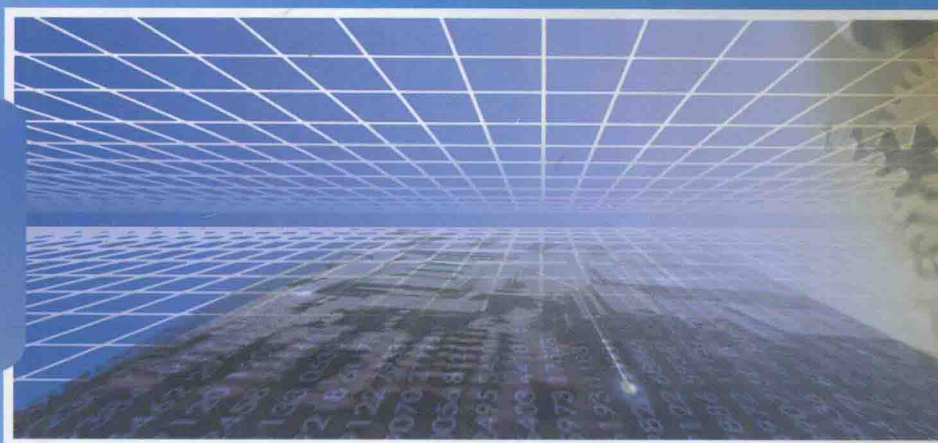




D-K-YT006-0D
空军航空机务系统教材

飞行控制系统

蔡满意 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

D-K-YT006-0D

空军航空机务系统教材

飞行控制系统

蔡满意 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共7章,主要讲述飞机飞行动力学的基本内容及自动飞行控制系统、人工飞行控制系统的结构和原理。介绍了数字飞行控制系统、飞行仿真技术和现代飞行控制技术的基本知识。

本书是航空控制工程类本科教材,也适用于从事飞行控制系统研究、生产制造和使用维护的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行控制系统 / 蔡满意主编. —北京:国防工业出版社,
2007.9

(空军航空机务系统教材)

ISBN 978 - 7 - 118 - 05273 - 2

I. 飞... II. 蔡... III. 飞行控制系统—教材 IV. V249

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第108499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 16 字数 380 千字

2007年9月第1版第1次印刷 印数 1—4500册 定价 40.00元

(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 郇 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 郇 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
特设专业编审组

组 长 杨 军

成 员 刘惠聪 杨继恩 宫玉春 苏广中 富 强
池华佑

前 言

本教材主要研究典型的飞行控制系统的结构、原理及其工作过程,是航空控制工程本科专业一门必修的核心专业基础课。它是根据空军航空机务系统教材体系工程规划而编写的,主要解决目前使用的教材内容陈旧、编排分散、无法适应新时期学生培养训练的问题。新编的教材在体系上突出了系统性和工程性,内容上兼顾先进性和继承性。

新编的教材在原空军工程学院出版的《飞行控制系统》的基础上,把原教材中单独成章的“舵机与舵回路”及“飞行品质及评价方法”简化后前移到第2章的“预备知识”和第3章的“飞行动力学”中;对原教材“飞行动力学”一章重新编写,并增加了飞机的基本飞行性能等内容;对“自动飞行控制系统”和“人工飞行控制系统”里面有关内容作了适当的微调,并增加了“飞行指引系统”等较新的内容;单独增加了“数字飞行控制系统和飞行仿真技术”内容,简单介绍了数字飞行控制系统及飞行仿真的基本组成和原理,对机载 BIT 系统也作了简单介绍;并对“现代飞行控制技术”作了适当改写。

本教材由空军工程大学工程学院负责编写,其中,第1章、第4章和第5章由蔡满意编写,第2章和第3章由朱凡编写,第6章由黄宏伟编写,第7章由李朝旭编写。蔡满意负责全书的统稿工作,李朝旭负责了全书的校对和排版工作。

本书由空军航空大学王社伟副教授、西北工业大学博士研究生导师章卫国教授担任主审,飞行试验训练基地理论训练研究中心苏广中副教授、西北工业大学博士研究生导师何长安教授、空军工程大学刘慧聪副教授、王国运高级实验师在审阅过程中提出了许多宝贵意见;教材的编写过程中得到了空军工程大学工程学院院、系、教研室及各级机关给予的大力支持,在此谨致谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者多提宝贵意见。

编 者

二〇〇七年元月于西安市东郊白鹿塬

目 录

符号表	1
第 1 章 绪论	5
1.1 航空发展概论	5
1.2 飞机飞行操纵系统概述	6
1.3 飞行控制系统概述	7
第 2 章 预备知识	9
2.1 空气动力学的基本知识	9
2.1.1 空气的基本特性	9
2.1.2 流体的模型化	12
2.1.3 大气飞行环境和国际标准大气	13
2.1.4 低速空气动力学的基本方程	14
2.1.5 连续性定理	19
2.1.6 伯努利定理	20
2.1.7 高速空气动力学的基本概念	20
2.2 飞机的几何形状和参数	26
2.2.1 飞机的布局形式和尺寸	26
2.2.2 机翼的几何形状和参数	27
2.3 飞机的操纵	30
2.3.1 飞机操纵的目的	30
2.3.2 飞机的操纵方式	30
2.3.3 舵机和舵回路的基本知识	30
小结	38
复习题	39
第 3 章 飞机飞行动力学	40
3.1 飞机运动的坐标系、运动参数和操纵机构的参数	40
3.1.1 常用坐标系	40
3.1.2 飞机的运动参数	41
3.1.3 飞机操纵机构的参数	42
3.2 作用在飞机上的外力与外力矩	42
3.2.1 对称定直平飞时作用在飞机上的力和力矩	43
3.2.2 非定常曲线飞行时作用在飞机纵向的力和力矩	51
3.2.3 非对称飞行时作用在飞机横侧向的力和力矩	55

3.2.4	飞机的一般运动方程	61
3.3	飞机运动的稳定性与操纵性	67
3.3.1	飞机运动方程的线性化和简化——小扰动方程	68
3.3.2	飞机纵向运动的稳定性与操纵性	78
3.3.3	飞机横侧向运动的稳定性与操纵性	92
3.4	飞机的飞行性能与基本飞行品质要求	100
3.4.1	飞行性能计算的原始数据和基本定义	100
3.4.2	飞机的基本飞行性能	103
3.4.3	飞机的续航与起飞着陆性能	106
3.4.4	飞机的机动飞行性能	107
3.4.5	飞机的飞行品质及评价方法	110
	小结	116
	复习题	116
第4章	自动飞行控制系统	117
4.1	概述	117
4.1.1	自动飞行控制系统的组成和功用	117
4.1.2	自动飞行控制系统的基本参数要求	118
4.2	飞机的三轴姿态控制系统	118
4.2.1	控制原理	118
4.2.2	飞机纵向角运动的稳定与控制	126
4.2.3	飞机侧向角运动的稳定与控制	130
4.2.4	自动配平系统	135
4.3	飞机的轨迹控制系统	136
4.3.1	飞行高度的稳定与控制	137
4.3.2	飞机侧向偏离控制系统	141
4.3.3	地形跟随控制系统	144
4.3.4	飞机自动着陆控制系统	150
4.4	其他类型的飞行控制系统	163
4.4.1	飞机的空速与马赫数控制系统	163
4.4.2	飞行指引系统	167
	小结	170
	复习题	171
第5章	人工飞行控制系统	172
5.1	概述	172
5.2	飞机的阻尼与增稳系统	173
5.2.1	飞机—阻尼器系统	173
5.2.2	飞机—增稳系统	179
5.3	飞机的控制增稳系统	183
5.3.1	控制增稳系统的组成、工作原理及控制律	183

5.3.2	控制增稳系统对飞机稳定性和操纵性的作用	185
5.3.3	指令模型的形式和参数选择	187
5.3.4	控制增稳系统的优缺点	189
5.4	飞机的电传操纵系统	190
5.4.1	电传操纵系统的提出	190
5.4.2	电传操纵系统中的可靠性与余度技术	191
5.4.3	电传操纵系统的组成、工作原理和控制律	194
5.4.4	电传操纵系统对飞机稳定性、操纵性和机动性的作用	198
	小结	199
	复习题	200
第6章	数字飞行控制系统及飞行仿真技术	201
6.1	概述	201
6.2	数字飞行控制系统的组成	202
6.2.1	数字飞行控制系统的硬件组成	202
6.2.2	数字飞行控制系统软件功能结构及程序模块	206
6.2.3	数字飞行控制系统的关键技术及发展	209
6.3	机内自检测系统	210
6.3.1	BIT 定义及基本技术要求	210
6.3.2	BIT 硬件结构及实现	211
6.3.3	BIT 的软件功能与组成	214
6.4	飞行仿真	214
6.4.1	概述	214
6.4.2	系统建模与飞行仿真的数学模型	215
6.4.3	飞行仿真中的计算机系统	217
6.4.4	飞行仿真中的一些理论与技术问题	220
	小结	223
	复习题	223
第7章	现代飞行控制技术	224
7.1	概述	224
7.2	放宽静稳定性后飞机的特性	225
7.2.1	飞机质心的位置	225
7.2.2	配平升力与配平阻力	227
7.2.3	纵向静不稳定飞机的锁舵动态特性	228
7.3	直接力控制	231
7.3.1	直接升力控制	231
7.3.2	直接侧力控制	233
7.4	主动控制的其他用途	235
7.4.1	机动载荷控制	235
7.4.2	阵风减缓	236

7.4.3 边界控制	237
7.4.4 颤振模态控制	238
7.5 综合控制与飞行管理	239
7.5.1 综合飞行火力控制	239
7.5.2 综合飞行推进控制	240
7.5.3 综合飞行/火力/推进控制与战术任务飞行管理系统	240
小结.....	243
复习题.....	243
参考文献.....	244

符号表

符号	术语
b	翼展
c	弦长
S_w	机翼面积
c_A	平均气动弦长
δ	翼剖面最大厚度
f	翼最大弯度
λ	展弦比
η	根梢比
χ	后掠角
Γ	上反角
h	几何高度
P	静压
Q	动压
m	飞机质量
G	飞机重量
g	重力加速度
$S_g - O_{x_g}y_gz_g$	铅垂地面坐标系 S_g
$S_b - Oxyz$	机体坐标系 S_b
$S_a - O_{x_a}y_az_a$	气流坐标系 S_a
$S_k - O_{x_k}y_kz_k$	航迹坐标系 S_k
β	侧滑角
α	迎角
ψ	偏航角
θ	俯仰角
ϕ	倾斜角
χ	航迹方位角
γ	爬升角
μ	航迹滚转角
ε	下洗角
V	飞行速度

V	空速
a	音速
Ma	马赫数
δ_a	副翼偏转角
δ_e	升降舵偏转角
δ_r	方向舵偏转角
d_a	驾驶杆横向位移
d_e	驾驶杆纵向位移
d_r	脚踏位移
δ_T	油门杆偏度
p	沿轴 x 的飞机角速度分量
q	沿轴 y 的飞机角速度分量
r	沿轴 z 的飞机角速度分量
V_w	风速
Ω	飞机角速度
I_x	绕纵轴惯性矩
I_y	绕横轴惯性矩
I_z	绕竖轴惯性矩
I_{yz}	相对纵轴的惯性积
I_{zx}	相对横轴的惯性积
I_{xy}	相对竖轴的惯性积
R	飞机所受合力(含推力)
X^R	合力 R 沿纵轴的分量
Y^R	合力 R 沿横轴的分量
Z^R	合力 R 沿竖轴的分量
R^A	飞机气动力
X	R^A 沿纵轴的分量
Y	R^A 沿横轴的分量
Z	R^A 沿竖轴的分量
D	阻力
Y_a	侧力
L	升力
C_D	阻力系数
C_{Ya}	侧力系数
C_L	升力系数
C_{D0}	零升阻力系数
AC_L^2	升致阻力系数

K	升阻比
C_{L_w}	升力线斜率
$C_{Y_{\alpha\beta}}$	侧力导数
$C_{Y_{\alpha\delta r}}$	方向舵侧力导数
$C_{Y_{\dot{\alpha}\dot{p}}}$	滚转角速度侧力导数
$C_{Y_{\dot{\alpha}\dot{r}}}$	偏航角速度侧力导数
L	滚转力矩
M	俯仰力矩
N	偏航力矩
C_l	滚转力矩系数
C_m	俯仰力矩系数
C_n	偏航力矩系数
C_{m0}	零升力矩系数
$C_{m_{\alpha}}$	纵向静稳定导数
$C_{l_{\beta}}$	横滚静稳定导数
$C_{n_{\beta}}$	偏航静稳定导数
$C_{l_{\delta a}}$	滚转操纵导数
$C_{l_{\delta r}}$	方向舵操纵交叉导数
C_{l_p}	滚转阻尼导数
C_{l_r}	交叉动导数
$C_{n_{\delta a}}$	副翼操纵交叉导数
$C_{n_{\delta r}}$	方向舵操纵导数
C_{n_p}	交叉动导数
C_{n_r}	偏航阻尼导数
T	发动机推力
T_{pf}	平飞需用推力
T_{k_y}	可用推力
ΔT	剩余推力
H_{max}	静升限
CAP	操纵期望参数
M_{F_y}	杆力灵敏度
$F_y^{n_z}$	单位过载杆力
T_p	长周期运动时间常数
T_s	短周期运动的时间常数
ξ_p	长周期运动的阻尼比
ξ_s	短周期运动的阻尼比

ω_p	长周期运动的固有频率
ω_s	短周期运动的固有频率
T_D	荷兰滚运动模态的时间常数
ξ_D	荷兰滚模态阻尼比
ω_D	荷兰滚模态固有频率
T_R	滚转阻尼模态时间常数
T_S	螺旋模态时间常数

第1章 绪论

1.1 航空发展概论

升空飞行是人类最古老、最美好的愿望之一。人类在追求升空的不断探索中,屡受挫折,经过长期反复的实践,终于找到了3种离地升空的技术途径:①根据热气上升原理而发明轻于空气的飞行器——气球、飞艇;②受中国古代的竹蜻蜓和昆虫飞行的启迪,靠旋转而直升飞行的飞行器——直升机;③受中国的风筝和鸟类滑翔飞行的启示,靠固定翼面产生升力的飞行器——滑翔机、飞机。时至今日,可在地球大气内飞行的航空器之种类与形式已多得到了令人眼花缭乱的地步,其飞行速度、航程、升限和载重能力令一般人难以置信,更是鸟类、昆虫和蝙蝠所无法比拟,真可谓青出于蓝而胜于蓝。

纵观人类航空发展的过程,有几个令人激动和振奋的事件是需要我们永远记住的:

(1) 1783年6月4日,法国的航空先驱、热气球的发明人蒙哥尔费兄弟(Montgolfier brothers, 兄, J. M. 蒙哥尔费, 1740—1810; 弟, J. E. 蒙哥尔费, 1745—1799)在昂纳内首次公开表演了他们制作的热气球——直径达10m的热气球升到457m的高度,在空中飘荡了10min左右,然后落回地面。1783年11月21日,法国人F. P. 罗齐埃和M. 达尔朗德乘坐蒙哥尔费兄弟制作的热气球升到1000m,在巴黎上空飞行了25min,实现了人类历史上第一次空中飞行;

(2) 1903年12月17日,这是一个人类航空史上,甚至是人类历史上一个意义深远的日子。上午11时左右美国人奥维尔·莱特在他们制作的“飞行者一号”固定翼飞机上俯伏就座,发动机启动后,飞机迎着43.5km/h的大风快速滑行并成功升空飞行。虽然这次飞行持续时间只有12s,但这是人类历史上有动力、载人、持续、稳定、可操纵的重于空气飞行器的首次飞行成功,它为人类征服天空揭开了新的一页,标志着固定翼飞机时代的来临;

(3) 1947年10月14日,根据美国人卡门的构思而设计的X-1火箭试验机在12800m的高空上达到了1078km/h的飞行速度(相应的马赫数为 $Ma = 1.015$),首次突破了声障。如果说1783年法国人蒙哥尔费兄弟的热气球升空标志着人类航空史上的第一次重大突破,1903年12月17日美国人莱特兄弟的飞机实现了人类首次持续的、有动力的、可操纵的飞行是航空发展的第二次突破,那么喷气式飞机的问世并突破声障则是航空史上第三次重大突破,它标志着人类已进入了超声速飞行的时代。

200多年前,人类在天空飞翔还只是一种梦想,但自人类第一次实现乘气球升空至今,航空技术已成为现代人类文明不可缺少的一部分,成为现代人类文明的重要标志之一。可以想象,未来的航空技术在今天也将是不可预测的,但是有一点却可以预测:那就是随着人类对航空技术的不断研究和探索,人类翱翔天空的本领将会更加强大、更加完美。