



航天科技图书出版基金资助出版

空间环境及其 对航天器的影响

[美] 文森特·L·皮塞卡 著
张育林 陈小前 闫 野 译



中国宇航出版社

本书在全面深入介绍空间环境及其对航天器影响的现有理论基础上，搜集整理了该领域的最新研究成果。全书内容包括太阳系概述、太阳、电磁场、重力场、磁层、中性环境、等离子体反应、辐射反应、航天器污染、流星体和轨道碎片、热控等。各部分内容结合工程实践，均配有具体案例，特别是NASA等研究机构在航天器系统和分系统设计中对环境影响的考虑，以及基于以往航天器异常和故障数据进行的改进设计经验，对航天器设计和产品研制具有很强的参考和借鉴意义。

ISBN 978-7-80218-878-5



9 787802 188785 >

定价：68.00 元

航天科技图书出版基金资助出版

空间环境及其 对航天器的影响

[美] 文森特·L·皮塞卡 著

张育林 陈小前 闫 野 译



中国宇航出版社

·北京·

Translation from the English language edition:

The Space Environment and Its Effects on Space Systems by Vincent L. Pisacane.

Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

ISBN 978-1-56347-926-7

Copyright © 2008 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

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: 01-2011-0326 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间环境及其对航天器的影响/(美) 皮塞卡(Pisacane, V. L.) 著;
张育林等译. —北京: 中国宇航出版社, 2010. 12

书名原文: *The Space Environment and Its Effects on Space Systems*
ISBN 978-7-80218-878-5

I. ①空… II. ①皮…②张… III. ①航天环境—影响—航天器—
研究 IV. ①V52②V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 252541 号

责任编辑 阎 列 责任校对 陈 琳 封面设计 宇航数码

出 版 社 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 北京画中华印刷有限公司

版 次 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 16.625 字 数 463 千字

书 号 ISBN 978-7-80218-878-5

定 价 68.00 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。可以登陆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

航天器是航天活动的主要载体，提高航天器的技术水平是航天领域永恒的主题。空间环境是航天器设计、研发与应用过程中必须考虑的重要因素，从某种意义上来说，航天器的发展水平受制于人类对空间环境的了解程度。当前，随着我国航天活动的日益增多，航天器的种类不断增加，数量不断增大，对航天器的性能、成本和研制周期等的要求也在不断提高。在开展航天器的研究活动时，如何借鉴国外空间环境科学研究的最新成果，充分汲取国外航天器的相关经验教训，对提高我国航天器的技术水平，推动我国航天事业的快速发展具有十分重要的意义。

2008年3月，《空间环境及其对航天器的影响》一书由美国航空航天学会（AIAA）出版社正式出版。作者文森特·L·皮塞卡（Vincent Pisacane）曾在美国的波音公司工作了30多年，负责和参与了多个航天器的研制，有着非常丰富的工程经验。从波音公司离职后，作者被聘为美国海军研究院海因莱因荣誉教授，从事航天器设计的教学与研究工作，他于2001年出版的《航天器基础》（Fundamentals of Space System）一书，已经成为美国航天器设计人员的经典教材，先后出版了3版。

作者以航天器设计专家的身份，针对空间环境对于航天器设计的重要影响撰写了本书，系统介绍了空间环境的基础知识，重点分析了各类空间环境因素对航天器的影响。作者写作本书时，充分考虑了航天器设计专业人员所需的空間环境知识的深度和广度。与其他的空间环境专著相比，本书具有以下几个鲜明特色：

- 系统性。本书以航天器设计过程中需要考虑的空间环境为主线，系统地介绍了太阳、地磁场、地球引力场、中性环境、等离子

体环境、辐射环境、流星体与空间碎片、热环境等知识，以及它们对航天器的影响，条理清晰、图文并茂，有利于读者查找、获取和理解空间环境的相关知识。

• 新颖性。本书搜集整理了空间环境研究的最新进展，并给出了美国国家航空航天局（NASA）等国外航天科研机构的大量研究案例，内容新颖、资料详实，对从事相关领域研究的科研人员有很好的启迪作用。

• 科学性。本书既注重对各空间环境因素基本原理的介绍，也注重结合工程实际进行具体阐述，所介绍的研究内容均取材于作者的科研成果及国际一流专著和论文，具有重要的学术参考价值。

• 实用性。本书对于各类空间环境因素影响的分析深入浅出，对于众多案例经验教训的总结具有较强的借鉴意义。同时，本书列出了大量精心设计的习题，便于读者理解和掌握相关知识。

本书共分12章：第1章介绍了空间环境及其对航天器影响的总体情况；第2章概要介绍了太阳系；第3章介绍了太阳的结构与特性；第4章介绍了地球磁场的结构、起源与模型；第5章介绍了地球的引力场模型；第6章介绍了地球的磁层和辐射环境；第7章介绍了中性环境；第8章介绍了等离子体环境；第9章介绍了辐射作用；第10章介绍了航天器的污染问题；第11章介绍了地球周围的流星体和空间碎片环境；第12章介绍了航天器的热控问题。

本译著是集体智慧的结晶，郑伟、张士峰、赵勇、陈利虎、绳涛、姚雯、朱亚文、白玉铸、钱山等同志做了大量工作，译者在此一并表示感谢。

本书可供从事航天器设计的专业人员和工程设计人员参考，也可作为高等院校航天器设计及相关专业研究生和本科生的教材，还可作为广大航天爱好者的参考读物。

由于译者水平有限，不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

2010年12月

序

我们非常高兴将文森特·L·皮塞卡先生的《空间环境及其对航天器的影响》一书呈现给大家。我们深信，这本全面深入论述空间环境的专著必将得到航天技术领域相关人员的好评。这本书共包括12章及附录。

文森特·L·皮塞卡先生在空间环境领域宽广而深厚的专业经历使他非常有资格来写本书。他掌握了关于这一主题的大量素材，同时还具备非常出众的能力，能够把这些素材非常有条理、非常清晰地组织和表达出来。

AIAA教育系列专著致力于涵盖航空航天领域的各类研究主题，包括基础理论、应用及工程设计等。登录 www.aiaa.org 可以查阅这一系列所有著作的目录。教育系列专著旨在出版可用于高等院校的教材、用于继续教育的辅助读物及用于独立研究的参考资料等。我们随时欢迎新主题的著作或新作者的加入。

约瑟夫·A·舒尔茨

AIAA教育系列专著主编

前 言

本书是一本探讨空间环境及其对航天器影响的专著。按照作者的设想,本书的读者主要包括两类:第一类是最主要的读者,即学习航天器设计与工程的本科生及低年级的研究生;第二类是专家,他们并非从事空间环境研究,但希望了解这一领域的基础知识。这一类书经常遇到的一个问题是如何把握内容的深度和广度。如果内容太深,则容易陷入细节,从而导致学习过程过于困难;而如果内容太浅,则不足以提供充分的基础知识,对于那些希望进一步学习相关知识的人而言就显得不够。我相信,本书所涉及的内容及其深度,已经足够使读者在概念设计的水平上掌握空间环境及其对航天器或航天器系统的影响。尽管本书重点阐述近地空间环境对于航天器的影响,但也涉及了一些行星际环境的内容。因为在未来,有很多任务将面向行星际。为了帮助读者更好地理解,本书每一章都列举了大量的实例,同时给出了一定数量的习题,并附有答案。本书还提供了不少参考书,便于读者了解相关主题的更多信息,并配备了一本相应的教师用书。

本书作为本科一学期工科课程(14周,每周3学时)的教材,建议采用以下教学计划。

章节	可略讲的部分	课时安排
1	—	2
2	2.6	2
3	—	3
4	4.7 和 4.8	3
5	5.5 和 5.7	2

续表

章节	可略讲的部分	课时安排
6	6.3.4 至 6.3.7	5
7	7.7, 7.8, 7.12, 7.13 和 7.14	3
8	8.5 和 8.8	2
9	9.8	4
10	10.8	2
11	11.4	3
12	12.3 和 12.4	6
总计		37

授课共计 37 个课时，此外还留有 5 个课时用于讨论、测验及复习等。如果已设专门的“热控”课程或“传热学”课程，则第 12 章可以不讲。如果还需要精简内容，建议删减第 5 章。

第 1 章简要介绍了航天器故障的成因、风险管理、可靠性与质量保障技术，以及部件的可靠性。本章给出了航天器所面临环境的特性及其对于航天器系统影响的总体情况。

第 2 章对于太阳系及其行星、小行星、彗星和流星作了总体介绍，这是因为未来将会有越来越多的航天器执行行星际任务。本章只对行星作了概要介绍，一些具体特性列于附录中。本章还对小行星和彗星的成分及主要的流星雨进行了简要介绍，对天体力学进行了简要介绍。

第 3 章描绘了太阳的结构，太阳是太阳系的中心，也是近地空间和行星际环境的主要能量源。本章描述了太阳的物理变化过程，包括太阳风、太阳电磁辐射特性，以及太阳电磁辐射与航天器间的相互作用，例如辐射压力等。

第 4 章介绍了地球磁场的结构、起源及模型，并分析了其对地球环境及航天器的影响效应。地磁场有时是航天器姿态的一个扰动源，但它也可以用于提供姿态控制力矩，或者用于耗散航天器振动

的能量。本章还介绍了行星的磁场，以及用来定量描绘磁场活动的部分参数。本章还简要介绍了地球的电场。

第5章介绍了地球的引力场，包括高阶的引力势能模型，及其对于航天器轨道的影响。给出了引力势能的定义，并详细介绍了应用较广泛的 WGS84 模型及参考椭球。还讨论了固体潮汐的问题，以及近地球轨道卫星升交点赤经、近地点幅角和平近点角的进动问题。

第6章介绍了地球的磁层和辐射环境，其中包括俘获粒子及运动、银河宇宙线和太阳粒子事件，它们都有可能影响航天设备或航天器的设计、运行和性能。其他讨论的主题包括磁刚度、俘获带电粒子的详细运动情况，以及银河宇宙线和太阳粒子事件的辐射流量等。

第7章介绍了中性环境，包括气体分子运动的基本原理、气体压力随高度的变化、电磁波的传播、低压及原子氧效应等。本章也讨论了容器中的气体隙透、地球大气的分层、行星大气和气动力对航天器的影响，以及典型的气动模型等，还给出了详细的气体分子运动理论以供参考。

第8章介绍了运行在地球周围的航天器必须面对的等离子体的环境，其中包括航天器充电原理、航天器接地和溅射，以及电磁辐射在电离介质中的传播情况等。本章讨论了电磁波传播过程中的临界频率、相速度和群速度、多普勒频移及法拉第旋转等，还分别介绍了低轨道和高轨道航天器的充电效应。

第9章描述了光子和带电粒子的辐射作用，及其对材料和人员的影响。本章还讨论了光子和带电粒子的衰减，以及位移损伤、总电离效应、单粒子效应及带电粒子沉积等问题。

第10章探讨了航天器污染问题，介绍了从在洁净室中进行系统研制和装配开始直到在轨操作的全过程中，用于控制污染的技术与手段，讨论了污染控制、污染分析、污染评估及前向和后向生物污染问题。

第11章介绍了地球周围的流星体和空间碎片环境，探讨了用于

降低潜在撞击风险的技术。本章还讨论了 NASA 的碎片控制策略，评估了碰撞概率，介绍了超高速碰撞效应，分析了遮护板与防撞器的设计。

第 12 章介绍了航天器的热控问题，包括对流、热传导和辐射等热传递方式。介绍了一些典型的热控组件，如热控涂层、第二表面镜、多层隔热组件、百叶窗、相变材料、加热器、热倍增器、热管、放射性同位素加热器及泵回路系统等，同时还针对航天器构型举例介绍了稳态与瞬态热分析的方法。

附录列出了本书所需的一些重要常数，以及太阳系中天体的参数。

文森特·L·皮塞卡

2008 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 空间环境引起的故障	9
1.3 风险管理	14
1.3.1 引言	14
1.3.2 风险识别	14
1.3.3 风险分析	15
1.3.4 风险规划	17
1.3.5 风险跟踪	17
1.3.6 风险控制与归档	17
1.4 可靠性与质量保证	17
1.5 部件可靠性	20
参考文献	23
第 2 章 太阳系概述	27
2.1 引言	27
2.2 太阳系中的行星	28
2.3 小行星	30
2.4 彗星	31
2.5 流星体	33
2.6 天体力学	35
参考文献	38
第 3 章 太阳	47

3.1 引言	47
3.2 太阳的基本结构	47
3.2.1 引言	47
3.2.2 日核	48
3.2.3 辐射区	49
3.2.4 对流区	49
3.2.5 光球层	50
3.2.6 色球层	50
3.2.7 日冕层	50
3.3 太阳活动	51
3.3.1 引言	51
3.3.2 米粒组织和超米粒组织	51
3.3.3 针状体	51
3.3.4 光斑	51
3.3.5 黑子	52
3.3.6 F 10.7 cm 通量	56
3.3.7 谱斑	58
3.3.8 日珥	58
3.3.9 耀斑	59
3.3.10 日冕物质抛射	59
3.4 日光层与太阳风	60
3.5 太阳能	62
3.5.1 太阳常数	62
3.5.2 黑体辐射	64
3.5.3 斯忒藩—玻耳兹曼定律	69
3.5.4 维恩位移定律	70
3.5.5 反照率	70
3.6 表面光作用	72
3.6.1 辐射压力	72

3.6.2 透光镀膜	75
3.6.3 紫外线降解	77
3.7 太阳模拟器	82
参考文献	83
第4章 磁场和电场	88
4.1 引言	88
4.2 基本原理	88
4.3 偶极场	93
4.4 地球磁场	97
4.5 磁场活动	102
4.6 磁场与航天器系统的相互作用	104
4.7 磁强计	105
4.8 地球电场	106
参考文献	107
第5章 引力场	111
5.1 引言	111
5.2 牛顿万有引力定律	111
5.3 高阶引力位	115
5.4 引力模型	118
5.5 液体和固体潮汐	123
5.6 卫星运动摄动	125
5.7 重力梯度力	129
参考文献	132
第6章 磁层	137
6.1 引言	137
6.2 地球磁层	138

6.2.1	引言	138
6.2.2	磁层的区域	140
6.2.3	磁刚度	145
6.3	辐射环境	148
6.3.1	引言	148
6.3.2	俘获辐射	149
6.3.3	洛伦兹力	151
6.3.4	均匀磁场	151
6.3.5	漂移速度	155
6.3.6	镜像反射	162
6.3.7	赤道损失锥	165
6.3.8	俘获辐射的模型	166
6.4	银河宇宙射线	169
6.5	太阳粒子事件	170
	参考文献	172
第7章	中性环境	177
7.1	引言	177
7.2	气体定律	177
7.2.1	引言	177
7.2.2	理想气体公式	178
7.2.3	道尔顿分压定律	179
7.3	气体的分子运动理论	182
7.4	隙透	186
7.5	地球大气	188
7.6	压强随高度的变化	192
7.7	行星大气	197
7.8	大气传播效应	199
7.8.1	路径或时间延迟	199

7.8.2 大气闪烁	203
7.8.3 吸收作用	203
7.9 原子氧	204
7.10 气动力	207
7.11 大气模型	212
7.11.1 美国标准大气	212
7.11.2 Jacchia 参考大气	213
7.11.3 质谱仪非相关散射模型	214
7.12 氧气对人类的作用	217
7.13 定义和背景	220
7.14 气体分子运动理论	222
7.14.1 分子热运动	222
7.14.2 麦克斯韦速度概率分布	224
参考文献	226
 第8章 等离子体作用	 231
8.1 引言	231
8.2 等离子体特性	232
8.2.1 引言	232
8.2.2 德拜长度	232
8.2.3 等离子体频率	234
8.2.4 等离子体参数	235
8.3 行星的电离层	235
8.4 地球的电离层	237
8.4.1 引言	237
8.4.2 D 区	239
8.4.3 E 区	240
8.4.4 F 区	241
8.4.5 电离层扰动	242