

机场鸟击防范系列丛书

Foundation of Aeronautical Meteorology

# 航空气象学

# 基础

胡成伟 张亮 张秀明 编著



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 航空气象学基础

胡成伟 张 亮 张秀明 编

合肥工业大学出版社

## 内 容 提 要

航空气象学是研究气象条件同飞行活动和航空技术之间的关系、航空气象服务的方式和方法,以及航天飞行器在地球大气层中飞行时的气象等问题的一门学科。气象条件对飞机的起飞、航行、降落以及其他各种飞行活动有不同的影响,飞机的设计制造和气象条件也有密切关系。本书主要介绍航空气象学的发展历史、大气的热能和温度、大气的水平运动、重要天气系统、影响航空的大气环境、常规天气图分析、航空气象资料的判读分析和使用、飞行气象情报发布与交换、航空气象业务组织结构等内容。本书可供民航大专以上院校师生和机场场务人员、航空公司、空管广大员工学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空气象学基础/胡成伟,张亮,张秀明编. —合肥:合肥工业大学出版社,2014.12  
ISBN 978-7-5650-2086-5

I. ①航… II. ①胡… ②张… ③张… III. ①航空学—气象学—教材 IV. ①V321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 306288 号

## 航 空 气 象 学 基 础

胡成伟 张 亮 张秀明 编

责任编辑 权 怡

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2014 年 12 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2014 年 12 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16
电 话	总 编 室:0551-62903038 市场营销部:0551-62903198	印 张	14
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	332 千字
E-mail	hfutpress@163.com	发 行	全国新华书店
		印 刷	合肥现代印务有限公司

ISBN 978-7-5650-2086-5

定价:35.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换



# 目 录

第一章 引言 .....	(1)
一、气象学与航空气象学 .....	(1)
二、航空气象学的发展简史 .....	(2)
三、我国航空气象工作概述 .....	(2)
四、现代航空气象学的研究内容 .....	(3)
五、航空气象学研究机构和产品 .....	(4)
第二章 地球和大气 .....	(5)
一、大气的成分 .....	(5)
二、大气的结构 .....	(7)
三、国际标准大气 ISA .....	(10)
四、基本气象要素 .....	(11)
五、基本气象要素对飞行的影响 .....	(14)
第三章 大气的热能和温度 .....	(15)
一、太阳辐射 .....	(15)
二、地面辐射和大气辐射 .....	(19)
三、大气的热力学过程 .....	(20)
四、大气温度的时空分布特征 .....	(21)
五、大气环流 .....	(26)
六、大气的垂直运动 .....	(28)
第四章 大气的水平运动 .....	(29)
一、风的定义 .....	(29)
二、风的测量 .....	(29)
三、风的形成 .....	(31)
四、风对飞行的影响 .....	(33)



第五章 云、雾和降水 .....	(36)
一、云 .....	(36)
二、雾 .....	(39)
三、降水 .....	(42)
第六章 重要天气系统 .....	(46)
一、天气系统的尺度 .....	(46)
二、气旋与反气旋 .....	(47)
三、副热带高压 .....	(48)
四、热带气旋 .....	(51)
五、气团 .....	(55)
六、锋 .....	(56)
第七章 雷暴及其他对流性天气 .....	(62)
一、雷暴 .....	(62)
二、沙尘暴 .....	(67)
三、特殊地形下的对流性天气 .....	(69)
第八章 能见度与视程障碍 .....	(72)
一、能见度 .....	(72)
二、视程障碍 .....	(75)
第九章 影响航空的大气环境 .....	(80)
一、低空风切变 .....	(80)
二、飞机颠簸 .....	(86)
三、飞机积冰 .....	(90)
四、高空飞行的气象条件 .....	(97)
第十章 特殊气象环境下的运行 .....	(105)
一、高原气象特点 .....	(105)
二、高原机场气象环境 .....	(106)
第十一章 常规天气图分析 .....	(110)
一、地面天气图 .....	(110)



二、等压面图 .....	(115)
三、气象卫星云图 .....	(117)
<b>第十二章 航空天气预报 .....</b>	<b>(124)</b>
一、机场预报 .....	(124)
二、着陆预报 .....	(138)
三、起飞预报 .....	(145)
四、机场警报 .....	(145)
五、风切变警报及告警 .....	(147)
六、区域预报 .....	(149)
七、航路预报 .....	(151)
<b>第十三章 航空天气预告图的制作 .....</b>	<b>(155)</b>
一、预告图制作的一般规定 .....	(155)
二、高空风和温度预告图的制作 .....	(155)
三、重要天气预告图的制作 .....	(156)
四、预告图的修订和更正 .....	(159)
五、重要天气预告图评定说明 .....	(159)
<b>第十四章 重要气象情报和低空气象情报 .....</b>	<b>(162)</b>
一、重要气象情报 .....	(162)
二、低空气象情报 .....	(164)
三、重要气象情报和低空重要气象情报报头的种类 .....	(166)
四、重要气象情报和低空重要气象情报常用简字 .....	(166)
五、SIGMET、AIRMET 报模板 .....	(168)
<b>第十五章 航空气象服务 .....</b>	<b>(172)</b>
一、基本内容 .....	(172)
二、为航务部门和飞行机组提供的气象情报 .....	(173)
三、为空中交通服务部门提供的气象情报 .....	(176)
四、为搜寻和救援服务单位提供的气象情报 .....	(177)
五、为航空情报服务单位提供的气象情报 .....	(177)
六、为机场运行管理部门提供的气象情报 .....	(177)
七、为通用航空飞行部门提供的气象情报 .....	(178)



第十六章 飞行气象情报发布与交换 .....	(179)
一、总则 .....	(179)
二、机场天气预报 .....	(179)
三、航空器空中报告 .....	(180)
四、机场预报 .....	(181)
五、着陆预报和起飞预报 .....	(182)
六、航路预报 .....	(182)
七、预告图形式的区域预报 .....	(182)
八、缩写明语形式的区域预报 .....	(183)
九、重要气象情报和低空气象情报 .....	(184)
十、机场警报和风切变警报 .....	(184)
十一、非常程序 .....	(184)
第十七章 航空气象业务组织结构 .....	(186)
一、我国气象组织框架 .....	(186)
二、地面观测业务 .....	(187)
三、航空气象探测系统 .....	(192)
四、气象自动化观测系统 MIDAS IV AWOS 简介 .....	(195)
五、世界区域天气预报系统 .....	(201)
附录 A .....	(205)
附录 B .....	(206)
附录 C .....	(207)
附录 D .....	(208)
附录 F .....	(209)
附录 F .....	(210)
附录 G .....	(211)
附录 H .....	(212)
附录 I .....	(213)
附录 J .....	(214)
附录 K .....	(215)
附录 L .....	(216)
附录 M .....	(217)
附录 N .....	(218)
附录 O .....	(219)



# 第一章 引言

## 一、气象学与航空气象学

由于地球的引力作用，地球周围聚集着一个气体圈层，构成了所谓的大气圈。大气的分布范围是如此之广，以至于地球表面都在大气的笼罩之下；它又是如此之厚，以至于地球表面没有任何山峰能穿过大气层。以地球最高峰珠穆朗玛峰的高度来和大气层的厚度相比，它也只能算是“沧海一粟”。人类就生活在大气圈底部的“下垫面”。

地球是太阳系的一个行星，强大的太阳辐射是地球上物质获取能源的最重要的来源。这个能源首先经过大气圈后到达下垫面，大气中所发生的一切物理、化学现象和过程，除取决于大气本身的性质外，都直接或间接与太阳辐射和下垫面有关。这些现象和过程与人类生活和生产活动关系至为密切。人类在长期的生产实践中不断地对它们进行观测、分析、总结，从感性认识提高到理性认识，再在生产实践中加以验证、修订、逐步提高，这就产生了专门研究大气现象和过程，探讨其演变规律和变化，并直接或间接用于指导生产实践为人类服务的科学——气象学。

气象学是一门研究大气的科学。它是人们用来了解大气中各种现象的形成原因、形成时间及空间分布和变化规律的科学。从动力学、物理学、化学和生物学等方面研究大气中各种自然现象和过程，揭示它们的本质和内在联系及普遍规律。气象学的研究对象是大气中各种自然现象（风、云、晴、雨、干、湿、冷、暖、雷、电等）及其过程。气象学研究通常用气象要素（如温度、湿度、气压、风、降水、积冰等）来表示。对大气现象和过程进行定量的观测和分析，进而揭示其发生、发展的规律，是气象学的研究任务。运用这些规律预测未来大气的发展过程和局部控制天气的演变，充分利用环境资源，则是气象学的研究目的。

气象学在形成之初，内容十分广泛，几乎包罗万象。随着科学的发展、技术的进步以及应用的需求，气象学形成了许多分支。站在不同的角度，有不同的划分方式：按照传统的划分方法，气象学分为大气物理学、天气学、动力气象学、气候学、大气探测学；根据研究内容和研究方法，气象学分为理论气象学、实验气象学以及应用气象学。

本书讲述的内容是应用气象学的分支——航空气象学（Aeronautical Meteorology）。航空气象学与农业气象学、森林气象学、水文气象学、海洋气象学、污染气象学等共同作为气象学在实践中的应用，为社会生产及实践服务。

航空气象学是为航空服务的一门应用气象学科。它针对航空中所提出的关于气象方面的要求进行研究。其主要任务是研究气象要素和天气现象对航空技术装备和飞行活动的影





响,组织以预报为主的有效的天气保障,保证飞行安全和顺利完成飞行任务。航空气象学还包括航空气候统计,航空气象资料的整理编制、存储和检索等内容。

天气条件对飞机的起飞、航行、降落以及其他各种飞行活动有着不同的影响,飞机的设计制造和天气条件也有密切关系。在实际工作中,航空气象的主要任务是保障飞行安全,提高航行效率,在不同的天气条件下,有效地运用航空技术。

## 二、航空气象学的发展简史

### 1. 起源

20世纪初航空活动兴起之后,航空气象学开始萌芽。1903年12月17日,美国W.莱特和O.莱特兄弟在做人类首次飞行时,先用叶轮式风速表观测了地面风速,这是航空史上的第一次航空气象观测。1915年,美国气象局的一名官员乘坐军用飞机,在圣迭戈附近观测了山区的气流。当时人们认为飞机在铅直气流中的突然升降是跌入了“空气的洞穴”。

### 2. 早期

早期的航空气象学主要着眼于研究地面风和对流层下部的气流对飞行的影响。当时的航线天气预报只包括雷暴、总云量(3km以下)、地面风、高空风(3km以下)和能见度。20世纪20年代末,出现了无线电探空仪,人们开始能获取空中的温度和气压的资料,这对航空气象学的研究和发展有重要的促进作用。随着飞行高度的扩展,云、雾、雷暴、积冰、大气湍流、大气能见度以及它们的预报方法,都成为航空气象学研究的内容。

### 3. 第二次世界大战结束之后

第二次世界大战结束后,人们开始使用雷达探测强对流天气,这对保障飞行的安全有重大作用。20世纪50年代以后出现了喷气式飞机,其巡航高度一般可到9~12km,超音速运输机的巡航高度可达20km左右,飞机逐渐大型化,起飞着陆区和高空航线上天气条件的探测和预报成为重要的航空气象问题。随着天气仪器的更加完善,激光技术、天气卫星和电子计算机的使用,航空气象学的发展进入了一个新阶段。

### 4. 近代

航空气象服务始于20世纪20年代。1919年9月,国际天气组织(IMO)在法国巴黎召开第四届理事会,决定成立航空气象学应用委员会。1935年在波兰华沙召开的第七届理事会上决定把它改名为国际航空气象学委员会(简称ICAeM)。1951年3月,世界天气组织又将国际航空气象学委员会改名为航空气象学委员会(简称CAeM)。随着飞机性能的提高、空中交通流量的增大以及微电子技术的发展,航空气象服务的内容、方式和方法由早期的人工操作进入了自动化服务阶段,并建立了航空气象服务的标准。

## 三、我国航空气象工作概述

1939年,中华民国航空委员会设立空军天气总台;1947年成立民用航空局,下设气象科和为数不多的机场气象台。1949年新中国成立之后,建立了比较完善的航空气象组织,逐渐构成了装备有天气雷达、卫星云图接收装置、激光测云仪和移频通信、天气传真



机等先进设备的航空气象台站网，航空天气预报和航空气象服务方面开始有了较大发展。

近 20 年来，我国航空气象行业发展迅速，并积极采纳国际民航组织制定的服务标准和建设措施，建立了一套较完整的业务运行和服务体系，2005 年至 2007 年，民航局接连颁布《民用航空气象行业标准》《民用航空气象服务管理办法》《中国民用航空气象工作规则》《民用航空飞行气象情报发布与交换办法》等等。

#### 四、现代航空气象学的研究内容

现代航空气象学主要的研究内容包括航空气象学原理、航空气象探测、航空天气预报、航空气候和航空气象服务自动化等。对航空影响较大的气象问题如下：

**大气能见度：**云、雾、降水、烟、霾、风沙和浮尘等现象，都可使能见度降低，当机场的水平和倾斜的能见度降低到临界值以下而造成视程障碍时，飞机的起飞和着陆就会困难。当水平能见度小于 1500m 时，在具有仪表着陆设施的机场，要观测跑道视距距离（指在飞机起飞或着陆方向，飞行员能够看清跑道或高强度跑道灯光的距离）。在具有仪表着陆系统的机场上，飞机虽然可以在低能见度状况下着陆，但当跑道视距小于 400m、决断高度（一般用云高表示）低于 30m 时，飞机就难以着陆。观测斜视能见度，尚缺少有效的仪器，只能根据水平能见度来推断。

**大气湍流：**大气湍流可以使飞机在飞行时产生瞬间的或长时间的颠簸，当湍流尺度和飞机的尺度相当时，颠簸最剧烈。飞机对湍流的响应同飞行速度、飞行姿态和翼载荷等有关。强烈的湍流可使飞机失去控制，甚至可因过载造成机身结构的变形或断裂。对飞行影响较大的是晴空湍流、低空风切变和地形波。

晴空湍流是一种小尺度的大气湍流现象，多出现在 5000m 以上的高空。经常发生在急流区最大风速中心附近风速切变最大的地方，其铅直厚度只有几百米到千余米，约 50% 的晴空湍流的水平尺度小于 30000m，约 80% 小于 90000m。晴空湍流能造成持续性的飞机颠簸，由于它不伴有可见的天气现象，飞行员难以事先发现，因此对飞行的影响较大。晴空湍流的物理机制还不十分明了，还没有实用的预报方法。曾有人研究用红外线或激光探测航线前方的晴空湍流的机载仪器，但尚处于试验阶段。

低空风切变是发生在高度几百米以下的风切变。由于它影响飞机的空速，改变了飞机的升力，而使飞行高度突然发生变化，往往使已降低高度和正在减速着陆的大型飞机发生严重的飞行事故。雷暴、低空急流和锋面活动是造成低空风切变的主要天气条件。来自雷暴或对流性单体的强烈下冲气流，伴有强烈的风切变，这种现象的时间和空间尺度都非常小，对它的探测和预报都比较困难。

地形波是气流经过山区时受地形影响而形成的波状的铅直运动。气流较强时铅直运动比较强烈。J. 弗尔希特戈特根据气流和风的铅直分布，将地形波分成层流、定常涡动流、波状流和滚转状流等四种类型。地形波中的铅直气流可使飞机的飞行高度突然下降，严重的可造成撞山事故；地形波中强烈的湍流，可造成飞机颠簸；在地形波中铅直加速度较大的地方，可使飞机气压高度表的指示产生误差。在日常预报业务中还不能对地形波作出定量预报。

**积冰：**飞机飞经含有过冷水滴的云、冻雨和湿雪区时，飞机表面的突出部位有结冰的



现象。积冰将改变飞机的气动外形，增加飞行阻力，耗费燃油，并使皮托特静压系统仪表和通信设备失灵。飞机结冰与云中的含水量和温度有关，对于螺旋桨飞机来说，最容易发生结冰的气温是 $-10^{\circ}\text{C}$ 左右，在 $-30^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ 有时也容易发生结冰。对于喷气式飞机来说，高速飞行的动力增温，使机身表面温度高于大气温度，因此发生结冰的气温与飞行速度有关。积冰曾经是威胁飞行安全的主要问题之一。20世纪50年代以后，飞机的巡航高度一般都高于容易发生结冰的高度，而且机上都有防冰装置和除冰装置，但在起飞、爬高、空中盘旋和下滑时，仍然可能产生比较严重的积冰。

雷暴：一种发展旺盛的强对流性天气。云中气流的强烈铅直运动可使飞机失去控制；云中的过冷水滴，可造成严重的飞机结冰；冰雹可打坏飞机；闪电对无线电罗盘和通信设备可造成干扰和破坏；雷击能损伤飞机的蒙皮。因此雷暴区历来被视为“空中禁区”，禁止飞机穿越。自从气象雷达出现以后，人们能够及时而准确地发现雷暴，并对其进行监视和避让。一般运输飞机上都装有气象雷达，从而减小了雷暴对飞行的影响。但是在起飞和着陆时，机场上空的雷暴对飞行仍有较大威胁。现代飞机使用了大量的电子设备，特别是控制飞行状态的电子计算机，由于雷电对这些设备能造成严重的破坏，因此直接影响着飞机的正常航行。雷暴属中小尺度天气系统，难以准确预报。

高空风和气温：高空风和气温的时间、空间分布变化较大，实际大气温度和飞机设计所依据的标准大气温度也有很大差异。在高速飞行的情况下，气温的变化可引起空气压缩性的改变，从而影响飞机的空气动力特性。制订长途航线飞行计划时，为了缩短飞行时间和节约燃油，必须根据高空风和实际大气温度的观测资料和预报选择最佳航线、最佳的飞行高度和飞行速度。此外，地面风向、风速特别是大风和风的阵性变化对飞机的起飞、着陆有着严重的影响。这也是航空气象学研究的课题。

## 五、航空气象学研究机构和产品

航空气象服务通常由航空气象观测哨、机场气象台（站）、区域航空管制中心气象室和国家范围的航空气象中心等各级组成。根据民用和军用的不同需要，各国一般都有民航和空军两套航空气象服务机构。世界性的航空气象服务机构有国际民用航空组织的区域气象中心（如欧洲区、亚洲区等）。

航空气象技术装备主要包括航空气象观（探）测设备、气象情报传递和终端设备、各类计算机以及一些特殊装备。气象卫星和气象雷达是现代重要的航空气象设备。气象卫星能提供可见光云图、红外云图、空中风场、高空急流位置和强度、气温和水汽的垂直分布等。通过对卫星资料的分析，可获得准确的国际航线大气风的预报，从而使远程航行的意外事故大为减少。气象雷达包括测风雷达、测云雷达、测雨雷达等多种类型，其中测雨雷达是掌握对飞行安全威胁严重的强对流天气的有效工具。

航空气象情报主要有各种观（探）测资料，包括空气温度、湿度、大气压力、风向、风速、云和能见度等的实测数据，以及气象卫星资料和气象雷达图片等。此外还有各种天气报告和航空天气预报、各种航空危险天气警报和通报等。这些情报是实施气象保障的基本依据，其中航空天气预报是直接提供给空勤人员和航空管制部门的重要气象情报。现代航空天气预报正向客观化、定量化和短时化方向发展。



## 第二章 地球和大气

### 一、大气的成分

地球由水圈、岩石圈、大气圈及生物圈组成。包围在地球表面的整个空气层，称之为大气。大气中发生的各种物理现象（如风、云、雨、雪、雷、电等）和各种物理过程（如增热、冷却、蒸发、凝结等）都与大气本身的性质密切相关。

地球大气是多种物质的混合物，由干洁空气、水汽、悬浮尘粒和杂质组成，如图 2-1 所示。在距地表 85km 以下的各种气体成分中一般可分为定常成分和可变成成分两类。定常成分：各部分之间大致保持固定比例，如  $N_2$ 、 $O_2$ 、Ar、Ne、Kr、Xe、He；可变成成分：这些气体在大气中的比例随时间、地点而变，如  $CO_2$ 、 $O_3$ 、CO、 $CH_4$ 、 $SO_2$ 。

#### 1. 干洁空气

大气中除固体杂质和水汽之外的全部混合气体，称为干洁空气。干洁空气中氮和氧容积占 99.04%，加上氩，三者合占 99.97%，其他气体仅占 0.03%。干洁空气中大多数气体的临界温度低于自然情况下大气中可能出现的最低温度， $CO_2$  的临界温度虽然较高，但它所对应的压力却大大超过其实际分压力。因此，干洁空气中所有成分都呈气体状态。

从大气探测资料得知：从地面到 85km 高度附近的大气层，由于强烈的垂直混合作用，大气均匀混合，其主要成分的比例几乎是不变的，因此叫匀和层，又称为混合层。其气体成分可分为：以氮、氧、氩为主的不可变气体，其中各成分所占比例基本上不随时间、空间而变化；以二氧化碳、臭氧、水汽为主的可变气体，它们所占比例有很大变化。110km 以上的大气层，因气体扩散分离和分子离解作用超过湍流扩散作用，使得大气成分经中立分离后，轻的在上，重的在下，干洁空气的平均分子量随高度的增加而减小，称非均匀和层，又称异成层。85~110km 的气层是从湍流混合为主过渡到分子扩散为主的过渡带，称为湍流层顶。

#### (1) 氮和氧

常温下  $N_2$  的化学性质不活泼，不能直接被植物吸收和利用，只能通过豆科植物的根瘤菌部分固定于土壤中。 $N_2$  对波长为 0.03~0.13  $\mu m$  的太阳辐射进行选择吸收。氮是植物制造叶绿素的原料，也是制造蛋白的原料。地球上生命体的起源和发展都同氮组成的

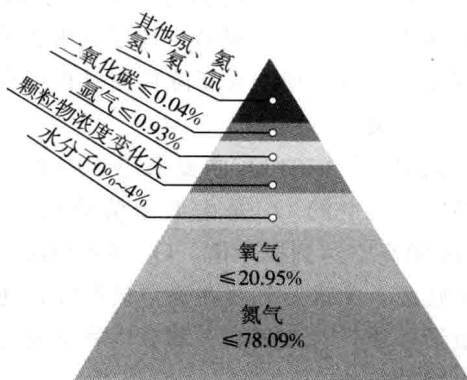


图 2-1 大气组成成分图



物质有密切联系。氮还能冲淡大气中氧的浓度，使氧化作用不过于激烈。

O<sub>2</sub> 是生物赖以生存和繁殖的必要条件，除了游离态的外，还以硅酸盐、氧化物和水等化合态存在，在高空还有臭氧及原子氧。O<sub>2</sub> 在波长小于 0.24 μm 的辐射作用下分解，大气中臭氧层的形成就和氧的分解有关。氧的化学性质活泼，对物质的燃烧、腐烂、分解以及大气中的化学变化都起着重要的作用。氧气在医疗、工业等许多方面都有广泛的用途。氧气对飞行也有重要影响，由于氧气的分压随高度而降低，当高空氧的分压过低时，人体没有足够的氧气补充，就会产生疲劳感，进而视力损伤，甚至出现无意识症状。

### (2) 二氧化碳

CO<sub>2</sub> 离地表 20km 以下，其平均浓度约为 0.03%，向高空显著减少。CO<sub>2</sub> 主要来自火山喷发、动植物的呼吸以及有机物的燃烧、腐败等。在人口稠密的工业区，其浓度明显增高，达 0.05%~0.07%；在海洋上和人口稀少地区，其浓度大为减少。而海水中 CO<sub>2</sub> 的浓度则明显超过大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度。CO<sub>2</sub> 的浓度超过 0.2%~0.5% 会对生物有害。CO<sub>2</sub> 能吸收和放射长波辐射，对大气和地表温度有明显影响，起着“温室”作用；另外，CO<sub>2</sub> 浓度的升高，将导致平流层放射更多的长波辐射，引起平流层的冷却。CO<sub>2</sub> 可供植物养分，是绿色植物在新陈代谢过程中合成碳水化合物和其他物质的重要原料。

### (3) 臭氧

低层大气中的 O<sub>3</sub> 主要来源于闪电。闪电不经常发生，所以低层 O<sub>3</sub> 含量极少，而且不稳定。高空的 O<sub>3</sub> 是由太阳紫外线作用形成的，所以含量比低层大气多，并在 20~25km 的高空达到极大值。O<sub>3</sub> 强烈地吸收太阳紫外线，对大气有增温作用，并在高空形成一个暖区。大量紫外线在高空被吸收，使地面上的生物免受危害。穿透大气层到达地表的少量紫外线，对人类和大部分生物是有益的。O<sub>3</sub> 层的破坏将引起一系列不利于人类的气候生物效应。

臭氧的浓度随高度的分布，具有不连续或突变特征。大气中 O<sub>3</sub> 主要存在于 10~50km 的大气层中，绝大部分集中在平流层，在对流层中只占 10% 左右。近地面层臭氧含量少，从 10km 高度开始浓度逐渐增加，到 20~30km 高度浓度达到最大值，称为“臭氧层”，再往上逐渐减少，到 50km 以上就极少了。这是由于不同高度上 O<sub>3</sub> 的形成条件不同造成的。

## 2. 水汽

水汽主要来源于海洋、江河湖沼和土壤，以及潮湿物体表面的蒸发和植物的蒸腾。大气中的水汽含量极不固定，随时间、地点、条件而不同。其所占容积变化范围为 0%~4%。观测结果表明，在 1.5~2km 高度，水汽含量只及地面的 1/2；在 5km 高度，水汽含量只相当于地面的 1/10，再往上更少。水汽含量虽然不多，但它在大气温度变化范围内可以发生汽态、液态和固态三相转化，常见的云、雾、雨、雪等天气现象，都是水汽的表现和存在形式。

水汽能强烈吸收和放射长波辐射，也能吸收、散射和反射部分太阳辐射。水汽在变相过程中能吸收或释放热量。其总趋势是使大气增暖，减少地面热量的散失，这对防止地面夜间急剧冷却、保持热量平衡有重要作用。

## 3. 固体杂质

悬浮在大气中的固体杂质主要有烟粒、尘埃、盐粒等，它们的半径一般为  $10^{-2} \sim 10^{-8}$  cm，



多集中于低层大气中。烟粒主要来源于生产、生活方面的燃烧；尘埃主要来自经风的吹扬进入大气的地表松散微粒，以及火山爆发后产生的火山灰、流星燃烧的灰烬；盐粒则主要是由海洋波浪飞溅进入大气的水滴被蒸发后形成的，陆地上空固体杂质的含量多于海洋上空，城市多于乡村，冬季多于夏季，白天多于夜晚，愈近地面愈多。固体杂质是大气中水汽凝结的必要条件；能吸收部分太阳辐射，又可阻挡地面长波辐射，对大气和地表温度有一定影响；其含量多少，还直接影响大气能见度的高低。

## 二、大气的结构

大气总质量大约  $5.15 \times 10^{15} \text{ t}$ 。受地球引力作用，大气质量低层密集。各层大气在大气总质量中所占的比例为：5km 以下占 50%，10km 以下占 75%，16km 以下占 90%，20km 以下占 95%，30~35km 以下占 99%。近地面的大气密度平均为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ，密度随高度增加迅速减小，在 100km 高度上只有  $5.6 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ ，在 1600km 高度上，减小到只有海平面上空气密度的百万亿分之一。但就这样小的密度，也还比星际气体的密度大得多，可见地球大气伸展之远。

观测表明，大气的物理性质无论在垂直方向还是水平方向上，都是不均匀的。不同高度范围内的大气层和不同区域的空气具有各种不同的特点。根据大气本身的物理和化学性质，可将大气分为若干层。如按大气的成分结构，大气分为均匀层和非均匀层；如按大气的压力结构，大气分为气压层和外大气层（逸散层）；按大气的电离结构，大气分为电离层和磁层。但应用最广泛的是按大气的温度结构分层，按照大气温度的垂直分布特点，大气分为对流层、平流层、中间层、暖层和外层（散逸）层，如图 2-2 所示。

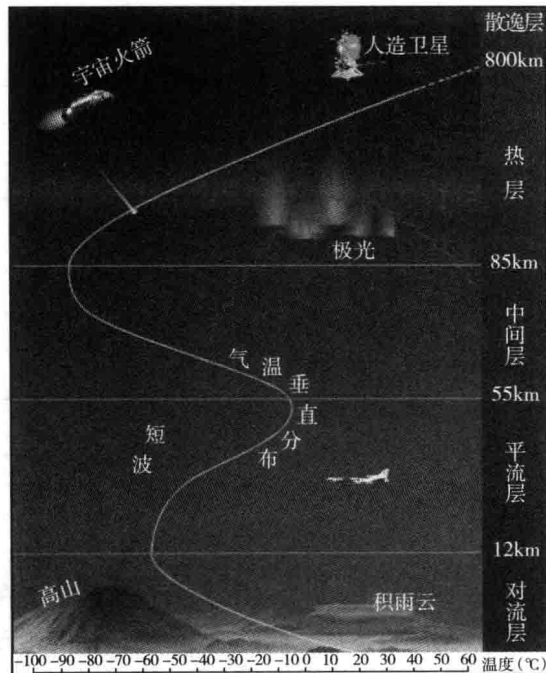


图 2-2 大气的结构图



### 1. 对流层

对流层是靠近地面的大气最底层，集中了大约 75% 的大气质量和 90% 以上的水汽质量。其下界是地面，上界则随纬度和季节的不同而变化。就其平均高度而言，在高纬度地区为 8~9km，在中纬度地区为 10~12km，在低纬度地区为 17~18km。虽然对流层相对于整个大气层是很浅薄的一层，它的厚度还不及整个大气厚度的 1%，但是由于地球的引力作用，对流层集中了大约 3/4 的大气质量、90% 以上的水汽质量，以及几乎全部的气溶胶粒子。对流层受地表影响最大，层内对流运动旺盛，大气中主要的天气现象，如云、雾、降水等都发生在这一层，所以对流层是气象学研究的重点层。

对流层有三个主要特性，一是温度随着高度的增加而降低。对流层空气直接吸收太阳辐射很少，主要吸收地面发射的红外辐射。低层大气受到地面的热量作用，通过空气的对流和湍流运动，将热量输送到上层空气。所以在对流层中，一般情况下，温度随高度的增加而降低。气温直减率在不同的地区、季节、高度是不一致的，平均而言，高度每升高 100m，气温下降 0.65℃。二是对流层大气具有强烈的对流运动和湍流运动。这是由于地面不均匀受热所引起的。这种垂直混合作用，使高层和低层的空气进行交换，近地面层的热量、水汽和气溶胶粒子能向高层输送，对水汽凝结现象、大气能见度等都有很大的影响。三是温度和湿度等气象要素水平分布不均匀。不仅不同的纬度地区有明显的不同，即使在同一纬度上也常常有明显差异。特别是冷暖空气交汇的区域，这种差异更为明显。这是地面的海陆和地形等不均匀性对大气的影晌所致，主要表现在气团和锋的活动上。对流层大气运动往往伴有剧烈的天气变化，对人类活动产生很大影响，对飞行也易造成危害。

按照气流和天气现象的特点，还可以把对流层细分为下层、中层、上层和对流层顶等四层，如图 2-3 所示。

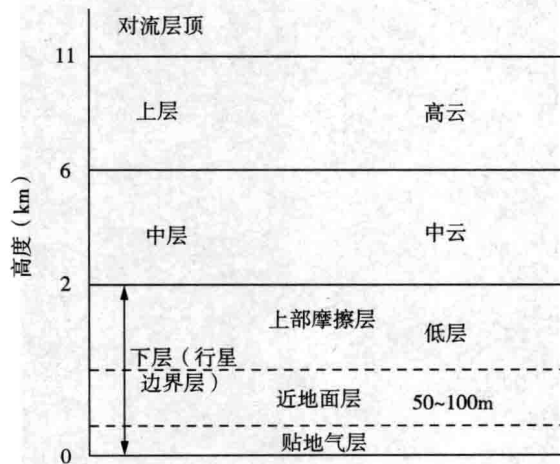


图 2-3 对流层结构分层图

下层自地平面至 1~2km 高度，为摩擦层，又称行星边界层。在 2km 高度上平均温度为 5℃，这层气流受地面摩擦作用很大，空气的湍流运动很强，通过湍流运动把地面的热量和水汽往高层输送，并把高层的动量往下输送。该层内各气象要素都有明显的日变化，低云和雾等现象经常出现。



行星边界层以上的大气层，即中层和上层，称为自由大气层。在自由大气层中，地球表面的摩擦作用可以忽略不计。中层为 2~6km 高度，在 6km 高度上的平均温度为  $-13.5^{\circ}\text{C}$ 。该层是天气演变的主要场所，强烈的对流云系和降水多在此层形成。上层自 6km 高度到对流层顶部，平均温度为  $-48.5^{\circ}\text{C}$ 。该层受下垫面影响更小，水汽含量很少，高云和积雨云的顶部一般出现在该层，都是由冰晶和过冷水滴组成。

在对流层和平流层之间，还存在一个厚度为数百米到 1~2km 的过渡层，称为对流层顶。对流层顶内气温随高度不变或少变。对流层顶对对流层中的对流运动有阻挡作用，从而使下层输送上来的水汽、气溶胶粒子等聚集在其下方，并使该处大气的混浊度增加，此时可以观测到积雨云的顶部被平衍成砧状的情况。

### 2. 平流层

平流层亦称同温层，是地球大气层中上热下冷的一层。此层分为不同的温度层，中、高温层置于顶部，而低温层置于低部。它与位于其下贴近地表的对流层刚好相反，对流层是上冷下热的。在中纬度地区，平流层位于离地表 10~50km 的高度，而在极地，此层则位于离地表 8km 左右。

在平流层内，气温随高度升高而增加得少，下半部气温随高度升高而增加，上半部气温随高度升高而增加得多，到平流层顶可达  $0^{\circ}\text{C}$ 。平流层中水汽稀少，不会形成类似对流层中那样的云。平流层的水平风速较大，在平流层底部，特别是两级地区的冬季，80m/s 以上的强风时有出现。

平流层中大气层结构稳定，垂直运动受到抑制，在这里飞行空气阻力小，飞机不会产生剧烈颠簸，对飞行有利。但这里天空暗淡，不受阳光直射的物体更不易看清，因此目测比较困难。另外，大气密度小，飞机的空气动力性能受到影响，操纵时飞机反应迟缓，因此对飞行不利。

### 3. 中间层

中间层又称中层，即自平流层顶到 85km 之间的大气层。该层内因臭氧含量低，同时，能被氮、氧等直接吸收的太阳短波辐射大部分被上层大气所吸收，所以温度垂直递减率很大，对流运动强盛。中间层顶附近的温度约为 190K；空气分子吸收太阳紫外辐射后可发生电离，习惯上称为电离层的 D 层；有时在高纬度、夏季、黄昏时有夜光云出现。

### 4. 热层

热层，即中间层顶（约 85km）至 250km（在太阳宁静期）或 500km 左右（太阳活动期）之间的大气层。热层又称暖层。从热层底部向上，大气温度迅速增加，达到温度梯度消失时的高度，即为热层顶。热层顶高度随太阳活动变化很大，通常为 300~500km。热层几乎吸收了波长短于 1750 埃的全部太阳紫外辐射，成为主要热源，热层温度结构主要受太阳活动的支配。这一层温度随高度增加而迅速增加，层内温度很高，层顶温度可达 1500K，昼夜变化很大，热层下部尚有少量的水分存在，因此偶尔会出现银白并微带青色的夜光云。

### 5. 散逸层

散逸层亦称“外层”“逃逸层”，是地球大气的最外层。热层（暖层）以上的大气层称





为逃逸层。这层空气在太阳紫外线和宇宙射线的作用下，大部分分子发生电离，使质子和氦核的含量大大超过中性氢原子的含量。逃逸层空气极为稀薄，其密度几乎与太空密度相同，故又常称为外大气层。由于空气受地心引力极小，气体及微粒可以从这层飞出地球引力场进入太空。逃逸层是地球大气的最外层，该层的上界没有确定。实际上地球大气与星际空间并没有截然的界限。逃逸层的温度随高度增加而略有增加。

从航天考虑，通常把大气结构分成两个部分：150km 以下为低层大气或稠密大气；150km 到 930000km 称为近地宇宙空间。在低层大气中飞行，由于飞行器受到很大的空气阻力，如不用动力装置就不能围绕地球飞行。但是，在 150km 以上，不需要开动发动机，飞行器也能依靠惯性绕地球飞行。

### 三、国际标准大气 ISA

#### 1. 人为规定标准大气的意义

飞机在大气中飞行，必然会与作为飞行介质的环境大气产生互相影响。因此，在确定飞行参数时，必须把飞机与环境大气看成统一的整体。飞行中显示的各种空气动力、发动机推力、燃料消耗量、飞行速度、升限和某些领航仪表的示度等，都与大气物理状态有关。在密度大的气层中，大气状态的主要物理特性对飞机飞行的影响更为突出。

技术气象要素的空间（水平和垂直）分布及其随时间的变化表明，飞机和其他飞行器的飞行技术数据，随着大气环境的不同，变化范围可以是相当大的。因此，在设计飞行器及其设备和仪表时，在修正飞行试验数据时，都要以预先规定好的随高度固定分布的大气状态物理特性为依据。也就是说，要使用某种与昼夜、季节以及飞行地点无关的，在所有情况下其物理特征分布都固定的大气，这样的大气叫作标准大气。采用标准大气，能够得到可以相互比较的仪表高度、飞行试验数据、空气动力计算数值、地球物理测量数值和气象测量数值。

#### 2. 标准大气的特性

标准大气（Standard Atmosphere）又称参考大气（Reference Atmosphere），能够反映某地区（如中纬度）垂直方向上气温、气压、湿度等近似平均分布的一种模式大气。它能粗略地反映中纬度地区大气多年年平均状况，并得到一国或国际组织承认。标准大气在航空领域有相当重要的作用，飞机与空间飞行器的性能计算和设计、遥感探测的背景大气、压力高度标准、弹道制表及气象制图基准等都需要用到标准大气这一重要参数。

在世界的不同地区，大气随高度和水平位置的变化是完全不同的。为此，需要采用一组平均的条件，即国际标准大气（ISA）。国际标准大气（ISA）包括大气温度、压力和密度以及大气成分和大气物理参数的垂直分布。它是理想化的，静态的和最接近实际大气的模型。它的分布为：（1）标准海平面重力加速度为  $9.80665\text{m/s}^2$ ；（2）海平面温度为  $15^\circ\text{C}$ ，气压为  $1013.25\text{hPa}$ ，密度为  $1.225\text{kg/m}^3$ ；（3）地面到  $11\text{km}$  为对流层，气温垂直递减率为  $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ ，近似多元大气；（4） $11\text{km}$  到  $20\text{km}$  为平流圈，温度不变，即为等温大气；（5） $20\text{km}$  到  $32\text{km}$ ，气温垂直递减率为  $-0.1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。图 2-4 解释了标准大气中温度的变化：