

大气探测学 教程

林晔 主编

王庆安 顾松山 林国安 编著

气象出版社

大气探测学教程

林 晔 主编

王庆安 顾松山 林国安 编著

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书介绍地面气象观测和高空大气探测的基本原理和方法,探讨测量误差的来源,同时对大气遥感等探测新技术作概要介绍,为有关各专业的学生学习专业课提供必要的基础知识和技能。

本教材的特点是,内容上兼含目测项目和器测项目;表述上力求深入浅出、理论密切联系实际。本书可作为气象、气候、农业气象及地理、海洋、水文、环保等专业的教科书,也可供邻近各学科的科技工作者以及广大的中学地理教师作为一般了解或教学参考之用。

大气探测学教程

林晔 主编

王庆安 顾松山 林国安 编著

责任编辑 陶国庆 终审 顾仁俭

封面设计 牛涛 责任技编 席大光 责任校对 吕影

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 15.5 字数: 401千字

1993年9月第一版 1995年10月第二次印刷

印数: 2001—8000

ISBN 7-5029-1316-5/P·0575 (课)

定价: 14.00元

前 言

本教程是根据1989年在成都召开的，讨论高等院校气象类教材编写大纲会议上对非大气探测（含大气物理）^{4b}专业所提出的有关大气探测课程的基本要求而编写的。主要讲授地面气象观测（包括目测和器测）及高空大气探测的基本原理和方法，适当介绍主动和被动遥感技术在大气探测中的应用。要求学生较全面地了解大气探测的基础知识并掌握其基本技能。考虑到本课程不但是气象学科各专业，如气象、气候、农业气象各专业的公共专业基础课，而且也是地理、海洋、水文、环保等邻近学科要求了解大气探测的基本原理和方法的各专业的必修或选修课程，因此，在课程内容上要照顾到面上的要求。即对于一些虽然在现代发展很快，但目前还不属于常规观测的内容，则只作概要的介绍，在叙述上不作系统、深入的展开。各章所列的参考文献则提供读者进一步学习或查考的线索。

考虑到本书的读者面比较广，因此，在内容上力求通俗易懂。对于那些具有一定深度的内容也尽可能由浅入深，并联系气象工作的实际，务求理论与实践相结合。

本教材由南京气象学院、南京大学、空军气象学院根据各院校大气探测专业基础课多年教学经验的积累联合编写而成。全书共分16章，另将气象仪器的检定法辑入附录。第一章由林晔、王庆安编写；第二、三、五章由林晔编写（第五章部分内容由顾松山编写）；第四、六、十、十六章及附录由王庆安编写；第七、九、十一、十二、十四章由林国安编写（第十一章部分内容由逢勇编写）；第十五章由顾松山编写；第八、十三章由逢勇编写（第八章部分内容由林晔编写）。全书由林晔主编统稿校订。

编著者

1992年12月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
§1 大气探测学研究的对象、任务和特点.....	(1)
§2 大气探测学发展简史.....	(2)
§3 气象仪器和测量误差.....	(5)
§4 气象观测工作的组织.....	(11)
§5 大气探测的“三性”要求.....	(15)
参考文献.....	(19)
第二章 云的观测	(20)
§1 概述.....	(20)
§2 云的分类和云状的定义与识别特征.....	(22)
§3 云的外形和形成云的基本过程.....	(35)
§4 各种云状之间的互相演变及其和天气 演变的关系.....	(44)
§5 云的国际电码及其天气意义.....	(46)
§6 云量和云高的观测.....	(55)
参考文献.....	(65)
第三章 天气现象的观测	(66)
§1 概述.....	(66)
§2 各种天气现象的特征.....	(66)
参考文献.....	(78)
第四章 能见度的观测	(79)
§1 能见度及目标物视亮度方程.....	(79)
§2 气象能见度目测法.....	(84)

§3 能见度器测法	(93)
参考文献	(98)
第五章 温度的测量	(99)
§1 温度、温标、测温器	(99)
§2 玻璃液体温度表	(104)
§3 双金属片温度计	(111)
§4 电测温度表及其它测温技术	(116)
§5 温度观测的特点和存在的一些问题	(131)
§6 冻土深度的测量	(147)
参考文献	(148)
第六章 空气温度的测量	(150)
§1 湿度参数的定义和换算	(150)
§2 测量湿度的一些主要方法	(154)
§3 干湿表法测湿原理及A值的计算	(170)
参考文献	(182)
第七章 气压的测量	(183)
§1 水银气压表	(184)
§2 空盒气压表和气压计	(195)
§3 其它测压仪器	(201)
参考文献	(204)
第八章 地面风的测量	(205)
§1 概述	(205)
§2 风向的测量	(210)
§3 风速的测量	(221)
§4 测风仪器的若干问题和综合考虑	(237)
参考文献	(244)
第九章 降水、积雪和蒸发的测量	(245)
§1 降水的测量	(245)
§2 积雪的测量	(251)

§3 蒸发量的测量	(252)
第十章 辐射及日照时数的测量	(257)
§1 辐射基本量及观测项目	(258)
§2 测量原理、仪器及辐射基准	(260)
§3 太阳直接辐射的测量	(262)
§4 短波总辐射和散射辐射的测量	(268)
§5 全辐射、净辐射和长波辐射的测量	(276)
§6 日照时数的测量	(279)
参考文献	(285)
第十一章 高空风的测量	(286)
§1 概述	(286)
§2 气球测风方法的基本原理	(287)
§3 光学经纬仪测风	(292)
§4 无线电测风	(313)
§5 测风误差的分析	(320)
参考文献	(326)
第十二章 高空温、压、湿的测量	(327)
§1 概述	(327)
§2 无线电探空原理	(329)
§3 GZZ2型转筒式电码探空仪	(332)
§4 GZZ7型电子探空仪	(341)
§5 探空仪的测量误差	(344)
参考文献	(351)
第十三章 自动气象站	(352)
§1 自动气象站概况	(352)
§2 自动气象站的基本组成部分	(354)
§3 几种自动气象站	(357)
参考文献	(365)
第十四章 大气探测资料的传递与处理	(366)

§1 大气探测资料的传递过程·····	(366)
§2 天气观测报告的编码和填图·····	(369)
§3 大气探测资料的自动处理·····	(376)
第十五章 主动式大气遥感探测 ·····	(378)
§1 大气遥感探测概述·····	(378)
§2 天气雷达遥感气象要素的原理·····	(382)
§3 天气雷达的工作原理·····	(395)
§4 天气雷达回波信号的处理·····	(403)
§5 雷达回波的识别·····	(410)
§6 气象要素的雷达测量·····	(414)
§7 激光气象雷达·····	(420)
§8 声雷达探测·····	(422)
§9 VHF-UHF 多普勒雷达探测·····	(424)
参考文献·····	(426)
第十六章 被动式大气遥感探测 ·····	(428)
§1 大气被动式微波遥感及微波辐射计·····	(428)
§2 红外遥感原理及红外辐射仪·····	(442)
§3 气象卫星遥感大气及卫星云图·····	(454)
参考文献·····	(473)
附录 常用气象仪器的检定 ·····	(474)
一、 温度表的检定·····	(474)
二、 温度计的检定·····	(476)
三、 水银气压表的检定·····	(476)
四、 空盒气压表的检定·····	(479)
五、 湿度的计量标准与湿度控制·····	(479)
六、 通风干湿表的检定·····	(482)
七、 毛发湿度表(计)的检定·····	(484)
八、 风向风速仪的检定·····	(485)

第一章 绪 论

§1 大气探测学研究的对象、任务和特点

大气探测是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。这种探测既包括目测，也包括器测；既包括直接测定（指直接置仪器的感应部分于大气介质中），也包括间接测定（指不置感应器于被测介质中的遥感探测技术）。大气探测是大气科学的一个重要分支，也是大气科学的基础。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各部门直接提供常规的资料和数据，而且天气、气候工作以及大气科学本身的发展也尖锐地提出改进或更新原有探测方法的要求以获取各种非常规的资料或数据。因此，大气探测技术的发展程度就日益成为气象工作以及气象科学发展水平的一个标尺。

随着生产和科学的发展，大气探测的范围和内容越来越广泛；观测方法也越来越多样。根据探测的对象和范围，大气探测又可分为地面气象观测、高空气象观测和专业性气象探测。地面气象观测是以目力或仪器对近地面层的大气状况进行观察和测定。观测的项目包括云、能见度、天气现象、温度、湿度、气压、风、降水、蒸发、辐射能、日照时数以及冻土深度、积雪和电线积冰等。高空气象观测是利用气球、无线电探空仪、气象探测飞机、气象火箭、气象卫星等对自由大气的温、压、湿、风等要素进行探测。专业性或特殊项目的观测是根据各种不同的专业研究的需要而进行的大气探测工作；如大气污染监测、农业气象观测、中高层大气探测等。近几十年来，作为主动遥感的各种气象雷达探

测和作为被动遥感的气象卫星探测，以及地面微波辐射探测等能获得较多信息的探测方法，正在逐步地进入常规观测的领域或广泛地应用于大气科学的研究领域，极大地丰富了大气探测的内容。

探测手段和方法不但随地面与高空的不同而异，而且也随探测点相对固定与否而异。作为大气探测基地或出发点的观测平台通常可分为固定平台和移动平台，如表1.1所示。

表1.1 气象观测平台示例

范围类别	地面及海面	高空及空间
固定平台	地面站、固定漂浮站、气象塔	高山站、系留气球、静止卫星
移动平台	观测车、船舶站、自由浮标	自由气球、定高气球、球携探空仪、气象飞机、气象火箭下投气球、卫星、飞行器

大气探测学课程的特点是理论与实践的密切结合，也就是说基本原理与基本技能紧密联系，是一门实践性很强的学科。在系统地讲述探测原理和基本知识的同时，也充分强调实习和实验的重要性。一些目测项目更要突出平时实际观测经验的积累和判别理解的加深。

由于现代科学技术的迅速发展，使得大气探测技术日新月异。计算机的广泛采用和各种遥感手段和卫星技术的愈来愈多的应用，极大地丰富了大气探测的内涵。使这门处于大气科学基础的学科又出现在大气科学的前沿，形成了一门以多学科为基础的独立学科，使它既具有基础性，又具有前沿性。这也是本课程日益突出的另一个特点。

§2 大气探测学发展简史

一、气象观测发展的几个阶段

由于劳动和生活的需要，自古以来人们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现象的经验性预测。随着生产技术的发展，这种定性的目力观察逐渐发展到借助仪器来进行定量的测定。各种主要气象要素的测量仪器相继发明、改进。就大气探测手段的发展阶段来考察，大致可以分为这样几个时期。

1. 始创时期 直到16世纪末发明第一批气象仪器以前的漫长历史时期中，人们对大气中发生的现象大多以定性的经验观察为主。在这期间，已经有了相风乌、雨量器、风压板等的发明创造（其中相当一部分是在我国首创的）。也开始有了一些定量的仪器观察，但是却没有留下系统的连续的记录。

2. 地面气象观测开始发展的时期 自从1593年意大利人伽里略(G. Galileo)发明气体温度表，到1665年经波义耳(R. Boyle)的改良，才完成酒精温度表，1643年托里拆利(E. Torricelli)发明水银气压表，1659年有了水银气压表一直到1783年瑞士德索修尔(H. B. de Saussure)发明毛发湿度表（第一支干湿表则晚到1825年才制造出来），一些主要的气象要素才有了连续的仪器观测记录。同时从18世纪20年代开始，英、俄等国相继建立了有组织的气象观测网，地面气象观测开始向面上发展，为日后地面气象观测各个项目的完备及世界范围观测网的发展奠定了基础。

3. 高空探测的开始发展时期 自从1783年法国人查理(J. A. C. Charles)在巴黎上空，用氢气球携带温度表及气压表探测高空大气状况以后，就开始了零星的升空探测。在这以后直到20世纪初，风筝、系留气球、飞机以及锥形的火箭携带气球和仪器升空进行高空大气的探测得到了发展。在这期间，用经纬仪观测高空各层风向风速的方法也逐步推广开来。

4. 近代高空和高层大气探测的迅速发展时期 自从1919年法国人巴洛(R. Bureau)第一次作无线电探空仪的试放(到1927年才首次作业务施放)以后，为高空大气探测事业开辟了新的途

径，也是大气探测向高空发展的第一次突破。1940年开始用测风雷达追踪气球进行测风，1945年第二次大战结束前夕美国将雷达首次应用于气象观测。在这之后向更高的高空发射的气象火箭（100km以下）和探空火箭（500km以下），把探测高度伸展到中间层和电离层，可以说是本时期的第二次突破。到1960年美国气象卫星首次发射、1966年用地球静止卫星作云图传真成功，使探测大范围大气参量的连续变化成为可能，可说是高空探测事业的第三次突破。1973年起美国和前苏联竞相发射宇宙飞行器探测行星和行星大气，由于各种遥感（包括空间遥感和地面遥感）和传输手段日新月异，这方面的发展正方兴未艾，大气探测正在向三度空间飞速发展。

二、我国气象观测事业的发展概况

在古代，我国是气象知识和气象观测技术累积得比较丰富的国家，风的测器和测雨量器都比欧洲各国使用得早。由于长期的封建统治，生产停滞不前，技术发明包括气象仪器的制造和推广不被重视，在技术发展迅速的世界上明显地落后了。解放前，虽经惨淡经营，我国也开始了现代气象观测网的建设，但战乱频仍，台站稀少，人员缺乏，各种仪器设备全靠进口。解放以来，新中国的气象事业得到了迅猛的发展，建立了较为稠密的全国台站网。全国气象部门有地面气象观测业务的台站已由1949年的72个发展到1988年底的2609个（其中国家基本站近700个，气候基准站近200个；各级气象台315个，气象站2208个，独立的农业气象试验站55个），站网的密度达到国际中上等的水平。各种观测系统的数量和密度情况如表1.2所示。就全国来说，已基本上达到了地市有台、县县有站。尤其是作为我国“天气大门”的西部地区，尽管现有的站网密度还很不足，但发展的速度是非常突出的。至于从事气象工作的职工总数和科技人员，以国家气象局系统为例，已由1949年的约600人增加到1989年底的68000多人和约52000人（其中高级技术人员1274人，中级技术人员14509人，职工队伍

表1.2 我国气象观测站网分布情况表(1982)

观测系统类别	站数	全国平均密度 (km间距)
地面观测	2582	61 (青海、新疆、西藏平均127km, 其中西藏平均179km)
高空探测	120	283 (新疆350km, 西藏559km)
天气雷达	约200	约220 (西部、北部少)
辐射观测	85	336
农业气象观测	918	102 (包括农试站)

中具有大专以上文化程度的占24%)。此外,许多新的观测项目已经开始建立,台站基本气象仪器和许多精密仪器都已能自己制造。气象观测工作也已经历了改革,统一了观测技术规范,发展了新的专业观测。

提高观测质量并逐步实现探测现代化是大气探测工作的首要任务。这就要求改进现代仪器设备,提高仪器的测量精度,并使之适合我国的地理、气候条件;还要加强基准仪器和仪器检定的工作,使测器逐步达到标准化。在可能的条件下,台站的基本观测项目也要逐步实现遥测半自动化或自动化。由于电子元件和小型、微型电子计算机的逐步引入,可以预见电子元件和计算机技术将成为大气探测实现现代化的主要方向。

和探测工作的现代化相适应,提高资料处理和整编工作的自动化技术水平以及建立一个以现代通信技术为基础的数字传输系统,将成为实现整个探测工作现代化的不可分割的组成部分。

§3 气象仪器和测量误差

一、气象仪器

气象仪器的设计、制造、检定和使用直接决定着气象观测的质量,为此就必须掌握有关气象仪器的原理、构造和性能等方面

的知识，了解检定、调整和正确使用气象仪器的基本方法。只有这样，才能有效地应用观测所得到的资料。

气象仪器虽然由于其所测定的对象不同而有不同的构造和型式，但在仪器的性能方面却有一些共性，这些共性对于人们进行气象观测具有重要的意义。

(一) 惯性 (即滞后性)

一般的仪器，当用来测定某一对象的某个属性时，不能立即指示该对象的某个属性的真值，它的示度总是逐渐地接近所要测定的属性的真值的。也就是说，仪器的感应部分，从一种状态变化到另一种状态，需要有一定的响应时间，在这段时间里实现仪器与所测属性的物理量交换，最后达到平衡。这时仪器的示度才能正确地表示所测的物理属性。对于一种物理属性而言，不同构造特性的仪器，其所需要的响应时间不同，我们把这种性质称之为仪器的惯性，也称为滞后性。衡量滞后特性的量——滞后系数，将在第五章中讨论。

仪器惯性的选择，决定于所要测量的对象的变化特征和测量的目的。一些观测项目一方面需要了解要素在一定时间内的平均值，另一方面又需要了解要素本身的变化特征。因此一般气象仪器感应元件和指示器必须具有一定的自动平均能力，以便于自动地消除要素的微脉动变化，反应出一定尺度一定频率的要素变化特性。当然，对于一切需要揭示要素微脉动和微结构特征的专门测量来说，就要求尽量减小仪器的惯性，使之能跟踪要素的微脉动变化，反映要素场的微结构特征。

(二) 灵敏度

仪器的灵敏度就是它的示度在被测要素改变单位物理量时所移动的距离或旋转角度的大小。若被测要素的物理量改变 (输入量) 为 Δx ，相应的仪器示度改变 (输出量) 为 Δy ，则灵敏度

$$\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

由于观测者的各种感官功能有一定的限度，因此要求正确、迅速地读出仪器示度，就必须要求仪器具有适当的灵敏度。但只片面要求灵敏度大也是不合适的，那样仪器也势必变得庞大。灵敏度与材料性质和仪器构造有关，一般根据准确度和分辨率的要求及测量范围确定仪器的灵敏度大小，而从材料选择及仪器制造工艺方面来保证这些要求。

(三) 准确度和精密度

衡量仪器的精确程度，一般应该包括仪器的准确度和仪器的精密度这两层的含义。所谓准确度，指的是仪器的测值与真值的符合程度（自然这里所指的测值是指已经作了各种订正之后的测值）。所谓精密度，是指对所测的量的若干独立测定值彼此之间的符合程度。显然，准确度考察的是测值与实际值的接近程度，而精密度考察的是连续测值的彼此互相接近的程度。准确度反映系统误差和随机误差的合成大小，常用相对误差来表示，其差值愈小，准确度愈高。而精密度仅反映随机误差大小的程度，常以标准偏差与平均值之比来表示，其比值愈小，精密度愈高。

日常习惯上所称的仪器“精度”，虽然从字面上看似似乎是精密度的简称，但实际的含义往往泛指仪器示度的精确程度，即泛指反映两种误差合成大小的准确度。

和对仪器的惯性选择一样，对于仪器准确度的要求总是根据所测对象的变化特性和观测目的而确定的。提出过高的准确度要求在很多情况下并没有实际意义，而降低准确度要求又往往不能满足测定的需要。不同观测目的的地面气象观测各项目的准确度要求见表1.3。

仪器的准确度决定于感应元件的惯性和仪器的构造特性。在实际的气象测定中，有直接意义的是观测的准确性。这里所指的准确性，不仅决定于仪器的准确度，而且还决定于观测结果的代表性程度。

表1.3 地面观测各要素的准确度要求 (参照世界气象组织《气象仪器与观测实践指南》)

要素	气候观测		天气观测		航空气象观测		农业气象观测	
	精度要求	说明	精度要求	说明	精度要求	说明	精度要求	说明
云量	±1/8或 ±1/10		±1/10		±1/8			
云高 (m)	±30	(<1500)	±10m	(<100)	±15	(<150)		
	±300	(1500— 9000)	±10%	(>100)	±10%	(150— 300)		
	±1500	(9000— 21000)	±10%		±20%	(>300)		
云向			±10°	瞬时值				
气压 (hPa)	±0.3		±0.1		±0.5			
气压倾向			±0.2	两次瞬时 值的差				
干球温度 (°C)	±0.1	最小滞后	±0.1		±1.0	对跑道具 有代表性	±0.1	
最高 最低 温度	±0.5	为3min (滞后定 义为: 对 于一个等 于所需精 度的变化 量, 感应 其变幅的 90%所需 的时间)	±0.5				±0.5	
湿球温度	±0.1		±0.1				*	*对应相 对湿度的 精度要求 而确定
相对湿度	±3%		±5% ±2%	(<50%) (>50%)			±1%	
露点°C	±0.5				±1.0	同上	±0.1	
水汽压 (hPa)	±0.2						*	*对应± 0.1°C 露 点的精度 要求而定
风向	±10°	取3s到 到1h的平 均值不等	±5°	10min的 平均值	±10°	要对起落 区上空6 —10m及 跑道上空 6—15m 高处具有 代表性	±10°	2min 平 均
风速 (m/s)	±0.5	响应时 间: 3s(响 应时间定 义为: 响 应一个变 化量的 90%所需 的时间)	±0.5	(<5)			±10%	(>1m /s)
风速分量	±0.5		±10%	(>5)	±kn ±10%	(<10 kn) (>10 kn)		
降水量 (mm)	±0.1 ±2%	(<10) (>10)	±0.2 ±2%	(<10) (>10)			±0.2 ±2%	(<10) (>10)
降水强度 (mm/h)	±0.5 ±2%	(<25) (>25)	±0.02 ±0.2 ±2%	(<2) (2—10) (>10)			±5%	(超过15 min)

要素	气候观测		天气观测		航空气象观测		农业气象观测	
	精度要求	说明	精度要求	说明	精度要求	说明	精度要求	说明
积雪深度 (cm)	±1	不同地段 读数平均	±1% ±5%	(≤20) (>20)			±10%	
雪的密度	±0.01 g/cm ³							
蒸发量 (mm)	±0.1 ±2%	(≤10) (>10)						
日照时数	±0.1h	(任一小 时)						
日射	±1MJ/ m ² ·d							
能见度 (km)	0.1 1 5	(≤5) (5-30) (30-70)	±10%	瞬时观测				
跑道视程 (m)					±50 ±100 ±200	(≤500) (500- 1000) (>1000)		

(四) 分辨率 (力)

仪器的分辨率 (力) 指的是“导致一个测量系统响应值变化的最小的环境改变量”。它和量程及灵敏度有关, 仪器性能的改变也会直接影响分辨率。

(五) 量程

即仪器的测量范围, 它主要决定于所测属性的变化范围和测量的要求。仪器的感应元件的感应性能往往也会对测量范围带来一定的限制。对量程的要求一般应从属于仪器灵敏度、分辨率和准确度的要求。

二、测量误差

大气探测和其他测量技术一样, 其获得的结果, 总会存在一定的误差。误差的大小既标志着示度读数与测定结果之间的差异, 又标志着测定结果的准确程度。为了获得一定的测量准确度, 一方面要注意仪器构造的技术条件和观测方法, 另一方面也要分析误差的原因和特点, 确定适当的处理方法, 包括订正方法和可能的消除方法。