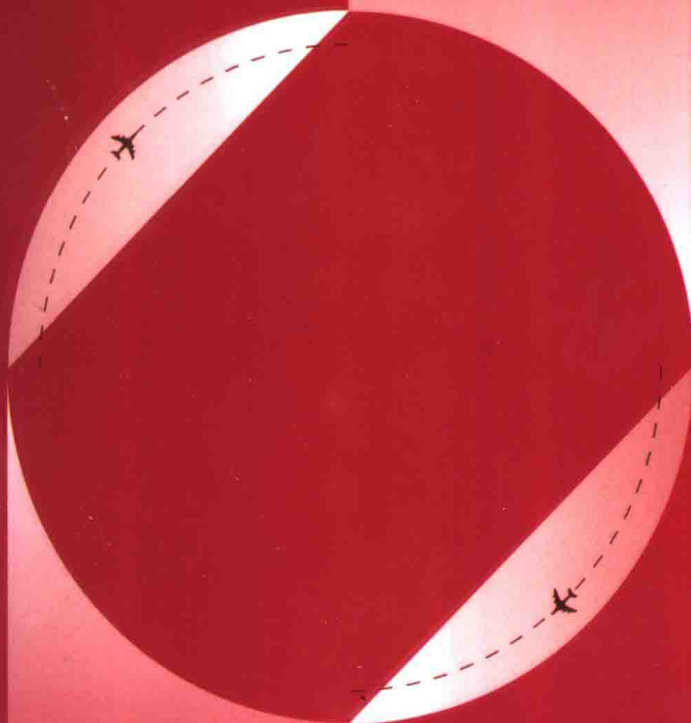


飞机飞行控制技术丛书

飞行操纵与增强系统

Mechanical Flight Control and Augmentation System

施继增 王永熙 郭恩友 等编著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

飞行操纵与增强系统/施继增等编著. —北京:国防工业出版社, 2003.1

(飞机飞行控制技术丛书)

ISBN 7-118-02896-7

I. 飞... II. 施... III. 飞机—飞行控制系统
IV. V249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047889 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经营

*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 262 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 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。

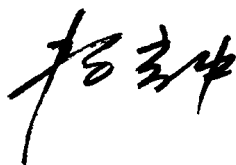
飞行控制系统是飞机的重要组成部分;飞行控制系统的水平对飞机的性能和安全性起着决定性的作用。对飞行控制系统的技术研究一直受到各航空发达国家的高度重视。我国航空界也卓有成效地开展了这一领域的研究,研制和生产了各种类型的飞行控制系统,满足了飞机研制的需要,并积累了丰富的经验。

《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 '张启中' (Zhang Qizhong), 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

飞行控制系统是飞机的重要功能系统,有人驾驶飞机的飞行控制系统分为人工飞行控制系统与自动飞行控制系统。人工飞行控制系统由电气、机械和液压部件组成,传输驾驶员控制指令或形成和传输驾驶员控制指令的增强指令,从而实现飞机的飞行控制功能,包括俯仰、滚转、偏航、法向、纵向、侧向及变几何形状等控制,还包括与它们有关的稳定与控制增强、性能限制及操纵装置。人工飞行控制系统又分为电传飞行控制系统和常规飞行控制系统。本书介绍常规飞行控制系统,包括机械操纵系统、动力操纵系统以及稳定与控制增强系统。

人工飞行控制系统是随着飞机性能的提高和用途的扩展而发展的。在飞机发展的前 50 年里都是采用机械操纵系统,驾驶杆(脚蹬)通过机械链系与操纵面相连,操纵面的偏角和气动载荷与操纵位移成比例,飞机的气动特性直接转换为操纵特性。为了改善操纵品质与减小日益增大的操纵力,进行了传动比设置机构开发与各种气动补偿措施等问题的研究。随着超声速飞机的出现,首先遇到的问题是操纵面气动铰链力矩急剧增加和变化,人力已无法操纵。为此从 20 世纪 40 年代末开始研制助力飞行操纵系统、动力飞行操纵系统以及为其提供操纵力模拟的人工感觉系统。另一方面由于超声速飞机采用薄翼型、大后掠机翼和大长细比机身构型,带来了气动特性的新特点,使之无法满足操纵品质的要求。为此研制了感受飞机运动响应变量的闭合控制回路,构成了阻尼器、稳定增强系统(SAS 或称增稳系统)与控制增强系统(CAS)。稳定增强系统与控制增强系统合称为稳定与控制增强系统(SACAS),简称增强系统。国内习惯称控制增强系统为控制增

稳系统。SACAS 虽不能单独构成飞行控制系统,但在提高飞机的操纵性能和改善操纵品质方面起着重要作用。由于动力飞行操纵系统和稳定与控制增强系统的采用,必须研究和解决由其带来的跟随性与稳定性、力反传与功率反传、控制模态的转换与兼容、故障及其瞬态、余度与可靠性以及驾驶员诱发振荡的新诱因等问题。

飞行控制技术的发展特点是继承性、连续性和适用性。一方面各种飞行控制系统有机结合,不同层次(性能、用途)的飞机采用相匹配的飞行控制系统。甚至在同一架飞机上各轴操纵采用不同的控制系统,例如 Su-27,纵向采用模拟式电传系统,横、航向采用常规系统。Миг-21 纵向采用动力操纵和阻尼器,横向采用动力操纵,航向采用机械操纵系统。另一方面飞行控制技术彼此融合、继承和过渡,机械操纵是动力操纵的重要组成部分,动力操纵为稳定与控制增强的采用提供了良好的基础。常规飞行控制系统的众多成熟技术和子系统还应用于电传飞行控制系统。虽然电传飞行控制系统是利用现代控制理论、机载计算机和余度技术研制的先进飞行控制系统,并以此为前提采用了各种类型的主动控制技术。但它仍以常规飞行控制系统为基础,如座舱操纵装置、人工感觉系统、液压伺服传动、操纵面组合控制、各类飞控传感器等,而且它又以全权限控制增强为基本工作模态。因此全面掌握常规飞行控制系统的结构组成、应用技术、研制程序和思路对于进行型号设计、课题研究以及开拓新的飞行控制领域都有着重大的意义。

本书是以我国的飞机研制为背景,在总结经验的基础上介绍常规飞行控制系统的设计与研究方法。包括简要技术要求、系统的结构选型、主要构件及回路的设计、可靠性与维修性设计等内容。在机械系统的基础上着重介绍了液压伺服作动系统、稳定与控制增强系统的设计,如构造、原理、部件功能、控制律设计、参数选择、特性分析、校正与补偿措施及有关判据、试验验证方法等。之后还对系统研制与使用中常出现的问题进行了分析,提供了解决措施,可供借鉴。本书内容简明扼要,突出实用性,反映了型号研制的成果和经验,紧密结合工程实际。

全书共分 10 章,第 1 章介绍简要技术要求,第 2 章和第 3 章介绍机械操纵系统,第 4 章、第 5 章、第 6 章介绍人工感觉和助(动)力操纵系统,第 7 章、第 8 章介绍稳定与控制增强系统,第 9 章介绍系统试验,第 10 章介绍系统常见问题及其处置。

本书由航空工业第六〇一研究所施继增研究员任主编,由第六一一研究所王永熙研究员和第六一八研究所郭恩友研究员任副主编。第 2 章、第 3 章、第 4 章由施继增编写,第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章由王永熙编写,第 7 章、第 8 章由郭恩友、李宝来研究员、宋翔贵研究员编写,第 10 章由王永熙、申安玉研究员、郭恩友编写。北京航空航天大学李沛琼教授和冯亚昌教授参加了全书结构的讨论,并分别参加了第 1 章和第 6 章的编写。第六〇一研究所李陆豫研究员和南昌飞机公司金文俊高级工程师分别对驾驶员诱发振荡问题和全书结构提供了咨询和有益的帮助,第六一一研究所陈今研究员对全书进行了审定,对本书的结构和内容提出了修改意见,并给予了充分的肯定和恰当的评价,在此一并表示感谢。

由于作者学识的局限,书中缺点和不足在所难免,恳切希望读者提出宝贵意见。

作 者

2001 年 10 月

目 录

第 1 章 飞行操纵与增强系统设计要求	1
1.1 飞行操纵系统设计一般要求	1
1.2 增强系统设计一般要求	4
1.3 系统强度与刚度设计要求	6
1.4 系统可靠性与维修性设计要求	7
1.4.1 系统可靠性设计	7
1.4.2 系统维修性设计	9
1.5 相关系统设计.....	10
1.6 使用规范应注意的问题.....	11
第 2 章 飞行操纵与增强系统方案选择	12
2.1 飞行控制系统的基本结构.....	12
2.2 控制指令传输类别的选择.....	13
2.3 动力操纵选用.....	15
2.3.1 人力操纵与动力操纵的选择.....	15
2.3.2 控制动力源的选择.....	17
2.4 人工感觉系统.....	18
2.5 增强系统与自动驾驶仪的选用.....	19
2.5.1 增强系统与自动驾驶仪的应用.....	19
2.5.2 电气回路与机械系统的交联.....	21
2.6 座舱内的控制与显示.....	24
2.6.1 座舱内的控制.....	24
2.6.2 座舱内的显示.....	28
2.7 传感器的应用与管理.....	30
2.8 飞行控制系统原理方案的选择与确定.....	31

第3章 机械操纵系统的研制	34
3.1 操纵线路的安排与设计	34
3.1.1 操纵线路的安排与分类	34
3.1.2 操纵线路的设计	35
3.2 操纵系统传动特性要求与设计	42
3.2.1 传动比与传动系数	42
3.2.2 特殊传动比要求	44
3.2.3 传动比的分配与计算	46
3.3 飞行操纵系统常用部件与轴承	48
3.3.1 常用部件及其布置	48
3.3.2 轴承	52
3.4 操纵机构	58
3.4.1 操纵机构的功用	58
3.4.2 操纵机构设计	60
3.4.3 机构的应用与组合	71
3.5 操纵系统的强度与刚度设计	76
3.5.1 强度与刚度的设计要求与任务	76
3.5.2 操纵系统设计载荷	77
3.5.3 系统的强度与刚度设计	79
3.6 操纵面的综合利用和组合控制	82
3.6.1 操纵面的功能及其组合利用	82
3.6.2 组合控制功能的交联与安全措施	85
3.6.3 操纵面的综合利用与组合控制应用实例	87
3.7 其他操纵系统设计	88
3.7.1 其他操纵系统的设计要求	88
3.7.2 襟翼操纵系统	89
第4章 操纵力及其配平	95
4.1 人工感觉系统	95
4.1.1 各类飞行操纵系统的操纵力	96
4.1.2 人工感觉系统的分类	98