

飞行技术专业系列教材

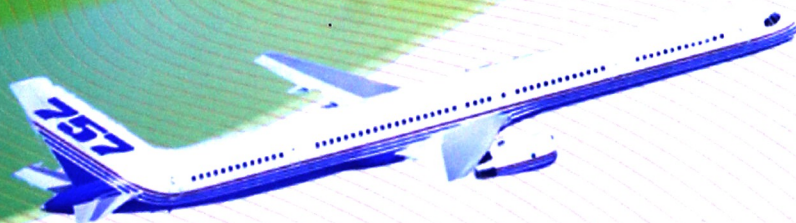
FEIXING JISHU ZHUANYE XILIE JIAOCAI

F E I X I N G Y U A N L I

# 飞行原理

(第二版)

● 主 编 杨 俊 杨军利 叶 露



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

飞行技术专业系列教材

# 飞行原理

(第二版)

主编 杨 俊 杨军利 叶 露

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书是飞行技术专业的专业教材。

全书共包括 10 章内容。分别介绍飞机和大气的基本知识、飞机空气动力学基础、螺旋桨空气动力、飞机稳定性和操纵性、飞机的基本飞行状态和飞行性能、飞机的特殊飞行、重量与平衡等。

本书主要供飞行技术专业学生使用,也可供交通运输专业和相关专业使用,还可作为航空院校学生的参考用书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

飞行原理 / 杨俊, 杨军利, 叶露主编. —2 版. —成都:  
西南交通大学出版社, 2012.1  
飞行专业系列教材  
ISBN 978-7-5643-1596-2

I. ①飞… II. ①杨… ②杨… ③叶… III. ①飞行原  
理—教材 IV. V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 275821 号

---

### 飞行技术专业系列教材

### 飞 行 原 理

(第二版)

主 编 杨 俊 杨军利 叶 露

\*

责任编辑 黄淑文

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 17.5

字数: 434 千字

2012 年 1 月第 2 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-1596-2

定价: 30.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



# 前 言

本书是飞行技术专业的专业教材。第一版于2004年4月出版。第二版根据中国民航飞行学院2010年审定通过的《飞行原理》教学大纲和中国民用航空规章61部(CCAR61)《民用航空器驾驶员和飞行教员合格审定规则》的要求在第一版的基础上重新修订。

在本教材的编写中,注意吸收国内外同类教材的优点,把握飞行员应该掌握的航空知识主线,贯穿必要的知识点,着重从物理概念的角度讲清问题的实质,突出基本原理的学习和基本方法的训练。注重知识的系统性和适用性,力求做到文字通俗易懂、内容博而不杂,起到为飞行打基础的作用。

全书共分10章。第1章为飞机和大气的一般介绍,主要介绍飞机的基本组成和飞行的大气环境;第2章为飞机的低速空气动力,主要介绍飞机升力、阻力的产生原理和变化规律等空气动力学知识;第3章为螺旋桨空气动力,主要介绍螺旋桨拉力的产生原理、变化规律以及螺旋桨的副作用等有关知识;第4章为飞机的平衡、稳定性和操纵性,主要介绍飞机稳定性和操纵性的基本概念、影响因素等有关知识;第5章为平飞、上升、下降,主要介绍飞机平飞、上升、下降的基本性能及操纵原理;第6章为盘旋,主要介绍飞机的基本机动性能和转弯的操纵原理;第7章为起飞和着陆,主要介绍飞机起飞和着陆性能及操纵原理;第8章为特殊飞行,主要介绍飞机失速、螺旋、在扰动气流中飞行、空中一台发动机失效后的飞行等有关知识;第9章为重量与平衡,主要介绍飞机重心位置的确定原理以及一些主要的确定方法;第10章为高速空气动力学基础,主要介绍空气亚、跨音速流动的一些基本规律。

第一版教材的第1章、第6章、第7章和第9章由中国民航飞行学院余江编写,第2章、第5章和第8章由中国民航飞行学院杨俊编写,第3章、第4章和第10章由中国民航飞行学院王大海编写。

第二版教材对第3、4、6、8、10章内容作了部分调整,增加空中一发失效后的飞行。其中第2章、第5章、第6章和第8章由中国民航飞行学院杨俊编写,第1章、第7章和第9章由中国民航飞行学院杨军利编写,第3章、第4章和第10章由中国民航飞行学院叶露编写。刘志强负责教材大部分插图的绘制。全书由杨俊统稿。

由于占有资料难全,加之编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

本书在编写过程中得到中国民航飞行学院教务处、飞行技术学院及飞行力学教研室的大力支持,并参阅了许多作者的著作,在此深表谢意。

作 者

2011年11月



# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第1章 飞机和大气的一般介绍 .....    | 1   |
| 1.1 飞机的一般介绍 .....       | 1   |
| 1.2 飞行大气环境的一般介绍 .....   | 10  |
| 复习思考题 .....             | 17  |
| 第2章 飞机的低速空气动力 .....     | 18  |
| 2.1 空气流动的描述 .....       | 18  |
| 2.2 升 力 .....           | 25  |
| 2.3 阻 力 .....           | 30  |
| 2.4 飞机的低速空气动力性能 .....   | 37  |
| 2.5 增升装置的增升原理 .....     | 43  |
| 复习思考题 .....             | 47  |
| 第3章 螺旋桨的空气动力 .....      | 49  |
| 3.1 螺旋桨的拉力和旋转阻力 .....   | 49  |
| 3.2 螺旋桨拉力在飞行中的变化 .....  | 56  |
| 3.3 螺旋桨的有效功率和效率 .....   | 62  |
| 3.4 螺旋桨的副作用 .....       | 66  |
| 复习思考题 .....             | 72  |
| 第4章 飞机的平衡、稳定性和操纵性 ..... | 73  |
| 4.1 飞机的平衡 .....         | 73  |
| 4.2 飞机的稳定性 .....        | 80  |
| 4.3 飞机的操纵性 .....        | 92  |
| 复习思考题 .....             | 102 |
| 第5章 平飞、上升、下降 .....      | 104 |
| 5.1 平 飞 .....           | 104 |
| 5.2 巡航性能 .....          | 114 |
| 5.3 上 升 .....           | 118 |
| 5.4 下 降 .....           | 126 |
| 复习思考题 .....             | 131 |
| 第6章 盘 旋 .....           | 133 |
| 6.1 盘旋中的作用力和盘旋性能 .....  | 133 |
| 6.2 盘旋的操纵原理 .....       | 139 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 6.3 侧滑和螺旋桨副作用对盘旋的影响·····    | 142        |
| 6.4 盘旋相关机动飞行简介·····         | 144        |
| 复习思考题·····                  | 146        |
| <b>第7章 起飞和着陆</b> ·····      | <b>147</b> |
| 7.1 预备知识·····               | 147        |
| 7.2 地面滑行·····               | 150        |
| 7.3 起 飞·····                | 153        |
| 7.4 着 陆·····                | 162        |
| 7.5 风对起飞、着陆的影响及修正·····      | 172        |
| 7.6 着陆目测·····               | 181        |
| 7.7 特殊情况下的起飞、着陆·····        | 186        |
| 复习思考题·····                  | 199        |
| <b>第8章 特殊飞行</b> ·····       | <b>200</b> |
| 8.1 失速和螺旋·····              | 200        |
| 8.2 在扰动气流中的飞行·····          | 205        |
| 8.3 在积冰条件下的飞行·····          | 211        |
| 8.4 低空风切变·····              | 214        |
| 8.5 “吃气流”·····              | 217        |
| 8.6 飞机的操纵限制速度·····          | 222        |
| 8.7 空中一台发动机失效后的飞行·····      | 225        |
| 复习思考题·····                  | 229        |
| <b>第9章 重量与平衡</b> ·····      | <b>230</b> |
| 9.1 重量与平衡术语·····            | 230        |
| 9.2 重量与平衡原理·····            | 232        |
| 9.3 重量与平衡的确定方法·····         | 233        |
| 9.4 装载移动、增减后重心位置的确定·····    | 238        |
| 9.5 飞机不同类别时的重量与平衡问题·····    | 240        |
| 复习思考题·····                  | 240        |
| <b>第10章 高速空气动力学基础</b> ····· | <b>241</b> |
| 10.1 高速气流特性·····            | 241        |
| 10.2 翼型的亚跨音速气动特性·····       | 251        |
| 10.3 后掠翼的高速升/阻力特性·····      | 260        |
| 复习思考题·····                  | 268        |
| <b>参考文献</b> ·····           | <b>269</b> |

# 第 1 章 飞机和大气的一般介绍

人类对空中飞行的愿望自古就有，对飞行活动进行了数个世纪顽强不懈的探索。早期的飞行活动是以滑翔机或热气球的形式进行的。直到 1903 年 12 月 17 日，莱特兄弟在美国北卡罗来纳州的 Kitty Hawk，才实现了人类历史上第一次带动力的、持续的、可控的飞行，如图 1.1 所示。

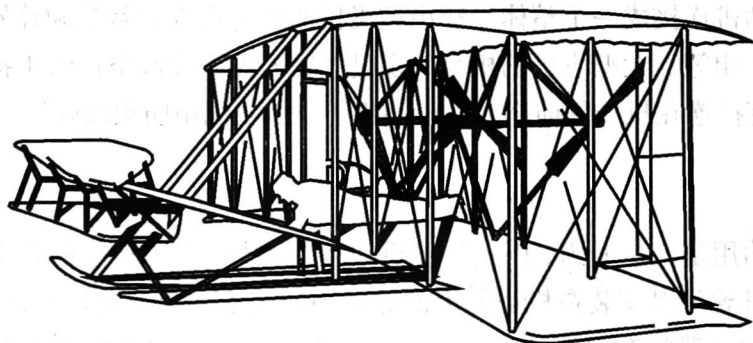


图 1.1 美国莱特兄弟的“飞行者”号

飞机是在大气中飞行的，我们要认识飞机在大气中运动的规律，就有必要先学习一些有关飞机和大气的基本知识。

## 1.1 飞机的一般介绍

飞机是目前最主要的飞行器。它广泛地用于军事和国民经济两方面。本节简要地介绍飞机的主要组成部分及其功用、操纵飞机的基本方法以及机翼的形状等问题。

### 1.1.1 飞机的主要组成部分及其功用

自从世界上出现飞机以来，虽然飞机的结构形式在不断改进，飞机类型也不断增多，但是到目前为止，除了少数特殊的飞机之外，大多数飞机都是由五个主要部分组成，即：机翼、机身、尾翼、起落装置和动力装置。它们各有其独特的功用。民航客机各主要部分名称如图 1.2 所示。





图 1.2 飞机的主要组成部分 (Boeing-737)

## 1. 机 身

机身的主要功用是装载机组、旅客、货物和其他必须设备，还可将飞机的其他部分，如尾翼、机翼、发动机连接成一个整体。轻小型飞机的机身内部通常是和外界连通的，机舱内气压和外部大气压相等。大型飞机的机身大多是气密座舱，在高空由人工提供增压。单发飞机的发动机通常直接连在机身的前部，在发动机与座舱之间由防火墙隔开。

## 2. 机 翼

机翼的主要功用是产生升力，以支持飞机在空中飞行。升力产生的效率是机翼设计时的主要考虑问题。机翼可以安装在机身的上部分、中间或下部分，这种设计分别称为上单翼、中单翼和下单翼。机翼的数目也可以变化，安装有一副机翼的飞机称为单翼机，两副机翼的飞机称为双翼机。历史上曾流行过双翼机，甚至还出现过多翼机，但现在飞机一般都是单翼机。

机翼在飞机的稳定性和操纵性中扮演着重要的角色。机翼决定了飞机的横侧稳定性大小。机翼上安装的可操纵翼面主要有副翼和襟翼。副翼一般在机翼的后沿外侧，两边副翼偏转方向相反，当它偏转时引起两翼升力大小不同，可使飞机滚转；襟翼一般在机翼的后沿内侧，两边襟翼偏转方向相同，放下襟翼能使机翼升力增大，用于飞机起飞着陆时降低起降速度。较复杂的机翼设计还包含前缘襟翼、前缘缝翼，可改善飞机的低速特性。大型飞机机翼普遍使用减速板或扰流板，用于飞机空中机动和地面滑跑减速。

另外，机翼还可用于吊装发动机、安装起落架和设置起落架轮舱，机翼的内部空间一般可用于安装油箱。图 1.3 为大部分民航客机机翼外观结构。

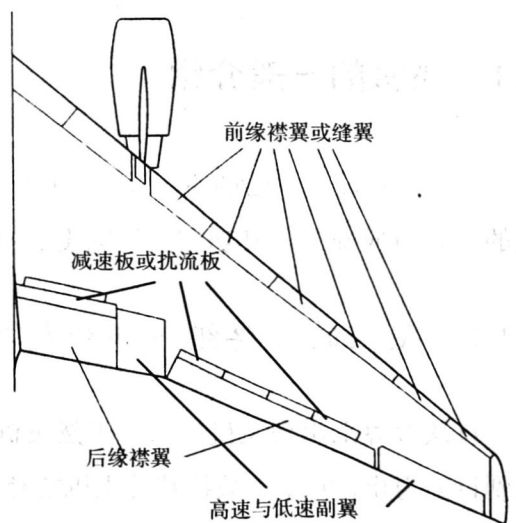


图 1.3 机翼结构

### 3. 尾 翼

尾翼包括水平尾翼和垂直尾翼。在典型的设计中，水平尾翼由固定的水平安定面和可动的升降舵组成，垂直尾翼则包括固定的垂直安定面和可动的方向舵。尾翼主要用来操纵飞机的俯仰和偏转，升降舵上下偏转改变水平尾翼上的升力大小，分别使飞机转入上升或下降。方向舵左右偏转改变垂直尾翼上侧力的大小，使飞机向左或右偏转。另外，尾翼是飞机稳定性的重要组成部分，水平尾翼和垂直尾翼像箭上的羽毛一样，使飞机在飞行中能维持稳定直线飞行。

升降舵的后沿安装有一个可操纵的小活动面，称为配平片，用于飞行中减小和消除驾驶盘上的杆力。

在有的设计中，水平尾翼是一个可操纵的整体活动面，称为全动平尾。全动平尾可增加飞机的操纵性，广泛用于军用战斗机的设计中。

少量的小型飞机采用 V 形尾翼，V 形尾翼的差动偏转可提供方向舵的功能，同向偏转可提供升降舵的功能。

### 4. 起落装置

起落装置用于飞机的起飞、着陆及在地面上滑行并支持飞机。陆上飞机的起落装置大都由减震支柱和机轮组成，主轮位于机身两侧，承载飞机的主要重量。前轮位于主轮之前，这种形式称为前三点式飞机。前三点式飞机具有良好的地面滑跑方向稳定性。尾轮置于主轮之后的形式称为后三点式飞机，现代飞机绝大多数为前三点式飞机。

前三点式飞机中，前轮一般为可偏转式，由座舱里的方向舵脚踏控制，用于控制飞机在地面上滑行转弯。蹬左舵（脚蹬）时，前轮左偏，飞机左转弯。飞机主轮上装有各自独立的刹车装置，由方向舵脚踏控制其刹车压力，当使用前脚掌下压脚踏前部时，相应侧主轮上的刹车压力增加。两个主轮上可施加不同的刹车压力，从而使两主轮的摩擦力不同，这称为差动刹车技术，可用于飞机在地面上滑行时进行辅助的方向控制。

机轮在空中可收起来的设计称为可收放式起落架，不能收起来的称为固定式起落架，空中收起起落架可显著地减小飞机在空中飞行的阻力，固定式起落架用于小型简单的飞机设计中。

水上飞机的起落装置采用浮筒式设计方案，由装于浮筒下的水中舵面进行方向控制。

### 5. 动力装置

动力装置主要用来产生拉力或推力，从而使飞机能够在空中以规定的速度飞行。飞机上采用的发动机类型可分为两大类：一类为活塞式发动机，通过气体的燃烧和扩张推动气缸里的活塞作往复运动，往复运动被连杆和曲轴转化成旋转运动，通过齿轮变速或直接带动螺旋桨产生拉力，广泛应用在低速小型飞机中。另外一类为涡轮喷气发动机，通过气体被连续地压缩、燃烧并扩张，驱动涡轮旋转并向后喷出，产生推力，它主要用在大型、高速的民航客

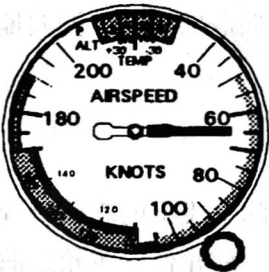
机和军用飞机中。在涡轮喷气发动机的基础上，又衍生出涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机和涡轮风扇发动机。

发动机带动的发电机为飞机上用电设备提供电源，从发动机引入的高压热气流可用于座舱加温或空调系统。

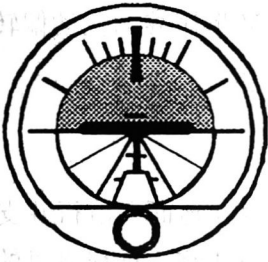
### 1.1.2 飞机座舱基本仪表介绍

民用飞机座舱里飞行员位置一般为并列两座布局，训练飞行时，左座为学员座，右座为教员座，而在日常飞行中，左座为机长座，右座为副驾驶座。

小型飞机飞行仪表主要包括（从左到右，从上到下，如图 1.4 所示）：空速表、姿态仪、高度表、转弯测滑仪、航向仪和升降速度表。下面分别简单加以说明。



(a) 空速表



(b) 姿态仪



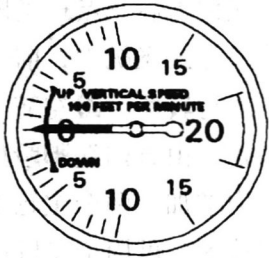
(c) 高度表



(d) 转弯测滑仪



(e) 航向仪



(f) 升降速度表

图 1.4 小型飞机的六个基本仪表

空速表 (Airspeed Indicator)：指示飞机相对于空气的速度即指示空速 IAS (Indicated Air Speed) 的大小，单位为海里/小时 (kt)。

姿态仪 (Attitude Indicator)：指示飞机滚转角（坡度）和俯仰角大小。由固定的小飞机和活动的人工天地线背景所组成，小飞机与人工天地线的相对姿态模拟了真实飞机与实际天地线的相对姿态，如图 1.5 所示。

高度表 (Altitude Indicator)：指示飞机相对于某一基准的气压高度，单位为英尺 (ft)。拨动表左下部的旋钮可以设定基准气压，基准气压单位通常为英寸汞柱 (inHg) 或毫巴 (mbar)。当基准气压设为标准大气海平面气压 29.92 inHg 时，高度表读数即为压力高度，即标准海压高度。

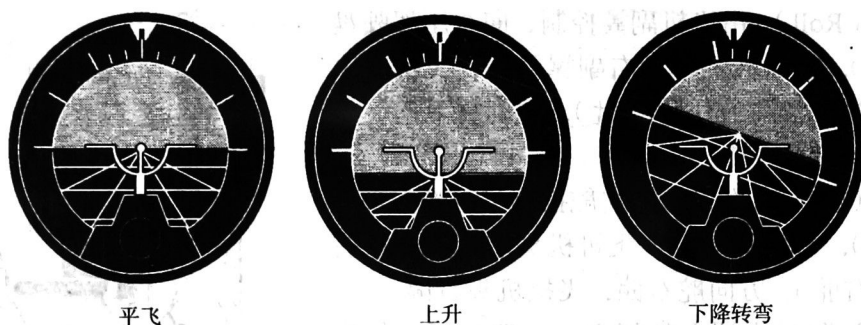


图 1.5 姿态仪在不同飞行状态下的指示

转弯侧滑仪 (Turn Coordinator): 指示飞机转弯速率和侧滑状态。可以转动的小飞机指示转弯中角速度的大小和近似的坡度; 可以左右移动的小球指示飞机是否带侧滑飞行。

航向仪 (Heading Indicator) 或水平状态指示器 (HSI): 指示飞机航向, 由固定的小飞机和可以转动的表盘组成。水平状态指示器为较高级的仪表形式, 它除了可以提供航向仪的所有功能外, 还可以用于 VOR 导航和仪表着陆系统进近使用。

升降速度表 (Vertical Speed Indicator): 指示飞机垂直速度, 单位为英尺/分 (ft/min)。

这六个仪表的排列位置是标准的, 分两排排列, 从左到右上排为依次为: 空速表、姿态仪、高度表, 下排依次为: 转弯侧滑仪、航向仪、升降速度表。其中四个仪表: 空速表、姿态仪、高度表和航向仪, 由于在飞行中的主导地位, 构成 T 字形, 常被称为 Basic T。

除这六个仪表外, 小型飞机前仪表板上通常还有两个导航用的仪表, 分别是:

甚高频全向信标 VOR: 指示飞机基于 VOR 台的径向线方位。

自动定向仪 ADF: 指示飞机基于 NDB 台的相对方位。

活塞发动机主要的功率指示仪表有表示油气混合气压力的进气压力表 (Manifold Pressure) 和表示发动机转速大小的转速表 (Tachometer)。对于调速器控制的变距螺旋桨飞机, 进气压力表由油门杆控制, 转速表由变距杆控制, 油门的增减并不影响转速。而对于简单的定距螺旋桨飞机, 则是由油门杆直接控制转速。

现代大型飞机普遍采用多功能组合型仪表, 将以前需要多个仪表才能提供的信息显示在单个仪表上, 使用由计算机驱动的阴极射线管 CRT 或液晶屏显示飞行数据, 除此之外, 还提供了许多传统仪表无法提供的信息。

关于每个仪表的具体使用细节和构成, 将在其他相关课程中讲授。

### 1.1.3 操纵飞机的基本方法

飞机的操纵方法如图 1.6 所示。

小型飞机操纵控制系统一般由座舱里的操纵器、钢绳、滑轮、连接件与飞机外部的活动舵面所组成。操纵系统可分为: 主操纵系统与辅助操纵系统。主操纵系统包括副翼、升降舵和方向舵, 辅助操纵系统包括配平片和襟翼。下面分别简述其功用。

俯仰控制 (Pitch): 由飞机升降舵控制, 前推驾驶杆 (或称顶杆), 升降舵下偏, 飞机低头; 后拉驾驶杆 (或称带杆), 升降舵上偏, 飞机抬头。



**滚转控制 (Roll):** 由飞机副翼控制, 向左压驾驶盘 (或称压左盘), 左副翼上偏, 右副翼下偏, 飞机向左滚转; 向右压驾驶盘 (或压称右盘), 左副翼下偏, 右副翼上偏, 飞机向右滚转。

**偏转控制 (Yaw):** 由飞机方向舵控制, 前蹬左脚蹬 (或称蹬左舵), 方向舵左偏, 飞机机头左偏; 前蹬右脚蹬 (或称蹬右舵), 方向舵右偏, 飞机机头右偏。

配平可以消除操纵器上的杆力, 一般包括俯仰配平、滚转配平和航向配平, 分别可以消除杆、盘与舵上的力。俯仰配平操纵器一般为中央控制台侧面的可以旋转的圆盘, 称配平轮。配平轮的前后转动, 通过操纵机构偏转升降舵后缘的配平片, 减小或消除升降舵铰链力矩, 从而减小或消除杆力。前推配平轮可以消除前推杆力, 后拉配平轮可以消除后拉杆力。

襟翼的收放可以用座舱前面板上的襟翼收放手柄操纵, 小型飞机的襟翼收放手柄一般分三个挡位, 即收起、起飞、着陆。除此之外, 前面板上还有用于控制起落架收放的起落架收放手柄。为便于区别, 审定规范要求: 襟翼收放手柄必须设计成翼剖面形状, 而起落架收放手柄必须设计成机轮形状。

飞机操纵的另外一个重要方面是功率控制。座舱里用于发动机功率控制的操纵一般位于中央控制台上, 对于较高级的装备调速器的变距螺旋桨活塞式飞机 (它们包括: 油门杆、变距杆、和混合比杆), 按从左到右的顺序排列。

油门杆用于控制进入发动机气缸油气混合气量的大小。前推油门, 发动机功率增加, 拉力增加。油门的大小可用进气压力表来指示; 变距杆控制螺旋桨桨叶的桨距大小, 用于调节转速。前推变距杆, 转速增加; 混合比杆用于调节发动机油气混合比, 以适应高空飞行空气密度降低对发动机性能影响。前推混合比杆, 油气混合气变得富油, 混合比杆后拉至最后位, 将切断发动机燃油供应。因此设计规定, 混合比杆手柄为红色。

通过对飞机操纵的简单分析我们可以看出, 飞机在空中有六个自由度: 三个空间位置和三个空间姿态。对于常规布局的飞机而言, 飞行员可直接控制改变的自由度只有四个: 俯仰、滚转、偏转以及飞行速度方向的纵向位移。其他的两个自由度是通过间接的方法实现控制的。



图 1.6 飞机的操纵方法

#### 1.1.4 机翼形状

机翼形状主要是指机翼的平面形状和剖面形状, 它是影响机翼空气动力性能的主要因素。下面分别介绍机翼的剖面形和平面形。

##### 1. 机翼的剖面形状 (翼型)

各种机翼的剖面形状如图 1.7 所示。

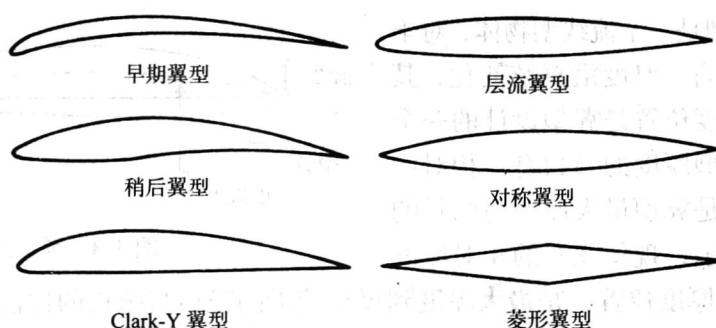


图 1.7 机翼的剖面形

最早的翼型是模仿风筝的，在骨架上张缝蒙布，基本上是平板。在实践中发现弯板比平板好，能用于较大的迎角范围。20 世纪初，经典流体动力学的方法已经可以成功地用于翼型，并且可能对某些简单翼型外形的升力特性进行数学计算。但是直到 1907 年俄国空气动力学家儒可夫斯基的机翼理论出来以后，才明确翼型应该有个圆头，应该有上下翼面。圆头能适应更大的迎角范围。在第一次世界大战期间，交战各国都在实践中摸索出一些性能较好的翼型。比如德国的 Gottingen387，英国的 RAF-6，美国的 Clark-Y，当时都是优秀的翼型（图 1.7）。战后，在 20 世纪 30 年代初期，美国的航空科研机构—国家航空咨询委员会 NACA（国家宇航局 NASA 的前身）对低速翼型进行了系统的实验研究。他们把当时的优秀翼型的厚度分布拿来进行比较。不管原来的弯度，一律把它改为对称翼型。结果发现，几种有名翼型的厚度分布，从前沿到后沿，几乎彼此重合在一起。于是他们确定厚度分布就用这个经试验证明很好的分布，而在中弧线的形状以及弯度的大小上做文章。1932 年他们确定了 NACA 4 位数字的翼型族，1935 年又确定了 5 位数字的翼型族，1939 年 NACA 发展了层流翼型，取名 NACA 1 系列。这是第一批根据需要，人工设计出来的低速翼型，其目的是尽可能推迟附面层转捩，尽可能延长层流附面层，减小摩擦阻力。这个翼型族厚度分布是设计出来的，而不是凭经验的。接着又发展 2 系列、3 系列直到 6 系列、7 系列。2~5 系列都不太好，只在设计点左右不大的迎角范围内，阻力特别低，离设计点稍远，阻力反而比一般的翼型还大。所以这几个翼型系列都被淘汰了。现在用的是 6 系列和 7 系列翼型。20 世纪 60 年代中期出现了一种称为超临界翼型的新翼型。它是美国 NASA 的 R.T.Whitcomb 首先在实验室里搞出来的。它可以在高亚音速飞行时延缓激波的到来，减小激波阻力。后来有许多理论工作者用理论设计改善这种翼型，使它的性能比原来的有所提高。这种超临界翼型另外的优点是在低速中等迎角下，阻力系数较低，而最大升力系数比普通翼型高很多。根据这些优点，20 世纪 70 年代中期发展出来一种称为“通用翼型”的 NASA LS 翼型，专为一般低速飞机使用。

除此之外，前苏联的中央空气和水动力学研究所、英国的皇家飞机研究院以及大型飞机设计制造厂商如 Boeing 和 Airbus 都对翼型进行了大量的研究，有自己的翼族系列。随着飞机的发展，翼型研究已经成为空气动力学研究的一个重要部分，现在仍在继续发展中。

平凸形和双凸形翼型的升力和阻力特性都较好，而且对结构布置和减轻重量也有利，是现代低速飞机广泛采用的翼型。

各种翼型的形状特点，可以用一些数据来表明，这些数据统称为翼型参数。翼型主要从翼弦、厚度分布、中弧线三个方面进行描述，如图 1.8 所示。

翼弦（Chord）。翼型前缘到后缘的连线称为翼弦，用符号  $c$  表示。

厚度分布。翼型是一个流线型物体，对于基本的对称翼型而言，厚度沿翼弦变化，其最大厚度和最大厚度位置是翼型设计的一个重要因素。描述翼型厚度的参数有：相对厚度，又称厚弦比，是翼型最大厚度与弦长的比值，用百分比表示，现代飞机的相对厚度为 4%~16%；最大厚度位置，是最大厚度到翼型前沿的距离与弦长的比值，也是用百分比表示。现代飞机的最大厚度位置为 30%~50%。

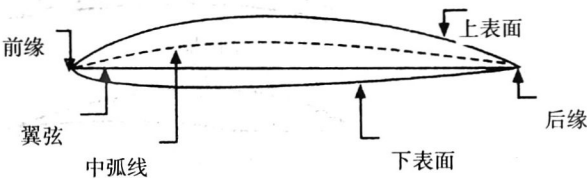


图 1.8 翼型描述

中弧线。在对称翼型基础上增加弯度可以增加翼型的性能，翼型中弧线是与翼型上下表面相切的一系列圆的圆心的连线，对于对称翼型，中弧线和翼弦重合，中弧线与翼弦的垂直距离称为弧高，描述翼型弯度的参数有相对弯度，是最大弧高与翼弦的比值，用百分比表示。现代飞机的相对弯度为 0~2%。

2. 机翼的平面形状

仰视空中飞行的飞机时，所看到的体现飞机特征的机翼形状就叫做机翼的平面形状。机翼的平面形状根据飞机的目的和适用范围而变化，每种机翼平面形状的设计都有其优点和缺点，它是决定飞机空气动力性能的重要因素。

平直机翼有着极好的低速特性，而且便于制造，广泛地应用在早期和现代的低速飞机中；椭圆机翼的阻力最小，但难于制造，成本较高，因此只有少数的飞机使用；梯形机翼结合了矩形机翼和椭圆机翼的优缺点，具有适中的升阻特性和较好的低速性能，制造成本也较低；后掠翼飞机和三角翼飞机具有很好的高速性能，广泛应用于高亚音速飞机和超音速飞机中，但它的低速性能没有其他平面形状机翼的好。各种机翼的平面形状如图 1.9 所示。



图 1.9 机翼的平面形状

各种不同平面形状的机翼，其升力、阻力之所以有差异，与机翼平面形状的各种参数有关，机翼平面形状的各种参数如图 1.10 所示。

翼展 (Span)。为机翼翼尖之间的距离，用符号  $b$  表示。

展弦比 (Aspect Ratio)。为机翼翼展  $b$  与平均弦长  $c_{AVG}$  的比值，用符号  $AR$  表示， $AR = b/c_{AVG}$ ，它表示了机翼平面形状长短和宽窄的程度。低速飞机通常采用大展弦比机翼，如滑翔机；高速飞机可以采用小展弦比机翼，如超音速飞机和导弹。现代飞机的展弦比为 2~10。

如果已知机翼面积  $S$ ，则可用公式  $AR = b^2/S$  计算展弦比。

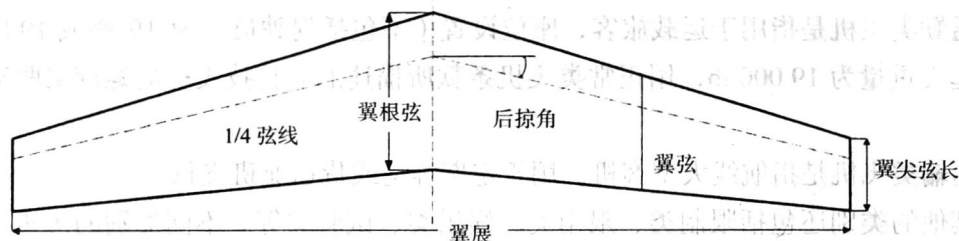


图 1.10 机翼的平面形状描述

梢根比 (Taper Ratio)。是机翼翼尖弦长  $c_t$  与机翼翼根弦长  $c_r$  的比值, 用符号  $\lambda$  表示。梢根比表示机翼翼尖到翼根的收缩度, 显然, 矩形机翼的梢根比等于 1, 梯形机翼的梢根比小于 1, 三角形机翼的梢根比等于 0。现代飞机机翼的梢根比为 0~0.5。

后掠角 (Sweep Angle)。为机翼 1/4 弦线与机身纵轴垂直线之间的夹角, 用符号  $\chi$  表示, 它表示机翼的平面形状向后倾斜的程度。也有用前缘后掠角表示机翼后掠角的, 此时称为前缘后掠角。现代飞机机翼的后掠角, 小到几度, 大到  $60^\circ$  以上。表 1.1 给出了几个大型机的机翼参数。

表 1.1 典型民航客机的机翼参数

| 项目\机型     | A320-200   | B737-300   | B757-200   | B747-400     |
|-----------|------------|------------|------------|--------------|
| 展弦比       | 9.39       | 9.17       | 7.82       | 7.39         |
| 梢根比       | 0.240      | 0.240      | 0.243      | 0.275        |
| 1/4 弦线后掠角 | $25^\circ$ | $25^\circ$ | $25^\circ$ | $37.5^\circ$ |

### 1.1.5 飞机的分类

大气层内飞行的飞行器称为航空器, 航空器由其任务和目的不同而分为若干种。对于民用飞机而言, 在飞机审定获取合格证时, 根据飞机的用途、操纵上的使用限制而将其分为不同的类别。根据美国联邦航空局 FAA 的划分, 民用飞机常见的类别有以下几种。

正常类飞机, 是指座位设置 (不包括驾驶员) 为 9 座或 9 座以下, 最大审定起飞重量为 12 500 lb, 用于非特技飞行的飞机。非特技飞行是指: 正常飞行中遇到的任何机动, 失速 (不包括尾冲失速); 坡度不大于  $60^\circ$  的懒八字飞行、急上升转弯和大坡度盘旋。

实用类飞机, 是指座位设置 (不包括驾驶员) 为 9 座或 9 座以下, 最大审定起飞重量为 12 500 lb, 用于有限特技飞行的飞机。按实用类审定合格的飞机可作正常类飞机允许的任何飞行动作和有限特技飞行动作。有限特技飞行包括: 尾旋 (如果对特定型号的飞机已批准作尾旋); 坡度大于  $60^\circ$  的懒八字飞行、急上升转弯和大坡度盘旋。

大部分小型飞机同时按照正常类和实用类审定取证, 实际中飞机处于哪一类别, 取决于它们的装载与平衡情况, 按实用类装载时, 飞机允许的重心范围更小, 飞机可以比按正常类装载承受更大的应力。

特技类飞机, 是指座位设置 (不包括驾驶员) 为 9 座或 9 座以下, 最大审定起飞重量为 12 500 lb, 除了所要求的飞机试验结果表明是必要的限制以外, 在使用中不加限制的飞机。特技类飞机可以用于特技飞行及训练, 因此其强度要求比正常类和实用类都大。

通勤类飞机是指用于运载旅客，座位设置（不包括驾驶员）为 19 座或 19 座以下，最大审定起飞重量为 19 000 lb，用正常类飞机条款所描述的非特技飞行的螺旋桨驱动的多发动机飞机。

运输类飞机是指航线大型客机，用于定期客运或货运航班飞行。

其他的类别还包括限制类、限用类、娱乐类、试验类等。不同类别的飞机有其不同的强度要求，从而限制了其飞行范围和机动飞行能力。

对于飞行员的合格审定而言，飞机被分为类别、级别和型别。常见的类别包括定翼机和旋翼机。定翼机进一步的级别划分为单发陆地、多发陆地、单发水上、多发水上。型别是指飞机的具体型号，按型别划分的方法应用于飞行员的执照类别中。

## 1.2 飞行大气环境的一般介绍

我们将包围地球的那一层空气看成一个整体，并把它叫做大气层，简称大气。飞机的空气动力、发动机工作的好坏都与大气密切相关，飞机上人员的生活也取决于大气条件。因此，我们有必要对大气有个基本了解。

### 1.2.1 大气的组成

包围在地球外部的大气主要有三种成分：由多种气体混合而成的纯干空气、水蒸气以及尘埃颗粒。纯干空气含有 78% 的氮气和 21% 的氧气，余下的 1% 由其他各种气体组成，其中排列前 9 位的气体主要有：氩（0.934%）、二氧化碳（0.031 4%）、氦（0.001 818%）、氖（0.000 524%）、甲烷（0.000 2%）、氪（0.000 114%）、氢（0.000 05%）、氙（0.000 008 7%）、臭氧（0.000 007%）。水蒸气在气象中扮演了一个重要的角色，大气中水蒸气的比例决定了云的形成及其规模。它在大气中的比例随地点和时间的变化而变化，例如：在非常温暖潮湿的热带地区，大气中水蒸气的含量就比寒冷干燥的极地地区空气中的水蒸气含量高得多。大气中的尘埃是数量巨大的悬浮颗粒，大部分来自地球表面，如：沙漠、海水中的盐粒、花粉、烟尘、汽车尾气等。

### 1.2.2 大气的分层

大气的底界明显，就是地面，而顶界则是模糊的。因为除大气之外，还有极其稀薄的星际气体。大气的密度随高度增加而减小，最后就和星际气体连接起来，因此，这两者间并不存在一个明显的界面。如果以空气密度接近于星际气体密度的高度来估计大气的顶界，这一高度为 2 000 ~ 3 000 km。以气温变化为基准，可将大气分为对流层、平流层、中间层、电离层和散逸层五层，如图 1.11 所示。



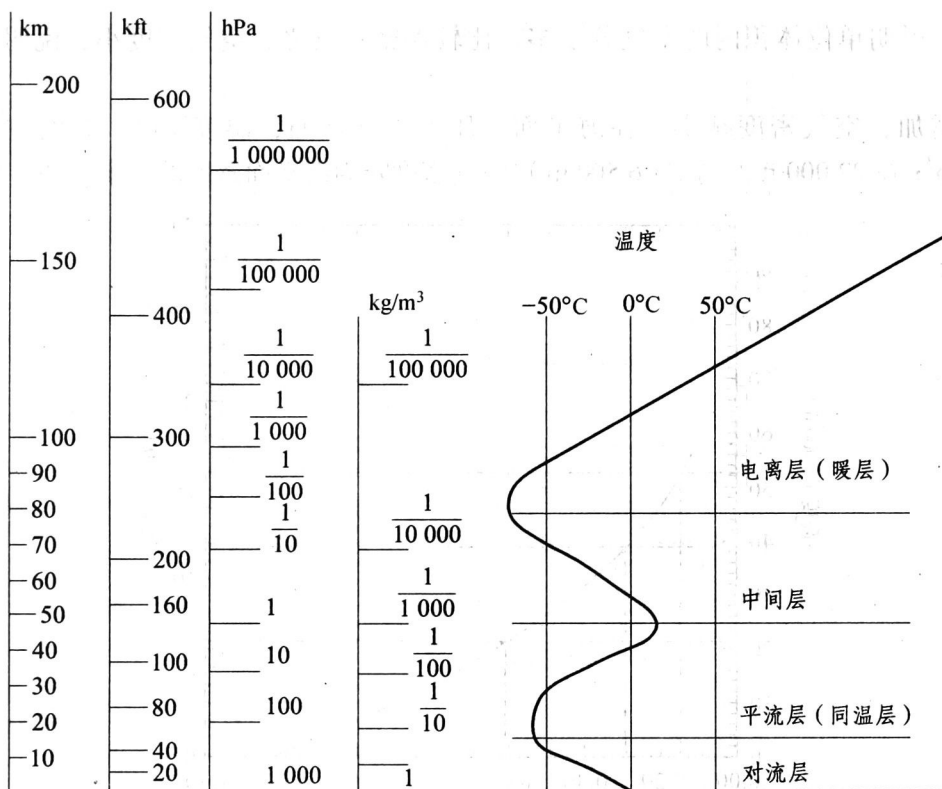


图 1.11 大气的分层

**对流层。**对流层是大气中最低的一层。它的底界是地面，而顶界则随纬度、季节而变化。在赤道地区，对流层的厚度约为 16 km，而极地地区则减小到 8 km，在中纬度地区平均为 11 km。这是大部分飞行活动的范围，也是地球各种天气现象如云、雨、雾、雪发生的区域，含有大量的水蒸气及其他微粒。气温随高度的增加而降低，平均每升高 1 000 m 降低 6.5°C。气温、气压的变化造成空气在垂直方向和水平方向的强烈对流。现代大型民用运输机的巡航高度一般在 11 km 左右。

**平流层 (同温层)。**平流层位于对流层之上，顶界离地约 50 km。在平流层的下半部气温几乎不变，平均在 -56.5°C 左右。上半部分的气温又开始增加直到 0°C 附近，这是因为臭氧吸收太阳紫外线而引起的升温作用。在这层大气中，天空清晰湛蓝，几乎不存在水蒸气，没有云、雨、雾、雪等天气情况，只有水平方向的风，没有空气的上下对流。平流层的底部是民用运输机比较理想的飞行空间。对流层与平流层的交界，常称为对流层顶。

在平流层之上，还有中间层、电离层 (暖层) 以及散逸层。它们均是按照温度的变化来划分的，由于它们的高度均超出了民用飞机的正常飞行极限，因此，这些层对于民用航空活动来说，就显得不重要了。

### 1.2.3 大气的特性

#### 1. 空气密度

空气密度是指单位体积内的空气质量。空气和其他物质一样，是由分子所组成。空气