



民用航空飞行技术专业核心教材

Principle of Flight — Airplane

飞机飞行原理

庆锋 朱怡 主编



中国民航出版社



民用航空飞行技术专业核心教材

飞机飞行原理

庆锋 朱怡 主编

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机飞行原理/庆锋, 朱怡主编. —北京: 中国
民航出版社, 2016. 3
ISBN 978-7-5128-0341-1

I. ①飞… II. ①庆… ②朱… III. ①飞机-飞行原
理 IV. ①V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 052350 号

飞机飞行原理

庆锋 朱怡 主编

责任编辑 邢璐 陈晨
内文制图 天津中天翔翼航空科技有限公司
出版 中国民航出版社 (010) 64279457
地址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排版 中国民航出版社录排室
印刷 北京画中画印刷有限公司
发行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开本 787×1092 1/16
印张 16.25
字数 397 千字
版印次 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5128-0341-1

定价 52.00 元

官方微博 <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网 <https://shop142257812.taobao.com>

电子邮箱 phcaac@sina.com

民用航空飞行技术专业核心教材 编委会

主任：董健康

副主任：杨 虎 于 剑 刘清贵

委员：（按姓氏笔画排序）

冯兴杰 刘铁祥 孙瑞山 周卫东

高庆吉 韩 雁

序 言

随着我国国民经济的飞速发展，民用航空在社会主义现代化建设中发挥着越来越重要的作用。在 21 世纪的今天，随着中国民航现代化和国际化进程的加快，民用航空进入了大众化时代，国际航空运输市场竞争日趋激烈。作为民航事业发展核心的飞行技术人员，行业与社会对其质量要求也越来越高。民航飞行员必须具备良好的政治素质、严谨的工作作风和适应飞行工作所需要的强健的身心素质，熟练掌握满足航空器运行所必需的航空理论知识、飞行程序和安全飞行方法，获得现代民用航空器的飞行驾驶技能和机组资源管理能力，达到符合国际民航标准的英语语言能力水平。

在此背景下，中国民航大学组织多年从事飞行基础理论和飞行执照理论教学的资深教员，编写了面向民用航空院校飞行技术专业本科学生的飞行基础理论系列教材。该系列教材在充分吸取国内外飞行理论教学先进经验的基础上，按照飞行人员执照理论考试大纲和知识点的最新要求，内容涵盖 CCAR-91 部《一般运行和飞行规则》、CCAR-61 部《民用航空器驾驶员和地面教员合格审定规则》和 CCAR-121 部《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》等规章中对飞行人员的航空知识要求，结合飞行训练实践，注重基本概念和基础理论的阐述，强调理论联系实际，具有基本概念清楚、理论系统规范、内容通俗易懂的特点。该系列教材除作为飞行技术专业学生的专业理论教材外，也可作为广大飞行爱好者自学航空知识及飞行理论的专业参考书。

本系列教材由飞行基础理论系列教材编写组编写。在编写过程中，得到了中国民用航空局人教司、飞标司，民航辽宁监管局，中国国际航空公司，中国东方航空公司，厦门航空公司等多家单位的大力支持，在此深表谢意。

前 言

本书是飞行基础理论系列教材之一，是交通运输类飞行技术专业本科生的专业基础教材。根据中国民航局 CCAR-61 部《民用航空器驾驶员和地面教员合格审定规则》，结合《私用驾驶员执照理论考试大纲（飞机）》、《商用驾驶员执照理论考试大纲（飞机）》及《航线运输驾驶员执照理论考试大纲（飞机）》知识点的要求，在专业多年来采用的讲义基础上，吸收国内外同类教材的优点并结合教学实践编写而成。

本教材突出基本原理、概念及理论的讲解，注重知识的实用性，使学生能够掌握空气动力学的基本知识，围绕中国民航局《驾驶员执照理论考试知识点》和《驾驶员实践考试标准》，将飞行原理与飞行训练有机结合。本教材内容立足专业标准、紧贴行业标准，可作为本科生和研究生学习飞机飞行原理的教材，也可供从事相关工作的各类专业人员学习参考。

全书共分九章。第一章为预备知识，主要讲解基本物理基础定理、飞行大气环境以及飞机基础知识；第二章为低速空气动力学，主要介绍低速气流特性，空气动力中升力和阻力的产生原因、特性及其关系；第三章为高速空气动力学，主要讨论亚音速和跨音速空气流动特性；第四章为螺旋桨空气动力学，主要研究螺旋桨拉力与旋转阻力的产生原理、变化规律及螺旋桨的特殊效应；第五章为平衡、稳定性和操纵性，主要分析飞机平衡的力与力矩关系和影响操纵性和稳定性的因素；第六章为飞机操纵与限制，主要介绍飞机平飞、爬升、下降和转弯的基本力学关系及基本操纵原理；第七章为多发飞机飞行操纵分析，主要阐述多发飞机的特点和一发失效的空气动力特性；第八章为特殊条件飞行，主要解释在特殊道面条件、机翼状态和气象条件下飞机的气动特性；第九章为机动飞行动作分析，主要涵盖局方要求的飞行训练科目内容及操纵原理分析。

本教材由中国民航大学飞行技术学院教材编写组编写，其中第二章、第五章和第九章由庆锋负责编写，第一章、第三章、第四章和第七章由朱怡负责编写，第六章和第八章由蒋思源负责编写。在编写过程中，华克强教授提出了许多宝贵的修改意见，并对全书进行了校审，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏等不足之处，敬请广大读者给予批评指正。

编 者

2016 年 5 月

目 录

序 言	
前 言	
第一章 预备知识	1
1.1 物理基础	1
1.2 外界大气条件	9
1.3 飞机基础知识	24
思考题	36
第二章 低速空气动力学	37
2.1 气流特性	37
2.2 空气动力	51
2.3 升力特性	62
2.4 阻力特性	66
2.5 升力与阻力的关系	74
思考题	80
第三章 高速空气动力学	81
3.1 音速与马赫数	81
3.2 微弱扰动与强扰动	88
3.3 亚音速空气动力特性	92
3.4 跨音速空气动力特性	94
3.5 后掠翼特性及优势	99
3.6 超临界翼型	104
思考题	105
第四章 螺旋桨空气动力学	106
4.1 螺旋桨结构	106
4.2 拉力和旋转阻力	114
4.3 负拉力	118
4.4 螺旋桨工作状态	122
4.5 螺旋桨效应	122
4.6 发动机失效	127
思考题	127

第五章 平衡、稳定性和操纵性	128
5.1 平衡	128
5.2 稳定性	136
5.3 操纵性	142
思考题	154
第六章 飞机操纵与限制	155
6.1 平飞	155
6.2 上升	161
6.3 下降	164
6.4 转弯和盘旋	169
6.5 操纵限制	173
思考题	179
第七章 多发飞机飞行操纵分析	180
7.1 多发飞机	180
7.2 速度概念及特点	180
7.3 性能平衡	182
7.4 飞行各阶段	183
7.5 一发失效	184
7.6 双发飞机低速失速螺旋特点	194
思考题	194
第八章 特殊条件飞行	196
8.1 跑道道面条件	196
8.2 污染机翼	197
8.3 特殊气象条件	199
思考题	215
第九章 机动飞行动作分析	216
9.1 局方要求	216
9.2 矩形机动和起落航线	217
9.3 转弯机动	227
9.4 8字机动	232
9.5 失速训练	241
9.6 螺旋机动	247
9.7 急上升转弯	248
9.8 急盘旋下降	249
思考题	251

参考文献

第一章 预备知识

【学习目标】

- 基本物理量定义及其单位换算；物理基本定律；
- 外界实际大气环境与标准大气的关系；高度的概念；
- 飞机基本结构概述；翼型及平面形状参数特征。

1.1 物理基础

本节主要介绍基本物理量及其单位换算；回顾经典力学、热力学等基本定律；讨论外界大气条件对飞机飞行的影响。

1.1.1 单位

1. 基本单位

在航空上，主要采用广泛通用的国际单位制（International System），但仍有部分物理量沿用英制单位，如高度单位英尺（ft）、空速单位节（kt）。表 1-1 为基本单位质量、长度和时间的国际单位和英制单位表示形式。

表 1-1 单位制

	国际单位制 (International System)	英制单位 (British Engineering System)
长度	米 (meter)	英尺 (foot)
质量	千克 (kilogram)	斯勒格 (slug)
时间	秒 (second)	秒 (second)

1) 长度单位

长度的国际基本单位是米（m）。以通过法国巴黎的地球子午线全长的四千万分之一作为国际长度基本单位，因此通过巴黎的经线长度为 40000 km。测量长距离时，使用千米（km）做单位。

在航空上常使用海里（nm）或英里（mile）等作为英制长度单位。在航空业中由于英美两国占有传统上的优势，这种英制计量单位仍在广泛使用，主要长度英制单位形式如下：

英尺（foot）：1 ft

英寸（in）：12 in = 1 ft

码（yard）：1 yard = 3 ft

英里（statute mile）：1 mile = 5280 ft = 0.87 nm

海里（nautical mile）：1 nm = 6080 ft = 1.15 mile

英制单位与国际单位的换算关系如下:

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 3.28 \text{ ft}$$

$$1 \text{ yard} = 0.9144 \text{ m}$$

$$1 \text{ mile} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ nm} = 1.852 \text{ km}$$

$$1 \text{ km} = 0.54 \text{ nm}$$

在平面上两点之间的最短距离是直线。但地球是一个不规则的椭球体, 北极较凸, 南极偏凹, 地球表面两点, 起始点与终点之间的连线是弧线, 弧线的半径越大, 弧的弯曲程度越小, 长度越短。地球表面任意两点都可与地心构成一个平面, 此平面与地球表面相交后形成一条弧线, 即这两点之间的最短距离。因此包含地心的平面与地球表面相交在地球表面上所形成的圆, 就是地球表面上半径最大的圆, 称为大圆。沿着这条弧线飞行的航线叫做大圆航线, 是最短航线。经度线和赤道都是大圆。例如北京至旧金山的大圆航线(不断调整航向) 距离约为 9084 km, 若飞等角航线(保持航向角不变) 距离约为 10248 km, 两者相差约 1000 km, 且航行时间及燃油消耗更多。

例 1.1 海里 (nm) 与千米 (km) 的换算关系, 即 1 nm 等于多少千米 (km)?

解: 海里是航空或航海中为了实用所制定的长度单位。地球上大圆弧 1', 即 $\frac{1}{60}^\circ$ 的弧长度为 1 nm, 地球平均半径为 6371 km, 大圆弧的周长为:

$$2\pi \cdot 6371 = 40009.88 \text{ km}$$

则 1' 的长度为:

$$40009.88 / 360 / 60 = 1.852 \text{ km}$$

因此 1 nm 等于 1852 m。

2) 质量单位

质量英制单位与国际单位的关系为:

$$1 \text{ slug} = 14.59 \text{ kg}$$

例 1.2 磅 (lb) 与千克 (kg) 之间的关系是什么?

解: 使质量为 1 (slug) 的物体产生 1 ft/s^2 加速度的力为 1 lb。

利用英制单位和国际单位的换算关系得到 1 lb 力为:

$$F = m \cdot a \tag{1-1}$$

则

$$1 \text{ lb} = 1 \text{ slug} \cdot 1 \text{ ft/s}^2 = 14.59 \text{ kg} \cdot 0.3048 \text{ m/s}^2 = 4.448 \text{ N}$$

因 1 kg 力为:

$$G = mg \tag{1-2}$$

$$1 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N}$$

则对应比例关系为:

$$9.81 / 4.448 = 2.20462$$

因此得到质量 kg 与力的单位磅 lb 之间的对应关系:

$$1 \text{ kg} \leftrightarrow 2.20462 \text{ lb}$$

$$1 \text{ lb} \leftrightarrow 0.4536 \text{ kg}$$

2. 衍生单位

由基本单位衍生出的单位有面积、体积、速度、加速度、力矩、力、重量、功、功率、能量、压强、密度、温度等。

1) 体积单位

$$\text{立方米 (m}^3\text{): } 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$$

$$\text{升 (L): } 1 \text{ liter} = 1000 \text{ cm}^3$$

$$\text{美制加仑 (gallon): } 1 \text{ US gal} = 3.785 \text{ L}$$

$$\text{英制加仑 (gallon): } 1 \text{ Britain gal} = 4.546 \text{ L}$$

2) 速度单位

$$\text{米每秒 (m/s), 千米每小时 (km/h)}$$

$$\text{英里每小时 (MPH): } 1 \text{ MPH} = 1 \text{ mile/h}$$

$$\text{节 (knot): } 1 \text{ kt} = 1 \text{ nm/h}$$

$$1 \text{ kt} = 1.15 \text{ mile/h} = 1.85 \text{ km/h} = 0.51 \text{ m/s}$$

3) 压强单位

$$\text{帕 (Pa): } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$\text{百帕 (hPa), 千帕 (kPa), 兆帕 (MPa)}$$

$$1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}; 1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}; 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$\text{毫米汞柱 (mmHg), 英寸汞柱 (inHg): } 760 \text{ mmHg} = 29.92 \text{ inHg} = 1013.25 \text{ hPa}$$

$$\text{巴 (bar): } 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^3 \text{ hPa}$$

$$\text{毫巴 (mbar): } 1 \text{ mbar} = 10^{-3} \text{ bar}; 1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}$$

$$\text{磅每平方英寸 (psi): } 1 \text{ psi} = 1 \text{ lb/in}^2; 1 \text{ psi} = 68.948 \text{ hPa}$$

4) 温度单位

表 1-2 四种温度制式及换算关系

	沸点 (Boiling Point of Water)	冰点 (Freezing Point of Water)	绝对零度 (Absolute Zero)
摄氏 (Centigrade)	100°C	0°C	-273°C
开氏 (Kelvin)	373 K	273 K	0 K
华氏 (Fahrenheit)	212°F	32°F	-460°F
兰金 (Rankin)	672°R	492°R	0°R

(1) 摄氏温标 (Centigrade): 也称百分温标。由瑞典人摄尔司在 1742 年规定: 在标准大气条件下, 水的冰点为 0°C, 沸点为 100°C, 中间分为 100 等分, 每个等分代表 1°C。摄氏温度用°C 表示, 如图 1.1 所示。

(2) 开氏温标 (Kelvin): 也称绝对温标、热力学温标。绝对温标每一度的大小和摄氏温标完全相同, 不过, 它以理论上所说的分子热运动将完全停止时的温度, 即 -273.15°C 作为 0 K, 用 K 表示, 如式(1-3)所示。

$$K = 273.15 + ^\circ\text{C} \quad (1-3)$$

-273.15℃是温度的真正零度，到目前，使物质的热运动完全停止还是不可能的，真正零度只可能无限接近，但永远也不可能达到。摄氏温标与开氏温标的关系如图 1.2 所示。

(3) 华氏温标 (Fahrenheit): 1709 年由德国人华伦海发明。规定在一个大气压下，水的冰点为 32 °F，沸点为 212 °F，中间分为 180 等分，每等分代表 1 °F。华氏温度用 °F 表示，与摄氏温标的关系如图 1.3 所示。

$$^{\circ}\text{F} = \frac{180}{100} \times ^{\circ}\text{C} + 32 \quad (1-4)$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{100}{180} \quad (1-5)$$

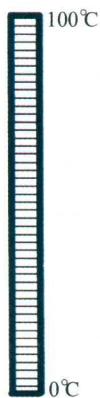


图 1.1 摄氏温标

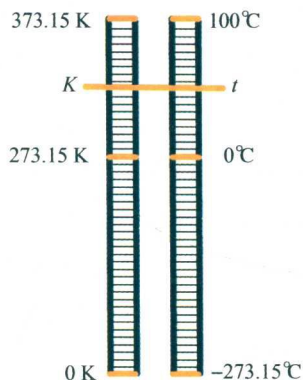


图 1.2 摄氏温标与开氏温标

例 1.3 用华氏温标表示绝对零度。

解：由式 (1-3) 及式 (1-4) 得

$$\text{K} = 273.15 + ^{\circ}\text{C}$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{180}{100} \times ^{\circ}\text{C} + 32$$

$$\text{F} = 1.8 \times (-273.15) + 32 = 459.7 \text{ } ^{\circ}\text{F}$$

(4) 兰金温标 (Rankine): 是一种绝对温标。每一度的大小和华氏温标完全相同，以绝对零度为其零点，用 °R 表示，与开氏温标和华氏温标的关系如图 1.4 所示。

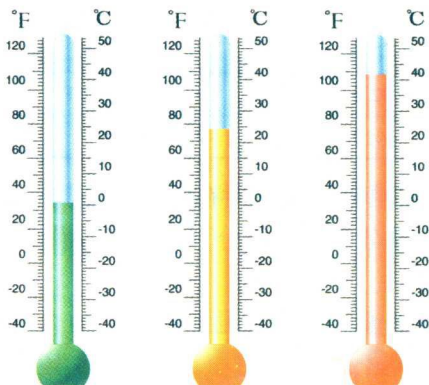


图 1.3 摄氏温标与华氏温标

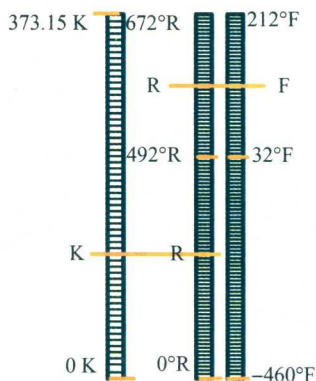


图 1.4 华氏温标、开氏温标与兰金温标

$$R = 459.7 + {}^{\circ}F \quad (1-6)$$

$$R = 1.8 K \quad (1-7)$$

5) 力和重量

力：是力学中的基本概念之一，是使物体获得加速度的外因。在动力学中它等于物体的质量与加速度的乘积。

$$F = m \times a \quad (1-8)$$

重力：地面附近的物体由于地球的吸引而受到的力，叫做重力。数值上等于物体质量与重力加速度乘积。

$$W = m \times g \quad (1-9)$$

6) 功和功率

功：物理学中，机械功是指力对距离的累积。机械功通常简称为功。与机械能相似的是，功也是标量。

$$W = F \times d \quad (1-10)$$

功或能量的国际标准单位均为焦耳 (J)。1 J = 1 N · m。

功率：是单位时间所做的功。例如，一架飞机的涡轮螺旋桨发动机提供了一个力 F ，与此同时，该发动机的功率为 P ，而飞机的运动速度为 v ，则

$$P = F \times v \quad (1-11)$$

功率的国际标准单位为瓦特 (W)。1 W = N · m/s。需要注意的是不要混淆功的缩写与功率的单位，虽然两者的缩写都为 W。

1.1.2 物理基本定律

1. 经典力学——牛顿定律

在 17 世纪，哲学家和数学家牛顿提出了三个基本的运动定律。在当时，还没有飞机这个概念，但是几乎所有已知的运动都可以符合这三个定律。这些定律以牛顿的名字命名如下：第一定律说明了力的含义：力是改变物体运动状态的原因；第二定律指出了力的作用效果：力使物体获得加速度；第三定律揭示出力的本质：力是物体间的相互作用。

1) 牛顿第一定律

一切物体在不受外力作用或合外力为零时，总保持静止或匀速直线运动状态。或指一个物体一直保持其运动状态直到有外界力量改变它。

停机坪上的静止飞机会一直保持静止，除非施加一个足够强的克服其惯性的力。然而，一旦其开始运动，它的惯性会让其保持运动状态，克服施加于飞机上的各种其他力量。这些力量或推动其加速运动，或减慢其速度，或改变速度的方向。

2) 牛顿第二定律

物体的加速度跟物体所受的合外力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向与合力的方向相同。式 (1-8) 可写成如下形式：

$$\Sigma F = ma \quad (1-12)$$

涉及克服牛顿第一定律的惯性因素包括方向和速度的改变，有两层含义：从静止到运动（正加速度）和从运动到停止（负加速度或减速）。

3) 牛顿第三定律

两个物体之间的作用力和反作用力，在同一条直线上，大小相等，方向相反。

飞机螺旋桨高速转动向后推动空气，空气向相反的方向推动螺旋桨；喷气飞机，冲压空气进入燃气涡轮发动机被压缩和燃油混合后经点火排气所产生的发动机向后推动力叫做推力。作用于发动机的反向等大小的作用力推动发动机，进而使得飞机前进，如图 1.5 所示。

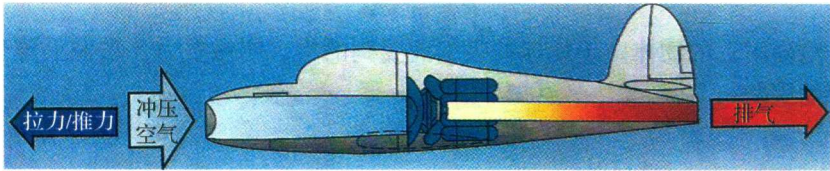


图 1.5 作用力与反作用力

将飞机视为质点，飞机所受的主要四个力为升力 L 、阻力 D 、重力 W 及拉力或推力 T 。若该四个力合力为零，则飞机将保持静止或匀速直线运动状态；若合外力不为零，则产生相应合外力方向的加速度。

飞机在空气中运动，受到空气的反作用力，即空气动力。空气动力的两个分量分别为与气流相垂直的升力及与气流相平行的阻力。

2. 气体定律和理想气体状态方程

1) 玻意耳定律

玻意耳定律 (Boyle's Law, 又称 Marriott's Law 或玻马定律, 由玻意耳和马里奥特在互不知情的情况下, 间隔不久先后发现) 指出, 如图 1.6 所示, 在定量定温下, 理想气体的体积与气体的压强成反比。玻意耳在 1662 年根据实验结果提出, 在密闭容器中的定量气体, 在恒温下, 气体的压强和体积成反比关系。等质量等温, 压强增加体积减小, 即压强和体积成反比。

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1-13)$$
$$P \propto \frac{1}{V}$$

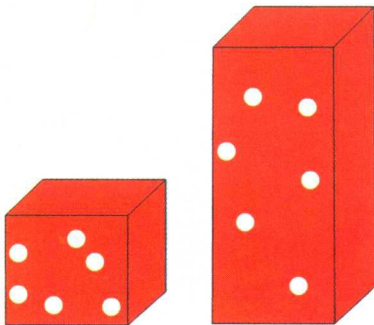


图 1.6 玻意耳定律

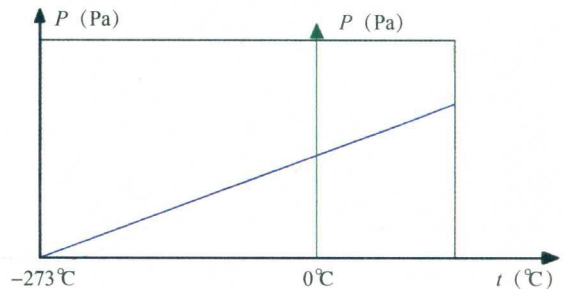


图 1.7 查理定律

2) 查理定律

查理定律 (如图 1.7 所示) 指出, 一定质量的气体, 当其体积一定时, 压强与热力学温度成正比。即

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (1-14)$$

$$P \propto T$$

气体的压强 P 和温度 T 可用压强计和温度计测定。实验可知, $P-t$ 图线为过坐标原点的直线, 且与 t 轴交于 -273°C 处。

3) 盖·吕萨克定律

盖·吕萨克发现气体热膨胀定律 (即盖·吕萨克定律): 一定质量的气体, 当压强保持不变时, 它的体积 V 随温度 t 线性变化, 即一定质量气体的体积跟热力学温度成正比。即等质量等压, 温度增加体积增大。即 $V \propto T$ 。

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1-15)$$

4) 理想气体状态方程

日常所见到的气体即实际气体。理想气体是假想只有质量而没有体积的气体分子, 而且气体分子之间是没有作用力的气体。一般在压力不太大、温度不太低的条件下, 基本上符合理想气体的两个假设, 可将空气作为理想气体来考虑, 空气动力学中通常将实际气体简化为理想气体来处理。在室温和常压范围内, 实际气体中分子的体积和分子间的相互作用可以略去不计。空气除高温高压情况外一般可看为理想气体, 因此研究大气的状态可由温度 T 、压强 P 和密度 ρ 决定, 此三个参数为状态参量, 理想气体状态方程表征气体的三个参数之间满足一定的函数关系。

$$P = \rho RT \quad (1-16)$$

温度 T 为绝对开式温度; 压强 P 为大气静压值; R 为气体常数, 不因 T 、 P 和 ρ 的变化而变化。对不同的气体, R 是不同的。空气的气体常数为 $287.15 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于一定质量 M 的空气, 其体积为 V , 那么式 (1-16) 可表示为:

$$P = \rho RT = \frac{M}{V} RT \quad (1-17)$$

理想气体状态方程是描述温度、压强和密度即大气参数之间关系的方程, 如式 (1-18):

若质量 M 与 R 为常数, 则:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1-18)$$

当密度保持不变时即其体积不变: 温度升高, 压强增大; 温度降低, 压强降低。

当温度保持不变时: 压强增大, 体积缩小, 密度增加; 压强降低, 体积增大, 密度减小。

当压强保持不变时：温度升高，体积变大，密度减小；温度降低，体积变小，密度增大。

5) 绝热过程

气体在流动中，最为常见的为绝热流动，气体和外界没有热交换，气体微团间亦没有热交换。理想的绝热过程是一定量的气体在状态变化时与外界没有传热，是个封闭体系，气体内部也互不传热。理想的绝热过程也称为等熵过程。各气体的状态参数压强、密度、温度等可表示为：

$$P = C\rho^k \tag{1-19}$$

或

$$\frac{P_1}{\rho_1^k} = \frac{P_2}{\rho_2^k} \tag{1-20}$$

其中， k 为绝热指数，与气体种类及温度有关， C 为常数。在空气动力学中，温度与压强较低条件下，可近似将绝热指数定义为常数。如空气的绝热指数为

$$k = 1.4$$

带入理想气体状态方程 $P = \rho RT$ 得：

$$T/\rho^{k-1} = C \tag{1-21}$$

$$T/P^{(k-1)/k} = C \tag{1-22}$$

3. 守恒方程

1) 质量守恒

质量守恒定律 (Conservation of Mass)：自然界的基本定律之一。在任何与周围隔绝的物质系统 (孤立系统) 中，不论发生何种变化或过程，其总质量保持不变。

2) 能量守恒

能量守恒定律 (Conservation of Energy)：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中，能量的总量不变。

(1) 动能 (Kinetic Energy)：物体由于运动而具有的能量，称为物体的动能。动能大小为物体质量与速度平方乘积的一半。

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1-23}$$

质量相同的物体，运动速度越大，动能越大；运动速度相同的物体，质量越大，具有的动能就越大。

动能是标量，无方向，只有大小，且不能小于零。与功一致，可直接相加减；动能是相对量，不同的参照系中，速度 v 不同，物体的动能也不同。

(2) 势能 (Potential Energy)：重力势能 (Gravitational Potential Energy) 是物体因为重力作用而拥有的能量：

$$E_p = mgh \tag{1-24}$$

其中 m 为质量, g 取 9.8 N/kg , h 为物体距基准面的高度。

(3) 机械能 (Mechanical Energy): 机械能是动能与势能的总和, 势能分为重力势能和弹性势能。

(4) 内能 (Internal Energy): 内能是物体或若干物体构成的系统内部一切微观粒子的运动形式所具有的能量总和。热力学第一定律指出, 指定物体的内能的变化量等于外界对它做的功 W 和外界传递给它的热量 Q 的总和。

决定动能的是质量与速度; 决定重力势能的是高度和质量; 决定弹性势能的是劲度系数与形变量; 动能与势能可相互转化; 机械能只是动能与势能的和; 机械能是表示物体运动状态与高度的物理量。

如飞机的机械能保持守恒, 因此当飞机在发动机推力不变的情况下, 损失的 H 高度, 将会获得一定的速度, 即转化为动能。相反, 如果飞机在爬升, 则速度减小, 动能减小。飞机着陆后的速度的减少, 动能的减少, 转化成刹车机轮温度的升高。

1.2 外界大气条件

飞机在大气即空气当中运动, 了解飞机飞行所处的环境对于飞机飞行原理的学习是必要的, 因为飞机的空气动力、发动机工作状态都与大气密切相关。

1.2.1 空气组成

飞行所处的大气是环绕地球并贴近其表面的一层空气包层。它是地球相当重要的组成部分, 就像海洋或陆地一样。然而, 空气不同于陆地和水, 因为它是多种气体的混合物。它具有质量, 也有重量和不确定的形状。

1. 大气组成

如图 1.8 所示, 大气是由 78% 的氮气, 21% 的氧气以及 1% 的其他气体, 如氩气和氦气等组成的。由于部分元素比其他的重, 较重的气体如氧气, 其天然的趋势就会占据地球的表面, 而较轻的气体会升高到较高的区域。因此大多数氧气包含在约 35000 ft (11000 m) 高度以下。

因为空气有质量也有重量, 可看作一个物体。既为物体, 必然遵循物理定律。气柱驻留于地球表面之上, 有重量, 在海平面上产生的平均压力为每平方英寸 14.7 lb, 或者为 29.92 in、760 mmHg 的高度所对应的压力。由于其浓度是有限的, 在更高的高度上, 那里的空气更加稀薄。如在 18000 ft 高度的大气重量仅为

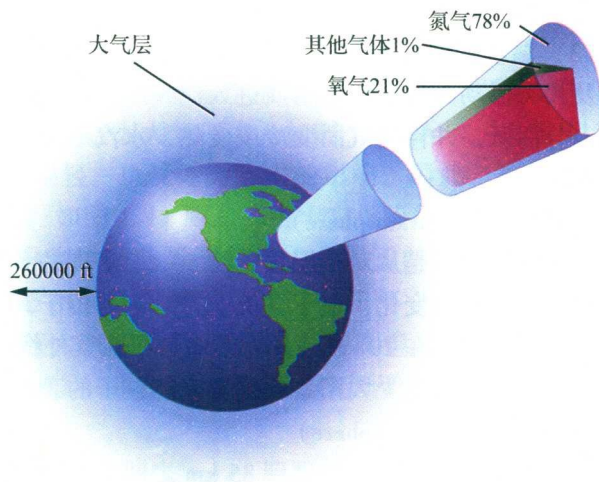


图 1.8 大气环境及组成