

通信卫星总体设计 和动力学分析

SYSTEM DESIGN AND DYNAMICS ANALYSIS
OF COMMUNICATION SATELLITES

周志成 曲广吉 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

通信卫星总体设计 和动力学分析

SYSTEM DESIGN AND DYNAMICS ANALYSIS
OF COMMUNICATION SATELLITES

周志成 曲广吉 著



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

通信卫星总体设计和动力学分析/周志成, 曲广吉著. —北京:
中国科学技术出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6254 - 5

I. ①通… II. ①周… ②曲… III. ①通信卫星 - 总体设计
②通信卫星 - 动力学分析 IV. ①V474. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 288612 号

责任编辑 崔 玲 李 睿

封面设计 中文天地

责任校对 林 华

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010 - 62173865

传 真 010 - 62179148

投稿电话 010 - 62176522

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 900 千字

印 张 37.5

版 次 2013 年 1 月第 1 版

印 次 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 刷 北京长宁印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6254 - 5/V · 65

定 价 126.00 元

内 容 提 要

本书以现代通信卫星为代表的地球静止轨道（GEO）航天器为设计研究对象，在系统工程方法论和航天器总体设计框架体系指导下，结合几十年航天工程实践，并从航天器设计学科高度，系统总结和详细介绍了 GEO 航天器总体设计、动力学与控制分析仿真、多学科设计优化和设计验证的技术内容和理论方法。全书编写遵循系统性、可读性、科学性、创新性、实用性的宗旨要求，并在有关章节设置了工程应用范例。

全书共分 15 章。第 1 章为绪论；第 2、3 章为轨道动力学和空间环境；第 4、5、6 章为航天器总体设计、有效载荷设计和主要分系统设计；第 7 章为航天器总体设计优化方法，包括构型拓扑优化、设备布局优化、结构参数优化、总体参数多学科设计优化；第 8 章为航天器结构动力学、模型修正、力学环境和力学试验；第 9~13 章为柔性、晃动、多体和热致微振动等动力学以及动力学与控制仿真；第 14 章为航天器总体设计、分析、优化范例；第 15 章为可靠性设计、分析、验证。

本书读者对象为航天科研院所和高等院校从事航天器总体设计、动力学与控制分析仿真、优化设计理论方法研究应用的科技人员、教师和研究生，也可作为空间飞行器设计专业及相关专业的教学参考书。

序(一)

自1970年我国第一颗人造地球卫星东方红一号上天以来的42年间,中国在人造地球卫星、载人航天器和深空探测器三大航天器工程技术领域,都获得了里程碑式的跨越发展和工程应用,极大地促进了国民经济发展、科学技术进步和现代国防建设,并在各个领域取得了显著的经济社会效益。地球静止轨道(GEO)大容量通信卫星工程是我国正在建设发展和广泛应用的重要应用卫星系统之一,这是一项规模庞大、技术复杂和应用价值极高的高轨道、长寿命、大功率、高精度航天器工程,也是国际卫星市场竞争最为激烈的一类应用卫星。迄今,东方红系列GEO通信卫星已发展了三代,2008年成功发射的第三代东方红四号大型通信卫星,在规模和性能方面已达到同类卫星平台的国际主流水平,并实现了“委星一号”等三颗卫星整装出口和在轨交付服务。这充分说明,中国在航天器设计学科领域的科学理论和专业技术发展及其工程研制能力已达到和接近当代世界水平。

我从1967年自东方红一号开始,几十年来主持了我国航天器工程系统的设计研制和应用发展,亲身见证了中国航天器工程系统追赶世界先进水平的多个里程碑式跨越发展。但是,应该承认我们同国际先进航天大国比较在科学技术水平方面还存在差距,应在航天领域进一步贯彻科学发展观,将几十年大量工程实践和经验,通过总结提炼进一步上升到科学理论、科学方法、科学规范、科学体系等,并全面提高航天科技队伍的整体素质水平,以支持和指导我国航天器工程技术的可持续发展。周志成和曲广吉两位同志,都是几十年工作在航天科研第一线的专家,他们在航天器总体设计、动力学与控制、总体优化设计和研制试验方面,都具有扎实的理论基础、精湛的专业知识和丰富的工程经验,并在我国航天器总体设计和各类复杂航天器动力学应用研究方面,做出了突出贡献。他们合作写成《通信卫星总体设计和动力学分析》这部专著,这对我国航天事业尤其GEO航天器的发展是一件非常有意义和值得称赞的工作。本书密切结合我国GEO通信卫星工程实际,从系统工程方法论和航天器设计学科高度,结合几十年航天工程实践,系统深入总结

和全面详细介绍了通信卫星总体设计、分析、优化和验证的技术内容和理论方法。本书撰写的主要特点有：航天器设计、分析、优化、验证及范例都密切结合实际工程，突出了科学、先进和实用；研究提出了航天器总体设计框架体系和系统工程总体设计方法；重点介绍了航天器总体设计、动力学与控制、多学科优化和设计验证的技术内容和理论方法及其技术进展；还给出了环境试验规范、安全可靠性和研制技术流程等设计分析方法。因此，这是国内首部全面系统论述航天器总体设计、分析、优化与验证的科技专著。

《通信卫星总体设计和动力学分析》一书的正式出版非常值得航天界庆贺！我相信，这部著作的出版，将会促进我国航天器总体设计技术进一步研究发展、技术创新和工程应用，促进航天器设计学科的应用理论发展和科学技术进步，也将对航天领域年轻科技人才的培养发挥重要作用。

“两弹一星”功勋科学家
中国科学院院士



2012年11月

序(二)

航天器设计属于航空宇航科学与技术(一级学科)下的飞行器设计学科(二级学科)。其研究范畴主要包括航天器总体设计、航天器结构设计、航天器动力学与控制三个专业方向。航天器设计是一门多学科交叉的综合性学科,其发展水平对一个国家的航天技术进步具有重要作用,并对相关学科及高新技术发展具有重要影响和引领作用。


从我国1984年成功发射第一颗地球静止轨道通信卫星东方红二号以来,已发展三代(东方红二号、三号、四号),共发射26颗通信卫星。我国在通信卫星领域取得了举世瞩目的成就,特别是2008年发射的新一代大容量、长寿命东方红四号通信卫星,达到了国际同类通信卫星的先进水平,并兼顾了后续通信卫星对公用平台的需求,为我国空间通信基础设施建设和国际卫星市场开发提供了先进的卫星公用平台。

在老一代科学家基础上,周志成研究员从2000年开始担任东方红四号通信卫星的总设计师兼总指挥,瞄准当时国际先进的通信卫星平台,大胆采用并突破了若干关键先进技术。他在总体方案优化、可靠性设计和验证、卫星平台化研制、研制流程优化等方面做了大量开创性工作,同时积累了丰富的卫星总体设计和系统研制经验;在通信卫星型号研制、国际市场开拓、领域规划发展方面做出了出色的成绩;同时他多年从事动力学与控制研究工作,在通信卫星复杂动力学研究和应用方面发挥了重要作用。曲广吉研究员是我国著名航天动力学专家,自20世纪80年代以来,主持开展了我国各类复杂航天器多种动力学问题的理论研究、软件开发、试验验证,并独立自主地解决了我国复杂航天器各类动力学分析设计问题;特别是2000年以来,在复杂航天器动力学等多个学科方向研究突破了一批新的理论和技术问题,获得了多项工程应用成果和创新成果。周志成与曲广吉二位研究员合作撰写的《通信卫星总体设计和动力学分析》一书以东方红四号通信卫星为代表的GEO航天器为主要设计研究对象,从系统工程角度论述了GEO航天器总体设计、分析、优化与验证的技术内容和理论方法,其中突出了航天器设计学科的总体设计

和动力学与控制两部分内容，该书既是对我国通信卫星设计技术、方法和经验的一次系统深入总结，又展现了我国通信卫星总体技术最新进展和成果。

《通信卫星总体设计和动力学分析》一书的出版非常值得祝贺！它密切结合通信卫星工程研制，系统凝练总结了通信卫星总体技术原理和具体设计方法；全面阐述了通信卫星复杂动力学建模和仿真技术研究成果，并结合实际工程给出了算例。这是一本理论与实践密切结合、工程实用性很强的航天器总体设计专著。相信该书的出版，将会有力推动我国通信卫星总体设计技术的进一步研究发展和工程应用，促进我国通信卫星总体设计水平和研制能力的提升。

中国工程院院士



2012年11月

序(三)

从东方红二号第一代试验通信卫星研制到现在的30多年来,我国又研制了东方红三号和东方红四号两代通信卫星,由此不仅满足了国内各类卫星通信需求,还基于大容量、长寿命、技术先进的东方红四号卫星平台开拓国际市场,实现了多星的出口。我国通信卫星事业取得了令人瞩目的成就,从卫星有效载荷能力、卫星平台指标水平、总体设计技术、卫星研制规范、工程管理方法和卫星研制能力等方面,均取得了飞速发展。《通信卫星总体设计和动力学分析》一书反映了我国在通信卫星总体技术和复杂动力学研究和应用方面的重大进展和技术进步。

周志成研究员在从事多年航天器动力学与控制专业研究后,致力于通信和导航卫星总体设计工作,是通信卫星的业务骨干,曾在东方红三号系列通信卫星和北斗导航卫星中担任总体主任设计师、副总设计师,2000年开始担任我国新一代大型地球静止轨道卫星公用平台(东方红四号)总设计师,历时8年,他带领团队成功开发东四卫星平台,此平台现已成为我国整星出口的主力产品。他在总体设计、动力学特别是卫星系统研制方面具有很深的理论造诣和丰富的工程经验。曲广吉研究员从20世纪80年代以来,主持完成了我国各类复杂动力学研究和工程应用,是我国享有盛誉的航天动力学专家。二位合著的《通信卫星总体设计和动力学分析》一书按航天器系统工程的方法体系,深入提炼和系统总结了他们及他们的团队几十年来在通信卫星设计、分析、优化和验证方面的创新工作成果、系统设计方法和经验。

该书以东方红四号通信卫星为代表的GEO航天器为对象,重点介绍了航天器总体方案、有效载荷和平台分系统的主要设计方法以及复杂动力学与控制 and 设计优化技术;同时,还介绍了空间环境、轨道、可靠性等的设计和分析方法。

难能可贵的是,本书密切结合工程实践,阐述了通信卫星设计、分析、优化与验证的理论方法;强调技术原理和设计分析方法相结合,着重总结了通信卫星总体设计内容和具体方法,并给出了相应工程实例;面向研发中的

GEO 卫星新平台和新系统，阐述了有效载荷、综合电子、电推进、多学科优化、热致微振动等通信卫星最新技术进展和应用成果。我相信，这部专著的出版，将会促进我国通信卫星先进设计技术和方法的进一步研究和工程应用，推动我国通信卫星系统的创新发展；也将会促进航天器设计学科的发展，并为航天人才培养发挥重要作用。

中国航天科技集团公司科技委顾问

中国工程院院士

The image shows a handwritten signature in black ink, which appears to be the name '杨青' (Yang Qing) written in a cursive style.

2012 年 11 月

前 言

1970年我国成功发射了第一颗人造地球卫星东方红一号，揭开了中国进入航天时代的序幕。进入21世纪以来，我国在人造地球卫星、载人航天器和深空探测器三大类航天器工程技术领域，都获得了里程碑式的跨越发展和广泛应用，极大地促进了国民经济发展、科学技术进步和现代国防建设，并在各个领域取得了显著的经济社会效益。这些举世瞩目的航天成就，不但表明中国已名副其实地进入世界航天大国行列，而且还表明中国在三大航天器工程技术领域，其航天器设计学科的科学理论和专业技术发展及其工程研制能力已达到或接近当代世界水平。地球静止轨道（GEO）大容量通信卫星工程是我国已经建立和正在建设的几类重要应用卫星系统之一，这是一项规模庞大、技术复杂和应用价值极高的高轨道、长寿命、大功率、高精度航天器工程，也是国际卫星市场竞争最为激烈的一类卫星应用领域。1984年以来我国共发展了三代GEO通信卫星，其中第三代东方红四号大容量通信卫星，在规模和性能方面已达到同类GEO卫星平台的国际主流水平，并实现了“委星一号”等三颗卫星整星出口和在轨交付服务。

在上述工程背景下，本书以现代通信卫星为代表的GEO航天器为设计研究对象，在系统工程方法论指导下，结合几十年航天工程实践，并从航天器设计学科高度，重点总结和详细介绍了通信卫星总体方案设计、分析、优化和验证的技术内容和理论方法。航天器设计属于航空宇航科学与技术的主干学科之一——飞行器设计学科。根据国内外定义，航天器设计学科主要包括航天器总体设计、航天器结构设计、航天器动力学与控制三个学科专业方向，其相关学科主要涵盖数学、力学、物理学、化学、工程热物理、电子科学与技术、制导导航与控制、计算机应用技术、材料科学、机械工程、制造工艺、低温与真空技术、推进工程、环境工程与管理科学等。航天器总体设计是航天器设计（学科）的顶层设计，包括总体方案设计和总体详细设计两大部分内容；而总体方案设计包括预先研究、可行性论证与方案设计，总体详细设计包括初样设计和正样设计。航天器公用平台设计是航天器总体设计和结构

设计的核心研究内容。航天器总体设计优劣要通过航天器动力学与控制建模分析和总体仿真进行评估,并开展总体综合优化设计。因此,航天器设计是一门多学科交叉和综合性很强的航天高科技学科。

《通信卫星总体设计和动力学分析》一书编写的主要技术特点可概括为以下几个方面:

第一,全书编写内容突出了科学性、先进性和实用性。全书按系统性、可读性、科学性、先进性和实用性的编写宗旨进行框架设计和正文内容撰写。全书成稿过程突出了理论方法科学性、科学技术先进性和航天工程实用性。

第二,研究提出了 GEO 航天器总体设计框架体系。以用户需求和有效载荷与运行轨道设计要求为输入条件,以大系统等各类接口为约束条件,并以航天器公用平台及其有效载荷和分系统设计为核心内容,开展航天器总体设计、动力学与控制分析仿真、总体设计综合优化、环境规范设计和可靠性设计验证等。航天器总体设计框架体系(图 1-1)给出了各模块具体工程任务及其相互关系和约束条件,使总体和专业设计队伍各层次人员能站在全局做好本职工作;该框架体系还从学科和工程两个方面指导了本书正文撰写和范例设置。

第三,总结提出了航天器系统工程总体设计方法。主要包括:任务目标和功能指标设计方法、继承改进和创新设计方法、系统层次分解设计方法、分析与综合设计方法、研制阶段和流程控制设计方法、状态冻结和基线控制设计方法、建模和验证设计方法、并行协同优化设计方法。该方法在 1.2 节做了详细论述,并指导了全书正文撰写。

第四,我国 GEO 航天器公用平台技术获得重要进展和应用。从航天器工程研制综合分析,航天器设计可分为航天器公用平台设计、有效载荷设计、大系统等各类接口设计及其环境试验规范设计、动力学与控制仿真评估。东方红四号大型通信卫星平台已有 7 颗星在轨运行,新一代超大型通信卫星平台正在研发。根据国际发展和国内需求,我国通信卫星平台已实现模块化、系列化和通用化设计,正朝超大型化平台发展,并跟踪国际发展趋势,积极发展和采用先进的有效载荷技术、平台分系统技术和可靠性设计技术及各类设计验证技术,以支持超大型平台发展(第 1、4、5、6、15 章)。

第五,我国 GEO 航天器动力学与控制分析仿真技术获得重要进展和广泛应用。这是航天器设计的一个重要学科专业方向,其主要任务是研究航天器从设计、研制、试验、发射到在轨运行(和返回)全过程各类动力学问题的理论建模分析、控制仿真评估、系统优化设计和仿真试验验证。从 20 世纪 80 年代后期以来,我国已能独立自主地解决复杂航天器各类动力学与控制问题,

彻底打破了国外封锁和依附国外的局面。从2000年以来12年间，我们在GEO复杂航天器柔性、晃动、多体、微振动等多类动力学问题研究都取得了突破性进展，并在动力学与控制方面获得多项创新成果和工程应用成果（第9~13章）。其中，大幅晃动三维质心面法建模仿真、系统级平衡降阶模型反射变换理论方法和高精度柔性航天器热致微振动耦合动力学建模分析等国际前沿课题均取得突破性创新成果。

第六，我国GEO航天器总体设计综合优化技术获得突破性进展和初步应用。航天器总体设计是一个从顶层到分系统反复进行协调与迭代的过程，传统设计主要靠设计师经验进行多方案比较，既费时费力又使方案偏于保守。为解决航天器总体方案优化设计问题，20世纪90年代以来我们先后开展了航天器结构参数和设备布局两类问题的优化理论方法和设计优化软件研究。迄今，结构参数优化软件SPOSS和设备布局优化软件COPOSS已用于DFH-4卫星平台及其后继星总体优化设计，其中布局优化由于独立提出子空间建模方法，解决了COPOSS软件的通用性和实用性。近两年来我们又开展了航天器结构构型拓扑优化和总体参数多学科优化的工程应用探索研究，虽然难度很大，还是取得了初步工程应用成果（第7、14章）。本书详细介绍了航天器构型拓扑优化、设备布局优化、结构参数优化和总体参数多学科设计优化的理论方法和典型工程应用算例，以促进总体设计优化技术的深入发展和推广应用。

第七，航天器可靠性设计技术已形成可靠性保证体系、标准规范体系和具体工作指南（第15章）。航天器设计验证技术已建成基本配套和功能完善的各类试验和测试系统，并形成了标准试验规范和试验方法（第4、8、15章）。

本书重点总结和介绍了从2000年以来我国GEO通信卫星工程总体设计、动力学分析、多学科优化和设计验证等技术和方法的最新研究进展，全书共分15章。参加本书各章编写或研究的人员以及评审专家为：第1章绪论（周志成、曲广吉、王敏、袁俊刚；彭成荣研究员）；第2章航天器轨道动力学（周志成、曲广吉、梁新刚；向开恒研究员）；第3章航天器空间环境（周志成、王敏、朱文明、呼延奇；蔡震波研究员）；第4章航天器总体设计（周志成、王敏、孙治国、袁俊刚；彭成荣研究员、魏强研究员）；第5章航天器有效载荷设计（周志成、刘乃金、王敏、薛永；邱乐德研究员）；第6章航天器主要分系统设计（周志成、王敏、袁俊刚、沈宇飞；陈忠贵研究员、刘杰荣研究员）；第7章航天器总体设计优化方法（曲广吉、周志成、孙治国、袁俊刚、李东泽、陈余军、郝宝新；黄海教授、谭春林研究员）；第8章航天器结构动力学与力学环境（曲广吉、周志成、王敏、袁俊刚、刘正山；高耀南研

究员、韩增尧研究员)；第9章航天器柔性耦合动力学(曲广吉、周志成、曹丽；于登云研究员)；第10章航天器液体晃动动力学(曲广吉、周志成、黄华；张焯研究员)；第11章航天器多体动力学(曲广吉、周志成、董富祥；杨雷研究员)；第12章航天器热致微振动动力学(曲广吉、周志成、刘正山；孙树立教授、华诚生研究员)；第13章航天器动力学与控制总体仿真(曲广吉、周志成、原劲鹏、关晓东；杨涤教授、李志研究员)；第14章航天器总体设计分析优化范例(周志成、曲广吉、王敏、孙治国、袁俊刚；魏强研究员、刘杰荣研究员)；第15章航天器可靠性设计和故障对策(周志成、徐珩衍、李毅、林逢春、王敏；朱北园研究员、康锐教授)。另外，在本书成稿过程中还得到了通信卫星事业部有关领导、部科技委和部办领导、总体室和新平台室领导的大力支持，王吉辉主任、潘昕研究员和朱凤梧研究员做了大量组织、管理和协调工作。应该说明，《通信卫星总体设计和动力学分析》一书能够出版还得到中国空间技术研究院领导和专家的支持及中国航天科技集团公司领导和高级技术顾问的鼓励，孙家栋院士、杜善义院士和范本尧院士在百忙中为本专著作序。作者对上述众多专家、教授、领导对本书出版所做的贡献一并表示最衷心的感谢。

《通信卫星总体设计和动力学分析》一书在今年最后一个月就要出版了，作者希望这本书能为我国航天器总体设计上水平和航天事业蓬勃发展奉献一份薄礼。本书编写的目标是使读者通过学习能了解和掌握 GEO 航天器总体设计、分析、优化和验证的主要理论方法和基本技术内容，为从事航天器总体设计、动力学与控制分析仿真、优化设计理论方法研究以及工程应用的科技人员提高业务素质提供培训参考书，也可作为高等院校和科研院所空间飞行器设计专业及相关领域工程技术人员和教师学生的教学参考书。限于作者水平和时间短促，对书中错误和不当处敬请读者指正。

作者

2012年11月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 航天器设计的研究范畴和基本内涵	1
1.2 航天器系统工程和总体设计方法	3
1.2.1 航天器工程	3
1.2.2 航天器系统工程	5
1.2.3 航天器任务分析和总体设计方法	11
1.3 航天器动力学(工程)的分析研究方法	15
1.3.1 现代航天器动力学的主要特征	15
1.3.2 航天器动力学(工程)的基本概念、研究范畴和研究内容	16
1.3.3 航天器动力学(工程)的研究方法	19
1.4 我国通信卫星工程的研究进展和重要意义	24
1.4.1 通信卫星工程发展应用概况	24
1.4.2 通信卫星关键技术研究进展	26
1.4.3 发展通信卫星工程重要意义	32
第2章 航天器轨道动力学	35
2.1 引 言	35
2.2 航天器二体问题	36
2.2.1 二体问题解析解和轨道根数	36
2.2.2 二体问题的应用	38
2.3 航天器轨道摄动	40
2.3.1 轨道摄动方程	40
2.3.2 地球非球形摄动	43
2.3.3 其他摄动	44
2.4 轨道转移	46
2.4.1 共面圆轨道最优转移	46
2.4.2 共面椭圆轨道双脉冲最优转移	48
2.4.3 异面轨道转移	48
2.5 GEO 航天器轨道设计	49
2.5.1 GEO 转移轨道变轨策略	49
2.5.2 东西和南北位置摄动与保持	50
2.6 高轨星座对地覆盖设计分析	51

2.6.1	高轨星座任务类型和设计要求	51
2.6.2	区域和全球单重覆盖星座设计	52
2.6.3	区域和全球双重覆盖星座分析	53
2.6.4	预警星座导弹红外目标弹道估计与误差分析	55
第3章	航天器空间环境	62
3.1	引 言	62
3.1.1	空间环境基本要素及影响	62
3.1.2	航天器空间环境工程设计的目标和内容	63
3.2	地球空间环境	64
3.2.1	太阳活动	64
3.2.2	地球大气层	66
3.2.3	地球电离层	67
3.2.4	地球磁场与磁层	68
3.2.5	空间带电粒子辐射	69
3.3	航天器空间环境效应	73
3.3.1	空间辐射环境效应类型	73
3.3.2	空间环境效应分析	75
3.4	航天器空间环境效应防护设计	80
3.4.1	电离总剂量效应防护设计	80
3.4.2	单粒子效应防护设计	82
3.4.3	表面充放电效应防护设计	83
3.4.4	航天器内带电效应防护设计	85
3.5	空间环境和效应在轨监测	86
3.5.1	航天器在轨异常/故障与空间环境的相关性	86
3.5.2	航天器内外环境及其环境效应监测	87
3.5.3	典型的环境与效应监测仪器	88
第4章	航天器总体设计	91
4.1	引 言	91
4.2	航天器总体设计任务分析	93
4.2.1	用户任务要求和卫星系统主要技术指标分析	93
4.2.2	航天器轨道选择和分析	96
4.2.3	有效载荷技术指标分析	97
4.2.4	卫星平台功能需求和主要技术指标分析	97
4.2.5	卫星与大系统接口要求分析	99
4.3	航天器总体方案设计	100
4.3.1	有效载荷方案设计	100
4.3.2	卫星平台主要分系统方案设计	101
4.3.3	卫星总体参数预算	103

4.3.4	卫星平台构型和承力结构方案设计	111
4.3.5	卫星设备布局方案设计	115
4.3.6	卫星轨道设计分析	118
4.3.7	卫星接口设计	123
4.3.8	总体方案系统性能分析	124
4.4	航天器总体详细设计	128
4.4.1	卫星主要分系统详细设计	128
4.4.2	卫星总装设计	131
4.4.3	卫星总体电路设计	133
4.4.4	卫星环境试验设计	138
4.4.5	卫星综合测试设计	144
4.4.6	卫星飞行程序设计	147
4.5	航天器研制技术流程	148
第5章	航天器有效载荷设计	152
5.1	引 言	152
5.1.1	GEO 航天器有效载荷分类和特点	152
5.1.2	GEO 航天器有效载荷设计任务和要求	152
5.1.3	GEO 航天器有效载荷技术发展	153
5.2	通信卫星有效载荷设计	155
5.2.1	通信卫星有效载荷指标分析	156
5.2.2	通信卫星天线设计	158
5.2.3	通信卫星转发器设计	161
5.2.4	移动通信卫星新型有效载荷设计	167
5.2.5	宽带通信卫星新型有效载荷设计	172
5.2.6	激光通信卫星新型有效载荷设计	176
5.3	跟踪中继卫星有效载荷设计	178
5.3.1	跟踪中继卫星功能任务及其系统和有效载荷组成	178
5.3.2	跟踪中继卫星有效载荷主要技术指标分析	179
5.3.3	跟踪中继卫星有效载荷设计	181
5.4	遥感卫星有效载荷设计	183
5.4.1	遥感卫星功能任务及其分类	183
5.4.2	遥感卫星有效载荷主要技术指标分析	184
5.4.3	遥感卫星有效载荷设计	185
第6章	航天器主要分系统设计	188
6.1	引 言	188
6.2	航天器结构分系统设计	189
6.2.1	结构分系统设计任务和要求	189
6.2.2	主承力结构设计	189