



卫星设计学 (再版)

王希季 李大耀 张永维 著

 中国宇航出版社

卫星设计学

(再版)

王希季 李大耀 张永维 著



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

卫星设计学:再版/王希季,李大耀,张永维著

--北京:中国宇航出版社,2014.12

ISBN 978-7-5159-0827-4

I. ①卫… II. ①王… ②李… ③张… III. ①人造卫星-设计 IV. ①V423.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 273798 号

责任编辑 彭晨光

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 12 月第 1 版
2014 年 12 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 27.25

字数 342 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0827-4

定价 128.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

作者简介

王希季 白族，云南大理人，1921年7月出生。中国科学院院士，国际宇航科学院院士，中国空间科学学会名誉理事长、“两弹一星”功勋奖章获得者。1942年11月毕业于国立西南联合大学，获机械工程学士学位。1949年2月于美国弗吉尼亚理工学院（Virginia Polytechnic Institute）研究生院获科学硕士学位。1950年5月回国后，历任大连工学院（现大连理工大学）、上海交通大学副教授、教授，上海机电设计院总工程师，北京空间机电研究所所长，中国空间技术研究院副院长、科技委主任、返回式卫星总设计师，航天工业部总工程师、航空航天工业部科技委顾问。现任中国空间技术研究院研究员、技术顾问，中国航天科技集团公司科技委顾问，中国人民解放军总装备部科技委顾问，中国科学学会理事会名誉理事长。

在国内，王希季首先提出了“空间资源”、“空间基础设施”、“空间疆域”等新概念。他在国内外学术会议和刊物上发表论文多篇，与他人合著有《船舶汽轮机原理及热计算》《航天器进入与返回技术》《工程设计学》和《空间技术》等著作。

李大耀 汉族，江苏南通人，1940年8月出生。1958年12月上海复旦大学数学系提前毕业，进入中国科学院上海机电设计院

(现北京空间机电研究所) 从事航天科技工作, 2001年8月退休。曾任北京空间机电研究所科技委常务副主任、研究员, 兼任中国空间科学学会第五届理事会常务理事。发表过若干航天领域专业论文和科普文章, 与他人合作撰写或编辑过一些航天领域专业著作。

张永维 汉族, 辽宁岫岩人, 1939年11月生, 研究员, 历任技术员, 工程组长, 室主任, 卫星型号总设计师、总指挥, 863航天领域专家, 总工程师, 状态控制委员会主任, 现任航天东方红卫星有限公司首席科学家。长期从事卫星技术的研究工作, 是中国现代小卫星主要开拓者之一。自主创新组织完成了CAST968卫星平台工作, 提出了公用平台设计思路, 采用新型集成化的星务管理技术, 使中国小卫星技术水平达到国际现代小卫星水平。与国内外科学家合作提出了夸父科学卫星计划, 先后荣获国家科技进步一等奖一项、二等奖两项, 部委级科技进步一等奖三项, 2007年荣获何梁一何利工程建设技术奖, 2010年荣获国际宇航科学院杰出团队成就奖 (IAA Laurels for Team Achievement Double Star and Cluster Team)。先后发表论文20余篇, 参与编写3部专著, 培育了一支小卫星的专业队伍。

再版序

本书第一版（王希季，李大耀．卫星设计学．上海：上海科学技术出版社，1997）出版以来，至今已过十七个春秋。在这段时间，我国空间技术和事业高速发展，人造卫星已从研究、试验和试用阶段，发展到研发、制造和应用阶段，进入了市场，提供了一些用户需求的和扩大了需求范围的卫星及星座产品，有的应用卫星已组成或正在组成为空间基础设施。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》把“建设导航、遥感、通信等卫星组成的空间基础设施框架”列为国家战略性新兴产业创新发展工程，确定了卫星产业在国民经济和社会发展中的重要地位，指明了发展方向。今后卫星的研发、制造和应用，应以建设能在空间长期稳定运行、满足地面应用需求并能扩大应用范围、与地面配套设备共同构成的空间基础设施大系统为主。作为空间技术组成部分的卫星设计学必须密切结合国情同步发展。本书再版将对第一版作适当的更新和补充，以适应卫星的发展态势。

卫星的发展，其品质和经济性起关键作用，必须高度重视进入市场的研发创新能力和制造效率。而任何一颗卫星和由卫星组成的空间基础设施的品质和经济性以及研发创新能力和制造效率都是设计和创造出来的。卫星的设计由以卫星总设计师为首的设计师团队完成。卫星和星座组成的空间基础设施是由包含设计师团队在内的大工程系统研制团队创造出来的。不仅仅是卫星设计师团队的成员应具有卫星设计学知识，而是整个大工程团队的成员都应具有卫星

设计学的基本知识。这样，大工程团队就容易取得共识，从而更加有力推进工程进度。

本书再版的内容主要包括：结合卫星及其组成的空间基础设施设计阐述工程设计学的基本理论，研究卫星的本质特征（按天体力学规律运行，存在于外层空间和高度自动化活动，服务于在地上的人类），讨论卫星设计的主要规则和方法、对设计方案的评估、卫星的可靠性和经济性问题。这些方面都是卫星设计，特别是卫星总体设计的共性问题。在这些共性问题中，客观上存在着一些必须认识和遵守的规律。本书重点之一就是要尽可能准确地指出这些规律和明确地阐述这些规律。

卫星设计学是一本较为集中地讨论卫星及其组成的空间基础设施设计有关问题的专著，阐述的内容涉及诸多方面，缺点错误在所难免。希望本书能起到抛砖引玉的作用，能得到设计师们和有关工程技术工作者以及组织者的批评和指正，以促进我国工程设计学的发展。

作 者

2014年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星设计学	1
1.1.1 工程设计学	1
1.1.2 卫星设计学	2
1.2 科学、技术和卫星设计	4
1.2.1 科学和技术的区别	4
1.2.2 技术的定义	6
1.3 卫星工程系统和卫星	8
1.3.1 卫星工程系统的组成	8
1.3.2 卫星的主要组成	10
第 2 章 卫星特性和卫星设计特点的讨论	12
2.1 卫星特性的探讨	12
2.1.1 卫星的系统性质	12
2.1.2 卫星对特殊环境的适应性	18
2.1.3 卫星的高度自动化性质	22
2.1.4 卫星的危险品性质和安全设计	23
2.1.5 卫星设计的程序性质	24
2.1.6 卫星设计的创造性	26
2.2 卫星设计的特点	30
2.2.1 由卫星个性引发的特殊的设计问题	30
2.2.2 由运载器有效载荷引发的设计特点	32

2.2.3	适应外层空间环境引发出的设计特点	34
2.2.4	由特殊的一次使用性引发的设计特点	35
2.2.5	由小批量生产引发的设计特点	36
第3章	卫星设计程序	37
3.1	卫星设计程序的基本类型和通用模式	40
3.1.1	卫星设计程序的基本类型	40
3.1.2	卫星设计程序的通用模式	43
3.2	卫星的外部设计以及任务和指标的确定	50
3.2.1	卫星的外部环境	50
3.2.2	卫星的外部设计	52
3.3	卫星可行方案论证和设计	58
3.3.1	卫星可行方案论证	58
3.3.2	卫星可行方案设计	60
3.4	卫星总体方案设计	62
3.4.1	卫星总体设计与分系统设计的关系	62
3.4.2	卫星总体方案设计的主要工作	64
3.5	卫星分系统的方案设计	71
3.5.1	卫星分系统设计的性质	71
3.5.2	卫星分系统方案设计的主要工作	72
3.6	卫星的详细设计	76
3.6.1	卫星详细设计的两个阶段	76
3.6.2	卫星分系统的详细设计	78
3.6.3	卫星总体的详细设计	80
3.7	卫星通用设计程序的进一步讨论	84
3.7.1	卫星通用设计程序的简化	84
3.7.2	卫星的设计评审	87
第4章	卫星的设计要求	90
4.1	卫星设计要求的构成	92
4.1.1	卫星设计要求的要点	93

4.1.2 卫星的技术和功能要求	95
4.2 卫星设计要求的分析和综合	100
4.2.1 层次分析综合模式	100
4.2.2 目标—约束分析综合模式	106
4.3 卫星设计要求的分解和确定	109
4.3.1 卫星设计要求的分解	109
4.3.2 卫星设计要求的权衡	109
第5章 卫星总体方案设计	112
5.1 卫星总体方案设计的意义	112
5.1.1 卫星总体方案设计的基本点和任务	112
5.1.2 卫星总体方案设计的重要性	114
5.2 卫星总体方案的综合选优	116
5.2.1 系统层次的综合选优	116
5.2.2 卫星总体技术途径的综合选优	117
5.2.3 卫星内部组成结构的综合选优	119
5.3 组成卫星的分系统	121
5.3.1 分解卫星组成的三种途径	121
5.3.2 卫星按功能层次的分解	122
5.3.3 卫星按承担功能的分解	123
5.3.4 按实现功能的过程进行分解	127
5.4 卫星的设计模型	128
5.4.1 卫星设计模型的特性	128
5.4.2 卫星总体方案的内部组成结构模型	129
5.4.3 卫星总体方案的数学模型	132
5.5 卫星总体设计指标的分配	135
5.5.1 卫星功能分析	136
5.5.2 卫星总体设计指标分配方法	138
第6章 卫星轨道设计	152
6.1 卫星轨道设计要求	153

6.1.1	外部环境对卫星轨道设计的支持与制约	154
6.1.2	卫星轨道设计的主要要求	156
6.2	卫星轨道的基本概念	157
6.2.1	地心赤道坐标体系	157
6.2.2	地心直角坐标系	159
6.2.3	卫星轨道的零级近似解	160
6.2.4	卫星轨道摄动	163
6.2.5	卫星轨道分类和特点	165
6.3	卫星对地面的覆盖	173
6.3.1	卫星的地面覆盖区	173
6.3.2	卫星的地面覆盖带	175
6.3.3	同轨等距卫星星座的地面覆盖带	180
6.4	卫星轨道和一般星座设计的基本方法	183
6.4.1	对全球覆盖的准回归、太阳同步、低高度 圆轨道的确定	183
6.4.2	空间基础设施轨道设计	190
第7章	卫星构形设计	201
7.1	卫星构形设计的任务和特点	201
7.1.1	卫星构形设计的任务	201
7.1.2	卫星模装	202
7.1.3	卫星构形设计与卫星结构设计的区别	203
7.2	卫星构形设计的基本要求	204
7.2.1	实现卫星及其组成的功能要求	205
7.2.2	适应外部环境和卫星工程系统限制条件和 接口关系的要求	205
7.2.3	实现模块式和集成式布局的要求	210
7.2.4	减少来自外部和内部的各种干扰的要求	211
7.2.5	其他要求	212
7.3	卫星构形的类型	213

7.3.1	不用整流罩和用整流罩的卫星构形	213
7.3.2	不同姿态控制方式的卫星构形	214
7.3.3	具有变轨功能卫星的构形	217
7.3.4	不同主承力构件的卫星构形	223
7.3.5	为满足特殊要求的特殊构形	228
第8章	卫星可靠性设计	234
8.1	卫星的可靠性	235
8.1.1	卫星可靠性的定义	235
8.1.2	卫星可靠性设计	236
8.1.3	对卫星可靠性有重要影响的设计准则	239
8.1.4	可靠性的基本概念	241
8.2	卫星可靠性模型	247
8.2.1	与可靠性有关的定义	247
8.2.2	可靠性模型的建立	250
8.2.3	串联系统可靠性数学模型	252
8.2.4	并联系统可靠性数学模型	254
8.2.5	可靠性串—并联组合系统	259
8.2.6	“ n 中取 k ”表决系统	262
8.3	卫星可靠性预测	264
8.3.1	卫星可靠性指标论证和可靠性预测	264
8.3.2	元器件计数可靠性预测法	267
8.3.3	数学模型法	268
8.3.4	上下限法	273
8.4	卫星可靠性分配	277
8.4.1	可靠性分配的原则	277
8.4.2	串联系统可靠性分配	278
8.4.3	有并联冗余的系统的可靠性分配	281
8.4.4	可靠性分配的代数方法	282
8.4.5	动态规划法	284

8.5	卫星故障模式、影响及危害性分析	287
8.5.1	概述	287
8.5.2	FMEA 和 FMECA 的基本程序和所需资料	290
8.5.3	故障模式及影响分析	292
8.5.4	危害性分析	301
8.6	卫星故障树分析	306
8.6.1	故障树的建立方法	306
8.6.2	建立故障树	308
8.6.3	故障树的规范化和简化	313
8.6.4	故障树定性分析	322
8.6.5	故障树定量分析	325
第9章	卫星集同设计与设计工具的框架	329
9.1	卫星集同设计及其支撑软件	329
9.1.1	概述	329
9.1.2	集同设计对研制工作的影响	330
9.1.3	卫星集同设计进展概况	331
9.1.4	数据源及支撑软件	333
9.1.5	大数据技术	334
9.2	空间环境及其效应的集成分析	336
9.2.1	空间环境模型	336
9.2.2	产品适应空间环境的设计	337
9.3	卫星数字化模装	339
9.3.1	卫星数字化模装流程	339
9.3.2	接口数据单编写及签署	339
9.3.3	三维数字化建模	341
9.4	卫星集同设计实例	349
9.4.1	卫星集同设计中心	349
9.4.2	卫星集同设计实例	350
9.5	卫星热控分系统集同设计	352

9.5.1	概述	352
9.5.2	卫星热分析	355
9.5.3	卫星热控技术	355
9.5.4	高分一号整星热控设计实例	357
第 10 章	卫星成本估算	367
10.1	卫星成本的构成	367
10.1.1	卫星成本估算的重要性	367
10.1.2	成本分析的基本概念	368
10.2	卫星成本估算方法	372
10.2.1	成本估算参照体的选择	373
10.2.2	成本估算公式	373
10.2.3	成本修正因子	379
10.3	卫星成本数据的回归分析	381
10.3.1	回归分析	381
10.3.2	成本的一元线性回归	382
10.3.2	成本的一元曲线回归	384
第 11 章	卫星设计方案评价	386
11.1	卫星设计方案评价的标准和步骤	386
11.1.1	卫星设计方案评价的实质和标准	386
11.1.2	卫星设计方案评价的体系与步骤	387
11.1.3	专家组评价	390
11.2	卫星设计方案的定量评价方法	393
11.2.1	普通评分法	393
11.2.2	层次分析法	398
11.2.3	模糊综合评判法	405
11.3	卫星设计方案评价示例	411
参考文献	418

第 1 章 绪论

1.1 卫星设计学

卫星设计学是工程设计学的一个分支，在卫星设计学中将应用工程设计学的研究成果，并结合卫星的特殊问题进一步探讨和发展工程设计学。

1.1.1 工程设计学

设计就其一般的含义而言，可以认为是一项为满足特定需求而预先进行的、用来指导行动以达到目的的技术活动。通过这项有目的的技术活动，创制出预期能够解决问题、满足需求的安排、部署、计划、方案、程序、规程、图表、图纸和指导文件等资料。大至一个国家计划的制定，小至一桌饭菜单的提出，都可以视为一项设计，或者说都是具有设计性质的活动。

范围限制在工程技术方面的设计，称为工程设计。它一般指工程技术人员创制出用工程语言（包括文字、术语、符号、计算机程序语言、图形和表格）表达的、预期能够制作出满足设计任务书和指标规定的硬、软件产品和工程项目的全套工程资料的工作。工程和技术部门依据这些设计资料去组织和进行研制，从而制造出符合设计任务书和规定指标的产品和工程。

承担工程设计的工程技术人员，一般称为设计师。设计师从事的工作主要是设计新的或改进原有的产品和工程项目，也就是创造

出原来还没有的或改进原来已经有的设备、仪器、交通工具、飞行器、各类建筑和其他各类的产品和工程等，以满足特定的需求。一般说来，可以满足设计任务书及其指标规定的特定需求的产品和工程项目的设计可能不止一个，因此，设计师还有一个重要的任务，就是密切结合社会现实，通过选优得出能以高效率完成高品质、低风险和良好经济性的产品和工程项目的设计。

据此，工程设计学可定义为探讨工程设计的一般性规律，寻求以高效率完成高品质、低风险和良好经济性工程设计的途径的学科。它是随着技术进步、工业发展和设计师队伍增大的客观形势而形成并发展起来的，并且还会继续发展的一门技术学科。在中国工程技术界，这门学科基本上还处于创建阶段。虽然不同的学者从不同的角度，对工程设计学所下的定义不尽相同，对这门学科所包含的内容也有不同的见解，但是，上述工程设计学定义所概括的内容，即使不是这门学科的全部，至少也是它的重要部分。相信工程设计界对这一点分歧不大。

人类利用天然的资源，创造和建设了现今的世界。这个创造和建设的进程，总的说来是一个加速前进的过程。人类现今赖以生活、工作和生产的一切用品，究其产生过程而言，不论形式如何，其中都必定有一个设计的过程。

1.1.2 卫星设计学

卫星设计学是卫星工程设计学的简称，是专门讨论卫星设计的工程设计学。按一般定义，卫星是人造地球卫星的简称。在本书中将航天器（在外层空间基本按照天体力学规律运行的各类飞行器的总称）中的不载人航天器统称为卫星，但论述的具体内容仍以人造地球卫星为重点。

在地面上设计制造出来的卫星，必须依靠人为的办法使之到达

外层空间，并获得在空间轨道上运行和工作的能力。外层空间是人类新近才进入的一个疆域。这个位于地球稠密大气层之外的新疆域，有着完全不同于地球上的陆地和海洋以及包围地球的稠密大气层的特殊环境。卫星必须进入还必须适应外层空间的特殊环境。

进入外层空间的航天器是探索、研究和认识外层空间这个新疆域的特殊环境和开发、利用存在于其中的空间资源的工具。因此，可以将卫星视为进入并适应外层空间环境，能在这种特殊环境中完全自动化存活（运行和工作），以服务于地上人类的特定需求的一类工程技术的人造物体。空间基础设施可以视为由卫星组成的、在空间建立的、为规模化开发利用空间资源、为多方面提供长期稳定服务的空间设施及其地面配套设备构成的大工程系统。卫星与地球上和稠密大气层内各种人造物体很不相同，属高技术产品，即高知识密集、高投入、高风险和高效益的四高产品，且又具有与其他高技术产品不同的特点，因此在设计卫星时，要特别注意卫星的独特之处，应该结合卫星这种特别强的个性来认识工程设计学的一般规律和运用一般的工程设计方法。卫星设计学也就是在这种认识的启示下提出来的。

卫星设计学可定义为探讨卫星设计的一般规律性，寻求以高效率和高经济性完成在外层空间具有高品质的卫星及空间基础设施设计的途径的学科。它是一门结合卫星很强的个性来探讨工程设计学一般共性的学科。

设计卫星的工程技术人员称为卫星设计师。卫星设计师和其他设计师一样，都应具备设计师应有的素质，但卫星设计师也有其特殊之处。这些特殊之处主要在于卫星设计师要掌握外层空间的自然环境方面知识，要掌握卫星在空间轨道上如何服务于地上人类的知识，要知道卫星是非常昂贵的、具有危险品性质的、高度自动化的高技术产品。卫星设计师在任何时候都不能忘记或忽略卫星是天上