

# 载人航天的辐射防护 与监测

## Radiation Protection and Monitoring for Manned Spaceflight

祁章年 著



国防工业出版社



# 载人航天的辐射防护与监测 Radiation Protection and Monitoring for Manned Spaceflight

祁章年 著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

载人航天的辐射防护与监测/祁章年著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

ISBN 7-118-02884-3

I. 载... II. 祁... III. ①载人航天器—辐射防护  
②载人航天器—辐射监测 IV. ①V476.2②R852.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 044487 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{1}{2}$  207 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 20.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	崔士义	蔡锺		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

# 前 言

空间辐射是载人航天遇到的重要有害环境因素之一,它直接影响到航天员的健康和安全,因而自 20 世纪 50 年代起就受到航天科学家们的广泛关注。人类的航天活动已有 40 多年的发展历史,并取得举世瞩目的辉煌成就,在此期间,作为空间辐射防护基础的空间辐射剂量学和空间辐射生物学研究也取得长足进步,并正在为建立月球基地和火星探险的载人航天计划进行辐射防护的预先研究。突破载人航天技术是我国航天事业发展的里程碑,空间辐射的防护与监测直接服务于载人航天的安全保障。本书以空间辐射防护为主线,介绍国内外空间辐射剂量学和空间辐射生物学的发展概况以及辐射防护的实践经验,这些内容将对我国相应学科的发展以及载人航天的辐射安全保障均有一定的促进作用。

本书共分 8 章。第 1 章是绪论;第 2 章介绍空间辐射环境;第 3、4 章是空间辐射防护的剂量学和生物学基础;第 5、6、7 三章是辐射防护与监测的核心内容;第 8 章简要介绍了空间非电离辐射的来源和防护问题。

载人航天辐射防护与监测在我国尚属较新的研究领域,涉及的专业较多,本书力求系统、且重点突出地向读者介绍了有关空间辐射防护的概念及研究成果,以便读者在实际工作中参考应用。由于受本人专业知识和学术水平所限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

陈涓同志对本书进行了校对工作,在此表示衷心的感谢。

著 者

2002 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 载人航天的辐射危险 .....	1
1.2 空间辐射剂量学和辐射生物学 .....	3
1.3 航天员的辐射安全保障 .....	6
1.4 星际载人航天的辐射危险与防护 .....	8
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 空间电离辐射环境</b> .....	11
2.1 银河宇宙辐射.....	12
2.2 地磁捕获辐射.....	16
2.3 太阳粒子事件.....	20
2.4 地磁场的影响.....	27
2.5 与飞行轨道相关的电离辐射环境.....	35
参考文献 .....	37
<b>第 3 章 空间辐射剂量学</b> .....	38
3.1 带电粒子在物质中的能量损失.....	38
3.2 剂量学的量和单位.....	47
3.3 空间辐射剂量的主动测量方法.....	52
3.4 空间辐射剂量的被动测量方法.....	58
3.5 微剂量学概念.....	67
参考文献 .....	71
<b>第 4 章 空间辐射的医学、生物学效应</b> .....	73
4.1 电离辐射损伤的生物学基础.....	73
4.2 辐射的确定性效应.....	77
4.3 辐射的随机性效应.....	83



4.4 空间辐射的生物学效应特点	90
4.5 空间辐射生物学实验研究	104
参考文献	111
<b>第5章 空间辐射防护的剂量预估</b>	<b>113</b>
5.1 空间辐射剂量预估的概念	113
5.2 空间电离辐射环境模型	116
5.3 用于人体器官剂量计算的模型	126
5.4 人体组织剂量的计算	133
5.5 某些空间飞行的预估剂量	140
参考文献	150
<b>第6章 载人航天的辐射防护</b>	<b>152</b>
6.1 辐射防护的发展概况	152
6.2 危险分析与辐射防护	155
6.3 载人航天的辐射剂量限值	160
6.4 空间辐射防护方法	172
6.5 星际飞行的辐射防护	184
6.6 载人航天辐射防护的实施	188
参考文献	194
<b>第7章 载人航天的辐射剂量监测</b>	<b>196</b>
7.1 载人航天的辐射监测要求	196
7.2 载人航天的辐射监测装备	199
7.3 航天期间测量的辐射剂量	205
7.4 航天中的一些剂量学研究	213
参考文献	228
<b>第8章 空间非电离辐射及其防护</b>	<b>232</b>
8.1 非电离辐射及其来源	232
8.2 非电离辐射的人体效应	235
8.3 空间非电离辐射的防护	241
参考文献	246

# CONTENTS

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	1
1.1	Radiation Risks for Manned Spaceflight .....	1
1.2	Dosimetry and Radiobiology of Space Radiation .....	3
1.3	Radiation Safety Measures for Astronauts .....	6
1.4	Radiation Risks and Protection for Interplanetary Missions .....	8
	References .....	10
<b>2</b>	<b>Ionizing Radiation Environment in Space</b> .....	11
2.1	Galactic Cosmic Radiation .....	12
2.2	Geomagnetically Trapped Radiation .....	16
2.3	Solar Particle Events .....	20
2.4	Influence of Geomagnetic Field .....	27
2.5	Radiation Environment Related to Flight Orbits .....	35
	References .....	37
<b>3</b>	<b>Space Radiation Dosimetry</b> .....	38
3.1	Energy-Loss of Charged Particles .....	38
3.2	Dosimetric Quantities and Units .....	47
3.3	Active Dosimetry Methods for Space Radiation .....	52
3.4	Passive Dosimetry Methods for Space Radiation .....	58
3.5	Micodosimetry Concept .....	67
	References .....	71
<b>4</b>	<b>Medical and Biological Effects of Space Radiation</b> .....	73
4.1	Biological Basis of Radiation Damage .....	73
4.2	Deterministic Effects .....	77
4.3	Stochastic Effects .....	83
4.4	Radiobiological Features of Space Radiation .....	90

4.5	Experimental Studies on Space Radobiology .....	104
	References .....	111
<b>5</b>	<b>Dose Prediction for Space Radiation Protection .....</b>	<b>113</b>
5.1	Concept of Radiation Dose Prediction .....	113
5.2	Models of Space Radiation Environments .....	116
5.3	Models of Human Body for Organ Dose Calculation .....	126
5.4	Dose Calculation in Tissue .....	133
5.5	Predicted Doses for Some Space Missions .....	140
	References .....	150
<b>6</b>	<b>Radiation Protection for Manned Spaceflight .....</b>	<b>152</b>
6.1	Development of radiation Protection .....	152
6.2	Risk Analysis and Radiation Protection .....	155
6.3	Radiation Exposure Limits for Spaceflight .....	160
6.4	Methodologies of Space Radiation Protection .....	172
6.5	Radiation Protection on Interplanetary Missions .....	184
6.6	Implementation of Radiation Protection for Manned Spaceflight .....	188
	References .....	194
<b>7</b>	<b>Radiation Monitoring on Manned Spaceflight .....</b>	<b>196</b>
7.1	Monitoring Requirements on Manned Missions .....	196
7.2	Monitoring Instrumentation Aboard Spacecraft .....	199
7.3	Radiation Doses Measured on Manned Space Missions .....	205
7.4	Dosimetric Investigations on Space Missions .....	213
	References .....	228
<b>8</b>	<b>Non-Ionizing Radiation in Space and Its Protection .....</b>	<b>232</b>
8.1	Non-Ionizing Radiation and Its Sources .....	232
8.2	Human Responses to Non-Ionizing Radiation .....	235
8.3	Non-Ionizing Radiation Protection .....	241
	References .....	246

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 载人航天的辐射危险

1961 年 4 月 12 日,苏联航天员加加林成功地完成了首次绕地球 1.8h 的太空飞行,人类航天的梦想变成现实。迄今为止,载人航天已经历了 40 年的发展历史,近 900 人次遨游太空,12 名航天员登上月球,航天员在太空持续飞行时间创造了 438d 的记录,女性和老年航天员也为载人航天增添了光彩,火星探险已列入即将实施的载人航天计划。载人航天脱离了地球稠密大气层的保护而暴露于空间的强辐射环境,这是航天期间必然遇到的主要有害环境因素之一。在历次载人航天的实践中,航天科技工作者一直致力于尽量减少空间辐射所带来的危害,保护航天员安全和健康以及完成航天规定任务的能力。

### 1.1.1 载人航天的辐射环境

载人航天不可避免地要暴露于外层空间的辐射环境,这一辐射环境包括空间天然存在的和航天器载荷中产生的电离辐射和非电离辐射。空间天然存在且有防护实际意义的电离辐射源主要是银河宇宙辐射、地磁捕获辐射和随机发生的太阳粒子事件。天然非电离辐射源主要来自太阳的光辐射和射频辐射。空间电离辐射环境因其可能造成生物机体严重损伤而在载人航天中倍受重视。空间电离辐射环境与地面常见的辐射源有很大的不同:一是粒子类型,空间辐射粒子几乎包含元素周期表中所有元素的核,且粒子带有和原子序数相同的电荷,粒子的主要成分是质子、电子和

氦核,重离子所占比重较小;二是能量范围,空间辐射的粒子能量范围非常宽,由 keV $\sim$ 10<sup>20</sup>eV,且为连续能谱,而不是地面加速器产生的几乎为单能量的粒子;三是空间辐射粒子从 4 $\pi$  立体角同时入射到作用靶物质,而地面加速器粒子在某一时刻是单向入射的;四是空间辐射环境不是恒定的,由于受到太阳活动和地磁场的调制,其强度随时间和空间而变化,尤其是太阳粒子事件的发生是随机的,发生时间和事件粒子注量目前尚难以预报,是一种潜在的辐射危险源,航天持续时间越长,遇到太阳粒子事件的概率则越大。

### 1.1.2 载人航天的辐射危险

电离辐射与物质相互作用并在物质内部引起原子的电离、激发、核反应和化学反应,从而造成对人体和材料的辐射损伤。空间的非电离辐射因热机制和非热机制也可造成人体的生理功能变化和组织损伤。辐射对人体的危害程度与所接受的剂量大小有关,短时高剂量照射可引起人体的急性效应,甚至威胁生命。多年的载人航天实践表明,航天员暴露的空间辐射剂量可以降低,但不能避免,因为完全屏蔽高能的空间辐射是不可能的。载人航天暴露的空间辐射环境随飞行轨道而变化。一般来说,低地球轨道飞行由于存在地球磁场和地球自身的屏蔽作用,大大降低了航天员受到的空间辐射照射。但地磁场对空间辐射的屏蔽作用随轨道倾角的增高而下降,在两极区几乎失去防护作用。轨道高度越高,地磁场屏蔽作用越小,航天员接受的辐射剂量越大。对于登月或火星飞行,虽然脱离了地磁捕获辐射源,但也失去了低地球轨道的自然防护条件,从而加大了银河宇宙辐射和太阳粒子事件的影响,一旦遭遇特大太阳粒子事件,将有可能威胁到航天员的生命安全。

迄今为止,作为空间辐射危险评价基础的辐射生物效应和作用机理尚不十分清楚,能够采用的具有统计学说服力的实验资料相当匮乏,从而使载人航天的辐射危险估计尚存在很大的不确定

性(有报告估计为 400% ~ 1500%)<sup>[1]</sup>,尤其是高传能线密度(LET)辐射成分的危害评价以及空间辐射与其他航天环境因素如微重力、有害气体的复合作用影响还未能获得明晰的结论。

尽管载人航天存在一定的辐射危险性,但载人航天为人类社会进步以及探索、开发和利用外层空间资源带来的巨大利益远大于为此而增加额外照射所付出的代价。多年来,航天科技工作者进行了大量卓有成效的空间辐射剂量学测量和辐射防护研究,力图将空间辐射给航天员带来的危害降低到可以接受的水平,以保障载人航天的辐射安全。

## 1.2 空间辐射剂量学和辐射生物学

为了保障载人航天的辐射安全,在 40 年的载人航天实践中建立和发展了空间辐射剂量学和空间辐射生物学。

### 1.2.1 空间辐射剂量学

空间辐射剂量学是空间辐射防护和监测的重要组成部分,是研究空间电离辐射能量在作用物质中的转移和沉积规律的科学。电离辐射与物质包括生物体发生作用,引起物理性质、化学性质和生物学的一系列变化。这些变化在很大程度上取决于辐射能量在物质中沉积的数量和分布。“剂量”是将辐射沉积能量和分布与辐射生物效应联系起来的一个“桥梁”。

空间辐射剂量学实质上是航天条件下的高能带电粒子剂量学,它包括空间辐射剂量的测量原理和方法,空间辐射品质的测量原理和方法,载人航天辐射剂量的预估技术以及空间辐射物理、化学防护的原理和方法等。

空间辐射剂量学是在地面辐射剂量学基础上发展起来的。因为空间辐射环境所具有的特殊性,空间辐射剂量学也有其不同于地面的特殊要求。空间辐射剂量学应能在多种类型“初级”和“次级”粒子混合辐射场中较准确地确定吸收剂量;应能在较大

的 LET 范围内测量空间电离辐射的品质因数  $Q$ ; 应尽可能选择组织等效剂量计, 以提供人体组织的吸收剂量; 应研制体积小、重量轻和低功耗, 并经受得住发射、返回期间力学环境(加速度、振动和冲击)的剂量计; 剂量计应能长期稳定可靠地工作而不需校准。

相同吸收剂量引起的生物效应因电离辐射能量沉积的微观分布而有所不同。微剂量学研究这种微观分布与生物效应之间的关系。宏观的吸收剂量并不能反映能量沉积的微观分布, 因此在 LET 概念的基础上提出线能和比能微剂量学量。空间辐射的重离子虽然注量率不高, 但射入物质后沿其径迹有很大的能量沉积, 可使多个生物细胞受到损伤, 在空间辐射剂量学中微剂量学的重要性更为突出。

生物剂量学是利用受照生物体自身被辐射诱发的生物学变化作为剂量的量度, 直接反映受照机体的损伤程度并对未来可能发生的危害进行预测, 这是物理剂量学所难以达到的。因此, 发展灵敏度高、稳定性和重复性好的生物剂量学指标也是空间辐射剂量学的一个重要研究内容。

由于空间辐射环境在时间和空间上的多变性以及载人航天的活动范围越来越大, 飞行前的辐射剂量预估技术一开始就受到广泛的重视, 并在实践中不断得以修改和完善。空间辐射环境的模型、人体模型、屏蔽分布的测绘技术以及粒子在物质中的传输计算成为剂量预估的主要研究内容。

### 1.2.2 空间辐射生物学

空间辐射生物学是空间辐射防护的生物学基础, 主要研究空间电离辐射产生的生物学效应及其作用机制, 包括空间辐射诱发的生物效应特点及作用途径, 空间辐射生物效应与辐射能量沉积和分布的关系, 空间辐射与载人航天其他有害环境因素的复合效应, 空间辐射的医学、化学防护和治疗等。空间辐射重离子的早期和后效应研究、肿瘤形成过程以及小剂量长时间暴露的作用规律

研究、中枢神经系统的行为和功能变化研究、白内障和其他视觉损伤研究、空间辐射与微重力的复合效应研究、急性照射的躯体效应、空间辐射生物效应数学模型的研究以及降低辐射危险的生物学方法研究等是空间辐射生物学探索的重点问题。

在航天器上进行空间辐射生物学实验受到许多条件的制约,如载荷限制、实验支持系统的限制、实验环境和时间的限制以及实验经费的限制等。一般采用的研究途径是:在地面实验室利用模拟空间辐射源的条件研究动物模型的生物学效应,在空间飞行期间进行必要的验证实验,这种研究途径的效益-代价比是最高的。地基实验可容易地控制实验变量、选择统计学上有意义的样本量和实验次数。这一技术途径的应用价值在于如何将动物模型实验结果科学地外推到人体。

空间辐射生物学实验中值得推广的是生物叠实验技术,将生物样本与核径迹探测器叠层放置构成“三明治”式的生物叠,研究单个重离子对生物样本的作用效应和作用参数。该方法的不足是需保持生物样本的位置固定,因此,实验中多使用处于休眠期的植物种子或昆虫卵等。

测量空间电离辐射环境,发展空间辐射剂量学,揭示空间电离辐射对人体和生物体的辐射损伤特点和机制,对空间辐射的危险程度做出预测和评价,研究空间电离辐射的防护方法和制订既经济又有效的辐射防护方案,实施航天员的地面和空间辐射剂量监测,构成载人航天辐射安全保障的基本任务。

空间电离辐射环境医学与防护是航天环境医学的重要内容。人类探索、开发和利用宇宙空间资源的需求是永无止境的。虽然空间辐射剂量学和空间辐射生物学在过去的40年已经取得长足进步,但仍有许多问题尚未解决,如空间混合辐射场各种辐射成分的剂量测量,人体深部组织和器官剂量的准确评价,空间高能带电粒子辐射与 $\gamma$ 和中子辐射生物效应的异同,空间辐射与其他航天环境因素的复合效应特点和机制,空间辐射危险性的科学评价方法,建立月球基地或火星探险的有效辐射防护方法等。随着21世



纪载人航天事业的发展,空间辐射剂量学和空间辐射生物学必将创造出更加引人注目的成就。

### 1.3 航天员的辐射安全保障

一般来说,人体暴露于辐射总是不利的,因此,载人航天的辐射安全是通过与其他航天危险因素以及地面辐射职业人员的辐照实践相比较而言的,是相对的。对于载人航天的辐射防护,ALARA 准则(将照射保持在可合理达到的最低水平)同样适用。防护的宗旨是避免发生急性的确定性效应,并将随机性效应的发生概率降低到认为可以接受的水平。

航天员的辐射安全保障体系是载人航天器设计阶段、航天期间和航天活动之后保障航天员辐射安全的工程技术和医学措施的总合,可分为航天期间的安全保障和地面期间的安全保障。这些保障措施是以航天员剂量限值为指导,以辐射危险分析为依据。航天期间的辐射安全保障主要是针对空间自然辐射源的防护与监测。目前,根据航天器的飞行轨道能较好地预估银河宇宙辐射和地磁捕获辐射的剂量水平,因此,对随机发生的太阳粒子事件的预报、防护和监测是安全保障的突出问题。航天器乘员舱内外辐射环境的监测主要是提供辐射环境恶化的有关信息,以决策是否采取应急辐射防护措施。航天员个人剂量监测是飞行期间辐射安全评价的最重要依据。地面训练期间的辐射安全保障主要是针对常规体检、疾患的诊断和治疗中核医学设备的辐射照射进行严格控制和管理,尤其是 CT 断层扫描和放射治疗。航天员的辐射安全保障体系的大体构成如图 1-1 所示。

载人航天期间航天员将不可避免地暴露于空间辐射,因此,航天员属于特殊的一类辐射职业工作人群,尽管此人群的数量不大,但重要性很突出,因此,其受照射的实践活动必须由专门审管机构进行控制和管理。

载人航天的特殊环境条件使空间辐射防护受到很大的制约,