

DESIGN OF
ROBUST FLIGHT
CONTROL SYSTEM

鲁棒飞行 控制系统设计

章卫国 李爱军 刘小雄 李广文 编著



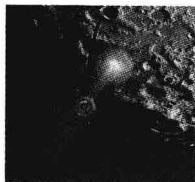
国防工业出版社
National Defense Industry Press

鲁棒飞行控制系统设计

Design of Robust Flight Control System

李爱军 李广文
章卫国 刘小雄
编著

国防工业出版社



图书在版编目(CIP)数据

鲁棒飞行控制系统设计 / 章卫国等编著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 07479 - 6

I. ①鲁... II. ①章... III. ①鲁棒控制 - 飞行
控制系统 - 系统设计 IV. ①V249. 122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 169367 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 7/8 字数 266 千字
2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

无论是自然界还是人类社会,不确定性是一个普遍存在的因素,在实际的控制系统中,由于各种原因必然总是存在着不确定性。这种不确定性通常分为两类:一是外部的不确定性,如干扰等;二是系统内部的不确定性,如测量误差、参数估计误差及被控对象的未建模动态等。

鲁棒控制在设计过程中考虑了数学模型所具有的不确定性,假设模型频率特性与实际被控对象的频率特性,或者模型参数与实际对象的参数具有一定范围内的偏差,然后用解析的手段设计控制器,使系统对这一误差范围内的所有被控对象均能满足理想的性能要求。

控制系统的鲁棒性是指系统存在不确定性时,系统还能保持其应有的性能的一种属性。若系统具有不确定性时能保持稳定性,则称为鲁棒稳定性。如果除了鲁棒稳定外,还能保持一定的性能指标,则称为鲁棒性能。系统中的不确定性(如模型误差)对控制系统的性能(包括稳定性)具有很大的影响,甚至会使系统变得不稳定。因此,在控制系统设计过程中,必须充分考虑不确定性的影响,

研究控制系统的鲁棒性和鲁棒控制问题。

飞机飞行控制系统的设计一般都是基于其名义(标称)模型设计的,而实际飞机这一复杂被控对象与名义模型间存在着各种模型不确定性。对飞机来说,系统主要的不确定性和外界干扰有以下几方面:

(1) 飞行控制系统是基于飞机运动的标称数学模型(也称为名义模型)设计的,但该数学模型是通过对飞机这一非线性时变模型进行一系列的简化假设和线性化处理得到的,因此标称数学模型与对应状态点的飞机实际模型间存在未建模动态特性不确定性。

(2) 飞机在飞行中由于动力系数、飞机重量、飞行高度、速度以及载荷位置等的不断变化,都将对飞机的运动特性和动态模型参数产生很大的影响,甚至可能改变飞机的动态模型结构,因此在进行飞行控制系统的设计中必须要考虑这些飞机模型参数的变化和结构不确定性。

(3) 对飞机而言,不确定性和外界干扰还包括:风洞实验误差带来的空气动力系数的不确定性;时延、忽略传感器和执行机构动态特性可能引起的未建模动态不确定性;大气扰动(如水平风、垂直风、大气紊流等)对飞机运动的干扰以及传感器噪声等。

随着科学技术的飞速发展,对飞机的性能要求越来越高。无论对于战斗机还是大型民机,都希望在动态性能不明确的情况下,能保证它具有良好的运动性能。更进一步地说,飞机通常要求在开环临界稳定点附近工作,但由于

实际飞行控制系统必然存在着各种不确定性,所以设计控制器,使整个飞机系统不但具有鲁棒稳定性,而且具有性能鲁棒性,有着重要的实际意义。

本书是作者多年来在研究生教学和科研工作的基础上不断积累总结而成。系统地介绍了当前比较流行的三种鲁棒控制设计方法: H_∞ 控制方法、 H_2/H_∞ 混合控制方法与 μ 综合控制方法。在介绍三种主要的鲁棒控制设计方法的基础上,通过飞行控制系统的设计实例及仿真,详细说明了三种鲁棒飞行控制系统的设计过程。

本书共分 5 章。第 1 章 鲁棒控制理论概述,主要介绍鲁棒控制理论中的主要方法和鲁棒控制的应用及鲁棒飞行控制研究现状;第 2 章 鲁棒控制基础,主要介绍鲁棒控制理论的相关数学知识、不确定性的描述、不确定系统频域模型、鲁棒稳定性的频域判定等内容;第 3 章 H_∞ 飞行控制系统设计,主要包括 H_∞ 标准设计问题、 H_∞ 混合灵敏度控制思想与控制方法及其加权函数的选择方法、 H_∞ 纵向飞行控制系统的设计与仿真、 H_∞ 侧向飞行控制系统的设计与仿真等内容;第 4 章 H_2/H_∞ 飞行控制系统设计,主要包括 H_2/H_∞ 混合控制问题的提出、 H_2 标准控制问题、基于 LMI 的 H_2/H_∞ 控制、基于 LMI 的 H_2/H_∞ 鲁棒飞行控制系统设计与仿真、含参数摄动的飞控系统设计与仿真等内容;第 5 章 μ 综合飞行控制系统设计,主要包括结构奇异值 μ 的定义、鲁棒稳定性和鲁棒性能分析、 μ 综合设计方法及其步骤、纵向和侧向 μ 综合鲁棒飞行控制系统的设计

计与仿真、非脆弱 μ 综合飞行控制系统的设计与仿真等内容。

本书不仅注重鲁棒控制理论的介绍和总结,同时更注重鲁棒控制方法在飞行控制系统设计中的应用,将先进控制理论与工程实际问题紧密结合在一起。本书可供航空航天领域中从事控制理论研究与应用、飞行控制系统设计与研究的科研人员、工程技术人员使用,也可作为高等院校博士研究生、硕士研究生和高年级本科生的教学参考书。

本书的出版得到国防工业出版社的大力支持,作者在此表示衷心地感谢。感谢所引用参考文献的作者们,他们的出色工作为本书增添了丰富的内容。

本书由章卫国教授、李爱军教授、刘小雄副教授、李广文副教授共同编著。章萌博士为本书的编写做了大量程序编写、仿真和图文处理、校对等工作,徐丽娜、袁刚、张鑫、桂敬玲等研究生也做了一些图文处理和校对工作,在此表示感谢。

由于编者经验和水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者能给予批评指正。

编者

2011年5月

于西北工业大学

目 录

第 1 章	鲁棒控制理论概述	001
1.1	鲁棒控制理论中的主要方法	005
1.1.1	Kharitonov 区间理论	005
1.1.2	H_∞ 鲁棒控制方法	007
1.1.3	H_2/H_∞ 鲁棒控制方法	012
1.1.4	结构奇异值 μ 方法	021
1.1.5	鲁棒控制的求解方法	022
1.2	鲁棒控制的应用及鲁棒飞行控制研究现状	023
第 2 章	鲁棒控制基础	031
2.1	数学预备知识	032
2.1.1	空间与范数	032
2.1.2	矩阵奇异值	041
2.1.3	函数的范数	042
2.1.4	Riccati 方程	045
2.1.5	线性分式变换	046
		XI

2.1.6	线性矩阵不等式	049
2.2	不确定性的描述	054
2.2.1	可参数化不确定模型	054
2.2.2	非参数化不确定性	055
2.3	线性不确定系统的频域模型	058
2.3.1	不确定系统模型的类型	058
2.3.2	摄动函数建模	059
2.4	鲁棒稳定性的频域判据	061
2.4.1	Nyquist 判据	061
2.4.2	小增益定理: Nyquist 频域判据 的推广	065
第 3 章	H_∞ 飞行控制系统设计	069
3.1	H_∞ 标准设计问题	070
3.2	H_∞ 混合灵敏度控制问题	072
3.2.1	混合灵敏度控制思想	072
3.2.2	H_∞ 混合灵敏度控制方法	075
3.3	加权函数的选取	078
3.4	纵向飞行控制系统设计与仿真	080
3.4.1	单状态点设计与仿真	081
3.4.2	多状态点设计与仿真	087
3.5	侧向飞行控制系统设计与仿真	097

第 4 章	H_2/H_∞ 飞行控制系统设计	105
4.1	问题的提出	106
4.2	H_2 标准控制	112
4.2.1	H_2 性能	112
4.2.2	H_2 标准控制问题	116
4.3	基于 LMI 的 H_2/H_∞ 控制	118
4.3.1	基于 LMI 的 H_∞ 控制	118
4.3.2	基于 LMI 的 H_2 控制	120
4.3.3	基于 LMI 的 H_2/H_∞ 控制	121
4.3.4	求解算法	122
4.4	飞控系统设计与仿真	124
4.5	含参数摄动的飞控系统设计与仿真	130
4.5.1	模型的建立及求解算法	130
4.5.2	飞控系统设计与仿真	132
第 5 章	μ 综合飞行控制系统设计	137
5.1	结构奇异值	138
5.1.1	结构奇异值 μ 定义	138
5.1.2	μ 的边界	140
5.1.3	实数与复数值结构的比较	143
5.1.4	恒定但未知结构与随机时间 变化结构的比较	143
5.2	鲁棒稳定性和鲁棒性能	144
5.2.1	鲁棒稳定性分析	144

5.2.2	鲁棒性能	145
5.3	μ 综合设计方法	149
5.3.1	μ 综合步骤	149
5.3.2	内部连接结构	150
5.3.3	闭环响应	175
5.3.4	H_{∞} 综合	176
5.3.5	μ 分析和 D 尺度	178
5.3.6	$D-K$ 迭代	180
5.4	纵向飞控系统设计与仿真	185
5.4.1	飞机模型及内部连接结构	185
5.4.2	加权函数的选取	186
5.4.3	μ 综合与 μ 分析	189
5.4.4	仿真分析	195
5.5	侧向飞控系统设计与仿真	196
5.5.1	飞机模型及内部连接结构	196
5.5.2	加权函数的选取	197
5.5.3	μ 综合与 μ 分析	201
5.5.4	仿真分析	202
5.6	非脆弱 μ 综合鲁棒飞控系统的设计与仿真	206
5.6.1	非脆弱鲁棒控制基本概念	206
5.6.2	非脆弱 μ 综合设计方法	207
5.6.3	飞控系统设计与仿真	208
	参考文献	215

Contents

Chapter 1	Overview of Robust Control Theory	001
1.1	Main Methods in Robust Control Theory	005
1.1.1	Kharitonov Interval Theory	005
1.1.2	H_∞ Robust Control Method	007
1.1.3	H_2/H_∞ Robust Control Method	012
1.1.4	Singular Value μ Method	021
1.1.5	Solving Methods of Robust Control	022
1.2	Application of Robust Control and Present State of Robust Flight Control Study	023
Chapter 2	Foundamentals of Robust Control	031
2.1	Mathematica Preliminary Knowledge	032
2.1.1	Space and Norm	032
2.1.2	Matrix Singular Value	041
2.1.3	Function Norm	042
2.1.4	Riccati Equation	045

2.1.5	Linear Fractional Transformation	046
2.1.6	Linear Matrix Inequality	049
2.2	Description of Uncertainty	054
2.2.1	Parameterizable Uncertain Model	054
2.2.2	Unparameterization Uncertainty	055
2.3	Frequency Domain Model of Linear Uncertain System	058
2.3.1	Types of Uncertain System Model	058
2.3.2	Modelling of Perturbation Function	059
2.4	Frequency Domain Criteria of Robust Stability	061
2.4.1	Nyquist Criterion	061
2.4.2	Small Gain Theorem	065
Chapter 3	Design of H_∞ Flight Control System	069
3.1	H_∞ Standard Design Problem	070
3.2	H_∞ Mixed Sensitivity Control Problem	072
3.2.1	Mixed Sensitivity Control Idea	072
3.2.2	H_∞ Mixed Sensitivity Control Method	075
3.3	Choice of Weighting Function	078
3.4	Design and Simulation of Longitudinal Flight Control System	080

3.4.1	Design and Simulation of Single State	081
3.4.2	Design and Simulation of Multi-States	087
3.5	Design and Simulation of Latitude Flight Control System	097
Chapter 4	Design of H_2/H_∞ Flight Control System	105
4.1	Problem Description	106
4.2	H_2 Standard Control	112
4.2.1	H_2 Performance	112
4.2.2	H_2 Standard Control Problem	116
4.3	H_2/H_∞ Control Based on LMI	118
4.3.1	H_∞ Control Based on LMI	118
4.3.2	H_2 Control Based on LMI	120
4.3.3	H_2/H_∞ Control Based on LMI	121
4.3.4	Solving Algorithm	122
4.4	Design and Simulation of Flight Control System	124
4.5	Design and Simulation of Flight Control System with Parameter Perturbation	130
4.5.1	Building Model and Solving Algorithm	130