



国防科技图书出版基金

Design and Verification for
Flight Control System of
Launch Vehicle

运载火箭飞行控制系统 设计与验证

■ 李学锋 王青 王辉 王通 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

运载火箭飞行控制系统 设计与验证

Design and Verification for Flight Control System of
Launch Vehicle

李学锋 王青 王辉 王通 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

运载火箭飞行控制系统设计与验证/李学锋等编著. —北京:国防工业出版社,2014.2

ISBN 978-7-118-09194-6

I. ①运… II. ①李… III. ①运载火箭—飞行控制系统—控制系统设计②运载火箭—飞行控制系统—可靠性验证 IV. ①V475.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第053623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 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 177 千字

2014年2月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 40.00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

IV

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	陆军	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

运载火箭控制系统是航天任务众多系统中至关重要的一个,它对完成越来越复杂的航天任务起着决定性的作用。随着现代航天任务的多元化、运载火箭结构的复杂化,如何保证控制系统的稳定性、如何提高控制系统的可靠性以及如何全面验证控制系统的性能指标,是当前面对控制系统不确定性、非线性等亟需解决的问题。

运载火箭是一个参数时变和高度非线性的不确定系统,由于建模过程进行了大量的简化,使得模型中还存在着大量的未建模动态。另外,运载火箭的各种运动形式通过动力学与控制而互相交连,它们各自均具有较大的不确定性和外界干扰。而基于小扰动假设的传统控制设计方法,虽然能通过设置稳定裕度或者直接进行鲁棒性设计来提高系统动态性能,但是必然具有一定的局限性,无法达到系统性能最优;而采用新型的现代控制方法,如自适应控制等,则可以适应这种变化。在此基础上,为了提高系统的抗干扰能力,将滑模变结构控制方法和反步法等非线性自适应控制方法应用于航天控制系统设计中。同时,综合了不同智能控制方法的相关优势,针对航天控制系统模型的非线性,设计了多项新技术相结合的控制方法。为提高控制系统可靠性,提出了冗余容错设计理念,并介绍了冗余管理策略、冗余控制方程、阈值的选择及其在工程实际中的应用。总结数学仿真的一般方法,介绍了半实物仿真的特点、系统组成;重点论述了半实物仿真试验算法、试验内容并对仿真试验进行了覆盖性和有效性评估。最后,给出半实物仿真试验实例,介绍了半实物仿真的实施流程。

全书共6章。第1章对航天控制系统的现状和发展趋势进行了概述;第2章针对运载火箭为主的航天器刚体运动、弹性振动、测量元件和执行机构进行了建模;第3章主要讲述运载火箭姿控系统经典设计方法、冗余容错控制方法和基于最优控制的现代控制方法;第4章将自适应控制方法应用在航天控制系统设计中,所设计的自适应补偿控制器能够消除参数不确定的影响,进一步研究了其他非线性鲁棒自适应控制方法在航天控制系统设计中的应用;第5章进一步探索模型严重不确定对系统的影响及对控制系统的新要求,将智能控制方法融入经典控制和现代控制方法,如自适应模糊控制、神经网络控制等,讨论复杂智能控制系统应用于航天控制系统的实现方法;第6章结合实际工程经验,重点介绍了控制系统半实物仿真的应用和评估方法。

本书可作为从事运载火箭与导弹控制系统分析、设计与验证工作工程技术人员和研究人员的参考书,亦可作为导航、制导与控制相关专业研究生和高年级本科生的教材。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2013. 10

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 运载火箭控制系统建模	5
2.1 飞行动力学基础	5
2.1.1 坐标系定义与转换关系	5
2.1.2 作用力与力矩	11
2.1.3 动力学方程	23
2.2 刚体运动模型	25
2.2.1 刚体六自由度模型	25
2.2.2 用于控制系统设计的模型	29
2.3 弹性运动模型	30
2.3.1 弹性运动方程	30
2.3.2 用于控制系统设计的弹性模型	34
2.4 状态观测与测量	35
2.4.1 测量设备	35
2.4.2 测量模型	38
2.5 执行机构模型	39
2.5.1 执行机构设备	39
2.5.2 执行机构模型	40
第 3 章 运载火箭控制系统设计方法	43
3.1 引言	43

3.2	控制系统频域设计方法	45
3.2.1	控制系统频域设计	45
3.2.2	系统特性对频域设计的要求	47
3.2.3	频域设计实例	50
3.3	控制系统冗余设计	55
3.3.1	惯性测量装置冗余	56
3.3.2	速率陀螺冗余	60
3.3.3	伺服系统冗余	62
3.4	控制系统现代设计方法	63
3.4.1	线性二次型最优控制问题	64
3.4.2	运载火箭最优控制器设计	65
3.4.3	加权矩阵设计优化	69
第4章	运载火箭自适应控制技术	73
4.1	引言	73
4.2	模型参考自适应控制	74
4.2.1	名义控制器与参考模型	74
4.2.2	自适应控制器设计与稳定性分析	75
4.2.3	仿真结果分析	78
4.3	非导数自适应控制	80
4.3.1	非导数自适应控制器设计	81
4.3.2	系统稳定性分析	83
4.3.3	非导数最优自适应律	88
4.3.4	仿真结果对比分析	88
4.4	变结构自适应控制	96
4.4.1	滑模变结构控制基本原理	97
4.4.2	连续滑模控制律设计方法	99
4.4.3	连续滑模控制应用	104

4.4.4	系统仿真验证	111
4.5	反步法控制	114
4.5.1	反步法设计基础	114
4.5.2	反步法控制律设计	115
4.5.3	鲁棒补偿控制器设计	117
4.5.4	动态曲面控制方法	119
4.5.5	仿真结果分析	124
第5章	运载火箭模糊与神经网络控制技术	129
5.1	引言	129
5.2	模糊 PD 控制	131
5.2.1	模糊控制设计基础	132
5.2.2	模糊 PD 控制器设计	137
5.2.3	系统仿真验证	139
5.3	自适应模糊滑模输出反馈控制	141
5.3.1	自适应模糊逻辑系统	144
5.3.2	自适应模糊滑模控制器设计	145
5.3.3	系统稳定性分析	147
5.3.4	系统仿真验证	150
5.4	神经网络控制器设计	152
5.4.1	基于 RBF 神经网络的反步控制律设计	153
5.4.2	基于神经网络和积分滑模的补偿器设计	157
5.4.3	系统收敛性分析	159
5.4.4	系统仿真验证	160
第6章	运载火箭控制系统仿真验证	165
6.1	引言	165
6.2	半实物仿真试验要求和目的	166

6.3	半实物仿真试验系统组成	167
6.3.1	系统组成及工作原理	167
6.3.2	测量模拟设备	169
6.3.3	负载模拟设备	172
6.4	半实物仿真试验	176
6.4.1	仿真试验算法	176
6.4.2	仿真试验测试	186
6.4.3	仿真试验内容	187
6.4.4	仿真试验评估	189
6.5	半实物仿真试验实例	190
	参考文献	193

Contents

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	Modeling for Control System of Launch Vehicle	5
2.1	Flight Dynamics	5
2.1.1	Definition and Transfer of Coordinate System	5
2.1.2	Forces and Moments	11
2.1.3	Formulations of Flight Dynamics	23
2.2	Rigid Body Kinematics Models	25
2.2.1	Rigid Body Models with 6 Degrees of Freedom	25
2.2.2	Models for Control System Design	29
2.3	Elastic Kinematics Models	30
2.3.1	Formulations of Elastic Kinematics	30
2.3.2	Elastic Motion Models for Control System Design	34
2.4	States Observation and Measurement	35
2.4.1	Measurement Equipment	35
2.4.2	Measurement Models	38
2.5	Actuator Models	39
2.5.1	Actuator Equipment	39
2.5.2	Actuator Models	40
Chapter 3	Control System Design of Launch Vehicle	43
3.1	Introduction	43

3.2	Frequency – domain Design of Control System	45
3.2.1	Frequency – domain Design of Control System	45
3.2.2	Frequency – domain Requirelby System Characters ...	47
3.2.3	Frequency – domain Design Example	50
3.3	Redundancy Design for Control System	55
3.3.1	Measurement Equipment Redundancy	56
3.3.2	Rate Gyro Redundancy	60
3.3.3	Servo Redundancy	62
3.4	Modern Control Design	63
3.4.1	Linear Quadric Optimal Control	64
3.4.2	Optimal Controller for Launch Vehicle	65
3.4.3	Optimal Design for Weighting Matrices	69
Chapter 4	Adaptive Control of Launch Vehicle	73
4.1	Introduction	73
4.2	Model Reference Adaptive Control	74
4.2.1	Nominal Controller and Reference Model	74
4.2.2	Adaptive Controller Design and Stability Analysis	75
4.2.3	Simulation Results Analysis	78
4.3	Derivative – free Adaptive Control	80
4.3.1	Design of Derivative – free Adaptive Controller	81
4.3.2	System Stability Analysis	83
4.3.3	Derivative – free Optimal Adaptive Control	88
4.3.4	Simulation Results Comparison	88
4.4	Variable Structure Adaptive Control	96
4.4.1	Foundation of Sliding Mode Variable Structure Control	97
4.4.2	Design of Continual Sliding Mode Control	99

4.4.3	Application of Continual Sliding Mode Control	104
4.4.4	Simulation	111
4.5	Back Stepping Control	114
4.5.1	Foundation of Back Stepping Design	114
4.5.2	Design of Back Stepping Control Law	115
4.5.3	Design of Robust Compensator	117
4.5.4	Dynamic Surface Control	119
4.5.5	Simulation Results Analysis	124

Chapter 5 Fuzzy and Neural Network Control of Launch

	Vehicle	129
5.1	Introduction	129
5.2	Fuzzy PD Control	131
5.2.1	Foundation of Fuzzy Control	132
5.2.2	Design of Fuzzy PD Controller	137
5.2.3	Simulation	139
5.3	Adaptive Fuzzy Sliding Mode Output Feedback Control	141
5.3.1	Adaptive Fuzzy Logic System	144
5.3.2	Design of Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller	145
5.3.3	System Stability Analysis	147
5.3.4	Simulation	150
5.4	Neural Network Control	152
5.4.1	Back Stepping Control based on RBF Neural Network	153
5.4.2	Integral Sliding Mode Compensator based on Neural Network	157
5.4.3	Convergence Analysis	159
5.4.4	Simulation	160

Chapter 6 Simulation and Verification for Control System of	
Launch Vehicle	165
6.1 Introduction	165
6.2 Require and Aims of Hardware – in – loop Simulation	166
6.3 Composing of Hardware – in – loop Simulation	167
6.3.1 System Composing and Principle	167
6.3.2 Measurement Equipment Simulator	169
6.3.3 Load Simulator	172
6.4 Hardware – in – loop Simulation Test	176
6.4.1 Simulation Arithmetic	176
6.4.2 Simulation Test	186
6.4.3 Simulation Content	187
6.4.4 Simulation Evaluation	189
6.5 Hardware – in – loop Simulation Example	190
Reference	193

第1章 绪 论

近年来,我国航天技术的发展取得了长足的进步,随着航天任务的日益复杂,对运载火箭系统设计提出新的挑战,进而对控制系统的精确性、稳定性和可靠性提出了更高的要求。本书主要适用于运载火箭姿态控制系统设计与验证。

运载火箭控制系统的主要任务是在内外干扰和实际飞行条件下,通过各种测量信息和控制计算,实现姿态的稳定与控制。运载火箭主要采用自主式控制系统,由敏感装置、飞行控制计算机、时序装置、综合放大器和执行机构组成,如图 1-1-1 所示。敏感装置测量姿态和位置的变化,包括箭体线运动和角运动参数,角运动参数是姿态控制系统的基本输入参数,有时还需要引入线运动参数。飞行控制计算机进行控制信号的计算、校正、综合与放大,输出控制信号,控制时序装置和执行机构。执行机构根据控制信号驱动舵面或摆动发动机,产生控制力矩,使各状态量(姿态及摆角等)控制在允许范围之内,实现稳定飞行并准确入轨。

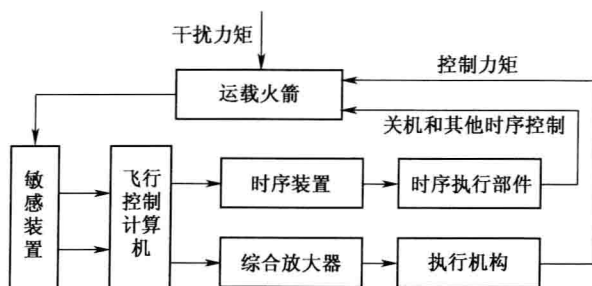


图 1-1-1 控制系统顺序结构图