

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列

飞机飞行力学

匡江红 王秉良 吕鸿雁 编



清华大学出版社

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列



飞机飞行力学

匡江红 王秉良 吕鸿雁 编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分 10 章,讲述了飞行性能计算的原始数据,飞机的基本飞行性能,飞机的机动飞行,飞机的续航性能,起飞和着陆性能,飞机的纵向稳定性和操纵性,飞机的侧向稳定性和操纵性,基本飞行技术,特殊情况下的飞行和不对称动力飞行。

本书在内容的广度和深度上,兼顾知识的系统性、逻辑性,力求结构合理、理论性和实用性并重。通过对本书的学习,不仅能了解飞行力学的基本原理,而且能学习到飞机操纵的方法和要领。

本书可以作为飞行技术及民航交通运输专业的教科书,也可作为航空爱好者的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

飞机飞行力学/匡江红,王秉良,吕鸿雁编.--北京:清华大学出版社,2012.5

(卓越工程师教育培养计划配套教材——飞行技术系列)

ISBN 978-7-302-28290-7

I. ①飞… II. ①匡… ②王… ③吕… III. ①飞机—飞行力学—高等学校—教材 IV. ①V212.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 041685 号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.25 字 数:310千字

版 次:2012年5月第1版 印 次:2012年5月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

产品编号:046426-01

卓越工程师教育培养计划配套教材

总编委会名单

主任：丁晓东 汪 泓

副主任：陈力华 鲁嘉华

委员：（按姓氏笔画为序）

丁兴国 王岩松 王裕明 叶永青 刘晓民

匡江红 余 粟 吴训成 张子厚 张莉萍

李 毅 陆肖元 陈因达 徐宝钢 徐新成

徐滕岗 程武山 谢东来 魏 建

卓越工程师教育培养计划配套教材

——飞行技术系列编委会名单

主任：汪 泓 丁兴国 郝建平

副主任：谢东来 陈力华 魏 建

委员：(按姓氏笔画为序)

卫国林 马银才 王秉良 王惠民 史健勇

石丽娜 匡江红 吴 忠 陆惠忠 范海翔

郝 勇 徐宝钢 贾慈力 隋成城 鲁嘉华



我国“十二五”发展规划的重点建设目标之一,是根据国民经济发展对民航业的要求,不断扩充与优化配置航线和飞机等资源。在民航业持续快速发展的同时,必然会使飞行专业技术人才高度匮乏。在《中国民用航空发展第十一个五年规划》中,中国民用航空局对未来20年全行业人才需求进行了预计分析,其中,“十二五”期间需增加飞行员16 500人。因此,飞行技术人才的培养是推动或阻碍民航发展的关键。

与其他本科专业相比,飞行技术专业的学生除了学习掌握飞行原理、飞机系统、航空动力装置、航空气象、空中领航、机载设备、仪表飞行程序设计、空中交通管制等飞行技术的专业知识外,还需具备一定的管理能力和较高的英语水平。并且,飞行技术专业人才的培养多采用学历教育与职业教育同步实施的模式,要求同时取得学历、学位证书和职业技能证书(飞行驾驶执照)后,才有资格担任民航运输机副驾驶员。

飞行技术人才培养具有专业性强、培养难度大和成本高的特点。伴随着大型民用运输机的生产与发展,必然要求提高飞行员的学历层次。国内设置飞行技术本科专业的高等院校仅有中国民航飞行学院、中国民航大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、上海工程技术大学等几所。而且,培养学士学位飞行技术人才的历史仅二十多年,尽管积累了一定的培养经验,但适用的专业教材相对较少。

在飞行技术专业的学科建设中,上海工程技术大学飞行学院和航空运输学院秉承服务国家和地区经济建设的宗旨,坚持教学和科研相结合、理论和实践相结合。2010年,上海工程技术大学飞行技术专业被列为教育部卓越工程师教育培养计划的试点专业,上海工程技术大学被列为教育部卓越工程师教育培养计划的示范单位。为满足飞行技术专业卓越工程师教育的需要,上海工程技术大学从事飞行技术专业教学和研究的骨干教师以及航空公司的业务骨干合作编写了“卓越计划”飞行技术系列教材。

“卓越计划”飞行技术系列教材共20本,分别为《运输机飞行仿真技术及应用》、《飞行人因工程》、《机组资源管理》、《飞行运营管理》、《民用航空法概论》、《空中交通管理基础》、《飞机系统》、《航空动力装置》、《飞机空气动力学》、《飞机飞行力学》、《飞行性能与计划》、《仪表飞行程序设计原理》、《航空机载电子设备》、《航空气象》、《空中领航》、《陆空通话》、《飞行专业英语(阅读)》、《飞行专业英语(听力)》、《飞行基础英语(一)》、《飞行基础英语(二)》等。

系列教材以理论和实践相结合作为编写的理念和原则,具有基础性、系统性、应用性等



特点。在借鉴国内外相关文献资料的基础上,坚持加强基础理论,对基本概念、基础知识和基本技能进行详细阐述,能满足飞行技术专业卓越工程师教育培养的教学目标和要求。同时,强调理论联系实际,体现“面向工业界、面向世界、面向未来”的工程教育理念,实践上海工程技术大学建设现代化特色大学的办学思想,凸显飞行技术的专业特色。

系列教材在编写过程中,参阅了大量的中外文参考书籍和文献资料,吸收和借鉴了现有部分教材的优势,参考了航空运输企业的相关材料,在此,对国内外有关作者和企业一并表示衷心的感谢。

受编者水平和时间所限,书中难免有错误和遗漏之处,敬请读者提出宝贵意见,不足之处还请同行不吝赐教。

上海工程技术大学 汪泓

2012年1月



目前,国内开设飞行技术、民航交通运输等相关专业的院校,一般都将“飞行力学”作为一门必修的专业课程,但是适用于本、专科学生的相关教材却极其匮乏,使得教学过程中遇到了诸多障碍。

鉴于此,本书充分利用上海工程技术大学航空运输学院多年的教学积累,对飞行力学教材进行了整理和编写。本书针对飞机这种特定的飞行器,讲述了飞行性能计算的原始数据,飞机的基本飞行性能,飞机的机动飞行,飞机的续航性能,飞机的起飞和着陆性能,飞机的纵向稳定性和操纵性,飞机的侧向稳定性和操纵性,飞机基本飞行技术,特殊情况下的飞行以及不对称动力飞行。本书的编写力求结构合理、理论性和实用性并重,注重从基本力学理论出发,系统地介绍飞机的飞行性能和操纵原理。本书各章均给出了习题,用作启发学生思考和引导学生在课堂上与教师协同学习的主动性,也可用作课外作业。另外每章后面给出相应的拓展阅读材料,拓展学生的视野,引导学生思考。

考虑到我国现有的民航运输机大部分为波音和空客公司产品,飞机附带的手册和机上设备均使用英制单位,因此本书中部分图表采用了英制单位。为了便于同国际单位对比,本书附录 A 中给出了常用英制单位与国际单位的换算关系。

本书作为卓越工程师教育培养计划飞行技术专业建设项目内容,由上海工程技术大学组织编写,校长汪泓教授给予了极大的支持,亲自组织业内专家审阅,并提出许多宝贵的意见和建议。本书的编写得到了上海工程技术大学航空运输学院和飞行学院领导的大力支持,上海航空公司徐宝钢一级飞行员给予了许多的指导,在此一并表示衷心的感谢。本书由上海工程技术大学飞行学院匡江红统稿,由匡江红、王秉良和吕鸿雁共同编写。在编写过程中参考了相关的飞行原理教材以及上海工程技术大学航空运输学院自编讲义。

因此,本书既可作为飞行技术、民航交通运输等相关专业本、专科的教材,亦可作为民航企业的培训教材。

由于编者水平有限,书中难免有错漏之处,恳请广大专家和读者给予批评指正。

编者

2012年2月

主要符号表

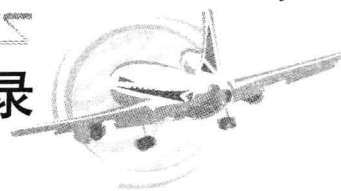
符号	定义
a	升力系数曲线斜率
A	升致阻力因子
b	弦长
b_a	几何平均弦长
b_A	平均空气动力弦长
C	声速
C_0, C_H	标准大气海平面处的声速, 高度 H 处的声速
C_x, C_y, C_z	飞机的阻力系数、升力系数和侧力系数
$C_{y_{\max}}$	最大升力系数
C_{x0}	零升阻力系数
f	弯度, 摩擦系数
F	作用在飞机上的合力
g	重力加速度
G	重力
H	飞行高度
$H_{\max, d}$	动升限
k	绝热指数, 速度阻滞系数
K	升阻比
K_z	传动比
l	翼展
l_{\downarrow}	下降距离
$L, L_{\uparrow}, L_{\text{巡}}, L_{\downarrow}$	航程, 上升段航程, 巡航段航程, 下降段航程
m, m_0	质量, 飞机起飞质量
$m_{\text{总}}, m_{\text{可用}}, m_{\text{巡}}$	总燃油量, 可用燃油量, 巡航段的燃油量
$m_{\uparrow}, m_{\downarrow}$	上升段所用燃油, 下降段所用燃油
m_x, m_y, m_z	滚转力矩系数, 偏转力矩系数, 俯仰力矩系数
$m_x^{\alpha}, m_y^{\beta}, m_z^{\beta}$	横向静稳定度, 方向静稳定度, 纵向静稳定度
Ma, Ma_{\max}	飞行马赫数, 飞行限定马赫数
M_x, M_y, M_z	滚转力矩, 偏转力矩, 俯仰力矩
$M_{\text{枢轴}}$	铰链力矩



n	发动机转速
n, n_x, n_i	过载, 纵向过载, 法向过载
n_y	载荷因数
N	反作用力
N_e, N_{ky}	发动机的有效功率, 发动机的可用功率
p	压强
$p_{H0}, p_{H\infty}$	高度 H 处气流总压, 高度 H 处气流静压
P	发动机的推力或拉力
$P_{ky}, P_{px}, P_{可用满}$	可用推力或拉力, 平飞所需推力或拉力, 满油门时飞机可用推力
q_{max}	容许的最大动压
q_N	喷气发动机的单位耗油率
q_h, q_k	小时耗油量, 千米耗油量
R	空气动力, 盘旋半径
Re	雷诺数
S	机翼面积
sfc	活塞式发动机的燃油消耗率
$T_{巡}$	巡航段航时
U	风速
$V, V_{平尾}$	飞行速度, 平尾处气流速度
V_{px}, V_{max}, V_{min}	平飞所需速度, 平飞最大速度, 平飞最小速度
$V_{MD}, V_{抖}, V_s$	最小阻力速度, 抖动速度, 失速速度
$V_{陡升}, V_{上}, V_{快升}$	陡升速度, 上升时的飞行速度, 快升速度
$V_{离}, V_R, V_{接地}$	起飞离地速度, 抬前轮速度, 接地速度
$V_{下}$	下降时的飞行速度
$V_y, V_{ymax}, V_{y下}$	上升率, 最大上升率, 下降率
V_i, V_c, V_e	指示空速, 校正空速, 当量空速
w	地速
X, Y, Z	飞机的阻力、升力和侧力
X_0, X_i	零升阻力, 升致阻力
x_G	重心到翼型前缘的距离
x_F	焦点到翼型前缘的距离
α	迎角
α_0	零升迎角
β	侧滑角
ϕ	机翼安装角
ϕ_P	发动机推力与飞机机身纵轴之间的夹角



ρ	密度
ρ_0, ρ_H	海平面标准大气密度, 飞行高度 H 处的空气密度
θ	航迹倾角, 上升角, 下降角
γ	坡度
χ	后掠角
ψ	上反角
ε	下洗角
$\delta_{\text{舵}}, \delta_x, \delta_y$	升降舵偏角, 副翼偏转角度, 方向舵偏转角度
ω	旋转角速度
η	螺旋桨效率
ΔP	剩余推力



第 1 章 飞行性能计算的原始数据 ·····	1
1.1 机翼的外形及几何参数·····	1
1.2 飞机的重心·····	4
1.3 飞机的坐标轴系·····	5
1.4 性能计算的原始数据·····	7
1.5 发动机特性·····	9
1.5.1 喷气发动机·····	9
1.5.2 活塞式发动机·····	11
本章小结·····	12
思考与练习·····	12
拓展阅读·····	13
第 2 章 飞机的基本飞行性能 ·····	15
2.1 垂直平面内的质心运动方程·····	15
2.2 飞机的定常直线水平运动(平飞)·····	16
2.2.1 平飞运动方程·····	16
2.2.2 平飞所需速度·····	17
2.2.3 平飞所需推力·····	17
2.3 飞机平飞性能·····	21
2.3.1 确定飞机平飞性能的简单推力法·····	21
2.3.2 飞机的平飞性能·····	21
2.4 上升·····	24
2.4.1 定常直线上升的运动方程·····	24
2.4.2 定常直线上升时的上升性能·····	25
2.4.3 飞机的静升限·····	27
2.4.4 稳定风场对上升性能的影响·····	27
2.5 下降·····	28



2.5.1	定常直线下降的运动方程	28
2.5.2	定常直线下降时的下降性能	28
2.5.3	下降性能的主要影响因素	29
	本章小结	30
	思考与练习	30
	拓展阅读	32
第3章	飞机的机动飞行	33
3.1	飞机在垂直平面内的机动飞行	33
3.1.1	平飞加、减速	33
3.1.2	跃升和俯冲	35
3.1.3	机动飞行的过载	37
3.2	飞机在水平平面内的机动飞行	39
3.2.1	盘旋运动方程	39
3.2.2	盘旋时的过载	40
3.2.3	盘旋性能	41
	本章小结	43
	思考与练习	43
	拓展阅读	43
第4章	飞机的续航性能	46
4.1	续航性能的基本关系式	46
4.2	喷气式飞机续航性能的计算	49
4.2.1	等高等速巡航时的续航性能	49
4.2.2	喷气式飞机的最佳续航性能	52
4.3	活塞式螺旋桨飞机的续航性能分析	53
4.3.1	飞行条件的改变对平飞航时的影响	54
4.3.2	飞行条件的改变对平飞航程的影响	55
	本章小结	56
	思考与练习	56
	拓展阅读	57
第5章	起飞和着陆性能	59
5.1	飞机的起飞	59
5.1.1	地面滑跑	60
5.1.2	离地	62
5.1.3	加速上升阶段	62
5.1.4	飞机的起飞性能	63
5.2	飞机的着陆	66



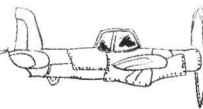
5.2.1	下降	67
5.2.2	拉平	68
5.2.3	平飘	68
5.2.4	飘落接地	69
5.2.5	着陆滑跑	69
5.2.6	飞机的着陆性能	69
	本章小结	73
	思考与练习	73
	拓展阅读	74
第 6 章	飞机的纵向稳定性和操纵性	76
6.1	飞机的纵向平衡	77
6.2	飞机的纵向稳定性	81
6.2.1	稳定性概念及条件	81
6.2.2	飞机的纵向静稳定性	82
6.2.3	飞机的纵向动稳定性	85
6.2.4	影响飞机纵向稳定性的因素	87
6.3	飞机的纵向操纵性	88
6.3.1	直线飞行中改变迎角操纵的基本原理	88
6.3.2	舵面平衡曲线	89
6.3.3	驾驶杆的杆力	91
6.3.4	曲线飞行中改变迎角的原理	92
6.3.5	调整片	93
6.3.6	影响飞机纵向操纵性的主要因素	94
	本章小结	95
	思考与练习	95
	拓展阅读	97
第 7 章	飞机的侧向稳定性和操纵性	99
7.1	侧滑	99
7.2	飞机的侧向平衡	100
7.3	飞机的侧向静稳定性	101
7.3.1	飞机侧向静稳定性的判据	101
7.3.2	飞机的横向静稳定性	101
7.3.3	飞机的方向静稳定性	106
7.4	飞机的侧向动稳定性	108
7.4.1	侧向阻尼力矩	108
7.4.2	飞机的侧向动稳定性	110
7.4.3	飞机的侧向动不稳定	111



7.4.4	影响飞机侧向稳定性的因素	112
7.5	飞机的侧向操纵性	112
7.5.1	飞机的方向操纵性(飞机无滚转)	113
7.5.2	飞机的横向操纵性(无侧滑)	114
7.5.3	影响飞机侧向操纵性的因素	115
	本章小结	116
	思考与练习	117
	拓展阅读	118
第8章	基本飞行技术	120
8.1	滑行	120
8.1.1	滑行阶段运动分析	120
8.1.2	滑行阶段的操纵	121
8.2	平飞、上升和下降	121
8.2.1	平飞操纵原理	121
8.2.2	飞机上升操纵原理	123
8.2.3	飞机下降操纵原理	124
8.3	盘旋	125
8.3.1	盘旋操纵原理	125
8.3.2	盘旋中的侧滑	127
8.3.3	螺旋桨副作用对盘旋的影响及修正	128
8.4	起飞技术	129
8.4.1	地面滑跑	129
8.4.2	离地	130
8.4.3	加速上升	131
8.5	着陆技术	131
8.5.1	着陆阶段的操纵	131
8.5.2	着陆中常见的偏差及修正	133
8.5.3	着陆目测	135
8.6	风对起飞、着陆的影响及修正	138
8.6.1	飞机在逆风中起飞、着陆的特点	138
8.6.2	侧风对滑跑的影响及修正原理	139
8.6.3	空中侧风导致的偏流及其修正	140
8.6.4	侧风情况下的起飞和着陆	143
8.7	复飞	144
	本章小结	145
	思考与练习	145
	拓展阅读	146



第 9 章 特殊情况下的飞行	149
9.1 失速和螺旋	149
9.1.1 失速.....	149
9.1.2 螺旋.....	151
9.2 低空风切变	151
9.2.1 风切变的分类.....	152
9.2.2 低空风切变对起飞、着陆的影响	153
9.2.3 如何避免低空风切变的危害.....	154
9.3 积冰条件下的飞行	155
9.4 在湍流中的飞行	157
9.5 进入前机尾流的飞行	161
9.6 特殊情况下的起飞与着陆	163
本章小结.....	167
思考与练习.....	167
拓展阅读.....	168
第 10 章 不对称动力飞行	170
10.1 多发飞机一发或多发停车后飞行性能的变化	170
10.2 不对称动力飞行的操纵原理	172
10.2.1 一发空中停车后飞机的运动	173
10.2.2 典型的不对称动力飞行状态	174
10.3 单发或双发故障时飞机的操纵方法和飞行特点	177
10.3.1 发动机故障时的起飞	177
10.3.2 发动机故障时的上升、平飞和下降.....	178
10.3.3 发动机故障时的着陆和复飞	178
10.3.4 不对称动力转弯	179
本章小结	182
思考与练习	182
拓展阅读	183
附录 A	185
A.1 常用英制单位与国际单位的换算.....	185
A.2 国际标准大气的属性.....	185
附录 B 练习题参考答案	187
参考文献	189



飞行性能计算的原始数据

关键词

性能计算(performance calculation)

空气动力(aerodynamic forces)

重心位置(center of gravity)

翼型(aerofoil)

空速(air speed)

坐标轴(coordinate axes)

发动机推力(engine thrust)

飞机飞行力学主要分析作用在飞机上的外力和飞机质心运动之间的关系以及作用在飞机上的力矩平衡,分析飞机的飞行性能以及飞机的稳定性和操纵性,因此首先必须知道作用在飞机上的外力,以及这些外力与飞行速度、飞行高度之间的关系。

在正常飞行中,作用在飞机上的外力有飞机所受的重力 G 、空气动力 R 以及发动机的推力或拉力 P 。各种飞行情况下, G 、 R 、 P 的大小及它们的变化规律,就是分析与计算飞行性能所需要的原始数据。

而作用在飞机上的空气动力的大小与机翼的形状有很大的关系,因此本章将介绍飞机机翼的有关几何参数以及飞行性能计算所需要的原始数据。

1.1 机翼的外形及几何参数

机翼的外形会影响到作用在机翼上的空气动力的大小和方向,因此机翼外形对飞机的飞行性能很重要。机翼外形一般指机翼翼型(翼剖面)的几何形状、机翼的平面形状、机翼扭转角和上反角等。

1. 翼型及其几何参数

翼型通常指平行于飞机(机翼)对称平面的机翼剖面,有时也指与机翼前缘相垂直的剖面。翼型的一般形状如图 1.1 所示。

表征翼型形状的主要几何参数有:翼弦、厚度(最大厚度和相对厚度)、最大厚度位置、中弧线、弯度、前缘半径等。

(1) 翼弦是翼型前缘和后缘的连线,其长度称为弦长,用 b 表示。

(2) 厚度是上下翼面在垂直翼弦方向的距离,其中最大厚度用 c 表示。翼型的厚薄程