

飞机飞行控制技术丛书

先进飞行控制系统

Advanced Flight Control System

郭锁凤 申功璋 吴成富 等编著



国防工业出版社

责任编辑：许波建

组稿编辑：孙中明

封面设计：彭建华



飞机飞行控制技术丛书

飞机飞行品质

飞行操纵与增强系统

自动飞行控制系统

电传飞行控制系统

飞行控制系统的地面与飞行试验

先进飞行控制系统

飞行控制系统的分系统

ISBN 7-118-02989-0



9 787118 029895 >

ISBN 7-118-02989-0/V·223

定价：28.00 元

飞机飞行控制技术丛书

先进飞行控制系统

Advanced Flight Control System

郭锁凤 申功璋 吴成富 等编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

先进飞行控制系统/郭锁凤等编著. —北京:国防工业出版社, 2003.3

(飞机飞行控制技术丛书)

ISBN 7-118-02989-0

I. 先... II. 郭... III. 飞行控制系统 IV. V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 082495 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{4}$ 276 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版社国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 崔士义 蔡 镛

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

序 一

新中国航空工业历经五十年的艰难创业,经历了由仿制到自主研发的历程,取得了令人瞩目的成就。《飞机飞行控制技术丛书》就是众多成果之一,它的编著出版,从一个侧面反映出我们在这个领域的水平。在进入 21 世纪、实现航空工业跨越式发展的进程中,这套丛书必将发挥积极的作用。

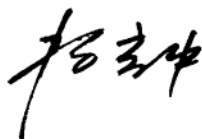
飞行控制系统是飞机的重要组成部分;飞行控制系统的水平对飞机的性能和安全性起着决定性的作用。对飞行控制系统的技术研究一直受到各航空发达国家的高度重视。我国航空界也卓有成效地开展了这一领域的研究,研制和生产了各种类型的飞行控制系统,满足了飞机研制的需要,并积累了丰富的经验。

《飞机飞行控制技术丛书》是我国航空工业界、科技界和教育界一大批专家、学者、科研人员和管理人员团结合作的劳动结晶。他们历时多年,克服了许多困难,在认真总结我国在飞行控制技术的理论研究和工程实践的基础上,完成了这套丛书的编著。实践证明,产学研相结合是我们开展科技创新、发展航空科技的重要途径,也是联合编著科技著作、促进人才培养的有效手段。在对参与此书策划和编著的全体人员表示祝贺的同时,我要对他们付出的辛勤劳动表示衷心的感谢,还要向参与飞机飞行控制系统科学研究活动、对本书提供丰厚的实践背景的广大科技人员表示衷心的感谢。

我还要特别感谢国防科技图书出版基金对此书出版的资助,

这是航空科技界得到该基金支持的第一部著作,这一支持将鼓舞我们继续努力,编著更多更好的航空科技专著。

中国航空工业第一集团公司 常务副总经理
中 国 航 空 研 究 院 院 长

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张纪中' (Zhang Jizhong), written in a cursive style.

2001 年 7 月 13 日

序 二

《飞机飞行控制技术丛书》是由中国航空学会飞行器控制与操纵专业委员会提出建议、原中国航空工业总公司机载设备局支持和资助而开始编著的。在机载设备局领导下,专业委员会组建了编委会,具体组织了编著工作。1999年航空工业管理体制变革后,中国航空工业第一集团公司科技发展部继续支持了该项工作,并和中国航空学会飞行器控制与操纵专业委员会及本丛书编委会,共同组织完成了本丛书的编著。本丛书的出版得到了国防科技图书出版基金的资助,使这套丛书得以出版面世,获得圆满的结果。中国航空工业第一集团公司常务副总经理、中国航空研究院院长杨育中为本书撰写了序言。

编著这套丛书的目的是:总结我国自行研制和发展飞行控制系统的经验与成果,并归纳出设计研制现代飞行控制系统的主要技术和一般规律,为我国航空技术的持续发展提供系统的理论与实践知识。

全书按不同主题分为七册,详细阐述飞行控制系统设计、研制和试验验证的全貌。各册内容相对独立、完整。

《飞机飞行品质》着重阐述飞机的飞行品质及其评价准则与评估技术,以及人一机闭环特性、起飞着陆、大迎角飞行特性及其品质评价。

《飞行操纵与增强系统》论述飞行操纵与增强系统的设计与研制,在机械式飞行操纵系统的基础上着重介绍动力操纵系统、稳定与控制增强系统的设计技术,分析研究使用中出现的 key 技术问题及其解决方法。

《自动飞行控制系统》主要阐述飞机的姿态控制与轨迹控制、自动油门速度控制及与航空电子设备的交联,实现多功能自动飞行控制。

《电传飞行控制系统》主要阐述电传飞行控制系统的设计与应用。电传飞行控制系统是现代飞机先进性的标志之一,本册以电传/主动控制系统的科研实践为依据,阐述电传飞行控制系统的主要设计技术和工程开发规律;突出数字技术与余度技术的应用。

《飞行控制系统的地面与飞行试验》着重阐述各类地面与飞行试验的关键技术,包括试验计划的制订、测试设备的配置和试验数据的处理与分析。

《先进飞行控制系统》着重论述作为现代飞行控制技术发展基础的现代控制理论的发展与应用,重点分析了七种典型新系统的构成、应用及其关键技术。

《飞行控制系统的分系统》着重论述飞行控制系统的关键分系统,包括新型传感器分系统、计算机分系统、余度伺服作动器分系统及自动检测、显示分系统的研制与试验技术。

本书由直接从事飞行控制系统研制和开发的厂所专家和长期从事该领域科研教学的高校教授联合编著。整套丛书七个主题的配置,兼顾了研制实践经验的积累与高新技术的发展,它与一般的以基础理论为主的教科书有明显的区别。

本丛书内容丰富、新颖、实用、系统,体现我国飞行控制技术的实际水平,有明显的特色和应用价值。

本书的读者对象为广大的航空科技人员、教师、本专业本科生与研究生,以及相关部门(部队、基地等)的工程技术人员和管理人员;亦可作为飞行控制技术培训班、高研班的参考书。

本丛书的出版由国防科技图书出版基金资助,特再次表示致谢。对关心和支持本书编著出版的所有领导和同仁一并致以衷心的感谢。特别是韩宽庆、陈法善、孙瑞坤、蒋龙潭、李京生等同志,为本书的策划立项、编著出版和组织领导做出了贡献。张鸿元同志积极推荐此书,国防科技图书基金办崔士义同志鼎力支持,没有

他们的努力,此书是不可能出版发行的。尤其要提及的是,在编著过程中,冯亚昌等同志在日常工作中做了大量工作,付出了辛勤劳动。

编著这样一套丛书,技术难度很大,加之编著经验不足,多人并行工作,不当、不妥和风格不尽统一的问题在所难免,恳切希望广大读者指正。

《飞机飞行控制技术丛书》编委会

2001年7月13日于北京

飞机飞行控制技术丛书编委会成员名单

主任委员 郭锁凤 阎治孝

副主任委员 李 明 李沛琼 肖顺达 吴厚道 陈 今

金淑惠 李文俊 张聚恩 张新国

委 员 冯亚昌 谢文国 陈传德 高金源 施继增

申安玉 宋翔贵 张德发 刘 林 张 晶

李陆豫 郭恩友 王永熙 申学仁 李云保

叶胜利 申功璋 吴成富 崔士义 张鸿元

张林昌 梁东山 王 非 张汝麟 郭葆昌

王复华

各分册主/副编、主审人名单

分 册	主 编	副 主 编	主 审 人
飞机飞行品质	高金源	李陆豫 冯亚昌	李 明
飞机操纵与增强系统	施继增	王永熙 郭恩友	陈 今
自动飞行控制系统	申安玉	申学仁 李云保	王 非
电传飞行控制系统	宋翔贵	张新国	张汝麟
飞行控制系统的地面与飞行试验	张德发	叶胜利	李 明
先进飞行控制系统	郭锁凤	申功璋 吴成富	张明廉
飞行控制系统的分系统	刘 林	郭恩友	王永熙 谢克嘉

前 言

“先进飞行控制系统”是实用飞行控制系统的发展与延伸。我们主要选择了两种国际上较成熟、应用较多的现代飞行控制理论与方法:线性二次型最优控制理论和非线性动态逆控制方法,两种方法结合系统论述,更具有针对性。此外,还选择了8种新型系统:电传操纵系统最优二次型设计、综合火力/飞行控制系统、综合飞行/推进控制系统、飞行管理系统、自主式低空突防系统(地形跟随/地形回避系统)、舰载机自动着舰导引控制系统、大迎角超机动飞行控制系统和光传飞行控制系统。全书共分8章论述。

以上新理论(方法)与新系统均以航空预研或基金项目的研究内容为背景,体现我国飞行控制技术领域的自主发展的新成果。这些新技术在新一代飞机的发展中将起到重要作用。

当然新的飞行控制理论,新的飞行控制系统还有很多,如鲁棒控制、自适应控制、自修复重构控制、智能控制及系统等等。由于篇幅所限,系统本身尚欠成熟又缺乏实践基础,而只能割爱了。

本书内容新颖,包含了新一代飞机所需采用的多种新系统,不仅是国际新技术的论述,还着重反映了我国自主研究发展的成果。可作为工程技术人员和高校师生的重要教材和参考书。

本书坐标系均采用英美坐标系。

本书由南京航空航天大学郭锁凤教授任主编,并编写了第7章;由北京航空航天大学申功璋教授和西北工业大学吴成富副教授任副主编。本书第1章由北京航空航天大学高金源教授编写,第2章、第3章由北京航空航天大学申功璋教授编写,第4章由西北工业大学吴成富副教授编写,第5章由南京航空航天大学沈春林教授编写,第6章由南京航空航天大学杨一栋教授编写,第8章

由南京航空航天大学黄子安教授编写。

全书由北京航空航天大学张明廉教授进行了深入细致的审定,提出了许多重要的意见,并对全书框架和内容给予了充分的肯定和实事求是的评价。

由于作者的学识所限,书中缺点和不足在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见。

目 录

第 1 章 飞机电传操纵系统的最优二次型设计	1
1.1 现代控制方法在电传系统设计中的应用	1
1.2 最优二次型调节器设计方法	6
1.2.1 基本方法	6
1.2.2 模型跟踪最优二次型方法	7
1.2.3 计算机控制系统(采样系统)的 LQR 方法	10
1.3 数字电传系统 LQR 设计	12
1.3.1 纵向系统控制律设计	13
1.3.2 横侧向系统的最优控制律设计	23
1.4 频域加权最优二次型方法	26
1.4.1 频域加权法的基本原理	27
1.4.2 飞机纵向电传系统控制律设计举例	32
参考文献	42
第 2 章 综合飞行/火力控制系统	43
2.1 综合飞行/火力控制系统基本组成及特点	43
2.2 系统坐标系选择及定义	44
2.3 机载目标状态估计器设计	48
2.3.1 跟踪坐标系的选择	49
2.3.2 机动目标模型	49
2.3.3 估计器模型的建立与滤波	53
2.4 火力控制系统建模	66
2.4.1 空—空机炮模态	66
2.4.2 空—空导弹模态	72
2.4.3 空—地轰炸模态	76