



国防科技著作精品译丛



Springer

Deep space Craft
An Overview of Interplanetary Flight

深空飞行器

——行星际飞行概览

【美】Dave Doody 著

刘建平 李晶 熊菁 朱俊 吴功友 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

深空飞行器

——行星际飞行概览

Deep Space Craft

An Overview of Interplanetary Flight

[美] Dave Doody 著

刘建平 李晶 熊菁 朱俊 吴功友 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字：军 -2014 -208 号

图书在版编目 (CIP) 数据

深空飞行器: 行星际飞行概览/ (美) 杜迪 (Doody, D.) 著; 刘建平等译.

—北京: 国防工业出版社, 2015. 10

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Deep Space Craft: An Overview of Interplanetary Flight

ISBN 978-7-118-10195-9

I. ①深… II. ①杜… ②刘… III. ①行星际航天器 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 249743 号

Translation from English language edition:

Deep Space Craft. An Overview of Interplanetary Flight by Dave Doody

Copyright © 2009 Praxis Publishing Ltd.

Praxis Publishing is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

版权所有, 侵权必究。

深空飞行器——行星际飞行概览

[美] Dave Doody 著

刘建平 李晶 熊菁 朱俊 吴功友 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 28½

字 数 458 千字

版 印 次 2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 158.00 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

译者序

当人类探索太空的脚步逐步延伸至月球乃至行星际时,我们迫切需要了解和掌握星际航天器的导航、通信以及科学探测的理论、原理和实现方法。*Deep Space Craft — An Overview of Interplanetary Flight* 一书由美国航空航天局 (NASA) 喷气推进实验室 Dave Doody 编著。

本书作者是“旅行者”号飞行团队的一员,参加实施了“旅行者”2号的科学探测过程。书中描述了卡西尼号飞往土星旅程中的难忘场景,探讨了深空航天器星地导航与数据传输信道的设计方法,分析了深空导航及航天器姿态、轨道控制的基本原理,介绍了星载科学仪器功能和星体的组成结构。本书深入浅出、充满乐趣,对于提高我国深空探测的任务实施能力有着很好的借鉴意义。

本书可供从事深空探测任务设计和测控运控管理的研究人员和工程技术人员参考,也可作为大专院校相关专业的高年级本科生和研究生的参考资料。

全书由宇航动力学国家重点实验室刘建平、李晶、熊菁、朱俊、吴功友翻译和审校。其中,李晶翻译了第1章和第6章,朱俊翻译了第2章和第5章,熊菁翻译了第3章和第4章,刘建平翻译了第7章和第8章,吴功友翻译了附录和名词术语,黄静琪对所有的图表进行了编辑。在本书的翻译和成稿过程中,得到了西安卫星测控中心领导的大力支持和宇航动力学国家重点实验室许多同志的帮助,另外,许可、姜博、张天骄、李杰、李涵秋、李海玥、薛志嘉、杨杰、李超等也提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,书中难免出现纰漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

刘建平
2015年7月

前言

当我们在生活中忙忙碌碌时，可能没有意识到，我们生活的周边环境充满着新奇。理所当然地，我们把地球这个具有巨大价值的星球看作我们的家园，却不了解这个世界和太阳系的本质，我们身在其中，时刻受到哺育和保护。纵观几千年的历史以及史前文明，我们从来没有了解到另一个星球或其他太阳系的特征，但最近几十年却发生了显著的变化。行星际飞行是我们一直梦想着的冒险，直到最近才得以实现，它带来了关于我们所处宇宙空间的前所未有的认识！

当前的行星际任务毫无羁绊，不需要复杂的生命支持系统，而以前我们一直认为该系统是穿越浩渺宇宙到达外星世界的必备之物。无人航天器先于人类到达月球，并且运行成本仅仅是宇航员探索近地轨道的一小部分^①。机器人探测器远远地超越了这个距离，途经成千上万倍甚至一亿倍地月距离之远，一直在延伸和拓展着我们有限的人类感官。此刻它们正孤独飞行，没有太多的公众关注，也谈不上生命危险，正如我们忙碌生活中的一个脚注。

对于任何与星际飞行无关但又对此好奇的读者，如艺术家或动物学家，本书是对深空探索航天器的惊鸿一瞥。通过查看章节标题，你可以驻足挑选感兴趣的内容，细细品味。在内容设计上，本书更注重广度而非深度。你想深入了解任何主题，都可以参考相关文献。书中我们多次关注到某个具

^①这并不是贬低载人飞行。尽管人类的太空飞行也有一段时间，但作者仍然最敬佩 NASA 的“阿波罗”团队和 12 个登上月球的宇航员，以及那些在地球轨道上的伟大工作者。

体的深空项目，跟踪任务中的事件并发现它的内在含义，最终探究一个深空任务所涉及的主要方面。本书中，深空 (deep space) 定义为到月球及更远距离。

撰写过程中，本书希望提供读者发现的乐趣，这种方式也是美国物理学家理查德·费曼^① (Richard Feynman, 1918—1988) 所推崇的。读者在新闻和其他媒体中会遇到一些行星际飞行中的发现、任务及仪器，读完这本书将会无形中形成一个大致框架，也可以更好地跟从事相关行业的朋友、家人和同事进行交流。

对于正选择职业道路的年轻学生来说，本书涉及行星际飞行的所有相关学科，并阐释了各个学科的基本要素。你将会发现一些熟悉的工程与科学领域巨匠的名字，星际飞行的实现源于他们的原创成果：我们站在巨人的肩膀，才到达时空深处。

除了本书中的参考文献，互联网为查找更多的信息提供了丰富的途径，而且信息更新迅速。需要注意的是，一些有效的搜索可能需要授权，尤其对于没有多少互联网使用经验的读者。为了聚焦兴趣点，你可以从文中挑选两三个关键词，用一个好的搜索引擎来查找。还需要注意，本书中的许多图和参考文献中提到了一个图像 ID，如“图像 ID: PIA08329”。只要搜索这个 ID，大多数搜索引擎会立刻给出它的索引，你可以浏览或下载全分辨率和全彩色图片，并且读取原标题。

^① Jeffrey Robbins 编著 *The Pleasure of Finding Things out* 一书包含了许多费曼的文章及其演讲访谈的手稿，其中一个是在 1981 年在 BBC 电视上的访谈。

作者序言

成为“旅行者”号飞行团队的一员是我一生中最大的荣耀。1989年8月的一个夜晚，我们在监视器上看着来自“旅行者”2号从非常遥远的太空传来的一幅幅图像，激动万分。我们一直与“旅行者”2号保持着联系，直到它消失在海王星寒冷的北部云层中，并直接飞过引力走廊，接近巨大而逆行的海卫一。经过几个小时的传输中断后，在航天器上安装的图像运动补偿程序开始工作，寒冷的外星景象再次通过清晰的图像展现出来。后来，经过图像分析，发现了从海卫一冻结氮表面喷发的活性氮间歇泉。这是“旅行者”2号在太阳系内最后的探索活动，后来，“旅行者”2号就永远地运行在远离太阳的双曲线轨道上。

几天后，当海王星稀薄的前所未有的新卫星出现在餐厅天花板上悬挂的电视机上时，整个飞行团队沉浸在欢快的气氛中，尤其是团队的图像处理科学家 Carl Sagan (1934—1996)。Chuck Berry (1926—)^① 在 JPL 行政大楼前抱着电子吉他摇摆和鸭式行走，穿过宽宽的水泥台阶出去，向我们展示了正飞出太阳系出口的“旅行者”2号。

欢迎您了解星际飞行航天器，探索它们的运行方式。

Dave Doody

阿尔塔迪纳，加利福尼亚，2009年3月10日

^① Chuck Berry 简介见 wikipedia.org/wiki/Chuck_Berry。

致谢

非常感谢对本书有关章节提供意见和建议的那些人。由于水平所限, 本书不可避免地存在一些缺漏, 欢迎大家反馈^①。感谢 Jim Taylor, Laura Sakamoto Burke 和 Julie Webster 提供的通信专业知识, Jitu Mehta 提供的姿态控制知识, Todd Barbe 提出了推进方面的建议, Mary Beth Murill 对电源方面的技术进行了审核, 以及 Pam Chadbourne, Ken Fujii 和 Charles Kohlhasse 在任务总体和任务规划方面给出了帮助。感谢 Jim Hodder 提供了 DSN 建议, Bill Owen 在导航方面提供了帮助, Brent Ware 对引力辐射的内容进行了耐心检查, 还有 Sooz Kurtik 发来的电子邮件也给出很多的意见。感谢 Rob Smith, Arden Accord, Kuei Shen, Vicki Ryan 和 Kathy Lynn 审阅原稿, Roger Lighty 也在审阅过程提供了帮助, 还有 Mitch Scaff 在技术质量上进行了认真检查。感谢 Ray Sabersky 的鼓励和 Dolores Simpson 的一些好的建议。

感谢艺术家 Don Davis, Don Dixon 和 Gordon Morrison 分享了他们富有想象力的作品, 以及本书中 NASA 和其他研究结构提供效果图的所有人。感谢 JAXA、NASA、ESA 和 ASI 提供广泛而实用的图像和信息。

感谢 Clive Horwood 提供来自 Praxis 的周到建议, 以及 John Mason 和编辑 Michael McMurtrey, 他们使我的句子更生动, 更具有活力。

感谢 Rosaly Lopes 带来的灵感。

嘀! 火箭起飞了!

^① 见 www.linkedin.com。

序

太空时代大约诞生于半个世纪前，当时一个篮球大小的卫星“伴侣”号 (Sputnik) 从苏联发射升空，成为首次绕地球轨道飞行的人造物体。“伴侣”号没有携带任何科学仪器，只是一个简单的无线电广播台，发出容易检测的蜂鸣信号。“伴侣”号的任务不是探索，但它向世界证明了它在太空中，而以前没有任何人造物体去过那里。

“伴侣”号取得了巨大的成功，令人振奋。太空时代开始了。美国、苏联和许多其他国家开始以惊人的速度将航天器送上太空，包括无人的和载人的，进入地球轨道和更远的地方。

在这些航天器中，飞行地球轨道以远的深空探测器获取的图像最多。在“伴侣”号发射以后的几十年里，航天器已经飞过了所有的行星，除了冥王星（我是一个念旧的人，我认为冥王星仍是一颗行星，尽管近来科学争论怎么称呼它）。它们已经飞越了金星、火星、木星和土星，而且着陆在金星、火星和土星的卫星土卫六上。在很短的时间内，太阳系的行星已经从望远镜上的光点变成了具有自己天气、山峰、峡谷和平原的真实世界，你甚至可以看到它表面上蜿蜒几千米的车轮轨迹。

这一切都来之不易。在这些壮观的图像和新的科学解释背后，是航天器制造、行星际导航、运行管理等各种复杂的问题。本书中，作者 Dave Doody 给出了这些问题是如何解决的。Dave 用通俗易懂的语言解释了星际任务的产生、设计和实施。很多想象力丰富的读者看见过土星光环或火星日落的壮观景象，如果想知道“它们如何做到”，在这本书中就能找到答案。

那些有幸从事这个行业的人都知道,毫不夸张地说,成为深空任务团队的一员是终生的冒险。这本书分享了这次冒险。更重要的是,我确信它将激发一些幸运的读者积极参与成为这个冒险团队的一份子。

Steve Squyres

Goldwin Smith Professor of Astronomy, 康纳尔大学
火星探测轨道器项目首席研究员

献给那些正在参与
太阳系航天探索项目并
在星际探险中享受每个
激动瞬间的“大使们”!

目录

第 1 章 远程呈现	1
1.1 现场描述.....	1
1.1.1 繁忙之夜.....	4
1.1.2 任务节点.....	5
1.1.3 突发事件.....	6
1.1.4 解决方案.....	9
1.2 天地链路.....	10
1.2.1 航天器与深空网.....	11
1.2.2 微波.....	11
1.2.3 天线增益.....	14
1.2.4 链路功率.....	14
1.2.5 所有因素.....	15
1.2.6 信噪比 SNR.....	18
1.2.7 放大器.....	20
1.2.8 HEMT 低噪声放大器.....	22
1.2.9 Master 低噪声放大器.....	23
1.2.10 LNA 带宽.....	24
1.2.11 微波信号传输.....	24
1.2.12 闭环接收机.....	25
1.2.13 开环接收机.....	26

1.2.14	信息传输	26
1.2.15	调制方式	27
1.2.16	数据信号功率	28
1.2.17	检错与纠错	29
1.2.18	遥测锁定	32
1.2.19	数据压缩	33
1.2.20	香农极限	34
1.2.21	数据结构	34
1.2.22	工程数据和科学数据	36
1.2.23	CCSDS	38
1.2.24	远程控制	38
1.2.25	空间信标	40
1.3	不只远程呈现	42
	注释	42
	参考文献	44

第 2 章 深空导航

2.1	火星任务误算	47
2.2	飞行路径选择	49
2.3	轨道确定与制导	51
2.3.1	开普勒、牛顿及其定律	52
2.3.2	模型和观测	53
2.3.3	光学导航	55
2.3.4	自主导航	55
2.4	测量	56
2.4.1	坐标系统	57
2.4.2	多普勒频移	60
2.4.3	单程、双程、三程	62
2.4.4	测距	64
2.4.5	VLBI —— 甚长基线干涉测量技术	65
2.4.6	集中处理	68
2.5	轨迹修正和配平机动	68
2.5.1	目标平面	70

2.5.2 机动实施.....	73
2.6 引力助推.....	75
2.6.1 壮观之旅.....	76
2.6.2 工作原理.....	77
2.7 既有关系的破裂.....	79
注释.....	80
参考文献.....	82
第 3 章 航天器姿态控制技术.....	85
3.1 遥远的摆动.....	85
3.2 姿态控制系统.....	88
3.3 交叉学科.....	91
3.4 稳定性.....	94
3.4.1 自旋稳定.....	94
3.4.2 三轴控制.....	97
3.4.3 混合型.....	98
3.5 姿态控制外设.....	99
3.5.1 AACS 输入设备.....	99
3.5.2 AACS 输出设备.....	105
3.6 AACS 科学实验.....	113
3.7 AACS 故障及保护.....	115
注释.....	116
参考文献.....	117
第 4 章 推进系统.....	119
4.1 发射.....	119
4.2 牛顿第三定律.....	121
4.2.1 反应物质——水.....	122
4.2.2 火箭原理.....	123
4.2.3 固体火箭范例.....	124
4.2.4 性能比较.....	124
4.3 行星际航行.....	125
4.3.1 喷管.....	126

4.4	推进系统设计	127
4.4.1	固体火箭发动机	128
4.4.2	单组元液体推进系统	130
4.4.3	双组元液体推进系统	132
4.4.4	失重储箱	135
4.4.5	双模式和混合动力	135
4.4.6	电推进	136
4.5	基础系统	138
	注释	139
	参考文献	140
第 5 章	其他星载子系统	142
5.0.1	体系结构	142
5.0.2	航天器载荷舱	142
5.1	电源子系统	143
5.1.1	电压与电流	143
5.1.2	太阳帆板	144
5.1.3	电池	147
5.1.4	RTG	150
5.1.5	电能调节与配给	152
5.1.6	功率裕量	154
5.2	结构子系统	154
5.2.1	功能	154
5.2.2	材料	155
5.2.3	组件	155
5.2.4	实例	156
5.2.5	发射前结构测试	157
5.3	指令和遥测子系统	158
5.3.1	CTS 的作用	158
5.3.2	数据存储	159
5.3.3	数据总线	159
5.3.4	热控	160
5.3.5	脉冲	160

5.4	故障保护	160
5.4.1	安全模式	161
5.4.2	容错结构	161
5.4.3	故障保护监视	162
5.4.4	故障保护响应	163
5.4.5	关键指令	163
5.4.6	安全模式恢复	164
5.5	热控子系统	164
5.5.1	辐射热传导	165
5.5.2	热产生	167
5.5.3	传导传热	167
5.5.4	组件	167
5.5.5	进入大气	171
5.5.6	热真空管测试	173
5.6	机械子系统	173
5.6.1	释放装置	174
5.6.2	伸展臂	175
5.7	科学仪器	177
	注释	177
	参考文献	178
第 6 章	科学仪器与实验	181
6.1	科学问题	182
6.2	有效载荷	183
6.3	科学仪器	183
6.3.1	四种类型	183
6.3.2	科学问题和仪器	185
6.3.3	成像科学仪器	186
6.3.4	高度计	200
6.3.5	微波辐射计和散射计	201
6.3.6	光学光谱仪器	201
6.3.7	质谱仪	211
6.3.8	大气分析仪器	212