



航天科技图书出版基金资助出版

通信卫星工程

周志成 主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

通信卫星工程

周志成 主编



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

通信卫星工程/周志成主编. -- 北京: 中国宇航出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0483 - 2

I. ①通… II. ①周… III. ①通信卫星 IV. ①V474. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 201990 号

责任编辑 马 航

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出 版 发 行 **中国宇航出版社**

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2014 年 6 月第 1 版
2014 年 6 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092

开 本 1/16

印 张 48.25

字 数 1145 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0483 - 2

定 价 298.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《通信卫星工程》

编 写 组

主 编 周志成

编写组成员	于 森	王 敏	王世波	王余涛	王宏群	冯小琼
	左 坤	田 栋	田 野	白光明	刘 波	刘 悦
	刘 豪	刘乃金	刘建功	刘杰荣	刘新彦	孙宝祥
	朱贵伟	朱劲梅	朱毅麟	衣文洁	邢 杰	阮剑华
	何 成	何 洋	佟金成	张 宁	张 鹏	张 巍
	张敬铭	张照炎	张鑫伟	李 东	李 峰	李 辉
	李 源	李 毅	李明峰	李砥擎	李朝阳	杨 军
	杨 勇	杨宝宁	杨显强	杨晓宁	沈宇飞	肖应廷
	邹恒光	周 颖	周佐新	孟莉莉	经姚翔	范 晨
	范陆海	郑 驰	金雪松	赵欣博	郝燕艳	原民辉
	徐珩衍	袁俊刚	陶宁波	高 宇	曹 鹏	梁军强
	梁宗闯	梁剑飞	傅 岳	彭云鹤	韩庆虎	雷仲谋
	熊晓将	裴 林	潘 屹	濮海玲	魏 强	魏振超

前 言

通信卫星工程,是在现有技术手段下以最合理的资源配置研制出满足要求的通信卫星的过程,是通信卫星工程大系统的核心,与运载火箭系统、发射场系统、地面测控系统和地面应用系统密切合作、相互配合,实现通信卫星的研制、发射、运行和应用。

自1984年我国第一颗地球静止轨道通信卫星——东方红二号成功发射以来,经过近30年的艰苦奋斗和自主创新,我国通信卫星工程先后取得了自主研制实用通信卫星,开发大容量、长寿命、高可靠通信卫星公用平台,通信卫星整星出口等成就,走出了一条适合我国国情、有自身特色的发展道路。目前,我国已形成三代成熟的通信卫星平台(东方红二号、东方红三号和东方红四号),累计发射27颗通信卫星。其中第三代东方红四号平台大容量通信卫星,在规模和性能方面已达到国外同类卫星平台的主流水平,并实现了委星一号等三颗卫星整星出口和在轨交付服务。

为总结和提炼我国通信卫星设计、试验与制造的原理和方法,在理论和系统化的层次上论述通信卫星技术和工程,展示我国通信卫星工程的研制成果和创新成就,撰写了这本《通信卫星工程》。本书以地球静止轨道通信卫星为主要对象,在总结我国通信卫星工程实践经验和成果的基础上,全面论述通信卫星相关技术、设计、制造、测试与试验、发射、在轨运行和项目管理,力求做到理论方法与工程运用相结合,具备理论性、知识性、工程性和启发性。本书是通信卫星从业人员必读的专业书,可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可以作为与国外同行进行交流的具有中国特色的学术技术资料。

《通信卫星工程》由18章组成,以系统工程的思想进行编排,在介绍通信卫星工程概念的基础上,从系统级总体设计出发,逐步深入有效载荷与平台的分系统设计与试验,最后回到整星系统级操作。其中:第1章概论,介绍了卫星通信和通信卫星的发展历程、发展现状和发展趋势,从通信卫星工程的角度划定了本书的范畴,并介绍我国通信卫星工程的发展和展望;第2章从空间环境的角度集中介绍通信卫星经历的空间环境及其对通信卫星设计和运行造成的影响;第3~15章详细介绍了通信卫星总体设计及各分系统的相关技术、设计、测试与试验,是全书的核心部分,在通信卫星系统级和分系统级上具体介绍了通信卫星的总体设计、轨道设计、三大有效载荷分系统(转发器分系统、天线分系统、捕获跟踪分系统),七大平台分系统(结构分系统、热控分系统、姿态与轨道控制分系统、推进分系统、供配电分系统、测控分系统、数据管理分系统)的研制,可靠性和安全性设

计；第16章和17章介绍了通信卫星的总装、测试和试验，以及发射、在轨测试和运行管理等内容；第18章介绍了通信卫星项目管理的基础知识，首次对我国通信卫星项目管理的概念、特点和内容进行了总结，是本书的亮点之一。

感谢中国空间技术研究院通信卫星事业部、北京空间科技信息研究所组织了本书的策划和编写，感谢中国空间技术研究院通信卫星事业部、北京空间科技信息研究所、北京控制工程研究所、中国空间技术研究院西安分院、中国空间技术研究院总体部，以及中国宇航出版社等单位的相关部门和领导在本书撰写和出版过程中给予的大力支持。

本书在撰写过程中力求做到框架完整、内容全面、技术准确、亮点突出，但由于通信卫星工程是规模庞大、系统复杂、技术密集、综合性强的系统工程，本书的内容难免有错误和疏漏之处，恳请关心和关注我国通信卫星事业的各界专家、学者们和广大读者给予批评指正。

《通信卫星工程》编委会

2013年6月

序 一

中国航天器研制工作始于20世纪50年代末期,经过50余年的艰苦努力,在物质技术基础薄弱的条件下,取得了一系列重大成就。近三年来,我国在发射次数方面均居世界前三,在人造地球卫星、载人航天器、深空探测器三大航天器工程技术领域取得了里程碑式的跨越发展和工程应用。

1970年,东方红一号卫星成功发射,树立起中国航天事业的第一个里程碑,标志着中国成为世界上第五个独立研制并发射人造卫星的国家。随后,返回式卫星、地球静止轨道通信卫星、气象卫星、定位导航卫星的成功发射,逐步奠定了中国作为世界航天大国的地位。进入21世纪以来,载人航天工程和月球探测工程的成功,成为我国航天事业发展的另外两个重要里程碑。

随着我国航天器体系逐渐完备,各类航天器广泛应用于国民经济、国防建设、文化教育和科学研究等方面。此外,在航天器研制中取得了新技术成果,也迅速推广到国民经济建设的各个部分,有力推动了传统产业的技术改造和技术进步。

当前,我国正处于全面建设小康社会的关键时期,国家战略规划、经济社会发展和科技进步等对我国航天提出了由航天大国向航天强国转变的迫切需求。面对国家加快培育和发展战略新兴产业的重大历史机遇,我国航天产业发展已站在了新的历史起点。因此,有必要对以前工程实践中取得的经验和成果进行总结、提炼和升华,指导并推动航天工程技术的不断发展。

作为卫星应用产业的主力军和空间基础设施的重要组成部分,通信卫星充当了排头兵的角色。《通信卫星工程》专著的出现,符合航天大发展背景下的迫切需求。本书以系统工程的思想全面地论述了通信卫星工程的设计、试验、总装、发射和运行管理等各个阶段和相关技术,密切结合我国通信卫星工程实际,在总结的基础上进行提炼,具有工程性、知识性、理论性等特点。本书由长期从事通信卫星研制的一线专家和技术人员共同编写,全书内容全面、技术准确,工程性和理论性相结合,是一部优秀的工程专著。

在此祝贺《通信卫星工程》的出版发行,相信这部专著的出版将会促进我国航天器工程技术的进一步发展,促进通信卫星领域的技术创新和工程应用,也将对航天领域年轻人才的培养发挥重要作用。



中国科学院院士

“两弹一星”功勋科学家

2013年6月

序 二

自1958年世界首颗通信卫星——斯科尔成功发射以来，通信卫星逐渐成为应用最深入、影响最广泛的一类人造地球卫星，在服务国民经济建设和社会进步、保障国家安全、带动科学技术创新等方面发挥着重要的作用。截至2013年2月底，世界各国和组织在轨航天器共计1 079个，其中56%以上是通信卫星。在卫星产业中，以卫星通信为主的卫星服务业占卫星产业收入的60%以上，通信卫星也成为国际卫星市场竞争最激烈的一类卫星应用领域。

我国通信卫星工程起步于20世纪60年代末，在80年代以后得到快速发展。1984年东方红二号通信卫星成功发射，使中国成为世界上第五个独立研制并成功发射地球静止轨道卫星的国家，迈出了我国通信卫星工程从探索到实践的第一步。随后，东方红三号卫星的成功研制和发射进一步推动了我国通信卫星工程从试验到实用的发展。

2000年，东方红四号卫星公用平台正式立项。新一代通信卫星公用平台采用模块化、通用化、先进性和可扩展性的设计思想，大胆采用并突破若干关键技术，具备容量大、功率高、承载能力强和服务寿命长等特点。基于东方红四号卫星平台的委星一号等三颗卫星的整星出口和在轨交付，不但标志着我国通信卫星研制能力达到了国际同类通信卫星的先进水平，也实现了我国通信卫星工程从国内到国际的跨越。

《通信卫星工程》一书就是在总结以往经验和成果的基础上，由从事通信卫星工程的一线专家和技术人员共同编著。本书不但对我国通信卫星的研制成果和创新成就进行了总结，而且在理论和系统化的层次上对通信卫星工程和通信卫星技术进行了提炼和升华，使其更具有工程指导意义。

本书以地球静止轨道通信卫星为主要对象，覆盖了通信卫星全系统、全寿命周期的技术、工程研制和管理的相关内容，强调基本原理与工程运用相结合，具有较高的技术深度和较强的实践性和指导性。在论述通信卫星各分系统时，全面介绍各分系统的基本技术、设计方法、试验方法和技术发展趋势，具有一定知识性和启发性。

《通信卫星工程》的出版非常值得祝贺！本书主题明确、亮点突出、内容全面，达到了现有同类航天器及卫星工程专著的先进水平，可以说是国内首部通信卫星领域工程专著。相信本书的出版，将会有力推动通信卫星工程理论的研究与发展，促进通信卫星工程技术的进步与应用，提升我国通信卫星研制水平，并且有利于通信卫星领域年轻人才的教育和培养。



中国工程院院士

东方红二号和东方红三号通信卫星总设计师

2013年6月

序 三

随着航天技术的发展,应用卫星不断深入社会和人们的生活。其中,通信卫星是发展最早、应用最为广泛的一类应用卫星,在促进国民经济发展、保障应急救灾、推动国防建设等方面发挥着重要的作用。目前,国外通信卫星应用产业发展比较成熟,全球通信卫星市场也由少数几家国外制造商主导。

我国通信卫星工程起步于20世纪60年代,经过50余年的艰苦奋斗和自力更生,取得了举世瞩目的成就。东方红二号卫星的成功发射标志着中国成为世界上第五个独立研制并成功发射地球静止轨道通信卫星的国家;东方红三号卫星的成功研制和发射进一步推动了我国通信卫星从试验向实用的发展;东方红四号卫星公用平台的成功研制和应用,标志着我国通信卫星的研制能力达到了国际同类通信卫星的先进水平。

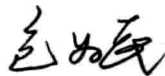
当前,我国处在从航天大国向航天强国迈进的战略机遇期。建设航天强国,不但要提升生产制造能力和科技创新能力等航天硬实力,还要着力提升航天软实力,而航天学术著作就是航天软实力的重要衡量标准之一。目前,国内尚无面向通信卫星的工程专著,《通信卫星工程》的出现填补了该领域的空白。

《通信卫星工程》以地球静止轨道通信卫星为主要对象,在总结我国通信卫星研制经验和成果的基础上进行提炼和拔高,在理论和实践相结合的基础上阐述通信卫星工程的内涵。该书以通信卫星的设计和研制为主要内容,覆盖了通信卫星的全生命周期。其中,各分系统的设计与试验、整星的可靠性工程,以及通信卫星项目管理均是全书的亮点。

该书由东方红四号卫星公用平台的总设计师和总指挥——周志成研究员组织编写,各章作者汇集了通信卫星研制的一线技术人员和相关领域的专家,内容充分体现了我国通信卫星工程研制的成果。

由于通信卫星工程是一项系统工程,除航空宇航科学与技术和信息与通信工程以外,还涉及控制科学与工程、电气工程、电子科学与技术、材料科学与工程等多个学科。书中相关学科知识的介绍,对其他应用卫星工程也具有一定的参考和借鉴意义。

在此,热烈祝贺《通信卫星工程》一书的出版,相信该书的出版,不仅会促进我国通信卫星研制水平的提升和我国通信卫星技术的发展,而且会对我国通信卫星相关学科的发展以及通信卫星领域专业人才的培养发挥重要的推动作用。



中国科学院院士

中国航天科技集团科技委主任

2013年6月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 卫星通信与通信卫星	1
1.1.1 卫星通信	1
1.1.2 卫星通信的特点	4
1.1.3 通信卫星	5
1.2 通信卫星发展概况	6
1.2.1 通信卫星发展历程	6
1.2.2 典型通信卫星	8
1.3 通信卫星技术发展	12
1.3.1 技术发展现状	12
1.3.2 技术发展趋势	15
1.4 通信卫星工程	17
1.4.1 通信卫星工程与通信卫星工程系统	17
1.4.2 通信卫星工程的内涵与阶段	18
1.4.3 通信卫星工程的特点	21
1.5 我国通信卫星工程发展及展望	22
参考文献	24
第 2 章 空间环境及影响	25
2.1 概述	25
2.2 太阳及其活动	26
2.2.1 太阳简介	26
2.2.2 太阳电磁辐射	28
2.2.3 太阳风	28
2.2.4 太阳活动	29
2.3 地球空间环境	32
2.3.1 引力场与微重力	32
2.3.2 真空	33
2.3.3 地球大气层	33

2.3.4 电离层	33
2.3.5 地球空间磁场与磁层	34
2.4 地球静止轨道空间环境	36
2.4.1 地球辐射带	37
2.4.2 太阳宇宙线	40
2.4.3 银河宇宙线	44
2.5 空间环境对通信卫星的影响	46
2.5.1 对轨道的影响	47
2.5.2 对姿态的影响	48
2.5.3 对结构和材料的影响	48
2.5.4 对电磁波传播的影响	50
2.6 空间辐射环境对通信卫星的影响	51
2.6.1 总剂量效应	52
2.6.2 位移损伤效应	53
2.6.3 单粒子效应	53
2.6.4 表面充/放电效应	54
2.6.5 内带电效应	55
2.7 空间环境防护设计	56
参考文献	57
第3章 通信卫星总体设计	58
3.1 概述	58
3.1.1 通信卫星总体设计原则和要求	58
3.1.2 通信卫星总体设计阶段	60
3.1.3 通信卫星总体设计技术	62
3.2 通信卫星任务分析	64
3.2.1 通信卫星任务需求及总体性能指标分析	64
3.2.2 通信卫星轨道设计分析	66
3.2.3 大系统接口分析	66
3.2.4 通信卫星总体参数分配	68
3.3 通信卫星有效载荷设计	76
3.3.1 通信卫星有效载荷设计内容	76
3.3.2 通信卫星有效载荷指标分析	77
3.3.3 通信卫星天线设计	79
3.3.4 通信卫星转发器设计	80
3.4 通信卫星平台设计	82
3.4.1 通信卫星平台组成	82

3.4.2 通信卫星平台选型	82
3.4.3 通信卫星平台设计要求	84
3.5 通信卫星构型及布局设计	86
3.5.1 卫星构型设计	86
3.5.2 卫星布局设计	89
3.6 通信卫星总体性能分析及优化	92
3.6.1 通信卫星总体性能分析	92
3.6.2 卫星总体优化设计	96
3.7 通信卫星研制技术流程	100
3.8 通信卫星总体设计技术发展趋势	101
参考文献	104
第4章 通信卫星轨道设计	105
4.1 概述	105
4.2 卫星轨道力学	108
4.2.1 坐标系及时间系统	108
4.2.2 二体问题及轨道根数	110
4.2.3 轨道摄动	112
4.2.4 轨道摄动计算方法	115
4.2.5 各类摄动的主要影响及应用	116
4.2.6 轨道控制	122
4.3 静止轨道通信卫星轨道设计	123
4.3.1 静止轨道特点	123
4.3.2 变轨设计	125
4.3.3 发射窗口	129
4.3.4 地球静止轨道位置保持	133
4.3.5 地影、月影与日凌现象	138
4.3.6 弃置轨道设计	139
4.4 静止轨道双星共位	142
4.4.1 共位的基本方法	142
4.4.2 双星共位轨道控制方法	146
第5章 通信卫星转发器分系统	149
5.1 概述	149
5.1.1 转发器的原理及分类	149
5.1.2 转发器的组成	150
5.2 通信卫星转发器技术	152
5.2.1 功率放大技术	152

5.2.2 输出多工技术	152
5.2.3 星上处理技术	153
5.2.4 转发器主要技术特性	154
5.3 通信卫星转发器分系统设计	158
5.3.1 设计要求	158
5.3.2 设计原则	160
5.3.3 设计流程	160
5.3.4 设计内容	162
5.4 通信卫星转发器分系统测试与试验	174
5.4.1 目的与原则	174
5.4.2 转发器分系统测试流程	175
5.4.3 测试设施和设备	177
5.4.4 测试方法	178
5.5 通信卫星转发器技术发展趋势	180
参考文献	183
第6章 通信卫星天线分系统	184
6.1 概述	184
6.1.1 天线的分类	184
6.1.2 天线的组成	184
6.2 通信卫星天线技术	186
6.2.1 辐射场	186
6.2.2 天线功率传输	188
6.2.3 天线主要参数	189
6.2.4 抛物面天线	192
6.2.5 天线测试原理	195
6.3 通信卫星天线分系统设计	198
6.3.1 设计要求	198
6.3.2 设计原则	199
6.3.3 设计流程	200
6.3.4 设计内容	201
6.4 通信卫星天线分系统测试与试验	211
6.4.1 天线测试组装	212
6.4.2 天线测试	212
6.5 通信卫星天线技术发展趋势	215
参考文献	218
第7章 通信卫星捕获跟踪分系统	219

7.1 概述	219
7.2 捕获跟踪技术	220
7.2.1 程序跟踪技术	220
7.2.2 目标捕获技术	220
7.2.3 自动跟踪技术	221
7.3 捕获跟踪分系统设计	227
7.3.1 设计要求	227
7.3.2 设计方法	228
7.3.3 单机设计	235
7.4 捕获跟踪分系统测试及试验	237
7.4.1 系统联试	238
7.4.2 天线展开与驱动试验	240
7.4.3 整星状态下分系统测试与试验	241
7.4.4 在轨状态下相位与角度标校及测试	245
7.5 技术发展趋势	249
参考文献	250
第 8 章 通信卫星结构分系统	251
8.1 概述	251
8.2 通信卫星结构设计技术	252
8.2.1 强度校核与设计技术	252
8.2.2 结构优化设计技术	255
8.2.3 复合材料结构设计技术	256
8.2.4 模态计算方法	257
8.3 通信卫星结构设计	258
8.3.1 设计要求	258
8.3.2 设计原则	259
8.3.3 结构设计一般流程	259
8.3.4 结构构型设计	261
8.3.5 结构部件设计	262
8.3.6 结构连接设计	265
8.3.7 结构装配设计	267
8.4 通信卫星结构力学分析	268
8.4.1 结构力学分析一般流程	268
8.4.2 静力分析	270
8.4.3 模态分析	272
8.4.4 动态响应分析	274

8.5 通信卫星结构试验	276
8.5.1 结构试验一般分类	276
8.5.2 静力试验	278
8.5.3 振动试验	279
8.5.4 声试验	281
8.6 机械太阳翼	281
8.6.1 太阳翼组成	282
8.6.2 太阳翼技术	282
8.6.3 太阳翼设计	284
8.6.4 太阳翼设计分析	295
8.6.5 太阳翼试验	298
8.7 通信卫星结构技术发展趋势	300
8.7.1 通信卫星本体结构技术发展趋势	301
8.7.2 通信卫星太阳翼技术发展趋势	301
参考文献	303
第9章 通信卫星热控分系统	304
9.1 概述	304
9.2 卫星热控制技术与产品	305
9.2.1 热控制技术	306
9.2.2 热控产品	307
9.3 通信卫星热设计	311
9.3.1 热设计基本原则	311
9.3.2 任务分析	311
9.3.3 通信卫星热设计特点	313
9.3.4 热设计	313
9.4 热分析	323
9.4.1 热分析目的	323
9.4.2 热分析数学模型	323
9.4.3 建模方法	324
9.4.4 参数选取	325
9.4.5 分析工具	326
9.4.6 模型修正	327
9.5 热平衡试验	327
9.5.1 试验目的	327
9.5.2 试验方法	327
9.5.3 试验设备	328

9.5.4 试验技术状态	329
9.5.5 试验工况	330
9.5.6 试验程序	330
9.6 热设计验证优化	330
9.6.1 热平衡试验技术优化——取消热控星	330
9.6.2 热分析技术优化	332
9.7 通信卫星热控技术发展趋势	333
9.7.1 基于环路热管的可展开式辐射器	333
9.7.2 单相流体回路	335
参考文献	337
第 10 章 通信卫星姿态与轨道控制分系统	338
10.1 概述	338
10.1.1 通信卫星姿态控制的概念和任务	338
10.1.2 轨道控制的概念和任务	340
10.1.3 通信卫星控制分系统的组成和控制方式	342
10.2 通信卫星姿态确定与控制技术	344
10.2.1 姿态确定技术	345
10.2.2 姿态控制技术	356
10.3 通信卫星轨道确定与控制技术	366
10.3.1 轨道确定技术	366
10.3.2 轨道控制技术	371
10.4 通信卫星控制分系统设计	378
10.4.1 设计要求和原则	378
10.4.2 任务分析	379
10.4.3 控制方案设计	382
10.4.4 技术实现设计	392
10.5 通信卫星控制分系统测试与试验	400
10.5.1 单机测试与试验	400
10.5.2 分系统测试与试验	401
10.5.3 整星总装、集成与测试阶段控制分系统的测试及试验	406
10.6 通信卫星控制分系统技术发展趋势	406
参考文献	408
第 11 章 通信卫星推进分系统	409
11.1 概述	409
11.1.1 推进分系统的定义与功能	409
11.1.2 推进分系统的特点	409

11.1.3 推进分系统的组成	410
11.2 通信卫星推进技术	411
11.2.1 通信卫星推进技术的发展	411
11.2.2 通信卫星双组元推进技术	413
11.2.3 通信卫星典型推进系统	416
11.3 通信卫星推进分系统设计	421
11.3.1 推进分系统设计要求	421
11.3.2 推进分系统设计流程	422
11.3.3 推进分系统性能与参数设计	424
11.3.4 推进分系统配置和工作过程	427
11.3.5 可靠性、安全性设计	429
11.3.6 推进分系统与其他系统接口设计	431
11.3.7 推进分系统主要部件	433
11.4 通信卫星推进分系统总装、测试与试验	447
11.4.1 推进分系统总装	447
11.4.2 推进分系统测试和试验	449
11.4.3 推进分系统地面专项试验	453
11.5 通信卫星推进分系统技术发展趋势	456
参考文献	459
第12章 通信卫星供配电分系统	461
12.1 概述	461
12.1.1 定义和功能	461
12.1.2 组成和工作原理	461
12.2 通信卫星供配电技术	462
12.2.1 发电技术	463
12.2.2 储能技术	468
12.2.3 电源控制技术	473
12.2.4 电源变换技术	477
12.2.5 配电技术	478
12.2.6 低频电缆网设计技术	478
12.3 通信卫星供配电分系统设计	480
12.3.1 设计要求	480
12.3.2 设计原则	482
12.3.3 供配电分系统设计	482
12.3.4 一次电源子系统设计	490
12.3.5 总体电路子系统设计	497