


Daqi  
Tancexue

# 大气探测学

◎ 孙学金 王晓蕾 李浩 张伟星 严卫 编

 气象出版社  
China Meteorological Press

Daqi

TRAINING

# 大气探测学


11111 11111 11111 11111 11111



中国气象出版社

# 大气探测学

孙学金 王晓蕾 李浩 编著  
张伟星 严卫

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

本书详细讲述了大气探测的基本理论、技术和方法,包括云、能见度、天气现象、气温、湿度、气压、风、降水、积雪、日照、辐射、大气电场的地基观测方法,气温、湿度、气压、风的无线电探空技术,以及闪电定位、天气雷达、风廓线仪、激光气象雷达、声雷达、GNSS等主动遥感设备的测量原理和可见光、红外、微波被动遥感的理论基础,介绍了各类仪器设备的组成结构,对测量误差及其来源进行了探讨。本书既包括经典的大气探测方法和技术,也包括了较新的大气探测研究成果。

本书可作为大气科学及相关学科大气探测学课程的教科书,也可供从事水文、环境、地理等方面的专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气探测学/孙学金等编著. —北京:气象出版社,2009.8

ISBN 978-7-5029-4800-9

I. 大… II. 孙… III. 大气探测 IV. P41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 143447 号

Daqi Tancexue

## 大气探测学

孙学金等 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

策划编辑:李太宇

责任编辑:林雨晨

封面设计:博雅思企划

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:532 千字

版 次:2009 年 8 月第 1 版

印 数:1~3000 册

邮 政 编 码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 刷:北京昌平环球印刷厂

印 张:28.75 插 页:1

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

# 前 言

大气探测学是大气科学的重要分支,是研究获取大气物理和化学性质的原理、技术和方法的一门学科。它是一门涉及大气物理学、气象学、传感器技术、遥感技术、电子技术、无线通信技术和空间技术等多个学科和专业的交叉综合学科。随着数学物理理论和现代科学技术的发展以及大气科学自身发展的需要,大气探测学也在不断地发展中。

该课程是大气科学专业本科生必修的一门专业基础课,多年来一直是我院的主干课程。本书是在我院原有讲义的基础上,参考国内外有关大气探测专著和文献编写而成的。书中在传统大气探测课程讲授内容基础上,增加了云量、能见度、天气现象、降水量的自动测量以及闪电定位、风廓线仪、激光气象雷达和 GNSS 大气遥感等内容,统一了高空风的计算方法,对新的测量仪器以及遥感方法进行了较全面的介绍,分析了各种测量方法和仪器的误差来源。

本书第 1—4 章、第 12 章由孙学金编写、第 5—9 章由王晓蕾编写、第 10 和 11 章由李浩编写、第 13 和 14 章由张伟星编写、第 15 和 16 章由严卫编写,最后由孙学金统稿,王林斌、赵世军等参与了部分文字整理工作,余鹏参与了插图绘制工作,胡明宝提供了部分典型雷达回波图。本书编写得到了解放军理工大学气象学院、探测与信息工程系各级领导和机关的支持,以及林国安和探测工程教研室同事的不少有益建议,我们在此一并表示感谢。

在本书编写过程中,曾参考了国内外出版的教材、专著、规范、指南和厂家的设备手册以及最新的文献资料,书后列出了这些著作,在此向上述作者们表示衷心的感谢。

由于大气探测学内容广泛,且处于不断发展变化中,特别是现代大气遥感内容非常丰富,因此在教材内容组织中存在着一定的困难,疏漏在所难免,请读者给予批评指正。

编者

2009 年 4 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 大气探测与大气探测学 .....	(1)
1.2 大气探测发展简史和趋势 .....	(6)
1.3 大气探测资料的“三性”要求.....	(11)
1.4 本书的安排和教学要求.....	(13)
习题 .....	(14)
<b>第 2 章 云的观测</b> .....	(15)
2.1 云的分类和特征.....	(16)
2.2 云的形成与外形特征.....	(20)
2.3 云状的观测.....	(24)
2.4 云量的观测.....	(30)
2.5 云底高的观测.....	(36)
习题 .....	(43)
<b>第 3 章 能见度的观测</b> .....	(44)
3.1 能见度及其影响因子.....	(44)
3.2 柯什密得定律.....	(47)
3.3 气象能见度的目测.....	(50)
3.4 能见度的仪器测量.....	(56)
附录 几个与能见度观测有关的光物理量 .....	(73)
习题 .....	(73)
<b>第 4 章 天气现象的观测</b> .....	(75)
4.1 天气现象的分类和特征.....	(75)
4.2 天气现象的自动识别.....	(83)
4.3 现在天气的确定.....	(89)
附录 A WMO4677电码表(适用于人工气象台站报告现在天气) .....	(89)
附录 B WMO4680电码表(适用自动气象站报告现在天气).....	(92)
习题 .....	(94)

---

<b>第 5 章 温度的测量</b> .....	(96)
5.1 温标及测温要求 .....	(96)
5.2 测温仪器 .....	(98)
5.3 热滞效应 .....	(114)
5.4 温度测量与防辐射方法 .....	(120)
习题 .....	(125)
<b>第 6 章 空气湿度的测量</b> .....	(126)
6.1 湿度参量及测湿方法 .....	(126)
6.2 热力学测湿法 .....	(130)
6.3 吸湿测湿法 .....	(138)
6.4 凝结测湿法 .....	(146)
习题 .....	(151)
<b>第 7 章 气压的测量</b> .....	(152)
7.1 力平衡式测压 .....	(152)
7.2 谐振式测压 .....	(159)
7.3 其他测压方法 .....	(163)
7.4 海平面气压与场面气压 .....	(168)
习题 .....	(170)
<b>第 8 章 地面风的测量</b> .....	(172)
8.1 风的表示法及其测量方法 .....	(172)
8.2 风向的测量 .....	(179)
8.3 风速的测量 .....	(186)
习题 .....	(195)
<b>第 9 章 降水量、积雪深度和蒸发量的测量</b> .....	(196)
9.1 降水量的测量 .....	(196)
9.2 积雪深度的测量 .....	(209)
9.3 蒸发量的测量 .....	(212)
习题 .....	(215)
<b>第 10 章 辐射能和日照时数的测量</b> .....	(217)
10.1 辐射能的测量 .....	(217)
10.2 日照时数的观测 .....	(229)
习题 .....	(233)

---

<b>第 11 章 大气电的测量</b> .....	(234)
11.1 闪电物理 .....	(234)
11.2 闪电定位 .....	(239)
11.3 大气电场的测量 .....	(243)
习题 .....	(245)
<b>第 12 章 自动气象站</b> .....	(246)
12.1 自动气象站的分类 .....	(246)
12.2 自动气象站硬件结构与设计 .....	(247)
12.3 自动气象站软件与数据处理 .....	(256)
12.4 自动气象站的应用与维护 .....	(261)
习题 .....	(264)
<b>第 13 章 高空风的探测</b> .....	(265)
13.1 气象气球 .....	(265)
13.2 气球位置的确定 .....	(270)
13.3 高空风的计算 .....	(282)
13.4 高空风探测的误差 .....	(296)
习题 .....	(299)
<b>第 14 章 高空温压湿的探测</b> .....	(301)
14.1 无线电探空仪 .....	(302)
14.2 高空温压湿的测量 .....	(311)
14.3 探空仪测量的误差 .....	(316)
习题 .....	(322)
<b>第 15 章 主动式大气遥感</b> .....	(323)
15.1 电磁波在大气中的传播 .....	(323)
15.2 天气雷达遥感 .....	(333)
15.3 风廓线仪遥感 .....	(358)
15.4 激光雷达大气遥感 .....	(362)
15.5 声雷达大气遥感 .....	(367)
15.6 GNSS 大气遥感 .....	(376)
习题 .....	(386)
<b>第 16 章 被动式大气遥感</b> .....	(387)
16.1 辐射量与辐射定律 .....	(387)
16.2 气象卫星及遥感仪器 .....	(394)



---

16.3	可见光遥感·····	(406)
16.4	红外遥感·····	(410)
16.5	微波遥感·····	(425)
16.6	气象卫星资料的接收与处理·····	(437)
	习题·····	(449)
	<b>参考文献</b> ·····	(450)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 大气探测与大气探测学

大气探测又称之为气象观测,是指对表征大气状况的气象要素、天气现象及其变化过程进行个别或系统的、连续的观察和测定,并对获得的记录进行整理的过程和方法。大气探测不仅为天气预报、气候分析、科学研究以及国民经济和国防安全直接提供准确、完整的气象资料,而且大气科学本身的发展和国民经济、国防安全的建设反过来也对大气探测提出了更高的要求,从而促进了大气探测的发展。

大气探测学是大气科学的重要分支,是研究获取大气物理和化学性质的原理、技术和方法的一门学科。它是一门涉及大气物理学、气象学、传感器技术、遥感技术、电子技术、无线通信技术和空间技术等多个学科和专业的交叉综合学科。随着数学物理理论和现代科学技术的发展,大气探测学也在不断发展中。现代科学技术的每一次进步均促进了“大气探测学”这门学科的发展,也给大气科学提供了发展动力。今天对气团、锋面、大尺度波动、高空急流、台风结构等天气系统和大气现象的认识,均是依赖于每一次探测技术的进步,而目前对中小尺度天气的监测和预报则更是依赖于现代大气探测手段,例如多普勒天气雷达、风廓线仪等。可以说,没有大气探测技术的发展,就没有今天的大气科学,大气探测是大气科学发展的基础,大气探测的发展程度是大气科学发展水平的一个重要标尺。

### 1.1.1 大气探测分类

大气探测技术和方法多种多样,按照不同的探测方法、探测范围、探测平台和探测时间,可以将其划分为不同的种类。

按照探测方法分,大气探测分为目测、直接探测和遥感三种。所谓目测,就是凭借目力或借助辅助仪器进行的观测,主要由观测员用肉眼观测。目前在气象台站,云、天气现象和能见度还主要采用目测的方法进行。所谓直接探测,就是探测仪器与被测大气直接接触进行的探测,例如用玻璃液体温度表测量气温的方法,就是直接探测。目前直接探测正在向遥测方向发展,虽然测量仪器与被测大气接触,但与用户终端之间具有一定的距离,探测结果通过有线或无线通信的方式传递给用户。通常把这种直接探测,称为遥测。所谓遥感,又称为间接探测,就是指探测

仪器与被测大气不直接接触进行的探测。遥感又分为主动遥感和被动遥感。主动式大气遥感是指遥感器向大气发射信号,并通过接收被大气散射、吸收或折射后的信号,从中反演气象要素的方法和技术。被动式大气遥感是指遥感器接收大气自身发射或散射的自然源信号,从中反演气象要素的方法和技术。

按照探测的范围分,大气探测分为地面气象观测和高空气象探测两种。

地面气象观测,是指在地面上以目力或仪器对近地面层的大气状况和天气现象进行的观测。通常观测的项目有云、能见度、天气现象、温度、湿度、气压、风、降水、积雪、蒸发、辐射能、日照时数、电线积冰等。虽然云是发生在空中的大气现象,由于历史的原因,通常把它也归入到地面气象观测的项目中。

高空气象探测,是指对自由大气各气象要素的直接或间接探测。高空气象探测,通常利用气球、无线电探空仪、气象飞机、气象火箭、气象卫星、气象雷达等探测平台和仪器设备进行。探测的项目主要包括各高度上的气温、湿度、气压和风。常规的高空气象探测,是指利用气球携带无线电探空仪对空中气温、湿度、气压和风进行的探测,其最大探测高度一般为 35 km,又称为无线电高空气象探测。一般又把 35 km 以上的高空气象探测,称为中高层大气探测。

按照探测平台分,大气探测分为地基探测、空基探测和天基探测。在地表面(包括陆地和海表面)建立的探测平台上进行的探测,称为地基探测。地基探测既可进行近地面气象要素的探测,也可对高空气象要素进行探测。地面观测场、气象塔、海上浮标等均是地基探测平台。利用漂浮于大气层内的气球、系留气球、定高气球、飞机等探测平台对大气进行的探测,称为空基探测。利用气象卫星等从大气层外对地球大气进行的探测,称为天基探测。

按照探测时间分,大气探测分为定时观测和不定时的观测。定时观测是指每日在固定的时次进行的观测。世界气象组织又把定时观测,分为基本天气观测和辅助天气观测。由指定测站所组成的观测网在世界时 00、06、12、18 时所进行的天气观测,为基本天气观测。由指定测站所组成的观测网在世界时 03、09、15、21 时所进行的天气观测,称为辅助天气观测。基本天气观测和辅助天气观测均参与全球气象资料的交换。为了特殊的目的,定时观测的时次还可以进一步加密,例如,可缩短为每小时观测一次。不定时的观测,又叫补充观测,是指在规定的时刻以外,为满足某种专门需要而增加的气象观测。例如,为监测强降水而增加的降水观测,为保障飞机起飞和降落,在机场对云、能见度等进行的补充观测。

上述这些分类的方法,侧重点各有不同,有时也会将两种探测种类组合起来进行称谓,如空基遥感等。

### 1.1.2 大气探测学研究内容

大气探测学主要研究内容包括:研究大气探测系统的建立原则和方法,以便获得有代表性的全球三维空间分布的气象资料;制订大气探测技术规范来统一各种观测技术和方法,使其标准化,确保气象资料具有可比较性;研制探测仪器标准计量设备,制订计量校准方法,确保测量结果的准确性。

#### (1) 大气探测系统

一个比较完整的现代化大气探测系统,包括探测平台、探测仪器、通信系统和资料处理系统四部分。

探测平台是探测系统的基础。探测平台的建立与观测网的建立有关,不同的观测网需要有不同的探测平台。组建地面气象观测网时,作为地基探测平台的地面观测场位置的选择很重要,应选择在对观测地点周围具有代表性的位置;组建卫星监测网时,为了保证获得全球分布的具有一定时间分辨率的卫星资料,应在全球布设分布合理、性质不同的卫星天基平台;组建天气雷达探测网时,则要考虑天气雷达的有效探测距离,确保网内所有地区能被雷达探测范围所覆盖。选择好适当的探测平台后,探测仪器的安装也是探测平台必须考虑的问题,应确保探测仪器能取得具有代表性的资料。

探测仪器是探测系统的核心。现代化的大气探测系统应采用先进的探测仪器,既具有很高的灵敏度、准确度和很大的动态范围,又具有长期稳定可靠的探测性能,适应各种复杂和恶劣的天气条件。目前在地面气象观测中已普遍采用不同功能的自动气象站。探测仪器的设计还要考虑到适应不同探测平台的需要,在移动平台上的探测仪器,则要比固定平台上的探测仪器更要考虑到适应不同运输条件的性能。

通信系统是现代化大气探测系统的纽带。为了保证分布于全球各地的气象观测资料能实时地汇聚起来,需要高速有效的通信系统的支撑。

资料处理系统是现代化大气探测系统不可缺少的部分。现代化的大气探测系统所获取的信息量很大,为了能有效地利用各类气象资料,供天气预报和各种服务使用,必须建立高速的计算机处理系统,对各类资料进行分类处理。

#### (2) 大气探测技术规范

为了促进气象观测的标准化和确保始终如一地公布观测资料和统计结果,世界气象组织一直重视大气探测技术的规范工作,经常地召开世界气象大会,通过一些技术规则,制订各成员国必须遵循的各种气象实践和程序。这些规则均被写进世界气象组织的出版物《气象仪器与观测方法指南》中。该指南自 1954 年出版第一版以来,随着探测项目的不断增加和探测技术的改进,到 1996 年已修订出版了

第六版,内容从第一版的12章增加到第六版的32章。内容包括地面、高空、高层、航空、海洋、火箭、卫星、雷达等气象观测以及取样、校准比对、修正、管理和仪器人员培训等方面,主要对仪器和观测方法作了较详细阐述,制订了当前国际气象业务技术需要的观测项目、仪器和观测方法的基本标准,规定了气象计量单位,给出了一些基本参数,并对各种误差概念、观测资料的准确度作了明确的论述。

我国气象业务管理部门1955年出版了第一版《地面气象观测规范》以规范地面气象观测工作,1979年进行了修订。为了适应自动气象站技术的发展,1999年开始制订了适应自动气象站设备的观测规范,并于2003年对自动观测方式和人工观测方式进行了统一,制订了新的《地面气象观测规范》。先后还制订了高空气象探测规范、天气雷达探测规范等一系列法规性文件,以便对气象观测工作进行统一要求,取得具有比较性的观测资料。军队和民航气象部门结合行业特点也制订了相应的气象观测规范。

### (3)气象仪器的测试、校准和相互比对

气象仪器测量结果的准确与否与仪器本身的性能有很大的关系,要确保仪器的性能符合规定的要求,获得有效的观测数据,应对仪器进行有关测试、校准和相互比对。通过测试、校准和相互比对,可以了解传感器准确度或系统的准确度;当站网中布设这样的测量系统或传感器时,对测量结果产生的影响;当传感器或测量系统的布设位置发生变化时,测量数据会有何种变化或偏移;当对相同的气象要素进行测量时,更换传感器或测量系统会对数据产生何种变化或偏移。

对传感器和测量系统进行测试是为了获得它们在规定条件下使用时的性能资料。测试包括环境测试、电或电磁干扰测试以及功能测试等。

传感器或测量系统的校准是确定测量数据有效性的第一步。校准的目的是将仪器与已知的标准器进行比对,以确定仪器在预期运行范围内的输出与标准器的吻合程度。实验室校准结果的性能隐含着仪器在野外使用时的性能与校准结果均能保持不变的假定。连续几次校准的情况可以提供对仪器性能稳定性的参考。

校准是一组操作,是指在特定条件下,建立测量仪器或测量系统的指示值与相应的被测量(即需要测量的量)的已知值之间的关系。主要是确定传感器或测量系统的偏差或平均偏差、随机误差、是否存在任何阈值或非线性响应区域、分辨率和滞差等。滞差是通过校准时使传感器在其使用范围内进行循环测试后确定的。校准结果有时可以用一个校准系数或一系列校准系数表示,也可以采用校准表或校准曲线的形式表示。校准结果通常记录在校准证书上或校准报告中。

校准证书或校准报告可以确定偏差值,这种偏差可以通过机械的、电学的或软件的调试方式来消除。随机误差是不可重复的,也是不能消除的,但是它能够通过在校准时采用足够次数的重复测量和统计方法加以确定。

仪器或测量系统的校准通常都是与一个或多个标准器进行比对完成的。气象仪器的校准通常是在拥有合适的测量标准器和校准装置的实验室进行。根据国际标准化组织(ISO)的定义,标准器可分基准、二级标准、国际标准、国家标准、工作标准、传递标准、移运式标准等。基准设置在重要的国际机构或国家机构中。二级标准通常设置在主要的校准实验室中,不宜在野外场地使用。工作标准通常是经过用二级标准校准的实验室仪器。工作标准可以在野外场地作为传递标准使用。传递标准既可用于实验室也可在野外场地使用。校准装置是产生校准用环境的装置。

基准(或一级标准)(Primary Standard):具有最高的计量学性质的标准器,其量值可以被接受而无需参照其他标准器。

二级标准(Secondary Standard):其值是通过与基准进行比对而认定的标准器。

国际标准(International Standard):经国际协议承认的标准器,在国际上作为对有关量的其他标准器定值的依据。

国家标准(National Standard):经国家承认的标准器,在一个国家内作为对有关量的其他标准器定值的依据。

参考标准(Reference Standard):适用在给定地点或在给定机构内,通常具有最高的计量学性质的标准器,在该处所作的测量均由此标准器导出。

工作标准(Working Standard):日常用于校准或核查测量仪器的标准器。

传递标准(Transfer Standard):标准器进行比较时用作媒介的标准器。

移运式标准(Travelling Standard):可运输到不同地点使用的标准器,有时具有特殊结构。

为了保证溯源性,校准实验室由有关的国家机构予以授权和认可。校准实验室要保持测量标准器所必需的品质和保持这些标准器的溯源性的记录。经过授权和认可的实验室才可以颁发内容含有对校准准确性评估的校准证书。

仪器与观测系统的相互比对,对于建立兼容性资料集是很重要的。所有的相互比对均应周密计划和认真实施,以保证每种气象变量的测量均能具有适当一致的质量水平。有许多种气象量不能直接用计量标准器进行比较,也不能用绝对参考量进行比较,例如,能见度,云底高度和降水。对于这几种气象量而言,相互比对则显得非常重要。

仪器或观测系统的比对与评价可以按照不同级别进行组织与实施,如国际比对、区域比对、多边的和双边的比对以及国家级的比对。由于气象测量进行国际比对的重要性,世界气象组织经常组织各种仪器的国际比对和区域比对,并且制订了相应的规则以使协调有效而且有保证。

## 1.2 大气探测发展简史和趋势

### 1.2.1 发展简史

由于劳动和生活的需要,人们很早以前就非常注意观察发生在大气中的种种现象和过程,并根据某些征兆作出对天气的经验性预测。随着生产技术的发展,这种定性的目力观测逐渐发展到借助仪器来进行定量的测定。在其发展过程中,大气探测大致经历了四个主要阶段:

#### (1) 目测、定性阶段(始创时期)

在16世纪以前,人们对于大气的认识主要停留在目力和定性的观察上,通过不断对经验的总结产生了各种谚语,用于对天气的预测。这个时期也发明了一些仪器,如我国古代劳动人民发明的相风鸟、雨量器、风压板等,但主要还是以目力和定性观察为主。这是第一个阶段,又称为始创时期。

#### (2) 地面气象观测发展阶段

大气探测发展的第二个阶段是从16世纪末伽利略发明气体温度表开始的。在这个阶段,发明了一系列的地面气象观测仪器,如1643年,托里拆利发明了水银气压表;1783年,德索修尔发明了毛发湿度表。从此以后,一些主要的气象要素才开始有了连续的仪器观测记录。在这个阶段,地面气象观测的项目逐渐增多,观测站也逐渐增加,把各地的气象资料集中到一起进行分析,形成了有组织的地面气象观测网。

#### (3) 高空气象探测发展阶段

从18世纪末开始,人们利用风筝、气球等对高空大气进行探测,但直到20世纪初,随着无线电技术的发展,一些先进国家,如法国、德国、芬兰、苏联等,先后开始研制无线电探空仪,才发展了现代的高空气象探测技术。1919年法国人巴洛第一次作无线电探空仪施放,这标志着大气探测技术进入了第三个发展阶段——高空气象探测发展阶段,从而使得人们对大气的认识从平面二维发展到空间三维。大气中的锋面、波动等天气系统也逐渐被揭示出来。1940年代中期,气象火箭探测技术又进一步把探测高度从二三十千米提高到100 km左右。

#### (4) 大气遥感发展阶段

1940年代初,在应用军事雷达进行探测时,发现了云雨等气象目标产生的回波,从而把雷达探测技术应用到气象目标探测中来,并专门研制了气象探测雷达——天气雷达。1960年4月美国成功发射第一颗气象卫星泰罗斯-1号,开始了人类利用卫星遥感大气特性的新方法。这标志着大气探测发展到了第四个阶段,

即大气遥感发展阶段。在这个阶段,除了天气雷达和气象卫星外,声雷达、风廓线仪、激光雷达、红外辐射仪、微波辐射仪等遥感设备均被应用到大气探测中,人们对于大气的认识产生了新的飞跃,大气科学也进入了一个新的发展阶段。

一部天气雷达可以对数百千米范围内的雷暴中降水分布及其结构进行连续性探测,人们可以利用它进行龙卷的预报;利用静止气象卫星就很容易地监测到台风的结构和变化、移动情况,对台风做出预报。这些均是在天气雷达、气象卫星发明之前很难做到的事情。

### 1.2.2 现状

随着科学与技术的发展,大气探测取得了显著的发展,主要表现在探测能力显著增强,自动化水平迅速提高,观测方法、观测网的设计和观测工具的配合得到重视,直接探测和遥感技术并存,各取所长,综合利用。

#### (1) 传感器与测量仪器

目前各种气象要素测量传感器和仪器的性能均得到长足的发展。在气象测量中,铂电阻温度传感器已基本取代应用了 400 多年的玻璃液体温度表,其测量误差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。铂电阻通风干湿表、湿敏电容传感器、露点式氯化锂传感器也已成为湿度测量的主要仪器。但是由于湿度测量的复杂性,目前湿敏电容传感器的测量准确度在 $0^{\circ}\text{C}$ 以上只能达到 $3\% \sim 5\% \text{RH}$ ,在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下为 $5\% \sim 8\% \text{RH}$ ,在低温条件下其测量准确度虽然高于铂电阻通风干湿表,但在 $5^{\circ}\text{C}$ 以上时要比铂电阻通风干湿表低。目前减小测温误差的主要问题已不在温度测量传感器和仪器本身,而是在于对温度敏感元件的通风和防辐射上;而对于湿度传感器来说,还是集中在提高低温低湿下的测量性能。

利用振筒传感器制成的振筒气压仪已替代水银气压表被用于气压日常业务测量,从而解决了长期的汞污染问题。体积更小、耗电更低的硅压阻传感器也已被用于高空气象探测中,采用自动温度补偿的硅压阻传感器正在研制中。

由碳纤维制成的高强度风杯、风向标以及采用计数和编码方式的风速、风向转换器已开始替换滞后和阻尼特性不能满足世界气象组织要求的电接风向风速计和电传风向风速仪。固态测风传感器已研制成功,由于没有转动部件,解决了结冰情况下的测风问题,也大大提高了抗风和冰雹等自然灾害的能力。

翻斗雨量计已普遍应用于降水量自动测量中,取代了降水量的人工观测。目前在进一步提高其测量性能的基础上,又研制出了新型的光电雨强计、感雨器和雨雪量计等。

测量总辐射、长波辐射、短波辐射的各种辐射表已广泛应用于辐射测量中,测量准确度得到了大大提高。短波辐射的测量准确度达到 $1\% \sim 2\%$ ,长波辐射的测



量准确度达到  $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。人们还研制成功了自动跟踪太阳的直接日射表和太阳光度计。

利用先进的电子技术和 GPS 技术研制的电子数字探空仪、GPS 探空仪已被用于高空气象探测业务中,替代了长期使用的机械式电码探空仪。与电子数字探空仪配套的 L 波段二次测风雷达、无线电经纬仪已成为主要的高空气象探测设备。

天气雷达已从模拟型发展成数字型,并从降水强度定性测量的模拟天气雷达发展到降水强度定量测量、降水区风场探测和降水粒子性质测量的数字化多普勒天气雷达、双偏振天气雷达等。

风廓线仪也已从研究设备发展成为业务使用设备。各种类型的边界层风廓线仪、对流层风廓线仪、平流层风廓线仪均已研制成功,并被应用到大气风廓线的连续监测中,为研究大气运动提供了实时连续的风场资料。

激光技术应用到大气监测中后,已成功地研制出米散射激光雷达、瑞利散射激光雷达、拉曼散射激光雷达、差分吸收激光雷达、共振荧光激光雷达,为气溶胶、大气成分和高层大气温度、密度的探测提供了新的探测手段。

气象卫星遥感仪器已从最初的成像辐射仪发展到谱分辨率达到  $1 \text{ cm}^{-1}$  的超光谱分辨率辐射计,形成了图谱合一的辐射遥感仪器,一些主动遥感设备,如降水雷达、合成孔径雷达等也已装载到卫星上,使得气象卫星的作用更加增强。

## (2) 监测网

从发明了第一支温度表以来,经过了 400 多年的发展,目前已在全球范围内建成了由多种手段组成的世界天气监测网(WWW),它由各种探测平台、探测仪器、资料处理方法和传送手段组成。

在这个网中,陆地上大约有 10000 个地面气象观测站,其中 4000 个为基本天气观测站,实时地向全球交换观测资料。另外,截止到 1997 年,在海上有大约 700 个浮标、6700 个船舶观测站提供海面温度、气压观测资料。目前地面气象观测站基本上覆盖了全球,陆地上比较密集,但在海洋上还比较稀疏。此外,在全球已组成了约 900 个无线电探空仪观测网,其中有  $2/3$  的台站一天两次对 30 km 以下的高空大气进行探测。

除了地面和高空观测站网外,目前还建成了全球卫星观测系统,主要由五颗极轨卫星和六颗静止卫星以及其他研究试验卫星组成。中国的风云 1 号和风云 2 号卫星也参与了全球卫星观测系统中。

美国在 1990 年代建成了由 168 部 WSR-88D 组成的下一代雷达(NEXRAD)全国监测网,WSR-88D 利用多普勒技术全面提升了天气雷达系统的性能,并具有对某些天气事件进行自动监测和识别的能力。1980 年代中期,美国在其中部地区建立了国家风廓线仪试验网(NPN),由 30 多部对流层风廓线仪组成,监测输送墨