

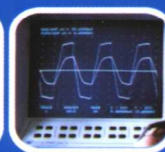
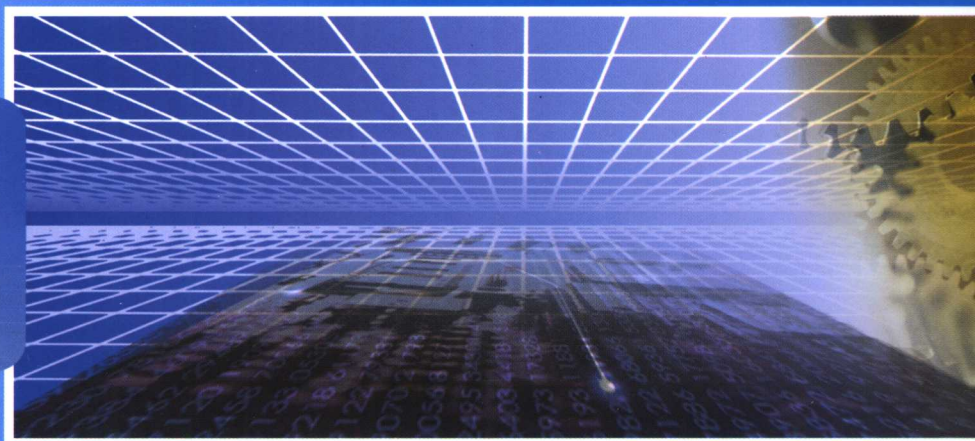


D-K-YT004-0D

空军航空机务系统教材

飞机飞行性能品质与控制

陈廷楠 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

D-K-YT004-0D

空军航空机务系统教材

飞机飞行性能品质与控制

陈廷楠 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共分四篇。第一篇为飞机飞行性能。本篇着重叙述了飞机的最大和最小速度、升限、航程和航时、起飞和着陆以及各种机动等性能的含义和计算方法。此外,本篇还简要介绍了现代作战飞机气动布局的特点及军用飞机战术技术论证的一般程序。第二篇为飞机飞行品质。本篇主要研究了飞机的静态和动态的飞行品质,即飞机的平衡、稳定和操纵特性。第三篇为飞机闭环控制。本篇主要研究了飞机闭环控制的基本原理,在此基础上,研究了第三代和第四代飞机的飞行控制技术。第四篇为飞机性能与品质的工程仿真。本篇首先介绍了工程仿真的基本方法,然后着重介绍了飞机性能与品质工程仿真程序,并附有光盘,供工程仿真计算使用。

本书为本科统编教材,其内容新、涉及面广,并附有工程计算的应用程序,因此也可供有关专业研究生教学用。对于空军和航空工业部门的厂、所、机关以及需要应用飞机性能、品质与控制方面知识的科技工作者,亦是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机飞行性能品质与控制 / 陈廷楠主编. —北京: 国防工业出版社, 2007. 2
(空军航空机务系统教材)
ISBN 978 - 7 - 118 - 04979 - 4

I. 飞... II. 陈... III. ①飞机 - 飞行品质 - 教材②飞机 - 飞行控制系统 - 教材 IV. V212.13 V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 012568 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 21 字数 502 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 56.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

总 序

发生在世纪之交的几场局部战争表明,脱胎于20世纪工业文明的机械化战争正在被迅猛发展的信息文明催生的信息化战争所取代。信息化战争的一个显著特点,就是知识和技术密集,战争的成败越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量和数量,以及人与武器的最佳配合。因此,作为人才培养基础工作的教材建设,就显得格外重要和十分紧迫。为了加快推进中国特色军事变革,贯彻执行军队人才战略工程规划,培养造就高素质新型航空机务人才,空军从2003年开始实施了航空机务系统教材体系工程。

实施航空机务系统教材体系工程是空军航空装备事业继往开来的大事,它是空军装备建设的一个重要组成部分,是航空装备保障人才培养的一个重要方面,也是体现空军航空装备技术保障水平的一个重要标志。两年来,空军航空机务系统近千名专家、教授和广大干部、教员积极参与教材编修工作,付出了艰辛的劳动,部分教材已经印发使用,效果显著。实践证明,实施教材体系工程,对于提高空军航空机务人才的现代科学文化水平和综合素质,进而提升航空机务保障力和战斗力,必将发挥重要作用和产生深远影响,是一项具有战略意义的工程。

空军航空机务系统教材体系工程,以邓小平理论和“三个代表”的重要思想为指导,以新时期军事战备方针为依据,以培养高素质新型航空机务人才为目标,着眼空军向攻防兼备型转变和航空装备发展需要,按照整体对应、系统配套、紧贴实际、适应发展,突出重点,解决急需的思路构建了一个较为完整的教材体系。教材体系的结构由部队、院校、训练机构教育训练教材三部分组成,分为航空机务军官教育训练教材和航空机务士兵教育训练教材两个系列十六个类别的教材组成。规划教材按照新编、修编、再版等不同方式组织编修。新编和修编的教材,充实了新技术、新装备的内容,吸收了近年来航空维修理论研究的新成果,对高技术战争条件下航空机务保障的特点和规律进行了有益探索,院校的专业训练教材与国家人才培养规格接轨并具有鲜明的军事特色,部队训练教材与总参颁布的《空军军事训练与考核大纲》配套,能够适应不同层次、不同专业航空机务人员的教育训练需要,教材的系统性、先进性、科学性、针对性和实践性与原有教材相比有了明显提高。

此次大规模教材编修工作,系统整理总结了空军航空机务事业创业50多年来的宝贵经验,将诸多专家、教授、骨干的学识见解和实践经验总结继承下来,优化了航空机务保障教材体系,为装备保障人员提供了一套系统、全面的教科书,满足了人才培养对教材的急需。全航空机务系统一定要认真学习新教材,使其真正发挥对航空机务工作的指导作用。

同时,教材建设又是一项学术性很强的工作,教材反映的学术理论内容是随实践的发展而发展的。当前我军建设正处在一个跨越式发展的历史关键时期,航空装备的飞速发展和空军作战样式的深刻变化,使航空机务人才培养呈现出许多新特点,给航空机务系统教材建设带来许多新问题。因此,必须十分关注航空装备的发展和航空机务教育训练的改革创新,不断发展和完善具有时代特征和我军特色的航空机务系统教材体系,为航空机务人才建设提供知识信息和开发智力资源。

魏 钢

二〇〇五年十二月

空军航空机务系统教材体系工程编委会

主任	魏 钢				
副主任	周 迈	毕雁翎	王凤银	袁 强	韩云涛
	吴辉建	王洪国	王晓朝	常 远	蔡风震
	李绍敏	李瑞迁	张凤鸣	张建华	许志良
委员	刘千里	陆阿坤	李 明	郦 卫	沙云松
	关相春	吴 鸿	朱小军	许家闻	夏利民
	陈 涛	谢 军	严利华	高 俊	戴震球
	王力军	曾庆阳	王培森	杜元海	

空军航空机务系统教材体系工程总编审组

组 长	刘桂茂				
副组长	刘千里	郦 卫	张凤鸣		
成 员	孙海涛	陈廷楠	周志刚	杨 军	陈德煌
	韩跃敏	谢先觉	高 虹	彭家荣	富 强
	郭汉堂	呼万丰	童止戈	张 弘	

空军航空机务系统教材体系工程
机械专业编审组

组 长 陈廷楠

成 员 王行江 陈柏松 王献军 赵 斌 高 虹
呼万丰 邱炳辉

前 言

《飞机飞行性能品质与控制》是根据空军航空机务系统教材体系工程的有关规定及我校教学改革精神编写的,主要供全军院校飞机发动机专业本科使用,也可供地方航空院校教学以及军队和航空工业部门研究所、工厂、机关、部队人员自学和工作参考。

本教材紧扣装备使用和发展,内容重点放在与第三代飞机技术有关的内容,还适当编写了与第四代飞机相关的知识。教材编写过程中注意了科学性、适用性与前瞻性,还注意了理论与实践相结合,既注重了基本理论,也引入了不少应用实例。考虑到我军装备论证的需要编写了“军用飞机作战使用性能与战技指标论证”一章;考虑到自学及今后工作使用方便,书中配有自学用的光盘,光盘中含飞机性能与品质计算的计算机软件及算例。

全书共分4篇,15章。其中第一篇由童中翔教授、王旭教授、张登成副教授编写;第二篇由董彦非副教授、陈廷楠教授编写;第三篇由张登成副教授、徐浩军教授编写;第四篇由王晓东讲师、柴世杰讲师编写,光盘中计算程序由王晓东完成编制。陈廷楠教授担任主编。

本书由空军工程大学工程学院组织初审,初审人员有胡孟权副教授、林国华教授。由空军专业编审组组织终审,终审的专家有陈士橹院士(主审)和刘千刚教授(博士生导师)。两位专家百忙中审查了教材,并给教材以很高的评价。陈院士指出:该教材“是一本优秀教材,它不仅可供教学使用,也可供部队和工业部门参考”,并“推荐为高等院校优秀教材”。刘教授指出:该教材“概念清晰,公式推导严谨,内容新颖,而且理论联系实际,有所创见,是一本特优的大学本科教材,对于其他从事飞行力学的工作者,也是一本很有价值的参考书。”编者对此表示感谢。

为了提高教材质量,本书编完后已经试用了两期。但由于编者水平有限,难免仍有不足和疏漏之处,诚恳希望使用者和关心本书的同志予以批评指正。

编者
2007年1月

主要符号表

符号	定义	单位
a	声速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
A	诱导阻力因子	
b_A	机翼平均空气动力弦长	m
C_R	总空气动力系数	
C_x	阻力系数	
C_{x0}	零升阻力系数	
C_y	升力系数	
C_z	侧力系数	
D_x	副翼操纵杆位移(Displacement)	mm
D_y	方向舵操纵杆位移	mm
D_z	平尾操纵杆位移	mm
F_x	副翼操纵杆力(Force)	
F_y	方向舵操纵杆力	
F_z	平尾操纵杆力	
G	飞机所受重力	N, kN
g	重力加速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
H	飞行高度	m
I_x, I_y, I_z	飞机绕机体轴的惯性矩(转动惯量)	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}	飞机绕机体轴的惯性积	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
K	升阻比	
l	机翼翼展	m
Ma	马赫数	
M_x, M_y, M_z	滚转力矩、偏航力矩、俯仰力矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
m_x, m_y, m_z	滚转、偏航和俯仰力矩系数	

符号	定义	单位
m_x^β, m_y^β	横向、方向静稳定导数(静稳定度)	
$m_z^\alpha, m_z^{C_y}$	纵向静稳定导数	
m_z^φ	平尾操纵导数(平尾效能)	
$m_x^{\delta_x}$	副翼操纵导数	
$m_y^{\delta_x}$	副翼偏航导数	
$m_x^{\delta_y}, m_y^{\delta_y}$	方向舵操纵导数	
$\bar{m}_z^{\omega_x}$	无因次滚转阻尼导数	
$\bar{m}_y^{\omega_y}$	无因次偏航阻尼导数	
$\bar{m}_z^{\omega_z}$	无因次纵向阻尼导数	
\bar{m}_z^{α}	无因次洗流时差导数	
$\bar{m}_x^{\omega_y}, \bar{m}_y^{\omega_x}$	无因次交叉导数	
m_{z0}	纵向零升力矩系数	
$N_{1/2}(N_2)$	振幅衰减 1/2(增大 1 倍)的振荡次数	
n_x, n_y, n_z	沿坐标轴的过载分量	
P	发动机推力	N, kN
p	大气压强	Pa, kPa
q	动压、速压	$N \cdot m^{-2}$
R	总空气动力; 作战半径; 盘旋半径; 航程	N; m, km
S	机翼面积	m^2
T	振荡周期	s
t_R	滚转模态时间常数	s
t	时间	s
$t_{1/2}(t_2)$	半衰期(倍幅时间)	s
V	飞机空速	$m \cdot s^{-1}$
V_i	飞机表速	$m \cdot s^{-1}$
V_y	飞机垂直上升率	$m \cdot s^{-1}$
V_{ad}	飞机有利速度	$m \cdot s^{-1}$
X, Y, Z	飞机的阻力、升力和侧力	N, kN
\bar{x}_F	全机焦点在机翼平均空气动力弦上的相对位置	

符号	定义	单位
\bar{x}_G	全机质心在机翼平均空气动力弦上的相对位置	
\bar{x}_m	握杆机动点在机翼平均空气动力弦上的相对位置	
α	迎角	(°)
β	侧滑角	(°)
γ	滚转角(坡度)	(°)
δ_x	副翼偏转角	(°)
δ_y	方向舵偏转角	(°)
δ_z	升降舵/平尾偏转角	(°)
	升降舵/平尾差动偏转角	(°)
ε	平尾处的平均下洗角	(°)
ζ	阻尼比	
ζ_p	长周期模态阻尼比	
ζ_{sp}	短周期模态阻尼比	
η	机翼根梢比	
θ	航迹倾斜角	(°)
ϑ	飞机俯仰角	(°)
λ	机翼展弦比	
μ	飞机相对密度	
ρ	空气密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
φ	平尾安定面的安装角	(°)
χ	机翼后掠角	(°)
ψ	偏航角	(°)
ψ_s	航向角	
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	飞机绕机体轴的滚转、偏航和俯仰角速度	(°) · s ⁻¹
$\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$	飞机绕机体轴的无因次角速度	
$\bar{\omega}_n$	无阻尼自振频率	
$\bar{\omega}_{np}$	长周期模态无阻尼自振频率	
$\bar{\omega}_{nsp}$	短周期模态无阻尼自振频率	
X		

主要下标

下标	定义	备注
ai	副翼	Aileron
av	可用	Available
b	机身	Body
bal	平衡	Balance
c	螺旋模态	Corkscrew Mode
cr	临界	Critical
d	荷兰滚模态	Dutch Roll Mode
di	抖动	Dithering
dt	接地	Down Touch
g	地面	Ground
h	铰链	Hinge
ht	水平尾翼	Horizontal Tail
l	定直平飞	Level
m	平均	Mean
p	长周期模态	Phugoid Motion
per	允许	Permit
r	滚转模态	Rolling Mode
req	需用	Require
sp	短周期模态	Short Period Motion
to	起飞	Take Off
vt	垂直尾翼	Vertical Tail
w	机翼	Wing
x	副翼,或在 x 轴分量,或绕 ox 轴	
y	方向舵,或在 y 轴分量,或绕 oy 轴	
z	升降舵,或在 z 轴分量,或绕 oz 轴	

目 录

第一篇 飞机飞行性能

第 1 章 现代作战飞机气动布局特点	1
1.1 飞机气动布局设计简介	1
1.2 现代作战飞机气动布局特点	6
第 2 章 飞机飞行性能	21
2.1 常用坐标系和质心运动方程组	21
2.2 飞机基本飞行性能	27
2.3 飞机机动飞行性能	37
2.4 飞机起飞、着陆性能	42
2.5 飞机任务性能和航程航时计算	49
2.6 飞机的敏捷性	54
第 3 章 军用飞机发展论证简介	57
3.1 军用飞机的一般研制程序	57
3.2 军用飞机论证	58
3.3 军用飞机型号论证的内容和要求	61
3.4 对歼、强类飞机的论证	63
3.5 对大型军用飞机的论证	64
3.6 论证的一般方法	65

第二篇 飞机的飞行品质

第 4 章 飞机的平衡	66
4.1 飞机的纵向平衡	67
4.2 飞机的方向平衡	73
4.3 飞机的横向平衡	74
小结	76
第 5 章 飞机静态飞行品质	78
5.1 飞机静稳定性	78
5.2 飞机静操纵性	84
第 6 章 刚体飞机运动方程	106
6.1 飞机基本运动方程	106

6.2	飞机运动方程的线化	108
6.3	飞机小扰动运动方程	109
6.4	无因次小扰动运动方程	116
6.5	矩阵形式的小扰动运动方程	119
第7章	飞机动态飞行品质	122
7.1	飞机的动稳定性	122
7.2	飞机纵向动稳定性	126
7.3	飞机横航向动稳定性	136
7.4	飞机的动操纵性	142

第三篇 飞机的闭环控制

第8章	飞机的闭环控制及主动控制技术	155
8.1	飞机闭环控制基本原理	155
8.2	纵向闭环控制基本原理	161
8.3	横、航向闭环控制基本原理	165
8.4	主动控制技术	168
8.5	驾驶员诱发振荡	173
第9章	增稳和控制增稳飞机飞行品质	174
9.1	增稳飞机飞行品质	174
9.2	控制增稳飞机飞行品质	183
第10章	电传飞机飞行品质	191
10.1	可靠性和余度技术	191
10.2	电传飞机飞行品质	193
10.3	YF-16 飞机电传操纵系统	205
第11章	飞行控制发展与展望	214
11.1	综合飞行/火力控制	214
11.2	综合飞行/推进控制	215
11.3	综合飞行/火力/推进控制	217
11.4	光传飞行控制	218
11.5	其他先进控制技术简介	222

第四篇 飞行性能与品质的工程仿真

第12章	飞行仿真基础知识	225
12.1	飞行仿真系统数学模型	225
12.2	飞行仿真常用算法	226
12.3	飞行仿真软件	229
第13章	飞行性能仿真计算	232

13.1	基本飞行性能计算	232
13.2	机动性能计算	234
13.3	起降性能计算	237
13.4	续航性能计算	240
第 14 章	飞行品质仿真计算	241
14.1	飞行品质研究方法	241
14.2	飞机稳定性和操纵性仿真计算	242
14.3	飞机动态响应特性计算	250
第 15 章	飞行模拟器	252
15.1	概述	252
15.2	地面飞行模拟器	252
15.3	空中飞行模拟器	257
附录		263
附录 A-1	论证的一般定量分析方法	263
附录 A-2	某新型教练机战术技术指标论证报告	275
附录 B-1	平尾对飞机纵向力矩的贡献	279
附录 B-2	飞机气动导数	282
附录 B-3	飞机飞行品质规范	286
附录 B-4	J_n 的测量方法	289
附录 B-5	滚转模态三自由度简化方法	289
附录 C-1	机动载荷控制	290
附录 C-2	直接力控制	293
附录 C-3	阵风减缓与乘感控制	299
附录 C-4	颤振主动抑制	301
附录 C-5	人一机系统结构图	302
附录 C-6	横航向增稳飞机飞行品质	305
附录 C-7	某型飞机电传操纵系统	311
附录 D	配套软件说明	320
参考文献		322

第一篇 飞机飞行性能

飞机飞行性能研究在已知外力(发动机推力、空气动力及飞机重力)作用下,如何确定飞机在空中及地面的各种运动特征,如最大飞行速度、飞行高度、飞行距离、各种机动性能以及起飞着陆特性等。分析这类问题所采用的基本方法是,把飞机看做一个全部质量集中在质心的质点,用飞机质心的运动代替整架飞机的运动。并且假定在各种飞行状态下,绕飞机质心的力矩平衡,都可以通过驾驶员操纵飞机的舵面来满足。

第一篇分三章。第1章在简要介绍飞机气动布局设计基本知识的基础上,对现代作战飞机的气动布局特点进行了简要介绍;第2章从质点动力学问题出发,介绍几种常用坐标系和飞机飞行性能的基本概念及有关的计算方法;第3章简要阐述军用飞机作战使用性能与战技指标论证的内容、要求及论证方法。

第1章 现代作战飞机气动布局特点

1.1 飞机气动布局设计简介

飞机由3大部分组成:飞机机体、推进系统和机载设备。机体包括机身、机翼、尾翼、起落装置和机械系统等。机械系统一般包括操纵、液压、燃油和发动机安装、环控和救生系统等。推进系统除了发动机本身外,还有一套复杂的附件和控制系统。对于现代作战飞机而言,机载设备是一个由计算机控制的、复杂的、功能先进的管理、通信、导航、仪表等多门类系统,包括航空电子、武器和火控、座舱显示以及电源系统等。

飞机气动布局就是飞机空气动力的总体设计,通常指飞机各主要气动部件的气动外形及其相对位置的设计与安排。飞机气动布局设计不仅限于飞机气动外形的设计,还包括各种气动参数的选择,以及与气动特性有关的综合设计,是飞行器设计中的重要组成部分。

1.1.1 气动布局的形式

在飞机气动布局设计中,首先要确定的就是气动布局的形式,即不同气动部件的安排形式。全机气动特性取决于各气动部件的相互位置及其大小和形状。机翼是最主要的气动部件,它是产生升力的主要部件,水平前翼、水平尾翼、垂直尾翼等是辅助气动部件,主要用于保证飞机的稳定性和操纵性。

根据各辅助翼面和机翼的相对位置以及辅助面的多少,气动布局的形式主要有以下几种:

- (1) 常规布局,水平尾翼在机翼之后;
- (2) 鸭式布局,水平前翼在机翼之前,称之为鸭翼;
- (3) 无尾或飞翼布局,飞机有机翼而无尾翼和鸭翼;
- (4) 三翼面布局,机翼前面有水平前翼(鸭翼),机翼后面有水平尾翼。

1.1.2 机翼设计

机翼是飞机产生升力的主要部件。在设计机翼时,首先要满足飞行性能的设计要求,其次要满足强度和气动弹性要求。这些与机翼设计有关的要求,可以通过机翼的翼型、平面形状、几何参数、弯扭、增升装置的正确选择来满足。

1. 翼型

机翼的剖面形状称为翼型。翼型是构成翼面的重要组成部分,它的气动特性直接影响到飞机的飞行性能和飞行品质,而翼型的气动特性取决于翼型的几何形状。

翼型内接圆圆心的连线称为翼型的中弧线,中弧线的最前点和最后点分别称为翼型的前缘和后缘,连接前、后缘的直线称为弦线,弦线被前、后缘所截线段的长度称为翼型的弦长,用 b 表示。翼型中弧线与弦线之间的距离的最大值称为最大弯度,简称弯度,用 f 表示。弯度与弦长的比值,称为相对弯度,即 $\bar{f} = f/b$,相对弯度的大小表示翼型的不对称程度。上下翼面在垂直于弦线方向的距离的最大值称为翼型的最大厚度,简称厚度,用 c 表示。厚度与弦长的比值,称为翼型的相对厚度,即 $\bar{c} = c/b$ 。翼型前缘处的曲率半径称为前缘半径,以 r 表示。翼型上下表面在后缘处的切线之间的夹角称为后缘角,以 τ 表示。

常用的典型翼型有:

- (1) 标准翼型,有对称和非对称两种;
- (2) 尖头翼型,有双弧线翼型、普通翼型及前缘削尖和平板削尖翼型;
- (3) 超临界翼型;
- (4) 层流翼型,有自然层流和层流控制翼型两种。

2. 机翼平面形状

比较常用的机翼平面形状有以下几种(图 1-1):

- (1) 平直机翼,适用于低速飞机;
- (2) 后掠机翼,可分为单后掠机翼和双后掠机翼,适用于高速飞机;
- (3) 前掠机翼,适用于高速飞机;
- (4) 三角机翼,可分为单三角机翼和双三角机翼,适用于高速飞机;
- (5) 菱形机翼,适用于高速飞机;
- (6) 曲线前缘机翼,适用于高速飞机。

3. 机翼几何参数

机翼几何参数包括机翼平面形状参数和其他机翼参数。图 1-2 给出了描述机翼平面形状的主要几何参数的定义。

其他机翼参数主要有安装角、扭转角,上(下)反角和机翼相对于机身的垂直位置等。

安装角是翼根弦与水平线的夹角,扭转角是翼尖弦与翼根弦之间的夹角,上(下)反角是机翼与水平线的夹角。

4. 边条翼

在中等后掠角、中等展弦比的机翼根部前缘加装一大后掠角尖前缘的细长翼所形成的复