

空间环境静电充放电效应 及防护技术

◎ 曹鹤飞 著

非外借



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

空间环境静电充放电效应及防护技术

曹鹤飞 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书深入介绍了空间环境静电充放电效应及防护技术, 主要内容包括绪论、空间环境航天器带电研究、空间环境航天器放电研究、航天器静电防护研究、研究总结与展望。本书可作为普通高等学校电子科学等相关专业研究生或航天领域科研工作人员的参考用书。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

空间环境静电充放电效应及防护技术/ 曹鹤飞著. —北京: 北京交通大学出版社, 2018. 11

ISBN 978 - 7 - 5121 - 3743 - 1

I. ①空… II. ①曹… III. ①航天器 - 静电防护 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. ①V14 ②TN07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242010 号

空间环境静电充放电效应及防护技术

KONGJIAN HUANJING JINGDIAN CHONG-FANGDIAN XIAOYING JI FANGHU JISHU

责任编辑: 严慧明

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 艺堂印刷 (天津) 有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm × 235 mm 印张: 8.5 字数: 119 千字

版 次: 2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 3743 - 1/TN · 118

定 价: 36.00 元



本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

当航天器处于空间等离子体、高能电子辐射及太阳辐射等复杂空间环境中时，其表面将产生电荷聚集，当电荷聚集到某一放电阈值时，航天器会向其周围环境释放电子，放电形式包括电晕放电、弧光放电等。静电放电会对航天器表面材料造成氧化、腐蚀等损伤，此外，静电放电电磁脉冲可通过航天器线缆、结构等耦合进入电路，导致电子设备出现故障，从而威胁航天器的安全运行。

国外从 20 世纪中叶开始研究航天器静电充放电效应，实施了庞大的航天器带电研究计划，并成立了专门的航天器带电技术研究委员会，发展至今已经形成了包括航天器静电充放电效应理论、仿真及防护技术在内的完整体系。虽然目前我国航天器发展取得了举世瞩目的成果，通过一系列防护措施也保证了航天器的安全运行，但是大多情况下还是依据工程经验设计航天器，缺乏静电充放电效应理论支撑，这就往往会产生“过防护”现象，造成资源浪费。

作为一门交叉学科，航天器静电充放电效应及防护技术包括基础空间科学和空间工程两个方面。目前，尽管有些书中论述了航天器静电充放电效应，但是还没有一本专门论述空间环境静电充放电效应及防护技术的书。本书集航天器充放电效应及防护技术等相关研究成果为一体，可作为普通高等学校电子科学等相关专业研究生或航天领域科研工作人员的参考用书。

空间环境静电充放电效应及防护技术相关研究工作正在快速向前发展，许多研究工作需要不断创新与完善。尽管作者在撰写过程中做了很大努力，但限于认识和水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请各位同仁批评指正。

作者

2018年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天器空间环境效应故障统计	1
1.2 国内外航天器静电充放电效应研究进展	3
1.3 空间环境静电充放电效应及防护技术研究意义	6
第 2 章 空间环境航天器带电研究	7
2.1 等离子体环境下固体表面带电研究	7
2.1.1 等离子体环境下固体表面充电理论	8
2.1.2 讨论分析	11
2.1.3 结论	14
2.2 空间环境下航天器内部绝缘球形导体表面带电面积效应研究	15
2.2.1 绝缘球形导体表面带电面积效应规律	15
2.2.2 讨论分析	19
2.2.3 结论	22
2.3 等离子体环境下绝缘球形导体表面充电时域特性研究	23
2.3.1 绝缘球形导体表面充电电位时域分析	24
2.3.2 讨论分析	27
2.3.3 结论	34
2.4 真空环境下卫星高压电缆内部电场强度变化规律研究	35

2.4.1	真空环境下卫星高压电缆内部场强分布表达式	35
2.4.2	分析讨论	37
2.4.3	结论	42
2.5	相关实验装置的开发与研制	42
2.5.1	航天器材料表面带电模拟装置	42
2.5.2	分布式自动补偿表面静电电位的电位测试系统	46
2.5.3	低气压环境下介质材料表面带电测试装置	50
2.5.4	电子束辐照聚四氟乙烯内带电测试装置	54
2.6	航天器等离子体环境下介质材料起电仿真软件	57
第3章 空间环境航天器放电研究		65
3.1	不同接地布局下的充放电过程研究	65
3.1.1	不同接地布局下介质材料表面电位计算方法	65
3.1.2	不同接地布局下介质材料表面电位计算分析	71
3.1.3	结论	82
3.2	脉冲电磁场诱发真空放电效应研究	82
3.2.1	电磁脉冲辐射下直流放电等离子体混合数值模型	83
3.2.2	脉冲电磁场诱发真空放电实验研究	87
3.2.3	实验结果与分析	89
3.2.4	结论	91
3.3	相关实验装置的开发与研制	91
3.3.1	不同温度、气压及电磁场环境下高压放电规律研究装置	91
3.3.2	电磁脉冲辐射环境下静电放电实验装置	93

第 4 章 航天器静电防护研究	97
4.1 航天器太阳能电池阵网格状 ITO 薄膜静电防护研究	97
4.1.1 网格状 ITO 薄膜静电防护实验	98
4.1.2 测试结果与分析	100
4.1.3 结论	104
4.2 太阳能电池阵石墨烯静电防护膜	105
4.3 相关实验装置的开发与研制	107
4.3.1 带电粉尘测量装置	107
4.3.2 太阳能电池光电性能测试装置	109
4.3.3 粉尘类介质材料电磁屏蔽性能测试装置	111
第 5 章 研究总结与展望	114
5.1 研究总结	114
5.2 研究展望	117
参考文献	120

第 1 章

绪 论

1.1 航天器空间环境效应故障统计

有研究人员对国外航天器故障进行了统计,统计结果表明在太阳活动高峰期,强烈的太阳活动将产生恶劣的空间环境,它会使航天器空间环境效应故障增多,同时航天器静电充放电效应是导致航天器产生故障的主要原因。2007年,NASA统计了4家权威机构数据库,统计结果表明在国外共发生的326起由空间环境引发的航天器故障中,静电充放电效应、单粒子效应是引发航天器故障的最常见的空间环境效应,其中静电充放电效应引发的航天器故障数占总航天器故障数的54.2%。航天器空间环境效应故障统计图如图1.1所示,卫星因静电充放电效应发生故障统计表如表1.1所示。

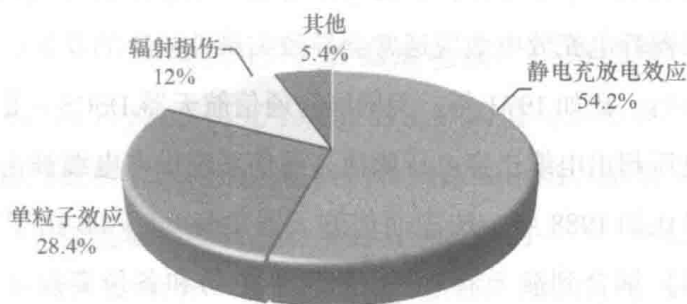


图 1.1 航天器空间环境效应故障统计图

表 1.1 卫星因静电充放电效应发生故障统计表

序号	卫星名称	所属国家或组织	故障情况
1	国际通信卫星 II - F1	美国	电子设备乱真切换
2	国际通信卫星 II - F2	美国	电子设备乱真切换
3	国际通信卫星 III - F4	卫星组织	电子设备乱真切换
4	国际通信卫星 III - F7	卫星组织	电子设备乱真切换
5	国际通信卫星 IV - F6	卫星组织	电子设备乱真切换
6	国际通信卫星 IV - F8	卫星组织	电子设备乱真切换
7	阿妮克 A1	美国	编码器乱真切换
8	阿妮克 A2	美国	编码器乱真切换
9	阿妮克 A3	加拿大	编码器乱真切换
10	天狼星 - 1	意大利	姿态传感器异常
11	阿妮克 A3	加拿大	姿态传感器异常
12	天狼星 - 1	意大利	姿态传感器异常
13	阿妮克 B	加拿大	温控性能衰减
14	欧洲航海通信卫星 1	欧洲航天局	干扰电子设备
15	交响乐 - II	法 - 德	干扰遥测设备
16	交响乐 - I	法 - 德	干扰电源调节系统
17	林肯实验卫星	美国	陀螺漂移

由图 1.1 及表 1.1 不难看出, 静电充放电效应是导致航天器故障发生的主要原因之一。航天器静电充放电效应通常会导致灾难性故障的发生, 严重影响航天器的在轨安全运行。比如 1973 年, 美国国防通信航天器 DSCS - II (9431) 由于电缆表面充电电压超出电缆击穿电压阈值, 通信系统供电电缆被击穿, 最终导致航天器失效。又比如 1988 年, 法国通信航天器 Telecom - 1B 由于放电电流 (瞬时值达几十安培) 耦合到航天器内部, 航天器主份和备份姿控计算机均发生故障, 最终导致航天器失效。

1.2 国内外航天器静电充放电效应研究进展

多年来,国外航天器电子设备在磁层亚暴期间发生过多次故障,究其原因,是由航天器介质材料在亚暴期间受空间电子作用导致电荷沉积,继而发生静电充放电效应所引起的,从此,航天器介质材料静电充放电效应研究成为独立的研究方向。美国、俄罗斯等许多国家都投入了大量的研究经费以持续开展航天器带电效应研究。

航天器中往往使用了很多介质材料,典型的有:PCB基板、电缆外皮、接插件、光学玻璃、聚酰亚胺块和各种绝缘胶等,这些介质材料一般都具有较高的电阻率,容易积累电荷而不易释放电荷。航天器长期暴露在空间环境中,这就使航天器介质材料处于复杂的电磁环境下,从而恶化航天器介质材料静电充放电效应。此外在真空环境中,高压部件附近的非金属材料在初期所产生的污染物被高压电离后所形成的等离子体也会产生静电击穿;高压大电流金属部件表面的微突起所产生的场致电子发射也会产生真空电弧放电,造成高压部件的静电击穿。航天器所处环境的电磁场和温度会由于轨道的不同而发生变化,电磁场和温度的变化均会对航天器表面静电充放电效应产生显著的影响,而介质材料的放电阈值由材料的带电特性和结构决定。当航天器介质材料表面充电电压超出放电阈值时,航天器将发生静电击穿,介质击穿产生的电荷放电模式主要有:介质体击穿或“贯穿放电”、表面放电或“闪络放电”、空间放电或“吹离放电”。Umoto和Sakai研究了材料的击穿阈值与工作电压的关系,他们利用高能电子辐照材料,同时通过电极向材料施加电场。结果发现,当材料发生静电击穿时,外加电场强度只有通常的击穿场强的一半。国际上目前占主导地位介质击穿理论模型有二次电子发射雪崩模型和电子触发的极化松弛模型。

国外从 20 世纪 70 年代开始就制定了庞大的航天器带电研究计划，成立了专门的航天器带电技术研究委员会，并定期召开空间环境效应国际会议——航天器带电技术专项国际会议。这些工作极大地推动了航天器带电效应研究的发展，在航天器的研制和在轨安全运行方面发挥了极其重要的作用。通过半个多世纪的研究，国外在航天器介质材料静电充放电机理、仿真分析及防护方法研究方面取得了显著成果。国外各大宇航机构开展了广泛的静电充放电效应研究，在建立先进的航天器带电分析模型基础上，开发了众多的静电充放电仿真软件。同时，他们在开展地面实验的基础上掌握了许多航天器静电充放电规律，为其航天器的静电充放电效应风险评估和防护设计提供了坚实的基础。

我国针对航天器带电效应的研究工作始于 20 世纪 80 年代，由于科研条件和经费支持等方面的欠缺，国内研究主要集中在理论技术和模拟实验方面，在空间飞行实验方面开展的研究较少。我国虽然完成了各项航天器的研制和发射任务，并且在太阳电池阵静电防护方面取得了一定成果，但是相比国外航天大国还有一定差距。例如，目前，我国对于高压太阳电池阵的带电机理认识还不十分清晰，尚未完全掌握系统抑制充电和提高放电阈值的防护方法。

下面从机理研究、仿真及实验研究、防护及控制研究三个方面对目前国内外航天器静电充放电效应研究进行对比分析。

(1) 机理研究。

在航天器静电充放电机理研究方面，国外综合考虑了不同空间环境和材料带电特性参数，建立了介质材料带电模型，以及不同工作电压、工作电流、结构等工况下的静电击穿模型和损伤模式；国内初步研究了航天介质材料内电子输运机理及放电击穿现象，开展了高压太阳电池阵电流收集机理研究并建立了模型。今后我国在机理研究方面的主要任务是建立复杂空间环境、复杂结构、大功率高压工况下的介质充放电模型。

(2) 仿真及实验研究。

在航天器静电充放电仿真及实验研究方面,国外分别利用 PIC (particle in cell, 粒子网络) 法和蒙特卡罗法建立了表面带电和内带电的仿真软件,并通过数值模拟和地面实验获得不同轨道环境下的充放电规律;国内初步开展了介质材料充放电效应的数值模拟研究,获得了高压太阳电池阵放电击穿阈值,并开展了高压太阳电池阵功率损耗规律及放电脉冲特性研究。今后我国在仿真及实验研究方面的主要任务包括:①建立基于蒙特卡罗法计算介质材料内部电场的内带电仿真软件;②通过数值仿真和地面实验获得不同轨道环境和工况下的充放电规律。

(3) 防护及控制研究。

在航天器静电充放电防护及控制研究方面,国外建立了表面带电和内带电防护设计方法,针对电荷泄放控制和损伤防护还获得了不同工况下充放电效应防护方法和电位控制技术,并应用于工程设计。在借鉴国外标准的基础上,国内在工程上总结了部分防护方法,但是并没有系统开展航天器充放电效应防护方法和技术的研究工作。今后我国在防护及控制研究方面的主要任务包括:①建立航天器充放电效应防护设计方法,能够用于大功率高压部件带电防护设计,使高压供配电部件安全工作电压提高1倍;②建立充放电主动控制方法,使得大型天线表面电位差小于500V。

国内外航天器静电充放电效应研究成果对比表如表1.2所示。

表 1.2 国内外航天器静电充放电效应研究成果对比表

	项目	国内研究进展	国外研究进展
航天介质材料 带电效应理论 模型	复杂电磁环境模型	有待进一步完善	已经建立
	高能电子沉积模型	已经建立	已经建立
	介质材料带电的电子输运模型	有待进一步完善	已经建立
	介质材料放电的击穿模型	有待进一步完善	已经建立

续表

	项目	国内研究进展	国外研究进展
航天介质材料 带电数值分析	分段电子能谱计算模型	无	已经建立
	蒙特卡罗带电计算方法	有待进一步完善	已经建立
	完整的内电场计算模型	有待进一步完善	已经建立
航天器充放电 效应防护及 控制	航天器带电设计指南	有待进一步完善	已经建立
	被动防护方法	初步应用	应用成熟
	主动控制技术	初步应用	应用成熟

总体来说,我国对航天介质材料充放电效应机理的复杂性认识还不透彻,计算分析仍停留在简单的模型分析,缺乏基础理论的支持,缺乏系统性的防护技术。另外,我国低轨道航天器设计寿命将由3年提高到5~8年,高轨道航天器设计寿命也将由8年提高到15年,随着航天器寿命的延长,材料静电特性发生非线性变化,静电充放电过程及其规律更加复杂,因此需要开展更加深入的理论研究。

1.3 空间环境静电充放电效应及防护技术研究意义

我国航天技术已由跨越实验阶段进入了全面应用的崭新阶段,对卫星寿命、可靠性和设计精度等提出了更高的要求,这将给卫星充放电效应评价和防护带来许多技术难题,亟须系统开展卫星充放电效应研究,为解决工程问题奠定理论和技术基础。因此,在考虑多因素作用背景下研究空间环境静电充放电效应及防护技术,能够对航天介质材料充放电过程的产生机理有更加深入的认识,对研制高可靠性和高寿命航天器电气绝缘设备具有重要的指导意义,为航天器设计过程中提高整体可靠性提供重要理论支持。

第 2 章

空间环境航天器带电研究

2.1 等离子体环境下固体表面带电研究

宇宙中超过 99% 的物质都是等离子体，太阳和恒星是几乎全部电离的热等离子体，星际空间由于恒星辐射作用也是电离的，宇宙空间充满了等离子体。地球周围大多数的轨道环境都处于等离子体状态，航天器与等离子体相互作用，最终可能导致航天器充电。特别是当发生磁暴时，等离子体会产生扰动，此时等离子体具有极高的能量，这样会使航天器具有很高的电位。由于航天器表面材料的导电性能存在差异，其二次电子系数不同，以及受光电效应等因素的影响，航天器表面不同部位或不同材料之间具有不同的电位。当航天器表面电位差达到材料击穿阈值时，将发生电弧放电，可能会对电源、微电子器件等造成损毁。此外，电弧放电产生的电磁辐射会干扰航天器上各种电器设备的正常工作，使通信系统在没有接到地面指令的情况下发生自动改变，使逻辑系统出现故障，使光学传感器出现噪声，使天线指向系统失灵而造成天线指向错误，使消旋机构失灵而使卫星自动旋转。材料表面放电也可使材料性能下降等。综上所述，电弧放电可能会带来直接或潜在的灾难性后果，因此，表面带电效应受到了各方面的广泛关注。

固体在等离子体环境中经过一段时间后，其表面电流会达到一个动态平衡，

此时的电子和离子所带电荷的代数和为零。可以采用等效电路的方法求解固体表面充电电位，该方法计算量较小，处理问题起来较为直观，但是计算精度有待提高。也可以基于气体动理论，利用粒子的麦克斯韦速度分布函数求解固体表面充电电位，该方法能够较为精确地计算出固体表面充电电位。本书采用第二种方法推导在等离子体环境下运动的固体表面充电电位表达式，并对不同空间环境及固体不同运动情况下的表面充电电位进行了讨论。最后以地球轨道为例进行了固体表面充电电位计算，所得理论计算结果与实际测量数据一致，从而验证了模型的准确性和可行性。

2.1.1 等离子体环境下固体表面充电理论

等离子体一般由电子、离子及中性粒子组成，三者的密度可分别以 n_e 、 n_i 、 n_a 表示。通常情况下，等离子体中的离子为一价离子，且含有同一种类的中性粒子， $n_e = n_i$ ，因此整体呈现电中性。粒子之间由于带有电荷而具有电场力的相互作用，这对于处于平衡态的理想等离子体而言，其自身热运动动能远远大于电场势能，因此可以忽略其电场势能。等离子体中电子的温度 T_e 和离子的温度 T_i 不一定相等：对于低温等离子体， $T_e > T_i$ ；对于高温等离子体， $T_e \approx T_i$ 。等离子体中离子的质量远远大于电子的质量，处于平衡态的等离子体中电子的速度远远大于离子的速度。

在无光电效应发生的情况下，将固体置于等离子体中，等离子体中的电子、离子由于受到固体静电力的作用而向固体表面运动。由于电子的平均速度远大于离子的平均速度，因此到达固体表面的电子数目将大于离子数目，固体表面形成大量电子聚集，产生负场强。负场强的增加对电子向表面聚集具有阻碍作用，而对离子向表面聚集具有促进作用，从而使流向固体表面的电子流密度逐渐减小而离子流密度逐渐增加。同时，由于二次电子效应及背散射效应，固体表面的电子数目将有一定程度的减少。当到达固体表面的电子流密度与离子流密度相等时，

固体表面充电电位将达到一个稳定值且保持不变。

当处于等离子体环境的固体表面充电电位达到稳定负电位（设为 U ）后，建立如图 2.1 所示的直角坐标系，固体沿 x 轴方向的运动速度为 v_s 。

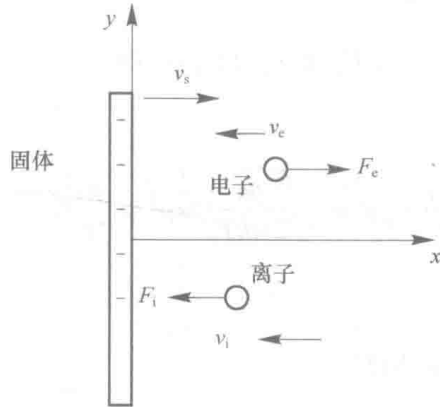


图 2.1 建立直角坐标系

设电子的运动速度为 v_e ，在 x 轴上的分量为 v_{ex} 。当固体达到稳定的负电位 U 后，并非所有的电子都可以到达固体表面，只有面向固体表面运动即沿 x 轴负向运动且能量大到足够克服负电位所产生的势能的电子才能够到达固体表面，此时电子的最小动能满足

$$-eU = \frac{1}{2}m_e (v_{e0} + v_s)^2 \quad (2-1)$$

可得到临界速度为

$$|v_{e0}| = \sqrt{\frac{-2eU}{m_e}} - v_s \quad (2-2)$$

只有当电子的运动速度

$$|v_{ex}| \geq \sqrt{\frac{-2eU}{m_e}} - v_s \quad (2-3)$$

时，电子才能够到达固体表面。由于离子受到固体表面负场强的吸引作用，所以具有任何运动速度的离子均可到达固体表面。