



空间环境

[美] 艾伦·C·特里布尔 著
唐贤明 译



中国宇航出版社

THE SPACE ENVIRONMENT

载人航天译丛

空间环境

THE SPACE ENVIRONMENT

[美] 艾伦·C·特里布尔 著

唐贤明 译



中国宇航出版社

· 北京 ·

Translation from the English language edition;

The space environment: implications for spacecraft design. Edited by Alan C. Tribble.

Copyright © 1995 by Princeton University Press.

Published by Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540. 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, 任何个人或者组织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 - 2008 - 2470 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间环境/(美)特里布尔(Tribble, A. C.)著;唐贤明译. —北京:中国宇航出版社, 2009. 1

书名原文: The Space Environment-Implications for Spacecraft Design

ISBN 978 - 7 - 80218 - 404 - 6

I. 空… II. ①特…②唐… III. 航天环境 IV. V52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195855 号

责任编辑 张艳艳 马 航

责任校对 王 妍

封面设计 03 工舍

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/www.caphbook.com.cn

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 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 7 字 数 188 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 404 - 6

定 价 48.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前言和致谢

本书引入基础物理学来描述空间环境，介绍空间环境与航天器结构系统和有效载荷如何发生作用。从这个意义上讲，本书在空间物理学领域和航天工程学领域之间架起了一座桥梁；可作为从事航天器系统设计和有效载荷设计的工程技术人员的基础参考资料，同时也可作为空间环境效应课程的入门教材。书中详细介绍了很多重要概念的含义，但限于篇幅，没有涉及具体细节因素之间的相互作用及计算机模拟技术方面的内容。

本书的写作准备工作得到了许多人的帮助。尤其是罗克韦尔（Rockwell）国际空间环境效应实验室的 Ron Lukins 和 Eric Watts 为本书提供数据，审核内容，并鼓励我坚持完成写作。罗克韦尔国际公司的 Jim Haffner，马丁·马丽埃塔（Martin Marietta）公司的 William Metzger，以及 NASA 约翰逊（Johnson）航天中心的 Rob Saggs 作为技术审核，保证了本书的质量。1994 年春，南加州大学 AEA585 班学生们对草稿进行了实地验证，使本书的内容更加流利顺畅，我很赞赏他们的耐心和思维能力。

最后一定要提到的是，我的家人为此书做出了无法估量的贡献。我的妻子及好友 Beth 在此书写作的几个月里给予了我无尽的爱、理解和精神上的支持。在那些坐在计

算机键盘旁的漫漫长夜里，我的儿子 Matthew 使我得到了不同寻常的享受。我们的猫咪在我的腿上安睡，让我产生了成就感，获得了自信。我要感谢所有给予我帮助的人们。

我就不在此一一向读者阐述写作过程中的种种艰辛了，以免影响未来的作家在面对“出版还是毁灭”时的决心，剥夺他们获得成果的权利。这里我只想说：我做到了，我成功了。

作者

于加利福尼亚 长滩

1995 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 空间环境	(3)
1.3 航天器设计	(5)
1.4 地球磁场	(9)
1.5 太阳 - 行星间的关系	(11)
1.6 练习	(23)
1.7 应用标准	(23)
参考文献	(23)
第 2 章 真空环境	(25)
2.1 概述	(25)
2.2 真空环境效应	(28)
2.3 微粒污染	(44)
2.4 其他要关注的问题	(57)
2.5 空间和地面试验	(59)
2.6 设计指南	(60)
2.7 习题	(61)
2.8 应用标准	(63)
参考文献	(64)
第 3 章 中性环境	(70)
3.1 概述	(70)
3.2 大气物理学基础	(73)

3.3	中性大气环境效应	(81)
3.4	空间试验和地面试验	(98)
3.5	设计指南	(99)
3.6	总结	(100)
3.7	习题	(101)
3.8	应用标准	(103)
	参考文献	(103)
第 4 章	等离子体环境	(109)
4.1	概述	(109)
4.2	等离子体物理学基础	(111)
4.3	航天器的充电	(121)
4.4	等离子体环境效应	(136)
4.5	模型和工具	(138)
4.6	设计指南	(139)
4.7	练习	(140)
4.8	应用标准	(141)
	参考文献	(142)
第 5 章	辐射环境	(147)
5.1	概述	(147)
5.2	辐射物理基础	(148)
5.3	空间中的辐射	(157)
5.4	辐射环境效应	(164)
5.5	模型和工具	(174)
5.6	空间及地面试验	(174)
5.7	设计指南	(175)
5.8	练习	(175)
5.9	应用标准	(177)

参考文献	(178)
第 6 章 微流星体/轨道碎片环境	(183)
6.1 概述	(183)
6.2 高速撞击的物理原理	(183)
6.3 微流星体环境	(187)
6.4 轨道碎片环境	(189)
6.5 撞击概率	(193)
6.6 空间和地面试验	(194)
6.7 设计指南	(194)
6.8 习题	(195)
参考文献	(196)
第 7 章 结论	(200)
参考文献	(203)
附录 A 术语	(204)
附录 B 缩写词	(207)
附录 C 物理常量	(209)
附录 D 长期暴露装置	(210)

第1章 绪论

1.1 概述

如果有什么共同之处能把现代人和他们的原始祖先联系在一起的话,那就是每个人都可能曾经在夜深人静的时候,躺在床上仰望星空,沉思宇宙的真实模样。有史以来,人类就一直在观察着恒星、行星和月球等天体,并梦想着在它们之间穿梭旅行。250 年以前,牛顿就对物体在地球轨道上运行的条件有了全面的了解。然而,直到 1957 年,人类才开发出离开地球的技术,并迈出了探索太阳系的第一步。太空旅行遇到的困难不仅表现在如何把航天器送入预定轨道,更重要的是如何使航天器在与地球表面完全不同的空间环境中正常运行。尽管人们通常认为空间环境近似于真空,但在轨道航天器所处的环境中,可能还包括大量的中性粒子、带电粒子、碎片尘埃以及电磁辐射。每一种环境因素都有可能与航天器表面或其分系统产生严重的相互作用,如果不能有效地预见这种作用的潜在危害,可能会严重地影响航天器执行任务的效果。位于美国科罗拉多州巨石城(Boulder)的国家地球物理数据中心,收集了自 1971 年至 1989 年间发生的航天器与空间环境相互作用造成的 2 779 次异常现象,并编辑成了数据库。通过对 NASA(美国国家航空航天局)和美国空军以前发射的航天器的研究表明,大约有 20%~25% 的航天器故障跟它与空间环境间的相互作用有关。表 1-1 列出了部分重大异常事件。

表 1-1 部分航天器出现的异常现象

航天器	异常现象
Anik E-1 和 E-2 通信卫星	在航天器充电期间, 动量轮控制系统出现故障
Ariel 1 通信卫星	高空核爆后出现故障
地球同步环境卫星 (GOES)	表面带电形成弧光放电, 造成了许多指令异常
全球定位系统 (GPS)	光化学沉积导致的污染使太阳能电池阵的功率输出降低 热控材料性能下降
Intelsat K 通信卫星	表面带电形成弧光放电, 造成指令异常
长期暴露装置 (LDEF)	回收时, 提前 1 个月再入大气层 大量的微流星体/轨道碎片撞击 大量污染物以及原子氧腐蚀 感应辐射
先锋金星探测器	高能宇宙射线导致的部分指令存储器异常
天空实验室	不断增加的大气阻力导致再入大气层
航天飞机	大量微流星体/轨道碎片的撞击 航天飞机辉光 进行防撞机动
尤利西斯太阳探测器	在英仙座流星雨高峰期出现故障失败

由于探讨的是空间环境如何影响航天器的, 人们就把专门研究这种相互作用的领域, 称为空间环境效应学。由于认识到空间环境效应的重要性, NASA 于 1993 年设立了一个国家级机构, 来协调这一领域的工作。同年, 国际标准化组织 (ISO) 按照联合国宪章成立了太空系统技术委员会, 其任务之一就是制定国际公

认的空间环境标准。1994年，NASA发布了第一份空间环境效应研究公报，公布了用于航天器研发的轨道环境指导原则^[1]。

本书通过引入空间环境的概念，重点讨论可能影响航天器分系统性能的环境因素，试图在空间物理学和航天工程学之间架起一座桥梁。其目的在于了解空间环境与航天器、空间仪器、操作规程以及设计选项之间的相互作用方式。包括描述空间环境，讨论空间环境作用于航天器的方式，以及建立不同空间环境因素与航天器设计参数之间的关系。正确理解这种关系，不仅对航天器设计者来说非常重要，因为他们设计的航天器必须具备在特定轨道环境下运行的能力；同时对有效载荷研制单位来说，也具有十分重要的意义，因为他们提供的仪器设备必须具备在各种不利环境条件下提供高质量数据的能力。

1.2 空间环境

在研究空间环境效应时遇到的第一个问题就是定义各种环境。历史上，这些定义取决于对象的性质或定义者的目的^[2-4]。为了反映地球轨道环境所具有的基本特性，本书把空间环境效应分为5大类，分别是：真空环境，中性粒子环境，等离子体环境，辐射环境，微流星体/轨道碎片（MMOD）环境。

航天器运行的典型高度，即300 km的轨道高度上，其大气密度比海平面低大约10个数量级。因此，所谓的真空环境其实是远低于正常大气密度下的环境，而不是绝对真空。

大气密度下降10个数量级，相对来说变化明显，从绝对值来说，大气密度从 $10^{27}/\text{m}^3$ 降到了 $10^{17}/\text{m}^3$ 。在这样的环境下，中性粒子既可以通过撞击的动能对航天器产生机械作用，也可以通过自身的反应特性与其产生化学作用。中性环境描述的就是与这些中性粒子相关的现象。

在300 km高度的轨道上，大约有1%的中性粒子由于太阳紫

外线的辐射，被电离而失去了电子。这些带电粒子形成的等离子体环境，可以产生完全不同的相互作用。这些粒子可以使航天器表面充电而形成高压。这会导致科学仪器收集到的数据发生偏差，或者引发航天器外壳弧光放电。因此，由能量在 KeV 级或以下的带电粒子产生的现象，属于等离子体环境。

某些带电粒子的能量为 MeV 级或更高，它们会造成与能量低的带电粒子完全不同的影响。这些高能带电粒子可以穿透大多数物质，改变物质的物理结构，形成辐射环境。

最后，航天器可能会遭遇微小尺寸的天然尘埃或人工碎片，这些东西形成了微流星体/轨道碎片（MMOD）环境。正如将要看到的，这些以轨道速度运动的物体，将使航天器的表面受到侵蚀，并可能终结其寿命。表 1-2 列出了各种环境造成的影响。

表 1-2 空间环境效应

环 境	效 应
真空环境	太阳紫外线造成材料降解
中性粒子环境	机械效应
	气动阻力
	物理性溅射
	化学效应
	原子氧腐蚀
等离子环境	航天器辉光
	航天器表面充电
	接地电压改变
	释放静电
	电介质击穿
	电弧放电
	辅助溅射
	吸附污染物

续表

环 境	效 应
辐射环境	总剂量效应
	太阳能电池性能降低
	传感器性能降低
	电子设备性能降低
	单粒子效应
	翻转, 闭锁, ……
微流星体/轨道碎片环境	高速撞击

航天器所处的轨道不同, 这些作用也各有差异。有的可以忽略不计, 有的则会给飞行任务带来严重威胁。第2~第6章, 将对各种环境及它们对航天器的特殊影响进行深入的讨论。每章重点在于理解环境的基本性质, 了解环境和航天器工程分系统之间可能产生的相互作用。第7章总结了本书的主要内容, 验证了不同环境之间形成协同效应的可能性。然而, 在进行深入讨论之前, 有必要对航天器设计的基本原理、地球磁场、太阳与行星际间的关系进行一下回顾。绪论部分的结论将在后面各章适当的地方进一步阐述。

1.3 航天器设计

即使不考虑有效载荷的特殊性, 所有航天器也必须具备一定的基本功能来使有效载荷正常运行。航天器必须具备推进系统, 才能进入预定轨道, 维持轨道状态, 并在飞行任务结束时脱离轨道。航天器必须具备供电系统 (EPS), 为有效载荷和其他分系统提供电力。航天器必须具有热控系统 (TCS), 使航天器保持在适于运行的温度范围之内。姿态定位和控制系统 (ADC) 用来调整航天器的朝向, 并将有效载荷指向所需要的方向。航天器上

有许多电子设备用来传递电信号；遥感、跟踪及通信（TT&C）系统用来向地面传送数据，并接受来自地面的指令。最后，航天器还要有一个能够容纳各个分系统和有效载荷的硬件结构。举例来说，分系统的设计师可以采用不同的手段确定最合适的系统级解决方案（见表1-3）^[2]。一般来说，主要的空间环境效应作用于直接暴露的部件。根据需要，在后面几章中，将更详细地介绍不同分系统设计方案的优选方法。如想获取更多有关航天器和飞行任务设计方面的内容，建议读者阅读 Griffin、French 及 Brown 等人的著作^[5,6]。

表 1-3 航天器工程分系统

分系统	用 途	主要组成
姿态定位和控制系统	控制航天器稳定和朝向	反应轮 动力轮 太阳/地球传感器 磁扭矩装置
电子设备系统	向有效载荷和分系统传输数据和指令	数据总线 处理器 存储器
供电系统	供应及分配电力	太阳能电池阵 蓄电池 二次电源
推进系统	驱动航天器进入预定轨道	推进器 燃料 贮箱，管路
结构系统	在发射和机动时保持结构稳定	舱壁 机构
遥感、跟踪和通信系统	与地面之间传输指令和数据	发射机 接收机 天线

续表

分系统	用途	主要组成
热控系统	保持温度平衡	散热器, 加热器 热管 多层绝缘材料 阳极化铝

大多数航天器的运行轨道都可归纳为3种(见图1-1)。近地点低于1 000 km的轨道称为低地球轨道(LEO)。这种轨道上通常运行航天飞机和大型有效载荷(如天空实验室、和平号空间站、礼炮号空间站),或者是对地球进行近距观测的航天器(如地球资源卫星、国防气象观测卫星)。高度为1 000~2 000 km的轨道称为中地球轨道(MEO),有时候也称为高地球轨道(HEO),在这种轨道上运行的侦察卫星经常采用椭圆形轨道。最后,在35 800 km高度的地球同步轨道(GEO)上运行的是各种监测卫星或通信卫星。航天器所承受的空间环境效应影响的类型和程度,首先取决于其所处的轨道高度。

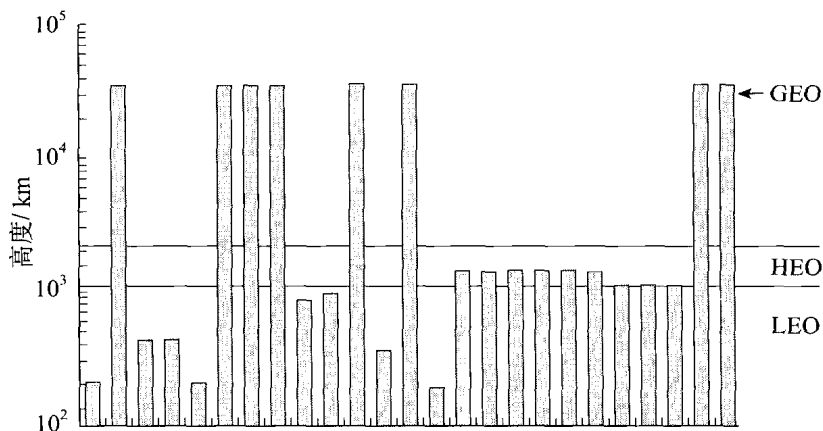


图1-1 1991年第四季度发射的所有航天器的近地点高度

航天器承受环境效应的第二项决定因素是轨道倾角,也就是地球赤道平面与轨道平面的夹角。例如,轨道倾角约为 99° 时(实际角度是高度的函数),航天器在此轨道平面运行的速率与地球绕太阳运行的速率相同。这时航天器与太阳间的角度保持不变,这种轨道叫做太阳同步轨道。不同的需求选择不同倾角的轨道,发射场的纬度是决定轨道倾角的初始因素。运载火箭可以把它所能承受的最大载荷送入与发射场纬度相同倾角的轨道上。表1-4列出了不同发射场的纬度。在下面相关章节中,将着重讨论由于高度/倾角产生的不同环境效应问题。

表 1-4 全球发射场的纬度

发射场	纬 度	发射场	纬 度
澳大利亚		日本	
Woomera (武默拉)	南纬 $31^\circ 07'$	Kagoshima (鹿儿岛)	北纬 $31^\circ 14'$
		Osaka (大阪)	北纬 $30^\circ 24'$
中国		Takesaki (种子岛)	北纬 $30^\circ 23'$
East Wind (东风)	北纬 $40^\circ 25'$	印度	
Tai yuan (太原)	北纬 $37^\circ 46'$	Thumba	北纬 $08^\circ 35'$
Wuzhai (原文如此)	北纬 $38^\circ 35'$		
Xichang (西昌)	北纬 $28^\circ 06'$	以色列	
独联体		Yavne	北纬 $31^\circ 31'$
Plesetsk (普列谢茨克)	北纬 $62^\circ 48'$	美国	
Kapustin Yar (长普斯丁亚尔)	北纬 $48^\circ 24'$	Eastern range (西靶场)	北纬 $28^\circ 30'$
Tyuratam	北纬 $45^\circ 54'$	Wallops (沃洛普斯)	北纬 $37^\circ 51'$
欧洲 (欧空局)		Western range (东靶场)	北纬 $34^\circ 36'$
Kourou (库鲁)	北纬 $05^\circ 32'$		
San Marco (圣马可)(意大利)	北纬 $02^\circ 56'$		

1.4 地球磁场

正如第4章和第5章将要讲到的,地球磁场是地球环境中重要的组成部分。本质上讲,地球磁场是个偶极子场,但以下两种因素使其变得非常复杂,其一是磁轴与地轴不一致,其二是太阳磁场对海拔2 000 km以上的磁场形成了干扰。

磁场北极在格陵兰的图勒附近(Thule, Greenland),大约在地球北极以南 11.5° ,位于北纬 78.3° ,西经 69° 。磁场南极位于南纬 78.3° ,东经 -111° ,在南极洲的东方站附近(Vostok Station, Antarctica)。偶极子场磁势 V 可表示为

$$V = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{D}}{r^3} \quad (1-1)$$

式中, r 是距场中心的距离(m); $\mathbf{M}$ 是磁矩($\text{T} \cdot \text{m}^3$)。

对于地球来说, $\mathbf{M}$ 大约是 $8 \times 10^{14} \text{ T} \cdot \text{m}^3$,或是 $8 \times 10^{24} \text{ Gs} \cdot \text{cm}^3$ 。在球坐标中, θ 是偶极子场中轴线长度(地磁余纬度),偶极子场可以表示为 $B = \nabla V$ 或

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{2M}{r^3} \cos\theta \\ B_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\frac{M}{r^3} \sin\theta \\ B_\phi &= \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

磁场的总强度为

$$B = \frac{M}{r^3} [3\cos^2\theta + 1]^{1/2} \quad (1-3)$$

(注:有些作者是用偶极子场纬度来定义磁场,本计算公式是取地磁赤道到地磁北极的距离,这种方法与传统方法不同。)

计算结果表明,在地球表面赤道附近的总磁场强度约为30 mT (0.3 Gs),在两极点约为60 mT (0.6 Gs)。在第3章中将要介绍,