



航天器结构

Spacecraft Structures

[荷] 雅各布·约布·维科尔 (Jacob Job Wijker) 著
董瑶海 周徐斌 满孝颖 张 娇 等译
杜 冬 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press



Springer

航天器结构

Spacecraft Structures

[荷] 雅各布·约布·维科尔(Jacob Job Wijker) 著
董瑶海 周徐斌 满孝颖 张 娇 等译
杜 冬 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-203号

图书在版编目(CIP)数据

航天器结构/(荷)雅各布·约布·维科尔(Jacob Job Wijker)著;董瑶海等译. —北京:国防工业出版社, 2017.1

书名原文:Spacecraft Structures

ISBN 978-7-118-10927-6

I. ①航… II. ①雅… ②周… III. ①航天器-结构设计 IV. ①V414.19

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第298368号

Spacecraft Structures by J. Jaap Wijker

Copyright © 2008 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media All Rights Reserved

本书简体中文由Springer授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 498 千字

2017年1月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

由于航天领域的特殊性,国内研究人员与国外同行们直接交流的机会不多。即便有,也是零星的针对个别单机产品或某一个具体问题的探讨,很难有全面系统深入的技术交流。并且由于语言障碍,以及双方在研制流程、管理方式等知识背景上的差异或技术保密方面的限制等,很多技术与对话停留在表面,难以深入到技术核心。当然,国内的研究人员很勤奋也很聪明,最终通过不断的试验以及吸取很多失败的教训,也能达到几乎与国外水平相当的工程能力,所以几十年来中国航天取得了骄人的成绩,但花费的成本不小,也走过不少弯路。

在全球信息化以及市场国际化的发展趋势下,及时了解世界航天强国的技术方法和研制实践,深入研究对手们的经验和不足,并积极与世界一流航天研究机构对标,不断缩小差距,可以有力地促进国内型号研制能力和技术研发能力的提高。

欧美等国的航天技术研究处于国际领先地位。他们的许多研究人员在总结工程研制实践的基础上出版了大量的研究专著。翻译并出版这些优秀著作应该是当前一个紧迫且极富现实意义的举措。

Spacecraft Structures 就是其中的专著之一。它较为系统地介绍了欧洲一些国家在型号研制管理、航天器结构专业的常用理论和经验方法等,是一本难得的既深入又全面介绍国外航天器结构设计经验的著作。上海卫星工程研究所的设计师在董瑶海总师的带领下,在繁重的型号研制任务之余,花费了很大力气研究了这本英文资料,并将其翻译成了中文,供国内同行们借鉴,相信他们辛勤的工作能够对国内航天型号研制产生积极的作用!

孟执中

FOREWORD 译者序

在型号研制过程中,经常需要收集并借鉴欧美等航天发达国家的研究成果和成功经验,消化和吸收他们的理论成果和设计方法,并取长补短为我所用,是促进国内航天器设计能力和水平提升的有效途径。

航天器结构是航天器系统中最为重要的分系统之一,它确定了航天器的构型、为有效载荷和各分系统仪器设备提供安装接口和支撑、承受和传递各种载荷(包括过载、振动、冲击、噪声及热载荷等),对航天器任务的圆满完成起到至关重要的作用。

随着航天器任务的精细化和复杂化,对航天器结构在承载能力、发射段振动响应控制水平以及在轨精度保证能力等都提出了比以往更高的要求。这对航天器结构设计人员的能力和水平也提出了新的、更高的要求。因而想到了翻译欧美国关于航天器结构设计方面的专著,供业内人士参考。

经过遴选,特别是型号一线设计师的推荐,我们选择了 *Spacecraft Structures* 一书。经了解本书的作者在欧洲航天研发单位和高校工作超过 35 年,对航天器结构设计具有独到的见解和丰富的经验。

在翻译过程中,译者了解并学习了欧洲航天系统在航天器结构设计的研制流程和研制方法。本书从载荷假设与环境条件、设计准则、设计细节及制造方法、材料选择、静力与动力分析、失效分析及承载能力、试验验证七大方面进行了详细论述,并在每一小节末及本书最后章节进行了算例分析。它不仅包括了国内通用的设计理论、仿真技术和试验方法,还介绍了随机振动、模态理论、冲击、疲劳、微流星及空间碎片防护等国内航天器结构设计中鲜有涉及的工程和理论方法。如航天器冲击响应的定量评估,国内研究起步较晚,也一直缺乏公认的方法,而本书在相关章节中,直接给出了欧洲和美国航天机构经过大量试验建立的冲击衰减经验公式。又如微流星防护,目前我国还未进行过月球以外的深空探测活动,对深空探测器微流星防护的数据和经验还相当缺乏,书中对微流星环境预估、冲击防护设计均有深入描述。再比如书中用大量篇幅介绍了子结构模态综合在航天器结构动力学仿真分析中的应用,而国内航天器结构分析工程师对此显然是不够重视的。凡此种种,不胜枚举。可以预见,书中的经验会对国内航天器研发能力的提升产生积极作用!

本书写作流畅,内容全面、实例丰富,特别注重理论与实践相结合,可作为航天器设计专业高年级本科生及研究生辅助参考书,也可以作为航天器结构研制科研人员的参考资料。

本书由董瑶海负责统稿;第1章~第4章由董瑶海翻译,第5章~第7章由周徐斌翻译,第8章~第11章由满孝颖翻译,第12章~第16章由张娇翻译,第17章~第21章由刘兴天翻译,第22章~第25章由李昊翻译,第26章~第29章由胡梦瑶翻译,杜冬对每一章进行了推敲和审定;张建刚、陈昌亚、石川千、王建炜、朱华、李庆、袁野等对书稿进行了校对。译者还特别感谢浙江大学朱卫秋院士、北京航空航天大学胡伟平和孟庆春老师、上海交通大学的张志谊和谌勇老师对随机振动、疲劳分析、模态分析及冲击等章节翻译的悉心指导。还要感谢国防工业出版社的肖姝编辑对本书的重要贡献。由于译者的水平有限,在对原文的理解和专业用语方面难免有不妥之处,敬请读者指正并原谅。

译者

2016年8月

第1章 概论	1
1.1 引言	1
参考文献	2
第2章 设计过程	3
2.1 引言	3
2.2 设计要求	3
2.3 设计规范	3
2.4 设计	4
2.5 设计控制	4
2.6 练习	5
第3章 运载火箭系统	6
3.1 引言	6
3.2 练习	7
参考文献	8
第4章 航天器分系统	9
4.1 引言	9
4.2 电源系统	9
4.3 姿态控制系统	10
4.4 数据系统	10
4.5 热控系统	10
4.6 通信系统	10
4.7 推进系统	11
4.8 结构系统	11
4.9 分系统之间的相互影响	11
参考文献	12
第5章 设计及安全系数	13
5.1 引言	13

5.2	术语	13
5.3	航天器的安全系数	16
5.4	练习	16
	参考文献	17
第6章	航天器设计载荷	18
6.1	引言	18
6.2	运输载荷系数	19
6.3	稳态载荷	20
6.4	动态载荷	21
6.5	声载荷	31
6.6	冲击载荷	38
6.7	静压力波动	43
6.8	微流星/空间碎片	43
6.9	练习	45
	参考文献	47
第7章	试验验证	49
7.1	引言	49
7.2	试验类型	49
7.3	试验目的	50
7.4	试验大纲	51
7.5	试验细则	51
7.6	试验模型	52
7.7	静力试验	52
7.8	振动/噪声试验	54
7.9	下凹	61
7.10	图解	69
7.11	西欧的试验设施	70
	参考文献	70
第8章	航天器结构设计	72
8.1	引言	72
8.2	确定航天器配置	73
8.3	航天器结构初样设计	75
8.4	承载结构基本设计	80
8.5	详细分析	84
8.6	航天器结构制造	87
8.7	试验	87

8.8 练习	88
参考文献	88
第9章 结构单元的强度和刚度	89
9.1 引言	89
9.2 杆件和桁架结构	90
9.3 梁的弯曲, Myosotis 方程	92
9.4 平台	103
9.5 结构板	103
9.6 旋转壳体:圆柱/圆锥	104
9.7 搭接接头应力	109
9.8 练习	110
参考文献	113
第10章 夹层结构	115
10.1 引言	115
10.2 芯子及蒙皮厚度的优化设计:夹层结构质量小	116
10.3 应力	117
10.4 夹层柱的失稳	119
10.5 圆柱的整体失稳	120
10.6 局部失稳	121
10.7 埋件	123
10.8 蜂窝芯子的力学性能	124
10.9 典型连接形式	124
10.10 练习	125
参考文献	125
第11章 有限元分析	127
11.1 引言	127
11.2 理论方法	127
11.3 数学模型	134
11.4 单元类型	135
11.5 自由度数量	135
11.6 连接	135
11.7 阻尼	135
11.8 改动	137
11.9 有限元模型的交付	137
11.10 练习	141
参考文献	143

第 12 章 刚度/柔度分析	144
12.1 引言	144
12.2 算例	144
12.3 单位力方法	146
12.4 简化刚度矩阵	146
12.5 单位位移	146
12.6 主方向	147
12.7 练习	149
参考文献	149
第 13 章 材料选择	150
13.1 引言	150
13.2 金属材料	150
13.3 复合材料	151
13.4 蜂窝芯子	153
13.5 材料选择的原则	153
参考文献	155
第 14 章 航天器质量	156
14.1 引言	156
14.2 结构质量	157
14.3 整星质量计算	158
14.4 练习	165
参考文献	165
第 15 章 固有频率估计	167
15.1 引言	167
15.2 静态位移法	167
15.3 Rayleigh 商	169
15.4 Dunkerley 法	171
15.5 练习	175
参考文献	178
第 16 章 有效模态质量	179
16.1 引言	179
16.2 强迫加速度	179
16.3 多自由度系统的模态有效质量	181
16.4 练习	188
参考文献	190

第 17 章	动态模型简化方法	191
17.1	引言	191
17.2	静力缩聚方法	192
17.3	Craig-Bampton 减缩模型	196
17.4	系统等效减缩扩展方法(SEREP)	198
17.5	结论	201
17.6	练习	202
	参考文献	203
第 18 章	动态子结构, 组件模态综合	205
18.1	引言	205
18.2	CMS 方法	206
18.3	练习	219
	参考文献	221
第 19 章	输出变换矩阵	222
19.1	引言	222
19.2	减缩自由-自由动力学模型	222
19.3	练习	227
	参考文献	227
第 20 章	耦合动态载荷分析	229
20.1	引言	229
20.2	有限元模型验证	230
20.3	练习	232
	参考文献	232
第 21 章	随机振动简化响应分析	234
21.1	引言	234
21.2	低频域内的随机振动	234
21.3	声学分析	245
21.4	练习	251
	参考文献	253
第 22 章	疲劳寿命预测	255
22.1	引言	255
22.2	Palgren-Miner 线性累积损伤准则	255
22.3	载荷-时间历程分析	256
22.4	正弦振动导致的失效	258
22.5	窄带随机振动导致的失效	260

22.6	网址	265
22.7	练习	265
	参考文献	267
第 23 章	冲击响应谱	268
23.1	引言	268
23.2	强迫加速度激励	269
23.3	冲击响应谱的数值计算:分段精确逼近法	270
23.4	结合冲击响应谱的响应分析	274
23.5	冲击响应谱和合成时间历程的匹配	281
23.6	练习	287
	参考文献	289
第 24 章	流星体和轨道碎片对航天器的损坏	291
24.1	引言	291
24.2	微流星和空间碎片环境	292
24.3	高速冲击损伤模型	296
24.4	碰撞概率	299
	参考文献	300
第 25 章	指定平均温度	302
25.1	引言	302
25.2	PAT 法	302
25.3	PAT 法用于简化太阳阵的热计算	305
25.4	练习	314
	参考文献	315
第 26 章	热弹性应力	316
26.1	引言	316
26.2	材料属性	320
26.3	练习	321
	参考文献	322
第 27 章	热、湿膨胀系数	323
27.1	引言	323
27.2	热膨胀系数	323
27.3	湿膨胀系数(CME)	325
第 28 章	通气孔	326
28.1	引言	326
28.2	通气孔	326

参考文献	328
第 29 章 举例	329
29.1 引言	329
29.2 固有频率近似	329
29.3 悬臂梁设计算例	331
29.4 等效动力学系统	336
29.5 随机振动	338
29.6 SIMPSAT 卫星的强度和刚度分析	347
29.7 用卡氏第二定理计算刚度	355
29.8 悬臂梁的模态有效质量	357
29.9 模态综合法 (Craig-Bampton 方法)	359
参考文献	362
英汉术语对照	363

1.1 引 言

空间飞行器自诞生以来,便引起学术界和工程界的广泛关注,各国学者对空间飞行器进行了大量的研究,并取得了卓有成效的研究成果。太空探索是人类长久以来的梦想,但由于地球大气层阻碍了大部分的空间辐射,在地面进行太空研究存在诸多限制,而通过空间飞行器从太空来研究行星、恒星和宇宙更加切实可行,因此空间飞行器对太空研究的发展极为重要。

因为太空的无重力环境,进行科学研究也更容易产生新发现。

和其他众多方式相比,从太空研究地球效率更高。对环境变化乃至天气演化的研究都可以利用天基观测这一高效而廉价的方式进行。

空间飞行器的应用已经成为了人们日常生活的一部分,例如,各种气象卫星、环境监测卫星和通信卫星,无不改变着人们的生活方式。其中,通信卫星通常位于赤道上空 36000km 的地球静止轨道上。

空间飞行器的应用也产生了新的技术和经济增长点,例如,大量通信卫星的研制需求以及对运载火箭的发射需求。

空间飞行器技术具有高度综合性和创新性。它涉及许多技术领域,其中一些将会在本书中详细说明。

本书对“空间飞行器”专业领域的全面描述,旨在对空间飞行器的设计、建造和分析方面做一些介绍。包括卫星、运载火箭在内的空间飞行器可分为载人 and 无人两个明显不同的类别。国际空间站 (ISS)、俄罗斯和平号空间站 (MIR)、美国航天飞机以及欧洲的空间实验室都是载人空间飞行器,而提供广播和电视服务的通信卫星、提供天气信息的气象卫星都是无人空间飞行器。本书并没有覆盖所有载人/无人空间任务、空间飞行器和运载火箭 [Fortescue 1990, Griffin 1991, Marty 1994, Wertz 1999],而是将重点放在无人空间飞行器,尤其是航天器的研制,而不是运载火箭的研制。

航天器按它需要执行的任务可分为以下几类:

- 通信卫星 (TELECOM, INTELSAT, DRS)

- 气象卫星 (METEOSAT, GOES, NOAA)
- 海事卫星 (INMARSAT)
- 天文卫星 (ANS, IRAS, ISO, Hubble Space Telescope (HST))
- 军事卫星 (espionage)
- 地球观测卫星 (SPOT, ERS1, Landsat, RADARSAT, ENVISAT)
- 科学卫星 (EURECA, GIOTTO, CLUSTER)
- 载人飞行器 (航天飞机, 空间实验室, “和平”号空间站, 国际空间站)
- 微重力卫星 (EURECA)

围绕着地球、太阳系其他行星,或者可能更远轨道运行的航天器是一个包含运载火箭(将航天器送入指定轨道)、地面基站(提供通信)在内复杂大系统的一部分。本书仅讲解航天器结构设计方面的内容。

一般说来,航天器可分为两部分:

- 有效载荷
- 服务平台

有效载荷执行预设的任务,如通信卫星的广播通信。空间飞行器的服务平台要包含若干个分系统,如姿态控制、推进、电源、热控、结构、可展开机构(如太阳阵)和遥测遥控等分系统。

Öry [Öry 1991]指出,在航天器结构研制过程中几个主要的部分环节较为重要:

- 载荷设定、载荷环境
- 设计要求
- 设计细节、研制特点、制造方法
- 材料选择
- 静态和动态分析
- 失效分析、承载能力
- 验收级与鉴定级试验

上述内容环环相扣,本书将讨论航天器设计中所有这些环节。

参 考 文 献

- Fortescue, P. and Star, J., 1990, Spacecraft Systems Engineering, Wiley, ISBN 0 471 92794 5.
- Griffin, D. G., and French, J. R., Space Vehicle Design, AIAA Education Series, 1991, ISBN 0-930403-90-8.
- Marty, D., 1994, Systems Spatiaux, Conception et Technology, Masson, ISBN 2-225-84460-7.
- Öry, H., 1991, Structural Design of Aerospace Vehicles I, Space Course, Institut für Leichtbau, RWTH, Aachen.
- Wertz, J. and Larson, J. W., 1999, Space Mission Analysis and Design, third edition, Space technology Library, ISBN 1-881883-10-8.

第2章 设计过程

2.1 引言

航天器研制生产往往具有严格的时间节点要求,同时又要保证一次成功,这导致了其设计和开发具有许多鲜明特征。

对航天器进行的一系列测试和考核要求决定了航天器的最终设计。这些最终设计都体现在图纸和其他资料中,它们共同定义了航天器最终产品和飞行实物的状态。

2.2 设计要求

设计要求(如对质量、刚度、外形等指标的要求)是一切设计的源头。招标投标阶段一般要为设计要求可能的改动留有适应的空间。针对一些分系统如太阳阵,还要根据整星设计要求分解出分系统的技术要求。

2.3 设计规范

设计过程的首要工作就是分解得到设计指标。完成这一步需要考虑下列需求:

- 与主任务相关的功能
- 力学载荷
- 环境因素
- 材料特性
- 重量和质心平衡
- 可靠性与寿命
- 安全性要求
- 可互换性、可维修性和可维护性

- 易于管理
- 各个需求因素间的互相干扰

根据设计规范就可以制定设计开发策划书,并定义工作包^①。工作包描述了需要完成的工作内容、时间进度和可用的资源。工作包也包括了必要的输入和期望的输出。

2.4 设计

根据设计开发策划书,通过设计研究、计算机仿真、分析、权衡和详细的试验,以及对试验模型的设计和测试,可对设计技术要求进行验证和完善。

设计过程中的每一阶段,都会将设计固化在产品文件(图纸、工艺卡)、测试大纲和细则中,复杂程度逐步增加。

对试验模型的测试和研究是设计过程中的重要内容。可能这些模型并不是完整的,大多数情况下,会用到以下四部分:

- 结构模型(SM,动力学响应)
- 热模型(TM,真空中的热响应)
- 电路模型(EM,所有联试系统、地面测试设备或地面电气支持设备(Electrical Ground Support Equipment, EGSE)的电响应)
- 鉴定模型(QM,飞行模型(FM)的鉴定件)

对于姿态控制系统的开发,在上述基础上还需增加姿态控制模型。

试验模型测试完成后可能需要对设计进行更改。偏离了规范要求的设计需要得到用户的批准。

2.5 设计控制

设计过程包含若干步骤。经过这些步骤,设计可以逐步深入。这些步骤常常要以一些评审作为标志。大多数情况下,这些评审包括:

- 初步设计评审(Preliminary Design Review PDR):初步设计阶段,一般在试验模型开始生产之前。
- 关键设计评审(Critical Design Review, CDR):在鉴定产品和飞行产品^②技术状态确定之前,最好是在飞行产品投产前。

^① 原著中为 work package,可理解为国内型号工作中具体的节点计划。——译者

^② 飞行产品等同国内的正样产品。——译者