

原书第四版

SPACECRAFT SYSTEMS
ENGINEERING

航天器系统工程 (上册)

[英] Peter Fortescue/Graham Swinerd/John Stark 主编
李靖 范文杰 刘佳 程卫强 译



科学出版社

航天器系统工程(上册)

(原书第四版)

SPACECRAFT SYSTEMS ENGINEERING

〔英〕Peter Fortescue, Graham Swinerd,

John Stark 主编

李 靖 范文杰 刘 佳 程卫强 译

科学出版社

北 京

图字:01-2013-2139 号

内 容 简 介

本书以空间任务需求为设计驱动,给出任务及轨道选择之间的关系,在分析航天器的空间环境与设计约束的基础上展开航天器设计,介绍了航天器发射与运行控制密切相关的运载火箭系统和地面站及控制系统,阐述了航天器的结构、机构、装配、集成和测试、小卫星工程以及产品保证等内容。本书最后一章是对前面各章专业知识的总结,并重点介绍一种系统设计方法——并行工程设计,该章内容是全书的精髓。

本书适合的读者对象是立志成为航天器设计师的研究生、有航天经验的工程师和高级管理人员。

Copyright © 2011, John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Spacecraft Systems Engineering, ISBN 978-0-470-75012-4, by Peter Fortescue, Graham Swinerd, John Stark, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

图书在版编目(CIP)数据

航天器系统工程:第4版.上册/(英)福蒂斯丘(Fortescue, P.)等主编;李靖等译.—北京:科学出版社,2014.9

书名原文:Spacecraft Systems Engineering

ISBN 978-7-03-041878-4

I. ①航… II. ①福… ②李… III. ①航天器-系统工程 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212004 号

责任编辑:赵彦超 周 涵 / 责任校对:桂伟利

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:418 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以本书纪念

Nicky Skinner

1978—2011

主编及撰稿人名单

主编

Peter W. Fortescue

Aeronautics and Astronautics, Faculty of
Engineering and the Environment, University
of Southampton, UK (retired)

John P. W. Stark

School of Engineering and Materials Science,
Queen Mary, University of London, UK

Graham G. Swinerd

Aeronautics and Astronautics, Faculty of
Engineering and the Environment, University
of Southampton, UK

撰稿人

Guglielmo S. Aglietti

Aeronautics and Astronautics,
Faculty of Engineering and the Environment,
University of Southampton, UK

Massimo Bandecchi

European Space Research and Technology
Centre (ESTEC), European Space Agency,
The Netherlands

Franck Chatel

German Space Operations Center (GSOC),
Oberpfaffenhofen, Germany

Graham E. Dorrington

School of Engineering and Materials Science,
Queen Mary, University of London, UK

John B. Farrow

International Space University, Strasbourg,
France

Nigel P. Fillery

EADS Astrium, Portsmouth, UK

C. Richard Francis

European Space Research and Technology
Centre (ESTEC), European Space Agency,
The Netherlands

Geoffrey Hall

Moreton Hall Associates, Maidenhead, UK

John M. Houghton

EADS Astrium, Stevenage, UK

J. Barrie Moss

School of Engineering, Cranfield University, UK

Terry Ransome

EADS Astrium, Stevenage, UK (retired)

Ken M. Redford

British Aerospace, Bristol, UK

Chris J. Savage

European Space Research and Technology
Centre (ESTEC), European Space Agency,
The Netherlands (retired)

Ray E. Sheriff

School of Engineering, Design and Technology,
University of Bradford, UK

David Stanton

Keltik Ltd, Hampton Hill, UK

Martin N. Sweeting

Surrey Space Centre, University of Surrey,
Guildford, Surrey, UK

Adrian R. L. Tatnall

Aeronautics and Astronautics, Faculty of
Engineering and the Environment,
University of Southampton, UK

Craig I. Underwood

Surrey Space Centre, University of Surrey,
Guildford, Surrey, UK

译者序

改革开放以来,特别是最近的十多年,我国的航天事业得到了快速的发展。2003年10月15日,我国成功发射“神舟五号”载人飞船,第一次将中国航天员送入太空;2007年10月24日,“嫦娥一号”月球探测器在西昌卫星发射中心成功发射,并对月球表面进行了多项科学探测;2011年9月29日,中国第一个实验型空间站“天宫一号”成功发射,并于2011年11月3日与“神舟八号”无人飞船成功进行空间交会对接;2013年12月14日,“嫦娥三号”探测器成功实现月球表面软着陆,并在月球表面开展了就位探测与自动巡视勘察,这是我国航天史上又一个新的里程碑!

随着我国航天事业的发展,对航天专业工程师及系统工程师的培养也越来越迫切,特别是“系统级”工程师。人才的培养离不开专业书籍,我国航天专业书籍较多,但综合性、系统性书籍较少,也出版过各专业自成一册的“系列丛书”,但缺少系统性和各专业知识的内在联系,Peter Fortescue等编写的《航天器系统工程》一书恰恰弥补了这方面的不足。该书是在南安普敦大学短期课程教学笔记的基础上整理而成,是航天器各专业有经验专家多年心血的结晶。该书第一版发行于1991年,后经读者要求多次改进和再版,至今已是第四版。该书以任务需求为设计驱动,给出任务及轨道选择之间的关系,在分析航天器的空间环境与设计约束的基础上展开航天器设计,介绍了航天器发射与运行控制密切相关的运载火箭系统和地面站及控制系统,并阐述了航天器的结构、机构、装配、集成和测试、小卫星工程以及产品保证等方面。本书最后一章对前面各章的专业知识进行了总结,并重点介绍了一种系统设计方法——并行工程设计,该章内容是全书的精髓,值得系统工程师和高级管理者学习和思考。

本书的读者对象主要是有志成为航天器设计师的研究生、有航天经验的工程师及从事航天工程的高级管理人员。

本书的重点在于航天器平台而不是有效载荷,专注航天器系统工程设计而不是专业知识的深入介绍,希望大家能够站在系统高度上理解自身负责的分系统与其他分系统之间的相互关系、相互影响及性能指标的权衡。

范文杰博士翻译第8、15、16章,熊蔚明博士翻译第12、13章,刘佳翻译第4、5章,程卫强和赵小翔研究员分别翻译第9章和第11章,其余各章由李靖博士翻译,

李涤微博士负责全书的统稿与校对工作。此外,谢侃博士校对第4、5章,朱亮聪高工校对第6、7章,刘志敏副教授校对第12、13章,刘勇研究员和郑建华研究员校对第2章和第4章并提出很好的修改意见,Manfred Schmid对机构一章提出了很好的建议,译者对上述人员的辛苦工作与支持表示衷心感谢!最后,特别感谢张升伟研究员对本书翻译工作所给予的大力支持!

译 者

第四版前言

当我思考在第四版前言中说些什么时，回顾了前面几版出版时的情况，第一版已是 20 年前！很显然，这段时间里发生了很大变化，当然，所有这些变化在此版本内容中都有体现。然而，整个这段时间里保持不变的一点是美国航天飞机作为人类太空飞行计划的役马所产生的影响。

航天飞机第一次发射是在 30 年前的 1981 年，对我来说是里程碑性的事件之一，它以某种方式激活了记忆，精准地回想起那个时候你在哪里，在干什么。1981 年 4 月 12 日是一个灿烂的春日，那天我和妻子在喜悦中登上了遥远的苏格兰西北高地的峰巅。然而，在感知当天所发生事情的历史意义的同时，我确实记得在那个激动人心的一天即将结束时，哥伦比亚号航天飞机完成了历史性的第一次飞行。航天飞机计划的后续历程完整地记录在案，尽管运行成本高昂，计划总体上仍然获得了巨大成功，但以失去人的生命为代价的惨痛悲剧也给这一计划蒙上了阴影。这一年见证了这种非凡航天器的退役，又回到起点。这一个具有人生特点的事件——航天飞机的开始与结束和我个人在空间领域和学术界的职业生涯恰好紧密重合，它像一个老朋友，总在那儿。

航天飞机的退役不可避免地迫使人们重新思考美国的人类航天飞行计划。最终，布什政府批准了星座计划，这一计划主要集中于猎户座新型载人飞船，它由航天飞机的替代品——载人战神 1 号运载火箭运送入轨。这个计划另一个重要组成部分是称为战神 5 号的大升力运载火箭，它可以独立运载大量人类探索太空所需要的载荷至地球外轨道空间。整个计划的主要目标是到 2020 年重返月球，并在较长的时间内为载人登陆火星做好准备。但是，继任的奥巴马政府毫不留情地毁灭了“布什幻想”，把人类开发进入太空向私人企业开放，搁置了人类开发地球轨道之外太空的美好愿望，将国际空间站的寿命延长至 2020 年。在短期内，这造成了置美国太空飞行活动重心于地球轨道的相当古怪的局面，但美国宇航员又没有到达的独立手段。在写这本书的时候，美国人类空间飞行的未来发展是不明朗的，此情形增加了这种可能，即月表的下一个脚印或许是中国宇航员的。就本书内容而言，尝试写关于太空活动的这个方面，现在已不是一个好时机。例如，本书有关航天飞机的内容最少；运载火箭部分（第 7 章）的重点放在了 Ariane 运载火箭计划（尽管有一些关于 Ares 系列运载火箭的讨论，但随着时间的延续，也许是恰当的，也可能不恰当）。

这本书的大部分内容主要讲述无人航天飞行器的设计和工程研制,此外,处在世纪之交,“更快、更优、更廉”的设计理念影响着航天飞行器的设计,特别是科学类飞行器的大小和质量方面。不过,这一理念由于不合时宜地出现一些在轨飞行失败事件而有所弱化,这些案例提供了“更快、更廉”未必一定是“更优”的教训。然而,对小型、功能齐全航天飞行器的兴趣并没有减弱,新修订的第 18 章小卫星工程介绍了这方面的内容。

在航天器尺度范围的另一端,是许多具备自主观测等功能的航天飞行器计划,它们将在本书上市后不久成为新闻的头条。其中最有意义的是哈勃太空望远镜的继任者,被命名为詹姆斯韦伯的太空望远镜。

詹姆斯韦伯的太空望远镜将于 2014 年前后发射至 L2 拉格朗日点,距地球约 1 500 000 km,其尺寸近乎哈勃的 3 倍,科学家期待它的运转会带来爆炸性的宇宙新发现。与此同时,欧洲航空航天局的彗星探测卫星罗塞塔将开始它在轨绕 67P/楚留莫夫-格拉西门克彗星运行的使命,期望罗塞塔卫星的数据给我们了解所处的环境——太阳系的起源提供一个阶梯。在全球应用卫星领域,一个称为伽利略的新的全球导航卫星系统将在 2014 年开始运作。它是一个民用项目,由欧盟资助,发射 30 颗星座卫星,轨道高度大约为 23 000 km。希望这个非军事系统的介入会听到民间组织将卫星导航技术纳入他们的业务的声音。由该项目而产生的重要发展是卫星导航在民用航空交通控制领域得到充分的利用。

《航天器系统工程》第四版通篇作了大量的修改和更新,以便读者像上面提到的可以从早期的系统设计到在轨运行操作等多方面掌握非载人空间飞行器工程。还有一些全新的内容值得特别提及,目前行星际间任务的趋势表明采用一种新的小推力轨道是非常有利的,这部分内容已加入扩充了的“任务分析”一章(第 5 章)。先前的第 14 章关于地面站的内容已经重写,新版冠名为“地面部分”以强调其内容不仅涉及地面站,还包括如飞行运行控制等其他活动;新增加了第 17 章,专门介绍组装、集成和验证这些题材,它们主要专注于航天器工程后期整个系统已经完成集成并进行发射前的测试。旧版本中关于产品保证的内容(第 19 章)已全部重写,以反映包括软件在内的产品保证的各个方面。产品保证特别和空间部分相关,因为研制的产品通常要求要在没有产品维护的恶劣环境下正常工作多年。最后一章(第 20 章)也进行了重写,将重点改为系统设计方法的讨论,特别是并行工程设计的讨论。实践中的系统设计以欧洲航空航天局 Cryosat 卫星设计为范例加以阐释。

最后,编者要感谢军方对此书的贡献,他们付出的时间和努力使本版得以完

成,没有他们的支持不可能有新的版本;还要感谢 Wiley 团队的帮助,特别是 Nicky Skinner 和 Gill Whiteley,他们在整个草稿编辑期间的帮助难以用价值来衡量。在本书的编写即将画上句号、印制过程即将开始之际,Nicky Skinner 于 3 月份的突然离世令我们非常震惊和悲痛。很遗憾这些天我们的工作关系通常只单纯地通过电子邮件,虽然没有机会与这位同仁见面并加深我们之间的友谊,但是我认为我非常了解 Nicky。非常感谢她自始至终给予的支持和帮助,本书用来纪念她是非常适宜的。

Graham Swinerd
南安普敦,2011 年 5 月

第三版前言

1989 年退休后,我的好友和同行 Graham Swinerd 接替了南安普敦大学的空间技术短期课程。谁能比 Graham 更胜任《航天器系统工程》新版本的主编一职呢?我确信 Graham 会在老版本的基础上创建更好的声誉,预祝他在这个新角色中获得成功。献给你,Graham...

Peter Fortescue,南安普敦,2002 年 7 月

自从这本书此前的版本发行以来,Dan Goldin“更快、更好、更廉”的空间任务理念给美国人的活动造成了很大的影响。结果,于 1997 年 10 月发射至土星的卡西尼卫星成为最后一枚大型行星际间航天器。像 NEAR Shoemaker 这样的计划已取代了这类任务,该计划于 1996 年 2 月将一个体积相对较小但功能齐全的航天器发射入轨,最终降落在小星体 433 Eros 上。这种“小型任务”已深刻地影响了现在正在实施和已建议的行星探索计划。

在此过渡时期,我们还目睹发射了低轨道的卫星星座,用于手机的全球移动通信,特别是铱星星座,其首批卫星于 1997 年 5 月发射。虽然财政问题对此计划影响很大,但是它预示了许多领域大规模运用星座系统时代的来临。不仅在通信和导航领域利用这些分布式系统有很大的好处,而且在对地观测领域能够改善时间分辨率。另外,还存在着利用若干小型但功能完备的航天器完成一个或两个大型卫星工作的潜在趋势。

小型卫星技术发展的主要推动力是降低通往太空的成本。降低成本的主要措施是降低发射成本,缩短设计、制造和测试周期,降低地面接口和运行控制的复杂程度,资金风险相对较低条件下识别出航天器测试的新技术。

在大型航天器方面,1998 年 12 月见证了国际空间站(ISS)的第一批组件完成在轨安装。如果按照原计划继续发展,到 2005 年 ISS 将成为有史以来部署在地球轨道上最大(大约 400 吨)的飞行器,成为人类太空永久居住的开端。

所有这些方面的发展对本书新版的结构产生了重要影响。主要的变化包括删去了大气再入的章节,增加了新的一章——小卫星工程及应用。许多删除的内容已重新分配在其他章节。例如,大气再入已包括在第 7 章(运载火箭)里,轨道机动的内容编排在第 5 章(任务分析)。新的关于小卫星的第 18 章是由英国萨里大学萨里空间中心的 Martin Sweeting 和 Craig Underwood 提供的,二人在该领域的专业学识是国际公认的。本章建立在萨里空间中心的庞大专业队伍基础之上,总

体上提供了对小卫星系统工程的深刻见解。鉴于小卫星活动的不断增多,如若没有这部分内容,这类教科书是不完整的。

其他各章已重写,特别是第8章(航天器结构)、第11章(航天器热控)、第16章(电磁兼容)和第19章(航天器系统工程),其余的大部分都做了大量的修订,包括第5章(任务分析)中星座设计和小星球任务的讨论。

第二版的一些作者已经退休,这一版的作者名单列表中已出现了新的名字。非常感谢所有这些作者的贡献。同时也怀着悲痛的心情告诉大家先前作者中的三位已经离世,他们是 Howard Smith(电子通信),Les Woolliscroft(航天器电磁兼容工程)和 Mervyn Briscoe(航天器机械工程)。我们怀念他们。

读者可能已注意到本书扉页对其中一位作者——Mervyn Briscoe 的题献,在他离世的2001年,仍然积极地参与机械章节的修订。我们还要感谢 Guglielmo Aglietti,他作为一名合著者临危受命,完成了 Mervyn 章节的修订。多年来 Mervyn 作为作者,忠诚地服务于南安普敦大学的短期课程,在此对他表示感谢,谨以此书记念他。

最后,感谢 Peter Fortescue 和 John Stark 为先前各版本付印所做的开创性的工作以及为本版所提供的宝贵帮助。

Graham Swinerd

南安普敦,2002年7月

第二版前言

第二版的诞生源于我们对一个电话的响应,这个电话曾一度让我们恐惧:“有没有想过出第二版呢?”经过慎重思考后我们的回答是:“是的,要出第二版。”于是,就有了此版的诞生。

这不仅给了本书作者一个更新他们章节中资料的机会——技术一直在不断发展,五年太久!同时也给了我们修正第一版中的一些错误(当然也有可能增加一些新的错误)的机会,并对读者关于内容方面的建议和对我们在内容上不可回避的“重新思考”作出回应。因此,有了两个新的章节。

第一个新的章节是关于机构——航天器上的重要设备。这是其他章节所包括的许多系统中必要的一部分,但因为有其自身的需求,在这里给了一章的地位。这是一个专业主题,涉及机械部件之间的相对运动。如果任务中的结构是长寿命、无服务、无外界干扰,则理想设计目标是无单点失效,机构设计师将面临任务挑战,第16章内容告知了他们是如何应对挑战的。

第二个新增章节讲述系统工程的内容,第一版中此标题没有连字符,那些把标题理解为“航天器系统的工程”的读者可能会觉得内容大部分和他们想象的一样。的确,对第一版比较满意的读者对第二版有些担忧。不过,标题还可以理解为“航天器的系统工程”。作如此理解的读者无疑会很失望,因为在本书里几乎找不到有关系统工程学科的内容。

我们的处理方法是保留第一版中有些模糊的标题并保留了第一版写此章的目的,但是增加了新的一章(第19章),重点讲述航天器的系统工程。这一章是由航天工业领域有经验的作者撰写的。期望这一章能像拼图游戏一样将散落在其他章节里的小碎片拼接起来,并说明它们如何能够协调地安放在一起形成一个有生命的整体——以一个可行方式达到设计目标的航天器。

从第一版至今,部分作者已经搬到了新的居住地,部分已经退休,这一版的作者中已出现一些新的名字。第二版是对第一版的改进,编者非常感谢所有新老作者并希望本版“重新思考”后呈现其精华。

第一版前言

这本书源于南安普敦大学开设的一系列短期课程配套的教学笔记。这些课程始于1974年,为学时两周的空间技术教程,教学对象为希望成为航天器工程师的科学或工程专业研究生。目前,此课程服务于欧洲的许多企业,课程设置为一周,异常火爆,面向有经验的工程师或者是高级工程师,他们都是各自领域的专家。

教学中,学员参加一个工程项目竞争团队,该工程涉及为实现总体目标进行航天器设计。多年来,任务设计已转向所有的应用领域:科学、天文学、通信以及对地观测。现在有一个模型“陈列馆”,展示航天器的布局,并在运行控制、分系统技术参数和发射条件限制等方面支持参与者的报告,这些模型展示了系统的可用性但不是详细设计。工程从系统层面进行设计,指导者给学员提供了本书中所涉及的确定详细设计的基本原则。

因此,本书涵盖的内容主要是系统工程师们的需求范围,重点放在卫星平台本身而不是有效载荷。专业工程师通常有很多包括详尽和深入介绍子系统的教科书相辅助,在本书中不可能学到很多他们所从事专业的知识,但或许会学到其他专业的知识。希望这足以使他们理解自身子系统关于其他子系统之间相互影响的权衡。

第2~5章主要介绍航天器特别是卫星的一般背景知识,它们工作在太空环境中,这类环境通常比我们所熟悉的地球环境恶劣。第2章介绍空间环境的主要特性。第3章和第4章阐述空间物体动力学,运载工具对微小的力和力矩将产生响应,而这些若发生在地球上则几乎没有影响。在地球上这些微小的力和力矩的确发生,但我们常常在不完全自由状态下工作,因此地球约束下的运载工具经受更大的力的作用。第5章讲述航天飞行器相对地球而不是天体力学下的惯性参考系的运动。

第6~15章介绍主要的航天飞行器分系统。第7章和第8章内容包括地面发射和通过大气层返回,第6章、第9~12章和第14章论述航天器装载的主要分系统,包括遥测、遥控链路(第14章)和地面控制(第15章),第13章讲述通信链路,包括基本原理及其在航天器上的一些特殊应用,这些都和遥测、遥控链路以及通信荷载相关。

第16章介绍电磁兼容(EMC)。不同的分系统要协调工作,这是系统工程师不可避免的主题之一。对于航天工程师,产品保证至关重要。产品必须从恶劣的发射环境中幸存下来,必须在没有任何维护奢望的情况下工作多年,他们在产品保

证实践中保持了良好的纪律,因此大多数航天产品完成了上述要求。

在此,编者要向那些贡献了本书各章的作者表示感谢。如上所述,大部分章节都已经在课上讲授。鉴于作者的慷慨,我们的任务就是将他们提供的材料进行精简凝练。同时也感激他们的耐心,原本以为将课堂笔记转换成一本书过程很短,现在看来我们确实想错了!

还要感谢同事 Graham Swinerd 和 Adrian Tatnall,他们阅读了部分章节并提出了建议。最后,要感谢 Sally Mulford,她以极大的耐心和良好的幽默感将一些粗糙的文本变成了打印稿。

缩 略 语

AATSR	Advanced Along-Track Scanning Radiometer	先进沿迹扫描辐射计
ABM	Apogee Boost Motor	远地点发动机
AC	Alternating current	交流电流
ACS	Attitude Control System	姿态控制系统
ACU	Antenna Control Unit	天线控制单元
A/D	Analogue to digital	模数转换
ADEOS	Advanced Earth Observing System	先进对地观测系统
ADR	Active Debris Removal	主动碎片移除
AFT	Abbreviated Functional Test	缩减的功能测试
AGC	Automatic gain control	自动增益控制
AIT	Assembly, integration and test	装配、集成和测试
AIV	Assembly, integration and verification	装配、集成和检验
AKM	Apogee Kick Motor	远地点发动机
AM	Amplitude modulation	调幅
AMI	Active Microwave Instrument	主动微波设备
AMOOS	Aero-Manoeuvring Orbit-to-Orbit Shuttle	轨道航天飞机的航空机动轨道
AO	Announcement of Opportunity	指南
AOCS	Attitude and Orbit Control System	姿态和轨道控制系统
AOP	Announcement of Opportunity Package	指南包
AOS	Acquisition of signal, also Advanced Orbiting Systems	信号采集, 或者先进轨道系统
AOTV	Aero-assisted Orbital Transfer Vehicle	航空辅助轨道转移飞行器
APM	Antenna Pointing Mechanism, also Attached Pressurized Module	天线指向机构, 或附加压力舱
APS	Active Pixel Sensor	有源像素传感器
AQAP	Allied Quality Assurance Publication	盟军质量保证出版物
ARQ	Automatic report queuing	自动报告排队
ASAP	Ariane Structure for Auxiliary Payloads	用于搭载有效载荷的阿丽亚娜结构
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar	先进合成孔径雷达
ASIC	Application-specific integrated circuit	专用集成电路