

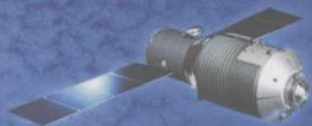


国家“十一五”出版规划重点图书
空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

空间环境 工程学

黄本诚 童靖宇 编著

SPACE ENVIRONMENT ENGINEERING



中国科学技术出版社

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

空间环境工程学

SPACE ENVIRONMENT ENGINEERING

黄本诚 童靖宇 编著

中国科学技术出版社

• 北 京 •

图书在版编目(CIP)数据

空间环境工程学/黄本诚,童靖宇编著. —北京:中国科学技术出版社,2010.6

(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 978-7-5046-5605-6

I. ①空… II. ①黄… ②童… III. ①航天环境-环境工程学-高等学校-教材 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 076377 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62173865 传真:010-62179148

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 印张:43.5 字数:900 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定价:90.00 元

ISBN 978-7-5046-5605-6/X · 105

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

全书共分 16 章,内容包括:航天器空间环境试验技术、空间环境数值仿真与虚拟试验、空间真空环境及其模拟技术、空间冷黑环境的热沉及分子沉模拟技术、太阳辐照环境模拟与试验技术、空间磁场环境及其模拟技术、微重力环境及其模拟技术、微流星体与空间碎片环境、空间粒子辐射环境及其效应、空间原子氧环境效应与防护技术、等离子体环境与航天器带电、月球与深空探测环境及其模拟试验技术、空间环境模拟设备与模拟技术、空间污染环境与控制技术、空间生命科学及空间环境产业等。

作者简介

黄本诚 1937年12月生,1960年毕业于哈尔滨工业大学。40多年来一直从事空间环境工程学的研究,并主编与合作撰写《空间环境工程学》、《空间模拟器设计》、《航天器空间环境试验技术》、《空间真空环境与真空技术》等7部著作。其研究成果“大型航天环模设备的研制”获国家科技进步一等奖(第1完成人),“KM6载人航天器空间环境试验设备”获国家科技进步二等奖(第1完成人)。先后获国家科技进步奖3项,部级科技进步奖14项。先后任北京卫星环境工程研究所研究员、博士生导师、KM6工程总设计师。1991年获政府特殊津贴。

童靖宇 1950年5月生,1982年毕业于兰州大学物理系。研究员,博士生导师。主要研究方向为空间环境效应与防护技术。曾获航天总公司科技进步二等奖1项、中国人民解放军科技进步二等奖1项、航天总公司情报研究二级论文奖1项。先后任中国空间技术研究院学科带头人、研发专家组空间环境效应与防护专业责任专家,国防科工局绕月探测工程科学应用专家委员会专家。

责任编辑	崔 玲
封面设计	中文天地
正文设计	孙 俐
责任校对	赵丽英 孟华英
责任印制	安利平

序

空间环境工程学是随着航天技术的发展而产生的一门新的学科,它主要研究空间环境对航天器的影响;空间环境模拟方法与模拟试验技术和空间环境的利用。

本书内容来自作者多年从事航天技术工作的经验,取材于国内外科学技术文献,因此,本书内容既反映了作者的经验和见解,也反映了国内外空间环境工程技术方面的新成果。

全书分16章,较系统地介绍了真空、冷黑、太阳辐照、磁场、粒子辐射、等离子体、磁层亚暴、微重力、微流星、空间碎片和原子氧等空间环境对航天器的影响及其模拟技术,也概述了空间工业、空间环境与生命科学和载人航天环境模拟技术。本书内容丰富,涉及知识面广,阅读它需要多方面的知识,但全书思路清晰,语言通俗,循序渐进,可作有关专业大学本科和研究生教学用,对从事航天技术的科技人员也是一本好参考书。

空间环境工程学是航天技术中的一个重要分支学科,因此,此书的出版,对我国航天技术的发展,航天器的研制和应用将起积极的作用。

阎桂荣

2001年

序 言

航天器作为高技术产品与其他产品的重要区别之一,就是要经历复杂严酷空间环境效应的考验。美国对 1971~1986 年发射卫星产生的 1589 次异常事件进行分析,结果表明 70% 的异常事件与空间环境有关。

为了满足不同轨道的卫星、载人飞船和空间站、月球探测器和深空探测器研究的需要,世界各航天国家已在空间环境模拟技术、地面试验评价方法、飞行探测及在轨试验验证技术、环境效应及作用机理、寿命预示与可靠性分析、空间环境效应防护技术等方面投入巨大的财力、人力,开展了广泛深入的试验研究工作,取得了大量研究成果,为促进航天器长寿命、高可靠技术发展发挥了非常重要的作用。

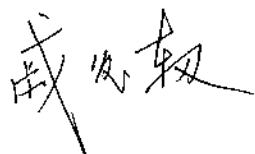
我国空间环境工程技术伴随我国空间技术的发展已经历了 40 多年的历史。我国已建立了以 KM6 空间模拟器、16m 磁试验设备等为代表的、具有国际先进水平的空间环境试验设备,保证了我国不同轨道的各类卫星、载人航天器、月球探测器的发射成功。同时,在电子、质子、紫外辐射、原子氧、等离子体与带电、微流星体与空间碎片、污染检测及控制、真空冷焊与摩擦寿命等特殊空间环境模拟及试验技术研究方面也开展了大量工作,许多研究成果已开始应用于工程试验。

空间环境工程是航天器工程技术中必不可缺的关键环节之一,在空间技术发展占有十分重要的地位。空间环境工程技术研究水平是衡量一个国家空间技术发展水平的重要标志。

空间环境工程技术也是一门多学科交叉的新兴技术,它涉及真空、低温、辐照、光学、气体放电、表面分析、超高速撞击、测量与控制、精密机械、计算机等多项专业技术,涉及普通物理、高能物理、空间物理、化学、材料学、机械学等多种学科。它的发展能牵动国家许多基础学科的发展。

《空间环境工程学》一书于1993年发行第一版,至今已历时14年。在这期间,国内外空间环境工程技术有了很大的进步。再版后的本书增加了大量近年来国内外空间环境工程研究的新理论、新技术、新成果,同时在书的结构上也作了较大调整,力图从系统性、逻辑性上更合理。本书不仅可以作为空间技术相关专业本科生、研究生的教科书,同时也为从事航天器工程设计、研制、试验的技术人员提供了一本优秀的专业技术参考书。

近年来,空间环境及其效应对航天器的严酷性已被逐步认识,空间环境工程技术受到日益广泛的重视,航天工业部门、中科院、高校都加强了对空间环境工程技术的研究,许多高校开设了与空间环境工程技术相关的专业课,我国空间环境工程技术发展进入黄金时期。在这个大背景下,《空间环境工程学》一书再版值得祝贺。在此,我衷心祝愿我国空间环境工程技术在国家创新战略的指引下取得更大成绩,以满足我国空间技术跨越式发展的需要,实现中华民族登上月球、飞出地球摇篮的千年梦想。



2009年11月10日

前 言

本书第一版于1993年出版,至今已有14年,本书出版后先后有多所高等院校作为航天类专业的高年级学生空间环境工程学教科书,并作为招收研究生入学考试的主要参考书之一。从20世纪90年代开始,由于我国航天技术的发展,从事航天器技术的研究、试验与研制单位逐年增加,本书作为高等院校学生学习的教材和航天器技术研究、试验与设计制造单位研究人员的参考书,发挥了积极的作用。

20世纪90年代以来,世界航天事业迅速发展,我国航天活动从试验阶段进入应用阶段,并积极开发各种新型航天器,特别是载人航天工程、探月工程的发展及新一代通信卫星、导航卫星、资源卫星、气象卫星与各类小型卫星的发展,空间环境工程技术也不断发展、不断进行研究开发,适应航天技术发展的要求。

十几年来国内外空间环境工程技术有了很大进步,再版中我们对有关章节进行了修改,并增补了大量新的内容,其中特别注意引用我国科技人员创新的研究成果。

本书的第2章第2.3.2节“航天器磁性数值仿真技术”由易忠研究员撰写;第2章第2.3.1节“真空热平衡试验数值仿真技术”由付仕明博士撰写;第9章第9.8.1.2节“超高速撞击特性”中有关弹道极限方程由侯明强博士撰写,并为本书编绘了部分插图;杨亦强研究员、丁一刚高工、刘向鹏工程师为本书提供了相关资料和图片;本书的第6章、第7章、

第 15 章分别由藏友竹研究员、齐燕文研究员、周传良高工审阅,曹燕对部分章节进行了文字校对,在此表示感谢。

本书初版时,在国内外未见有类似的论著出版,最近十几年来国内外已相继出版了类似的书籍,如国内航天丛书、《卫星环境工程与模拟试验》、《环境模拟技术》以及俄罗斯的有关专著等,从内容看各有侧重点,本书是以综合论述空间环境效应与机理为重点,结合空间环境模拟与试验技术,获得系统概念理论。书中列举的各种理论、方法、技术以及有关工程数据,对从事航天器技术与研制,航天器环境工程的研究、研制与试验人员和其他相关专业的科技人员具有参考意义。空间环境工程学是一门新兴的交叉学科,从理论和方法上都存在诸多不完善的地方,人们对它的认识还在不断深化中。加之作者水平有限,书中难免存在缺点甚至错误,恳请读者批评指正。

作 者

2010 年 1 月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 空间环境工程学研究的内容及范围	(2)
1.3 空间环境及其效应综述	(3)
1.4 空间环境试验技术	(8)
1.5 空间环境防护技术的研究	(11)
1.6 空间环境工程学的进展	(11)
第 2 章 航天器空间环境试验技术	(15)
2.1 概述	(15)
2.2 试验分类	(18)
2.3 试验方法与试验程序	(20)
2.4 试验剪裁与试验规范	(23)
2.5 试验验证计划与风险管理	(25)
2.6 航天器材料、涂层、器件主要试验项目	(27)
2.7 组件与部件试验技术	(30)
2.8 航天器系统级典型空间环境试验技术	(34)
2.9 整星(船)空间环境试验技术	(49)
第 3 章 空间环境数值仿真与虚拟试验	(55)
3.1 基本概念	(55)
3.2 数值模型与数值仿真	(60)
3.3 数值仿真技术在空间环境工程中的应用	(65)
第 4 章 空间真空环境与模拟试验技术	{86}
4.1 空间真空环境	(86)
4.2 真空环境效应	(89)
4.3 真空环境模拟技术	(93)
4.4 真空检测技术	(117)

4.5	空间真空环境润滑技术	(121)
4.6	空间真空环境与真空技术研究的展望	(122)
第5章	空间冷黑环境的热沉与分子沉模拟技术	(124)
5.1	空间冷黑环境	(124)
5.2	热沉模拟误差分析	(124)
5.3	热沉模拟的热辐射	(128)
5.4	热沉热负荷计算分析	(129)
5.5	热沉模拟的结构设计	(132)
5.6	分子沉模拟技术	(138)
5.7	热沉的制冷系统、调温系统与复温系统	(150)
第6章	太阳辐照环境模拟与试验技术	(167)
6.1	太阳辐照环境	(167)
6.2	太阳辐照的主要环境特征	(170)
6.3	太阳辐射环境效应	(171)
6.4	太阳辐照环境模拟技术	(172)
6.5	太阳模拟器的光源	(182)
6.6	国内外太阳模拟器	(187)
6.7	光源性能和太阳模拟器性能测量	(206)
6.8	红外模拟器	(212)
6.9	航天器真空热试验红外模拟器的设计 and 应用	(222)
6.10	太阳紫外辐照模拟技术	(223)
6.11	运动模拟器技术	(225)
第7章	空间磁场环境及其模拟技术	(241)
7.1	概述	(241)
7.2	空间磁场环境对航天器的影响	(243)
7.3	空间磁场环境模拟技术	(246)
7.4	试验室建设的要求	(255)
7.5	航天器磁设计的要求	(257)
7.6	航天器磁试验技术	(260)
第8章	微重力环境及其模拟技术	(274)
8.1	微重力环境	(274)
8.2	微重力环境效应	(275)

8.3	微重力环境模拟技术	(279)
第9章	微流星体与空间碎片环境	(303)
9.1	定义与研究背景	(303)
9.2	微流星体与空间碎片环境	(305)
9.3	微流星体和空间碎片对空间活动的威胁	(315)
9.4	空间碎片环境的探测	(318)
9.5	模型与数据库	(327)
9.6	空间碎片的减缓	(334)
9.7	空间碎片的主动防护	(337)
9.8	空间碎片的被动防护	(338)
第10章	空间粒子辐射环境及其效应	(367)
10.1	空间粒子辐射环境	(367)
10.2	辐射物理过程及其对材料的作用机理	(377)
10.3	空间粒子辐照环境效应	(388)
10.4	地面试验技术研究	(390)
10.5	辐射环境在轨飞行实验研究	(399)
10.6	抗辐射加固技术	(400)
第11章	空间原子氧环境效应与防护技术	(404)
11.1	原子氧环境	(404)
11.2	原子氧环境效应	(407)
11.3	原子氧的作用机理	(413)
11.4	原子氧引起航天器表面辉光	(415)
11.5	原子氧飞行实验	(417)
11.6	原子氧地面模拟试验技术	(425)
11.7	原子氧效应防护技术	(436)
11.8	数值仿真研究	(438)
11.9	低地球轨道综合环境协合效应	(440)
第12章	等离子体环境与航天器带电	(445)
12.1	空间等离子体环境	(445)
12.2	航天器带电研究的进展	(450)
12.3	表面带电	(452)
12.4	内带电	(474)

12.5	低地球轨道电离层等离子体带电	(493)
12.6	射频部组件二次电子倍增微放电	(510)
12.7	再入等离子体“黑障”现象简介	(515)
第 13 章	月球与深空探测环境及其模拟试验技术	(518)
13.1	概述	(518)
13.2	太阳系环境	(524)
13.3	月球环境模拟与试验技术	(540)
13.4	美国 NASA 空间探测极端环境技术简介	(560)
13.5	月球及深空探测环境工程技术的发展	(563)
第 14 章	空间环境模拟设备与模拟技术	(564)
14.1	概述	(564)
14.2	中国的空间环境模拟设备	(566)
14.3	国外空间环境模拟设备	(576)
14.4	光学传感器定标与发动机功能评价的热真空试验设备	(598)
第 15 章	空间污染环境与污染控制技术	(604)
15.1	空间污染环境	(604)
15.2	污染环境对航天器可靠性的影响	(610)
15.3	航天器污染防护与控制技术	(616)
15.4	污染量的检测技术	(624)
第 16 章	空间生命科学及空间环境产业	(629)
16.1	空间生命科学	(629)
16.2	空间环境产业	(646)

第1章 概论

1.1 概述

1.1.1 空间环境

空间环境是指太阳系内空间环境,包括地球空间环境、星际空间环境、行星空间环境。

地球空间环境:在地球轨道运行的航天器由于轨道不同具有不同的空间环境,在中、低轨道空间(低轨道高度 $100\sim 1000\text{km}$ 、中轨道高度 $1000\sim 10000\text{km}$)主要有中性气体、磁场、引力场、电场、电离气体、等离子体、各种波长的电磁波、流星体、碎片等环境;高轨道空间(36000km)主要有各种能量的带电粒子、等离子体、各种波长的电磁波、流星体、碎片等环境;在月球(380000km)空间主要有流星体、太阳风及月球表面六分之一的微重力、月貌、月壤、月尘、高低温、极高真空等环境。

星际空间与行星空间环境主要有流星体、太阳电磁辐射、行星际磁场、太阳宇宙线、银河宇宙线及不同行星表面的不同的特殊空间环境。

1.1.2 航天器环境

航天器环境是指航天器在制造、发射、在轨飞行、返回再入所遇到的环境。

航天器所经历的主要环境有:

(1)地面环境:包括制造、运输和储存过程中温度、湿度、振动等环境。

(2)发射环境:包括点火升空、级间分离、抛罩、变轨过程中产生的振动、噪声、冲击、加速度等力学环境。

(3)空间环境:是指航天器在空间运行时所遇到的自然环境和人为环境(又称诱导环境),包括真空、冷黑、太阳辐射、电子、质子、原子氧、弱磁场、微重力、等离子体、空间碎片、微流星等空间环境。

(4)返回再入环境:包括调姿、制动、再入、着陆等诱导产生的气动力加热与力学环境。

航天器要做到长寿命、高可靠,必须适应各种不同飞行剖面,经受着各种不

同组合的环境应力。

1.2 空间环境工程学研究的内容及范围

空间环境工程学是由于航天技术的发展而产生的新兴学科,是航天工程学科中的重要分支。它涉及多门学科与技术,主要有热物理学、电学、光学、磁学、力学、声学、空间物理学、真空科学与技术、深冷技术、计算机技术、自动化技术、机械工程技术等。

空间环境工程学研究的主要内容:

(1)空间环境对航天器的影响及其机理的研究。

(2)空间环境地面模拟方法及其模拟技术的研究。内容包括:空间环境物理模拟、空间环境效应模拟(用一种有效的模拟方法达到某种环境模拟的效果)、空间环境模拟设备的研制、模拟方法的研究与模拟误差分析、数值模拟技术的研究等。

(3)空间环境利用的研究。利用微重力环境展开大型轻质构件,利用磁环境控制航天器姿态,利用太阳辐照环境作为提供航天器工作的能源等。

(4)空间环境模拟的试验方法、试验技术、试验理论的研究。包括试验规范、试验标准化、环境试验预示、虚拟试验技术等研究。

(5)空间环境防护技术的研究。例如研究改变航天器表面结构形式与材料,防护碎片环境的撞击;改变航天器表面涂层防护原子氧的侵蚀等。

(6)在轨空间环境的探测试验技术研究。空间环境十分复杂,必须有一定的空间探测数据来验证地面上空间环境模拟试验的结果,或者作为修正地面上空间环境模拟试验模型的依据,以保证地面上空间环境模拟试验的真实性与可靠性。

(7)空间环境建模技术的研究。由于空间环境参数,在空间分布和随时间变化非常复杂,要有足够数量的探测结果。不同环境参数建立的模式,如高层大气模式、电离层模式、辐射带模式、轨道碎片模式、地磁场模式、宇宙线模式、太阳能量子模式等等,当前有部分模式比较简化,一些比较重要参数没有考虑;有的模式只给出平均状态,不能给出时间尺度较短的变化情况;有的是统计平均结果,与实际参数有一定差别。研究完整、实用的模式对研究空间环境效应及其预示、研究空间环境试验方法具有重要意义。

空间环境模式按编制的方法不同分理论模式与经验模式两类。

(8)月球与深空环境的模拟与试验技术研究。我国已开展探月工程的研究,

研究月球及其表面环境的模拟与试验是目前需要开展的一项重要工作。我国同俄罗斯合作已启动探测火星工程,火星上的表面大气压为 750Pa,主要成分为 CO_2 ,约占 95%,苏联、美国、欧洲已相继登陆火星。美、苏已有 27 个航天器探测或登陆金星,金星表面大气压为地球的 90 倍,主要成分为 CO_2 ,约占 97%,表面温度高达 465~485℃。美国还对水星进行了探测,水星是靠太阳最近的行星,大气稀薄,白天温度高达 700K,夜间 100K。深空环境的模拟与试验技术研究是深空探测的先期工作。

空间环境工程学的作用是为了减少或避免航天器产生故障或失效,以便延长航天器的工作寿命,提高航天器发射的可靠性,同时可以作为航天器在设计、研制、发射、在轨运行中主要参数选择的依据。例如在多种轨道可供选择时,环境影响会成为选择主要因素;决策航天器的发射时间,环境影响会成为主要因素;在设计航天器姿态控制系统时要考虑环境产生力矩的大小,同时考虑磁环境作为姿态控制的方法;在设计长寿命航天器时,要考虑高层大气密度来预测轨道陨落过程,决定燃料的多少;在设计载人航天器飞行辐射安全时,必须知道空间辐射的强度、成分及数量,以便设计防护措施;在设计太阳能电池阵时,需要计算空间粒子辐射造成的输出功率下降的因素等等。

因此,世界各航天国家都重视空间环境工程学的发展,作为航天技术的重点进行研究,它也是发展航天技术的重大基础学科。

1.3 空间环境及其效应综述

40 多年的航天技术的发展实践证明,几乎所有的航天器环境参数对航天器都有不可忽视的影响。环境导致的航天器事故举不胜举,据统计,其中空间环境占 70%,力学环境占 20%,其他环境占 10%。

1.3.1 真空环境及其效应

航天器运行轨道高度不同,真空度也不同,轨道越高,真空度越高。产生的影响如下。

(1)压力差效应。压力差的影响在 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^2 \text{ Pa}$ 的粗真空范围发生。当卫星的密封容器进入稀薄气体层后,使容器承受外部压力加剧,可能会导致密封舱变形或损坏,贮罐中液体或气体的泄漏增大,使用时间缩短。

(2)真空放电效应。真空放电发生在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 低真空范围。当电极之间发生自激放电时称为电击穿。当真空度达到 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 或更高时,在