

飞机飞行控制技术丛书

# 电传飞行控制系统

## Fly-by-Wire Flight Control System

宋翔贵 张新国 等编著



国防工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电传飞行控制系统 / 宋翔贵等编著. —北京: 国防工业出版社, 2003. 1

(飞机飞行控制技术丛书)

ISBN 7-118-02859-2

I. 电... II. 宋... III. 飞机—自动飞行控制—飞行控制系统—系统设计 IV. V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 032950 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)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 253 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: 24.00 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 镭

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。

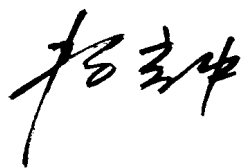
飞行控制系统是飞机的重要组成部分;飞行控制系统的水平对飞机的性能和安全性起着决定性的作用。对飞行控制系统的技术研究一直受到各航空发达国家的高度重视。我国航空界也卓有成效地开展了这一领域的研究,研制和生产了各种类型的飞行控制系统,满足了飞机研制的需要,并积累了丰富的经验。

《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 stylized handwritten signature in black ink, appearing to read '张仲' (Zhang Zhong).

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<br>谢克嘉 |

# 前 言

电传飞行控制系统在飞机上的使用和主动控制技术在飞机设计中的应用,为飞机性能的提高、飞行品质的改善、飞行员工作负荷的减轻、飞机安全可靠性的增强、机载分系统综合控制的实现等等,提供了技术手段和工程途径。电传飞行控制系统的装备,被看成是现代飞机先进性的标志之一;而主动控制技术的应用,更被认为是飞机设计技术发展中的一次飞跃。

为促进航空事业的发展和加速飞行控制水平的提高,早在 20 世纪 70 年代末,我国航空工业界即着手确立课题,组建技术队伍。并在随后的 4 个五年计划期间,开展了主动控制技术的研究与电传飞行控制系统的研制工作。经过理论与工程实践两方面的努力,解决并掌握了诸如:数字控制技术;余度技术;采用主动控制技术的全时间工作、全权限控制、多模态控制律设计技术;可靠性设计技术;多余度系统的综合与试验验证技术;以及飞行验证与试飞保障等先进技术。与此同时,为上天飞行验证而研制的模拟式与数字式两种形式的电传飞行控制系统,也分阶段先后在不同的主动控制技术验证飞机上,完成了百余个起落的飞行验证计划。

本书的编撰,是根据作者在飞控领域内数十年的科研工程实践,特别是参与电传飞行控制系统的设计、制造、试验和试飞中的切身经历,所做的总结、浓缩和提炼。其中包含有益的经验、深刻的教训、常用的设计方法、行之有效的设计技巧,以及对设计工作规律的探索和归纳。作者期望本书能为读者了解此项高新技术与实施先进飞控系统的研制提供专业背景资料。

本书章节及其层次安排如次:第 1 章通过对飞机操纵(控制)

系统发展历史及其演变的回顾,强调电传飞控系统在飞机飞行控制技术进展中所占据的里程碑意义。随后的7章,则分别讨论电传飞行控制系统研制的主要工程环节及相应的设计技术,包括:系统总体布局设计;控制律设计;系统余度配置与管理策略设计;分系统顶层设计;软件工程化设计与开发;系统与硬件、软件可靠性设计;以及系统台架综合与试验验证。

各章节对电传飞控系统设计技术的论述,包括设计工作内容、设计准则、设计方法的介绍以及电传控制技术研究 and 系统研制工程实践中的实例分析与评介。由于这些内容反映了国内外本专业科技研究的最新进展,所以颇具实用性和参考价值。这也正是作者撰写本书的宗旨和深感欣慰之处。

本书由宋翔贵主编、张新国副主编。其中,第1章、第2章由宋翔贵、张新国撰写;第3章由李宝来、郭恩友撰写;第4章由宋翔贵撰写;第5章由宋翔贵、张德发撰写;第6章由张永孝撰写;第7章由姚一平、李沛琼、王少萍、宋翔贵撰写;第8章由宋翔贵、王永撰写。

作者感谢为本书的出版给予关心、支持和帮助的人们。特别需要提及的是:对书稿作了审阅并给出建设性指正的主审张汝麟研究员;评阅初稿的金淑惠研究员;为本书的编著从事创造性科研实践并贡献宝贵设计经验的刘林、马良甫、杨增明、胡长胜研究员,杨锦清、王敏文、朱雪耀高级工程师等课题组的同事们;以及作了大量图文处理工作的许敏、解庄工程师。

宋翔贵 张新国

2001年7月19日

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第 1 章 飞机飞行控制与电传飞行控制系统</b> | 1  |
| 1.1 有人驾驶飞机飞行控制技术与飞行控制系统的发展   | 2  |
| 1.1.1 飞行控制技术与飞机飞行            | 2  |
| 1.1.2 飞行控制技术的发展              | 3  |
| 1.1.3 飞行控制系统的演变              | 5  |
| 1.2 主动控制技术与飞机设计              | 7  |
| 1.2.1 传统的飞机设计技术及其发展          | 7  |
| 1.2.2 主动控制技术及其应用             | 8  |
| 1.3 电传飞行控制系统                 | 9  |
| <b>第 2 章 飞行控制系统的总体设计技术</b>   | 15 |
| 2.1 系统设计与综合验证                | 15 |
| 2.2 系统功能设计                   | 18 |
| 2.3 系统构型设计                   | 19 |
| 2.3.1 系统控制方式的确定              | 20 |
| 2.3.2 系统布局设计考虑               | 21 |
| 2.3.3 备份与备份形式的确定             | 25 |
| 2.4 数字式飞行控制系统设计特征分析          | 26 |
| 2.4.1 数字式控制系统设计特点            | 26 |
| 2.4.2 数字飞行控制系统设计硬件/软件功能分配    | 28 |
| 2.5 飞行控制系统软件设计要求             | 29 |
| 2.5.1 飞行控制系统软件工程化设计与开发       | 29 |
| 2.5.2 软件设计要点                 | 31 |
| 2.6 人一机接口设计                  | 35 |
| 2.7 系统的连接及接口控制文件编制           | 36 |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 2.7.1      | 系统级接口控制文件的种类           | 36         |
| 2.7.2      | 系统线路图                  | 37         |
| 2.7.3      | 系统接线表                  | 38         |
| <b>第3章</b> | <b>系统控制律设计技术</b>       | <b>40</b>  |
| 3.1        | 控制律控制功能、工作模态的确定及其转换    | 41         |
| 3.1.1      | 电传飞行控制系统控制律模态          | 41         |
| 3.1.2      | 电传系统控制律设计              | 44         |
| 3.1.3      | 模态转换                   | 72         |
| 3.1.4      | 应急备份控制律设计              | 75         |
| 3.2        | 控制律设计技术                | 79         |
| 3.2.1      | 控制律设计方法与开发阶段           | 81         |
| 3.2.2      | 使用的数学模型                | 88         |
| 3.2.3      | 多模态控制律的基本回路设计          | 93         |
| 3.2.4      | 多模态控制律的各种功能单元设计        | 96         |
| 3.3        | 控制律设计实例                | 99         |
| 3.3.1      | 某模拟式电传系统控制律            | 99         |
| 3.3.2      | 某数字电传飞行控制系统多模态控制律      | 102        |
| 3.3.3      | 演示验证飞行与系统控制律设计仿真的相关性分析 | 107        |
| <b>第4章</b> | <b>系统余度配置及余度管理设计技术</b> | <b>125</b> |
| 4.1        | 系统余度配置设计               | 125        |
| 4.1.1      | 飞行控制系统的余度布局            | 126        |
| 4.1.2      | 余度形式的选择                | 130        |
| 4.2        | 余度管理策略设计               | 131        |
| 4.2.1      | 余度管理功能                 | 132        |
| 4.2.2      | 监控面的选定                 | 136        |
| 4.2.3      | 信号增强方式的确定              | 136        |
| 4.2.4      | 信号表决准则                 | 137        |
| 4.2.5      | 信号监控策略                 | 141        |
| 4.2.6      | 故障隔离方式                 | 152        |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 4.2.7 信号均衡 .....                   | 153        |
| 4.2.8 故障综合与故障申报 .....              | 154        |
| 4.2.9 故障恢复 .....                   | 155        |
| 4.2.10 系统重构与功能重构 .....             | 155        |
| <b>第5章 飞行控制系统的分系统顶层设计技术 .....</b>  | <b>157</b> |
| 5.1 分系统及部件设计的工程考虑 .....            | 157        |
| 5.2 飞行控制计算机分系统的基本设计考虑 .....        | 159        |
| 5.2.1 分系统总体设计 .....                | 159        |
| 5.2.2 接口设计 .....                   | 163        |
| 5.2.3 余度计算机之间的协调运行技术 .....         | 164        |
| 5.2.4 计算机软件设计考虑 .....              | 166        |
| 5.2.5 飞行控制计算机分系统的综合与验证 .....       | 168        |
| 5.3 伺服作动分系统的基本设计考虑 .....           | 173        |
| 5.3.1 伺服作动分系统的基本技术特征 .....         | 173        |
| 5.3.2 伺服作动系统的余度设计 .....            | 177        |
| 5.3.3 伺服作动分系统综合与验证 .....           | 181        |
| 5.4 传感器分系统的基本设计考虑 .....            | 184        |
| 5.4.1 传感器分类 .....                  | 184        |
| 5.4.2 传感器选型 .....                  | 185        |
| 5.4.3 传感器分系统综合 .....               | 190        |
| 5.5 控制—显示分系统设计考虑 .....             | 191        |
| 5.5.1 控制—显示分系统的设计特点 .....          | 191        |
| 5.5.2 控制—显示分系统构成 .....             | 192        |
| 5.5.3 控制—显示分系统的工程实现 .....          | 193        |
| 5.6 机内自检测(BIT)分系统设计考虑 .....        | 196        |
| 5.6.1 BIT定义及其基本技术要求 .....          | 196        |
| 5.6.2 BIT的实现及硬件配置 .....            | 199        |
| 5.6.3 BIT软件功能与构成 .....             | 205        |
| <b>第6章 电传飞行控制系统软件工程化设计技术 .....</b> | <b>207</b> |
| 6.1 飞行控制系统软件及软件设计 .....            | 207        |