

# 大气探测原理

赵柏林 张霭琛 主编



气象出版社

# 大气探测原理

王遵亲 主编



气象出版社

# 大气探测原理

赵柏林  
张霭琛 主编

气象出版社

## 内 容 简 介

本书系统地讲述了大气探测原理，介绍了温、压、湿、风、辐射能和大气质点的测量方法，以及无线电探空仪，气象雷达和遥感技术在大气探测中的应用，较全面地反映了当今国内外有关大气探测技术的新成就。

本书的特点是由浅入深，理论结合实际。可作为气象、大气物理和大气探测专业的教科书，亦可供从事水文、海洋、环境保护的科技人员及有关专业师生参考。

## 大气探测原理

赵柏林 张懿琛 主编

责任编辑 谷真真

\* \* \*  
气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

商务印书馆  
上海印刷厂

常熟分厂排版 广益印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

\* \* \*  
开本：850×1168 1/32 印张：18.3125 字数：470千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数：1—2000 定价：3.80元

ISBN 7-5029-0009-8/TN·0001

## 前 言

人们总结测量大气物理和化学性质以及观测大气现象与过程的原理和方法，形成了大气探测的学科。大气探测是大气科学的基础，许多大气科学的进展，发端于大气探测的结果。大气是地球上的三维空间的流体，千变万化，故而要经常地、连续地监测。这种监测常常要在广阔的地域、纵深的空间范围内进行。大气探测可分为如下几类：地面气象观测、高空气象观测、大气遥感、气象卫星探测及特殊观测（如中高层大气探测、环境监测、微气象观测等）。

在十五世纪以前，就有雨量测定的记载。在十七世纪发明了气压表，开创仪器观测大气的端倪。近三百年来，逐渐地丰富了地面气象观测系统，并形成网络。本世纪二十年代末，出现了无线电探空仪，进入了高空气象探测时代，从四十年代以来，逐渐组成高空气象探测站网，为天气预报服务。在第二次大战期间，雷达开始用于气象，现在也组成了雷达站网。六十年代以后，大气遥感的各种手段，陆续地付诸实用。同时，发展了气象卫星和气象火箭。上述这些观测构成多时刻的大气立体图象，供预告天气、评价环境等方面使用。

随着现代科学技术的发展，促使大气探测技术突飞猛进。如红外、微波、声波、自动化、计算机、卫星技术等广泛地被采用，大大地丰富了大气探测的内容，形成了一个以多学科为基础的独立科学，并以崭新的面貌出现在科学的前沿。

本书的宗旨是系统地讲述大气探测原理和近代的发展。在北京大学地球物理系大气物理专业教学基础上总结、补充成书。力求由浅入深，理论结合实际，尽可能反映国内外有关大气探测的

44993 / 15 11

1

成就。

本书共分十四章，第一章由赵柏林、张霭琛编写；第二章至第六章由张霭琛编写；第七章由张铮编写；第八章由王永生、张钧编写；第九章由王永生、杜金林编写；第十章至第十二章由陶善昌、刘宝章编写；第十三章由赵柏林编写；第十四章由赵柏林、胡成达编写。全书由赵柏林、张霭琛主编校订。

编者

1985年8月

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	1
§ 1.1 大气探测的发展概况	1
§ 1.2 探测原理	2
§ 1.3 探测仪器	3
§ 1.4 探测方法	4
第二章 温度的测量	7
§ 2.1 测温元件	8
§ 2.2 测温元件的热滞效应	30
§ 2.3 气温测量中的防辐射设备	34
第三章 湿度的测量	41
§ 3.1 湿度的定义和单位	41
§ 3.2 干湿球温度表	50
§ 3.3 露点测定方法	55
§ 3.4 毛发湿度表	59
§ 3.5 电学测湿元件	64
§ 3.6 湿度的控制和检定	70
第四章 气压的测量	76
§ 4.1 水银气压表	76
§ 4.2 水银气压表的读数订正	81
§ 4.3 气压表的安置和观测方法	85
§ 4.4 空盒气压表、气压计	87
§ 4.5 沸点气压表	91
§ 4.6 气压表的基准	93
第五章 气流的测量	96
§ 5.1 风向的测量	97

§ 5.2	旋转式风速表 .....	107
§ 5.3	散热式风速表 .....	113
§ 5.4	其它类型的风速表 .....	119
§ 5.5	风速检定设备 .....	124
第六章	辐射能的测量 .....	132
§ 6.1	测量内容 .....	132
§ 6.2	辐射测量基准 .....	134
§ 6.3	太阳直接辐射的测量 .....	136
§ 6.4	短波总辐射的测量 .....	143
§ 6.5	净辐射的测量 .....	151
§ 6.6	紫外辐射的测量 .....	153
§ 6.7	ACR 和 PACRAD 型绝对日射表 .....	155
第七章	大气中质点的测量 .....	161
§ 7.1	大气气溶胶的观测 .....	161
§ 7.2	云滴的观测 .....	177
§ 7.3	降水质点的观测 .....	182
第八章	高空风的观测 .....	187
§ 8.1	高空风的观测方法 .....	187
§ 8.2	气象气球 .....	190
§ 8.3	确定气球位置的仪器设备 .....	217
§ 8.4	高空风的测量 .....	230
第九章	空中温、压、湿的无线电探空仪探测法 .....	261
§ 9.1	概论 .....	261
§ 9.2	无线电探空仪探测法原理 .....	263
§ 9.3	五九型转筒式电码探空仪 .....	267
§ 9.4	变低频式探空仪 .....	284
§ 9.5	变高频式探空仪 .....	287
§ 9.6	探空仪的测量误差与探空仪的改进 .....	292
第十章	气象雷达探测原理 .....	302
§ 10.1	雷达工作原理 .....	302
§ 10.2	单个空气、云雾和降水质点对雷达波的作用 .....	312



§ 10.3	云和降水质点群对雷达波的作用 .....	325
§ 10.4	雷达气象方程 .....	334
<b>第十一章</b>	<b>雷达在大气探测中的应用 .....</b>	<b>339</b>
§ 11.1	雷达在定量测量降水中的应用 .....	339
§ 11.2	雷达观测云雾及天气系统 .....	349
§ 11.3	晴空回波 .....	359
§ 11.4	气象雷达的校准与参数的测量 .....	362
§ 11.5	雷达回波资料的收集和整理 .....	367
<b>第十二章</b>	<b>几种新型气象雷达 .....</b>	<b>371</b>
§ 12.1	多普勒雷达探测大气 .....	371
§ 12.2	激光气象雷达 .....	386
§ 12.3	声回波探测器(声雷达) .....	395
<b>第十三章</b>	<b>大气光学及无线电气象的测量 .....</b>	<b>406</b>
§ 13.1	能见度 .....	406
§ 13.2	能见度的测量 .....	412
§ 13.3	大气透明度的测量 .....	416
§ 13.4	天空背景亮度的测量 .....	417
§ 13.5	电波折射指数 .....	421
§ 13.6	大气折射率的测量 .....	424
§ 13.7	雷电探测 .....	428
<b>第十四章</b>	<b>大气遥感 .....</b>	<b>436</b>
§ 14.1	遥感 .....	436
§ 14.2	辐射定律 .....	437
§ 14.3	自然噪音 .....	441
§ 14.4	红外遥感 .....	448
§ 14.5	微波遥感 .....	487
§ 14.6	人造卫星的气象遥感 .....	543
§ 14.7	气象卫星云图的接收 .....	566

# 第一章 绪 论

## § 1.1 大气探测的发展概况

由于人类的生产和生活与自然界中的大气现象有密切的关系,人们很早就开始了对天气现象与物候的目测,归纳出了一些民间的大气和气候谚语。我国的廿四节气就是这种观测的成果之一。

近代仪器的出现和发展,使人们能够获得各种大气要素的定量探测结果。自从1643年托里拆利发明水银气压表以来,先后出现了温度表、毛发湿度表、风速计和观测太阳辐射的黑白球辐射表。1802年拉马契克进行了云状的分类。这些仪器和观测方法基本上满足了天气预报的需要。

随后人们又知道,各种天气现象在广大的区域内有一定的规律性的联系。当时航海事业的发展又迫切需要及时收集资料,作出天气预报。这就提出了建立气象台站网的要求。第一个台站网是由拉马契克在欧洲建立的(1902—1915年)。

从1643年到二十世纪初的二百多年里,是地面气象观测发展并趋于成熟的阶段。到二十世纪二十年代末,随着无线电技术的发展,法国、苏联、德国、芬兰等国都开始研制无线电探空仪,以及发展高空风探测技术,大气探测进入第二发展阶段。大气探测工作从近地面1—2m内的大气层扩展到了更广阔的三度空间。四十年代中期,气象火箭的探测进一步把探测高度从二、三十公里提高到100 km。

大气探测的第三阶段是大气遥感,这个阶段可以用1941—1942年气象雷达以及1960年4月美国发射第一颗气象卫星泰罗

斯-1 号的出现, 为主要标志。大气遥感不仅从根本上扩大了探测范围, 也提高了对大气过程探测的连续性。一颗极轨气象卫星昼夜不停地旋转, 每隔十二小时就给出一次全球气象观测资料。一台气象雷达可以对几百公里范围内的雷暴分布及其结构进行连续探测。

大气探测在大气科学的发展中占有相当重要的地位。大气现象和过程变化快, 而且是多要素的综合变化, 影响因素相互交错, 非常复杂, 整个地球的大气层好象是一个巨大的实验场, 组成从局地到全球的探测网, 准确、及时、完整地获取气象资料, 进行分析是大气科学发展的主要途径与方法。许多重大的理论突破都建立在大气探测提供的新资料的基础上。不断引进新的技术成果, 发展大气探测系统是发展大气科学的主要措施。

现代的气象观测网基本上分为两大类, 一类是进行日常观测工作, 主要为日常天气预报, 监视灾害性天气、积累气候资料服务。由世界各国的地面气象站, 海上漂浮站、船舶站、探空站和气象卫星组成世界天气监视网 (WWW)。此外还有国际臭氧监测网等。另一类是根据特定的科研课题, 只在一定时期内开展观测工作的专题性气象观测网。例如 1979 年第一次全球大气试验 (FGGE)。至于各种中、小型的专题观测工作更是数不胜数。

## § 1.2 探 测 原 理

大气探测主要有直接探测和遥感探测。直接探测是通过各种感应元件直接测量大气要素; 遥感探测是通过大气信号(声、光、电波等)传播的信息, 反演出大气要素的时空分布。根据元件的物理、化学性质受大气作用而产生反应的特性, 构成元件的直接探测原理。例如氯气锂湿敏电阻测湿的原理, 是氯化锂在大气中因吸湿作用而改变元件电阻率。遥感探测原理是根据大气中光、电、声等信号传播过程构成的。例如微波遥感测定湿度, 是根据大气中的水汽在 1.35 cm 波长处有强辐射。

除了上述两种探测方法外，还可人为地在大气中施放某些示踪物质，分析它的传播和演变规律，由此推测大气的状况。例如施放某些放射性示踪物或荧光物质，用以测试大气的扩散能力。

近年来，对大气中某些物理和化学过程开始进行室内的模拟实验。例如建立大型云室，考察云内的物理规律；建立大型的风洞，模拟大气边界层的状况，以探索动力学规律。室内模拟实验虽然比较粗糙，受到比较大的限制，但是可以突出地控制一、二个主要因素，寻找它们对某个大气物理过程的影响，起到更深入地了解实际大气规律的作用。

### § 1.3 探 测 仪 器

仪器是大气探测的工具，充分了解仪器的性能，才能发挥它应有的功效。仪器的性能包括精确度、惯性、灵敏度和坚固度。

仪器的精确度是指测量值与实际值接近的程度，可以通过仪器误差的数值大小进行衡量。仪器误差有系统性误差和偶然性误差两种。偶然误差表现为无规则的形式，可以由读数估计的偏差，操作上的细微差别，机械摩擦的变化以及仪器噪音等原因所引起。系统误差是仪器的某些特殊性能在测量时的反应，例如一些电学测温元件由于电流加热使指示温度偏高，又如一些测压元件有一定的温度系数。对于系统性误差可以采用适当的措施加以订正。两种不同的仪器平行观测同一大气要素，或是气象台站在更换新型仪器时都必须注意系统误差的订正。

必须注意保持仪器的精确度。一个初始精度很高，但无法长期保持的仪器会给探测工作带来麻烦。世界气象组织采取了定期的逐级对比制度，以保持仪器的精确度，其中包括设立各种级别的标准仪器，设计检定设备，以及规定仪器的检定周期。

仪器的灵敏度指单位待测量的变化所引起的指示仪表输出的变化。例如玻璃温度表灵敏度的单位为  $\text{mm}/1^\circ\text{C}$ 。灵敏度必须与仪器精确度相配合，例如精确度为  $0.1^\circ\text{C}$  的温度表，能用目力读出

0.01°C是没有意义的。

惯性指仪器响应的速度，惯性大小由观测任务规定。探空仪的惯性不能太大，否则在上升过程中就无法准确反映温、湿、压随高度的变化；大气湍流的探测仪器则要求很低的惯性系数；而地面气象台站使用的仪器可具有一定的惯性，使它们具有一定的平均能力。

探测仪器的坚固度应考虑到使用的条件和使用周期的长短。

此外，仪器结构简单，易于操作和维护，以及价格低廉也是设计大气探测仪器所必须考虑的。

一个完整的现代大气探测系统，包括观测平台、观测仪器和资料处理单元三个部分。观测平台是安装仪器进行工作的基点。除地面气象观测场外，塔、船舶、海上浮标、飞机、火箭、卫星和气球都是在大气探测中普遍采用的气象观测平台。近代大气探测系统所获取的大量信息必须得到及时的分析处理、传送和储存，现代化的计算机系统日益成为探测系统中不可缺少的部分。

## § 1.4 探测方法

探测方法与仪器是不可分割的。仪器的基本感应原理决定了使用仪器应遵守的一般原则，在这个基础上才能根据任务的性质选择仪器和规定相应的探测方法。

直接探测式的仪器，其感应部分应与大气直接接触，仪器系统与大气环境的相互干扰使感应元件周围的大气条件发生改变。仪器暴露引起的测量误差在总的观测误差中占有较大的比重，并且多数属于系统性误差。控制系统误差的符号和数值的有效方法是统一仪器的规格、安装方法和操作步骤，使观测点之间，以及不同观测时期的资料具有“可比较性”。

大气遥感探测的误差来源有两部分：一是来自探测系统本身，这与仪器灵敏度、稳定性等因素的限制，还有检定的误差等有关。另一方面是来自反演的误差。大气传输过程的模拟是自然情

况的近似,接收到的信号又受多种因素的综合影响,因此反演过程中常常是从综合信息中探求个体要素,这些都将引入误差。尽管遥感探测具有不破坏大气自然状况的优点,但其精度目前尚低于直接观测的精度。

选择观测地点必须注意周围环境。大型障碍物,特殊的地面覆盖,以及水体、谷地和山崖都可能产生局地小气候,测点距离这些地点太近会使资料失去代表性。

在某些情况下,大气要素随时间和空间有较强的不规则起伏,一次瞬时读数很难具有代表性,必须在一段时间里进行多次取样。但是,取样时间太长又将歪曲要素随时间的变化过程。这都需要根据要素本身的性质,仪器的性能综合加以考虑。

因此,统一观测方法包括统一仪器的性能,安装(或暴露)方式,观测时间以及读数取样步骤。

探测任务是多种多样的,为了适应特殊性,不同的任务有不同的观测法。维持日常气象工作的气象台站可以制定统一的观测规范,至于一些为了专题研究实施的探测计划,组织者必须根据实际情况以及大气探测的基本原则制定观测规范。

大气科学向深度和广度的发展,是建立在大气探测的实验基础上。科学技术的发展不断为大气探测提供新的设备,发现更多新的观测结果。与此同时,大气科学的发展,经济建设和国防建设的需要又向大气探测技术提出更高的要求。实践和理论相互促进必将使大气探测技术不断地向前发展。

### 参 考 文 献

- [1] Middleton W.E. K. & A. F. Spilhaus, Meteorological Instruments, 3rd. Edition, Univ. Toronto Press, (1953).
- [2] WMO, Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices, 5th. Edition.
- [3] Wang J. Y., Instruments for Physical Environmental measurements, Mileu Inform. Service, (1976).
- [4] Derr V.E. (Etited by) Remote Sensing of the Troposphere, U.S. Depart.

Commerce, NOAA and Univ. Colorado, (1972).

[5] Fymat A.L., & V. E. Zuev, Remote Sensing of Atmosphere: Inversion Methods and Applications, Elsevier Scientific, (1978).

[6] B. П. Слестпанко著, 雷达在气象中的应用, 科学出版社, (1979).

## 第二章 温度的测量

气象工作范围内的温度测量包括气温、水温和土壤温度的观测。本章的着重点在气温的观测上。

为了定量地表示温度，必须选定一个衡量温度的标尺——温标，这是理论性和实验性都很强的研究内容。由于大大超出了本书的中心内容，这里不作详细讨论。如有需要，读者可参阅文献[1]。

这里我们对1968年国际实用温标(IPTS)作简要的介绍。温标首先给定了一系列的参考点，与气象测量有关的如下：

标准大气压力下(1013.25 hPa)，液态氧及其蒸汽的平衡温度(沸点)：-182.962°C；冰、水和水汽的三相点：+0.01°C；水和水汽的平衡温度(沸点)：+100°C。

水的沸点与大气压力的关系为：

$$t_b = 100 + 2.7655 \times 10^{-2}(p - p_0) - 1.13393 \times 10^{-5}(p - p_0)^2 + 6.82509 \times 10^{-9}(p - p_0)^3 \quad (2.1)$$

在大气环境中，测温范围通常在+40—-60°C。为了工作上的方便，设置了一些二级参考点：

标准大气压下固体CO<sub>2</sub>的升华点：-78.476°C；

标准大气压下水银的沸点：-38.862°C；

水的冰点：+0.0°C；

二苯基醚的三相点：+23.87°C。

固体CO<sub>2</sub>的升华点与大气压力的关系为：

$$t_s = 1.21036 \times 10^{-2}(p - p_0) - 8.91226 \times 10^{-6}(p - p_0) - 78.476 \quad (2.2)$$

在参考点之外各点的测温标准为铂电阻温度表。测温金属铂要求达到一定的纯度，使其在100°C时的电阻(R<sub>100</sub>)和0°C时的



电阻( $R_0$ )之间的比值( $R_{100}/R_0$ )达到1.39250以上。

从 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $630.74^{\circ}\text{C}$ (锌的熔点),标准铂电阻与温度的关系为:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (2.3)$$

在两个参考点,即水的沸点和锌的熔点上,测定标准铂电阻的阻值 $R_t$ ,代入上式确定出系数 $A$ 和 $B$ 的数值。

从 $-182.96^{\circ}\text{C}$ 到 $0^{\circ}\text{C}$ ,标准铂电阻与温度的关系为:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(100 - t)t^3] \quad (2.4)$$

测定温度处于氧的沸点下的 $R_t$ 值,确定系数 $C$ 的数值。

本章讨论的重点是,如何在大气环境中精确地测定随时间变化的大气温度,主要包括下述几方面的内容:

- ① 测温元件的特性,元件引起的测温误差;
- ② 气温的动态测量;
- ③ 太阳辐射的防护。

## § 2.1 测温元件

### 一、液体玻璃温度表

它的构造如图2.1所示。玻璃球中充满水银或酒精等液体,与之相连的是中空的玻璃毛细管,毛细管另一端封闭。毛细管背后衬有白瓷刻度板,外有保护外套管。温度变化时,引起测温液体体积膨胀或收缩,使进入毛细管的液柱高度随之变化。



图 2.1 玻璃温度表

设 $0^{\circ}\text{C}$ 时表内液体的体积为 $V_0$ ,此时球部和这段毛细管的容积也为 $V_0$ ,当温度升高 $\Delta t$ ,毛细管中液柱的长度变化为 $\Delta L$ ;