



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

航天器系统工程

闻新 等 编著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

航天器系统工程

闻新 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由 12 章组成,集中在航天器总体设计知识和技术方面进行讨论和叙述,并且从系统工程角度,对航天器各个分系统进行论述,其主要内容包括:空间环境及其对航天器的影响、航天器轨道基础、航天任务分析、航天器结构与机构分系统、航天器电源分系统、航天器热控分系统、航天器推进分系统、姿态控制系统、航天器数据管理分系统和遥测遥控分系统,最后结合国际航天领域的先进型号,讨论几种新概念航天器。

本书是作者集多年从事航天器总体设计工作和近年来的教学经验,并在跟踪、收集国外优秀资料的基础上编写而成。本书除可以作为高校航天专业学生的教材外,还可作为从事航天型号研制技术人员、管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航天器系统工程 / 闻新等编著. —北京: 科学出版社, 2016.3
南京航空航天大学研究生系列精品教材
ISBN 978-7-03-047397-4

I. ①航… II. ①闻… III. ①航天器—系统工程—研究生—教材
IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 033250 号

责任编辑: 潘斯斯 李 清 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 20

字数: 474 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编 委 会

参编 (按姓名拼音排序):

李有光 连晓斌 秦钰琦

王嘉轶 杨靖宇 岳惠峰

张兴旺 赵金才 朱亚萍

前 言

随着科学技术的进步，人类航天事业也在不断发展，并带动相关学科快速发展。近几年来中国航天事业取得了世界瞩目的辉煌成就，这不禁让我想起钱学森先生说的：20世纪70年代，周恩来总理曾建议“航天系统工程管理方法可以推广到民用领域”。与此同时，自21世纪初以来，为了适应时代发展的需要，国内部分“985”和“211”高校先后成立“航空航天”专业，清华大学、哈尔滨工业大学、浙江大学和南京航空航天大学等高校也相继成功地发射了不同用途的小卫星，“航天器系统工程”已经成为研究生和本科学位的学位课。

航天器系统工程是一项多学科、多专业交叉与综合的系统工程技术，在航天器研制和应用中占有重要地位，其技术水平不但对航天器总体水平、研制周期、研制经费起着重要作用，而且直接关系到航天器系统性能及其系统技术指标的先进性、可靠性、安全性和航天器的在轨工作寿命。本书的编写旨在方便各高校师生教学和学习，适用于40左右学时的教学。

特别指出，本书所叙述的航天器系统总体设计方面的内容有别于其他专业书籍，是站在系统工程的高度，论述从系统（整体）到子系统（局部）认识和方法解决问题的方法。

本书的第1~4章、第12章由闻新编写，第5章由张兴旺编写，第6章由李有光、岳惠峰编写，第7章由杨靖宇编写、张兴旺修改，第8章由赵金才编写，第9~11章分别由秦钰琦、朱亚萍、王嘉轶编写。全书由闻新统稿，连晓斌协助整理。

本书的编写以欧洲的 *Spacecraft Systems Engineering* 和美国 NASA 的 *Space Technology* 为主要参考材料，还参阅了中国空间技术研究院很多前辈和同事出版的书籍，本书的出版还得到了科学出版社的大力支持，在此表示深深的感谢。

作者结合自身的经历和体会，跟踪美洲的相关技术，探索性地组织编写了这本教材。由于编写时间紧，没有比较成熟的模式可以借鉴，书中不妥之处恳请读者批评指正。

作 者

2015年7月20日于多伦多

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 什么是航天器总体设计	1
1.2 “航天器总体设计”课程的特征	1
1.3 任务与载荷	2
1.3.1 载荷的种类	2
1.3.2 载荷的地位	2
1.3.3 载荷的角色	3
1.4 航天系统工程	3
1.5 航天器的基本设计方法	4
1.6 航天器的设计过程	6
1.7 航天器工程：最终设计极限	8
1.8 航天器系统工程设计实例	8
1.8.1 通信卫星	8
1.8.2 遥感卫星	9
1.8.3 天文观测	10
1.8.4 行星探索	10
第 2 章 空间飞行器的环境及其影响	12
2.1 大气环境	12
2.1.1 地球大气层的概念	12
2.1.2 地球大气组成	12
2.1.3 大气压力的变化	13
2.1.4 大气的垂直结构	13
2.1.5 大气密度的变化	15
2.2 空间环境	15
2.2.1 引力场和微重力	16
2.2.2 真空	16
2.2.3 电离层	16
2.2.4 磁场与磁层	17
2.2.5 高能粒子辐射环境	19
2.2.6 微流星体和空间碎片	21

2.2.7 行星际空间环境	22
2.3 空间环境对航天器的影响	22
2.4 原子氧对航天器表面的剥蚀作用	23
2.5 高能带电粒子环境对航天器的影响	24
2.5.1 高能带电粒子环境	24
2.5.2 高能带电粒子环境对航天器的影响	25
2.6 空间等离子体环境对航天器的影响	27
2.6.1 航天器充电	27
2.6.2 太阳电池阵	28
2.7 流星体和空间碎片对航天器的影响	28
2.8 空间环境对航天器影响的对策	29
2.9 空间环境监测和警报	31
2.9.1 空间环境监测	31
2.9.2 空间环境警报	32
2.10 利用空间环境直接为航天工程服务	32
第3章 航天器运行轨道	33
3.1 太空飞行与大气层内飞行的区别	33
3.2 轨道基础	33
3.2.1 航天器轨道速度	33
3.2.2 卫星轨道周期	35
3.2.3 轨道平面倾角	36
3.3 椭圆轨道	37
3.4 卫星的圆轨道和椭圆轨道的数学模型	37
3.4.1 卫星的圆轨道	37
3.4.2 椭圆轨道	38
第4章 航天器任务分析	40
4.1 空间几何学的限制	40
4.1.1 卫星相对地球表面的运动	40
4.1.2 卫星仰角	42
4.1.3 地面覆盖区域(可见区域)	43
4.1.4 通信卫星信号传输时间	44
4.2 一般轨道	45
4.2.1 低轨道	45
4.2.2 中高度圆形地球轨道	46
4.2.3 Molniya 轨道	47
4.2.4 Tundra 轨道/冻土带轨道	47

4.2.5	地球同步轨道	47
4.2.6	太阳同步轨道	48
4.2.7	拉格朗日点	49
4.3	卫星仰角与地面覆盖范围的关系	50
4.3.1	卫星仰角	50
4.3.2	卫星的覆盖区	50
4.4	太空机动	51
4.4.1	在同一轨道面内的机动	52
4.4.2	改变轨道形状	52
4.4.3	改变圆形轨道的高度	53
4.4.4	改变轨道周期	54
4.4.5	在同一轨道面内改变卫星的相对位置	55
4.4.6	改变轨道面的机动	55
4.4.7	改变轨道倾角的机动	56
4.4.8	匀速旋转轨道面	57
4.4.9	卫星脱离轨道的机动	58
4.4.10	再入加热效应	59
4.4.11	轨道保持	60
4.5	太空机动技术细节	61
4.5.1	改变轨道形状的机动	61
4.5.2	圆形轨道之间的机动	61
4.5.3	改变卫星的轨道周期	62
4.5.4	改变轨道上升角	63
4.5.5	保持轨道上升角转动轨道面	63
4.5.6	基本的旋转	63
4.5.7	脱轨机动	63
4.5.8	轨道保持	64
第 5 章	结构与机构分系统	65
5.1	航天器结构功能及组成	65
5.1.1	结构功能	65
5.1.2	结构组成	65
5.2	航天器机构功能及组成	68
5.2.1	机构功能	68
5.2.2	机构组成	69
5.3	航天器结构与机构材料	76
5.3.1	航天器结构材料要求	76
5.3.2	金属合金	78

5.3.3	复合材料	79
5.3.4	复合材料与金属材料性能比较	80
5.3.5	材料的选择	82
5.4	航天器结构与机构研制流程	83
5.5	航天器结构设计、分析及试验验证	85
5.5.1	结构设计要求	85
5.5.2	结构设计原则	86
5.5.3	载荷确定	87
5.5.4	结构分析	88
5.5.5	结构试验验证	92
5.6	航天器机构设计、分析及试验验证	94
5.6.1	机构设计要求	94
5.6.2	设计原则	95
5.6.3	机构分析	95
5.6.4	机构试验验证	97
第 6 章	电源分系统	98
6.1	概述	98
6.1.1	电源分系统的定义与功能	98
6.1.2	电源分系统分类	98
6.1.3	电源分系统的基本组成	99
6.1.4	电源分系统设计的重要性	100
6.1.5	航天器电源分系统的可靠性	101
6.2	发电技术	103
6.2.1	能源转换器件及发电装置的选择	103
6.2.2	发电装置	104
6.3	储能技术	110
6.3.1	储能技术简介	110
6.3.2	蓄电池组的几个参数	111
6.3.3	镉镍蓄电池	111
6.3.4	氢镍蓄电池	113
6.3.5	锂离子蓄电池	118
6.4	电源控制技术	120
6.4.1	太阳能电池阵/蓄电池组联合电源的基本配置	120
6.4.2	电源控制装置功能和组成	121
6.4.3	一次电源母线	121
6.4.4	太阳能电池阵的功率调节	123
6.4.5	蓄电池组放电控制和功率调节	124

6.4.6	蓄电池组充电控制和功率调节	125
6.4.7	电源管理	129
6.5	电源变换器	133
6.5.1	电源变换器的功能和配置	133
6.5.2	电源变换器的分类	133
6.5.3	DC/DC 电源变换器	134
6.5.4	航天器电源变换器的设计	136
6.6	太阳电池	136
6.6.1	伏安特性	137
6.6.2	温度特性	139
6.6.3	太阳光强效应特性	139
6.6.4	太阳电池阵	140
6.7	一次电源总体设计	145
6.7.1	蓄电池组参数分析	145
6.7.2	太阳电池阵分析	148
第 7 章	热控分系统	150
7.1	航天器热控技术	151
7.1.1	被动热控技术	151
7.1.2	主动热控技术	158
7.1.3	常用的热控技术	160
7.2	航天器热控分系统的设计	161
7.2.1	热设计任务及原则	161
7.2.2	热控分系统方案设计	164
7.2.3	热分析计算	166
7.3	航天器热控分系统试验	167
7.3.1	部件热试验	167
7.3.2	整星热平衡试验	167
7.3.3	气动加热试验和整星地面调温试验	169
第 8 章	推进分系统	170
8.1	航天器推进系统定义、用途及分类	170
8.1.1	定义	170
8.1.2	用途	170
8.1.3	分类	171
8.2	特点与要求	172
8.2.1	特点	172
8.2.2	要求	173

8.3	航天器推进系统比较与选用原则	174
8.3.1	系统比较	174
8.3.2	推进系统确定方法	176
8.3.3	输送系统及推进剂量确定	177
8.4	中国“神舟”飞船推进系统	178
8.4.1	任务与功能	178
8.4.2	推进分系统组成和特点	179
8.4.3	推进分系统的故障模式、检测与处理对策	190
8.5	典型卫星推进系统	191
8.5.1	卫星用小推力推进系统类型	191
8.5.2	双组元统一推进系统(中国典型卫星推进系统)	194
8.5.3	双模式推进系统	195
8.5.4	复合式推进系统	196
第9章	姿态控制	197
9.1	引言	197
9.1.1	对卫星平台的影响	197
9.1.2	对有效载荷的影响	198
9.1.3	应用领域	198
9.2	姿态控制系统的要求	198
9.3	姿态参数	199
9.3.1	参考坐标系	199
9.3.2	方向余弦矩阵	200
9.3.3	欧拉角	200
9.3.4	四元数	201
9.4	姿态动力学	201
9.4.1	姿态运动学与动力学	201
9.4.2	扰动力矩	202
9.5	姿态确定和控制	204
9.5.1	姿态确定	204
9.5.2	姿态控制	205
9.6	姿态敏感器	206
9.6.1	通用的姿态敏感器	206
9.6.2	星敏感器	207
9.6.3	太阳敏感器	209
9.6.4	地球敏感器	210
9.6.5	磁强计	211
9.6.6	陀螺仪	213

9.6.7 全球导航卫星系统的姿态确定	216
9.7 姿态控制的执行器	217
9.7.1 执行器介绍	217
9.7.2 反作用轮、动量轮、控制力矩	218
9.7.3 姿态控制推力器	220
9.8 姿态控制系统的验证	221
9.8.1 解析验证	222
9.8.2 软件仿真	223
9.8.3 闭环硬件测试	223
9.8.4 气浮试验台	224
第 10 章 数据管理分系统	225
10.1 星上数据和信息管理	225
10.1.1 与普通地面设备的不同	226
10.1.2 数据管理分系统主要功能	227
10.1.3 数据管理分系统的组成	229
10.1.4 数据和信息管理发展趋势	229
10.1.5 互连拓扑结构	232
10.2 星载计算机	233
10.2.1 可编程门阵列和片上系统	234
10.2.2 计算机的太空应用	235
10.3 计算机软件	236
10.3.1 软件出现的问题	237
10.3.2 降低软件复杂度实例	238
10.3.3 软件功能和要求	238
10.3.4 实时程序设计	240
10.4 可靠性	241
10.4.1 处理模块内部错误	242
10.4.2 利用冗余模块处理模块外部错误	243
10.4.3 自检对	244
10.4.4 构造容错系统	244
10.5 数据管理分系统技术发展方向	246
第 11 章 遥测遥控分系统	247
11.1 概述	247
11.2 遥测遥控系统结构	248
11.2.1 系统组成	248
11.2.2 与其他分系统的关系	248

11.3	遥测分系统	249
11.3.1	遥测系统的组成	250
11.3.2	遥测系统的工作原理	251
11.3.3	遥测的作用和特点	253
11.3.4	遥测系统的分类	255
11.3.5	遥测系统的体制	258
11.4	遥控分系统	263
11.4.1	遥控系统的组成和工作原理	263
11.4.2	遥控的作用和特点	266
11.4.3	遥控系统的分类	266
11.4.4	系统主要技术指标	267
11.4.5	PCM 遥控	268
11.4.6	分包遥控	271
11.5	航天测控网	273
11.5.1	航天测控网的组成	273
11.5.2	航天测控地面系统	274
11.5.3	航天测控地面站	275
11.5.4	中国的航天测控网	276
第 12 章	新概念航天器	278
12.1	机器人航天员	278
12.1.1	简介	278
12.1.2	机器人航天员的先进性	279
12.1.3	机器人航天员的初期实验	281
12.1.4	R2 的应用模式与未来	283
12.2	小卫星及其编队飞行	284
12.2.1	现代小卫星的分类及发展模式	284
12.2.2	现代小卫星发展的若干问题分析	285
12.2.3	星群飞行的技术特征与模式	287
12.2.4	未来展望	288
12.3	捕获小行星的航天器	288
12.3.1	项目背景概述	289
12.3.2	捕获小行星的任务规划	290
12.3.3	目标小行星	290
12.3.4	航天器总体设计方案	291
12.3.5	小结	292
12.4	模块化分离卫星	292
12.4.1	模块化分离卫星的产生和目的	293

12.4.2	模块化分离卫星的研制计划和技术特征分析	294
12.5	未来 NASA 的群卫星系统分析与展望	296
12.5.1	群智能技术	296
12.5.2	群卫星系统	297
12.5.3	ANTS 系统的载荷配置及体系结构	298
12.5.4	小结	299
12.6	天基纳型镜群	299
12.6.1	基于航天器群建立的“天基镜群”	300
12.6.2	“天基镜群”的性能分析	301
12.6.3	“天基镜群”与“引力拖拉机”的比较	301
12.6.4	“天基镜群”的可控性和安全性	302
12.6.5	小结	302
	参考文献	303

第 1 章 概 述

1.1 什么是航天器总体设计

“航天器总体设计”中的“总体设计”一词是中国航天之父钱学森给出的定义，英文是“System Engineering”，所以学术界又称“航天总体设计”为“航天器系统工程”。

什么是“总体设计”或“系统工程”？钱学森说它是一种科学方法，美国学者说它是一门科学，还有专家说它是一门特殊工程学，但大多数科学家认为它是一种管理技术。

航天器总体设计技术是根据用户需求在航天器研制和飞行过程中与总体紧密相关的设计技术的统称。具体来说就是根据用户的特定任务要求，对航天器功能和总体技术指标进行综合论证；协调确定与运载火箭、发射场、测控网和地面应用等其他系统之间的接口和约束条件；分析和选择有效载荷的配置；选择和设计能够实现该任务的飞行轨道；完成总体技术方案和航天器的构型设计；在总体统筹和优化的基础上，确定各分系统的研制技术要求；完成结构与机构、热控制、综合电子等与总体密切相关的分系统设计和试验；确定系统集成方案，完成总装设计、总体电路设计以及总装集成后的电性能测试方案制定和实施；制定部件和系统级环境试验条件、地面验证试验方案和航天器建造规范等。

航天器总体设计技术是一项多学科、多专业交叉与综合的系统工程技术，在航天器研制和应用中占有重要地位，其技术水平不但对航天器总体水平、研制周期、研制经费起着重要作用，而且直接关系到航天器总体性能及其总体技术指标先进性、可靠性、安全性和航天器的在轨工作寿命。

1.2 “航天器总体设计”课程的特征

“航天器总体设计”课程以航天器系统为基础，主要论述航天器系统级方面的问题，所涉及的对象是工程大系统，所涉及的知识深度局限于设计最优大系统需要，所涉及的知识领域包含机、光和电等十几项技术的交叉科学。所以，“航天器总体设计”课程是培养航天器设计领军人才的专业课。

从理论角度看，航天器总体设计属于系统工程范畴，涉及的对象是工程大系统。从航天任务角度看，航天器总体设计是探索、开发和利用太空以及太空以外天体的综合性工程技术，集诸多科学领域之大成，它的发展又反过来促进各个学科领域向前发展。

“航天器总体设计”课程的内容包括航天任务分析、航天器环境分析、总体设计概

述、总体方案设计、姿态与轨道控制系统、轨道动力学、运载器、地面测控站、通信系统、电源系统、结构与机构、电磁兼容性、地面测试和产品可靠性等。所以，不难看出，“航天器总体设计”课程的目标是使学生通过本课程学习，基本了解航天器总体方案设计的方法，初步具备在任务分析基础上构思航天器总体方案的能力。

1.3 任务与载荷

1.3.1 载荷的种类

航天活动是探测研究太空环境和利用开发太空资源的重要手段，航天器则是直接探测研究太空环境和利用开发太空资源的主要工具。发展航天技术、研制和发射航天器的任务和目的，就在于开发信息、物质和能量类产品，以满足人类文明进步和社会日渐繁荣的需求。

利用航天器开发信息类产品，包括获取和传输太空环境信息、获取和传输地球和大气层系统环境信息、转发或发送各种无线电信息等，可以完全用仪器、设备或装置等物质性载荷以自动化方式进行。

因此，航天器都载有用于获取、传输或转发、发送信息的物质性有效载荷。利用航天器开发物质类和能量类产品要比开发信息类产品困难得多，也复杂得多。

有效地、成规模地开发物质类和能量类产品，虽然离不开物质类有效载荷，但在现今和可以预见的未来还很难或不宜全部以自动化方式实现，而需要人到达太空现场参与进行。

这正是载人航天器得以发展的缘由。载人航天器上载有航天员，而人是世间万物中最宝贵的因素。因此，载人航天器虽然会装载物质性有效载荷，但其最重要的有效载荷则为执行航天任务的人——航天员。

从上述可见，航天器的有效载荷从大的方面可分为航天员和物质性有效载荷两类。其中，作为载人航天器的主要有效载荷——航天员，并非单指航天员本身，而是由航天员和一定的装备(如航天服、必要的工具等)组成的一个能从事航天活动的系统。

作为航天器必备的物质性有效载荷视航天任务的不同而异，在现阶段大体上分为进行科学探测的仪器和科学实验的设备、获取地球和大气层系统反射和辐射(发射)电磁信息的遥感设备、转发无线电信息的通信设备、发送定位信息的导航设备等几种，今后还可以有批量生产特种材料和药物的设备、发送电力的装置等。它们中的每一种都是由若干个成分组成的复杂系统。例如，遥感器可分为结构、光学、电控、存储和传输等几个分系统。

1.3.2 载荷的地位

位于太空中的航天器上的有效载荷，必须由航天器提供能量、信息、物质和创造适当的人工环境、条件，才能在高真空、强辐射、超低温背景和冷热交变等严峻的太空环

境下可靠和有效地工作。航天器上用于保证与支持有效载荷工作的仪器、设备和系统称为航天器的平台系统。

航天器平台各组成部分彼此也相互支持。航天器的有效载荷和平台组合成为一个整体。若把航天器视作一级系统,则其包括有效载荷和平台两个二级系统,而平台又由结构系统、热控系统、姿态控制系统、推进系统、遥测测控系统、电源系统、数据管理系统等(如果是载人航天器,还包括返回着陆系统、航天员生命保障系统、仪表照明系统、航天员应急救援系统)组成。

1.3.3 载荷的角色

航天器在太空中完成任务、实现功能的标志为能产生符合设计要求的输出。航天器的有效载荷的输出,航天器平台内的各分系统一般是从不同的角度为产生直接输出的有效载荷或平台内其他分系统提供服务与支持的。

换言之,航天器的性质和功能主要是由有效载荷决定的。从这个意义上讲,有效载荷又是航天器的核心,在航天器设计中应起主导作用。有效载荷在航天器设计中的主导作用,要求组成航天器平台的各分系统以满足有效载荷的需要作为它们最基本的设计要求。当然,有效载荷对平台各分系统提出的设计要求,应是在航天器系统总设计师主持下,经有效载荷和平台各分系统充分协商后确定的,应符合航天器功能实现和整体优化的原则。有效载荷在航天器设计中的主导作用,决不意味着有效载荷的要求高于一切、有效载荷的设计师和设计单位高人一等。实际上,航天器有效载荷离开平台各分系统的保证与支持,或不能工作,或不能产生正常的输出;有效载荷设计单位离开平台各分系统设计单位的配合与协作,也完不成或很难完成研制任务。

因此,作为在航天器设计中起主导作用的有效载荷设计单位,务必谨慎,务必尽可能地考虑平台各分系统的要求。就是说,航天器有效载荷和平台双方,均应以完成整个航天器的任务作为共同的目标。

1.4 航天系统工程

航天系统包括航天器(航天器包含卫星)、运载火箭、航天发射场、航天测控网、应用系统组成的完成特定航天任务的工程系统(图 1.1)。其中应用系统指航天器的用户系统,一般是地面应用系统,如 GPS 接收机、气象预报等。

航天系统是现代典型的复杂工程大系统,具有规模庞大、系统复杂、技术密集、综合性强,以及投资大、周期长、风险大、应用广泛和社会经济效益可观等特点,是国家级大型工程系统。组织管理航天系统的设计、制造、试验、发射、运行和应用,要采用系统工程方法,在航天工程实践中形成航天系统工程,进一步丰富和发展系统工程的理论和方法。完善的航天系统是一个国家科技水平和经济实力的重要标志,目前世界上只有为数不多的国家拥有这种实力,而中国就是其中之一。