

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了卫星充放电效应的相关理论,包括与卫星充放电相关的空间环境、材料特性、充放电机理过程等内容。全书共分8章,第1章介绍了充放电效应的基本概念及危害;第2、3章介绍了与充放电相关的空间环境模型及材料特性;第4、5章分别讨论了表面充电模型和介质内部充电模型;第6章介绍了卫星充电诱发的放电机理及过程;第7、8章分别针对高压带电及微流星带电问题进行了讨论。

本书适合航天领域的工程技术人员及研究人员使用参考,也可供高校相关专业的师生阅读。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

卫星充放电效应基础理论 / 杨生胜等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2019.3

(空间科学与技术研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国之重器出版工程

ISBN 978-7-5682-6825-7

I. ①卫… II. ①杨… III. ①卫星通信系统—充放电—研究
IV. ①V474.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第041788号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 21.5

彩 插 / 6

字 数 / 349千字

版 次 / 2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷

定 价 / 98.00元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

《国之重器出版工程》

编辑委员会

主 任：苗 圩

副主任：刘利华 辛国斌

委 员：	冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
	陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
	李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
	谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
	赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
	卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
	张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



序 言

近年来,我国在航天领域取得了载人航天、北斗导航、探月工程等一系列举世瞩目的科技成就,标志着我国开始从航天大国向航天强国迈进。与此同时,航天技术的发展也对卫星在轨运行的可靠性、安全性提出了更高的要求。卫星充放电效应会在卫星材料中积累电荷并产生静电放电,损坏航天器上的部件并干扰航天器的运行,严重威胁卫星的在轨安全。

我国在卫星充放电效应基础研究方面相对薄弱,防护体系主要借鉴国外的方法,对防护方法的深层次机理认识不足,防护措施的有效性也难以判别。因此,迫切需要一套系统完整的介绍卫星充放电效应的专著,为航天科研工作者和型号工程人员提供服务与帮助。

兰州空间技术物理研究所是我国最早从事卫星充放电效应研究的单位,承担了一系列国家重大的研究项目和工程任务,系统开展了不同轨道的带电环境因素以及不同材料带电特性下的充放电机理研究,形成了完善的卫星充放电理论,开发了三维动态带电仿真分析软件,建立了系统的卫星充放电效应主被动防护方法,研究成果已在我国载人航天、通信卫星、气象卫星、对地观测卫星等国家重大科技工程中发挥了重要的技术支撑作用。

《卫星充放电效应基础理论》和《卫星充放电效应环境模拟方法》是兰州空间技术物理研究所的专家和科技工作者在总结国外充放电效应基础理论和模拟技术的基础上,结合自己的研究实践编著而成的。内容涵盖了卫星充放电效应环境、材料参数、理论模型、地面试验与评价技术等方面,反映了作者多年来在充放电效应领域内的研究成果,同时引入了国内外同行在该领域所取得的成就,内容体系性和知识性强。这套著作的出版发行不仅对中国卫星充



放电效应研究与发展产生重要、积极的影响，也将对中国航天事业的发展做出重要贡献。

应作者邀请为《卫星充放电效应基础理论》和《卫星充放电效应环境模拟方法》撰写序言，为之高兴。兰州空间技术物理研究所在国内率先对卫星充放电效应从理论研究到模拟试验，并结合航天工程应用需求，做了深入、系统的研究工作。这两部书的出版，相信对促进我国航天器事业的发展，建设航天强国，将起到积极推动作用。

杜善彪



前言

卫星充放电效应，又称卫星带电效应，是指卫星与周围空间中的带电粒子相互作用的过程及产生的效应。卫星充放电效应涉及空间等离子体物理、高能物理、材料科学和电磁场理论等多种学科，也与卫星的结构、工作状态等实际情况相关，因此它既是空间科学，又是空间工程。

卫星充放电效应会使卫星出现各种故障，严重影响卫星的在轨稳定及安全运行，例如：造成供配电系统短路，破坏卫星能源系统；击穿元器件，破坏卫星电子系统；产生电磁脉冲干扰，造成电路工作异常；击穿功能材料，影响材料性能；影响探测载荷功能等。卫星充放电效应研究伴随着人造卫星的发射始于 20 世纪中期，并从 20 世纪 70 年代开始进行系统专门研究，主要反映在航天器带电会议（Spacecraft Charging Technology Conference）的召开及专门的卫星充放电效应研究的开展。航天器带电会议是美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）专门组织的研究充放电效应的会议，从 1978 年美国空军军官学校举行的第 1 届航天器带电会议开始，至今已经举行了 15 届，并且已发展成两年一届的国际性学术会议。鉴于卫星充放电问题的研究需求，20 世纪 70 年代美国还专门针对表面带电问题发射了 SCATHA（Spacecraft Charging at High Altitudes）卫星，用于研究卫星的表面带电效应并验证其相关研究结果。随后在 20 世纪 90 年代美国又发射了 CRRES（Combined Release & Radiation Effect Satellite）卫星用于研究卫星的内带电效应。至今，卫星充放电效应研究已经发展成为一个独立的科学领域。

我国的卫星充放电效应研究多数针对具体工程任务，在卫星研制过程中



也主要依据工程经验。我国对卫星充放电效应机理的复杂性认识不透彻，也缺乏基础理论的支持，受充放电效应的影响，我国多型在轨卫星故障频发。随着我国航天技术的发展，各种新载荷、新技术、新材料等的应用，卫星充放电效应问题将会更加突出。近年来，国内陆续出版了一些卫星充放电效应相关书籍，这些书籍都没有对卫星充放电效应的基础理论进行系统介绍。因此，有必要对卫星充放电效应的机理及过程进行详细的阐述，从而服务于航天工程领域的技术人员和高校相关专业的师生。

本书著者及其所在单位承担过与卫星充放电效应相关的国家重大安全基础研究（973）和国家自然科学基金等多个项目。本书总结了著者多年的研究成果及文献资料调研分析结果。本书出版的初衷是使广大读者更好地了解卫星充放电效应并能结合工程实际进行充放电效应分析。因此，本书着重于卫星充放电效应基本机理的介绍，从卫星充放电效应的相关空间环境和材料特性入手，分别阐述了表面带电和内带电模型及其诱发的空间静电放电类型，并结合卫星的工作状态讨论了高压带电问题。

在本书撰写过程中，兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室的相关同事提供了大量资料并参与了撰稿工作，在此表示衷心的感谢！

限于著者水平，书中难免出现错误、疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

著者



目 录

第 1 章 充放电效应的基本概念	001
1.1 卫星充放电的概念	003
1.1.1 充放电的相关基本概念	003
1.1.2 充放电过程的影响因素	011
1.2 卫星充放电效应的危害及造成的故障	013
第 2 章 典型的空间充电环境及模型	019
2.1 磁层等离子体环境	021
2.1.1 磁层等离子体	022
2.1.2 GEO 空间等离子体环境监测数据	026
2.1.3 国内外航天器设计过程中采用的地球同步轨道等离子体 环境参数	036
2.2 地球辐射带高能电子环境	040
2.2.1 地球辐射带	041
2.2.2 内辐射带	045
2.2.3 外辐射带	046
2.2.4 辐射带高能带电粒子环境模型	048
2.3 电离层等离子体环境	057
2.3.1 D 层	058
2.3.2 E 层	059
2.3.3 F1 层	059



2.3.4	F2 层	059
2.4	极光沉降电子环境	064
2.4.1	极轨环境的特点	064
2.4.2	极光沉降电子模型	068
2.5	太阳风	073
2.6	银河宇宙线 (GCR) / 太阳宇宙线 (SCR) 高能质子	086
2.6.1	银河宇宙线 (GCR)	086
2.6.2	太阳宇宙线 (SCG)	088
第 3 章	与充放电相关的材料特性	095
3.1	二次电子	096
3.1.1	二次电子发射理论	096
3.1.2	二次电子发射系数	100
3.2	背散射电子	107
3.2.1	背散射电子理论	108
3.2.2	背散射电子发射系数	112
3.3	光电子	114
3.3.1	光电发射理论	114
3.3.2	光电子发射系数	115
3.4	材料的电导率	118
3.4.1	介质材料电导的微观机理	118
3.4.2	介质材料电导的宏观特性	131
3.5	材料的介电常数	134
第 4 章	表面充电模型	139
4.1	电流收集理论	140
4.1.1	朗缪尔探针	140
4.1.2	空间带电粒子的轨道限制理论	141
4.1.3	柴尔德-朗缪尔空间电荷限制理论	142
4.1.4	不同形状表面电流收集	143
4.1.5	玻耳兹曼排斥电流	144
4.2	充电电流平衡的表面充电模型	146
4.2.1	表面充电的电流平衡方程模型	146
4.2.2	带电的面积效应	151



4.2.3 势垒效应	153
4.3 低轨道太阳电池阵诱发的绝对充电	158
4.3.1 低轨道太阳电池阵诱发的绝对充电	158
4.3.2 低轨道太阳电池阵电流收集增强效应	163
4.4 尾区带电	167
4.5 电推进诱发的充放电	175
4.6 多体相互作用带电	180
4.7 感生充电	184
第 5 章 介质内部充电模型	187
5.1 高能带电粒子与材料相互作用的过程	188
5.1.1 材料中高能粒子的穿透特性	188
5.1.2 高能电子辐射下的电荷沉积及电荷输运模型	191
5.1.3 材料中的电荷沉积与能量沉积分布	193
5.2 材料辐射诱导电导率模型	197
5.2.1 高能电子辐照下的介质辐射诱导电导特性	198
5.2.2 强场作用下电介质材料的非线性电导机理与模型	208
5.3 介质内部充电模型及特性	210
第 6 章 卫星空间放电机理	215
6.1 放电击穿的基本理论	216
6.1.1 汤生放电理论	216
6.1.2 流注放电理论	219
6.1.3 固体击穿理论	229
6.2 典型的静电放电的类型及电荷转移模式	243
6.2.1 静电放电的类型	243
6.2.2 静电放电的电荷转移模式	244
6.3 表面击穿放电	245
6.3.1 真空沿面闪络放电	245
6.3.2 介质材料组合放电	247
6.3.3 金属-介质结构材料放电	251
6.3.4 表面放电的一些规律	253
6.4 介质深层带电击穿	255
6.4.1 高电场雪崩电离	255



6.4.2	Mott 转变	256
6.4.3	Poole-Frankel 强电场效应	257
6.4.4	齐纳击穿	258
6.4.5	放电电流估算	259
第 7 章	高压大功率部件充放电机理	261
7.1	高压太阳电池的二次放电机理	263
7.1.1	LEO 轨道高压太阳电池阵充放电过程	264
7.1.2	GEO 轨道高压太阳电池阵充放电过程	271
7.1.3	高压太阳电池阵二次放电模式	275
7.2	高压大功率部件内带电机理	282
7.2.1	高工作电压与高能电子共同作用下的介质内部电场分布 ..	282
7.2.2	高能电子辐射下 SADA 部件内部充电特性	287
第 8 章	流星体撞击诱发的卫星充放电问题	299
8.1	流星体的基本概念及速度	300
8.2	流星体诱发的卫星带电问题	303
参考文献		310
索引		314



第1章

充放电效应的基本概念

卫星充放电是指卫星在轨运行时与空间中的带电粒子相互作用产生的一种静电现象，其对卫星的在轨寿命、高可靠运行构成严重威胁。从广义上讲，卫星充放电包括充电和放电两个过程，充电是指空间带电环境与卫星相互作用产生的静电荷积累过程，当静电荷积累建立的场强超过其周围材料的击穿场强时将诱发放电过程。

根据卫星材料发生电荷积累的位置或部位不同可以分为表面带电和内带电两种类型。卫星在轨运行时与周围空间中的等离子体、太阳辐射和磁场环境等因素相互作用，导致净电荷在卫星表面积累形成表面带电，表面带电通常发生在地球同步轨道高度、近地轨道高度（包括极轨道高度）区域空间。而在地球辐射带（范·艾伦辐射带）中，极高能



量的电子和离子能够穿入非导电材料并沉积其中，或者穿透薄绝缘层进而形成内带电。

卫星充放电是一个非常复杂的过程，影响因素众多，不仅与空间环境相关，还与卫星的结构、材料、工作状态等相关。



| 1.1 卫星充放电的概念 |

1.1.1 充放电的相关基本概念

1. 航天器带电

空间等离子体在卫星表面或内部沉积,伴随着卫星材料表面带电粒子的出射,当航天器带有净电荷时,不论带正电或者负电,根据高斯定理该净电荷将产生电场。假设等离子体是电中性的,其时间尺度(等离子体频率的倒数)比航天器电位变化快很多。因为航天器带电需要花时间对材料的等效电容充电,所以带电过程比环境等离子体涨落时间要长很多。在卫星充放电研究领域,习惯上将环境空间等离子体电位 ϕ_p 规定为零,即

$$\phi_p = 0 \quad (1-1)$$

由于电位是一个相对概念,在卫星充放电研究领域,卫星充电电位是相对于空间等离子体零电位而言的。相对于周围等离子体电位而言,卫星充电电位是浮动的。如果相对于周围等离子体电位,卫星电位 ϕ_s 为非零,那么卫星就带电了:

$$\phi_s \neq 0 \quad (1-2)$$



2. 表面带电

空间电荷在航天器表面积累,使航天器表面与空间等离子体间或者航天器不同部位间充至不同电位的现象,称为表面带电 (Surface Charging)。引起表面带电的等离子体粒子能量一般小于 50 keV。通常,表面带电分为绝对带电 (Absolute Charging) 和不等量带电 (Differential Charging) 两种。绝对带电是指航天器外表面相对于周围空间等离子体环境的电位,而不等量带电则是指航天器的一部分相对于另一部分的电位。表面带电过程可以通过图 1-1 简单描述。

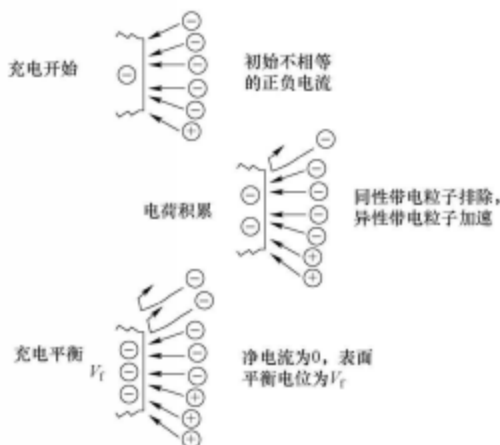


图 1-1 表面带电原理示意

3. 不等量带电

对于由电气隔离表面组成的卫星,不同材料表面的电位可能不同。表面电位取决于表面特性和周围环境,是各向异性的,对于这种情况,可以称为不等量带电。由于卫星外表面材料的介电特性、光照条件、几何形状等情况不同,不等量带电具体表现为卫星相邻外表面之间、表面与深层之间、表面与航天器结构“地”之间产生电位差。

图 1-2 给出了不等量带电电位差的形成机理,不同的材料由于其二次电子发射及背散射系数不同,因而具有不同的平衡电位。这种效应导致了在相邻表面间形成电位差。航天器“地”的电位与航天器表面的平均特性有关,每个表面对航天器的“地”充电至不同的电位,介质材料表面电位与下面导体电位间的差别是不等量电位的另一个来源。

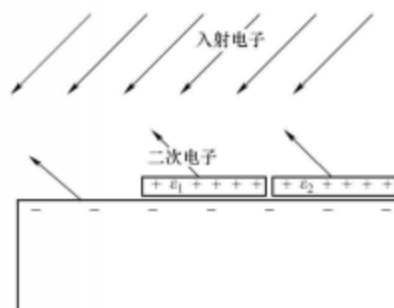


图 1-2 不等量带电电位差的形成机理

4. 绝对带电（结构带电）

绝对带电有时也称为结构带电或框架带电，当卫星作为一个整体相对于空间等离子体获得由净电荷积累形成的电势时就发生了绝对带电，如果整个卫星表面为金属材料（导体），则卫星相当于一个等势体，一般地，绝对带电发生的时间极短（几微秒）。绝对带电原理可以参考图 1-3。

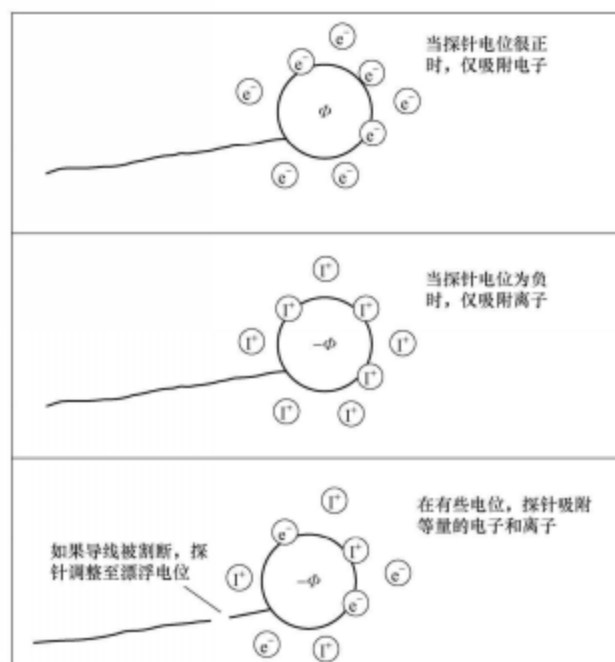


图 1-3 朗缪尔探针从周围等离子体吸附的电子或离子数与其电位相关，悬浮电位等于净电流为零时的电位



5. 内带电

当周围的电子和离子能量非常高 (MeV 或更高) 时, 它们可以穿透进入不导电的介质深层, 在介质内部产生电荷积累, 或穿透卫星, 在其内部的孤立导体上产生电荷积累。这种情况称为内带电或深层介质充电 (图 1-4)。

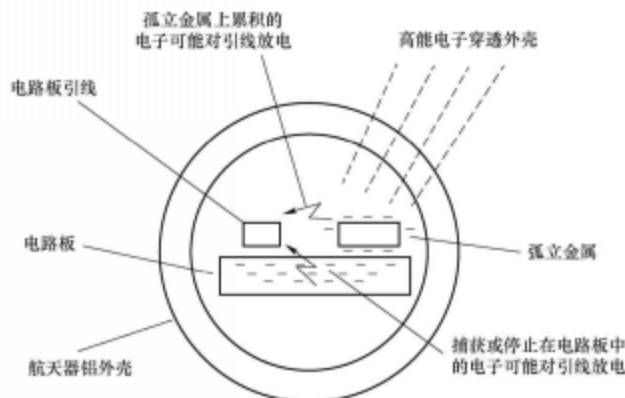


图 1-4 内带电示意

6. 德拜半径

空间等离子体中的任何一个带电粒子产生的静电位场, 均会受到周围电荷的屏蔽, 该电势的作用范围受到限制, 其作用的空间的特征尺度就是德拜半径 (Debye Radii)。德拜半径的表达式为

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_{e0} e^2}} \quad (1-3)$$

式中, ϵ_0 为真空中的介电常数; k 为玻耳兹曼常数; T_e 为电子温度; n_{e0} 为空间无扰动电子密度; e 为单位电荷。

7. 拉莫尔半径

空间等离子体中的带电粒子受到空间磁场的作用, 在洛伦兹力的作用下, 在垂直磁场平面内作圆周运动, 其运动回旋半径称为拉莫尔半径 (Larmor Radii)。拉莫尔半径的表达式为

$$R_C = \frac{mv_{\perp}}{qB} \quad (1-4)$$

式中, m 为带电粒子质量; $v_{\perp}$ 为垂直磁场平面内速度; q 为粒子所带电荷; B



为空间磁场强度。

8. 等离子体振荡

如果在等离子体的某个局部区域里瞬间出现了正或负的空间电荷,那么这些电荷将开始振荡。考虑厚度为 L 的片状等离子体,粒子密度为 n 。假设其中的电子相对于离子(假定离子静止不动)运动了很小的距离 x ,于是在片状等离子体的一侧出现了电子过剩,而在另一侧出现了多余的离子。把两个电荷过剩区域设想为很薄的面,它们的面电荷密度大小为 $\sigma = n_e ex$,由电磁学可知,在这片状区域将产生一个电场:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{n_e ex}{\epsilon_0} \quad (1-5)$$

这个电场有着把电子拉回到原来的平衡位置的趋势。在天外磁场,且忽略电子热运动及碰撞效应的情况下,在该电场的作用下,单个电子的运动方程为

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE = -\frac{n_e e^2 x}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

式中, m_e 为电子质量

式(1-6)中的负号表示电场方向与电子运动方向相反,式(1-6)可改写成

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_{pe}^2 x = 0 \quad (1-7)$$

此式即振荡方程,其中,

$$\omega_{pe} = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

为振荡频率,称为等离子体电子振荡频率,或朗缪尔振荡频率。

9. 等离子体鞘层

由于航天器表面带负电,在表面材料附近区域,等离子体电中性条件被破坏,它具有过剩的正电荷,这个处于表面与本体等离子体(电中性区域)之间的非电中性区域,称为等离子体鞘层。一般情况下,一维的等离子体鞘层的表达式为

$$d_s = \frac{2}{3} \lambda_D \left(\frac{-2V}{kT_e/e} \right)^{3/4} \quad (1-9)$$