

● 飞行技术与空中交通管理系列教材



飞行原理

王大海 杨俊 余江 编



西南交通大学出版社

责任编辑 黄淑文

封面设计 朱开文

飞行技术与空中交通管理系列教材

- ◎ 私人飞行员教程
- ◎ 商用飞行员教程
- ◎ 航空仪表
- ◎ 飞行中人的因素
- ◎ 飞机电源智能监控系统
- ◎ 民航飞机电气及通信系统
- ◎ 驾驶舱资源管理
- ◎ 航空电子设备
- ◎ 飞机系统
- ◎ 飞行性能与计划
- ◎ 航空医学
- ◎ 空中领航学
- ◎ 航空气象
- ◎ 航行情报服务
- ◎ 航空燃气涡轮动力装置
- ◎ 机场管制
- ◎ 飞行原理
- ◎ 飞行员航空理论教程（上、下）
- ◎ 航线飞行员航空理论教程（英文版）
- ◎ 通信 导航 监视设施

ISBN 7-81057-820-0



9 787810 578202 >

飞行技术与空中交通管理系列教材

飞行原理

王大海 杨俊 余江 编

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。

全书共包括十章内容。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，也可作为航空院校学生的参考用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞行原理 / 王大海, 杨俊, 余江编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2004.4
ISBN 7-81057-820-0

I. 飞... II. ①王...②杨...③余... III. 飞行原理
IV. V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 125418 号

飞 行 原 理

王大海 杨俊 余江 编

*

责任编辑 黄淑文

封面设计 朱开文

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: 87600564)

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

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 16.25

字数: 388 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-820-0/V · 019

定价: 29.00 元

前 言

本书是飞行技术专业的专业教材。根据中国民航飞行学院 2000 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》的要求进行编写的。

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。

全书共分十章。第一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;第二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;第三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;第四章为飞机的平衡、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;第五章为平飞、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;第六章为盘旋,主要介绍飞机的基本机动性能和转弯的操纵原理;第七章为起飞和着陆,主要介绍飞机起飞和着陆性能及操纵原理;第八章为特殊飞行,主要介绍飞机失速、螺旋、在扰动气流中飞行等有关知识;第九章为重量与平衡,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;第十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。

本教材第一章、第六章、第七章和第九章由中国民航飞行学院余江编写;第二章、第五章和第八章由中国民航飞行学院杨俊编写;第三章、第四章和第十章由中国民航飞行学院王大海编写。全书由杨俊统稿,编写组成员交叉审稿。

由于编写时间仓促,占有资料难全,加之编者水平有限,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、飞行技术与航空工程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

2003 年 11 月

主要英美制单位与国际标准单位的换算关系表

$$1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} = 3.281 \text{ ft}$$

$$1 \text{ n mile} = 1.852 \text{ km} = 1\,852 \text{ m}$$

$$1 \text{ kt} = 1.852 \text{ km/h}$$

$$1 \text{ km/h} = 0.539 \text{ kt}$$

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 2.205 \text{ lb}$$

$$1 \text{ gal (美)} = 3.786 \text{ L} = 3.385 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 1\,000 \text{ L} = 264.169 \text{ gal (美)}$$

$$1 \text{ inHg} = 33.86 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ hp (马力)} = 745.699\,9 \text{ W}$$

符号说明

- a ——加速度、音速
 A ——流管截面积
 AR ——展弦比
 b ——翼展
 C ——翼弦
 C_D ——阻力系数
 C_L ——升力系数
 C_L^α ——升力系数斜率
 C_p ——压力系数
 C_Y ——垂直于桨叶合速度方向的空气动力系数
 C_X ——平行于桨叶合速度方向的空气动力系数
 D ——阻力、螺旋桨直径
 dR ——叶素上的空气动力
 dY ——垂直于合速度方向的空气动力
 dX ——平行于合速度方向的空气动力
 F ——地面摩擦力
 H ——高度
 K ——升阻比
 L ——升力
 l ——距离
 M ——马赫数、力矩
 N ——地面支持力、功率
 n_y ——升力方向的载荷因数
 n ——载荷因数
 P ——拉力、压强
 p ——压力
 Q ——螺旋桨的旋转阻力
 R ——转弯半径、螺旋桨半径
 S ——机翼面积
 u ——风速
 v ——速度
 v_2 ——起飞安全速度

v_{\max} ——平飞最大速度
 v_{\min} ——平飞最小速度
 v_{MD} ——最小阻力速度
 v_{MP} ——最小功率速度
 v_R ——起飞抬前轮速度
 v_s ——失速速度
 v_x ——陡升速度
 v_y ——快升速度
 W ——重力、飞机重量
 w ——诱导速度、桨叶剖面的合速度
 α ——迎角
 β ——侧滑角
 γ ——坡度
 ε ——下洗角
 η ——滑翔比、效率
 θ ——上升角、下降角、性质角
 Λ ——后掠角
 λ ——梢根比、相对进距
 χ ——机翼后掠角
 ρ ——空气密度
 ω ——转弯角速度
 ϕ ——桨叶角、飞机机翼的安装角

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	65
复习思考题	70
第 4 章 飞机的平衡、稳定性和操纵性	71
4.1 飞机的平衡	71
4.2 飞机的稳定性	77
4.3 飞机的操纵性	87
复习思考题	96
第 5 章 平飞、上升、下降	98
5.1 平 飞	98
5.2 巡航性能	108
5.3 上 升	112

5.4 下降	120
复习思考题	125
第6章 盘旋	127
6.1 盘旋中的作用力	127
6.2 飞机的载荷因数	128
6.3 盘旋性能	129
6.4 转弯中的侧滑与盘舵协调	133
6.5 盘旋的操纵原理	134
6.6 侧滑对盘旋的影响	136
6.7 螺旋桨副作用对盘旋的影响	137
6.8 盘旋相关机动飞行简介	138
复习思考题	140
第7章 起飞和着陆	141
7.1 预备知识	141
7.2 地面滑行	144
7.3 起飞	147
7.4 着陆	156
7.5 风对起飞、着陆的影响及修正	166
7.6 着陆目测	175
7.7 特殊情况下的起飞、着陆	180
复习思考题	193
第8章 特殊飞行	194
8.1 失速和螺旋	194
8.2 在扰动气流中的飞行	199
8.3 在积冰条件下的飞行	205
8.4 低空风切变	208
8.5 “吃气流”	211
8.6 飞机的操纵限制速度	216
复习思考题	219
第9章 重量与平衡	220
9.1 重量与平衡术语	220
9.2 重量与平衡原理	222
9.3 重量与平衡的确定方法	223

9.4 装载移动、增减后重心位置的确定	228
9.5 飞机不同类别时的重量与平衡问题	230
复习思考题	230
第 10 章 高速空气动力学基础	231
10.1 高速气流特性	231
10.2 翼型的亚跨音速气动特性	233
10.3 后掠翼的高速升阻力特性	240
复习思考题	249
参考文献	250

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莱纳州的 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。

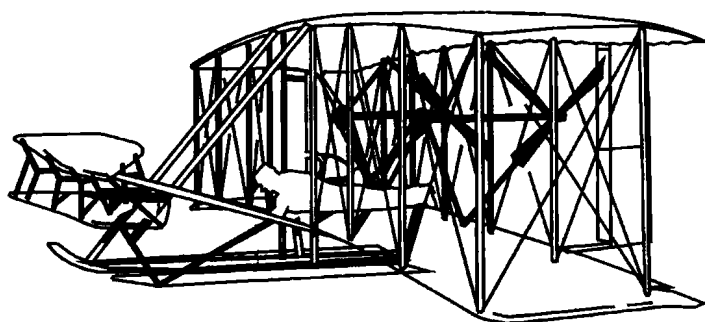


图 1.1 美国莱特兄弟的“飞行者”号

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。

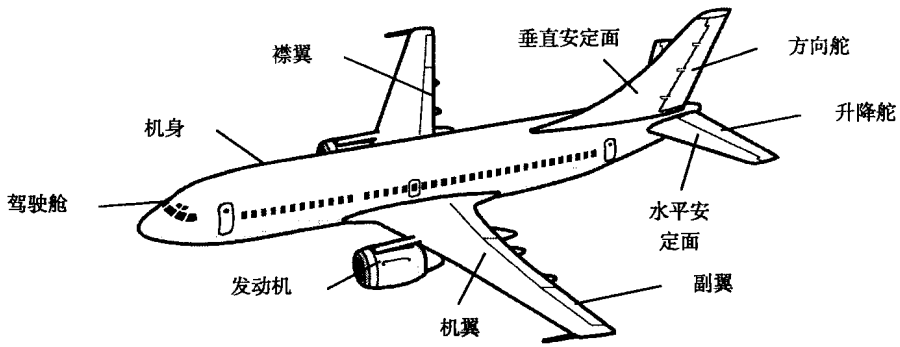


图 1.2 飞机的主要组成部分 (Boeing-737)

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。较复杂的机翼设计可能还包含前缘襟翼、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。

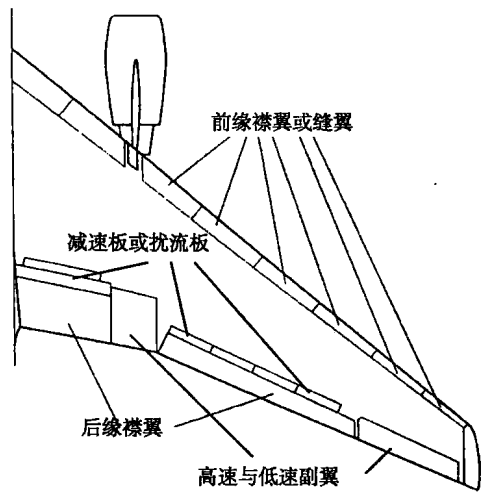


图 1.3 机翼结构

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，升降舵的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飞行。方向舵的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，这种构型称为前三点式飞机。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构型称为后三点式飞机，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蹬控制，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，由方向舵脚蹬控制其刹车压力，当使用前脚掌上压脚蹬前部时，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，广泛的应用在小型训练飞机中。这种构型的发动机中，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。另外一类为涡轮喷气发动机，它用在大型、高速的民航客机和军用飞机中。这种构型中，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。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。

活塞螺旋桨形式的动力装置被广泛地应用于低速小型飞机中，如 TB-20/200 为活塞式发动机。重量较大、速度更高的飞机如夏延 III 和运 7 广泛使用涡轮螺旋桨发动机，大型航线运输机和军用战斗机基本上都使用不同涵道比的涡轮风扇发动机，涡轮轴发动机用于各型直升机中。

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。

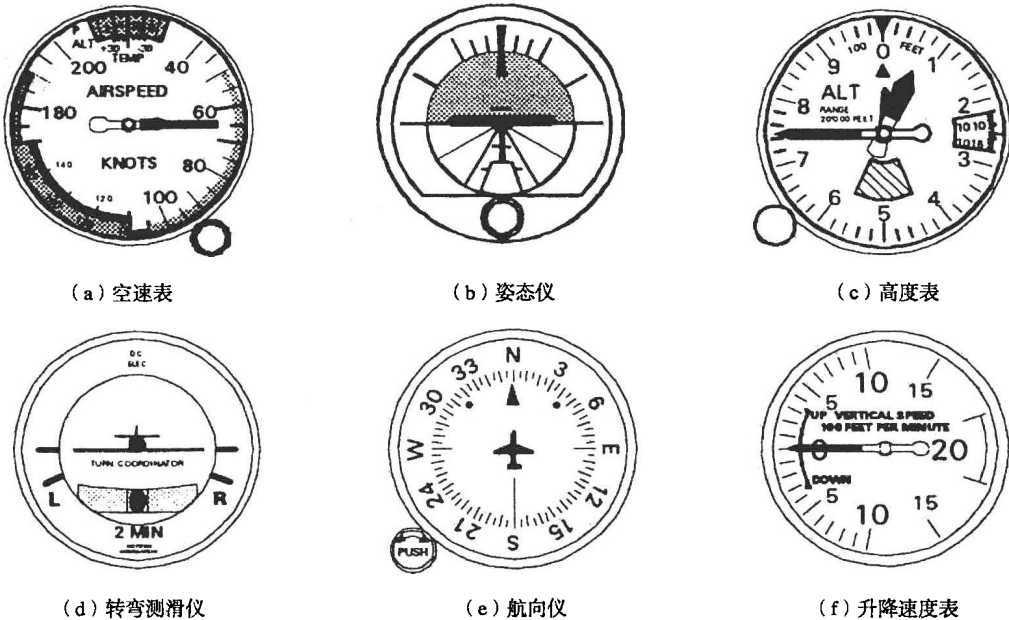


图 1.4 小型飞机的六个基本仪表

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。

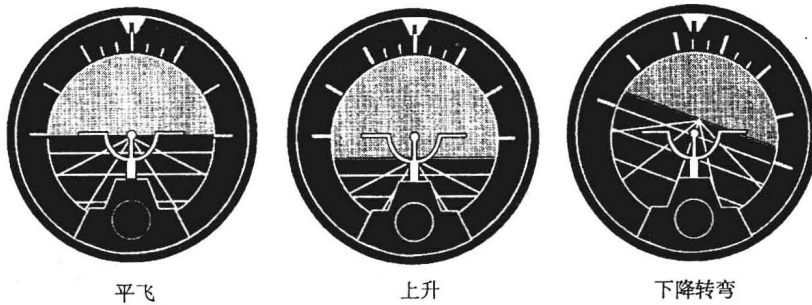


图 1.5 姿态仪在不同飞行状态下的指示

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, 前推驾驶盘 (或称顶杆), 升降舵下偏, 飞机低头; 后拉驾驶盘 (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，通过操纵机构传递到升降舵后缘的配平片，导致配平片偏转，使升降舵铰链力矩减小或消除，从而导致杆力减小或消除。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进行，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（FAR）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（如 TB20/200），它们包括：油门杆（Throttle）、变距杆（Propeller Control）和混合比杆（Mixture Control），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。

1.1.4 机翼的形状

机翼的形状主要是指机翼的平面形状和剖面形状，它是影响机翼的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（翼型）

各种机翼的剖面形如图 1.7 所示。

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

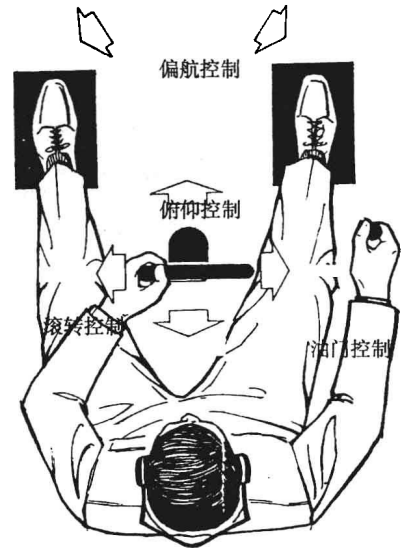


图 1.6 飞机的操纵方法