



飞行技术专业系列教材

# 飞行操纵理论与技术

Flight Manipulation: Theory and Technology

陈丽 王晓亮◆编著



旅游教育出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

飞行操纵理论与技术 / 陈丽, 王晓亮编著. — 北京: 旅游教育出版社, 2022. 9

飞行技术专业系列教材

ISBN 978-7-5637-4477-0

I. ①飞… II. ①陈… ②王… III. ①飞行控制—教材 IV. ①V24

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第177763号

飞行技术专业系列教材

飞行操纵理论与技术

陈丽 王晓亮 编著

策 划	李红丽
责任编辑	李红丽
出版单位	旅游教育出版社
地 址	北京市朝阳区定福庄南里1号
邮 编	100024
发行电话	(010) 65778403 65728372 65767462 (传真)
本社网址	www.tepcb.com
E - mail	tepfx@163.com
排版单位	北京旅教文化传播有限公司
印刷单位	北京柏力行彩印有限公司
经销单位	新华书店
开 本	710毫米 × 1000毫米 1/16
印 张	14.25
字 数	183千字
版 次	2022年9月第1版
印 次	2022年9月第1次印刷
定 价	45.00元

(图书如有装订差错请与发行部联系)

## 作者简介

陈丽，博士，上海工程技术大学飞行学院教授，从事飞行器控制系统设计和研究工作，获得上海市科技进步一等奖1项。作为项目负责人完成国家自然科学基金项目3项，国家863项目4项；参与完成国家总装高分重大专项1项。以第一作者发表论文30余篇，授权发明专利6项，出版有编著《大气动/静飞行器飞行原理》。

王晓亮，博士，上海交通大学航空航天学院副研究员，从事飞行器空气动力学、流固耦合力学和流动控制研究工作，获上海市科技进步一等奖1项。作为项目负责人完成国家重大专项1项，国家863项目3项，参与完成国家总装高分重大专项3项，以第一作者发表论文20余篇，出版有译著《飞艇设计技术》。



《集装箱与国际多式联运》  
姚红光◆编著



《航空货运市场营销》  
林彦 朱卫平◆编著



《民航危险品运输》  
肖恢翠 姚红光 韦薇◆编著



《民航配载平衡理论与实务》  
林彦◆编著



《航空货运代理》  
李智忠◆编著

飞行技术专业是一个综合性、跨学科的高技术应用型专业，其主要任务是为航空运输业培养飞行员。目前我国民航飞行员的来源主要有两种渠道：一是高考直接录用的飞行技术专业本科学生；二是社会招聘的非飞行技术专业的本科毕业生、需再进入航校学习的学员。通常飞行学员的培养分为四个阶段：理论学习阶段、航校飞行训练阶段、换照考试阶段及岗前培训阶段。每个阶段学习的重点不同，适用的教材也会随之变化。《飞行操纵理论与技术》一书即为满足飞行学员在理论学习阶段的需求而编写，可为实际航校飞行训练提供前期理论指导。

本书分为五大部分 11 个章节。五大部分分别为：飞行基本知识、飞行性能、飞机的稳定性和操纵性、飞行操纵技术、自动飞行系统和案例分析。本书在基本空气动力学和飞行力学基础上，分析了飞机的飞行性能、稳定性和操纵性，进而阐述了飞行操纵理论与技术相关的各方面知识。

本书内容特色如下：(1) 讲述了与飞机飞行操纵相关的普遍规律，并给出理论分析过程，全书知识点连贯一致，由浅入深，呈递进关系，有助于学生的理解和运用；(2) 同步对比分析了大型喷气式飞机和小型螺旋桨飞机的动力特性、飞行性能，以及操纵特点，使概念分类清晰，结论所属明确；(3) 归纳了自动飞行操纵系统和相关案例分析章节，提升学生对人工操纵与自动驾驶之间的权限意识，提高学生理论分析和应对实际问题的能力；(4) 本书对于不同飞机类型、不同飞行条件、不同飞行阶段给予细化，将概念理解贯穿于整个飞行性能、稳定性和操纵性的理论分析过程中，并在飞行操纵技术阶段得以验证。

本书充分利用以认知为目的的图例表达和以理解为目的的受力平衡分析，对飞行操纵理论的各个知识点原理进行阐述，力求所述概念简洁、条件充分、推理清晰、结论明确；并结合当前飞行技术相关热点探讨和典型事例剖析，加深学生对知识点在实际飞行中的理解和应用。需要说明的是：本书所述飞行事例和数据仅用于说明所涉及的技术问题，不作为事实论据。

本书在完稿过程中得到诸多同事朋友的帮助：国家一级飞行员徐宝钢教授、民航资深机长陈建国先生、西北工业大学自动化学院李广文副教授对书稿进行仔细评阅，并提出宝贵意见；笔者的多位同事也给予了大力支持和积极指导，在此一并表示衷心的感谢。

本书受国家自然科学基金项目（基金号：52175103、61733017）和上海工程技术大学教材建设项目（项目编号：X202108001）的资助。

由于编者水平所限，书中难免有差误之处，敬请读者批评指正。

编者

## 基本符号和表达式<sup>①</sup>

$V_g, V_w$	地速、风速
$V_a = V_g - V_w$	真空速
$V = V_g = V_a$	无风时飞机速度
$V_i$	指示空速
$V_s$	失速速度
$a$	声速
$Ma = V_a / a$	飞行马赫数
$\rho$	大气密度
$Q = \frac{1}{2} \rho V_a^2$	不考虑空气压缩性的动压
$\alpha, \beta$	迎角、侧滑角
$\gamma, \chi, \mu$	航迹爬升角、航迹方位角、航迹滚转角
$\phi, \theta, \psi$	滚转角、俯仰角、偏航角
$u, v, w$	沿机体坐标系三轴的线速度分量
$p, q, r$	绕机体坐标系三轴的角速度分量
$\delta_o, \delta_a, \delta_e, \delta_r$	油门大小、副翼、升降舵和方向舵的舵偏角度
$L, D$	升力、阻力
$T, P$	发动机的推力（拉力）和功率
$G, m$	重量、质量
$C_L, C_D$	升力系数、阻力系数
$K$	升阻比
$R/C, R/D$	爬升率、下降率

① 书中表示同一物理量的字母，若为正黑体表示其为向量，若为斜体表示其为该向量的大小。

$C_x, C_y, C_z$	沿机体坐标系三轴的气动力系数
$S$	机翼的参考面积
$X_a = QSC_x, Y_a = QSC_y, Z_a = QSC_z$	沿机体坐标系三轴的气动力分量
$C_l, C_m, C_n$	绕机体坐标系三轴的气动力矩系数
$c_A, b$	机翼的平均空气动力弦长、展长
$L_a = QScC_l, M_a = QSc_A C_m, N_a = QScC_n$	绕机体坐标系三轴的气动力矩分量
$C_{L\delta_e}, C_{m\delta_e}$	升降舵的舵效、操纵效能
$C_{L\delta_r}, C_{n\delta_r}$	方向舵的舵效、操纵效能
$i$	平尾安装角
$\varepsilon, \sigma$	下洗角、侧洗角
$\alpha_{wb}$	翼身组合体的迎角
$V_i, V_f$	平尾体积比、垂尾体积比
$h_n, h_{nwb}$	全机焦点位置、翼身组合体的焦点位置

### 下角标含义

$A$	可用
$R$	所需
$t$	平尾
$f$	垂尾
$cg, ac$	重心、气动中心
$w, b, wb$	机翼、机身、翼身组合体
$\min, \max$	最小、最大
$LO, TD$	起飞、接地
$av$	平均值

### 主要单位换算

- 1ft = 0.3048m (1英尺 = 0.3048米)  
 1nm = 1.852km (1海里 = 1.852千米)  
 1kn = 0.514m/s (1节 = 0.514米每秒)  
 1lb = 4.448N (1磅 = 4.448牛顿)

基本符号和表达式	1
----------	---

## 第一部分 飞行基本知识

第 1 章 绪论	3
1.1 飞行的环境	3
1.1.1 国际标准大气	4
1.1.2 大气的物理性质	5
1.1.3 风场	6
1.2 飞机的气动和起落架布局	8
1.2.1 操纵面	8
1.2.2 机翼	10
1.2.3 气动布局	12
1.2.4 起落架布局	14
1.3 飞机的外力	15
1.3.1 升力	15
1.3.2 阻力	18
1.3.3 极曲线	22
1.3.4 动力	23
1.4 飞机的状态	26
1.4.1 高度	27



1.4.2 速度 .....	29
1.4.3 姿态 .....	30
重要概念回顾 .....	34

## 第二部分 飞行性能

第 2 章 稳态飞行性能 .....	37
2.1 平飞性能 .....	37
2.2 续航性能 .....	39
2.2.1 续航特点 .....	39
2.2.2 最佳续航 .....	40
2.2.3 定高 / 定速续航 .....	41
2.2.4 续航性能改善方法 .....	43
2.3 下降性能 .....	44
2.4 爬升性能 .....	46
2.5 飞行包线 .....	49
第 3 章 机动飞行性能 .....	52
3.1 载荷系数 .....	52
3.2 平飞加 / 减速 .....	53
3.3 拉起和俯冲 .....	54
3.4 盘旋 .....	56
3.5 机动性能改善方法 .....	59
第 4 章 起飞和着陆性能 .....	61
4.1 起飞性能 .....	62
4.1.1 起飞滑跑段距离 .....	62
4.1.2 起飞上升段距离 .....	64
4.2 着陆性能 .....	65

4.2.1 着陆下降段距离 .....	66
4.2.2 着陆滑跑阶段距离 .....	67
4.3 起飞/着陆性能表 .....	68
重要概念回顾 .....	70

### 第三部分 飞机的稳定性和操纵性

第 5 章 飞机的动力学方程 .....	73
5.1 非线性运动方程 .....	73
5.2 运动方程解耦 .....	76
5.3 运动方程的解 .....	78
5.4 运动的稳定性 .....	79
第 6 章 纵向稳定性和操纵性 .....	82
6.1 纵向平衡 .....	82
6.2 气动中心 .....	82
6.2.1 零升力矩 .....	82
6.2.2 平均空气动力弦长 .....	83
6.2.3 气动中心 .....	84
6.3 纵向静稳定性 .....	88
6.3.1 迎角静稳定性 .....	88
6.3.2 平尾稳定作用 .....	90
6.4 纵向阻尼力矩 .....	91
6.5 纵向静操纵性 .....	92
6.5.1 俯仰操纵 .....	92
6.5.2 纵向配平 .....	93
6.6 纵向动稳定性和动操纵性 .....	96
6.6.1 纵向运动状态方程 .....	96
6.6.2 纵向运动模态 .....	97



6.6.3	纵向操纵响应	99
6.7	影响飞机纵向运动特性的因素	101
6.7.1	纵向平衡影响因素	101
6.7.2	纵向稳定性影响因素	101
6.7.3	纵向操纵性影响因素	102
<b>第7章</b>	<b>横侧向稳定性和操纵性</b>	<b>103</b>
7.1	横侧向平衡	103
7.2	横侧向静稳定性	104
7.2.1	内侧滑和外侧滑	105
7.2.2	滚转静稳定性	105
7.2.3	偏航静稳定性	106
7.2.4	后掠角稳定作用	107
7.2.5	上反角稳定作用	108
7.2.6	其他部件稳定作用	109
7.3	横侧向阻尼力矩	110
7.4	横侧向交叉力矩	111
7.5	横侧向静操纵性	112
7.5.1	滚转操纵	112
7.5.2	偏航操纵	113
7.5.3	横侧向配平	114
7.6	横侧向特殊运动的操纵	116
7.6.1	无侧滑的滚转操纵	116
7.6.2	无滚转的航向操纵	116
7.7	横侧向动稳定性和动操纵性	117
7.7.1	横侧向运动状态方程	117
7.7.2	横侧向运动模态	118
7.7.3	横侧向操纵响应	121
7.8	影响飞机横侧向运动特性的因素	123
7.8.1	横侧向稳定性影响因素	123

7.8.2 横侧向操纵性影响因素 .....	123
重要概念回顾 .....	125

## 第四部分 飞行操纵技术

第 8 章 基本飞行操纵技术 .....	129
8.1 平飞 .....	129
8.1.1 平飞速度范围 .....	129
8.1.2 平飞操纵 .....	130
8.2 下降 .....	131
8.2.1 下降速度范围 .....	131
8.2.2 下降操纵 .....	131
8.3 爬升 .....	132
8.3.1 爬升速度范围 .....	132
8.3.2 平飞与下降切换 .....	133
8.3.3 平飞与爬升切换 .....	134
8.4 转弯 .....	135
8.4.1 转弯的操纵 .....	135
8.4.2 盘旋的操纵 .....	136
8.4.3 盘旋的影响因素 .....	137
8.5 起飞 .....	139
8.5.1 滑行操纵 .....	139
8.5.2 起飞滑跑 .....	140
8.5.3 离地操纵 .....	141
8.5.4 加速上升 .....	141
8.6 着陆 .....	142
8.6.1 着陆目测 .....	142
8.6.2 最后进近 .....	146
8.6.3 拉平和平飘 .....	146



8.6.4	着陆滑跑	147
8.6.5	偏差修正	148
8.7	稳态风对起飞、着陆的影响	149
8.7.1	侧滑与偏流	149
8.7.2	侧风中滑跑	150
8.7.3	侧风起飞和着陆	151
8.7.4	顺/逆风起飞和着陆	154
8.8	复飞	156
8.8.1	仪表复飞程序设计标准	156
8.8.2	复飞操纵和注意事项	156
<b>第9章</b>	<b>特殊飞行操纵技术</b>	<b>158</b>
9.1	失速和螺旋	158
9.1.1	失速速度	158
9.1.2	失速改出	159
9.1.3	螺旋改出	160
9.2	特殊大气环境下的飞行	161
9.2.1	低空风切变下飞行	161
9.2.2	积冰条件下飞行	164
9.2.3	湍流中飞行	167
9.2.4	尾流中飞行	170
9.3	特殊机场条件下的起飞和着陆	172
9.3.1	高原机场上起飞与着陆	172
9.3.2	污染跑道上起飞与着陆	173
9.3.3	短跑道上起飞与着陆	174
9.3.4	松软道面上起飞与着陆	175
9.4	特殊飞机状况下的着陆	175
9.4.1	不放襟翼着陆	175
9.4.2	起落架故障着陆	176
9.4.3	停车迫降	177

重要概念回顾	179
--------	-----

## 第五部分 自动飞行系统和案例分析

第 10 章 自动飞行操纵系统	185
10.1 空客和波音飞机设计理念	185
10.2 自动驾驶飞行指引系统	186
10.2.1 自动驾驶仪	187
10.2.2 飞行指引仪	187
10.2.3 自动油门	188
10.3 自动配平	189
10.3.1 自动驾驶仪配平	189
10.3.2 马赫数配平	189
10.3.3 速度配平	190
10.4 偏航阻尼器	190
10.5 自动失速保护	190
10.6 飞行包线保护	191
10.6.1 大迎角保护	191
10.6.2 高速保护	192
10.6.3 滚转姿态保护	193
10.6.4 俯仰姿态保护	193
10.6.5 载荷系数保护	193
第 11 章 自动飞行相关案例分析	195
11.1 飞行模式设置错误	195
11.2 忽视对飞机的监控	196
11.3 人机沟通问题	198
11.4 飞行指引错误	199
11.5 自动控制系统失灵	201
11.6 自动油门系统故障	202



11.7 安全保护系统缺陷 .....	203
11.8 结束语 .....	205
重要概念回顾 .....	206
参考文献 .....	207
附录 1 纵向稳定性和操纵性仿真程序 .....	208
附录 2 横侧向稳定性和操纵性仿真程序 .....	211

# 第一部分

## 飞行基本知识

### 第1章 绪论 / 3

