



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

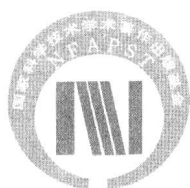
真空科学技术丛书

宇宙真空学

达道安 杨亚天 著



化学工业出版社



国家科学技术图书馆 金资助出版

真空科学技术丛书

宇宙真空学

达道安 杨亚天 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书综述了宇宙真空学的概念、理论、方法及计算结果与实际观测结果的符合性,探讨了宇宙真空的物理本质,是一门新的学科领域。全书共分9章,包括极高真空获得技术、空间真空测量、极高真空气体分子运动理论、近地球轨道极高真空获得技术、行星际大气密度分布律、行星大气逃逸理论、月球表面大气及水汽的寿命、宇宙真空的物理本质。

本书可作为宇航科技人员、大学真空专业、物理专业、宇航学院大学生、研究生的教材或参考书,也可供天文、气象工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

宇宙真空学/达道安,杨亚天著. —北京:化学工业出版社, 2012.6

真空科学技术丛书

ISBN 978-7-122-11929-2

I. 宇… II. ①达…②杨… III. 真空技术-应用-航天学
IV. ①V419②TB79

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第144818号

责任编辑:戴燕红 郑宇印

文字编辑:陈元

责任校对:吴静

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张16 字数352千字 2012年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:65.00元

版权所有 违者必究

《真空科学技术丛书》编写人员名单

主 编 达道安

副 主 编 张伟文 邱家稳 杨乃恒

参编人员（按姓氏笔画排序） 王荣宗、王欲知、王得喜、王敬宜、达道安、
刘玉魁、刘喜海、杨乃恒、杨亚天、李云奇、
李得天、邱家稳、邹惠芬、张伟文、张涤新、
张景钦、陆 峰、范垂楨、郑显峰、查良镇、
徐成海、谈治信、崔遂先、薛大同、薛增泉、

技术编辑 谈治信

编辑助理 权素君 曹艳秋

丛书序

真空科学技术是现代科学技术中应用最为广泛的高技术之一。制备超纯材料需要超高真空技术，太阳能薄膜电池及芯片制作需要清洁真空技术，航天器空间环境地面模拟设备需要大型真空容器技术。真空科学技术已渗透到人们的教学、科研、生产过程、经济活动以及日常生活中的方方面面，人们普遍认识到了真空科学技术的重要性。

真空科学技术是一门涉及多学科、多专业的综合性应用技术，它吸收了众多科学技术领域的基础理论和最新成果，使自己不断地进步和发展。真空科学技术的应用标志着国家科学和工业现代化的水平，大力发展真空科学技术是振兴民族工业，实现国家现代化的基本出发点。

多年来，党和国家政府非常重视发展真空科学技术。大学设立了真空科学技术专业，培养高层次真空专业人才；兴办真空企业，设计、制造真空产品；成立真空科学技术研究所开发新技术，提高真空应用水平；建立了相当规模和水平的真空教学、科研和生产体系；独立自主地生产出各种真空产品，满足了各行业的需求，推动了社会主义经济的发展。

在取得丰硕的物质成果和经济效益的同时，真空科技人员积累了宝贵的理论认知和实践经验。在和真空科学技术摸、爬、滚、打的漫长岁月中，一大批人以毕生的精力，辛勤的劳动亲身经历了多少次失败的痛苦和成功的喜悦。通过深刻的思考与精心的整理换得了大量的实践经验，这些付出了昂贵代价得来的知识是书本上难以学到的。经历了半个世纪沧桑岁月，当年风华正茂的真空科技工作者均年事已高，霜染鬓须，退居二线。唯一的希望是将自己积累的知识、技能、经验、教训通过文字载体传承给新一代的后来人，使他们能够在前人搭建的较高平台上工作。基于这一考虑，在兰州物理研究所支持下，我们聚集在一起，成立了《真空科学技术丛书》编写委员会，由全国高等院校、科研院所及企业中长期从事真空科学技术研制工作的工程技术人员组成。编写一套《真空科学技术丛

书》，系统的、完整的从真空科学技术的基本理论出发，重点叙述应用技术及应用的典型例证。这套丛书分专业、分学科门类编写，强调系统性、理论性和实用性，避免重复性。这套丛书的出版是我国真空科学技术工作者大力合作的成果，汇集了我国真空科学技术发展的经验，希望这套丛书对 21 世纪我国真空科学技术的进步和发展起到推动作用，为实施科教兴国战略做出贡献。

这套丛书像流水一样持续不断，是不封闭的系列丛书，只要有相关著作就可以陆续纳入这套丛书出版。《丛书》可供大专院校师生，科学研究人员，工业、企业技术人员参考。

这套丛书成立了编写委员会，设主编、副主编及参编人员、技术编辑等，由化学工业出版社出版发行。部分真空界企业提供了资助，作者、审稿者、编辑等付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心感谢。

达道安

2012 年 03 月 22 日

序

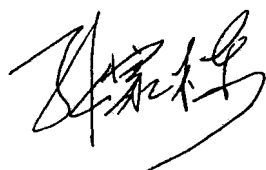
航天器（卫星、飞船、空间站、行星探测器等）长期在宇宙真空环境中生存，和宇宙真空环境发生相互作用，使航天器材料、器件、设备的物理、化学、电学、力学、表面特性、摩擦润滑学、热学等性能发生了变化。影响人们在地面大气环境中生产制造的航天器的工作性能，特别是可靠性及寿命。真空环境是航天器入轨后要适应的第一空间环境，研究航天器和真空环境相互作用发生的效应、效应的地面模拟试验、评价试验以及防护效应的验证实验一直是航天科技工作者的重要课题。建立在中国航天科技集团公司五院五一零所的“真空低温技术与物理”国家实验室在空间环境效应评价及防护技术方面做了大量富有成效的工作，发展了真空科学技术在航天工程领域的应用。为我国航天事业做出了突出贡献。

进入 21 世纪以来，美、俄、中、日、印及欧洲等国大力开展宇宙行星探测计划；包括月球探测、建立月球基地、火星探测、实现载人登陆火星等，这是航天技术发展的必然趋势。人们需要更详细地了解地球周围行星的信息，特别是生命特征及行星的环境和资源。因而需要研究宇宙真空环境特性；包括航天器周围的真空环境，它是由宇宙本底真空和航天器放气派生的真空环境叠加而成，行星之间的行星际真空以及行星表面真空（大气）环境特性。长期以来科学家利用天文观测、行星探测器测量了一些数据，但尚未建立完整的理论计算体系。

达道安研究员长期从事真空科学技术在航天工程中的应用研究工作，在空间环境模拟理论、极高真空技术与物理等方面取得了重大研究成果。近年来他和杨亚天教授合作研究宇宙真空学，提出了可变翼轨道分子屏概念，发展了轨道分子屏技术。解决了用玻耳兹曼气体分子分布律公式计算行星大气总分子数时出现的发散问题，经过重整化后给出了修正的玻耳兹曼公式，计算了行星大气总质量及行星周围大气密度分布。他们又在该理论的基础上，建立了行星大气逃逸方程，计算出了行星大气的寿命，行星水汽、水冰的寿命等，得到了和实测结果相一致的结果。

“宇宙真空学”是作者针对宇宙真空环境建立的全新的理论，把真空科学技术推广到宇宙空间，具有开创性。作者将在这个领域发表的论文收集整理成专著出版的目的不仅是与他人分享自己的研究成果，而且希望和更多的人进行

交流，更多地开展该理论的应用研究。这是一件非常有意义的工作，我谨表示祝贺。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '孙家栋' (Sun Jiazhong), written in a cursive style.

二〇一一年十一月

注：孙家栋系中国科学院院士；获“两弹一星元勋”称号；荣膺 2009 年度国家最高科学技术奖。

前言

地球表面充满了大气，原本不存在真空，直到 17 世纪，意大利人发现用泵汲水的高度受到限制，伽利略（Galileo）测量汲水的限制高度为 10m，认识到这是由于大气的重量产生的压力引起的。伽利略让他的学生托里切利（Torricelli）测量大气压力的大小，托利拆里把密度为 $13.6\text{g}/\text{cm}^3$ 的水银灌满长度 40in（约 1m）的一端封闭、另一端开口的玻璃管内，倒置在水银池中，形成一个 U 形管压力计，测得大气压力等于垂直高度为 760mm 水银柱的重量产生的压力，正好和 10m 水柱产生的压力相等。同时发现在玻璃管封闭端的里面形成 10in（约 256mm）长的真空空间。这是人类首次得到的人造真空的实例。以后经过三百余年的发展，人们发明了真空泵、真空计，建立了气体分子运动理论，形成了完整的真空科学体系，使真空技术广泛地应用于各领域，促进了人类社会的进步。

1957 年苏联成功地发射了人造地球卫星，1959 年宇航员驾驶宇宙飞船进入宇宙空间。1969 年美国用 Apollo 飞船把宇航员送上月球。证明人类具有进入宇宙太空的能力。近年来世界各国相继开展探测月球、火星、行星、小行星的活动。所有的空间探测器、卫星、飞船不仅飞行而且生存在宇宙真空环境中，长时期和宇宙真空环境发生相互作用，影响航天器的工作性能、可靠性及寿命。如果航天器在行星表面降落、着陆、巡航、勘测、取样及返回，必须了解宇宙及行星表面的真空或大气特性。前日本真空株式会社理事长林主税在“21 世纪真空科学技术展望”中提出了“21 世纪的真空科学技术是宇宙真空时代”的概念。前中国工程院院长宋健在 2004 年说：人类生活在地球表面，有大气层保护着，在日常生活中已经感到研究真空的重要。实际上，数十公里高的大气层以外的太阳系空间，太阳系以外的银河系以及整个可见宇宙中全部是“真空”，20 世纪下半叶，人类航天事业的出现，卫星、飞船、登月、深空探测都迫切需求关于宇宙真空的科学知识和开发利用以及对付真空的技术。宇宙真空是开放的、天然的非平衡态系统，完全不同于地面人造真空容器中的平衡态系统。因此，深入系统地研究宇宙真空特性的任务摆在了真空科学技术工作者的面前。

解决这个问题有两个技术途径。一是实际观测；由于大气分子处于准

静态分布，测量探测器的坐标系固定在航天器上，航天器又以宇宙速度做曲线运动，是一个非惯性坐标系；同时，测量探测器不断地放出气体，扰动了宇宙真空本底，难以实现准确测量宇宙真空度的目的；况且，偌大的宇宙空间，测量的空间位置点太少也没有实际的应用价值；何况，测量的成本也是很昂贵的。二是如果建立一个正确的理论体系，从理论上计算出宇宙空间气体分子的密度分布，计算结果又和人们观测的有限数据较好的符合，问题就得到了解决。

基于上述的思路，作者经过数十年的摸索、钻研，建立了宇宙真空学的理论体系，给出了宇宙空间航天器周围真空度的计算，行星际空间气体分子密度的分布律及行星大气分布、逃逸寿命、总质量等的计算理论。形成了基本完善的宇宙真空学的理论体系。该项研究工作得到“真空低温技术和物理”国家实验室基金资助。研究结果发表在国内外学术期刊上。为便于读者学习、研究和应用宇宙真空的研究结果，作者又用了两年的时间，将研究结果整理成书以飨读者，欢迎有兴趣者共同研究发展宇宙真空科学技术。

凡事都有个过程。20 世纪 70 年代作者承担了经中国空间技术研究院首任院长钱学森批准的极高真空技术的研究课题。经过十余年的努力，作者和课题组的同志们圆满完成了极高真空的获得、测量和极高真空气体分子运动理论研究。把我国真空科学技术的水平提高到了一个新的阶段，获得了 1987 年国家科技进步二等奖。在攻克极高真空技术的岁月中，使作者认识到地面极高真空和宇宙真空具有相似性。于是开始了思考、调研，逐渐形成了系统的思路。首先从研究近地球轨道航天器周围的真空环境入手，利用可变翼轨道分子屏技术在航天器周围获得极高真空，开展空间超纯材料加工实验，建立了可变翼轨道分子屏技术的理论。然后，形成了宇宙真空包括行星际真空、行星表面真空（大气）及航天器周围真空的概念。这些概念、理论、技术是由地面极高真空技术延伸而来。因而，本书中也就包含了地面极高真空技术的内容。读者先从地面极高真空技术开始阅读容易理解，并对学习宇宙真空的内容有所帮助。本书中收录了作者与此有关的研究结果，对启发读者的思维，扩大读者的近代科学知识领域会有所帮助。

本书在成书过程中得到了中国航天科技集团公司、中国空间技术研究院及五一零研究所领导及诸多专家的支持，化学工业出版社的热情帮助。并和段一士教授、毛铭德教授、薛大同研究员、邵明学博士进行了有益的讨论。北京大学薛增泉教授和五一零研究所范垂桢研究员参加了审稿，提出了宝贵的意见，作者做了认真的修改。本书申请了 2011 年度国家科学技术学术著作出版基金，2011 年 12 月 30 日，出版基金委员会通知作者《宇宙真空学》（项目编号：2011-D-013）通过了专家组评审并得到基金委批准。评审意见写道：本书系原创性实验技术及基础理论专著，系统总结了作者三十年来在极高真空技术与物理、可变翼轨道分子屏技术和理论、

宇宙真空学方面具有自主创新的研究结果。书中推导出的行星大气总质量公式、行星气体总质量随高度分布公式、行星气体分子密度随高度分布的气压计公式等具有很强的原创性。

本书具有原创性，发展了极高真空技术与物理，建立了宇宙真空学的理论基础，把真空科学技术从地面延伸到宇宙真空，填补了空白，国内外尚无相似著作出版。本书对发展我国真空科学技术、深空探测等方面有重要的指导作用和应用价值。

鉴于宇宙真空学是一个新的领域，不足和疏漏之处在所难免，诚恳希望读者提出宝贵意见。

高级工程师谈治信技术编辑、权素君编辑对书的整理、编辑、校对、打印工作付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢。

达道安 杨亚天

2012年4月于航天五一零所

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论 1

1.1 宇宙真空学的发展	1
1.2 宇宙真空学的内涵	3
1.3 宇宙空间真空环境特性	4
1.4 宇宙真空环境分类	5
1.5 行星表面环境	6
1.5.1 月球表面环境	6
1.5.2 火星表面环境	7
1.6 宇宙空间气体分子运动论的研究方法	8
1.6.1 牛顿力学方法	8
1.6.2 统计学方法	9
1.6.3 气体动力学方法	10
1.6.4 重整化的玻耳兹曼分布律	11
参考文献	12

第 2 章 极高真空获得技术 13

2.1 引言	13
2.2 限制极限压力的因素	15
2.2.1 容器内原有的气体的余压力	16
2.2.2 漏气	16
2.2.3 放气	17
2.2.4 渗漏	23
2.2.5 返流	26
2.3 极高真空获得机理	27
2.3.1 扩散泵	27
2.3.2 涡轮气体分子泵	27

2.3.3	溅射离子泵	28
2.3.4	冷冻升华钛泵	28
2.3.5	低温泵	29
2.4	获得极高真空的技术	31
2.4.1	用油扩散泵系统获得极高真空的质谱分析	31
2.4.2	极高真空液氮冷凝泵	36
2.4.3	钛钨丝和钛钨丝蒸发参数和吸气性能	43
2.4.4	极高真空设备中的冷漏现象及其消除方法	51
2.5	用气体分子沉技术获得 10^{-11} Pa 极高真空装置	55
2.5.1	概述	55
2.5.2	极高真空系统组成	55
2.5.3	10^{-11} Pa 极高真空系统设计	57
2.5.4	极高真空系统运转规范	58
2.5.5	试验结果与讨论	60
2.6	极高真空技术的应用	61
2.6.1	高能粒子加速器	62
2.6.2	气体分子束外延技术用来生长极纯半导体单晶材料	62
2.6.3	在航天技术领域应用极高真空技术	62
	参考文献	62

第3章 宇宙真空测量

64

3.1	引言	64
3.1.1	宇宙真空测量的概念	64
3.1.2	宇宙真空测量效应	65
3.1.3	宇宙真空测量方法	66
3.2	极高真空电离真空规	67
3.2.1	抑制规	67
3.2.2	抑制规性能	68
3.2.3	弯注规	69
3.2.4	规管的电极材料及其制作要求	71
3.2.5	规管使用中的问题	71
3.3	改进型裸弯注规	72
3.3.1	使用陶瓷封接引线	72
3.3.2	裸型弯注规离子流的低噪声引出线	72
3.3.3	合理地运转程序	73

3.3.4	调整弯注规内偏转电压参数	73
3.3.5	校准弯注规规管灵敏度常数	73
3.3.6	改换测量灯丝	73
3.4	极高真空热阴极电离规的非线性效应	74
3.5	宇宙真空的测量	75
3.5.1	定向流转换型真空规	75
3.5.2	不同类型定向流转换型真空规	76
3.6	B-A 型双圆锥定向流探测器	77
3.6.1	实验系统	78
3.6.2	B-A 型双圆锥定向流探测器设计	78
3.6.3	B-A 型双中空圆锥定向流探测器准直性实验	80
3.6.4	实验结果及讨论	81
3.7	宇宙真空测量的理论与技术	83
3.7.1	行星大气压强测量理论	84
3.7.2	p_0 和 j_0 的关系式	93
3.7.3	宇宙真空测量数据转换技术	95
3.7.4	宇宙空间大气压强 p_0 的测量	97
3.7.5	宇宙真空测量方法	97
3.7.6	测量规管的连接	99
3.7.7	宇宙真空的地面模拟与校准	99
参考文献		100

第 4 章 极高真空气体分子运动理论

101

4.1	引言	101
4.2	极高真空中气体的压力表达式	101
4.2.1	等温非平衡态下压力表达式	101
4.2.2	非等温状态下的压力表达式	103
4.3	极高真空抽气方程	104
4.4	气体分子和固体表面的适应系数	106
4.4.1	引言	106
4.4.2	适应系数的测量方法	107
4.4.3	气体分子真空寿命法	110
4.4.4	气体分子热适应系数的测量	111
4.4.5	极高真空气体分子速度分布律	111
参考文献		113

5.1 太空站极高真空轨道分子屏技术研究进展	114
5.1.1 太空站极高真空轨道分子屏实验室	114
5.1.2 轨道分子屏极高真空实验室试验装置	118
5.1.3 轨道分子屏极高真空实验室的发展前景	119
5.2 可变翼极高真空轨道分子屏研究	120
5.2.1 引言	120
5.2.2 可变翼极高真空轨道分子屏的概念及理论模型	121
5.2.3 理论及计算结果	122
5.2.4 可变翼轨道分子屏极限压力和翼长的关系	126
5.2.5 可变翼轨道分子屏内压力分布	126
5.2.6 结论	126
5.3 轨道分子屏极高真空系统的抽气方程	127
5.3.1 引言	127
5.3.2 半球形轨道分子屏抽气方程	128
5.3.3 球冠形轨道分子屏抽气方程	129
5.3.4 结果与讨论	130
5.3.5 非平衡态真空抽气方程的动力学表达	131
5.4 轨道分子屏极高真空实验室设计技术	135
5.4.1 引言	135
5.4.2 周围大气入射的气体分子数密度	136
5.4.3 轨道分子屏内的散射气体分子数密度	139
5.4.4 轨道分子屏的出气分子数密度	140
5.4.5 结论	142
参考文献	142

6.1 引言	143
6.2 行星大气玻耳兹曼分布律的适用性	144
6.3 行星大气分布律的 Jeans 理论	147
6.4 修正的玻耳兹曼 (RBF) 公式	154
6.5 RBF 理论中非单一温度时的行星大气分布律	159
6.6 RBF 应用举例	160
6.6.1 行星气体总质量与压力的关系	160

6.6.2	与玻耳兹曼公式的关系	161
6.6.3	行星表面气体的总质量随距离变化的关系式	162
6.6.4	大气压力随高度变化的关系	162
6.7	三种理论比较	164
6.7.1	解决玻耳兹曼公式 (BF) 发散的理论方法	164
6.7.2	三种处理方法的物理图像	168
6.7.3	RBF 与 BF 符合性分析	169
6.8	太阳系行星际大气密度分布	170
6.9	CO ₂ 排放量的增加与地球大气中氧含量的减少	173
6.9.1	地球大气中 CO ₂ 和 O ₂ 的循环	173
6.9.2	地球大气中 CO ₂ 浓度的增长率与 O ₂ 消耗完的时间	175
6.9.3	理论值与实测值的符合性	180
6.9.4	一个值得重视的问题	182
	参考文献	183

第 7 章 行星大气逃逸理论

184

7.1	行星大气逃逸方程	184
7.2	地球大气层寿命的计算	188
7.3	金星大气层寿命的计算	189
7.4	火星大气中水汽的逃逸率	190
7.4.1	引言	190
7.4.2	火星大气的高度分布	191
7.4.3	火星上大气逃逸的半寿命	192
7.4.4	火星大气中氧和水汽的逃逸率	195
7.4.5	火星上液态水的蒸发和固态冰的升华	196
7.4.6	火星水冰存在地点的热环境	200
7.4.7	结论	200
	参考文献	201

第 8 章 月球表面大气及水汽的寿命

203

8.1	引言	203
8.2	月球大气逃逸率的计算	204
8.3	月球大气及太阳风	205
8.3.1	太阳风对月球大气的影响	205
8.3.2	月球大气平衡与昼夜大气的总分子数	206

8.3.3 氦-3 储量的估算	216
8.4 月球表面水存在性的分析	219
8.4.1 运用行星大气逃逸理论计算	219
8.4.2 用冰的升华理论计算月球冰的寿命	219
参考文献	222

第 9 章 宇宙真空的物理本质	223
------------------------	------------

9.1 引言	223
9.2 人类对真空的认识过程	224
9.2.1 从不承认有真空到开始实现技术真空	224
9.2.2 1905 年以前的以太真空	225
9.2.3 量子论与相对论的零点振动场和负能海真空	226
9.2.4 黑格斯 (Higgs) 真空自发破缺	228
9.2.5 李政道真空	229
9.2.6 真空与宇宙常数	229
9.2.7 宇宙早期的真空相变与暴胀	230
9.3 物理真空研究进展	232
9.3.1 暗能量与真空能	232
9.3.2 惯性力的起源与真空的关系	235
9.4 关于物理真空问题的思考	236
参考文献	237