

飞行气象学

FEIXING QIXIANG XUE

章澄昌 编著



气象出版社

飞行气象学

章澄昌 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书结合飞机驾驶需要,全面、系统地讲述了气象学和天气学方面的基本知识、基础理论,分析了大气环境和天气过程对飞行的影响以及应采取的措施和飞行气象保障等方面的问题。对充分运用气象条件、避开不利天气,提高飞行效益,顺利完成飞行任务具有重要作用。

本书是为运输机飞行人员、航管人员编写的,可作为大学本科和硕士学位课程使用,也可供气象人员、飞行保障人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行气象学/章澄昌编著. —北京:气象出版社,2000.8

ISBN 7-5029-2985-1

I. 飞… I. 章… III. 航空学:气象学 N.V321.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第41978号

飞 行 气 象 学

章澄昌 编著

责任编辑:王小甫 终审:周诗健

封面设计:华 艺 责任技编:刘祥玉 责任校对:张若军

气象出版社出版

(北京市海淀区白石桥路46号 邮政编码:100081)

北京市白河印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:12.375 字数:320千字

2000年8月第一版 2000年8月第一次印刷

印数:1~3000

ISBN 7-5029-2985-1/P·1037

定价:25.00元

前 言

飞行气象学是运输飞机驾驶专业的专业课程。通过教学,使飞行学员和航管学员掌握必要的气象学、气象观测学和天气学的基础知识、基本概念和基本理论,了解有关气象要素和天气现象的变化规律及其对飞行的影响,掌握主要天气系统、天气变化过程的一般特征,并应用于飞行驾驶和飞行指挥,进行适应性飞行操纵和针对性调节和控制,具有识别和正确使用有关天气预报、气象情报的图表资料的能力,为趋利避害,确保飞行安全、准点、舒适、顺利打下良好的基础。

近年来国内自编和选译了一批航空气象学方面的教材,但一般主要针对航空部门的气象专业人员,其内容侧重和篇幅取舍,不完全适用于飞行人员和航管人员。在这些教材中,有关气象要素、天气现象、天气系统的基础知识、基本概念未作论述,而在天气预报的原理、方法方面篇幅较多,同时关于航空天气图、航空天气预报的释用、表述和应用方面介绍得不很充分。有关这些我在本教材中都作了增删、调整,以贴近飞行人员和航管人员的需要。为了有所区分,使之更加醒目,我把这本教材定名为飞行气象学,国外有关这方面的教材也有选用类似的书名的。

编著者长期从事大气探测、气象学、云物理学和人工影响天气、大气气溶胶等课程的教学和研究工作,并相应编著出版了一系列教材。1987年底本人自南京气象学院调至北京气象学院,并兼任大气科学系主任,期间北京气象学院应中国民航总局科教司的要求,举办民用航空专修科(学制二年),在全国招生50人。当时无合适的教师承担航空气象学课程(70学时)的教学任务。主要原因是考虑到只办一届,备课编教案工作量比较大,属于新开设的专业课,最后只得由我承担。其后为气象专业的本科生开设

航空气象选修课(30~40学时),共计三届。于1994年起兼任北京航空航天大学飞行学院的航空气象学课程至今。

为准备航空气象学课程和后来的以培养具有工学学士学位的飞行员为目标的飞行气象学课程,我先后参考国家图书馆、中国气象局图书馆、总参气象局图书馆以及北京气象学院图书馆有关图书、期刊,重新编写教材的章、节细纲,经过十几轮的教学实践,不断吸收、充实、调整、修改,遂写成目前这本教材。为了适应运输机驾驶高层次的培养要求,本教材在有关内容方面进行了适当的加强和提高,以适应工学硕士学位课程的要求。

本教材共分三编九章,第一编属于气象学基础,讲述与飞行有关的大气环境的基本知识、基本概念和基础理论,注意紧密结合飞行活动的要求和对飞行的影响;第二编着重讲述主要天气对飞行的影响,包括能见度概念、影响因子和变化特征、锋面天气特征及其飞行,急流、晴空湍流、低空风切变等重要的飞行危险天气,飞机飞行中常遇到的飞机颠簸和飞机积冰以及飞行尾迹这些特殊的飞行天气,最后讲述高空飞行和特殊地表面上空的飞行;第三编主要是航空天气预报及其应用,包括天气预报的基本原理和方法、概述航空天气预报、以及表述这类信息的方式方法,还概略介绍了航空气象导航的基本概念,并对气象卫星图像和气象雷达测量进行了较为详细的介绍。书末附录列举了重要的参考资料备查阅。

本教材在准备教学、写作和出版过程中,北京航空航天大学飞行学院院长王小宛教授给予大力支持和鼓励,张永顺教授审阅了全书、南方航空公司领导非常热情支持和关怀,作者在此一并致谢。

由于编著者的专业和学识水平所限,本教材难免偏颇、舛误和不当之处,恳请读者不吝指正,本人感激不尽,也便于在教学实践中改进。

编著者

2000年2月

目 录

前言

第一编 飞行气象学基础

第一章 大气的组成、结构和性质	(3)
§ 1 大气的组成	(3)
§ 2 大气的结构	(5)
§ 3 大气的性质	(13)
§ 4 标准大气	(16)
第二章 主要气象要素及其变化、分布和对 飞行的影响	(20)
§ 1 空气温度	(20)
§ 2 大气压强	(31)
§ 3 空气湿度	(46)
§ 4 大气中的风	(52)
第三章 重要天气现象的形成及其对飞行的影响	(80)
§ 1 云	(80)
§ 2 降水	(104)
§ 3 地面和近地面的凝结、凝华和冻结现象	(109)
§ 4 产生视程障碍的天气现象	(110)
§ 5 雷暴及其对飞行的影响	(113)

第二编 影响飞行的主要天气

第四章 飞机飞行的气象条件	(125)
----------------------------	---------

§ 1	影响飞行的主要天气	(125)
§ 2	能见度和跑道视程	(126)
§ 3	飞行方式和最低气象条件	(137)
第五章	锋、急流和低空风切变	(144)
§ 1	锋面天气及其对飞行的影响	(144)
§ 2	急流及其对飞行的影响	(155)
§ 3	危及飞行安全的低空风切变	(161)
第六章	飞行颠簸、飞机积冰和飞行尾迹	(189)
§ 1	大气湍流和飞机颠簸	(189)
§ 2	飞机积冰	(211)
§ 3	飞机尾迹	(230)
第七章	高空和特殊地表面上空的飞行	(233)
§ 1	高空飞行的气象条件	(233)
§ 2	热带和海洋的上空飞行	(243)
§ 3	山地、高原和荒漠上空的飞行	(249)

第三编 航空天气预报及其应用

第八章	天气图和辅助天气图	(257)
§ 1	天气图底图	(257)
§ 2	地面天气图	(261)
§ 3	高空等压面图	(268)
§ 4	辅助天气图	(269)
§ 5	气象卫星云图和气象雷达回波图	(273)
第九章	航空天气预报	(311)
§ 1	天气预报的基本原理和方法	(311)
§ 2	航空天气预报	(317)
§ 3	航空气象预报表和预告图	(322)
§ 4	航空天气预报的应用	(334)

附录 I	航务要求的预报准确性及观测准确度·····	(341)
附录 II	航空天气电码型式·····	(345)
1	航空天气实况电码 ·····	(345)
2	选定的特殊航空天气实况报告电码 ·····	(349)
3	趋势型着陆预报电码 ·····	(350)
4	航站预报电码 ·····	(350)
5	航线预报电码 ·····	(353)
6	航空区域预报电码 ·····	(356)
7	航空天气报告电码 (GD—21 I) 和危险天气 通报电码 (GD—22 I) ·····	(360)
附录 III	机场特选报标准及其他标准·····	(365)
附录 IV	飞行气象缩略语词汇·····	(375)
参考文献	·····	(380)

第一编

飞行气象学基础

第一章 大气的组成、结构和性质

地球表面的外层是空气，受地球重力作用，围绕地球占有一定的空间，称为大气 (Atmosphere)，它是地球整体的第二大物质圈 (除陆圈)，对航空来说非常重要，因为飞机就在作为介质的大气中飞行。

§ 1 大气的组成

地球大气是由多种气体组成的混合气体，还包含极少量的呈悬浮状态的固态、液态微小颗粒物质称为大气气溶胶质粒 (Atmospheric Aerosols)。

据研究，在86 km以下，大气的气体成分可分为两类：一类是常定成分，各成分之间的相对比例大致不变，如表 1.1 所示；另一类是可变成分，其含量随时间和位置而改变，主要有水汽、二氧化碳 (CO_2) 和臭氧 (O_3)，其中尤以水汽产生的变化最大，并可在大气环境的温度、气压条件下发生相态的变化。

由表 1.1 可见，大气成分虽然很多，但主要成分是氮 (N_2) 和氧 (O_2)，若再加上氩 (Ar)，三者合在一起的体积混合比达 99.96% 以上，其余的气体所占不足 0.5%。

大气低层的水汽含量有时可多达 7%，而且在大气温度变化范围内它是唯一可发生相态变化的成分。因而它是天气变化的最主要角色，并通过辐射的吸收和反射以及潜热输送在大气能量传输中起重要作用。

二氧化碳主要源于有机物的燃烧和腐烂，随着工业的发展和人口增长，空气中的二氧化碳含量逐年增加，它具有强烈的红外

表 1.1 86 km 以下地球大气的气体成分

成分			分子式	分子量	体积混合比	相对于干空气的密度
主要成分	常定	氮	N ₂	28.013 4	78.084%	0.967
		氧	O ₂	31.998 8	20.946%	1.105
		氩	Ar	39.948	0.934%	1.379
	可变	水汽	H ₂ O	18.016	0~7%	0.622
		二氧化碳	CO ₂	43.999	348 ppm* (1987), 年均增率 0.37%	1.519
微量成分	常定	氖	Ne	20.179	18.18 ppm	0.697
		氦	He	4.002 6	5.24 ppm	0.138
		氪	Kr	83.80	1.14 ppm	2.893
		氙	Xe	131.30	0.087 ppm	4.533
	可变	甲烷	CH ₄	16.04	1.7 ppm (1987), 年均增率 0.8%	0.554
		氢	H ₂	2.016	0.4~1.0 ppm	0.069 6
		臭氧	O ₃	47.998	0.4 ppm	1.657
		氧化氮	N ₂ O	44.01	0.3 ppm (1987), 年均增率 0.3%	1.519
		一氧化碳	CO	28.01	0.01~0.2 ppm	0.967
		二氧化硫	SO ₂	64.06	0~0.01 ppm	2.212
		氨	NH ₃	17.03	0.002~0.02 ppm	0.588
		硫化氢	H ₂ S	34.07	(2~20) × 10 ⁻³ ppm	1.176
		二氧化氮	NO ₂	46.01	(1~4.5) × 10 ⁻³ ppm	1.588

* ppm 百万分率 (10⁻⁶)

辐射吸收和反射作用，是主要的“温室气体”(Greenhouse Gas)。

臭氧(Ozone)主要通过太阳紫外辐射在高层使氧气分解，由氧原子和氧分子化合而成，主要分布在10~50 km的高空，极大值出现在20~25 km附近，称为臭氧层(Ozonosphere)。臭氧强烈吸收太阳紫外辐射，具有局地增温作用，在高空飞行时，有时应考虑太阳紫外线可能对人造成的伤害进行防护。

大气中的众多微量成分，如二氧化硫、一氧化碳、碳氢化合物、硫化氢、氨和气溶胶质粒等作为大气中的污染物，部分来源于火山喷发，主要是人类活动造成的产物，它们不仅危及人类健康，而且影响环境、生态和天气气候的变化，高空的火山尘有时也对飞行造成威胁。

气象学中常把不含水汽和气溶胶质粒的大气称为干洁大气，或简称为干空气(Dry Air)，它是制定标准大气的基本假设。在标准状况($t = 0^{\circ}\text{C}$, $p = 1\,013.25\text{ hPa}$)下，干空气的密度为 $1.293\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在86 km以下，大气维持湍流混合平衡，各成分之间呈均匀混合，此时可把干空气视为平均分子量为28.964 4的单一成分的空气。

§ 2 大气的结构

2.1 大气的垂直分层

探测发现，地球大气的成分、温度以及其他物理属性在垂直方向随高度变化很大，而在水平方向却比较均匀，这同地心引力随距离平方成反比不无关系，常把这类变化作为大气分层的依据。主要的分层方法有：1) 按大气温度随高度的分布特征，把大气分为对流层、平流层、中间层、热层和外大气层；2) 按大气成分的变化，把大气分为均质层(Homosphere, 86 km以下)和非均质层(Heterosphere, 86 km以上)；3) 按空气的电离特征，把大气分为中性层(Neutrosphere, 60 多千米以下)和电离层(Iono-

sphere, 60 多千米以上)。如图 1.1 所示。飞机主要在对流层和平流层低层中飞行, 下面将主要对这两个层次作一概述。

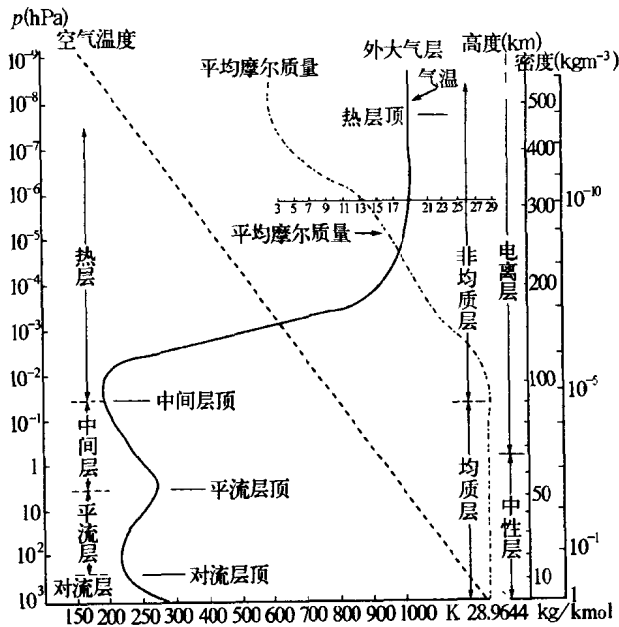


图 1.1 大气垂直分层

2.1.1 对流层 (Troposphere)

由于地球表面吸收太阳辐射相对较强, 地表面相对于其上的空气来说是热源, 通过长波辐射和湍流热交换, 地表面的热量向其上的空气层传递, 故对流层中的空气温度随高度增加而降低, 常以高度每增加 1 km, 温度降低的度数 ($^{\circ}\text{C}$) 来表示气温随高度的分布, 称为铅直温度递减率 (Lapse Rate of Temperature), 常用 $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$ 表示。对流层中 γ 的时空变化甚大, 平均约为 $\gamma = 6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。由于空气的运动和空气相对于地表面的不同热状况, 可造成空气中温度随高度分布的不同特征, 除了温度随高度增加

而降低外，也可出现温度随高度不变，即等温气层，以及温度随高度增加而增高的现象。由于对流层中一般表现为温度随高度递减，故把温度随高度递增称为逆温（Inversion），并把温度随高度递增的气层称为逆温层（Inversion Layer）。

对流层从地表面开始，其上界随纬度和季节而变化，低纬区约 17~18 km；中纬区约 11~12 km；高纬区约 8~9 km。夏季上界较高，冬季较低。如图 1.2 所示。

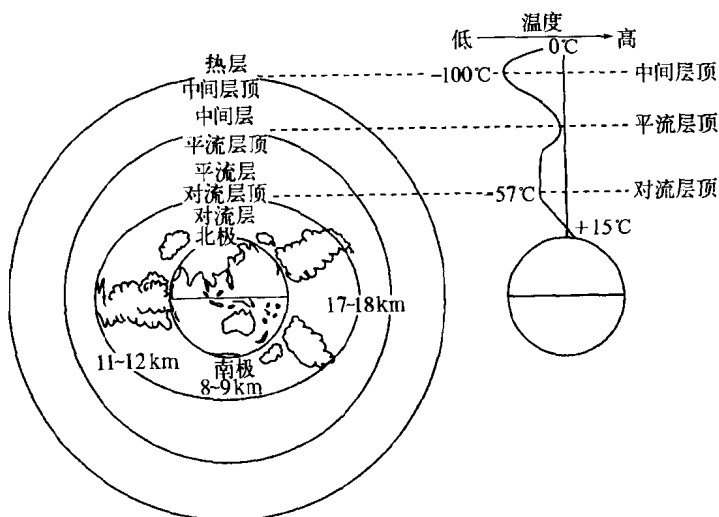


图 1.2 对流层顶高度随纬度的变化

对流层集中了约整个大气质量的 3/4 和几乎全部水汽。对流活动频繁，且有时较强烈，此即该层命名的依据。风、云、雨、雪、雷电等天气现象都发生在此层内。

对流层受地表面的影响最明显，自地表面向上到高度 1 000~1 500 m，空气明显地受地表面的摩擦作用的影响，称为摩擦层或行星边界层（Frictional Layer or Planetary Boundary Layer）。摩擦层以上的大气，称为自由大气（Free Atmosphere），在自由大气中地表面的摩擦作用可以忽略。由于地表面的特征和性质差异很

大,使得对流层空气的物理属性,如温度、湿度、风的水平分布很不均匀。

2.1.2 平流层 (Stratosphere)

平流层从对流层上界开始向上一直到约55 km高度。该层空气中气流平稳,垂直混合非常微弱。其温度分布初始随高度增加而不变或微升,约从30 km向上,温度随高度增高而上升很快,在平流层顶可达270~290 K,主要由作为热源的臭氧层强烈吸收太阳紫外辐射所致。平流层中水汽含量极少,能见度很好。在平流层底部,有时可见在对流层中发展强烈的积雨云的顶部,或少量分散的卷云。在中高纬度早晨、黄昏,有时还可观测到出现在20~27 km高度的具有特殊色彩的珠母云(Nacreous Cloud)。

从对流层向平流层的过渡区称为对流层顶(Tropopause),除了其温度递减率变化明显(由递减变成近于等温)外,还以某些可变微量成分的浓度突然变化作为标志。从对流层顶向上的起初几千米范围内,水汽含量陡降,而臭氧含量却增加一个量级以上,这表明在对流层和平流层之间的混合是非常微弱的,另一个事实也可以佐证,即以往的大气层核爆炸残留尘和火山爆发喷出的火山尘,在平流层中的浓度远超过对流层,它们可在平流层中滞留一年以上。

飞机在平流层中飞行比较平稳、阻力小,但因空气密度很小,故驾驶操纵的反应力度也小,即可操纵性低于对流层。

2.1.3 中间层、热层和外大气层

从平流层顶(Stratopause)向上,温度再次下降,到离地表面80~85 km处达最低值,约为160~190 K,这一层称为中间层(Mesosphere),又称为高空对流层。

从中间层顶(Mesopause)开始,向上伸展到500~600 km高度,空气极端稀薄,温度随高度上升迅速增加,可达1 000~2 000 K,把这一层称为热层(Thermosphere)。该层的高温起因于热层中的原子、离子对波长小于0.175 μm 的太阳紫外辐射的吸收,它不是通

常意义上所说的分子热，它仅表示粒子运动速度的一种度量。

热层顶 (Thermopause) 以上是外大气层 (Exosphere)。这一层可能一直延伸到 1 600 km 的高度，并且逐渐融合于行星空间。由于这样的高度，地球引力场的束缚作用很微弱，一些高速运动的空气粒子可向星际空间逸散，故又称为外逸层。

2.2 气团和锋

2.2.1 气团 (Air Mass)

气团是指对流层中水平方向上物理性质 (冷、暖、干、湿、稳定度) 比较均匀的大范围空气，其水平尺度可与整个大陆洲或海洋的面积相比，达几百千米至几千千米，垂直尺度约几千米至十几千米，常从地面伸展至对流层顶。气团的属性与其相接触并较长时间留驻的下垫面 (Underlying Earth's Surface) 的性质有关，通过与地表面产生热量与水汽的交换过程而形成。气团形成后，将随大气环流而移动，气团在移动过程中其属性的变化，称为气团变性 (Air-mass Modification)。气团变性的快慢随气团原有的属性而异。一般冷气团移至温暖地区变性较快，而暖气团移至寒冷地区，则变性较慢。

气团按其来源地的不同而分为北 (南) 极气团 (又称冰洋气团)、极地气团 (又称中纬度气团)、热带气团和赤道气团。前三种又有大陆和海洋之别。

北 (南) 极气团 [Arctic (Antarctic) Air] 形成于终年积雪的两极及其附近洋面上，特点为气温低、水汽含量少、气层稳定、天气晴朗；

极地大陆气团 (Polar Continental Air) 形成于中纬度大陆上，在西伯利亚、蒙古、加拿大、阿拉斯加一带，特点为低温、干燥、天气晴朗；

极地海洋气团 (Polar Marine Air) 形成于中纬度洋面上，多由大陆移至海洋变性而成。主要在南半球海洋及北太平洋和北大西洋。冬季比极地大陆气团的温度高、湿度大，可出现云和降水，