



空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

航天器结构与机构

SPACECRAFT STRUCTURES AND MECHANISMS

陈烈民 编著

 中国科学技术出版社

- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天器结构与机构

SPACECRAFT STRUCTURES AND MECHANISMS

陈烈民 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天器结构与机构/陈烈民编著.—北京：中国科学技术出版社，2005.1

ISBN 7-5046-3967-2

I. 航... II. 陈 ... III. ① 航天器-结构分析②航天器-构造
IV. ① V414.1②V423

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 002475 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:30 字数:550千字

2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

印数:1-1500册 定价:42.00元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书较全面地说明了航天器结构与机构的技术基础,包括它们的环境条件、材料、设计、分析、制造、试验和可靠性,重点是阐述航天器结构与机构的设计和分析技术。

全书共18章,可以分为四个部分:

第1章到第3章说明了航天器结构与机构的基本概念、功能、类型、研制流程以及相关的环境条件和应用的材料。

第4章到第11章为航天器结构的设计和分析,重点阐述设计和分析的原理和方法,并详细介绍了较典型的航天器结构,包括杆系结构、蜂窝夹层板结构、中心承力筒结构、密封舱结构和防热结构。

第12章到第15章为航天器机构的设计和分析,重点阐述设计和分析的原理和方法,并详细介绍了机构的主要装置以及太阳翼机构和连接分离机构。

第16章到第18章为航天器结构与机构的可靠性、制造和试验,说明了它们的一些基本概念和与设计有关的要求。

作者简介

陈烈民 1936年生,研究员,毕业于上海交通大学机械系和清华大学附设工程力学研究班。1958年起先后从事机械设计、力学研究、航天器结构试验、航天器结构设计和分析以及航天器机构设计等工作。

责任编辑 崔 玲
责任校对 杨京华
 韩 玲
封面设计 王 进
责任印制 王 沛
法律顾问 宋润君

总 序

我国航天技术走过了 40 多年的光荣历程，正面临着 21 世纪更加蓬勃发展的形势，需要人才，需要知识。

空间飞行器即航天器，包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科，它所涵盖的知识面很宽，涉及光、机、电、热和系统工程等，是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求，同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此，本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识，在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员，他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中，理论与实践密切结合，使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的，相信它不仅是一套不错的研究生教材，能够为培养高级航天技术人才服务；同时又是一套优秀的学术专著，将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2005年1月

前 言

航天器结构与机构是航天器中一个较大的分系统,它对保证航天器任务的完成起到很重要的作用。随着航天器技术的发展,航天器结构技术已经比较成熟和完善;另外,随着航天器上各种运动功能的增多,航天器机构技术也日益得到关注。因此,目前迫切需要对航天器结构与机构技术进行较全面系统的总结和介绍。由于国内尚没有专门说明航天器结构与机构的书籍,本书的出版也许有助于弥补这方面的缺陷。

航天器结构与机构技术涉及的范围较广,包括设计、分析、制造、试验、环境条件、材料、可靠性等相关内容,本书仅一般性地说明上述内容,重点是阐述航天器结构与机构的设计和分折,特别是卫星结构与机构的设计和分折。在本书编写过程中,得到了航天器结构与机构设计、分析、制造和试验各方面专家的支持和帮助,书中有不少内容取材于由多位航天器结构与机构专家共同编写的《卫星结构设计与分析》一书。本书的出版也得到了中国空间技术研究院有关领导和同事们的支持和帮助,在此一并表示感谢。

本书在总结过去国内外航天器结构与机构研制经验的基础上,力求全面和准确地介绍航天器结构与机构研制的技术。但随着航天器技术的快速发展,航天器结构与机构技术在不断更新和完善,加之编者的专业水平和专业范围有限,书中难免存在不少不足和错误,敬请广大读者批评指正。

本书主要是作为中国空间技术研究院飞行器设计专业研究生的教材,也可供从事航天器结构与机构研制的工程技术人员参考阅读,还可作为高等院校师生的教学或培训教材。

陈烈民

2005年1月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航天器结构与机构的基本概念	2
1.1.1 航天器结构的基本概念	2
1.1.2 航天器机构的基本概念	2
1.1.3 航天器结构和机构的关系	3
1.2 航天器结构与机构的功能	4
1.2.1 航天器结构的功能	4
1.2.2 航天器机构的功能	5
1.3 航天器结构与机构的类型	7
1.3.1 航天器结构的类型	7
1.3.2 航天器机构的类型	10
1.4 航天器结构与机构的研制	13
1.4.1 可行性论证阶段	15
1.4.2 方案阶段	15
1.4.3 初样阶段	16
1.4.4 正样阶段	19
第 2 章 航天器的环境条件和载荷	20
2.1 航天器的环境条件	20
2.1.1 地面环境	20
2.1.2 发射环境	23
2.1.3 轨道环境	25
2.1.4 再入环境	27
2.2 航天器的载荷	28
2.2.1 载荷性质	28
2.2.2 载荷来源	30
2.2.3 载荷分析	33
2.2.4 载荷的确定	34
第 3 章 航天器结构材料	38
3.1 概述	38

3.1.1	结构材料的重要性	38
3.1.2	空间环境对结构材料的影响	39
3.1.3	对结构材料性能的要求	40
3.2	金属材料	42
3.2.1	铝合金	42
3.2.2	镁合金	44
3.2.3	钛合金	45
3.2.4	金属材料的应用和发展	47
3.3	复合材料	50
3.3.1	复合材料的特点	50
3.3.2	单向复合材料的性能	52
3.3.3	层合复合材料的性能	56
3.3.4	复合材料的应用和发展	57
3.4	结构材料的选择	60
3.4.1	材料选择原则	60
3.4.2	材料性能指数	61
3.4.3	复合材料与金属材料性能的比较	63
第4章	航天器结构设计	66
4.1	航天器结构设计的特点和原则	66
4.1.1	设计特点	66
4.1.2	设计原则	67
4.2	航天器结构设计的技术要求	69
4.2.1	基本要求	71
4.2.2	强制要求	71
4.2.3	导出要求	72
4.3	航天器结构的方案设计	73
4.3.1	构型设计	73
4.3.2	结构设计要求的确定	74
4.3.3	结构形式、材料和连接方式的选择	76
4.3.4	结构的初步设计和分析	79
4.3.5	结构设计方案的比较和确定	79
4.4	航天器结构的详细设计	81
4.4.1	结构设计参数的确定	81
4.4.2	结构设计工程图样的制定	83

4.4.3	相关技术文件和规范的建立	84
4.5	结构强度设计	84
4.5.1	结构强度准则	85
4.5.2	结构强度验证	89
4.6	结构优化设计	92
4.6.1	优化设计的基本概念	92
4.6.2	优化计算方法	95
4.6.3	结构优化设计方法	100
4.7	复合材料设计	102
4.7.1	复合材料设计的重要意义	102
4.7.2	层合复合材料性能的计算	103
4.7.3	复合材料设计的方法	108
4.7.4	“零膨胀系数”材料设计	109
4.8	计算机辅助设计	111
4.8.1	零件设计和装配	112
4.8.2	工程图样的设计	114
第5章	航天器结构力学理论基础	115
5.1	结构力学理论	115
5.1.1	弹性力学理论	116
5.1.2	梁理论	118
5.1.3	杆系理论	121
5.1.4	板壳理论	127
5.1.5	薄壁杆件理论	134
5.1.6	复合材料结构力学理论	138
5.1.7	稳定理论	140
5.1.8	热弹性理论	143
5.2	振动理论	146
5.2.1	单自由度系统的自由振动	146
5.2.2	单自由度系统的受迫振动	148
5.2.3	多自由度系统的振动	151
5.3	结构有限元法	155
5.3.1	有限元法的基本概念	155
5.3.2	有限元法分析的过程	156
5.3.3	有限单元特性的确定	159

5.3.4	有限元法基本方程	161
第6章	航天器结构分析	165
6.1	结构分析模型的建立	165
6.1.1	结构理想化	166
6.1.2	计算机分析模型的建立	168
6.1.3	计算机分析模型的检验	171
6.2	结构静力分析	172
6.2.1	平衡问题分析	172
6.2.2	稳定问题分析	174
6.2.3	热弹性问题分析	176
6.3	结构模态分析	177
6.3.1	模态分析的目的和作用	177
6.3.2	模态分析方法	178
6.3.3	模态特征分析	180
6.3.4	提高模态分析准确性的手段	184
6.3.5	模态分析实例	184
6.4	结构动态响应分析	185
6.4.1	结构频率响应分析	186
6.4.2	结构随机振动分析	189
6.4.3	结构声振响应分析	195
第7章	杆系结构	200
7.1	概述	200
7.1.1	杆系结构的功能	200
7.1.2	杆系结构的设计要求	201
7.1.3	杆系结构的形式	201
7.2	杆系结构的设计和分析	202
7.2.1	整体构型设计	202
7.2.2	杆系结构的材料选择	203
7.2.3	杆件设计	204
7.2.4	接头设计	205
7.2.5	杆系结构分析	206
7.2.6	杆系结构的布局优化设计	207
7.3	杆系结构的应用	210

第 8 章 蜂窝夹层板结构	215
8.1 概述	215
8.1.1 蜂窝夹层板结构的功能和特点	215
8.1.2 蜂窝夹层板结构的设计要求	216
8.2 蜂窝夹层板的材料和规格	217
8.2.1 面板	217
8.2.2 蜂窝芯子	218
8.2.3 胶黏剂	221
8.3 蜂窝夹层板的设计和分析	222
8.3.1 蜂窝夹层板的力学性能特性和破坏模式	222
8.3.2 蜂窝夹层板的设计	224
8.3.3 蜂窝夹层板的分析	225
8.3.4 蜂窝夹层板的连接设计	228
8.4 蜂窝夹层板结构的应用	231
第 9 章 中心承力筒结构	233
9.1 概述	233
9.1.1 中心承力筒的功能和特点	233
9.1.2 中心承力筒的设计要求	234
9.1.3 中心承力筒的结构形式	235
9.2 桁条加筋中心承力筒的设计和分析	237
9.2.1 筒体设计	237
9.2.2 框设计	238
9.2.3 连接设计	241
9.2.4 分析计算	242
9.3 蜂窝夹层中心承力筒的设计和分析	244
9.3.1 筒体设计	244
9.3.2 连接设计	245
9.3.3 分析计算	247
9.4 中心承力筒结构的应用	248
第 10 章 密封舱结构	251
10.1 概述	251
10.1.1 密封舱结构的功能	251
10.1.2 密封舱结构的设计要求	252

10.1.3	密封舱结构的形式	252
10.2	密封舱结构设计和分析	254
10.2.1	舱体结构设计	254
10.2.2	舱体结构分析	256
10.2.3	舱门结构设计	259
10.3	密封装置设计	259
10.3.1	密封机理和方法	260
10.3.2	密封材料选择	261
10.3.3	密封圈设计	265
10.3.4	密封连接设计	267
10.4	密封舱结构的应用	269
第 11 章	防热结构	273
11.1	概述	273
11.1.1	防热结构的功能	273
11.1.2	防热结构的设计要求	274
11.1.3	防热结构的形式	275
11.2	吸热防热结构	275
11.2.1	机理和特点	275
11.2.2	设计和分析	277
11.2.3	防热材料	278
11.3	辐射防热结构	279
11.3.1	机理和特点	279
11.3.2	设计和分析	280
11.3.3	防热材料	283
11.4	烧蚀防热结构	284
11.4.1	机理和特点	284
11.4.2	设计和分析	285
11.4.3	防热材料	288
11.5	防热结构的应用	289
第 12 章	航天器机构的主要装置	294
12.1	释放装置	294
12.1.1	火工释放装置	295
12.1.2	无火药释放装置	309

12.2	展开装置	312
12.2.1	铰接展开装置	312
12.2.2	直线型展开装置	313
12.3	分离装置	321
12.3.1	弹簧和弹簧分离推杆	322
12.3.2	火工分离推杆	322
12.4	驱动装置	323
12.4.1	电机	324
12.4.2	齿轮	326
第 13 章	航天器机构设计	331
13.1	航天器机构设计的特点和原则	331
13.1.1	设计特点	331
13.1.2	设计原则	332
13.2	航天器机构设计的技术要求	334
13.2.1	一般设计要求	334
13.2.2	力矩(力)裕度	336
13.3	航天器机构设计的具体问题	339
13.3.1	压紧与释放机构设计	339
13.3.2	展开机构设计	341
13.3.3	连接与分离机构设计	345
13.3.4	指向机构设计	346
13.4	航天器机构的润滑设计	349
13.4.1	润滑设计的作用和要求	349
13.4.2	润滑材料	350
13.4.3	固体润滑膜的形成	351
13.4.4	固体润滑的应用设计	352
第 14 章	太阳翼机构	354
14.1	太阳翼构造	354
14.1.1	太阳电池阵构造	354
14.1.2	太阳翼的结构和机构	356
14.2	压紧与释放机构	359
14.2.1	压紧装置	360
14.2.2	释放装置	362

14.3	展开机构	363
14.3.1	板间铰链	363
14.3.2	根部铰链	366
14.3.3	绳索联动系统	367
14.4	太阳翼展开分析	370
14.4.1	展开运动分析	370
14.4.2	展开锁定时的冲击载荷分析	374
第 15 章	航天器连接与分离机构	375
15.1	星/箭连接与分离机构	375
15.1.1	爆炸螺栓式星/箭连接与分离机构	376
15.1.2	包带式星/箭连接与分离机构	379
15.2	飞船舱段连接与分离机构	381
15.2.1	轨道舱和返回舱之间的连接与分离机构	382
15.2.2	推进舱和返回舱之间的连接与分离机构	384
15.2.3	返回舱防热底部的连接与分离机构	384
15.3	空间对接机构	386
15.3.1	用途和功能	386
15.3.2	机构的类型	387
15.3.3	机构的应用实例	388
15.4	连接与分离机构分析	391
15.4.1	连接的预紧力分析	391
15.4.2	分离运动分析	394
第 16 章	航天器结构与机构可靠性	396
16.1	可靠性分析	396
16.1.1	故障模式影响分析	396
16.1.2	故障树分析	398
16.2	航天器结构的可靠性预计	400
16.2.1	数理统计基本知识	400
16.2.2	结构可靠性设计原理	402
16.2.3	结构可靠性预计方法	404
16.3	航天器机构的可靠性预计	405
16.3.1	机构可靠性框图的建立	405
16.3.2	机构可靠性预计方法	407

第 17 章 航天器结构与机构制造	408
17.1 概述	408
17.1.1 制造工艺的类型	408
17.1.2 制造特点	409
17.1.3 可生产性	410
17.2 金属材料零件制造技术	412
17.2.1 制造工艺方法及其选择	412
17.2.2 机械加工	414
17.2.3 成形	417
17.2.4 铸造	419
17.2.5 化铣	421
17.2.6 金属结构材料的制造工艺性能	422
17.2.7 设计和制造一体化	425
17.3 复合材料零件制造技术	426
17.3.1 复合材料制造工艺的特点	426
17.3.2 材料的准备	427
17.3.3 复合材料零件制造工艺方法及其选择	429
17.3.4 真空袋—热压罐成型方法	431
17.3.5 缠绕成型方法	432
第 18 章 航天器结构与机构试验	435
18.1 概述	435
18.1.1 航天器结构与机构的验证	435
18.1.2 试验的重要作用和特点	437
18.1.3 试验的类型	439
18.1.4 试验的设计	443
18.2 力学环境试验	444
18.2.1 静力试验	444
18.2.2 振动试验	447
18.2.3 声试验	451
18.3 机构功能试验	454
18.3.1 与机构功能有关的试验项目	454
18.3.2 太阳翼展开试验	456