来美国和日本开始使用小型热敏电阻, 尺寸又有所减小。我国从 70 年代研制 7 型探空仪以来, 生产的热敏电阻元件的直径一直只有 0.5mm, 是目前国际上使用的最细的杆状热敏电阻, 时间常数最小, 在地面为 1.7 秒^[1]。小珠状热敏电阻由于生产更难, 长期以来未能在业务上推广, 但美国 AIR 公司近来为国防部研制的使用卫星导航测风的新一代探空仪上大胆地使用了它。

在热敏电阻上涂复高反射率无机涂层一直是减小辐射误差的主要措施。我国研制的

涂层略优于美国^[2],在 30km 高空的太阳辐射误差已减小到 1℃左右。但无机涂层对地气系统的长波辐射几乎是黑体,在对流层顶以上的长波辐射误差也可达 1—2℃^[1],从而限制了测温精度的进一步提高。解决的办法之一是采用成本较高的真空镀铝。日本在其新探空仪 RS2-91 的小型杆状热敏电阻上采用了这种办法。另一办法是设法进行订正。芬兰采用了平均订正值。但长波辐射误差是随大气层的温湿层结和云层等因素而变的,用固定平均订正值仍会留下较大的残余误差。我国在新近完成的新探空系统中充分利用高速计算机的优点,用探空仪测得的温湿层结和云层实况订正太阳辐射和长波辐射误差,已在这方面领先了一步^[3],图 1 给出了几

种模式大气的计算结果。可以看出,在 100hPa 以上高空,低纬地区的订正值比高纬地区大 1℃多;有高云时比无云时低 1℃左右;芬兰 Vaisala RS-80 的平均订正值适用于高纬地区;而实况一般都在这几种模式间变化。

金属丝由于直径很细,散热好,30km 高度的太阳辐射误差只有 0.2℃,滞后误差可以忽略不计;由于其对长波辐射的反射率也很高,故长波辐射误差亦可忽略不计。从这一角度讲,它是理想的探空仪温度元件。但由于其灵敏度比热敏电阻小一量级,对测量电路的要求很高,成本也很高。加上金属丝元件生产使用困难,难以在常规业务中推广应用。英国一度在其 RS-3 探空仪上使用直径 13μm 的钨丝。由于仪器价格高达 300 美元而最终不得不放弃使用。1970 年前后,国际上曾出现过一些用细金属丝作温度元件的标准探空仪。但在近 10 年来进行的 4 次国际探空仪对比施放中都未使用,可见其应用何等困难。我国在 1986 年研制的温度标准探空仪用镀金钨铼丝作测温元件,用双参考通道、高线性电路进行测量,不仅遥测精度高,而且线路也不太复杂,价格与国外常规仪器相当,今后有希望争取充当对比标准^[4],但投入常规业务也是不可能的。

因此,在今后相当长时期内,在我国探空仪上采用成熟的直径 0.5mm 的热敏电阻及其高反射率无机涂层,用程序实况计算订正太阳辐射及长波辐射误差,是个既高精度又经济有效的解决办法。

1.2 测湿元件

源自美国的碳湿敏电阻和芬兰的高分子薄膜湿敏电容由于低温感湿性能好而逐步淘汰了肠衣、毛发等变形元件。但碳片温度系数大,碳膜又是黑的,因而防太阳辐射历来是仪器结构设计的难题。仅美国就设计出好几种

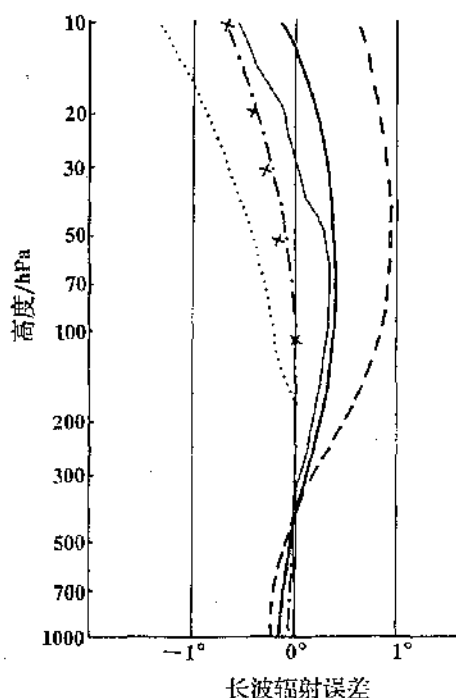


图 1 各种模式大气情况下的长波辐射误差
 断线:低纬度(晴),点划线:高纬度(晴)
 粗实线:中纬度(晴),虚线:中纬度(高云)
 细实线:实例,中亚(8月),× Vaisala, RS-80

通风槽,但东躲西藏,结果都不理想。相比之下,湿敏电容本身是半透明的,即使暴露在阳光下,也有很高的测湿精度。因而近年来有向湿敏电容转向的趋势(如日本、前苏联、美AIR公司)。我国对碳湿敏电阻的研究已有20多年的历史,对高分子薄膜电容研究历史较短。考虑到测湿元件是变阻型的,为减少探空仪线路成本,目前在新探空仪上使用的测湿元件仍为碳湿度片。

不过总的来讲,测湿精度不如测温精度高。由于水汽含量是气候变化的一个重要因素,近年来各国对此非常重视。世界气象组织将在1994年在美国举办探空仪湿度测量的施放对比,然后将在俄罗斯举办实验室测试对比活动。

1.3 测压元件

为提高采样率、减小传感器体积,变容式空盒正在逐步淘汰气压开关及变阻码片式空盒。如日本新探空仪、美国AIR公司的智能探空仪等相继采用变电容式空盒。但此种传感器温度系数较大,需进行温度补偿或软件订正。在采用热敏电阻作测温元件情况下,测量电路需兼顾电阻和电容的测量,线路相对复杂一些,成本也高些。

以半导体硅片腔体作压敏电容的元件已问世多年,但由于温度系数大,虽然适用于地面观测的较复杂的传感器已达实用精度,芬兰Vaisala,美国Motorola公司都有产品,但适用于探空仪的简单传感器尚需进一步探索。

我国新高空探测系统采用C波段高精度雷达测风,气压可用雷达测定的高度和探空仪测定的温度湿度层结曲线计算。即使在近地层,由于该雷达的测距误差只有5m,相应的气压误差不到1hPa,故其精度也高于空盒。此外,在新系统软件中增加了用大气实况订正大气折射误差的子程序,因而进一步提

高了测高和测压精度。新系统用雷达测高反算气压是走向既高精度又经济有效方向的又一有力措施。

1.4 元件校准

传统上,由于手工或半自动计算处理记录的需要,在校准图纸上画校准线是比较实用的方法。但到了计算机广为应用时代,校准线公式化已是必然趋势。这不仅是计算机计算的需要,而且公式化后可以减少校准点,提高校准线精度。例如,我国生产的热敏电阻元件经精密测试检验证明完全符合以下实验公式:

$$R = AT^C e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

其中, R 、 T 为阻值与温度(K), A 、 B 、 C 为常数。只要精确校准3点,即可解出 A 、 B 、 C 值,过去校准7点,校准线精度并不高,现在只校准3点,精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ [5]。

国外先进工厂的校准工作都用微机控制、采数、计算校准公式系数,并把结果存档备用。我国电子探空仪大规模推广应用后,校准生产线的微机化也是必走的道路。

2 探空仪电路的发展

随着电子工业的高速发展,探空仪电路除发射管外,都已从分立元件走向通用或专用集成电路化。现在微处理器也已出现在一些公司的探空仪上。探空仪的集成电路化不仅可以提高遥测精度、可靠性、降低功耗,回收的仪器还可反复使用、降低业务费用。

2.1 双参考、高线性、高精度测量电路

电子元器件都有温度系数,电路特性还受电源电压的影响。探空仪测量的大气环境温度可从 40°C 变化到 -90°C ,探空仪盒内温度可下降到 -50°C 左右。为了降低成本,业务用探空仪不可能采用成本过高的保温、稳压措施。因此如何消除测量电路标准线漂移引起的遥测误差是电路设计者必须重点解决的

问题之一。使用参考通道进行订正是惯用的方法。国内过去习惯采用一个参考通道用比例法进行订正,但效果不够理想。因为即使是理想的线性校准线也是两点决定一直线,需两个参考通道加以订正。当然使用过多的参考通道既不经济又减少了数据流中有效数据的比例。因此最好的办法是尽量使测量电路高度线性化。我国刚研制成的新电子探空仪测量电路由通用集成块组成,传统的测频率方法已被改测周期,校准线高度线性,用两个参考通道已使遥测精度达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ^[6]。

2.2 微处理器的应用

由于芯片价格的不断下降,美国 VIZ、AIR 公司正在几个探空仪型号上采用了微处理器,使探测结果实现了数字式传递,不仅提高了采样速率,而且提高了数据传送的可靠性,从而进一步提高了探测质量及自动化程度。

探空仪由微处理器管理后采样速率提高到 2 秒或 1 秒一周,敏感元件的输出被转换成 Manchester 0,1 码,编成组,发送至地面。由于发射频谱窄,每组数据发两次,大大提高了数据传送的可靠性。此外敏感元件的校准系数都已写入探空仪的 EPROM 中,在施放前或施放过程中随测量数据流传送至地面系统,省去了人工键入或调用步骤。在探空仪上直接把元件的输出转换成 T 、 P 、 u 真值再传送至地面的设想也已提出。

2.3 探空仪抗干扰性强,且高度自动化

国外除测风设备采用无线电经纬仪或二次雷达因而探空仪采用 1680MHz 以外,一般也都用 403MHz 频段。但这一频段非常拥挤,干扰很严重。因而发射机除采用调频体制外,不少厂家还采用晶振,频率稳定,频谱窄,加上数字式传送,抗干扰能力较强。

我国新探空仪由于受价格限制,仍采用 400MHz 调幅体制。由于探空仪发射频谱宽,

地面接收机频带也宽,因而有时严重受到干扰,是今后需要改进提高的一个方面。

国外不少国家的探空仪的敏感元件甚至电池(不用注水电池),已在工厂装配好。使用时按一下按钮,不用基测,即可施放。有的还自动灌球,放球,因而施放工作非常简便。

我国新电子探空仪在施放前尚须装湿度元件,泡电池,装配仪器,做基测。但工作量比 59 型探空仪少得多了。

3 地面数据处理加强质量检验且高度自动化

目前地面处理一般都采用大容量、高速微机。主机接收到密集原始数据后,第一步是通过各种方式进行质量检验,纠错,订正并采取某种光滑措施,以确保原始数据质量;第二步是进行一些必要的系统误差订正。如在我国新系统中已实现用探测到的大气实况进行太阳辐射、长波辐射及大气折射误差的订正^[7]。最后是按世界气象组织的全部要求处理计算规定层、特性层等记录,及时编发报文并存档备用。我国新系统球炸后 5 分钟即可发报。观测员在整个接收处理过程中只需判断记录有否异常情况出现,工作非常轻松。

4 高空风观测

各国高空风观测都在向现代化、自动化发展。由于各国情况不同,测风体制仍具多样化。一般而言,科研国防等单位往往较先使用最先进的技术装备,而气象业务部门则受经费等限制,往往落后一段时间。

4.1 无线电经纬仪

由于无线电经纬仪只有角度跟踪,地面设备比雷达简单,固定投资少而仍具魅力。美国、日本、加拿大等国长期以来一直沿用 1680MHz 无线电经纬仪体制。当然,随着现代技术的发展,元器件集成电路化、终端微机化等改造是必然的。例如日本刚投入业务的 1680MHz JMA-91 型无线电经纬仪除天线

外,室内只有一个小控制柜和 386 微机系统。此外,为了便于捕捉目标,采用宽、窄两种波瓣模式。

无线电经纬仪的另一技术进展是天线改用相控阵方式。其优点是不必连续转动天线跟踪目标。据芬兰 Vaisala 公司介绍,在一次探测过程中,天线只需转动 5—6 次即可。但目前的天线尺寸可能太小,旁瓣抑制不够,低仰角性能不如抛物面天线。美国 AIR 公司的产品在仰角低于 15° 以下时计算的风就不可靠(参见图 2)。芬兰每一部分(共有 4 部分)天线由 12 个振子组成,低仰角性能有所改善,但从其提供的实例看,计算的风廓线仍有较大的虚假起伏。

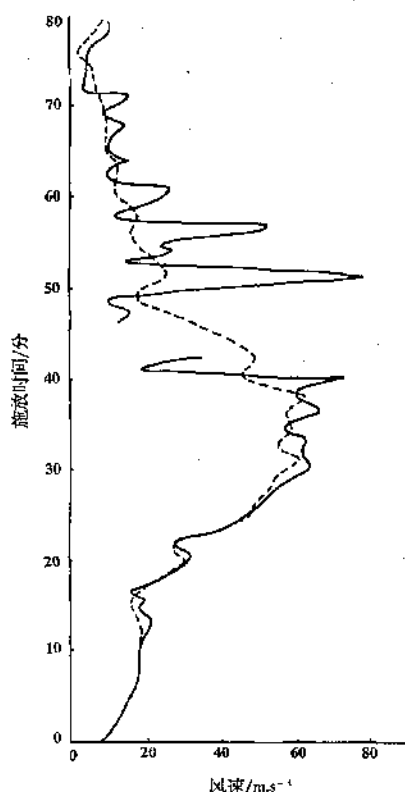


图 2 AIR 相控阵天线无线电经纬仪低仰角测风记录

虚线为对比的导航测风记录

采用无线电经纬仪测风时需用探空仪空

盒测定的高度 H 及目标仰角 α 的余切的乘积 $H \cot \alpha$ 计算目标的水平投影距离,在仰角较低时,高度及仰角的误差被大大放大而使计算出的高空风精度大为降低。例如美国的 GMD 无线电经纬仪角跟踪精度为 $\pm 0.06^\circ$, 比我国的 701 雷达的跟踪精度($\pm 0.15^\circ$)高得多,但由于没有测距,测风精度差不多(见图 3)。因此如要追求 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 高精度风廓线记录,无线电经纬仪至少在目前情况下是不可取的方案。

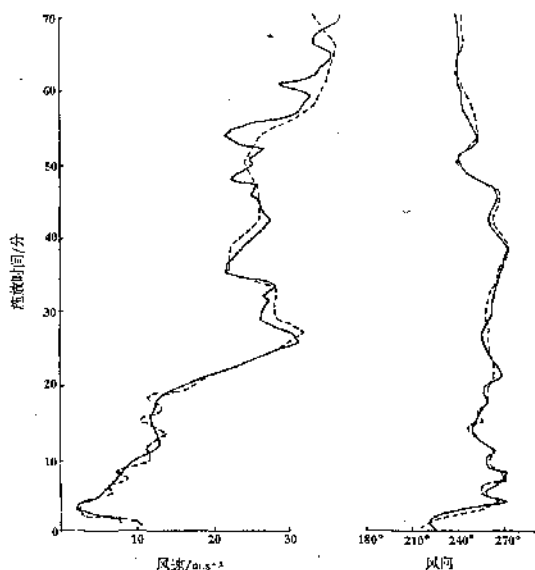


图 3 美国 GMD 无线电经纬仪(实线)与我国 701 二次雷达(断线)测风记录比较

4.2 雷达

如前所述,与无线电经纬仪相比,雷达由于有目标斜距记录,在同样角跟踪精度情况下,测风精度明显高于无线电经纬仪。但雷达需要大功率发射机,因而地面投资较大。特别是一次雷达,地面一次性投资更大。二次雷达在地面的投资比一次雷达少,但天上的发射回答器成本比普通发射机贵。1986 年确定我国第二代测风体制时,由于相当大部分台站每日有 1—2 次单测风,一次雷达用比较便宜

的反射靶测风,优越性比较明显。加上国内 1680MHz 发射机技术不成熟,成本较高,因而最后选择了 C 波段一次雷达体制。

从已研制的两部雷达样机看,跟踪精度很高,但与目标距离有关,即测角精度为 $\pm 0.02 \sim \pm 0.05^\circ$,测距精度为 $\pm 5 \sim 15\text{m}$ 。雷达最低工作仰角小于 5° 。在低空,采用 8 秒平均间隔,即可得到精度达 $\pm 1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的精细的风廓线;在 20km 以上高空,达到 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 精度所需的时间间隔只需 2 分钟,这样的优异性能,目前除卫星导航测风以外,任何一种其它测风技术都是不能达到的^[8]。图 4 是相隔 1 小时的两条高空风廓线实例,可以看出有些层次未变,有的层次已有微小变化。

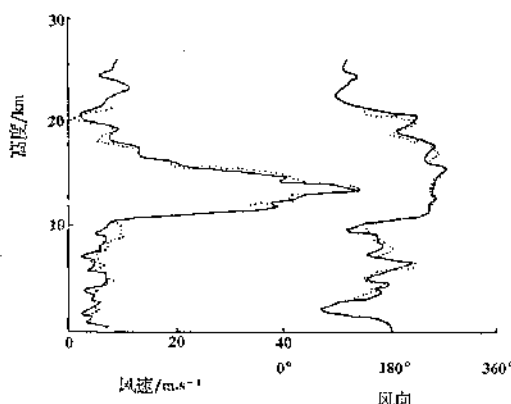


图 4 两份间隔 1 小时的高空风记录

4.3 导航测风技术

与无线电经纬仪和雷达相比,导航测风技术可以在运动平台(如船只、飞机)上以较高精度测定高空风而独具魅力。但目前导航测风也在一些国家的陆地站网上得到了广泛的应用。由于西欧、北美 Loran-C 导航信号覆盖良好,测风精度可达 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,近来英、法、德、波在更新其原有陈旧设备时都相继采用了 Loran-C 导航测风方案。据说美国今后也最有可能选择这一方案。

我国仅在东南沿海地区有 Loran-C 导航信号覆盖,不可能在西部地区采用此方案。Omega 导航信号原来覆盖全球,但今后将逐渐被卫星导航所淘汰,此外测风精度最多只有 $2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,故不可取。

应美国国防部的要求,利用卫星导航信号进行测风的技术已在美国 AIR 公司开发出来。据称探空仪上的 1575MHz 卫星导航信号接收机采用晶振、窄带(1kHz)、保温等措施后,测风精度已达 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如地面配备相同的接收机,用差分方法进行订正,测风精度可达 $0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。但目前成本还是相当高,对我国来讲只能在 21 世纪考虑了。

5 结语

常规高空探测技术近 10 年来已有较大发展。特别是一些公司为了满足一些试验研究或军事部门需要而开发的产品,由于受成本限制较少,采用的技术更先进。我国刚研制成功的 C 波段一次雷达-电子探空仪系统具有高精度、相当高的自动化程度及消耗品成本低等特点,是今后相当长时期内适用于我国国情的新高空观测系统。

参考文献

- 1 黄炳勋, GZZ-7 型探空仪温度元件的辐射误差及滞后误差, 气象科学技术集刊(7), 北京: 气象出版社, 1985, 1-8.
- 2 黄炳勋, 一种适用于探空仪热敏电阻温度元件的高反射率涂料, 大气探测文集, 北京: 气象出版社, 1983, 139-143.
- 3 黄炳勋, 郭亚田, 利用探空仪自身测定的温湿压廓线实时订正温度元件长波辐射误差的实用方法, 待发表.
- 4 寇红薇, 黄炳勋, 适用于标准探空仪的钨铼丝测温元件, 气象, 1986, 12(7): 33-35.
- 5 王九连, 黄炳勋, 一种新型热敏电阻温度元件, 气象, 1986, 12(9).
- 6 黄炳勋, 张永宽, 探空仪校准的既精确又经济有效的设计思路, 待发表.

7 黄炳勋. 雷达测高计算中的地球曲率和大气折射订正.
待发表.

8 黄炳勋. 我国第一部 C 波段测风雷达的跟踪特性及其
应用前景初析. 应用气象学报, 待发表.

A Summary of Recent Progress in the Upper-Air Observational Techniques at Home and Abroad

Huang Bingxun

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract

The recent progress in the upper-air observational techniques at home and abroad are summarized. The topics of discussion include: various sensors and circuits of radiosonde, various wind-finding equipments, measuring accuracy, automatization and economic effectiveness.

Key Words: radiosonde sensor wind-finding equipment measuring accuracy economic effectiveness