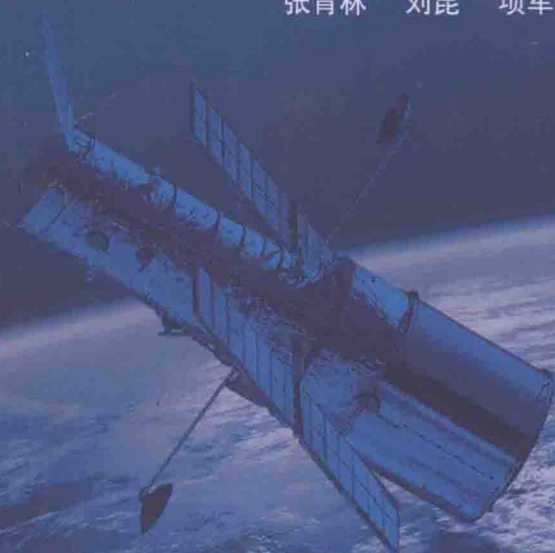




航天科技图书出版基金资助出版

空间仪器设计原理

[英] A·M·克鲁斯 J·A·鲍尔斯 著
T·J·帕特里克 C·V·古多尔
张育林 刘昆 项军华 张峰 译



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

空间仪器设计原理

[英] A·M·克鲁斯 J·A·鲍尔斯 著
T·J·帕特里克 C·V·古多尔
张育林 刘昆 项军华 张峰 译



中国宇航出版社

·北京·

Translation from the English language edition:
Principles of Space Instrument Design
Copyright © Cambridge University Press 1998
All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2012-8160 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间仪器设计原理/ (英) 克鲁斯 (Cruise, A. M.)
等著; 张育林等译. —北京: 中国宇航出版社, 2012. 11
书名原文: Principles of Space Instrument Design
ISBN 978-7-5159-0323-1

I. ①空… II. ①克…②张… III. ①空间探测仪器
—设计 IV. ①TH762

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 268284 号

责任编辑 舒承东 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版 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 北京画中国画印刷有限公司

版次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 13.5 字数 376 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0323-1

定价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

译者序

航天时代的开启，极大拓展了人类认识宇宙和自身的视野。外层空间所具有的独特优势，使很多在地球上无法完成的科学任务可以在空间得以实现，这不但极大促进了自然科学的发展，也带动了工程和技术进步。

空间仪器是空间科学任务的基本工具。轨道空间独特的环境，为空间科学任务的实现提供了高远的观测位置、高度真空及高度纯净的环境等有利条件，但同时也给空间仪器的设计带来了巨大的挑战。事实上，空间仪器设计的独特之处就在于必须要适应空间环境的影响和空间可用资源的约束。譬如，空间仪器的结构必须能够承受航天器发射过程中的过载等力学环境以及外层空间的热环境，空间电路的设计必须适应空间粒子辐射以及真空所带来的传热和放电问题，空间光学设计必须适应严酷的热环境以及材料出气带来的表面污染等问题。相对于在地面上工作的科学仪器而言，这些问题是所有空间仪器设计所必须考虑的基本问题。

本书作者 A·M·克鲁斯是英国伯明翰大学物理与天文学院教授，拥有物理学学士学位和空间仪器科学博士学位，主要研究引力波、重力等空间基础物理问题和相关空间仪器的设计，是国际宇航科学院院士、国际天文联合会会员。作者团队拥有深厚的理论修养和丰富的工程经验，使本书真正抓住了空间仪器设计的核心问题。本书将科学原理和技术细节有机地融为一体，填补了仪器设计者和航天工程人员之间的技术鸿沟。

本书可作为空间科学、航天器工程等学科本科生、研究生的教

材，也可以作为航天科技工作者的参考书。

本书的翻译得到国防科技大学“纳星集群飞行计划”的支持，主要翻译者来自“天拓”系列卫星的研制团队，除署名译者外，还包括杨磊、宋新、韩大鹏、绳涛博士等。另外，吉莉、肖龙龙、周伟勇、侯二永、刘巧林、魏静波、党朝辉、刘帅等研究生也为翻译和校对做了大量具体工作。

特别感谢中国宇航出版社对本书翻译出版的支持，尤其是舒承东编辑的严谨审校工作，才使本书顺利得以出版。

由于译者水平有限，译文中难免会有错误或不妥之处，敬请读者批评指正。

译者

2012年11月

前 言

空间科学观测要求仪器能够在太空环境中工作，这种特殊仪器的设计涵盖多个学科的内容，本书致力于融合空间仪器设计过程中的各种基本原理和要素。首先，本书可作为新近毕业的工程师或者物理学家进行空间项目仪器设计的手册。其次，本书可作为航天工程与管理课程的教材，适用于攻读航天科学与技术学位的本科生和研究生。本书对上述学生的教育背景没有特殊要求。

按照作者的不同经验，本书涉及从空间环境物理和系统设计到机械，从空间光学到项目管理以及小型科学航天器，并着重讨论了设计和试验中经常遇到的问题。虽然书中电子学和机械设计的内容对于具有最低相关背景要求的学生们来说已足够宽泛，但是受限于一本书的篇幅和费用，仍然无法涵盖航天器设计的所有方面。因此，对于多数仪器设计人员并不直接面对的问题，如姿态控制和在轨机动的航天器推进等，读者可以查阅相关文献。

本书作者都与长期从事空间硬件设计的大学机构有联系，他们在这个相对新兴的学科领域拥有超过一个世纪的丰富经验。其中一个作者的职业生涯起始于航空航天工业，但是我们都从空间研究机构的领导者和同事那里学到了新的和不断发展的技能，他们给予我们在实际工程项目中研究和实践空间技术的机会，在早期很少能有正式的训练。

在给不同专业的本科生和研究生讲授课程时，作者发现很难推荐一本既包含所需的知识又足够详细（使读者感到有充足的知识 and 信心从事空间项目）的教材。因此，我们一致认为，将空间仪器设

计与试验的基本原理放在一本书里是很有用的，作为一个具有挑战性甚至有一定困难的起点，读者可以从本书的使用中受益。

非常感谢在职业生涯早期指导我们的前辈们，他们具有将空间促进和发展成为科学工具的远见卓识。特别感谢 NASA 和 ESA 的哈瑞·马西教授，罗伯特·博伊德教授，J·L·卡尔亨教授，彼得·巴克先生，彼得·谢伊瑟先生，埃里克·多林博士以及作者研究机构中的许多同事。

J·A·鲍尔斯

A·M·克鲁斯

C·V·古多尔

T·J·帕特里克

1997 年 10 月

目 录

第 1 章 面向空间的设计	1
1.1 空间的挑战	1
1.2 空间物理环境	2
1.2.1 压力	2
1.2.2 温度	4
1.2.3 辐射	5
1.2.4 空间碎片	8
1.3 空间仪器的系统设计	9
1.3.1 系统设计过程	10
1.3.2 一些有用的实例	11
1.3.3 一个简单例子	12
第 2 章 机械设计	14
2.1 空间仪器的构架和结构	16
2.1.1 结构类型	16
2.1.2 壳结构	17
2.1.3 框架	18
2.1.4 悬臂	20
2.2 应力分析基础	20
2.2.1 应力, 应变, 胡克定律和典型材料	20
2.2.2 简单设计情况的截面计算	22
2.2.3 有限元分析方法	26
2.3 载荷	26
2.3.1 在发射环境中的航天器载荷	26

2.3.2	仪器和设备的载荷设计	29
2.3.3	基于质量—加速度曲线的载荷设计	30
2.3.4	压力载荷	32
2.3.5	强度系数	32
2.4	刚度	34
2.5	弹性不稳定性 and 屈曲	35
2.5.1	支杆和薄壁管	35
2.5.2	薄壳	40
2.6	航天器振动	41
2.6.1	火箭和机械振动	41
2.6.2	简单的弹簧—质量块振荡	43
2.6.3	多自由度系统	45
2.6.4	发射振动激励	47
2.6.5	随机振动和频谱密度	48
2.6.6	随机振动输入的响应	51
2.6.7	阻尼和数据 Q	54
2.6.8	振动试验	55
2.6.9	振动测量及仪器	56
2.6.10	声振动和试验	56
2.6.11	冲击频谱	57
2.6.12	振动设计	58
2.7	材料	58
2.7.1	发射及空间环境要求	58
2.7.2	机械特性	59
2.7.3	出气性	61
2.7.4	热性质	64
2.7.5	材料的选择	65
2.7.6	金属	65
2.7.7	塑料薄膜	67
2.7.8	黏合剂	67
2.7.9	油漆	68

2.7.10 橡胶	68
2.7.11 复合材料	69
2.7.12 陶瓷和玻璃	69
2.7.13 润滑材料	70
2.8 结构试验	71
2.9 耐低温结构	72
2.10 质量特性	73
2.11 结构细节和通用设计方法	73
2.12 结构分析和机械设计：关于设计流程的附言	75
2.12.1 主题	75
2.12.2 流程	75
第3章 热设计	78
3.1 背景概述	78
3.1.1 引言	78
3.1.2 地球温度	78
3.1.3 卫星温度	82
3.1.4 热设计建模	83
3.2 热、温度和黑体辐射	83
3.3 能量传输机理	90
3.3.1 概述	90
3.3.2 耦合导热	93
3.3.3 耦合辐射换热	97
3.4 热平衡	117
3.5 热控单元	129
3.5.1 介绍	129
3.5.2 被动热控单元	130
3.5.3 主动热控单元	141
3.6 热控制策略	143
3.7 热数学模型 (TMM)	145
3.8 瞬态分析	148

3.9	热设计策略	152
3.10	热设计实现	155
3.10.1	b. o. e. 模型	155
3.10.2	概念模型	156
3.10.3	详细模型	157
3.10.4	热平衡测试	157
3.10.5	航天器热平衡试验	159
3.11	结束语	159
第4章	电子学	161
4.1	初始设计	161
4.1.1	引言	161
4.1.2	典型分系统	163
4.2	姿态感知与控制	165
4.2.1	太阳敏感器	165
4.2.2	地球敏感器	167
4.2.3	星敏感器	171
4.2.4	交叉阳极阵列系统	172
4.2.5	电荷耦合器件 (CCD) 系统	173
4.2.6	楔条系统	176
4.2.7	磁强计	178
4.2.8	推力器和动量轮	181
4.2.9	磁控技术	182
4.3	模拟电路设计	185
4.3.1	引言	185
4.3.2	电荷放大器	185
4.3.3	脉冲整形电路	191
4.3.4	脉冲处理系统设计	196
4.3.5	低频测量	199
4.3.6	采样	201
4.4	数据处理	201

4.4.1	引言	201
4.4.2	用户子系统的数字预处理	202
4.4.3	队列	202
4.4.4	数据压缩	204
4.4.5	直方图	205
4.4.6	星载数据处理系统	207
4.4.7	用户子系统与 RTU 的接口	210
4.4.8	数据管理系统 (DMS)	212
4.4.9	分包遥测	214
4.4.10	指令	215
4.4.11	错误检测	220
4.5	电源系统	232
4.5.1	主电源	232
4.5.2	太阳能电池	233
4.5.3	太阳阵	239
4.5.4	蓄电池	243
4.5.5	蓄电池类型及其应用	243
4.5.6	调节	249
4.5.7	耗散系统	250
4.5.8	非耗散系统	252
4.5.9	调节器	254
4.5.10	电源监测	265
4.5.11	降噪	268
4.6	导线、连接器和 EMC	271
4.6.1	导线	271
4.6.2	导线与 EMC	272
4.6.3	屏蔽技术	276
4.6.4	屏蔽效率	279
4.6.5	排气需求与 EMC	284
4.6.6	连接器	285
4.7	可靠性	289

4.7.1	引言	289
4.7.2	设计技术	290
4.7.3	散热	290
4.7.4	门锁效应	291
4.7.5	接口和单点失效	292
4.7.6	星务管理	295
4.7.7	元件器规范	297
4.7.8	故障率	303
4.7.9	出气效应	304
4.7.10	制造	304
4.7.11	辐射	306
第5章	机构设计和作动器	312
5.1	设计考虑	313
5.1.1	运动学	313
5.1.2	约束和运动学设计	313
5.1.3	轴承的设计和润滑	316
5.1.4	挠性构件和柔性铰链	320
5.1.5	空间机构的材料	321
5.1.6	仪器和机构材料的最后加工	321
5.2	空间机构的传动	322
5.2.1	直流电动机和步进电机	322
5.2.2	直线作动器	328
5.2.3	齿轮传动	328
5.2.4	微动装置	331
5.2.5	带式传动和皮带传动	331
5.2.6	火工作动器	331
5.2.7	空间摩擦学和机构寿命	333
第6章	空间光学技术	335
6.1	光学器件的材料	335
6.2	安装和结构材料	337

6.3 精确装配的运动学原理	338
6.4 元件装配的详细设计	341
6.5 对准与调整	342
6.6 对焦	345
6.7 指向和扫描	345
6.8 杂散光	345
6.9 光学表面的污染	346
第7章 项目管理和控制	349
7.1 前言	349
7.2 引论	349
7.3 项目团队和外部机构	352
7.3.1 项目团队	352
7.3.2 资金机构	354
7.3.3 任务机构	355
7.3.4 发射机构	355
7.4 项目团队的管理结构	356
7.4.1 首席研究者	357
7.4.2 项目经理	358
7.4.3 合作研究者 (Co-I)	359
7.4.4 本地经理	359
7.4.5 指导委员会	359
7.4.6 项目管理委员会	360
7.4.7 管理结构	360
7.5 项目阶段	362
7.5.1 正常阶段	362
7.5.2 项目评审	365
7.6 进度控制	366
7.6.1 进展报告	367
7.6.2 里程碑	367
7.6.3 条形图	368

7.6.4 PERT 图	369
7.7 文档	370
7.7.1 提案	371
7.7.2 项目文档	371
7.8 质量保证	373
7.8.1 项目规范	373
7.8.2 制造方法和操作	373
7.8.3 结果的监测和报告	374
7.8.4 文件和报告的范例	374
7.8.5 详细内容	374
7.9 财务估计和控制	376
7.9.1 工作分解方案	377
7.9.2 费用估计	377
7.9.3 财务报表	379
7.9.4 财务政策问题	379
7.10 结论	382
第 8 章 空间仪器与小卫星	383
8.1 背景	383
8.2 小是什么	384
8.3 额外的任务	385
8.4 结论	386
附 录	388
附录 1 符号列表	388
附录 2 缩略词和单位	403
参考文献	407

第 1 章 面向空间的设计

1.1 空间的挑战

1957 年空间时代的开启是具有历史意义的事件，就如同美洲的发现、贝格尔号的环球航行（译者注：达尔文是随行的博物学家）或者莱特兄弟的第一次飞行。事实上，空间时代包含这些事件的主要元素：它是一个探索新疆域的时代，一次获得新知识和思想的机会，也是一场不能确定未来收益的技术革命的开始。无论如何，太空旅行已经激起了公众的想象力。

然而，不管是从花费的金钱而言，还是从工程师或科学家耗费的工作时间来说，进入空间环境绝非易事。因此，除非其他方法不能满足科学或工程需要，或者在某些情况下，尽管空间仪器耗资巨大，但实际上仍是最廉价的解决方法，才会设计空间仪器。设计工作在空间环境中的仪器或者航天器，需要应对严苛的要求。这项活动会面临 3 个方面的问题，它们增加了空间科学和工程任务的困难、挑战和刺激。第一，尽量避免设计非常复杂的仪器，因为其工作在恶劣的空间物理环境。第二，由于仪器在远离设计团队的地方工作，其设计、制造、测试、校准、发射和操作都必须精益求精，以获得保证任务成功的工作性能。第三，设计和制造必须以受限范围非常严格的资源（如质量、功率和体积）来达到性能要求。

即使未来的空间科学家和工程师们受挫于这项技术的巨大挑战，我们也应当看到，进入空间在增进我们对宇宙的理解、对地球大气的关键研究和监测我们这个星球的状况等方面已体现了巨大的价值。除了直接受益于空间研究，空间计划的需求产生的工程和技术发展，