国家科学技术学术著作出版基金
NFAPST

现代飞行控制系统的评估与确认方法

Advanced Verification and Clearance Techniques for Modern Flight Control Systems

刘 林◎著

國防工業出版社
National Defense Industry Press

国家科技图书出版基金

现代飞行控制系统的评估与确认方法

Advanced Verification and Clearance Techniques for Modern Flight Control Systems

中国科学技术大学
图书馆藏

刘 林 著

国防工業出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

现代飞行控制系统的评估与确认方法 / 刘林著.
—北京:国防工业出版社,2010.11
ISBN 978-7-118-06612-8

Ⅰ.①现... Ⅱ.①刘... Ⅲ.①飞行控制系统-技术评估②飞行控制系统-可靠性验证 Ⅳ.①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 200332 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 100048)
天利华印刷装订有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 850×1168　1/32　印张 7⅜　字数 181 千字
2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷　印数 1—2500 册　定价 36.00 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

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

前　言

自然界中广泛存在着不确定性。不确定性带来的突发性、破坏性影响也越来越大。例如在金融领域中流行的“黑天鹅”效应、索罗斯的“反射理论”以及地震等各种自然灾害等。同样作为复杂的系统，飞行控制系统设计中也存在各种不确定性，这些不确定性可能引起飞行事故。本书的主要内容聚焦于如何利用先进的评估与确认方法，去面对飞行控制系统以及飞行控制律设计中不确定性带来的挑战。

现代飞行控制系统是飞机的飞行关键系统，其性能直接影响飞机的飞行品质和飞机的性能，直接关系到飞机的飞行安全。同时现代飞行控制系统十分复杂，其研制过程是一个庞大的系统工程。因此需要对其进行缜密严格、详尽认真的评估与确认，确保系统实现的正确性、安全性。所以迫切需要研究先进的验证与确认技术和方法，以提高系统开发的效率和可靠性。

同时，随着飞机对象的复杂程度和控制要求的不断提高，飞行控制律的设计日趋复杂，呈现出多模态、多约束、多准则、高风险的特征。未来非常倾向于采用多变量控制技术来设计新型飞机的飞行控制律。这与20多年前几乎所有的飞行控制律都采用传统控制技术设计相比，已发生了很大的变化。现代飞行控制系统具有两个显著的特点：①属于强非线性多输入多输出复杂系统；②飞机及其控制系统建模中广泛存在不确定性，这些不确定性涉及气动参数、飞机构型变化、硬件变化及大气数据测量偏差

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

等多个方面。上述特点给控制工程师们带来了真正的挑战，主要体现在设计和确认两个方面：一方面要采用新的设计方法针对飞机不同的构型、任务、飞行状态点、故障情况、可视条件等情况设计出符合多准则的满意的飞行控制律；另一方面要采用有效的分析方法证明这些操稳品质在气动参数、飞机构型变化、传感器和舵机动态等变化条件下（即存在不确定性时）具有相当的鲁棒性。相对而言，理论界和工程界的研究重点在于开发和使用各种新的设计方法，对于系统评估与确认领域的研究则缺少足够的重视。尤其在飞行控制律的研究中，绝大多数研究集中在设计领域，如各种新的多变量设计方法，但针对控制律进行系统性评估与确认的研究很少，但它又是保证飞行安全、取得放飞许可的关键依据。本书正是针对这一问题进行了深入的研究。

本书是作者近年来在飞行控制系统，主要是飞行控制律评估与确认领域所进行的相关研究和工程实践总结，其中大部分内容是首次入编成书。全书共六章，第一章介绍了先进飞行控制技术的发展，由此引出飞行控制系统验证与确认的概念、发展和面临的挑战，以及飞行控制律评估与确认的相关问题；第二章从工程实践的角度对飞行控制系统验证与确认进行了详细系统的描述；第三章到第五章是本书最主要的部分，主要讨论现代飞行控制律评估与确认中的各种先进技术及其应用；第六章总结了飞行控制律的开发方法、流程和最佳实践。

本书中的研究内容得到了中国航空科学基金的大力资助。在本书的编写过程中，得到了西北工业大学王新民教授的热情支持，中国航空工业飞行自动控制研究所张汝麟研究员对书稿进行了仔细审阅，提出了许多宝贵意见和建议，特在此一并向他们表示衷心的感谢！另外，还得到了飞行自动控制研究所相关课题组同事们的大力协助，他们是车军、唐强、张翔伦等，特此致谢！感

谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助，也感谢国防工业出版社诸位在本书出版中所付出的辛勤劳动！

由于时间仓促，本书难免存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

刘 林

2010 年 9 月

目　录

第一章　绪论 …… 1
1.1　飞行控制系统的发展 …… 2
1.2　飞行控制系统的验证与确认 …… 11
1.2.1　基本概念 …… 11
1.2.2　验证与确认的基本特点 …… 14
1.2.3　验证与确认的发展历程 …… 16
1.2.4　验证与确认的现状与挑战 …… 17
1.3　飞行控制律评估与确认 …… 23
1.3.1　传统的评估与确认 …… 24
1.3.2　评估与确认的先进方法与意义 …… 24
第二章　飞行控制系统的验证与确认 …… 29
2.1　验证与确认的内容 …… 29
2.1.1　飞行控制系统级验证和确认 …… 29
2.1.2　软件及控制律的验证与确认 …… 32
2.2　验证与确认的新特征 …… 35
2.3　验证与确认的评价和管理 …… 36
2.3.1　验证与确认的评价准则 …… 36
2.3.2　验证与确认的技术管理 …… 37
2.4　工程实例 …… 38
2.4.1　波音 777 …… 39
2.4.2　F－18 大迎角验证机 …… 44
2.4.3　国产某型先进战斗机 …… 48
第三章　飞行控制律的评估与确认 …… 52

3.1 飞行控制律开发简介 …… 52
3.2 评估与确认过程 …… 55
3.2.1 研究模型的建立 …… 55
3.2.2 基于现代控制理论的控制律设计 …… 56
3.2.3 选用准则 …… 56
3.2.4 评估与确认环境建立 …… 57
3.2.5 分析与评估结论的生成 …… 58
3.3 飞机不确定参数模型的建立 …… 59
3.3.1 惯性因素引起的不确定性 …… 60
3.3.2 气动不确定性 …… 64
3.3.3 硬件变化引起的不确定性 …… 67
3.3.4 大气数据系统的测量误差 …… 67
3.3.5 飞行包线选择 …… 68
3.4 评估准则的选取 …… 69
3.4.1 不稳定特征值准则 …… 70
3.4.2 线性稳定储备准则 …… 71
3.4.3 平均相位速率准则与绝对幅值准则 …… 72
3.4.4 迎角/过载响应限制准则 …… 74
第四章 控制律评估与确认中的先进方法 …… 76
4.1 基于结构奇异值分析的评估与确认 …… 76
4.1.1 结构奇异值分析 …… 76
4.1.2 基于 μ 分析的评估与确认 …… 82
4.1.3 评估与确认示例 …… 93
4.2 基于多项式的控制律评估与确认 …… 100
4.2.1 多项式基本理论 …… 100
4.2.2 鲁棒 D 域稳定问题及区域划分 …… 105
4.2.3 基于多项式方法的评估与确认 …… 111
4.2.4 评估与确认示例 …… 114
4.3 基于 ν-gap 的评估与确认 …… 123
4.3.1 ν-gap 度量 …… 123

4.3.2 ν-gap 度量及摄动模型的近似表达 …… 127
4.3.3 基于 ν-gap 方法的评估与确认 …… 131
4.3.4 评估与确认示例 …… 133
第五章 优化算法在控制律评估与确认中的应用 …… 137
5.1 概述 …… 137
5.1.1 传统的网格方法 …… 137
5.1.2 基于优化算法的方法 …… 139
5.2 用于评估与确认的优化算法 …… 142
5.2.1 序列二次规划法 …… 143
5.2.2 模式搜索法 …… 146
5.2.3 遗传算法 …… 147
5.2.4 粒子群优化算法 …… 151
5.2.5 差分进化算法 …… 154
5.2.6 三种进化算法的比较 …… 156
5.3 评估与确认——线性分析部分 …… 157
5.3.1 适应度函数的设计 …… 158
5.3.2 典型飞行状态点的评估与分析 …… 160
5.3.3 飞行包线范围内的评估与分析 …… 172
5.4 评估与确认——非线性分析部分 …… 175
5.4.1 迎角/过载响应限制准则应用 …… 177
5.4.2 评估与确认结果及分析 …… 178
5.5 基于优化的评估确认特点分析 …… 182
第六章 飞行控制律的开发流程及最佳实践 …… 184
6.1 控制律设计与评估流程 …… 184
6.2 飞行控制律开发过程模型 …… 187
6.3 最佳实践知识库 …… 198
6.4 控制律设计与评估的环境 …… 205
6.5 本书小结 …… 211
参考文献 …… 213

Contents

Chapter 1 Introduction ····· 1
1.1 Evolution of Flight Control System ····· 2
1.2 Validation and Verification of Flight Control System ····· 11
1.2.1 Basic Concepts ····· 11
1.2.2 Characteristics of Validation and Verification ··· 14
1.2.3 Evolution of Validation and Verification ····· 16
1.2.4 State of The Art and Challenages of Validation and Verification ····· 17
1.3 Clearance of Flight Control Laws ····· 23
1.3.1 Trditional Clearance Methods ····· 24
1.3.2 Advaced Clearance Methods ····· 24
Chapter 2 Validation and Verification of Flight Control System ····· 29
2.1 Contents of Validation and Verification ····· 29
2.1.1 Validation and Verification of Flight Control System ····· 29
2.1.2 Validation and Verification of Software and Flight Control Law ····· 32
2.2 New Characters for Validation and Verificaiton ····· 35
2.3 Evaluation and Management of Validation and Verification ····· 36

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

2.3.1 Guide Lines to Evalute Validation and Verificaiton Process ····· 36
2.3.2 Technique Management of Validation and Verificaiton ····· 37
2.4 Engineering examples of flight Control system Validation and verification ····· 38
2.4.1 Boeing777 ····· 39
2.4.2 F-18 High Alpha Research Vehicle ····· 44
2.4.3 An Domestic Advanced Fighter ····· 48
Chapter 3 Clearance of Flight Control Laws ····· 52
3.1 Introduction to Flight Control Law Development Process ····· 52
3.2 Clearance Process ····· 55
3.2.1 Establishment of Research Model ····· 55
3.2.2 Flight Control Law Design Based on Modern Control Theory ····· 56
3.2.3 Selected Criteria ····· 56
3.2.4 Establishment of Clearance Environment ····· 57
3.2.5 Generation of Analysis and Evaluation Results ··· 58
3.3 Uncertain Model of Aircraft ····· 59
3.3.1 Inertia Parameters Uncertainty ····· 60
3.3.2 Aerodynamic Parameters Uncertainty ····· 64
3.3.3 Uncertainty Caused by Hardware Change ····· 67
3.3.4 Measure Error in Air Data Systems ····· 67
3.3.5 Flight Envelop Selection ····· 68
3.4 Clearance Criteria Selection ····· 69
3.4.1 Unstable Eigenvalue Criterion ····· 70
3.4.2 Stability Margin Criterion ····· 71
3.4.3 Average Phase Rate and Absolute Amplitude Criterion ····· 72

3.4.4 Nonlinear AOA/Ny-Limit Exceedance Criterion ····· 74

Chapter 4 Advanced Techniques Applied in Clearance ··· 76

4.1 Clearance Based on μ-Analysis Method ····· 76

4.1.1 μ-analysis ····· 76

4.1.2 Clearance Based on μ-Analysis ····· 82

4.1.3 Examples ····· 93

4.2 Clearance Based on Polynomial-Based Method ····· 100

4.2.1 Theories in Polynomial-Based Method ····· 100

4.2.2 Robust D-domian Problem and Partition ····· 105

4.2.3 Clearance Based on Polynomial-Based Method ····· 111

4.2.4 Examples ····· 114

4.3 Clearance Based on ν-gap Method ····· 123

4.3.1 ν-gap Measurement ····· 123

4.3.2 Approximate Expression of Perturbated Model ····· 127

4.3.3 Clearance Based on ν-gap Method ····· 131

4.3.4 Examples ····· 133

Chapter 5 Optimizaiton Based Clearance techniques ··· 137

5.1 Introduction ····· 137

5.1.1 Traditional Grid Based Methods ····· 137

5.1.2 Optimization Algorithms Based Methods ····· 139

5.2 Optimization Algorithms Applied in Clearance ····· 142

5.2.1 Sequential Quadratic Programming ····· 143

5.2.2 Pattern Search Method ····· 146

5.2.3 Genetic Algorithm ····· 147

5.2.4 Particle Swarm Optimization Algorithm ····· 151

5.2.5 Differential Evolution ····· 154
5.2.6 Comparison Between Three Evolution Algorithms ····· 156
5.3 Clearance for Linear Analysis Criteria ····· 157
5.3.1 Fitness Function Design ····· 158
5.3.2 Typical Flight State Clearance and Analysis ··· 160
5.3.3 Clearance and Analysis in Flight Envelop ····· 172
5.4 Clearance for Nonlinear Criteria ····· 175
5.4.1 Nonlinear AOA/Ny-Limit Exceedance Criterion ····· 177
5.4.2 Clearance Result and Its Analysis ····· 178
5.5 Characteristic on Optimization Based Clearance Method ····· 182
Chapter 6 Flight Control Law's Develop Process and Best Practice ····· 184
6.1 Design and Evaluation Process for Flight Control Law ····· 184
6.2 Flight Control Law's Developing Process Mode ····· 187
6.3 Knowledge Database for the Best Practice ····· 198
6.4 Flight Control Law's Design and Evaluation Environment ····· 205
6.5 Summary ····· 211
References ····· 213

第一章　绪　论

一直以来，飞行控制系统开发主要面临解决两个问题：①如何系统地为飞行器设计满意的控制规律；②如何实现期望的系统功能并使其可靠地运行。第一个问题的答案来自建模仿真技术和控制理论的发展。通过对飞机的建模，目前绝大多数现役的飞行控制系统是基于经典控制理论设计的；同时现代多变量控制理论目前也逐步得到充分的关注并有所应用，未来将成为先进飞行控制系统性能保障的关键技术。数字计算机、先进作动器、传感器和余度技术的发展则为上述第二个问题给出了解决方案，通过这些技术，现代飞行控制系统不仅能够获得过去难以想象的功能和性能，其可靠性也得到了充分的保障。

随着技术上和管理上各种新思想、新技术、新工具的成功应用，飞行控制系统变得越来越先进，同时系统的开发成本得到了有效的控制，开发效率也成倍地增长。尽管如此，飞行控制系统的开发仍是一个巨大而又复杂的系统工程，需要耗费大量的人力、时间和资金，一套飞行控制系统的工程化开发可能需要数年的时间和数千万的经费才能完成。值得注意的是，在这一过程中，几乎近一半左右的资金和工作量都集中在系统的验证与确认（System Verification and Validation）上，并贯穿整个开发过程。因为最终系统设计和实现的正确性和有效性只能依赖有效的验证和确认。同时系统的验证与确认又是一个非常复杂的过程，没有任何一种设计或者试验工具能够单独用来解决这一问题，需要综合所有可以利用的一系列相关工具和技术来进行系统的验证和确认，以将设计和实现的错误减少到最小。过去这方面的研究并

未得到足够的重视，但是随着飞行控制系统的发展，特别是20世纪90年代后，飞行控制系统开始向综合化、智能化方向发展，各种跨学科和不同应用领域的问题在设计和开发过程中开始变得集中，且其在整个飞机系统中所起的作用越来越关键，开发中所有的环节无一不需要经过缜密而严格的验证与确认，这给飞行控制系统的开发带来了新的挑战。

本章主要提供飞行控制系统验证与确认技术的相关背景和概览。首先对飞行控制系统的发展以及先进飞行控制技术和特点进行简要的介绍，然后在此基础上介绍飞行控制系统验证与确认的相关概念和工程应用背景，由此引出该领域的研究发展、存在的问题和挑战，并过渡到本书重点讨论的飞行控制律评估与确认的相关话题。

1.1 飞行控制系统的发展

飞行控制的研究是一个古老而又活跃的技术领域。早在1891年发明家Hiram Maxim就提出了用伺服机构反馈进行飞行器纵向控制的方法（先于莱特兄弟的Flyer，1903）。在1912年Elmer Sperry父子设计出了用机械电子控制的多轴用电动陀螺稳定器，是后来自动驾驶仪的雏形。

在过去的一个世纪里，飞行控制技术经历了增稳、控制增稳、自动飞行控制、全权限电传控制、综合控制等发展阶段。特别值得注意的是，自从20世纪下半叶电传飞行控制（FBW）和主动控制技术（ACT）这两个具有划时代意义的飞行控制概念出现以来，飞机的发展历程出现了巨大的变化，体现在：

（1）改变了传统的飞机设计概念和方法论，飞行控制技术首次与气动、结构和动力装置一起成为保证先进飞机平台性能的四大技术支柱。

（2）改变了自莱特兄弟首次飞行以来一直采用以机械操纵

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com