



试飞员培训系列教材

中国飞行试验研究院组织编写
陈 怿◎总主编

飞机空气动力学

张胜利 叶 忱 曹平宽 编

航空工业出版社

材

中国飞行试验研究院组织编写

陈 怿 总主编

飞机空气动力学

张胜利 叶 忱 曹平宽 编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本教材讲述了流体及空气动力学的基本理论知识，并能运用所学理论，掌握飞机的空气动力特性，为学习飞行力学等后续课程、掌握飞行驾驶技术打下必要的理论基础。

全书共10章，第1章与第2章讲述大气及流体的基本概念及理论。第3章介绍飞机的基本概念。第4章和第5章阐述了低速气流特性及飞机低速空气动力学的相关内容。第6章和第7章讲述了高速气流特性及飞机高速空气动力学。第8章是主动流动控制的内容。第9章概述了计算流体力学方面的相关知识。第10章阐述了风洞及风洞试验相关内容。

本教材旨在为飞行器试飞员进行正规化、专业化、系统化培训而编写的，适用于飞行器试飞员、飞行员培训，同时也可作为航空工业界从事飞行器设计、适航等人员使用，也可作为在校本科生及科普使用。

图书在版编目(CIP)数据

飞机空气动力学/张胜利, 叶忱, 曹平宽编. --北京: 航空工业出版社, 2018.3

试飞员培训系列教材

ISBN 978-7-5165-1259-3

I. ①飞… II. ①张… ②叶… ③曹… III. ①飞机—空气动力学—教材 IV. ①V211.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第164999号

飞机空气动力学 Feiji Kongqi Donglixue

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84934379 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018年3月第1版

2018年3月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 15.75

字数: 364千字

定价: 60.00元

《试飞员培训系列教材》总审委会

主 任：吴华强 王治渤
副 主 任：张智慧 张虹秋
成 员：袁 东 王建军 邓小宝 舒成辉 屈霖云 樊 力
朱 宇 郭 文 钟德均 魏荫璋 乔金堂

《试飞员培训系列教材》总编委会

主 任：陈 怿
常务副主任：郭平凡
副 主 任：邓友明 张景亭 赵 鹏 冯晓林
成 员 (按姓氏笔画排序)：
于 琦 万方义 马明明 王生楠 左军毅 朱清华
张宏林 张怡哲 张胜利 张晓敏 陆 洋 陈仁良
周友明 侯玉宏 姜 健 袁昌盛 贾晓鹏 徐锦法
郭正旺 唐正飞 蒙泽海 霍培锋

《试飞员培训系列教材》编写办公室

主 任：秦超敏
副 主 任：张 建 邹建国 张德元 史晋蕾
成 员：高 健 秦启武 蒋康博 李新建 刘 旭 叶 忱
欧 杰 李金梅

前 言

空气动力学是力学的一个分支，研究飞机或其他物体在同空气或其他气体做相对运动情况下的受力特性、气体的流动规律和伴随发生的物理化学变化。它是在流体力学的基础上，随着航空工业和喷气推进技术的发展而成长起来的一门学科。

随着我国航空和国防工业的发展，新型机型种类不断出现，迫切需提高飞行员和试飞员的理论水平，为此，我们编写了本教材。本教材内容兼顾经典理论知识与最新技术，不但结合作者多年给飞行员与试飞员的授课经验，还参考了国内外有关文献资料。

本教材力求概念阐明清楚，避免繁琐的理论公式推导。通过学习，使学员理解空气低、高速流动的基本规律和特性；掌握低、高速飞行时，飞机空气动力的产生及变化规律；了解空气动力学方面的新知识和新技术。

本教材适用于飞行器试飞员、飞行员的培训，也可作为航空工业界从事飞行器设计、适航等人员使用，也可作为在校本科生的相关教材及科普及用书。

感谢所参考相关文献的有关作者。

由于作者水平有限，本书内容难免有错误或不妥之处，望读者批评指正。

目 录

第 1 章 大气基础知识	1
1.1 大气简介	1
1.1.1 大气的主要状态参数	1
1.1.2 大气的黏性	3
1.1.3 空气的可压缩性	5
1.1.4 湿度	5
1.1.5 大气分层	6
1.1.6 国际标准大气	8
1.1.7 国际标准大气的应用	10
1.2 气象对飞行活动的影响	11
1.2.1 阵风对飞行的影响	11
1.2.2 稳定风场对飞行的影响	13
1.2.3 云对飞行的影响	14
1.2.4 机翼表面积冰(雪、霜)对飞行的影响	14
1.3 复杂大气环境对飞机飞行的影响	18
1.3.1 开展飞机环境研究的必要性	18
1.3.2 温度对飞机的影响	20
1.3.3 沙尘环境对飞机的影响	22
1.3.4 腐蚀环境对飞机的影响	25
1.4 航母尾流对舰载机飞行的影响	26
1.5 空气动力学简介	33
第 2 章 流体基础	36
2.1 流体流动的基本概念	36
2.1.1 相对运动原理	36
2.1.2 连续性假设	36
2.1.3 流场、定常流和非定常流	36
2.1.4 流线、流线谱、流管和流量	37
2.2 边界层理论	38

2.2.1	概述	38
2.2.2	边界层原理	40
2.2.3	边界层厚度的定义	41
2.2.4	边界层方程	42
2.2.5	边界层分离	43
第3章	飞机的基本概念	45
3.1	飞机的基本组成及其作用	45
3.2	机翼的几何外形和参数	46
3.2.1	机翼翼型	46
3.2.2	机翼平面形状和参数	47
3.2.3	机翼相对机身的安装位置	48
3.3	机身的几何形状和参数	49
3.4	作用在飞机上的空气动力	50
3.4.1	升力和阻力与压力中心	50
3.4.2	升力	50
3.4.3	阻力	51
3.4.4	升力公式和阻力公式	56
3.5	升力系数曲线、阻力系数曲线和升阻比曲线、极曲线	56
3.5.1	升力系数 C_L 随迎角的变化	57
3.5.2	阻力系数 C_D 随迎角的变化	57
3.5.3	临界迎角和飞机失速	58
3.5.4	升阻比曲线和极曲线	59
第4章	低速气流特性	61
4.1	连续性方程	61
4.2	伯努利方程	62
4.3	伯努利方程的应用	63
第5章	飞机的低速空气动力学特性	66
5.1	翼型的低速空气动力学特性	66
5.1.1	翼型研究的意义	66
5.1.2	国外翼型发展概况	67
5.2	机翼的低速空气动力学特性	76
5.2.1	机翼的压力分布	76

5.2.2	机翼的升力	81
5.2.3	机翼的阻力	85
5.2.4	升阻比和极曲线	90
5.3	飞机的增升装置	94
5.3.1	襟翼	94
5.3.2	前缘缝翼	98
5.3.3	边界层控制	99
5.4	地面效应	100
第 6 章	高速气流特性	104
6.1	高速气流特性	104
6.1.1	空气的压缩性及其影响因素	104
6.1.2	声波、声速、马赫数	104
6.1.3	超声速气流的加速性	106
6.1.4	弱扰动波在气流中的传播	107
6.1.5	激波	108
6.1.6	高速飞行中的阻力	111
6.1.7	高速飞机的空气动力外形特点	114
6.2	高速可压流动理论	127
6.2.1	热力学基础	127
6.2.2	高速一维定常流	131
6.2.3	微弱扰动的传播区	136
6.2.4	膨胀波	139
6.2.5	激波概述	143
6.2.6	正激波	144
6.2.7	斜激波	148
6.2.8	圆锥激波	155
6.3	高超声速流动的关键技术	155
第 7 章	飞机的高速空气动力学特性	158
7.1	翼型的跨声速空气动力特性	158
7.1.1	临界马赫数	158
7.1.2	局部激波的形成和发展	158
7.1.3	翼型的跨声速升力特性	160
7.1.4	翼型的跨声速阻力特性	161

7.2	翼型的超声速气动特性	162
7.2.1	概述	162
7.2.2	线化理论	164
7.2.3	布泽曼理论	170
7.2.4	激波 - 膨胀波法	170
7.3	机翼的超声速气动特性	171
7.3.1	概述	171
7.3.2	超声速机翼的绕流	173
7.3.3	基本方程及边界条件	174
7.3.4	求解方法	175
7.3.5	超声速飞机的一些设计问题	189
7.3.6	气动干扰	190
第 8 章	主动流动控制	198
8.1	主动流动控制技术的发展概况	198
8.2	控制器件和控制方法分类	199
8.3	应用等离子体实现主动流动控制的发展概况	202
第 9 章	计算流体力学	204
9.1	概论	204
9.1.1	计算流体力学概述	204
9.1.2	计算流体力学的特点及其与理论和试验流体力学的关系	205
9.1.3	CFD 的意义	208
9.2	CFD 求解问题的基本思路	209
9.3	CFD 数值算法	210
第 10 章	风洞及风洞试验	212
10.1	风洞	212
10.1.1	风洞简介	212
10.1.2	风洞的发展历史	212
10.1.3	风洞的构成	212
10.1.4	风洞分类	213
10.2	国外风洞简介	222
10.3	风洞发展的未来趋势	225
10.4	风洞试验	226

10.4.1	测力试验	227
10.4.2	测压试验	228
10.4.3	传热试验	229
10.4.4	动态模型试验	230
10.4.5	流态观察试验	231
10.5	美国 2025 年的风洞试验展望	233
10.5.1	风洞试验的不足	233
10.5.2	美国风洞试验展望	234
附录 量纲与单位		237
参考文献		238

第 1 章 大气基础知识

1.1 大气简介

1.1.1 大气的主要状态参数

大气由多种气体混合而成，主要成分是氮气和氧气。按体积计算，氮约占 78%，氧约占 21%，余下 1% 是氩、二氧化碳、氖、氦、氫、氢等其他气体。除了气体之外，大气中还含有水蒸气和尘埃颗粒。组成大气的各种气体分子都在不停地、无规则地（以不同的运动方向和运动速度）运动着，并产生相互碰撞。空气分子运动的动能以压力和热能的形式表现出来。

表示大气物理状态的物理参数主要是温度、压力（即压强）和密度。另外，与航空器飞行有关的物理参数还有黏性、压缩性、湿度和声速等。

(1) 大气密度

单位体积内所包含空气的质量叫大气密度，用 ρ 表示。如果质量为 m 的空气其体积为 V ，则空气的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

在国际单位制中，密度的单位是 kg/m^3 。

大气密度的大小表示空气的稠密。密度大，说明单位体积内的空气分子多，比较稠密；反之，密度小，说明空气比较稀薄。图 1-1 所示为大气密度随高度的变化。

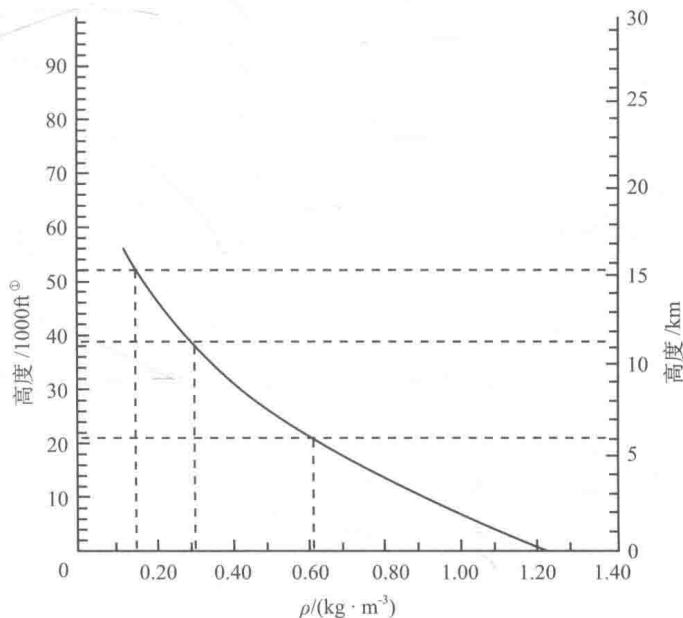


图 1-1 大气密度随高度的变化

① 1ft = 0.3048m。

(2) 大气温度

大气温度(简称气温)就是表示大气的冷热程度的物理量。大气的冷热程度,实质上是大气分子无规则运动的一种表现。气温越高,气体分子无规则运动的速度越大,平均动能越大;反之,气温越低,气体分子无规则运动的速度越小,平均动能越小。图1-2所示为度量气温的温标。

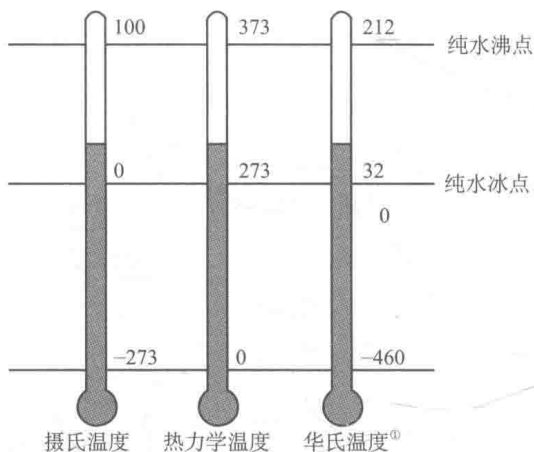


图1-2 大气温度的度量

我国和大多数国家常用摄氏温度来表示气温,单位是 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)。

热力学温度(T)和摄氏温度(t)可换算为

$$T = t + 273.15\text{K} \quad (1-2)$$

热力学温度的单位是K(开[尔文])。

(3) 大气压力

空气分子每时每刻都在以较大的速度做无规则运动,因此,物体表面会受到大量空气分子连续不断的撞击。空气垂直作用在物体表面单位面积上的力叫作空气压力(即大气压力,简称大气压或气压),用符号 p 表示。如果物体的受力面积为 S ,空气垂直作用于该面积上的力为 F ,则气压为

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可见,大气压力的法定计量单位是Pa(中文符号帕[斯卡])= N/m^2 (中文符号牛[顿]米²),大气压力的单位还习惯使用mmHg(毫米汞柱)、物理气压和工程大气压等。它们之间的换算关系如下(如图1-3所示为大气压力随高度的变化):

1 标准大气压(atm) = 101325Pa;

1 工程大气压(at) = $1\text{kgf}^{\text{②}}/\text{cm}^2 = 0.967841\text{atm} = 98066.5\text{Pa}$;

① 非法定计量单位华氏温度($^{\circ}\text{F}$)的换算: $t_{\text{F}}(^{\circ}\text{F}) = 32 + 1.8t(^{\circ}\text{C})$ 。

② $1\text{kgf} = 9.806\text{N}$ 。

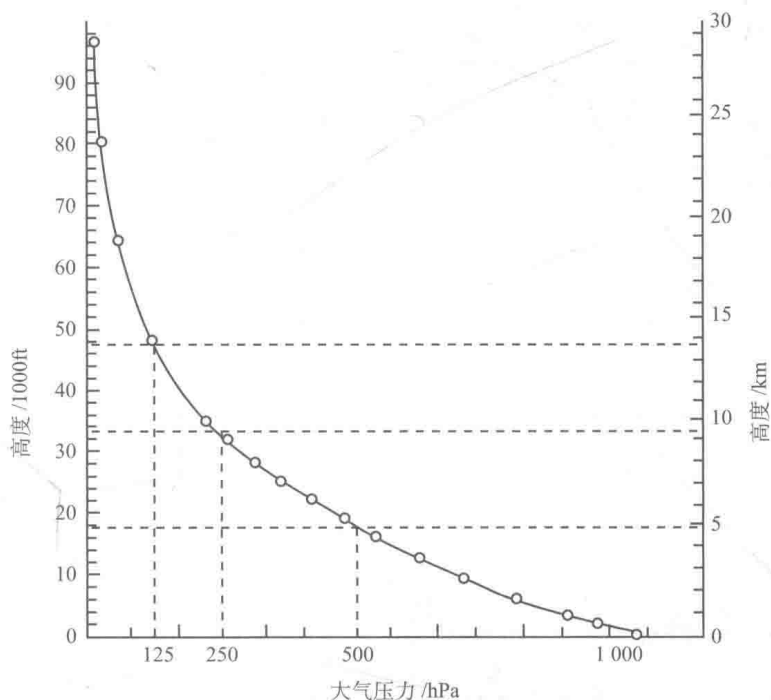


图 1-3 大气压力随高度的变化

1 标准大气压 = 1.033 工程大气压。

1mmHg = 13.5951mmH₂O = 133.3324Pa。

(4) 大气密度、温度、压力之间的关系

大气密度、温度和压力是相互联系又相互影响的 3 个物理量。它们之间的数量关系可以用气体状态方程表示，即

$$p = \rho RT \quad (1-4)$$

式中： ρ ——大气密度，kg/m³；

R ——气体常数，对于空气气体的空气 $R \approx 287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

T ——热力学温度，K。

如果知道气体的任意两个参数，就可以根据状态方程求出第三个参数值。

1.1.2 大气的黏性

黏性是流体固有的属性。当流体内相邻流层的流速不同，或流体与物体间发生相对运动时，两个流层接触面上或流体和物体接触面上便产生相互阻滞和相互牵扯的力，这种特性就是流体的黏性。

大气的黏性比较小，不容易被察觉，但对航空器飞行的影响却不能忽略。大气的黏性主要是由于大气中各种气体分子不规则运动造成的。气体分子的不规则运动使各层的气体

分子可以互相交换,当相邻两层气体之间有相对运动时,这种交换会带来动量的交换,从而产生相互牵扯的作用力,这种作用力就是大气的黏性力,或称作大气的内摩擦力。图1-4所示为速度 V 的分布。

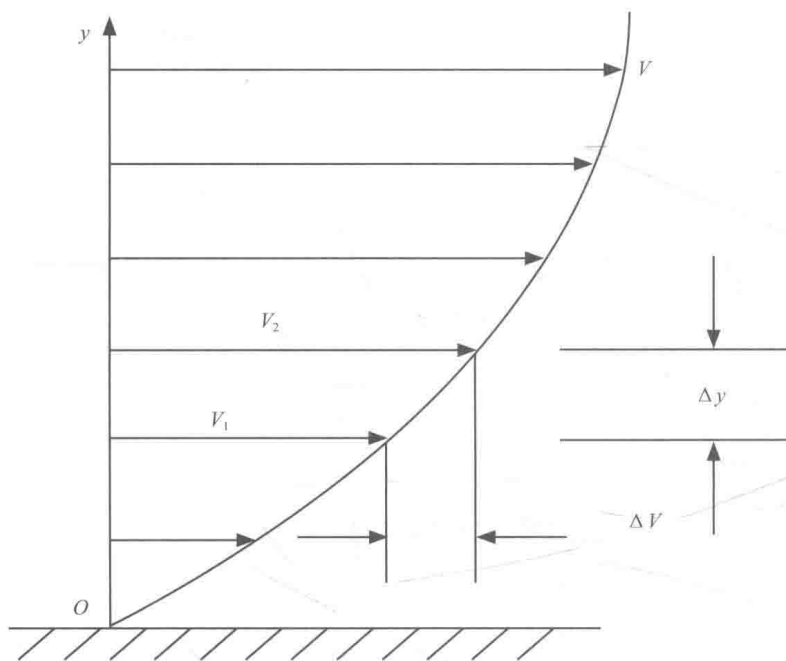


图1-4 速度 V 的分布

试验表明:流体的黏性力与相邻流层的速度差、接触面的面积 ΔS 成正比,和相邻流层的距离 Δy 成反比,即

$$F = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y} \Delta S \quad (1-5)$$

式中: F ——流体的黏性力;

$\Delta V / \Delta y$ ——在流层的垂直方向上每单位长度速度变化量,叫作横向速度梯度;

ΔS ——接触面的面积;

μ ——横向速度梯度为1时,在流层单位接触面上产生的黏性力,称为流体的[动力]黏度(旧称[动力]黏性系数),可作为度量流体黏性的指标,单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (帕[斯卡]·秒)。

不同的流体具有不同的黏度,同一流体的黏度又随温度而变化:气体的黏度随温度升高而增大;液体的黏度随温度升高而减小。气体和液体具有完全不同的黏—温特性,如图1-5所示。

当大气流过物体时,只有紧贴物体表面的气流层中横向速度梯度较大,黏性力比较大,空气的黏性表现得比较明显。在离开物体表面较远的外部区域,气流层中横向速度梯度很小,黏性力也很小,一般情况下可以忽略空气的黏性作用。没有黏性的流体称为理想流体。当不考虑黏性作用时,可以把空气当作理想流体来处理。

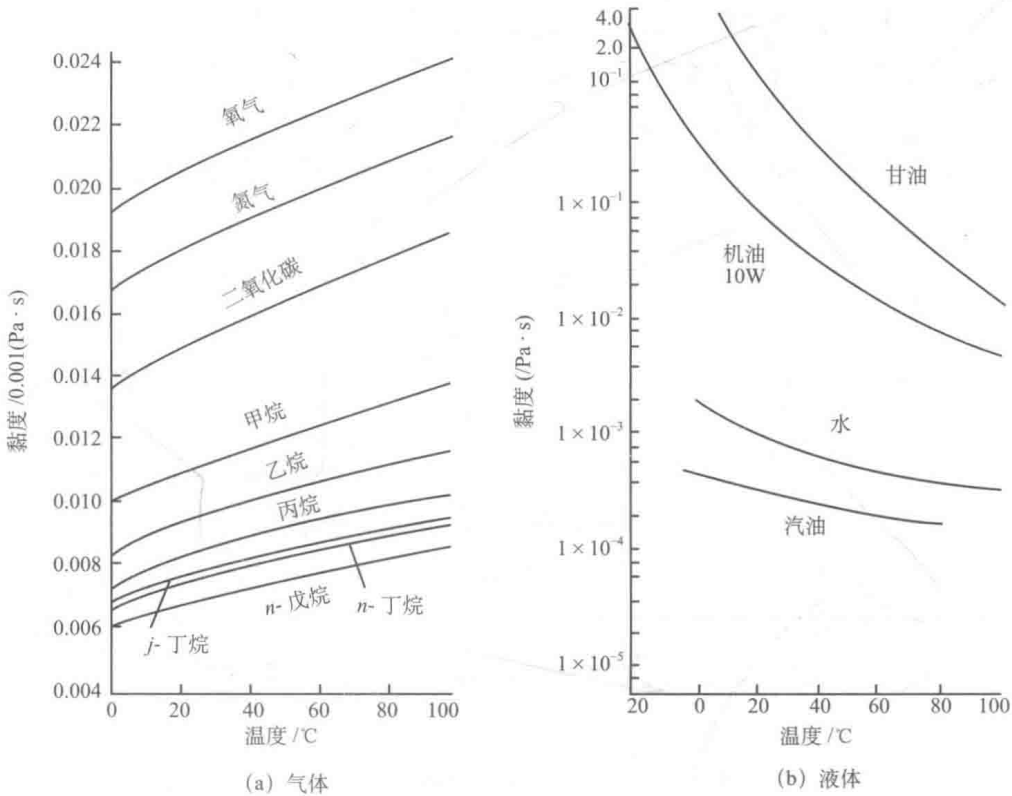


图 1-5 黏度随温度变化

1.1.3 空气的可压缩性

空气的可压缩性是指一定量的空气在压力或温度变化时，其体积和密度发生变化的特性。凡是物质都具有一定程度的可压缩性，但不同状态的物质可压缩性有着明显的差异。

在相同的压力变化量的作用下，密度的变化量越大的物质，可压缩性就越大。液体的密度变化量极小，可以看作是不可压缩的。而空气由于分子之间距离较大、分子之间吸引力较小，它的可压缩性表现得十分明显。

当大气流过飞行器表面时，在一些部位气流速度增加，气流的压力会减小，密度也会随之下降；在一些部位气流速度减小，气流的压力会增加，密度也会随之上升。这就是大气的压缩性在流动中的表现。在低速飞行时，大气压力的变化一般不大，密度的变化也很小，大气的压缩性对飞行器的飞行影响很小，可以忽略大气的压缩性，将大气看成是不可压缩的流体，从而使问题的研究简单化。但在高速飞行时，由于速度变化引起的压力和密度的变化比较大，大气的压缩性对飞行器的飞行影响不可忽略，这时，就必须考虑大气的可压缩性。

1.1.4 湿度

大气的湿度是指大气的潮湿程度，通常用相对湿度来表示。相对湿度是指大气中所含水蒸气的量与同温度下大气能含有的水蒸气最大量之比。当相对湿度为 100% 时，说明大气中含有的水蒸气量已达到了最大值，水蒸气处于饱和状态。

不同温度下大气所能含有的水蒸气最大量是不同的。温度越高,大气能含有的水蒸气最大量越大。因此,随着温度的降低,大气的相对湿度会增加。使大气的相对湿度达到100%时的温度称为露点温度。露点温度表示大气中的水蒸气已经达到饱和状态并开始凝结,从而形成云、雾、降水等各种气象现象。这些现象都会对飞行器的飞行带来影响,所以了解露点温度对飞行器的飞行来说是十分重要的。

另外,水蒸气的密度约等于干空气密度的 $5/8$,含有水蒸气的空气比干空气密度小、重量^①轻,这对飞机的起飞性能也会产生影响。飞机在潮湿天气起飞时,所需要的跑道长度比在干燥天气起飞时要长。

1.1.5 大气分层

包围在地球表面的大气的厚度可达 $2000 \sim 3000\text{km}$ 。根据不同的气象条件和气温变化等特征,可将大气分为对流层、平流层(旧称同温层)、中间层、热层和外逸层(外层)五层。

飞机所能达到的大气层是对流层和平流层,因此,下面主要介绍对流层和平流层。

对流层是接近地球表面的一层,它的底界是地面,顶界则随地区、季节情况而变化。

根据观测,对流层顶的高度,就地区而言,在赤道地区为 $16 \sim 18\text{km}$;在中纬度地区平均为 $10 \sim 12\text{km}$;在南、北极地区平均为 $8 \sim 9\text{km}$ 。也就是说,由赤道向南、北极,随着纬度的增加,对流层顶逐渐降低。例如,在广州附近,对流层顶平均高度约 16km ,而在东北地区则降低为 10km 左右。就季节而言,对流层顶夏季高于冬季。

对流层有以下特点:气温随高度升高而降低,高度每上升 1km ,气温约下降 6.5°C ;风向、风速经常变化;空气上、下对流激烈;有云、雨、雾等天气现象。

平流层位于对流层的上面,其顶界伸展到 $50 \sim 55\text{km}$ 高度。

平流层中,空气比较稀薄,风向稳定,空气主要是水平流动,水蒸气极少,通常没有云、雨、雾、雪等现象。

平流层中气温随高度的变化的规律是:在 25km 以下,高度升高,气温大致保持不变,平均温度为 -56.5°C ;高度超过 25km 以后,气温随高度的升高而上升。在平流层顶,气温升至 $-43 \sim -33^\circ\text{C}$ 。

在对流层和平流层,大气密度与气压随高度的变化是:在对流层中,高度升高,气温和气压都降低。气温降低要使密度变小。但是,气温降低的百分比小,气压降低的百分比却大得多,所以,大气密度还是随高度的升高而减小。在平流层中,当高度降低至 25km 时,由于气温基本上不随高度变化,故高度升高时,大气密度与气压基本上按同一比例下降。

大气层的温度、密度和压力变化等,如图1-6~图1-8所示。

地球大气层的温度变化规律如下。

^① 本书重量均为“质量”(mass)概念,单位为kg。

第一层：对流层，靠近地球表面。温度随着高度的增加而降低；

第二层：平流层，温度在其内层部分基本保持不变；

第三层：中间层，距离地球表面 50 ~ 80km，温度随着高度升高而下降；

第四层：热层，温度随着高度增加而升高，在 400km 时达到 1000K，然后保持不变；

第五层：外逸层。800km 以外。

大气压力变化：受地球引力的影响，静止大气的压力随着高度的增加而降低。流动的大气压力由两部分组成：总压 = 静压 + 动压（旧称速压）。

大气的密度变化：受地球引力的影响，大气密度随着高度的增加而降低。

温度、压力、密度三者的关系：温度、压力、密度三者之间存在一定的关系，在同一位置，压力不变时，大气密度随着温度的增加而降低。

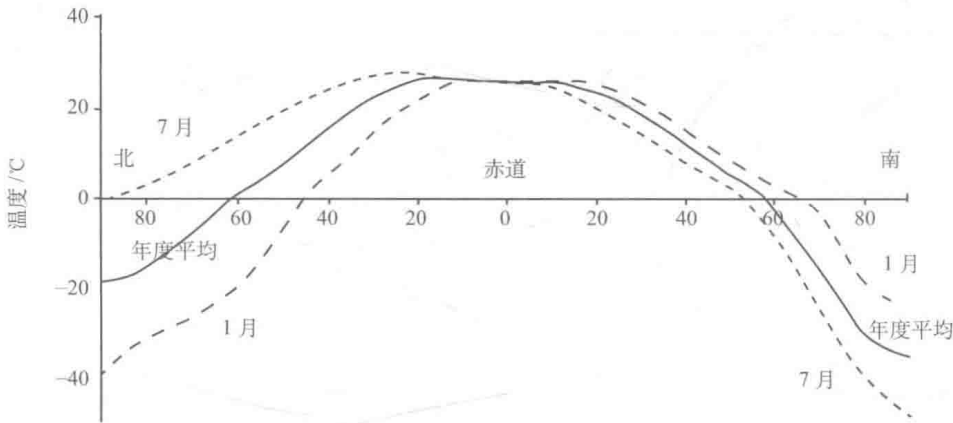


图 1-6 地球表面温度随季节和纬度变化

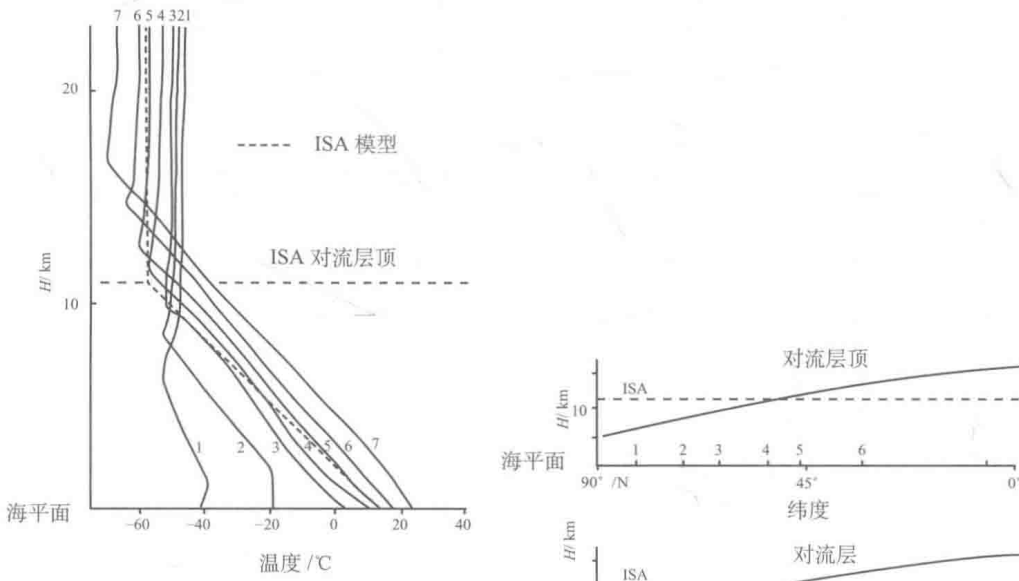


图 1-7 大气温度随高度、纬度变化