

高空气象

探测原理与方法

姚振东 余勇 王福增 王烁 甄小琼 / 主编



科学出版社

高空气象探测原理与方法

姚振东 余 勇 王福增 王 烁 甄小琼 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对地球大气的结构特征和温、压、湿、风等主要气象要素进行概述和分析,引出高空大气探测的特殊方法,指出其测量参数的性能指标要求。主要讨论基于 L 波段跟踪雷达和全球导航卫星系统的两种探空测风系统的基本构成和工作原理,并阐述不同高度层风的计算和处理方法;在描述探空仪构成的基础上,给出高空大气探测中温、压、湿气象要素的探测方法及其数据的采集与处理等;同时,为兼顾高空大气探测专业的应用,本书阐述场磨式高空电场仪、电化学池臭氧探空仪、冷凝式露点温度探空仪等仪器的构造和工作原理,对下投式探空和民航商用飞机 AMDAR 等探测技术也进行了讨论;简述地基高空大气探测中的基于主动遥感技术的风廓线雷达、基于被动遥感技术的微波辐射计以及地基和空基 GPS 气象学的工作原理和应用。

本书适合大气探测、大气科学及相关专业的高年级大学本科生、研究生和工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高空气象探测原理与方法/姚振东等主编. —北京:科学出版社, 2019. 7

ISBN 978-7-03-061723-1

I. ①高… II. ①姚… III. ①高空气象学—气象观测 IV. ①P412. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 121242 号

责任编辑:郑述方 / 责任校对:彭 映

责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本:16(787×1092)

2019 年 7 月第一次印刷 印张:20

字数:480 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

高空大气探测技术在气象观测与气候观测中具有极为重要的地位。20 世纪初,无线电探空仪的发明,促进了全球高空气象观测网的建设,并在天气预报、大气科学研究和气候统计方面一直发挥着无可替代的作用。

高空大气探测技术是微电子、通信和无线电定位等技术与高空大气传感器的完美结合,被应用于高空气象观测中的特殊技术。

本书共分 5 章。第 1 章:绪论,包括高空大气探测历史、理论基础、气象参数变化规律以及测量要求等,由余勇教授撰写;第 2 章:高空风探测,包括 L 波段探空测风雷达、雷达应答器、电子经纬仪、导航卫星测风系统、风的计算和处理等,由王福增博士撰写;第 3 章:高空温压湿气象要素探测,包括 TPU 探空仪、探空仪的施放与探空信号接收、探空数据采集与处理等,由甄小琼讲师撰写;第 4 章:非常规高空大气探测,也就是专业探测技术,主要有场磨式高空电场、电化学池臭氧、冷凝式露点温度等的探测,以及下投式探空和民航商用飞机(AMDR)探测技术等,由姚振东教授撰写;第 5 章:高空大气的微波遥感探测,包括风廓线雷达、微波辐射计、导航卫星水汽探测(GNSS/MET),并简述掩星探测原理,由王烁讲师撰写。

涉及高空探测仪器设备的章节力求详细讨论其工作原理、技术规范、机械物理结构、电路组成以及使用要求等实践性内容,希望做到考虑综合气象观测业务的动态发展,扩展高空气象探测仪器设备,尽量突出工程技术与探测原理结合的特点。目的是实现对探空仪器设备的使用、维护维修和设计的指导等。本书适合大气探测及相关专业的高年级大学本科生、研究生和工程技术人员阅读。

本书的撰写得到了中国气象局的大力支持,并得到了国家自然科学基金 41475033 项目的资助。在成书的过程中,得到了中国气象局气象探测中心、气象干部培训学院王强教授等单位与个人的指导(封面背景图为内蒙古二连浩特市气象局 L 波段探空测风雷达),在此一并表示感谢!

由于作者水平和经验有限,疏漏之处敬请原谅并不吝指正。

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 高空大气探测概述	(1)
1.1.1 高空大气探测的内涵	(1)
1.1.2 常规高空大气探测业务	(2)
1.1.3 学习高空大气探测技术的要求	(3)
1.2 高空大气探测的历史与发展现状	(4)
1.2.1 高空大气探测的历史	(4)
1.2.2 中国高空探测的发展历史	(7)
1.2.3 高空大气探测的现状	(8)
1.2.4 高空大气探测的发展趋势	(14)
1.3 高空大气探测的基础知识	(14)
1.3.1 地球大气的组成概况	(14)
1.3.2 大气的基本状态参数及状态方程	(16)
1.3.3 气压与高度	(17)
1.3.4 地球重力场与位势高度	(18)
1.3.5 大气湍流	(20)
1.3.6 大气热力学的基本概念	(21)
1.3.7 旋转坐标系和科里奥利力	(23)
1.3.8 地转风及其切变和热成风	(24)
1.4 地球大气分层结构和特性	(25)
1.4.1 标准大气	(25)
1.4.2 对流层	(27)
1.4.3 平流层	(28)
1.4.4 中间层	(29)
1.4.5 热层	(30)
1.4.6 外大气层	(31)
1.5 高空大气气象要素的基本变化规律	(31)
1.5.1 高空大气气象要素的基本特征	(31)

1.5.2	气压的变化规律	(33)
1.5.3	温度的变化规律	(36)
1.5.4	湿度的变化规律	(39)
1.5.5	风的变化规律	(41)
1.6	天气学和气候学对高空探测的基本要求	(45)
1.6.1	高空探测数据处理的基本要求	(45)
1.6.2	对传感器的基本要求	(46)
1.6.3	高空探测数据三性要求	(48)
第2章	高空风探测	(52)
2.1	测风雷达	(53)
2.1.1	L波段雷达探空原理	(53)
2.1.2	L波段雷达的测距原理	(53)
2.1.3	L波段雷达的测角跟踪原理	(54)
2.1.4	L波段雷达系统组成	(55)
2.1.5	雷达定位测风	(70)
2.2	无线电经纬仪	(72)
2.3	光学测风经纬仪	(73)
2.4	卫星导航测风	(77)
2.4.1	GPS卫星导航系统	(77)
2.4.2	北斗卫星导航系统	(78)
2.4.3	卫星导航探测仪器设备	(78)
2.4.4	导航卫星定位法测风	(80)
2.4.5	卫星频率多普勒频移法测风	(81)
2.5	气象业务应用所需的风	(83)
2.5.1	平面坐标投影原理	(83)
2.5.2	站心坐标与地心坐标的转换	(84)
2.5.3	气球漂移量的计算	(86)
2.5.4	层风的计算	(86)
2.5.5	规定高度风的计算	(90)
2.5.6	合成风的计算	(91)
2.5.7	最大风层的选取	(92)
2.6	高空风的平均、平滑和内插处理	(92)
2.6.1	传统的测风数据处理方法	(92)
2.6.2	风向风速的矢量平均方法	(94)

2.6.3	风向风速的内插处理	(95)
2.7	天气学所需的风	(97)
2.7.1	规定层的高度和时间	(98)
2.7.2	《常规高空气象观测业务规范》规定的内插方法	(98)
2.8	L波段高空大气探测系统软件介绍	(99)
2.8.1	主要功能	(100)
2.8.2	台站常量参数设置	(101)
2.8.3	数据处理软件	(101)
2.8.4	文件系统与命名规则	(105)
第3章	高空温压湿气象要素探测	(111)
3.1	气球和氢气	(111)
3.1.1	氢气	(111)
3.1.2	气球型号和用途	(117)
3.1.3	气球升速、稳定性及误差	(118)
3.2	探空仪	(125)
3.2.1	探空仪的分类	(125)
3.2.2	探空仪的组成	(126)
3.2.3	探空仪的传感器	(129)
3.2.4	探空仪及相关探测设备	(135)
3.2.5	几种典型的探空仪介绍	(139)
3.3	探空仪的施放和信号接收	(145)
3.3.1	探空仪施放前的准备	(145)
3.3.2	探空仪施放和探测过程	(151)
3.3.3	探空仪外场比对试验	(153)
3.4	探空数据的采集和处理	(161)
3.4.1	温度辐射误差修正	(161)
3.4.2	位势高度计算	(163)
3.4.3	用高度反算气压	(165)
3.4.4	规定等压面和规定高度	(166)
3.4.5	特性层的选取	(166)
3.4.6	特殊情况的处理	(168)
3.4.7	资料的就地审核和统计	(169)
3.4.8	探空报表和存档	(169)

第4章 非常规高空大气探测	(171)
4.1 高空电场观测	(171)
4.1.1 高空电场的基本特性	(171)
4.1.2 电场探空仪原理	(172)
4.1.3 三维空中电场仪	(176)
4.1.4 高空电场观测	(178)
4.2 高空臭氧探测	(178)
4.2.1 大气成分简介	(178)
4.2.2 臭氧的测量原理和方法	(179)
4.2.3 臭氧的电化学反应	(180)
4.2.4 测量臭氧的探空仪	(181)
4.3 高空露/霜点温度探测	(185)
4.3.1 高空湿度探测存在的缺陷	(185)
4.3.2 高空低温低湿条件下湿度测量的瓶颈	(187)
4.3.3 露点温度的直接测量	(188)
4.4 下投探空仪探测	(193)
4.4.1 下投探测的特点	(193)
4.4.2 平流层气球下投探测	(195)
4.4.3 飞机下投探测	(196)
4.4.4 气象火箭下投探测	(199)
4.5 商用飞机探测	(202)
4.5.1 概述	(202)
4.5.2 气压探测原理	(204)
4.5.3 温度探测原理	(206)
4.5.4 风速和风向探测原理	(207)
4.5.5 应用情况	(209)
4.5.6 气象飞机探测技术简介	(209)
第五章 高空大气的微波遥感探测	(213)
5.1 风廓线雷达原理及高空风的探测	(214)
5.1.1 概述	(214)
5.1.2 风廓线雷达回波机理	(215)
5.1.3 风廓线雷达探测原理	(222)
5.1.4 风廓线雷达的系统组成	(229)
5.1.5 风廓线雷达的应用	(232)

5.2 微波辐射计探测	(236)
5.2.1 概述	(236)
5.2.2 微波辐射测量原理	(237)
5.2.3 大气微波遥感原理	(252)
5.2.4 微波辐射计工作原理	(261)
5.2.5 微波辐射计的遥感应用	(274)
5.3 导航卫星水汽探测(GNSS/MET)	(279)
5.3.1 概述	(279)
5.3.2 导航卫星水汽探测原理	(281)
5.3.3 GPS 气象网的建设	(290)
5.3.4 导航卫星水汽探测应用	(292)
5.4 高空大气的掩星探测	(293)
5.4.1 概述	(293)
5.4.2 掩星探测原理	(294)
5.4.3 掩星探测的应用	(302)
参考文献	(304)

第 1 章 绪 论

1.1 高空大气探测概述

1.1.1 高空大气探测的内涵

高空大气探测(aerological sounding),顾名思义,就是利用气象传感器,采用直接测量、遥测或遥感的方式,直接或间接地探测地球表面大气层各部分的温度、湿度、气压、风向、风速、大气成分等大气状态参数,认知大气的物理或化学属性及演变的现象和规律,为天气预报、气候观测和科学研究服务。这里“高空”的概念通常是指由自由大气的近地面层开始,向上依次涵盖对流层、平流层大气,有时基于航空/航天大气探测服务的需求,甚至把探测目标扩展至中层及以上气层的大气。根据传感器所处位置的不同,可以把高空探测分为地基、空基和天基等探测方式。地基探测方式主要利用红外/微波遥感的方式探测高空大气的状态参数,其典型代表是地面微波辐射计、声雷达和地基微波雷达(如风廓线雷达)等;空基探测是高空大气探测的主要形式,它采用可垂直移动的传感器载运平台搭载气象要素传感器,通过与高空大气直接接触的方式测量大气的状态参数,其典型代表是基于气球搭载的电子探空仪结合 L 波段测风雷达或经纬仪的气象业务探空系统,另外,以飞机/无人机/探空火箭为传感器载运平台的探测手段也在气象业务和科研活动中广泛应用;天基探测主要是利用星载传感器遥感探测,其目的是借助卫星的活动范围,扩大高空大气的探测范围。

气象观测业务中的高空大气探测是综合气象观测的主体业务之一,在此观测业务中,高空大气被狭义地限定为平流层下部约 30km 以下的地球大气。对于这些高度的大气进行探测,有助于认识地球大气的运动规律、水汽/热量的垂直/水平输送机制,对于预测天气系统的形成和演变趋势,提高天气预报的准确性具有重要意义。

高空大气探测业务与地面探测有相似的一面,都是利用传感器感知大气状态参数的变化,但高空探测需要一个移动的传感器载运平台,而且传感器测量环境与地面有极大的不同。

高空大气探测传感器的载运平台从 18 世纪中期开始使用的风筝、人工操控气球,到 19 世纪末期开始使用并沿用至今的自主飞行气球,再到如今使用的飞艇、低空系留气球、探测火箭、飞机和无人机等,经历了漫长的发展过程。气球成本低,适合开展大规模业务观测,但飞行路径并不固定,其观测结果仅代表区域的平均效应。其他手段由于成本原因并不适合业务使用,这种应用上的思考促使了对遥感探测的需求。近年来,随着地面微波辐射计、风

廓线雷达和卫星遥感的发展,基于遥感资料的高空气象要素反演成为高空大气探测的重要补充。

在地面观测中,传感器处于静止状态,与被测大气环境有充分的接触时间,因此,对传感器的响应时间要求一般不高,只要满足地面气象观测规范即可;此外,地面气象条件在短时间内不会有太大变化,可以认为气象传感器处于均一环境中。而高空大气探测不同,空基传感器平台不可能处于静止状态,一般有较快的上升速度(如气球)或水平移动速度(如飞机),传感器与被测环境接触时间较短,需要气象传感器有较快的响应速度,对传感器设计与选择提出了更高的要求;在观测时,随着传感器平台的上升,气压与气温快速下降,气流运动、水汽凝结和空间辐射等因素影响传感器的工作状态,传感器在设计时必须考虑环境变化的影响,并采取保护措施。上述因素增加了传感器设计的技术难度,提高了高空探测的观测成本。

高空大气探测的主要目的是获取高空大气温/压/湿、风向/风速等气象要素参数的垂直廓线分布,探寻地球大气中天气系统的内部结构和运行演变机制,认知地球大气各种尺度天气系统的运动规律,为数值天气预报提供准确、有效的数据依据。通过对高空大气气象要素的长期观测,辅以对大气成分变化的观测,可以为地球气候监测提供科学、翔实的数据。

1.1.2 常规高空大气探测业务

常规高空大气探测业务是指采用气球携带无线电探空仪,以自由升空方式对自地球表面到几万米高度空间的大气状态参数(气压、温度、湿度)和运动参数(风向、风速)等的变化进行观测、收集、处理的活动和工作过程,在气象部门通常简称为高空气象观测或高空探测,该业务通常由专业化的高空气象台站实施。目前中国气象局下辖的高空气象台站主要使用L波段二次测风雷达-电子探空仪探测系统,部分台站和其他部门的探空业务也可能使用无线电经纬仪探测系统,未来的业务系统会逐渐过渡到卫星导航定位探空观测系统。

为了对高空气象观测业务加以指导,2010年中国气象局制定了《常规高空气象观测业务规范》(2010版),作为国内所有高空气象台站的工作依据,对高空气象观测的组织和实施方法提出了具体的业务要求。该规范规定了高空气象观测站的环境条件和业务要求;观测仪器和观测方法;观测信息采集和质量控制;观测仪器设备的标定,检查维护;观测信息编码与传输;月报表编制;业务操作流程与规章制度的制定与检查;高空气象观测网质量保证等。同时还规定了气象参数计算的公式和定义、数据文件命名规则、秒级观测资料上传文件格式等。按照《常规高空气象观测业务规范》(2010版)的要求,中国气象局还制定了高空气象观测的工作手册和各种技术规定,以保证全国高空气象观测数据符合世界气象组织对于高空气象观测数据应具有准确性、代表性和可比较性的要求。

世界气象组织(WMO)要求,高空气象台站每天的观测时间为北京时间02时、08时、14时、20时,考虑到气球从地面上升到30km以上高空需要一个多小时,实际气球的施放时间分别是北京时01时15分、07时15分、13时15分、19时15分。目前中国气象局大部分的高空气象观测站每天进行2次观测,时间是07时15分和19时15分。根据业务需要,可以

进行3次或4次观测。部分高空气象观测站的数据需要参与国际交换,由世界气象组织的相关机构通过对国际交换数据的评审和检查进行质量控制。

目前,高空气象观测的内容主要为高空大气温度、湿度、气压(位势高度)和风的观测。高空压、温、湿观测是由气球携带无线电探空仪升空,将实时测量的压、温、湿等高空气象数据传送至地面接收设备。高空风观测采用定向天线(雷达)跟踪、经纬仪跟踪或卫星导航系统定位等方式对气球位置进行跟踪测量。其中,定向天线(雷达)和经纬仪主要通过跟踪气球飞升过程中的仰角、方位角、斜距或高度计算风向、风速;卫星导航定位系统通过接收导航信号,确定气球携带探空仪(应答器)在空间的位移来计算风向、风速。

地面接收设备接收到的探空数据是探空仪探测数据的时间序列,数据自变量是时间而不是希望的高度层面,高空探测业务需要把这些数据转换为规定层面的探测数据,因此,需要数据处理终端对气压、温度、湿度、风向、风速等时间序列数据进行处理,获取规定层面上的数据资料,进而形成上传数据文件和秒数据文件等,编制高空压、温、湿记录月报表和高空风记录月报表,形成月数据文件,观测业务人员在规定的时间内完成文件传输。规定层面包括规定等压面、特性层、对流层顶、零度层、温湿度特性层、量得风层、规定高度风层、最大风层、高空风特性层等。例如,规定等压面为:地面 1000hPa、925hPa、850hPa、700hPa、600hPa、500hPa、400hPa、300hPa、250hPa、200hPa、150hPa、100hPa、70hPa、50hPa、40hPa、30hPa、20hPa、15hPa、10hPa、7hPa、5hPa、3hPa、2hPa、1hPa。规定高度风层:距地高度—300m、600m、900m;海拔高度:0.5 km、1.0 km、1.5 km、2.0 km、3.0 km、4.0 km、5.0 km、5.5 km、6.0 km、7.0 km、8.0 km、9.0 km、10.0 km、10.5 km、12.0 km、14.0 km 等(其后每2km为一层)。由此可见,直接的探空仪数据还需要经过大量的中间处理环节,才能转化为供气象业务使用的观测数据。

1.1.3 学习高空大气探测技术的要求

本书编写的目的是为学习高空大气探测技术的学生或业务人员提供一本有指导意义的高空探测基础教材。

高空大气探测业务涉及大气科学、大气物理、传感器技术、信息处理技术及计算机技术等相关技术知识,是一个综合性较强的观测业务。从事高空大气探测业务的工作人员,首先应该具有大气科学和大气物理的基础知识,应对天气系统和大气运动的关系有基本了解,对高空大气气象要素的变化范围及规律有基本认识,这样才能对观测数据的属性进行基本的分析判断,以便为预报业务提供高质量的观测数据。对气象要素进行探测的过程中,如果探测业务人员具有基本的传感器知识,就可以对探空仪的工作状态进行基本的监控,以保证观测数据的有效性。高空大气探测业务会产生大量的观测数据,数据的业务处理需要计算机系统的辅助,因此观测业务人员应该具备信息处理和计算机应用的基本业务能力。

本书欲为将来从事高空大气探测业务的工作人员提供基本的背景知识,主要介绍高空探测的历史与发展现状,高空大气的基本组成情况和气象要素的基本变化规律,高空温度、压强、湿度和风等气象要素探测的基本手段与数据处理方法,以及近年来探测业务中常见的

遥感探测手段及其在高空探测业务中的应用。

1.2 高空大气探测的历史与发展现状

1.2.1 高空大气探测的历史

1. 风筝与气球的使用

最早的气象观测可以追溯到古人的天象观测和看云识天,云量及其形状的观测可以认为是对高空大气状态的一种间接观测。在那些年代,人类从爬山的生活实践中认识到,随着高度的增加气温不断降低,但由于缺乏基本的测量技术,这种认知长期停留于人类感性认识阶段。16~17世纪,随着气压计、温度计和湿度计的发明,人们开始尝试用这些传感器测量气象要素的变化,促进了地面气象观测的发展。1650年,Blaise Pascal携带Torricelli式气压计爬上巴黎的圣雅克(St. Jacques)塔,做出了人类历史上第一次高空气压的测量,并发现气压随高度的增加而下降,这是利用传感器探测气象要素随高度变化的开端。由于缺乏传感器载运平台,能够利用的方法也就是人工携带传感器沿建筑物或高山向上攀升,因此这种测量的对象都是近地面大气,而不是现代高空探测的主体——自由大气。

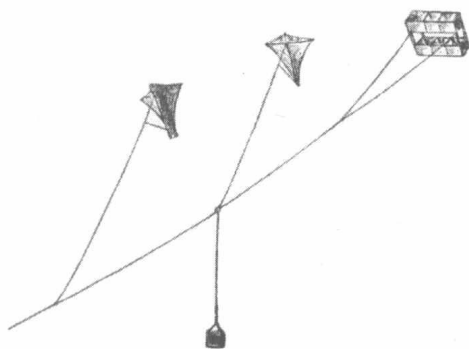


图 1-1 风筝探空

最早用作高空传感器载运平台的是风筝(图 1-1)。1749年,Alexander Wilson和他的学生 Robert Melvill把温度计绑在一个风筝上送上高空,力图测量不同高度自由空气的温度,但由于缺乏可行的数据记录方法,他们的测量难说成功。

在自由大气的高空观测上取得突破的是 Jacques Charles 和 Nicolas Robert。Charles

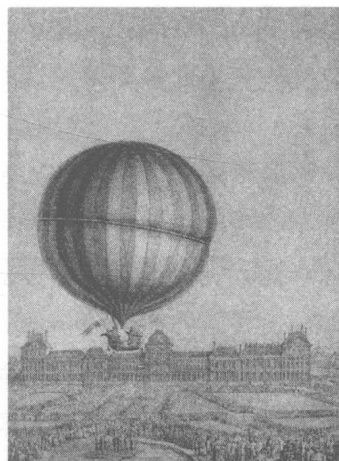


图 1-2 人工控制的探空气球

发现了大量制造氢气的方法,而 Robert 发明了防漏气的丝织橡胶布,他们合作制成了一个氢气球,并在下方配置了一个人工吊舱(图 1-2)。1783年,他们在巴黎进行了第一次无系留气球飞行,携带了一个温度计和一个气压计,成功地测量了不同高度自由空气的温度和气压,并做了很好的记录,开创了人工热气球探测高空大气的先河。1784年11月30日,John Jeffries 和 Jean Pierre Blandchard 用气球携带多种传感器,对高空大气作了一次系统的成功观测,他们得出温度的垂直递减率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$,这接近于现代观测值。1804年,Joseph Louis Gay-Lussac 和 Jean-Baptiste Biot 作了一次成功的热气球飞行,他们到达了 7km 高度,发现了大气中的水汽含量随高度的增加而减少,而大气的化学成分并没有随高度的增加产生变化。1852年,John Welsh 作了 4 次成功的气球飞行探测,他第一次采用了带屏蔽的通风温度计,对气温做了精确测量,发现了逆温层和同温层。这些发现刺激

了人们对高空大气探测的欲望。19世纪最著名的气球气象学家是英国的 James Glaisher, 他和 Henry Tracey Coxwell 利用煤气填充气球做了多次探测飞行, 创造了当时热气球飞行的记录, 他的观测数据均记录在他 1871 年发表的专著 *Travels in the Air* 中。

人工热气球探测高空大气不仅成本高昂, 而且非常危险, Glaisher 曾在他的飞行中高度超过 8km 时出现昏厥现象。因此, 随着传感器数据自记技术的进步, 风筝成了 19 世纪高空探测的主体。在 1822~1823 年的北极探险过程中, George Fisher 从船上释放了携带有自记温度计的风筝, 得到了最早的极地地区高空大气数据。风筝在 19 世纪和 20 世纪早期成了高空探测的主要传感器载运平台, 基于风筝的高空观测站在欧洲、北美广泛建立, 适合风筝载运的自记录传感器充分发展。但是, 风筝对于太重的笔式记录器和基于时钟的自记装置无能为力。因此, 业务化的高空探测需要新的传感器载运平台——基于自由飞行的现代式观测气球。

早期用于高空探测的自由飞行气球由动物肠衣制成, 填充氢气, 飞行高度可达 7km 以上。1901 年, Richard Assmann 发明了可伸缩的橡胶气球, 直到今天仍然用于全世界的高空探测业务, 这种气球要求携带的传感器有自记录功能、质量要轻, 由于气球向上飞行直至爆破, 传感器将难于找寻, 因此还要求传感器记录的数据能保存很长时间。在那个时代, 这种传感器的代表是 William Henry Dines 设计的气球用气象计。

2. 无线电探空仪

在 20 世纪 30 年代以前, 不论是基于风筝还是基于气球的高空探测资料都不能用于天气预报, 因为它们都是非实时资料, 不能及时送至预报员手中。直至无线电探空仪 (radiosonde) 出现, 这个问题才得以解决。

从 20 世纪 20 年代开始, 法国、美国、德国和苏联的气象学家开始提出无线电探空仪的设计和使用方法。关于无线电探空仪的起源有一定争论, 有种说法是 1927 年, 法国的 Pierre Idrac 和 Robert Bureau 成功地从平流层自由飞行的气球上获得过无线电信号; 但更为可信的是苏联的 Pavel Molchanov 于 1928 年设计了第一个实用化的无线电探空仪。Bureau 于 1929 年 1 月 7 日成功地测试了他的无线电探空仪, 并命名为 Radiosonde。1930 年 1 月 30 日 13:44 (莫斯科时间), Molchanov 成功释放了世界上第一台业务使用的无线电探空仪。该探空仪悬挂在一个橡胶氢气球下, 在飞行过程中自动测量温度、气压, 并通过加密编码把测量数据直接传送至地面基站, 进而转发至列宁格勒气象局和莫斯科天气预报中心, 完成了世界上第一次基于无线电探空仪的高空探测业务。德国的 Duckert 于 1930 年 5 月 15 日, 芬兰的 Vilho Vaisala 于 1931 年 12 月 31 日, 分别释放了他们的第一台无线电探空仪。加拿大、美国和英国则更晚得到它们的无线电探空仪, 高空探测进入了一个无线电遥测的时代。

世界各国使用的无线电探空仪设计和使用方法并不一致。20 世纪 80 年代以前, 无线电探空仪有 3 种代表: ① Molchanov 探空仪, 它设计简单, 体积小, 性能稳定, 早期采用 HF 载波, 后期采用 UHF 载波传输数据, 测量数据通过 Morse 电码发送至地面, 使用非常方便, 是那个时代无线电探空仪的经典代表; ② 英国的 UK 无线电探空仪, 数据传输采用 HF 载

波,每种传感器信号通过可变电感连接至一个独立的音频振荡电路,传感器信号变化被转化为可变音频信号,调制到 HF 载波上发送至地面;③ Vilho Vaisala 的无线电探空仪,每种传感器信号通过机械开连接至一个可变电容,进而连接至一个比较电路,调制 UHF 载频送往地面接收装置。

探空仪的无线电信号到达地面接收站后,被接收装置解调或解码,提取气象要素信息,然后被绘制为各种变化曲线或图表,其典型特征信息被提取,然后编码为 TEMM 代码(一种 5 字码国际编码),通过国际通信网络发布,全球共享观测成果。这些工作早期均由人工完成,因此,一个业务熟练、技术精湛的观测员是整个高空探测业务系统的一部分,在气球爬升过程中,只有在几分钟内完成数据处理工作,才能保证观测数据的实时性,在计算机出现之前,这是非常困难的。

1978 年,英国气象部门引入了世界上第一个计算机控制的无线电探空系统,它由一个全新设计的探空仪 Mk3 和一个基于 the Ferranti Argos 700 E 小型计算机的地面站组成,探空仪上升时,测量信号发送至地面解码与过去并无不同,但是解码后的数据图表绘制、特征信息提取、数据编报发布均由计算机自动完成,极大提高了探测数据的实时性,预示着高空探测系统计算机时代的来临。

Vaisala 公司设计于 1980~1987 年的探空仪 RS80 是一个探空仪发展的标志性产品(图 1-3)。它在设计上采用了晶体管、集成电路和印刷电路,温度传感器采用热敏电阻,湿度传感器采用自主设计的固态湿敏电容,隔热材料采用聚苯乙烯塑料,并对组件进行了大规模集成。这些改进使得 RS80 体积小、重量轻,而且性能稳定,它逐渐取代了世界上大多数探空仪。

20 世纪 90 年代至今是无线电探空仪大发展的时代,SMT(表面贴片)和 ASIC(专用集成电路)技术的应用使得探空仪电路稳定性提高、功耗极大下降;在传感器方面,引入可加热湿度传感器,低辐射影响、快速响应的细线热敏电容温度传感器,更灵敏的硅压传感器;在计算方面,由于高速计算机、大容量存储器的引入,可以采用更为复杂的算法改进数据的时空分辨率,提高测量精度。现在,最为先进的无线电探空仪是 Vaisala RS93 GPS radiosonde,它采用差分 GPS 相位技术测风,可以提供 6m 高度分辨率的高空气象要素测量。

20 世纪 90 年代后的另一个进步是全自动探空系统的出现。图 1-4 是 Vaisala 的自动探空系统,它能够自动完成气球充气、释放、跟踪、数据处理、计算和探空数据分发等整个探空业务流程,不需要人为干预,是未来探空系统发展的样板。

3. 高空风的探测

高空风的探测技术要难于其他气象要素的探测,它需要对气球进行空间定位。早期的人工操控气球探测高空大气时,飞行员需要释放一种小气球来判断高空风向,以规划飞行路



图 1-3 无线电探空仪

线。1809年, Thomas Foster 做出了利用高空气球测风的第一次尝试。真正利用仪器配合高空气球测风的是 Schreiber, 1873年, 他用两个间距 5km 的光学经纬仪跟踪高空气球, 利用三角几何原理测算气球的移动, 并在他 1886 年出版的专著中公布了测量结果。20 世纪初期兴起的无线电定向促进了无线电测风技术的发展, 促成了无线电经纬仪的出现, 利用无线电经纬仪对探空气球进行定位测风在美国广泛使用。

20 世纪 60 年代开始, 通过在探空仪上添加雷达反射器或应答器, 将雷达引入探空气球的跟踪, 推动了测风技术的发展。基于探空雷达跟踪的测风技术在 20 世纪 70~90 年代广泛使用, 成为高空探测业务的主体, 直至今日仍在使用。探空雷达采用机械扫描天线对探空仪进行跟踪, 在气球释放阶段, 跟踪非常困难, 因为这个阶段气球受地球表面紊乱气流的影响, 运动轨迹复杂, 升空速度较快, 电扫天线可以解决这个问题, 但基于电扫天线式相控阵雷达到今天也不可能大规模使用。因此, 人们开始关注更为有效的测风技术——导航测风(图 1-5)。

导航测风始于 20 世纪 70 年代无线电导航系统的发展, 美国与欧洲均有人提出基于导航系统信号的风测量方法。早期的尝试是在大西洋热带试验(global atlantic tropical experiment, GATE) 项目中, 利用遍布全球的导航站的 OMEGA VLF 发射信号进行风的测量。这种技术后来扩展到 LORAN 和 SIGMA 导航系统, 成为欧洲高空风探测的主流业务。在探空时, 探空仪检测不同导航信号之间的相位差, 并发送至地面站, 地面站利用连续信号相位差的变化跟踪气球, 完成风的探测。进入 21 世纪, 随着 GPS、GLONASS、北斗卫星导航系统的发展, 基于导航技术的无线电探空仪发展得更加成熟, 典型代表是 Vaisala RS93。

导航测风技术与气球雷达跟踪测风技术相比, 具有无可比拟的优势。它的使用使高空风探测摆脱了昂贵的雷达系统及探空仪上的雷达目标系统, 既降低了测量成本, 也减小了探空仪质量, 使探空仪更易小型化。另外, 基于卫星导航的探空仪系统对风的测量更为精准, 时空分辨率更高。

1.2.2 中国高空探测的发展历史

中国的高空探测业务在中华人民共和国成立初期几乎是空白的。1952 年仅有 5 个探空站和 40 个小球测风站, 但此后开始较快发展, 到 1957 年, 气象、民航和海军部门共建有 73

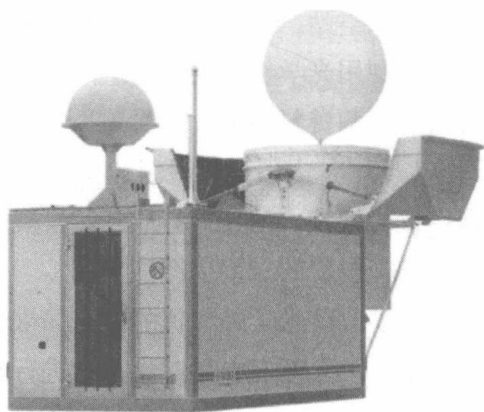


图 1-4 自动探空系统

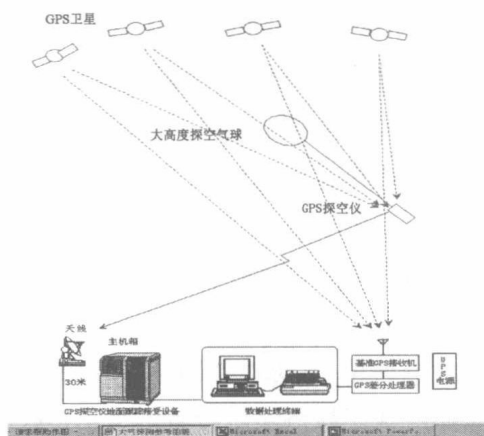


图 1-5 基于卫星导航的探空仪

个标准探空站。这些探空站均利用从苏联和芬兰进口的探空仪开展高空探测业务,风的测量主要利用光学经纬仪进行空间定位,此种方法极易受能见度的影响,在天气状况不好时常造成观测资料的缺失。

1955年,中国自行研制的049型探空仪投入业务使用,改变了中国高空探测业务对进口探空仪的依赖。随着探空业务的发展,57型、58型、59型探空仪相继问世,促进了1963年国产业务探空仪的定型生产。

为了改善光学经纬仪的测风局限性,中国从1959年开始了二次测风雷达的研制工作,早期推出了几部901型二次雷达进行业务探测试验。1965年,国产二次测风雷达701雷达正式定型生产。701二次雷达采用400MHz频率电磁波对59型探空仪上的应答器进行跟踪,完成探空仪定位和高空风的测量,59型探空仪利用24MHz频率将探测数据传送至地面站,由业务观测人员完成手工数据处理。到20世纪80年代末,全国共建有118个探空站,均采用59-701高空业务探测系统,这种系统一直使用到90年代,直至被新一代电子探空仪和L波段二次测风雷达所取代。

以59型探空仪为代表的机械式探空仪存在传感器响应速度慢、探测精度低等缺陷,另外人工数据处理方式不仅时效性差,也加大了观测人员的工作负担。从20世纪70年代末开始,随着电子技术和计算机技术的发展,国内开始电子探空仪的研制,并与701雷达配合使用,微型计算机也开始用于探测数据的自动化处理,提高了高空探测的数据质量和时效性,为新一代高空业务探测系统的发展奠定了技术基础。

1996年开始,由中国气象局组织相关生产厂家,开始发展L波段二次测风雷达-电子探空仪业务系统,经过几年的研究和比对试验,南京大桥机器厂生产的L波段雷达和上海长望气象科技有限公司研制的L波段数字式探空仪达到了业务要求。2001年10月,命名为GFE(L)1型二次测风雷达-GTS1型数字式电子探空仪系统的新一代高空气象探测系统正式设计定型。2002年1月1日,我国第一部L波段高空气象探测系统在北京观象台正式投入业务使用,标志着我国高空气象探测新的业务体制的建立。到2010年,全国共120个探空站完成了探测系统设备的更新换代。新的探空系统,数据采集频率从测风1次/min,探空6~10次/min,提高到测风、探空都可达到1次/s,实现了对高空气象要素的精细结构探测,减小了测风和探空数据的误差,实现了探测、数据处理和传输的自动化。

1.2.3 高空大气探测的现状

基于气球载体的常规高空大气探测业务采用的是一种遥测技术,温度、湿度、气压、风等气象要素的测量传感器与被测试环境大气直接接触,在快速传感器响应速度的支持下,可以较为精确地测定温度、湿度和气压等要素,其测试数据真实可靠,为天气预报业务提供了重要的数据基础。由于业务成本的原因,不可能在全球密集布网探空站,因此,基础探空的数据密度是有限的,必须通过其他探测方式来改善这种局限性。

遥感探测技术已经被广泛应用到高空气象要素的探测上,它利用遥感技术较高的时间和空间分辨率,有效地扩展了观测数据的时间分布和空间分布,是基础探空业务的有效补