

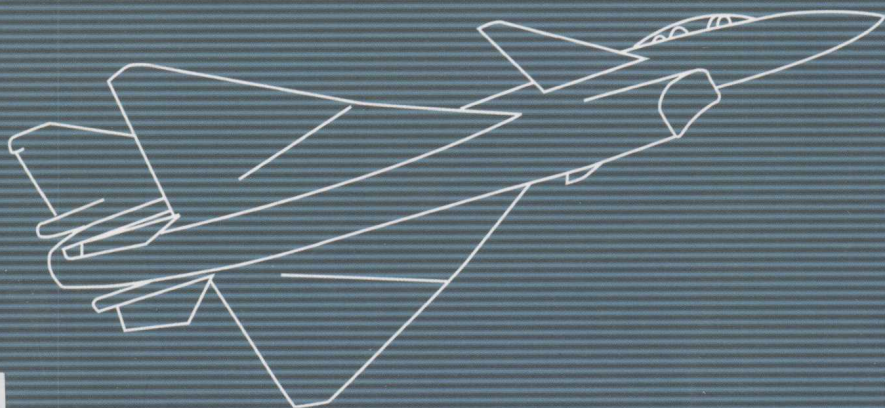
航空宇航科学与技术

国防科工委『十五』规划专著



飞机综合控制与 飞行管理

申功璋 高金源 张 津 著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

 国防科工安“十五”规划专著·航空宇航科学与技术

飞机综合控制与飞行管理

申功璋 高金源 张 津 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

飞机的综合控制与战术任务飞行管理技术是航空自动控制领域近 30 年发展起来的一种新技术。本专著综述了综合控制的基本概念、国外发展概况;重点介绍满足综合控制要求的发动机、推进系统性能与控制的建模;综合飞行/推进控制系统设计及仿真;综合飞行/火力控制系统的设计及性能评价;战术任务飞行管理系统的基本功能与结构、飞行中的轨迹规划、战场态势评估与驾驶员辅助系统;综合控制技术的系统总体方案、新型的综合控制设计方法及作战任务全过程仿真;综述了飞机综合控制技术的发展——飞行器管理系统研究思路及支撑技术。

全书内容力求具有一定的先进性、理论性和工程使用价值。本书可作为飞机总体设计与飞行控制等专业的教师、研究生、厂所研究人员的教学与研究工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机综合控制与飞行管理/申功璋,高金源,张津著.
—北京:北京航空航天大学出版社,2008.11

ISBN 978-7-81077-925-8

I. 飞… II. ①申…②高…③张… III. 飞机—飞行控制系统 IV. V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 015357 号

飞机综合控制与飞行管理

申功璋 高金源 张 津 著

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:13.625 字数:366 千字

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-81077-925-8 定价:43.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祯

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了



一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍。他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育,特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防



特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著书稿进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著书稿,覆盖了航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者。他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等院校,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展



阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝





前 言

航空自动控制技术自 20 世纪 60 年代以来,已经历了主动控制技术和综合控制技术两个阶段,目前正朝着智能控制技术阶段发展。

在现代立体化战争中,战斗机的地位显得越来越突出,它对未来战争具有极其重要的战略意义。这一变化趋势对战斗机的飞行性能和作战性能提出了更高的要求。未来战斗机要求具有下列战术技术性能:① 发动机在非加力状态下具有超声速巡航能力;② 良好的隐身性能;③ 高敏捷性和机动性,特别是过失速机动能力;④ 短距离起降能力;⑤ 超视距攻击、近距离格斗兼顾对地攻击能力;⑥ 综合信息管理和机群协同作战能力。

这些战术技术性能要求扩大战斗机的进攻范围,能够打击纵深目标,提高战斗机的机动性、攻击效率和完成任务的有效性,提高战斗机的生存力并减轻飞行员的工作负担。飞行员在作战过程中,不仅要操纵飞机完成如突防、拦截、攻击格斗、空中加油和电子对抗等多种作战任务,还要监视作战环境局势,判断空中和地面的威胁源,对战术信息和作战任务要求等进行战术决策。这种需求变化促进了先进战斗机综合技术的出现和发展,尤其是矢量喷管控制技术的发展和实现,对飞机控制技术变革具有极其重要的意义。

所谓系统综合技术,即把分离系统设计思想进化为



综合系统设计思想,从信息、功能、任务、结构和控制多个方面进行不同层次、不同程度的综合。综合飞行/推进控制(IFPC)系统利用推进系统控制潜力,优化、协调飞行控制和推进控制,改善、提高战斗机飞行性能;利用飞行控制信息改善推进系统性能。综合火力/飞行控制(IFFC)系统利用战术信息和攻击机信息综合、飞行控制和火力控制综合,实现自动机动攻击,有效地完成作战任务,减轻了飞行员的工作负担,提高了战斗机作战能力。综合飞行/火力/推进控制(IFFPC)系统是在前面两者基础上对系统控制和信息的进一步综合。战术任务飞行管理系统是在综合控制系统的基础上,对战术信息和飞行信息进行综合管理,实现以战术任务为目标,进行全局的任务规划与管理,在线组织具体的综合控制系统。

未来战斗机采用的综合控制技术将在综合航空电子系统总构架下实现,顶层为战术任务飞行管理系统,底层为各种控制模态的综合控制系统。这种结构模式可以满足未来战斗机对信息共享、数据融合、推力矢量控制、机动攻击以及完成多种战术任务的需求。综合航空电子系统在发挥攻击机作战效能方面起着关键性作用,而战术任务飞行管理与综合控制是在综合航空电子系统基础上提高、改善攻击机作战效能和生存力的核心技术之一。

一些发达国家对飞机的综合控制技术发展特别重视,已完成了从原理、仿真、工程研制、试飞验证直至装备先进战斗机的全过程。目前,我国与国外相比,综合控制技术研究还有一定差距。为了满足有关厂所研究人员、大专院校有关教师和研究生研究工作的迫切需要,作者



依据在该领域的科学技术研究、工作实践中积累的丰富资料,写出了本书,奉献给读者,期望为进一步推动该技术的深入研究起一个抛砖引玉的作用。

本书主要内容如下:第1章为绪论,综述了综合控制的基本概念、国外发展概况及综合控制技术的系统结构与综合设计思路;第2章为推进系统性能及其控制的建模与仿真,重点介绍满足先进战斗机综合控制要求的发动机、推进系统性能与控制的建模;第3章为综合飞行/推进控制系统,重点介绍先进战斗机典型飞行任务的综合飞行/推进控制系统设计及仿真,即性能寻优控制(包括超声速巡航)、飞行航迹优化、短距起降、大迎角综合飞行/推进控制;第4章为综合飞行/火力控制系统,重点介绍综合飞行/火力控制系统的组成、目标状态估计器设计、典型武器火力控制建模、综合控制的设计及性能评价;第5章为战术任务飞行管理系统,重点介绍战术任务飞行管理系统的基本功能与结构、飞行中的轨迹规划、战场态势评估与驾驶员辅助系统;第6章为综合飞行/火力/推进控制系统设计与仿真,重点介绍综合控制技术的系统总体方案、两种新型的综合控制设计方法及作战任务全过程仿真;第7章为飞行器管理系统简介,综述了飞机综合控制技术的发展——飞行器管理系统研究思路及支撑技术。全书内容力求一定的先进性、理论性和工程使用价值的有机结合,反映了曾在著名教授文传源老先生领导下,北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院、能源与动力工程学院开创组建的“飞机综合控制”课题组近20年来教师与研究生的研究工作与成果,前期大



部分研究成果已反映在研究生教材《现代飞行控制》(文传源编著、高金源、屠巴宁、申功璋等参编,“九五”国家级重点教材,北京航空航天大学出版社 2004 出版)中。在编著本书的过程中,考虑到系统性,仍然选用了这些研究成果的部分内容。

全书第 2 章由张津教授撰写,第 3.2 节部分内容由唐海龙副教授撰写,第 5 章由高金源教授撰写,其余章节由申功璋教授撰写并对全书统稿。参加撰写的还有研究生柳嘉润、杨凌宇、张晶、钟友武、金琦岩等,他们为全书的完稿作出了贡献;张汝麟研究员、张明廉教授对本书进行了认真的审阅,提出了宝贵的修改意见,一并在在此致谢。

书中若有不足之处,请读者不吝赐教。

作 者

2006 年 11 月

主要符号表

A	面积
A_{01}	进入进气道流量的流管面积
A_{0BL}	附面层泄除流量的流管面积
A_{0BP}	放气流量的流管面积
A_{0E}	进入发动机流量的流管面积
A_8	喷管喉道面积
A_9	喷管出口面积
A_c	进气道捕获面积
A_{dxH}	高压涡轮导向器面积
A_{dxL}	低压涡轮导向器面积
b	机翼展长
BPR	涵道比
c_A	平均气动力弦长
c_p	空气的比定压热容
c'_p	燃气的比定压热容
C_D	阻力系数
C_{DBL}	附面层泄除阻力系数
C_{DBP}	放气阻力系数
C_{DN}	后体阻力系数
C_{DSP}	溢流阻力系数
C_{FG}	喷管推力系数
C_l	滚转力矩系数
C_L	升力系数
C_m	俯仰力矩系数



C_n	偏航力矩系数
C_{Y_0}	侧力系数
D	阻力
D_{BP}	放气阻力
D_{BL}	附面层泄除阻力
D_{in}	进气道阻力
D_N	喷管后体阻力
D_{SP}	溢流阻力
EPR	发动机压比
f	油气比
f'	燃烧室油气比
F	非安装推力
F_D	冲压阻力
F_G	总推力
F_S	单位推力
g	重力加速度
H	飞行高度
H_u	燃油低热值
I_x, I_y, I_z	转动惯量
I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}	惯性积
J_z	转子转动惯量
L	升力
L^T, M^T, N^T	推力产生的滚转力矩、俯仰力矩和偏航力矩
L_r	滚转力矩
L_v	目标线俯仰角(或称高低角)
L_w	目标线方位角
m	飞机质量
Ma	马赫数
M_K	压气机扭矩



M_r	俯仰力矩
M_T	涡轮扭矩
n_F	风扇转子转速
n_{Fcor}	风扇换算转速
n_{Fzh}	风扇折合转速
n_H	高压转子转速
n_{Hcor}	高压压气机换算转速
n_{Hzh}	高压压气机折合转速
n_L	低压转子转速
n_x	纵向过载
n_y	横向过载
n_z	法向过载
N_r	偏航力矩
p	滚转角速度、静压
p^*	总压
p_0	大气压力
P	功率
PLA	油门杆角度
q	俯仰角速度
q_m	空气质量流量
q_{mf}	主燃烧室燃油质量流量
q_{mfA}	安装燃油质量流量
q_{mfAB}	加力燃烧室燃油质量流量
q_{mg}	燃气质量流量
Q	动压
r	偏航角速度
R	气体常数
Re	雷诺数
sfc	耗油率



sfc_A	安装耗油率
S_w	机翼面积
SM	喘振裕度
SM_F	风扇喘振裕度
SM_H	高压压气机喘振裕度
SM_L	低压压气机喘振裕度
T	推进系统推力(安装推力)、静温
T^*	总温
T_0	大气温度
T_x, T_y, T_z	推力在机体坐标系的分量
TR	节流比
$V(v)$	飞行速度
V_A	飞机的飞行速度
W_K	单位空气流量所作的压缩功
W_T	单位燃气流量所作的膨胀功
Y_a	侧力
α	迎角、余气系数
α_1	风扇进口导流叶片角度
α_2	高压压气机静子叶片角度
β	侧滑角
γ	航迹倾斜角、空气的比热比
γ'	燃气的比热比
δ_1	发动机进口总压和标准大气压力之比
δ_a	副翼偏转角
δ_c	鸭翼偏转角
δ_e	升降舵同向偏转角
$\bar{\delta}_e$	升降舵差动偏转角
δ_{ny}	喷管水平偏转角
δ_{nz}	喷管垂直偏转角



δ_r	方向舵偏转角
η	效率
θ	俯仰角、加热比
θ_1	发动机进口总温和标准大气温度之比
λ	速度系数
μ	航迹滚转角
π_F^*	风扇增压比
π_K^*	压气机增压比
π_N	喷管压比
π_T^*	涡轮膨胀比
ρ	空气密度
σ	总压恢复系数
Φ	流量系数
ϕ	滚转角
φ_D	发动机推力线与飞机轴线的夹角
χ	航迹方位角
ψ	偏航角, 相当温度
ψ_N	喷管速度损失系数
Ω_B	机体坐标系的角速度
Ω_V	速度坐标系的角速度

截面符号

1	风扇进口
1.1	高压压气机进口
2	高压压气机出口
3	高压涡轮进口
3.1	低压涡轮进口
4	低压涡轮出口
5I	内涵混合器进口