



民航特色专业系列教材

飞行技术专业卓越工程师教改成果

# 飞行性能与飞行计划

丁松滨 编著



科学出版社

民航特色专业系列教材  
飞行技术专业卓越工程师教改成果

# 飞行性能与飞行计划

丁松滨 编著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书结合民用大型运输机在实际飞行中的使用需要和规章要求,较系统地介绍了有关飞行性能的理论分析方法和实际应用知识。内容包括:相关的基础知识;按飞行剖面介绍起飞、爬升和下降、巡航、进近和着陆各阶段性能;飞机的载重与平衡计算的基本原理和方法,以及制定飞行计划的相关要求。在介绍有关基础理论知识和分析解决问题的方法时,较充分地考虑到了相关规章的要求和实际中的应用。

本书可供民航飞行技术、签派和空管等专业的高年级学生或研究生学习使用,也可供民航运输中从事飞行、签派和空管等相关工作的读者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

飞行性能与飞行计划/丁松滨编著. —北京: 科学出版社, 2013  
民航特色专业系列教材·飞行技术专业卓越工程师教改成果  
ISBN 978-7-03-037871-2

I. ①飞… II. ①丁… III. ①民用飞机-飞行性能-高等学校-教材②民用飞机-飞行计划-高等学校-教材 IV. ①V271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 130345 号

---

责任编辑: 贾瑞娜/责任校对: 陈玉凤

责任印制: 闫 磊/封面设计: 迷底书装

**科 学 出 版 社 出 版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**源海印刷有限责任公司印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年6月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2013年6月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 281 000

**定价: 38.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 丛书序

改革开放以来，我国民航事业获得了持续、快速、健康的发展。2010年，我国民用航空发展的主要预期指标是：航空运输总周转量493亿吨千米、旅客运输量2.6亿人次、货邮运输量498万吨。30年来上述指标年均增速均达到两位数，大约是中国国民经济发展速度的两倍，是世界民航业发展速度的四倍。从2005年至今，中国民航没有发生运输飞行事故，创造了中国民航历史上安全运营时间最长的记录，安全、生产、效益形势喜人。按照我国国民经济发展中长期规划和国际通用方法预测，中国民航的持续快速增长还会有较长一段时间。

近年来，中国民航总局党组提出了全面推进建设民航强国的战略构想，因此，对民航各层次管理和专业技术人才的培养提出了更高的要求。民用航空教育必须把培养知识面广、专业素质高、动手能力强、责任心强的专业人才作为自己的奋斗目标，以适应整个行业发展的需要。但是目前民航专业教材体系建设相对滞后，长期以来多数教材源于国外，不能完全符合中国实际；教材出版时间较早，知识相对陈旧，学生难以据此掌握当前民航的高新科学技术。教材问题已经客观地影响到教学效果和质量。

南京航空航天大学民航学院成立于1993年，由原中国民用航空总局和中国航空工业总公司正式联合创办，已形成具有培养本科、硕士、博士、博士后多层次人才的办学格局。目前设有交通管理与签派、民航运输管理、民航机务工程、民航电子电气工程、机场运行与管理、飞行技术6个专业。依托国家级、江苏省特色专业建设点，依靠国防科工委重点学科建设，以及承担国家级、省部级科研项目等多方雄厚的科研实力，形成了集市场营销、运营管理和维修保障为一体的全方位的人才培养体系，成为我国民用航空领域的重要教学和科研基地。

通过对近17年教学与科研成果的凝练与总结，为适应教学改革和民航发展的需要，及时反映现代民航科技领域的研究成果，保证教材建设与教学改革同步进行，我们出版了《民航特色专业系列教材》丛书。本套丛书在组织编写中，重点体现了以下几个方面的特色：

1. 突出民航和航空制造专业特色。教材编写过程中充分考虑到专业的交叉性、综合性和国际性强的特点，在要求学生掌握知识的同时，以培养技术与管理结合、适应性强、综合素质高、能在航空制造企业和民航企事业单位服务的复合型人才为目标，丰富和完善教材内容。

2. 面向民航应用，注重实践能力的培养。适当拓宽专业基础知识的范围，

以增强学生的适应性；面向民航工程实际，注重实践环节，强化在民航系统就业所必需的职业技能培养内容，以促进对学生的实际动手能力和创新能力的培养。

3. 强化专业素质教育。在专业所应具备的基本知识基础上，拓宽和延伸专业课内容，及时反映民航科技的最新成果，提升学生的专业素质和学习能力。

4. 兼顾学历教育和执照教育。由于民航专业的特殊性，获取专业执照是从业的必要条件，本套教材在编写过程中，注重学历教育和执照教育的有机结合，为学生顺利走上工作岗位创造条件。

5. 满足多层面的需求。针对同一类课程，根据不同的教学层次和学时要求，编写适合不同层次需求的教材，涵盖不同范围的拓展知识单元，注重与先修课程、后续课程的有机衔接，每本教材在重视系统性和完整性的基础上，尽量减少内容重复。

本套教材注重知识的系统性与全面性，突出民航专业特色；兼顾学生专业能力和综合素养的全面培养，力图提高民航专业人才的培养质量和完善人才培养的模式；着力推广民航专业教学经验和教学成果，推进民航专业教学改革。本套教材的编写出版为提高民航专业教学的整体水平做了有益的探索。

温家宝总理指出：“教育寄托着亿万家庭对美好生活的期盼，关系着民族素质和国家未来。不普及和提高教育，国家不可能强盛”。为了不断促进民航院校学生素质的提高以适应我国民航事业的持续、快速、健康发展，我们在教材编辑与创新上做了一些尝试，迈出了可喜的一步。作为一名老航空工作者，我为此鼓与呼。在丛书编写过程中，南京航空航天大学民航学院还得到众多相关学校与学院各方教授、专家、学者的帮助与指正，在此一并感谢。

王 知

2010年7月

# 前 言

飞机的飞行性能与飞行计划，是民航飞行技术专业的核心专业课程。本书主要依据民航对航线运输驾驶员的培养目标和要求，参照国内外相关课程，并兼顾考虑民航运输其他相关专业的要求而编写，主要供飞行技术、空管和签派等民航专业的学生使用。

本书结合民用大型运输机在实际飞行中的使用需要和规章要求，较系统地介绍了有关飞行性能的理论分析方法和实际应用知识。目的在于不断提高学生的基础理论素养，培养学生分析问题和解决问题的能力，锻炼学生理论联系实际、运用所学知识解决实际问题的能力。

本书主要内容：第1章是对标准大气、飞行高度和速度等基本概念、基础知识的复习；第2章介绍现代民航运输机飞行性能的主要理论方法；第3~6章结合有关的飞行运行规章要求，介绍飞机的起飞、爬升与下降、巡航、进近着陆等阶段的飞行性能；第7章介绍关于飞机载重与平衡的相关理论知识；第8章讲述飞行计划的有关知识。

本书是在作者多年教学实践的基础上编写完成的。教材编写的过程更是不断向前辈、向兄弟院校的同行、向民航企事业单位的专家等不断学习的过程。本书力求学科知识体系完整，重点加强基本概念、基础理论知识讲解，并着重锻炼学生应用所学理论知识解决实际问题的能力，培养学生遵守规章、执行标准程序的意识。

在教材的编写过程中，作者也深深体会到了自身学识及实践经验的不足与匮乏，书中的疏漏和错误在所难免，敬请读者批评指正，欢迎志同道合者共同探讨相关问题。

作 者

2013年6月于南京航空航天大学

dingzhili@nuaa.edu.cn

# 目 录

<b>第 1 章 预备知识</b> .....	1
1.1 国际标准大气 .....	1
1.1.1 大气的性质 .....	1
1.1.2 标准大气 .....	2
1.1.3 标准大气表 .....	5
1.2 高度 .....	6
1.2.1 高度的相关概念 .....	6
1.2.2 使用中的高度 .....	12
1.3 飞行速度.....	14
1.3.1 空速表的测速原理 .....	14
1.3.2 空速的定义与修正 .....	15
1.4 发动机的性能.....	17
1.4.1 活塞式航空动力装置 .....	17
1.4.2 涡轮喷气发动机 .....	20
<b>第 2 章 飞机飞行性能分析的常用方法</b> .....	25
2.1 推力法.....	25
2.1.1 飞机定常飞行状态方程 .....	25
2.1.2 飞机平飞需用推力曲线 .....	26
2.1.3 影响平飞需用推力的主要因素 .....	28
2.1.4 利用推力曲线确定定常飞行状态的特性速度 .....	29
2.2 功率法.....	31
2.2.1 功率曲线及其特征速度 .....	31
2.3 能量法.....	32
2.3.1 能量高度的概念 .....	32
2.3.2 能量高度变化率与飞机飞行特性的关系 .....	33
2.3.3 能量高度变化率与爬升率的关系 .....	35
2.4 平飞的速度极限边界.....	35
2.4.1 平飞最小速度 .....	36
2.4.2 平飞最大速度 .....	37
2.4.3 平飞的速度极限边界 .....	38

<b>第 3 章 飞机的起飞性能</b> .....	40
3.1 概述 .....	40
3.1.1 起飞航迹 .....	40
3.1.2 起飞场道阶段的相关速度及其限制 .....	41
3.1.3 起飞距离 .....	46
3.2 全发起飞场道阶段的性能 .....	51
3.2.1 全发起飞的跑道性能 .....	51
3.2.2 影响全发起飞跑道的因素 .....	55
3.3 单发停车起飞场道阶段的性能 .....	57
3.3.1 中断起飞性能 .....	57
3.3.2 继续起飞性能 .....	59
3.3.3 平衡场长与平衡速度 .....	61
3.3.4 起飞重量与决断速度的选择 .....	63
3.4 起飞航道阶段的性能 .....	70
3.4.1 起飞航道阶段的特点 .....	70
3.4.2 爬升率与爬升梯度 .....	71
3.4.3 起飞飞行航迹的越障性能 .....	73
3.5 限制最大起飞重量的因素 .....	78
3.5.1 结构强度限制的最大起飞重量 .....	78
3.5.2 刹车能量限制的最大起飞重量 .....	79
3.5.3 轮胎速度限制的最大起飞重量 .....	81
3.5.4 起飞飞行航迹第二段爬升梯度限制的最大起飞重量 .....	82
3.5.5 障碍物限制的最大起飞重量 .....	83
3.5.6 最大着陆重量限制的最大起飞重量 .....	84
3.5.7 航线上最低安全高度限制的最大起飞重量 .....	84
3.6 减推力起飞 .....	84
3.6.1 灵活推力法 .....	85
3.6.2 降低额定功率法起飞 .....	86
3.6.3 灵活推力和降低额定功率方法比较 .....	88
3.7 污染跑道的起飞 .....	89
3.7.1 湿跑道和污染跑道 .....	89
3.7.2 湿跑道和污染跑道起飞滑跑的滑水现象 .....	90
3.7.3 在湿跑道和污染跑道上起飞的主要特点 .....	91
<b>第 4 章 飞机的爬升和下降性能</b> .....	93
4.1 爬升性能 .....	93



4.1.1	爬升时飞机受力分析 .....	93
4.1.2	描述爬升特性的主要参数 .....	94
4.1.3	主要爬升性能参数的计算 .....	94
4.1.4	定常爬升时的特性参数及影响因素分析 .....	96
4.1.5	典型的爬升方式 .....	99
4.1.6	几种典型爬升方式的分析 .....	100
4.1.7	客舱压力高度的变化 .....	103
4.1.8	爬升性能参数的相关图表 .....	103
4.2	下降性能 .....	108
4.2.1	下降受力分析 .....	108
4.2.2	描述下降特性的主要参数 .....	109
4.2.3	主要下降性能参数的计算 .....	109
4.2.4	定常下降时的特性参数及影响因素分析 .....	111
4.2.5	典型的下降方式 .....	114
4.2.6	典型下降方式和成本指数 .....	116
4.2.7	客舱压力高度下降 .....	116
4.2.8	下降性能参数相关图表的使用 .....	118
<b>第5章</b>	<b>飞机的巡航性能</b> .....	<b>122</b>
5.1	巡航性能计算的基本公式 .....	122
5.1.1	航程计算的几个基本参数 .....	122
5.1.2	航程公式 .....	123
5.1.3	影响航程的因素 .....	124
5.1.4	巡航速度的选择及其影响因素 .....	126
5.1.5	巡航高度的选择及其影响因素 .....	130
5.2	典型巡航方式及其特点 .....	137
5.2.1	马赫数保持不变的巡航方式 .....	137
5.2.2	飞行高度保持不变的巡航方式 .....	138
5.2.3	马赫数和飞行高度保持不变的巡航方式 .....	139
5.2.4	按发动机额定推力巡航方式 .....	139
5.2.5	成本指数巡航 .....	140
5.2.6	阶梯式爬升巡航 .....	140
5.2.7	短航程巡航 .....	141
5.3	一发停车的巡航性能 .....	142
5.3.1	一发停车的飞行性能变化 .....	142
5.3.2	飘降 .....	144

5.4	等待飞行 .....	151
5.5	巡航性能参数计算 .....	153
<b>第6章</b>	<b>飞机的着陆性能</b> .....	<b>158</b>
6.1	概述 .....	158
6.2	复飞及其要求 .....	158
6.2.1	稳定的进近 .....	158
6.2.2	进近期间的速度要求 .....	159
6.2.3	进近爬升与着陆爬升 .....	160
6.2.4	复飞爬升梯度计算及其影响因素 .....	161
6.3	着陆性能 .....	161
6.3.1	着陆距离的计算及其影响因素 .....	161
6.3.2	规章对着陆距离的要求 .....	164
6.3.3	着陆重量的限制 .....	165
6.3.4	快速过站及其限制的最大着陆重量 .....	169
<b>第7章</b>	<b>飞机的载重与平衡</b> .....	<b>176</b>
7.1	概述 .....	176
7.2	重量及其限制 .....	178
7.2.1	飞机重量的定义 .....	178
7.2.2	飞机重量的限制 .....	179
7.3	重心计算的原理和方法 .....	180
7.3.1	重心计算的原理和位置表示方法 .....	180
7.3.2	指数及其应用 .....	189
7.4	重心包线与平衡图 .....	193
7.4.1	重心包线 .....	193
7.4.2	飞机的重心包线图 .....	195
7.5	指数计算 .....	197
7.5.1	基本使用指数 .....	197
7.5.2	干使用指数 (DOI) .....	198
7.5.3	燃油指数 .....	198
7.5.4	旅客和货物的指数 .....	200
7.5.5	对无燃油重心的限制 .....	200
<b>第8章</b>	<b>飞行计划</b> .....	<b>202</b>
8.1	概述 .....	202
8.1.1	飞行计划的主要内容 .....	202
8.2	关于备降机场和加油量的规定 .....	203

8.2.1	关于备降机场的规定 .....	203
8.2.2	关于燃油量的规定 .....	205
8.3	飞行剖面 .....	206
8.3.1	国际航线飞行剖面 .....	206
8.3.2	国内航线飞行剖面 .....	207
8.4	简易航班飞行计划图表使用简介 .....	208
8.4.1	活塞式发动机飞机的简易飞行计划图表的使用 .....	208
8.4.2	干线运输飞机的简易飞行计划图表的使用 .....	211
8.4.3	积分航程表的使用 .....	213
8.5	二次放行简介 .....	215
8.5.1	二次放行的原理和方法 .....	215
8.5.2	二次放行点的选择 .....	217
8.6	双发飞机延程飞行简介 .....	218
8.6.1	双发飞机延程飞行的相关概念 .....	218
8.6.2	获得 ETOPS 飞行的条件 .....	221
<b>参考文献</b> .....		<b>223</b>

# 第1章 预备知识

## 1.1 国际标准大气

大气 (atmosphere) 是指由地球引力场和磁场所束缚的包裹着固体地球表面的空气, 是地球的组成部分之一, 随着地球一起运动。大气成分按体积分数计算是: 氮 ( $N_2$ ) 约占 78%, 氧 ( $O_2$ ) 约占 21%, 其他气体约占 1%。大气的成分、温度、密度、压强及其他物理属性在垂直方向上随高度而变化, 在水平方向上是比较均匀的。

大气是民用飞机的飞行环境, 飞机的空气动力和发动机推力等与大气的物理特性密切相关。大气的压强、密度、温度等参数都是随着地理位置、季节、昼夜和高度等条件而变化的。因此, 对于同一架飞机, 在不同的大气条件中飞行的性能是不一样的。为了满足飞机的设计与计算, 处理和分析飞机的飞行试验数据, 进行飞行性能参数计算等方面的需求, 国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 制定了国际标准大气 (International standard atmosphere, ISA), 作为衡量、比较飞机性能的公共的标准。国际标准大气 (ISA) 模型是以北半球中纬度年平均大气物理属性测量的数据为依据, 建立起来的大气标准模型。

### 1.1.1 大气的性质

在分析大气对飞机性能的影响时, 通常可以被看作是连续介质 (continuous medium), 即大气是由无数流体质点无间隙地、连续地分布在空间, 大气的物理参数如温度、压强、密度等都是空间位置和时间的连续函数。同时把大气看作是完全气体, 即忽略大气的分子体积及分子间的相互作用, 并认为大气的比热比 (ratio of specific heats) 或绝热指数 (adiabatic exponent) (大气的定压比热  $C_p$  与定容比热  $C_v$  之比) 为常数, 即有:  $k = C_p/C_v = 1.4$ 。

#### 1) 大气的状态方程

大气的基本状态参量温度  $T$ 、压强  $P$ 、密度  $\rho$  满足如下方程

$$P = \rho RT \quad (1.1)$$

式中,  $P$  是大气的压强 ( $N/m^2$ );  $\rho$  是大气的密度 ( $kg/m^3$ );  $T$  是大气的温度 (K);  $R$  是大气的常数 ( $R = 287.06 (N \cdot m)/(kg \cdot K)$ )。

## 2) 大气中的声速

声速是指声波在空气中传播的速度。声波是一种微弱的扰动波，在传递过程中只有压力波（压强）的变化而引起传递介质疏密程度的变化产生的振动，并没有物质的交换。在飞机的飞行性能分析中大气中的声速是用来表征空气压缩性的参量或尺度。大气中声速取决于大气的温度，声速  $c$  (m/s) 的计算公式为

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1.2)$$

## 3) 大气的静力学方程

平静大气的压强  $P$  随高度  $h$  的变化规律满足如下流体静力学方程（图 1.1）：

$$dP = -\rho g dh \quad (1.3)$$

式中， $g$  是重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )； $h$  是高度 (m)。

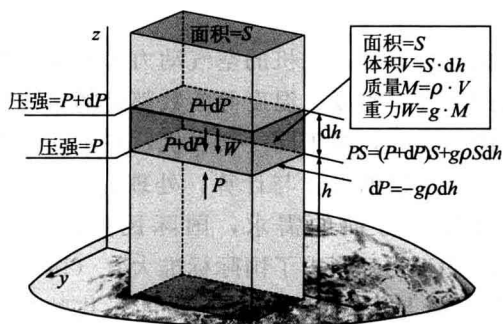


图 1.1 大气静力学方程

## 1.1.2 标准大气

国际标准大气对在 20km 高度范围内的大气参数变化规律如下。

## 1) 海平面的相关大气参数

## (1) 大气温度

$$T_0 = 15^\circ\text{C}(288.15\text{K}) = 59^\circ\text{F}(518.67^\circ\text{R}) \text{①}$$

## (2) 大气压强

$$P_0 = 1013.25\text{hPa}(\text{mbar}) = 760\text{mmHg} = 2116.2\text{lbf}/\text{ft}^2 = 29.92\text{inHg} \text{②}$$

## (3) 大气密度：

$$\rho_0 = 1.225\text{kg}/\text{m}^3 = 0.002377\text{slug} \text{③}/\text{ft}^3 (\text{lbf} \cdot \text{s}^2/\text{ft}^4)$$

①  $^\circ\text{F}$  为华氏度， $^\circ\text{R}$  为兰氏度。

②  $1\text{hPa}(\text{百帕}) = 100\text{Pa} = 1\text{mbar}(\text{巴})$ ， $1\text{lbf}(\text{磅力}) = 4.44822\text{N}$ ， $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$ 。

③  $1\text{slug}(\text{斯勒格}) = 14.594\text{kg}$ 。

(4) 声速:

$$c_0 = 340.294\text{m/s} = 1116.4\text{ft/s} = 1225\text{km/h} = 661.475\text{n mile}^{\text{①}}/\text{h}.$$

(5) 重力加速度:

$$g_0 = 9.80665\text{m/s}^2 = 32.17405\text{ft/s}^2$$

2) 标准大气的温度模型

标准大气的温度模型如图 1.2 所示。

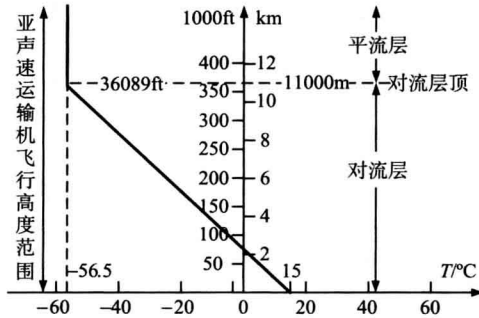


图 1.2 标准大气温度随高度变化率

(1) 对流层内 ( $\leq 11\text{km}$  (36089ft))。

对流层内标准大气的温度随高度的递减率为  $\lambda = 6.5^\circ\text{C}/\text{km} = 1.98^\circ\text{C}/(1000\text{ft}) \approx 2^\circ\text{C}/(1000\text{ft})$ 。因此任一高度  $h$  (km, 1000ft) 上的大气温度记作  $T_h$ , 则

$$T_h = T_0 - \lambda h (^\circ\text{C}) = 288.15 - \lambda h (\text{K})$$

(2) 在平流层内 (11~20km 或 36089~65574ft)。

任一高度  $h$  ( $11000\text{m} \leq h \leq 20000\text{m}$ ) 上的大气温度记作  $T_h$ , 则

$$T_h = -56.5^\circ\text{C} = 216.65\text{K} = -69.7^\circ\text{F} = 390^\circ\text{R} (11000\text{m} \leq h \leq 20000\text{m})$$

飞机的飞行性能, 通常是以 ISA 模型作为基准进行比较和分析的。在给定的高度飞行时, 实际大气条件一般表达为  $\text{ISA} \pm \Delta^\circ\text{C}$ 。例如, 飞机在 35000ft 的高度上飞行, 实际温度  $-45^\circ\text{C}$ 。而在 35000ft 高度的标准温度为  $\text{ISA} = 15 - 2 \times 35 = -55^\circ\text{C}$ 。实际温度比标准温度高  $10^\circ\text{C}$ , 则认为飞行高度上的温度条件为  $\text{ISA} + 10^\circ\text{C}$ 。

3) 标准大气的压强模型

标准大气压强的模型如图 1.3 所示。

(1) 在对流层内。

由式 (1.1) 可得

① 1n mile(海里) = 1.852km。

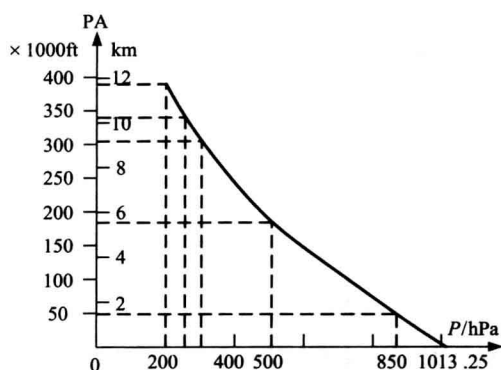


图 1.3 标准大气压强随高度变化率

$$\rho = P / (RT)$$

已知对流层内温度随高度的分布规律为  $T_h = T_0 - \lambda h$ , 把  $\rho$  和  $T_h$  的表达式代入式 (1.3), 并考虑到在标准大气海平面上的温度和压强分别为  $T_0$  和  $P_0$ , 因此对流层内任意高度上的压强记作  $P_h$ , 则有

$$P_h = P_0 \left( \frac{T_h}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}} = P_0 \left( 1 - \frac{\lambda h}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}} \quad (1.4)$$

把相关常数代入上式, 可得对流层内标准大气压强  $P_h$  随高度变化规律为

$$\begin{aligned} P_h &= 101325 \times \left( \frac{288.15 - 0.0065h}{288.15} \right)^{5.25588} \\ &= 101325 \times (1 - 2.25577 \times 10^{-5}h)^{5.25588} \text{ (N/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

或

$$P_h = 2116.2 \times (1 - 6.87488 \times 10^{-6} \times h)^{5.25588} \text{ (lb}^{\textcircled{1}}\text{/ft}^2\text{)}$$

(2) 平流层内 (11~20km 或 36089~65574ft)。

与对流层内大气压强随高度变化率的推导过程类似, 可得

$$P_h = P_{11} e^{-\frac{g_0(h-h_{11})}{RT_{11}}} \quad (1.5)$$

式中,  $P_{11} = 226.32\text{hPa}$  (在 11000m 或 36089ft 高度的标准气压);  $T_{11} = 216.65\text{K}$  (在 11000m 或 36089ft 高度的标准温度);  $h_{11} = 11000\text{m}$ 。

把相关常数代入式 (1.5), 可得平流层内标准大气压强  $P_h$  随高度变化规律为

$$\begin{aligned} P_h &= 22631.8e^{1.734-0.000157h} \text{ (N/m}^2\text{)} \\ P_h &= 472.759e^{1.734-0.00048h} \text{ (lb/ft}^2\text{)} \end{aligned}$$

通常把与标准大气压对应的高度称为气压高度 (pressure altitude, PA)。

#### 4) 标准大气的密度模型

根据  $P = \rho RT$  可得标准大气密度在对流层和平流层内的模型。

(1) 在对流层内 ( $0 \leq h \leq 11000\text{m}$ )。

对流层内任一高度  $h$  的大气密度记作  $\rho_h$ , 则有

$$\rho_h = \rho_0 \left( \frac{T_h}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda} - 1} = \rho_0 \left( 1 - \frac{\lambda h}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda} - 1} \quad (1.6)$$

带入相关已知量可得

<sup>①</sup> 1lb(磅) = 0.4536kg。

$$\rho_h = 1.225 \times \left( \frac{288.15 - 0.0065h}{288.15} \right)^{4.25588} \quad (\text{kg/m}^3)$$

或

$$\rho_h = 0.002377 \times (1 - 6.87488 \times 10^{-6} \times h)^{4.25588} \quad (\text{slug/ft}^3, \text{lbf} \cdot \text{s}^2/\text{ft}^4)$$

(2) 平流层内 (11~20km 或 36089~65574ft)。

同样可推得平流层内大气密度与高度的关系式为

$$\rho_h = \rho_{11} e^{-\frac{g_0(h-h_{11})}{RT_{11}}} \quad (1.7)$$

式中,  $\rho_{11}$  为 11km 高度的密度。相关参数代入式 (1.7) 可得

$$\rho_h = 0.036392 e^{1.734 - 0.000157h} \quad (\text{kg/m}^3)$$

或

$$\rho_h = 0.00070616 e^{1.734 - 0.00048h} \quad (\text{slug/ft}^3, \text{lbf} \cdot \text{s}^2/\text{ft}^4)$$

### 5) 无量纲形式的大气参数

在飞机的性能分析与计算中, 经常使用飞行高度  $h$  上的大气温度  $T$ 、压强  $P$ 、密度  $\rho$  与标准大气海平面的相应参数的比值, 分别记为

$$\text{温度比 (temperature ratio)} \quad \theta = T/T_0$$

$$\text{压强比 (pressure ratio)} \quad \delta = P/P_0$$

$$\text{密度比 (density ratio)} \quad \sigma = \rho/\rho_0$$

式中, 下标“0”表示标准大气海平面上的值。温度比  $\theta$ 、压强比  $\delta$ 、密度比  $\sigma$  均是无量纲参数, 本质上是飞行高度的函数, 其关系满足

$$\delta = \theta \cdot \sigma \quad (1.8)$$

## 1.1.3 标准大气表

为了方便使用, 根据标准大气的温度模型、压强模型和密度模型, 编制如表 1.1 所示的标准大气表。

表 1.1 标准大气表

高度 /ft	温度 /°C	压强			压力比 $\delta = P/P_0$	密度比 $\sigma = \rho/\rho_0$	音速 /kn <sup>①</sup>	高度 /m
		hPa	PSI (lbf/in <sup>2</sup> )	inHg				
40 000	-56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	-56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	-56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	-56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	-56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	-54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	-52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	-50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	-48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	-46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449

① 1kn (节) = 1n mile/h = 1.852km/h, 也有文献写作 kt。



续表

高度 /ft	温度 /°C	压强			压力比 $\delta = P/P_0$	密度比 $\sigma = \rho/\rho_0$	音速 /kn	高度 /m
		hPa	PSI (lbf/in <sup>2</sup> )	inHg				
30 000	-44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	-42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	-40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	-38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	-36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	-34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	-32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	-30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	-28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	-26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	-24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	-22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	-20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 406
17 000	-18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	-16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	-14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	-12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	-10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	-8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	-6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	-4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	-2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	-0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+3.1	812	11.78	23.90	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
-1 000	+17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	-305

## 1.2 高度

### 1.2.1 高度的相关概念

分析飞机性能的时候，离不开高度的概念。按照 ICAO 的定义，把通常所说的高度，即所谓某点或可以视为一个点的物体的高度 (height)，定义为从某一