

导弹与航天丛书
卫星工程系列

空间真空技术

主 编 达道安
副主编 李旺奎

 中国宇航出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统介绍了空间真空环境、空间真空环境模拟试验装置、空间材料的真空效应、空间材料的摩擦与润滑、空间应用的真空新工艺。着重介绍了与空间技术有关的真空获得、真空测量、空间质谱、表面分析及检测技术。

本书适合于从事空间真空技术工作的工程技术人员、科研人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间真空技术 / 达道安主编. —北京:中国宇航出版社,
1995.9(2009.8重印)

(导弹与航天丛书.第5辑,卫星工程系列)

ISBN 978-7-80034-695-8

I. 空… II. 达… III. 空间科学—真空技术 IV. V1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084601 号

责任编辑 崔素言 装帧设计 宇航数码

出 版 行 **中国宇航出版社**

社 址 北京市阜成路 8 号

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

零售店 读者服务部

(010)68371105

(010)68522384(传真)

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 1995 年 9 月第 1 版

2009 年 8 月第 2 次印刷

规 格 850×1168 开 本 1 / 32

印 张 18.875 字 数 486 千字

印 数 1001~1800

书 号 ISBN 978-7-80034-695-8

定 价 100.00 元

如有印装质量问题,可与读者服务部联系调换

《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员	屠守锷	黄纬禄	梁守槃	陈怀瑾
	王 卫	权振世	谢昌年	赵厚君
	曹中俄	张新侠	高本辉	

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

卫星工程系列 编辑委员会

主 任 孙家栋

副主任 戚发轫 杨嘉墀 屠善澄
侯深渊 (常务)

委 员 林华宝 朱毅麟 潘维孝 范本尧
邹广瑞 曾邑铎 王金堂 魏钟铨
李旺奎 黄本诚 陆道中 杨廷相
林鸿英 付继昌

办公室 陆道中 宋惠兰 杨树仁 王凤台

《空间真空技术》

作者名单

主 编 达道安

副 主 编 李旺奎

主编助理 陈隆智

作 者 (按姓氏笔画排列)

李旺奎	达道安	陈正全	肖祥正
陈隆智	邵惠民	张彦伟	张景钦
范垂祯	胡炳森	黄克威	黄良甫
薛大同			

重印版序

我国的航天事业在 50 多年的发展历程中，从无到有，从小到大，创造了以“两弹一星”、载人航天和绕月探测为重要里程碑的辉煌成就，构筑了专业齐全、功能配套、设施完备的航天科技工业体系，掌握了一大批具有自主知识产权的核心技术，积累了独具特色的航天工程管理经验和方法，造就了一支技术精湛、作风优良的航天人才队伍，孕育形成了具有鲜明时代特征的航天精神、“两弹一星”精神和载人航天精神，在世界高科技领域占有了一席之地，并在一些重要技术领域跻身世界先进行列，为维护国家安全、带动科技进步、推动经济发展、促进社会和谐和振奋民族精神作出了重要贡献。

回顾 50 多年的发展与建设，我国的航天事业，在创业中起步，在探索中发展，在改革中腾飞，走出了一条具有中国特色的创新发展之路，在取得辉煌成就的同时，通过无数航天科技工作者的探索与实践，也创造积累了十分宝贵的经验。为了将这些知识财富传承下来，用以指导新时期的航天重大工程实践，促进航天科技成果在更加广阔的领域推广应用，为推动国民经济建设和社会进步发挥更大的作用，自 20 世纪 80 年代起，数以千计的航天科技工作者历时 20 余年，从导弹武器、运载火箭和空间飞行器等航天产品的设计、研制、生产、试验等各个方面，系统总结了在实践中形成的理论、方法和工程经验，编纂了一部共 156 册、6500 余万字的鸿篇巨制——《导弹与航天丛书》，奉献给广大读者。

当前，面对世界格局多极化、全球经济一体化、科学技术突飞猛进以及新军事变革不断向纵深发展的新形势，航天科技工业

作为国家的战略安全基石以及科技进步、经济发展、社会和谐的重要推动力量，越来越凸现出其重要的战略地位。十七大以来，党和国家高度重视航天科技工业的发展，提出了富国强军的明确要求，部署了包括载人航天工程第二步、探月工程二期、高分辨率对地观测系统、新一代运载火箭在内的一系列国家重大工程和重大科技专项任务，可以说，航天科技工业正处于历史上任务最多、发展最快的重大战略机遇期，形势和任务对航天科技工业的发展提出了新的更高要求。如何抓住难得机遇，乘势而上，圆满完成国家任务，从而推动我国航天事业全面、协调、可持续发展，真正担负起富国强军、建设创新型国家和推动我国成为航天大国、强国的历史责任，是新一代航天科技工作者必须面对的重大考验。

因此，在新时期航天事业蓬勃发展和读者需求的强力推动下，重印《导弹与航天丛书》凸显了重要的现实意义和深远的历史意义。希望这部丛书能够使我国航天事业 50 多年的创新成果和实践经验，在新的历史时期彰显出无穷活力，给人以更加深刻的启示，从而推动更多的航天科技工作者在新的航天工程实践中，不断继承、完善、发展航天事业 50 多年形成的宝贵经验，积极探索新形势下航天科技工业发展的内在规律，努力建设航天科技工业新体系，使我国的航天事业在新的起点上不断谱写更加辉煌的历史篇章。

马兰瑞

2009 年 6 月

总 序

导弹与航天技术是现代科学技术中发展最快的高新技术之一。导弹武器的出现，使军事思想和作战方式发生了重大变革；航天技术把人类活动的领域扩展到太空，使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。

导弹与航天工程是复杂的系统工程，它运用了现代科学技术众多领域的最新成果，是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物，是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志。

中国人民经过 30 年的努力，依靠自己的力量，勇于开拓，坚韧不拔，在经济和科学技术比较落后的条件下，走出了自己发展导弹与航天技术的道路；造就了一支能打硬仗的技术队伍；建立了具有相当规模和水平的导弹与航天工业体系；形成了遍布全国的科研、生产协作网。这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利，是全国各地区、各部门大力协同，组织社会主义大协作的丰硕成果。

30 年来，我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程，装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹，用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星。我国导弹与航天工业的这些重大物质成果，对增强我国的国防实力、促进经济发展、带动科技进步发挥了重要的作用。

我们不仅取得了丰硕的物质成果，而且积累了宝贵的实践经验。为了发展中国的导弹与航天事业，多少人投入毕生的精力，贡献了宝贵的智慧，付出了辛勤的劳动，备尝了失败的苦痛和成功的欢欣。付出高昂代价取得的实际经验，从书本上学不到，更

不可能从外国买来，只能靠自己在实践中总结。为了加速我国导弹与航天事业的发展，需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论，总结其工程经验，用以指导今后的研制实践，并传授给导弹与航天事业一代又一代新生力量，使他们能在较高的起点上开始工作。为此，我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家与工程技术人员，编著了这套《导弹与航天丛书》。它以工程应用为主，力求体现工程的系统性、完整性和实用性，是我国导弹与航天技术队伍 30 年心血凝聚的精神成果，是多领域专业技术工作者通力合作的产物。

作为一项系统工程，要求参加导弹与航天工程研制工作的各类技术人员，不仅精通自己的专业，而且充分理解相关专业的要求和特点，在统一的总体目标下，相互协调、配合密切地工作。因此，本丛书也是导弹与航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员进行技术交流的读物。

本丛书按液体弹道导弹与运载火箭（Ⅰ）、固体弹道导弹（Ⅱ）、防空导弹（Ⅲ）、飞航导弹（Ⅳ）、卫星工程（Ⅴ）等 5 个型号系列编排；对各系列共用的固体推进技术和空气动力学两种专业技术，将有关著作编为专著（Ⅵ和Ⅶ），其他共用专业技术则分别纳入 5 个型号系列中的一个系列，并供其他系列选用。

本丛书的各级编委会、各册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术群体，为了编写好这部大型丛书，编著人员在组织和技术工作上都付出了巨大劳动。期望这套丛书能帮助人们加深对于导弹与航天技术的了解，促进中国的导弹与航天事业向更高的目标迈进。

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987 年 8 月

卫星工程系列

序 言

卫星工程系列是《导弹与航天丛书》的系列之一。

我国坚持自力更生、艰苦奋斗的方针，在人造卫星的研制工作中取得了举世瞩目的成就。1970年4月24日，中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”发射成功，卫星运行正常，我国跨入了空间大国的行列。至今，我国成功地研制和发射了30颗不同类型的人造卫星，其中包括当代最重要的三类应用卫星：高轨道的静止通信卫星、低轨道的返回式卫星和中轨道的遥感卫星。这些卫星应用于国民经济、国防建设、文化教育和科学研究的很多部门，取得了显著的社会效益和经济效益。

我国在研制人造卫星的工作中，开展了创造性的科研活动，积累了丰富的实践经验，形成了学科门类齐全的卫星工程知识体系。我们组织众多的工程技术专家编写本系列图书的目的，在于将这些实践经验和理论知识进一步系统化和理论化，并适当吸收国外先进的科学技术成果，使其形成一整套航天技术著作，用于指导今后的卫星研制工作。本系列图书共有19种29分册，包括卫星工程概论、卫星分系统技术和专业技术，以及探空火箭设计。

本系列图书的内容以人造卫星的研制技术为主，着重论述卫星工程技术方面的问题，并简要论及了许多相关学科的问题，使其具有完整性、系统性。某些分册涉及载人飞船、空间站等其他类航天器的工程技术问题，其中论述内容较多的两册，书名冠以

航天器。本系列各分册在内容上具有相对的独立性和系统性。

编纂卫星工程系列图书尚无经验可循，我们的工作首次尝试，由于编著人员的知识水平和实践经验有限，书中不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

本系列图书的编纂工作，得到很多单位领导、广大科技人员和宇航出版社很多同志的大力支持，在此致以衷心的感谢。

卫星工程系列

编辑委员会

1991年6月

前 言

《空间真空技术》是《导弹与航天丛书》卫星工程系列中的一本技术专著。本书由中国空间技术研究院多位专家共同编写。书中主要论述了空间真空环境，与空间技术有关的真空获得、真空测量、空间质谱、表面分析及检漏技术等方面的内容。还介绍了与之有关的空间真空环模试验装置、空间材料的真空效应、空间材料的摩擦与润滑以及若干在空间技术中获得应用的真空新工艺。本书的特点是注意结合工程设计，强调实用性，是在密切结合应用研究、工程设计等实践经验的基础上写成的。

书中的内容概念清楚、叙述准确、论理明白、结论正确，给出了必要的公式、数据、图表，便于工程设计人员和工程应用人员使用。

本书共 11 章。各章之间有较大的独立性，读者可根据自身需要选择有关章节阅读。

本书适合于从事空间真空技术工作的工程技术人员、科研人员阅读，也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

编 者

1994 年 9 月

目 录

第1章 概论	达道安 陈隆智
1.1 空间真空技术的研究范畴	(1)
1.2 空间真空技术的特点	(4)
1.3 空间真空技术的应用	(7)
1.4 展望	(9)
参考文献	(12)
第2章 空间真空环境	达道安
2.1 概述	(13)
2.2 气体密度	(14)
2.3 分子沉环境	(17)
2.4 太阳辐射	(18)
2.5 微重力环境	(19)
2.6 原子氧环境	(20)
2.7 诱发的气体环境	(21)
2.8 空间碎片环境	(22)
2.9 空间真空环境和航天器的相互作用	(22)
2.9.1 概述	(22)
2.9.2 真空环境和航天器的相互作用	(23)
参考文献	(27)
第3章 真空获得	达道安 张彦伟
3.1 空间环境模拟试验	(28)
3.1.1 空间环境模拟	(28)
3.1.2 空间环境模拟试验分类及设备类型	(33)
3.2 火箭发动机高空点火模拟设备	(34)

3.2.1	概述	(34)
3.2.2	真空抽气系统	(35)
3.3	高轨道真空环境模拟	(40)
3.3.1	高轨道环境模拟中的真空问题	(41)
3.3.2	以扩散泵为主泵的热真空模拟设备	(44)
3.3.3	用表面作用泵获得清洁的真空环境	(48)
3.3.4	中国现有的高轨道环境模拟设备	(51)
3.4	分子流的非平衡态理论	(54)
3.4.1	简单结构中的非平衡分子流	(54)
3.4.2	复杂结构中的非平衡分子流	(56)
3.4.3	分子沉与极高真空环境模拟	(60)
3.5	在轨航天器中的真空获得技术	(62)
3.5.1	航天器周围的分子环境	(62)
3.5.2	航天器真空装置在轨排气技术	(65)
3.5.3	极高真空分子屏实验平台	(66)
	参考文献	(75)
第4章	空间真空环模试验装置	邵惠民 陈正全
4.1	概述	(77)
4.2	空间真空环模试验装置设计的一般原则	(78)
4.2.1	大型真空容器的设计	(78)
4.2.2	真空抽气系统的配置	(83)
4.2.3	冷热环境设计	(92)
4.2.4	其他配套装置	(99)
4.2.5	获得真空环模的三个关键要素	(102)
4.3	空间真空环模装置应用实例	(106)
4.3.1	全尺寸航天器用环模试验装置	(106)
4.3.2	组件部件用环模试验装置	(116)
4.3.3	TS-3 离子发动机综合试验装置	(122)
4.3.4	X 射线望远镜空间环模检测装置	(123)
4.3.5	红外扫描辐射计定标装置	(127)
	参考文献	(129)

5.1 概述	(131)
5.2 空间环境模拟室中的真空测量	(132)
5.2.1 分子沉模拟——“有效压力”测量	(132)
5.2.2 非稳定流模拟——快速测量	(133)
5.2.3 超音速流模拟——“静压”与“动压”测量	(134)
5.2.4 复杂的温度环境——非热力学平衡	(135)
5.2.5 综合环境模拟——抗干扰测量	(136)
5.2.6 特大系统中的真空测量	(137)
5.3 航天器上的真空测量	(138)
5.3.1 方向性效应	(139)
5.3.2 质量选择效应	(143)
5.3.3 原子氧再复合效应	(144)
5.3.4 空间固有离子的侵入	(144)
5.3.5 复杂、变化的被测对象	(144)
5.3.6 航天器的喷气、放气效应	(145)
5.4 星球表面的真空度测量	(145)
5.5 非平衡态分子流的测量	(147)
5.5.1 稳态非均匀分子流的测量技术	(148)
5.5.2 瞬态分子流测量技术	(160)
5.6 指向性真空规	(163)
5.6.1 不同类型指向规的结构	(164)
5.6.2 转换器型指向性真空规	(169)
5.6.3 指向性真空规应用举例	(176)
5.7 抗干扰与快速测量技术	(178)
5.7.1 抗干扰原理	(178)
5.7.2 影响规管快速反应的因素	(181)
5.7.3 抗干扰、快速真空规举例	(184)
5.8 极高真空测量技术	(187)
5.8.1 深度宇空与极高真空测量	(187)

5.8.2 极高真空规	(188)
5.8.3 展望	(198)
5.9 空间科学中的真空计量标准	(199)
5.9.1 概述	(199)
5.9.2 超高和极高真空计量标准	(200)
5.9.3 原位置校准	(203)
5.9.4 超音速分子流校准	(206)
5.9.5 非稳定流校准	(207)
参考文献	(209)
第6章 空间质谱技术	胡炳森
6.1 质谱技术与空间探测	(212)
6.1.1 探空质谱计的测量参数	(214)
6.1.2 探空质谱计的离子源	(215)
6.1.3 不同类型的探空质谱计	(217)
6.2 质谱技术在载人航天器中的应用	(221)
6.2.1 生命保障系统气氛的质谱分析	(221)
6.2.2 计算机监测的质谱计系统	(223)
6.2.3 航天员生理监测质谱计	(225)
6.3 空间诱发污染环境的质谱监测	(231)
6.3.1 诱发污染监测的必要性	(231)
6.3.2 污染环境实时监测质谱计	(232)
6.3.3 分子污染物的质谱分析与跟踪	(233)
6.4 火箭发动机燃气与燃料加注环境的气氛 分析	(246)
6.4.1 火箭发动机燃气的质谱分析	(246)
6.4.2 火箭燃料加注环境的气氛分析	(248)
6.5 空间环境模拟设备中的气体质谱分析	(257)
6.5.1 模拟试验时定向分子流的质谱分析	(257)
6.5.2 卫星分系统及部件的漏率测量	(260)
6.5.3 环模设备的残气分析	(263)
参考文献	(266)