

HANGTIANQI
DAIDIAN
LILUN JI FANGHU



航天器带电理论及防护

◎ 原青云 孙永卫 张希军 武占成 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

航天器带电理论及防护

原青云 孙永卫 张希军 武占成 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了航天器带电基本理论与防护技术,主要包括航天器充放电物理过程,空间等离子体环境及其效应,航天器表面带电、深层带电的基础理论及地面模拟,航天器带电防护方法和高压太阳电池阵效应试验及防护技术等。

本书可供航天领域工程师和研究人员参考,也可作为高校相关专业的本科生和研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航天器带电理论及防护/原青云等编著. —北京:
国防工业出版社,2016. 11
ISBN 978 - 7 - 118 - 11081 - 4

I. ①航… II. ①原… III. ①航天器—空间带电
粒子—研究 IV. ①V47 ②P35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 290508 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 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13¼ 字数 245 千字
2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

航天器充放电过程,又称航天器带电过程,是指航天器与空间等离子体、高能电子、地磁场和太阳辐射等环境相互作用而发生的静电电荷积累及泄放过程。受充放电效应影响,我国多型航天器在轨故障频发,充放电效应已成为制约我国航天器在轨安全运行的重要瓶颈问题之一。“十二五”及后续几年,是我国航天重大工程实施和航天器批量装备高峰时期,二代导航二期卫星将运行在更恶劣的新环境中,“高分”工程将采用大型天线等新载荷,新型通信卫星将采用电推进和更大功率供电系统等新技术,这些新变化将导致航天器充放电效应问题更加突出。

充放电效应会造成航天器出现各种故障,严重影响航天器的在轨安全运行。虽然近年来国内航天部门依据工程经验,采用接地、滤波和材料选择等多种手段确保了我国航天器发射任务的成功,但是,我国对航天器充放电效应机理的复杂性认识不透彻,缺乏基础理论的支持,缺乏系统性的防护技术。随着我国航天军事装备的发展,单纯地依靠工程经验将无法解决充放电效应带来的问题,需要系统地研究航天器充放电效应的基础理论和防护方法,从而形成“理论指导工程,工程验证理论”的新模式。

航天器充放电研究领域主要探索航天器与周围等离子体、太阳光辐射和人工等离子环境等因素的基本相关作用,既是基础空间科学又是空间工程。尽管近年来国内出版了一些航天领域的书籍,这些书籍中一章或两章是论述航天器充放电的相关内容,但是还没有一本专门论述航天器充放电的书籍。本书旨在集航天器充放电的基础理论、防护及相关最新研究成果于系统著作,从而服务于高校研究生教育,并为研究人员提供参考。

本书是在国防“973”项目(项目编号:613211)、国家自然科学基金项目(编号:51177173)、“十二五”装备预研项目(项目编号:51333030101和51333060102)的资助下完成的。

全书由原青云提出编著纲目并执笔撰写,第2、3、4、9和10章由原青云撰写,第1章和第6章由孙永卫撰写,第7章和第8章由张希军撰写,第5章由武占成撰写。

限于作者水平有限,书中难免出现错误、疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 航天器的军事应用价值	1
1.2 空间环境效应引起的航天器故障	2
1.3 国内外研究现状	6
1.3.1 仿真软件	8
1.3.2 航天器表面带电地面模拟试验设备	11
1.3.3 航天器带电防护技术	13
第2章 航天器充放电物理概述	15
2.1 物理概念	15
2.1.1 等离子体	16
2.1.2 航天器表面带电	17
2.1.3 航天器介质深层带电	18
2.1.4 电导率与接地	19
2.1.5 击穿电压	19
2.1.6 电子通量	20
2.1.7 二次放电	20
2.1.8 尾区带电	20
2.1.9 材料的特性参数	21
2.2 航天器空间环境	22
2.2.1 真空环境及其效应	22
2.2.2 空间太阳辐照环境及其效应	23
2.2.3 高能粒子辐射环境及其效应	23
2.2.4 空间等离子体环境及其效应	24
2.2.5 空间磁层亚暴环境及其效应	25
2.2.6 其他空间环境及效应	27
2.3 介质材料的带电机理	28
2.3.1 介质材料的能带结构	28
2.3.2 介质材料的带电机理	29
2.3.3 介质材料表面结构对带电性能的影响	30

7.3.4	电场诱导电导率	135
7.3.5	辐射诱导电导率	136
7.3.6	介质内部不同深度的辐射剂量率	136
7.3.7	延迟电导率	137
7.4	深层带电物理学基础	137
7.4.1	高能带电粒子在固体中的穿透特性	137
7.4.2	阻止本领	138
7.4.3	透入深度和射程	139
7.4.4	高电场雪崩电离	141
7.4.5	Mott 转变	142
7.4.6	Poole - Frenkel 强电场效应	144
7.4.7	齐纳击穿	145
7.4.8	电子注量	145
7.4.9	介质深层带电的临界注量	146
7.4.10	带电粒子的穿透效应	147
第 8 章	深层带电地面模拟实验	148
8.1	国外地面模拟装置	148
8.1.1	CEETC2 和 CEETC3 装置	148
8.1.2	REEF 装置	149
8.1.3	SEMIRAMIS 和 SIRENE 装置	149
8.1.4	日本武藏工业大学装置	150
8.2	卫星深层充放电模拟实验装置	151
8.2.1	真空系统	152
8.2.2	温控系统	152
8.2.3	辐照源	153
8.2.4	测量系统	153
8.2.5	实验过程	154
8.3	辐照源束流强度的监测	154
8.3.1	电子枪束流强度的监测	155
8.3.2	放射源束流强度的监测	155
8.4	不同辐照条件下介质的深层充电过程	155
8.4.1	不同能量电子辐照下介质的充电过程	155
8.4.2	不同束流强度的电子辐照下介质的充电过程	157
8.4.3	不同厚度介质的充电过程	158
8.4.4	其他材料介质的充电过程	159

8.4.5 某卫星机构的深层充电过程	160
第9章 航天器带电防护	161
9.1 概述	161
9.1.1 被动防护	161
9.1.2 电位主动控制	163
9.2 航天器带电抑制方法	165
9.2.1 尖角法	167
9.2.2 热灯丝发射法	167
9.2.3 导电栅网法	168
9.2.4 局部表面导电涂层法	168
9.2.5 高二次电子发射系数法	168
9.2.6 电子和离子发射法	168
9.2.7 蒸发法	170
9.3 航天器带电防护方法的新进展	170
9.3.1 星内静电放电防护涂层技术	170
9.3.2 大型低轨道载人航天器电位主动控制技术	175
第10章 高压太阳能电池阵静电放电防护	183
10.1 防护技术分析	183
10.2 防护措施	184
10.2.1 盖片表面蒸镀金属氧化物涂层	184
10.2.2 盖片表面蒸镀 ITO 网格技术	185
10.2.3 控制电池串间的电位差	190
10.2.4 太阳能电池串间填涂室温硫化(RTV)胶	190
10.2.5 减小电池串电流	191
10.2.6 电场主动防护技术	191
10.2.7 电位主动防护技术	193
参考文献	194
附录 物理常量	200

第 1 章 绪 论

20 世纪 60 年代以来,全世界约有 4200 次发射,共将约 6000 个航天器送入了空间,促进人类社会发生了巨大的变化。迄今为止,全世界大约有 53 个国家和地区,都在利用空间进行科学研究、军事活动、商业活动、资源开发和环境监测等,在空间寻求政治、经济和军事利益等。近几年来,全球平均每年发射约 120 个各类航天器,总投入经费约 345 亿美元。可见,航天器的发展及应用已经越来越受到各个国家的高度重视。

同时,航天器的发展及其在军事上的应用,已经对现代战争产生了深远的影响。美国在海湾战争中动用了 70 余颗卫星,在科索沃战争和阿富汗战争中动用了 50 多颗卫星,为空中、海上和地面武器装备及作战人员提供了全方位的信息支援和保障。我国航天事业发展迅猛,“神舟”载人航天计划、探月工程、多用途卫星及特种飞机等空间应用技术不断提升。但是,国内外航天器在发射和轨道运行过程中因静电导致的多起软、硬故障,严重影响了航天器的正常工作,空间静电效应已经成为航天器面临的主要电磁环境威胁之一。

1.1 航天器的军事应用价值

在未来信息化战争中,航天器可以为各种作战行动提供情报信息支持和保障,能够完成情报侦察支持、指挥通信保障、防天监视和预报、导航定位支持以及对其他军兵种作战支援等多种任务,具有多种应用类型。

1. 侦察监视

利用航天器系统发现、识别和监视陆、海、空、天的各种目标,获取目标信息,在经过快速处理后,提供给联合作战指挥机关和作战单元,其目的是实现对对方的指挥中心、机场和交通枢纽等重要目标全天时、全天候地侦察与监视,为主战武器提供目标打击指示和进行打击效果评估等。

2. 导航定位

导航定位是利用运行于地球中高轨道的卫星星座连续向地球表面发射带有准确发射时间以及卫星在空间的准确位置等信息的无线电信号,地球表面及近地空间的导航接收机通过接收多颗卫星信号并进行测距而给出其载体的准确位置、速度和时间的过程。

在海湾战争和对伊战争中,美国大量使用 GPS 制导的巡航导航、GPS 制导

炸弹等各种 GPS 精确制导武器,取得了良好效果。

3. 信息传输

空间信息传输是实施战略战役甚至战术通信的主要手段,是构成作战指挥信息系统不可缺少的重要环节。卫星通信已经成为现代战争的重要手段,尤其是其多址灵活性和可移动性等特点,对联合作战的指挥控制具有特别重要的意义,能很好地满足联合作战对通信的特殊需求。

4. 导弹预警

导弹预警是利用卫星预警系统,从空间监视、发现和跟踪敌方导弹等飞行器的发射和飞行,在最早时间内发出来袭警报、识别导弹类型、估计飞行弹道参数和预报落点。

5. 环境探测

环境探测是利用航天器环境探测系统获取地球大气、海洋、空间环境信息,以探测天气变化、辐射环境、水文资料、海洋环境等要素,在对探测信息综合处理后,向用户提供环境信息及其对作战影响的分析结论的过程,包括对作战部队的部署、作战行动、武器装备的使用以及对 C⁴ISR(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)系统运行的影响等。

6. 作战支援

在未来信息化战中,制天权日益成为信息化部队、信息化武器和打赢信息化战争的重要前提,并将发挥非常关键的作用。而在平时,拥有制天权对于遏制战争、维护国家利益也具有十分重要的现实意义,是一个国家威慑力量的重要组成部分。

航天器的军事应用,使战场空间迅速从大气层拓展到外层空间,战争形态由传统的陆、海、空作战转变成陆、海、空、天、电多位一体的作战,成为导致军事活动全面变革、推动新军事革命的关键因素,在未来信息化条件下的联合作战中必将是武器装备信息化的基石、作战指挥信息系统的重要组成、作战要素一体化的桥梁,成为现代作战夺取信息优势、取得作战胜利的重要技术保障。

1.2 空间环境效应引起的航天器故障

20 世纪 60 年代初,随着地球同步轨道航天器的运行,国内外航天器发生了多起在轨异常和故障,严重干扰了航天器的正常工作。

美国国家地球物理数据中心统计了 1971 年至 1986 年间 39 颗地球同步轨道或准静止轨道卫星的在轨异常,表明由于受空间环境影响而造成故障的占到了总数的 70%。美国空间环境中心对从 1965 年起的 300 多个卫星异常或故障进行分析与评价,指出其中 1/3 左右是由变化的空间环境造成的。对我国早期 6

颗地球同步轨道卫星的故障原因进行统计,结果表明由空间环境引起的故障占总故障数的40%。通过对国内外航天器的在轨异常与故障进行分析表明,在所有卫星在轨故障的主要原因中,空间环境位于首位,是最主要的因素之一。图1-1为空间环境下航天器表面放电现象。

静电放电是空间电磁环境效应的重要组成部分,静电放电可能对航天器中的电子设备、火工品、计算机控制系统、电源系统及航天器的结构/材料造成影响。电弧放电和高压放电可以直接导致各种控制系统、电子设备、电源系统的故障,甚至是仪器、结构/材料的破坏;静电放电引起的电磁辐射也可能对航天器上各类设备及系统的正常工作造成干扰。

卫星充放电效应通常会产生灾难性的故障,严重影响卫星安全运行。如1973年,美国国防通信卫星 DSCS - II (9431) 由于电缆表面充电电压超出电缆击穿阈值,通信系统供电电缆击穿,如图1-2所示,导致卫星失效。

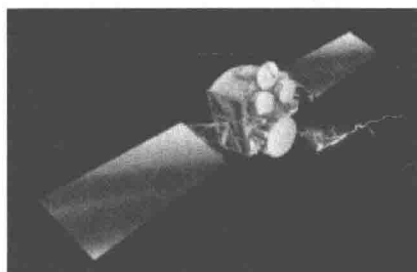


图1-1 空间环境下航天器表面的放电现象

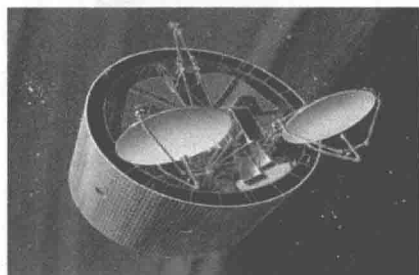


图1-2 DSCS - II 卫星电缆击穿故障

日本先进地球观测卫星(ADEOS - II)通过极区时,由高能电子引起的内带电效应烧毁了太阳电池阵和卫星主体间的部分供电电缆,如图1-3所示,导致卫星功率从6kW下降到1kW,卫星的大部分功能丧失。

法国通信卫星 Telecom - 1B 由于放电电流(瞬时值达几十安培)耦合到卫星内部,导致卫星主备份姿控计算机均发生故障,卫星失效,如图1-4所示。



图1-3 ADEOS - II 卫星电源线烧毁故障

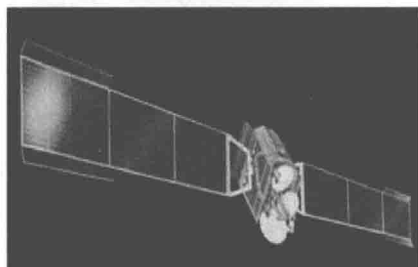


图1-4 放电脉冲干扰 Telecom - 1B 卫星姿控计算机

表 1-1 中列举了多个国家和地区的航天器由于静电放电而出现的故障情况,可以看出,空间静电放电对航天器的威胁由来已久,并普遍存在于各类航天器之中。

表 1-1 静电放电使卫星发生故障统计表

序号	卫星名称	故障情况	损伤部位
1	美国 DSCS - II (9431) 卫星	通信系统能源中断,卫星失效	能源系统
2	日本 ADEOS - II 卫星	太阳阵和卫星主体间的电缆烧毁	
3	阿拉伯卫星通信组织 Arabsat 1 - A 卫星	能源系统发生故障,转为备份星	
4	欧空局 MARECS - A 卫星	太阳阵烧毁、功率下降,卫星服务中止	
5	欧空局 Meteosat - F1 卫星	能源系统发生故障	
6	日本 ETS - 6 卫星	太阳能电池基底击穿,功率下降	
7	加拿大—美国 CTS 卫星	电源二极管失效,一根电源母线烧毁	
8	美国 DSCS - II (9432) 卫星	能源系统连续异常,卫星失效	
9	欧空局 Meteosat - F2 卫星	能源系统发生故障	
10	法国 Telecom 1A 卫星	通信故障,转为备份星	电子系统
11	美国 Telstar 401 卫星	姿控系统故障	
12	美国 Intelsat K 卫星	动量轮控制电路故障	
13	加拿大 Anik E - 1 卫星	陀螺仪故障	
14	加拿大 Anik E - 2 卫星	主备份姿控系统均发生故障,卫星失效	
15	美国 Telstar 401 卫星	姿控系统故障	
16	美国 Intelsat K 卫星	动量轮控制电路故障	
17	日本 BS - 3A 卫星	60min 遥测记录丢失	
18	澳大利亚 AUSSAT - A3 卫星	姿控系统遥测开关故障	
19	美国 FLTSATCOM 卫星	发生 5 次逻辑错误	电子系统
20	澳大利亚 AUSSAT - A2 卫星	姿控系统故障	
21	澳大利亚 AUSSAT - A1 卫星	姿控系统故障	
22	美国 Intelsat 511 卫星	姿控系统故障	
23	法国 Telecom - 1B 卫星	主备份姿控系统故障,卫星失效	
24	美国 Intelsat 510 卫星	姿控系统故障	
25	加拿大 Anik D - 2 卫星	消旋控制系统故障,通信中断	
26	美国 NATO - 3A 卫星	姿控系统故障	
27	美国 TDRS - 1 卫星	控制系统故障	

(续)

序号	卫星名称	故障情况	损伤部位
28	美国 TDRS -3 卫星	姿控系统处理器电路故障	电子系统
29	美国 TDRS -4 卫星	姿控系统故障	
30	美国 TDRS -5 卫星	姿控系统故障	
31	美国 SBS 1 卫星	姿控系统电路故障	
32	美国 DSCS - II (9443) 卫星	逻辑错误	
33	美国 NATO -3C 卫星	姿控系统故障	
34	加拿大 Anik B -1 卫星	热控涂层的性能下降	功能材料
35	美国 Landsat -3 卫星	传感器污染加重	
36	日本 GMS -3 卫星	加速计异常、红外可见扫描辐射计故障	敏感部件
37	美国 GOES -6 卫星	X 射线扫描仪故障	
38	美国 GOES -4 卫星	辐射计和大气探测器失效	
39	美国 SCATHA 卫星	数据丢失, 磁场探测器和等离子体分析仪均发生故障	
40	美国 Viking Lander 1 卫星	质谱仪工作异常	

近年来,随着我国在轨卫星数量及种类的增加,带电效应引起的故障已经开始凸显,带电效应已成为导致我国卫星在轨故障的重要原因。

2008 年,我国研制的尼日利亚卫星的太阳帆板驱动机构(SADA)100V 功率环与负线环间发生严重放电事件,破坏了卫星的供电电路,引起整星失效,归零分析和地面验证试验表明“产生高压放电的最大可能是 SADA 功率环在轨积累电荷所致”。SADA 功率环充放电现象如图 1-5 所示。

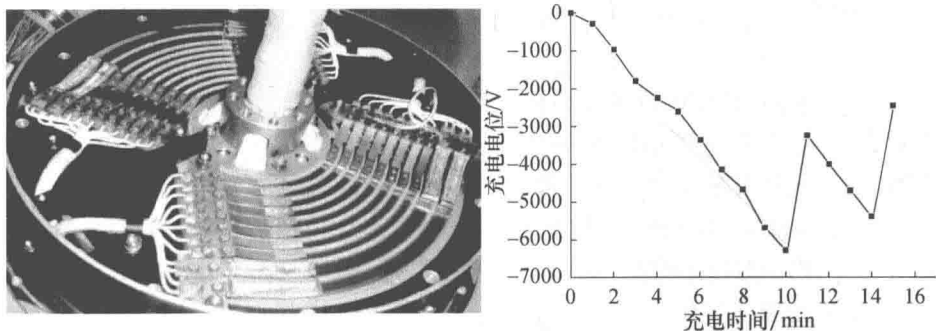


图 1-5 SADA 功率环充放电现象

充放电效应产生的空间电磁干扰是卫星产生故障的重要原因,我国的 FH-1(01) 卫星在轨运行期间,由于充放电效应使工作于定向测控方向的主备份测控放大

器先后失效,只能占用两路通信用全向转发器,影响了卫星效能的发挥。同时,其步进衰减器电路和电缆回线受充放电产生的电磁干扰,多次发生转发器增益挡跳变故障。BD-1 等卫星太阳帆板驱动电路控制方向的寄存器受到空间电磁干扰,多次发生太阳帆板复位和逆转故障,严重影响了能源系统的供给。

2004 年, FY-2(04) 卫星发生了天线消旋机构失锁故障。研究表明:卫星外部的主体结构玻璃钢(图 1-6)在 GEO 磁暴环境中,表面可产生高达 5000V 的充电电位,导致了频繁的放电(放电频率 5~6 次/min),造成天线消旋机构失锁,其放电波形如图 1-7 所示。

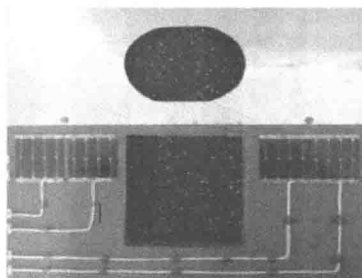


图 1-6 FY-2 卫星外部主体结构

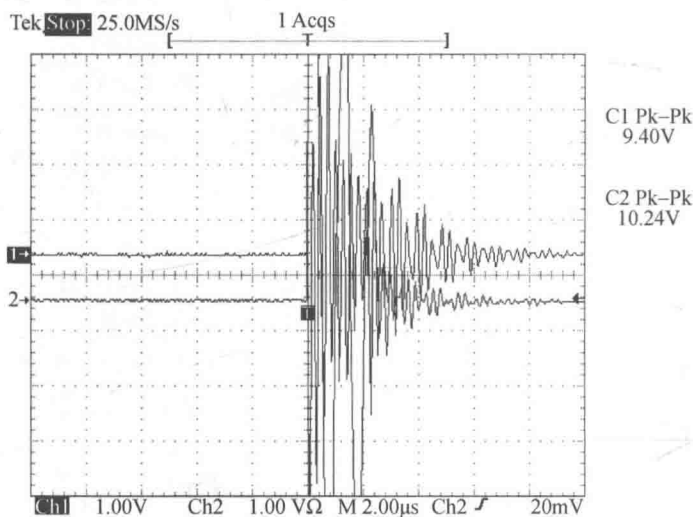


图 1-7 FY-2 卫星玻璃钢表面放电波形

2004 年,采用 CAST968 平台的 TC-2 卫星姿控计算机电路板采用了高绝缘材料,由于内带电使电路板产生放电,放电脉冲损坏了计算机中的 RAM 器件,导致姿控计算机无法正常工作。

2002 年, FY-1C(03) 卫星太阳电池阵测温系统采用了低电平电路,由于对在等离子体环境中卫星结构电位漂移认识不足,测温信号完全淹没在结构电位中,测温系统无法工作。

1.3 国内外研究现状

多年来,国外卫星电子设备在磁层亚暴期间发生多次故障,究其原因,是由

卫星表面介质材料在亚暴期间受空间电子作用导致电荷沉积,继而发生放电所引起的。从此,卫星充放电效应研究成为独立的研究方向。美国、欧洲及俄罗斯等投入大量的研究经费持续开展卫星带电效应的研究。国外从20世纪70年代开始,实施了庞大的卫星带电研究计划,成立了专门的航天器带电技术研究委员会,并定期召开唯一的单项空间环境效应国际会议——航天器带电技术国际会议。这些工作极大地推动了卫星带电效应研究的发展,也为保障卫星的研制和在轨安全发挥了极其重要的作用。

国外卫星充放电研究历经数十年的发展,与航天技术的发展始终保持着紧密联系,充放电领域的权威专家 Garrett 和 Whittlesey 将充放电效应的研究历程大致分成五个阶段:

第一阶段(20世纪50年代):卫星充放电效应研究的起步阶段。1955年,Johnson 和 Meadows 首次就充放电效应进行了报道,同时,国外开始在火箭上搭载传感器对电离层进行测量,这揭开了卫星充放电效应研究的篇章。

第二阶段(1957—1962年):其标志为1957年Sputnik卫星的发射。在1961年Chopra建立了航天器带电的基本理论,同时,Sputnik-3首次进行了表面电位的测量。火箭和卫星的观测数据证实了确实存在卫星带电现象,并能够对卫星的运行造成威胁。

第三阶段(1963—1965年):标志是卫星充放电模型的开发以及精确测量技术在火箭和卫星上的应用。在此阶段,国外就卫星充放电效应开展了广泛的研究工作,其代表如1963年Brundin和Bourdeau对带电研究的全面回顾。1965年,Singer出版了第一部完整的关于航天器带电的专业书籍。

第四阶段(1965—1980年):标志性成果是非常成熟的带电理论的建立。1973年,美国空军的DSCS(Defense Space System Communication Satellite)9431卫星因放电导致通信单元供电失效,这一事件使得NASA与美国空军联手发展带电控制技术。也正是在此阶段,开发出了著名的带电分析预测软件NASCAP/GEO。1979年,高轨道带电技术卫星(SCATHA,又称P78-2卫星)的发射标志着第四阶段的结束,同时,SCATHA卫星的测试数据被成功地运用到了带电控制方法的研究上。

第五阶段(1980年至今):此阶段主要关注内带电、大尺寸结构LEO带电和高功率卫星带电效应研究。这一阶段的标志性事件包括:1982年和1983年,发射了两颗DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)极轨卫星,用于研究低高度极区电子环境并收集极光活动信息,这可以看作第五阶段的开始;1984年,NASA开发了完整的表面带电分析软件,主要包括NASCAP/GEO、NASCAP/LEO和NASCAP/PEO三套软件;1984年,NASA编制并发布了表面带电控制与防护设计指南(NASA-TP-2361);1990年,美国发射了CRRES卫星研究卫星内带电效应;1999年NASA又编制了内带电效应防护手册(NASA-HDBK-4002),

并于2010年3月进行了修订(NASA-HDBK-4002A);2000年,ESA开发了卫星内带电分析软件(DICTAT)。

1.3.1 仿真软件

自从发现航天器表面带电引起故障以后,航天器表面带电分析技术就一直是国际宇航界研究的一个重要内容,在其预测分析、材料选取、带电引起的放电损伤、评价及其防护技术方面进行了大量的研究,并初步研发了一些用于航天器表面带电分析的软件。

由于经费和地面模拟试验技术条件的制约,在地面实现航天器表面带电试验是较为困难的。因此,利用航天器带电分析软件进行计算机仿真计算成为国际上航天器带电分析的一个重要手段,这也促使航天器带电分析软件在八九十年代成为一个热门课题。国外在建立的各种模型和算法的基础上,开发了NASACAP、NASACAP2K、SPIS、DICTAT、Builder等众多先进的充放电仿真软件,对卫星充放电效应进行了有效的分析和评估。

1. 表面充放电效应仿真分析研究

在表面带电仿真分析技术方面,国际上先后利用磁流体力学方法(MHD)、单元粒子法(PIC)等开发了许多成熟的表面带电分析软件。以NASCAP为代表的众多的卫星带电分析软件的开发应用,使国外已掌握了整星的表面带电分析评估技术。

NASCAP是最著名的卫星带电分析软件,可计算各种空间环境下卫星三维表面的带电状况。它是由NASCAP/GEO、NASCAP/LEO等部分组成的。

NASCAP/GEO是1976—1984年期间由NASA/Lewis研究中心与美国空军地球物理实验室开发的用于分析地球同步轨道带电的软件。该软件被大量地用于多颗卫星的表面带电状况分析。

NASCAP/LEO是1980—1990年期间NASA/Lewis研究中心研制开发的。目的在于进行高密度、短德拜长度的等离子体与卫星相互作用研究。它首创了将任意物体嵌入立体网格中进行分析的方法,可以对较小物体的重要特征进行局部细分;包括对太阳阵表面、太阳阵电路及流体力学离子膨胀模拟。

NASCAP2K是NASA新近开发的卫星表面带电分析软件,它继承了NASCAP的优点,采用了先进的边界元法(BEM)计算卫星表面电位,通过求解连续电场的方法分析空间电势。整个计算过程包括三维物体的定义、泊松方程的直接求解、材料次级效应的处理、空间电荷运动模拟等,可用于整星三维表面电位的计算,其典型的计算结果如图1-8所示。

POLAR(Potential of Large objects in the Auroral Region)是Phillips实验室开发的,用于极轨卫星在极区电子环境下的带电分析,主要包括对三维物体的定义、泊松方程的直接求解、空间电荷的传输以及表面带电的计算。POLAR所涉

及的物理效应包括等离子体尾迹与迎风、地磁场、鞘层与势垒结构、光电子与二次电子的产生与传输等。

ESCAPE 是 ESA 与莫斯科应用力学与电动力学研究所 (RIAME) 合作开发的“人为等离子体环境静电充电”软件,用于计算 GEO 轨道电推进等离子体引起的表面电荷和卫星电位变化。该软件的主要输入条件包括卫星的几何结构、表面材料性质、GEO 轨道环境

参数、推进器位置、羽流方向、粒子速度和电流密度分布等。输出结果包括充电电位和电场随时间的变化,各种粒子流密度随时间的变化,表面电位和电场强度的 3D 显示,电推进发射的电子和离子轨迹等。

俄罗斯克拉斯诺雅尔斯克国立技术大学宇宙物理实验室 (RLC. KSTU) 也开发了用于 GEO 卫星带电的动态三维模拟软件 (ECO - M),该软件可实现卫星在等离子体环境中带电的动态三维模拟。通过对卫星基本单元上表面电流、存储电荷和电压的迭代计算来达到动态模拟的目的。

随着对于空间等离子体与卫星之间相互作用的认识不断提高,国外开始研究新的仿真方法和模型去模拟和分析卫星与空间等离子体之间相互作用产生的效应,其中较为典型的是 PIC (Particle in Cell) 方法。PIC 方法是一种功能强大的数值计算方法,能够比较精确地模拟复杂的卫星结构与空间等离子体之间的相互作用。PIC 是一种微观的、精确的等离子体模拟方法,主要通过跟踪大量电子和离子在电磁场中的运动来描述等离子体的动力学行为。PIC 方法以动态的等离子体模型为基础,把等离子体当成是由一组宏观的运动粒子组成的网络,每个网格单元中包含不同数量的粒子,在 Euler 网格上定义场变量,用质点表征等离子体网格中的电荷,在 Euler 网格中配置离散的 Lagrange 质点,利用麦克斯韦方程求解质点的运动并计算通过网格边界的输运量,确定网格点的电荷密度、电流和等离子体宏观特性。因此利用 PIC 方法处理复杂的结构卫星与空间等离子体之间的相互作用时,也可以把待模拟的物体分解成许多网格单元,由此计算卫星表面电位分布和其周围电场的变化。PIC 仿真分析方法同其他同类数值方法相比,特别是在处理一些动态目标和特殊结构方面,具有独特的优势。所以 PIC 方法能精确动态的模拟空间等离子体对卫星的充电过程,符合现代复杂结构卫星与空间等离子体相互作用的仿真分析研究需求。

国外在 PIC 方法模拟卫星和空间等离子体相互作用方面开展了大量的工作,并在其开发的新一代卫星与等离子体相互作用分析软件中都采用了先进的 PIC 作为其数值模拟计算方法。1990 年,ESA/TOS - EMA 开发了 LEO/PEO 轨

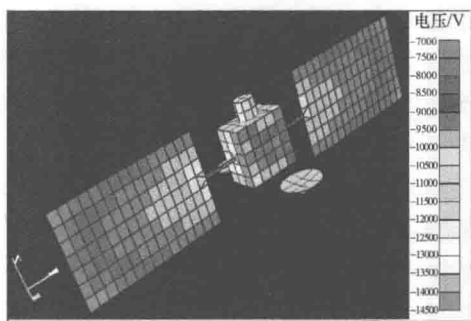


图 1-8 NASCAP2K 整星三维表面电位的计算结果

道的处理卫星与等离子体相互作用的软件,其中数值计算采用二维 PIC 方法。法国的 J - F. Roussel 利用 PIC 方法开发了 SILECS 软件,用于模拟分析 Rosetta 和 cometary 等离子体相互作用效应。奥地利国家研究中心采用三维单元粒子法分别对 Hall 和 Ion 等电推进器诱导产生的特殊空间等离子体环境与其相互作用效应进行了模拟分析。英国剑桥大学与空军研究实验室利用 PIC 方法研究航天器裸露电缆在空间等离子体环境中的电流收集作用。美国 Alabama 大学应用 PIC 数值计算方法对 SCHAWS 卫星进行了带电的仿真研究。PIC 方法最具代表性的应用成果是由欧洲 IRF - K/CNRS - UVSQ/CETP 和 ESA/TOS - EMA 共同开发研制的 PicUP3D/Spis 航天器等离子体相互作用模拟软件,它以三维 PIC 为基础,在航天器几何形状描述中使用了非结构图形,在场微商中使用了 Xapacitance - Matrix 方法,可用于航天器与等离子体相互作用的精确数值模拟计算。

2. 内带电效应仿真分析研究

ESA 在 20 世纪 80 年代开发了用于分析内带电的软件 ESABASS,该软件能计算在高能电子的辐照下,复杂卫星结构的介质材料产生的电场分布。在 20 世纪 90 年代,ESA 又研制了 ESADDC 内带电分析软件。

近几年,ESA 又研制了内带电分析软件 DICTAT,包括辐射诱导电导率、场致诱导电导率和环境温度因素的介质电导率的计算模型,可计算星内介质材料的充电电流、内部电场、表面电位和发生内带电所需的充电时间等参数。在 DICTAT 中,利用解析方程描述电子在屏蔽物上的运动和沉积,介质体最大电场根据欧姆定律和简单的电容器理论获得,通过计算得到的最大电场与一种 ESD 极限试验测试方法结果进行比较,判定结构是否会放电。该软件可对卫星空间内带电风险进行评估,目前已广泛应用于卫星工程设计中。

加拿大 Ottawa 国防研究中心开发了卫星电荷沉积三维分析软件 Builder。该软件采用蒙特卡洛方法计算电子在卫星星体内的穿透与沉积,其计算的电子在材料内穿透轨迹如图 1 - 9 所示,由简单的几何体实现卫星建模,内带电空间环境模型采用分段电子能谱,软件可实现材料内部电场强度的计算。该软件已应用于 STRV 等卫星的内带电分析工作。

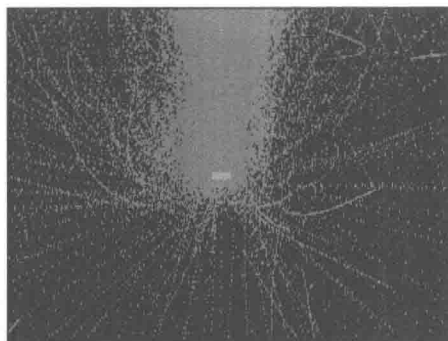


图 1 - 9 Builder 计算的电子在材料内穿透轨迹

这些软件发展较为完善,能处理三维的大型结构航天器,模拟的空间环境几乎包括了所有常见航天器经历的环境条件,软件本身自带了十几种常见的航天器表面材料的属性库。充电软件除了计算航天器的表面电位外,还能计算大型航天器的尾流结构、太阳能电池阵的电漏问题和航天器的浮动电位等。充