

空间碎片清除

Space Debris Removal

李怡勇 王卫杰 李智 陈勇 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

空间碎片清除

Space Debris Removal

李怡勇 王卫杰 李 智 陈 勇 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

空间碎片是人类航天活动的产物,是空间环境的主要污染源。主动清除空间碎片正成为国际社会新的研究热点,也是根治空间碎片的必然选择。本书全面介绍了空间碎片清除的背景知识、技术措施、任务设计和相关政策,具体内容包括空间碎片概述、空间碎片清除基础知识、推移离轨清除技术、增阻离轨清除技术、捕获离轨清除技术、服务后重用清除技术、自主离轨清除技术、空间碎片清除任务设计和法规政策与国际合作等。

本书适合于空间科学、空间技术、空间安全等领域的教学、科研和管理人员阅读,也可作为高等院校相关专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间碎片清除 / 李怡勇等编著. —北京:国防工业出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 118 - 09734 - 4

I. ①空… II. ①李… III. ①太空垃圾 - 垃圾
处理 IV. ①X738

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 236782 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 彩插 2 印张 14½ 字数 258 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 58.00 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

半个多世纪以来,空间技术取得了飞速发展和巨大成就,极大地影响和改变了人类生活。与此同时,人类的空间活动也制造了数以亿计的垃圾——空间碎片。这些碎片已经严重污染了空间环境,威胁着空间活动安全。早在20世纪七八十年代,卫星解体碎片的显著增加就引起了国际社会对此类问题的广泛关注。时至今日,人们已普遍认识到空间碎片是人类近地空间活动中面临的最大危险,它对在轨航天器和宇航员构成严重的甚至是灾难性的威胁。

为了应对空间碎片的威胁,人们已采取了航天器防护设计、轨道机动规避等被动防护手段,并制定了空间碎片减缓的相关措施。这些行动在一定程度上提高了航天活动的安全性,可以预防新空间碎片的产生,但这已不足以维持空间碎片环境的长期稳定。因此,必须采取主动的碎片清除措施,清除轨道上业已存在的空间碎片,彻底治理和保护空间环境。

目前,国际上针对空间碎片清除问题的广泛研究正在兴起。作者通过系统梳理和总结国内外相关学者的研究成果,并结合自身近年来的研究工作,编写了此书。包含的主要内容如下:一是阐述了空间碎片清除的实践背景和一些共性的基础知识,对应书中第1章、第2章;二是按照不同清除技术的内在原理对其进行了分类归纳与深入讨论,共分为推移离轨清除技术、增阻离轨清除技术、捕获离轨清除技术、服务后重用清除技术、自主离轨清除技术五大类,分别对应书中第3~7章;三是将理论技术与实际应用需求相结合,详细分析了空间碎片清除任务的设计,对应书中第8章;最后从法规政策与国际合作方面揭示了空间碎片清除活动中的非技术问题,对应书中第9章。

如果本书能够对空间碎片清除问题的解决起到抛砖引玉的作用,为人类的空间活动积累一点正能量,则慰藉之心足以。

本书编写过程中参考和引用了大量文献,本书的完成离不开这些文献作者的开创性工作,在此表示深深的谢意!同时本书编写过程中得到了装备学院各级领导的大力支持,在此表示衷心感谢。装备学院航天领域的沈怀荣、张雅声、李小将、邵琼玲、王盛军、王磊等老师和徐浩东、随昆明等研究生也付出了辛勤劳

动,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限、时间仓促,加之书中涉及内容较多,不足之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作者

2014年9月

目 录

第 1 章 空间碎片概述	1
1.1 空间碎片的现状	1
1.1.1 来源与分类	1
1.1.2 分布与演化	5
1.2 空间碎片的危害	8
1.2.1 危害根源及形式	8
1.2.2 在轨撞击实例	12
1.3 空间碎片的应对措施	13
1.3.1 躲避编目大碎片撞击的措施——规避	13
1.3.2 抵御众多小碎片撞击的措施——防护	14
1.3.3 预防新空间碎片产生的措施——减缓	15
1.3.4 治理已形成空间碎片的措施——清除	18
1.4 空间碎片清除研究现状	19
第 2 章 空间碎片清除基础知识	22
2.1 空间目标轨道运动学	22
2.1.1 坐标系统及其转换关系	22
2.1.2 轨道根数	26
2.1.3 轨道预报及误差	27
2.2 空间碎片探测	29
2.2.1 地基雷达观测	30
2.2.2 地基光学观测	31
2.2.3 天基遥感探测	33
2.2.4 天基碰撞感知探测	34
2.2.5 航天器表面采样分析	36
2.3 空间碎片环境描述	37
2.3.1 空间碎片编目数据及轨道预报	38
2.3.2 空间碎片环境模型	40

2.4	空间轨道机动	46
2.4.1	轨道机动类型和基本规律	46
2.4.2	轨道改变	48
2.4.3	空间交会	49
2.5	近地轨道空间碎片的自然演化	53
2.5.1	J_2 项摄动	53
2.5.2	大气阻力摄动	53
2.5.3	轨道寿命	55
第3章	推移离轨清除技术	57
3.1	激光推移离轨	57
3.1.1	基本原理和方式选择	57
3.1.2	地基激光推移空间碎片技术发展历程	59
3.1.3	地基激光推移离轨系统组成	60
3.1.4	地基激光推移离轨工作流程	61
3.1.5	地基激光推移离轨关键技术	62
3.1.6	地基激光推移离轨过程建模	67
3.2	离子束推移离轨	74
3.2.1	基本原理	74
3.2.2	离子束管控卫星	74
3.2.3	推进器的需求	76
3.2.4	等离子束的特性	76
3.2.5	转移到碎片上的动量	81
3.3	太阳帆推移离轨	82
3.3.1	基本原理	82
3.3.2	太阳帆的推力	83
3.3.3	太阳帆的特性	84
3.3.4	太阳帆结构与材料	85
3.3.5	太阳帆展开技术	86
3.3.6	技术试验演示验证	88
第4章	增阻离轨清除技术	92
4.1	膨胀泡沫增阻离轨	92
4.1.1	基本构想	92
4.1.2	泡沫分析选择	93
4.1.3	任务航天器设计	96

4.1.4	应用案例分析	98
4.2	静电力增阻离轨	104
4.2.1	基本概念	104
4.2.2	数学模型	104
4.2.3	原理实验	107
4.3	粉尘拦阻离轨	113
4.3.1	单颗碎片与人造粉尘的相互作用	113
4.3.2	考虑空间碎片密度时的作用效果	119
4.3.3	分析结论	124
第5章	捕获离轨清除技术	125
5.1	空间碎片捕获离轨方法概述	125
5.2	空间拖船捕获离轨	127
5.2.1	机械臂	127
5.2.2	Δv 预算	128
5.2.3	推进器	130
5.2.4	技术试验演示验证	130
5.3	空间绳系捕获离轨	136
5.3.1	基本工作模式	136
5.3.2	目标捕获装置	139
5.3.3	空间绳网系统组成与捕获过程	140
5.3.4	技术试验演示验证	143
5.3.5	典型空间绳系清除系统计划	145
5.4	容器收集器捕获离轨	148
5.4.1	容器收集器的技术特性	148
5.4.2	气凝胶收集器	149
5.4.3	LAD - C 实验系统	150
5.5	天基磁场发生器捕获离轨	152
第6章	服务后重用清除技术	153
6.1	在轨维修后重用	153
6.1.1	航天器维修性	154
6.1.2	在轨维修方式	155
6.1.3	在轨模块更换	156
6.1.4	技术试验演示验证	159
6.2	在轨加注后重用	160

6.2.1	在轨加注方式	161
6.2.2	技术试验演示验证	165
第7章	自主离轨清除技术	168
7.1	充气装置自主离轨	168
7.2	制动帆自主离轨	169
7.3	太阳帆自主离轨	170
第8章	空间碎片清除任务设计	171
8.1	任务需求分析	171
8.1.1	目标碎片筛选	171
8.1.2	降低现役航天器威胁	174
8.1.3	限制碎片数量增长	176
8.2	技术方案比较与评价	177
8.2.1	技术方案分类比较	178
8.2.2	技术方案综合评价	180
8.3	典型任务设计	182
8.3.1	碎片清除顺序	183
8.3.2	目标碎片的特性分析	184
8.3.3	清除方案总体构想	186
8.3.4	任务程序与步骤	187
8.3.5	地面测控任务	192
8.3.6	任务设计示例	193
第9章	法规政策与国际合作	198
9.1	法规政策	198
9.1.1	国际空间组织	198
9.1.2	国际空间法	200
9.1.3	国家空间政策	201
9.1.4	法规政策的困境	202
9.2	国际合作	206
9.2.1	开拓碎片清除市场	207
9.2.2	实现信息共享	208
9.2.3	完善空间法规政策	211
参考文献		214

第 1 章 空间碎片概述

20 世纪 60 年代初,随着人类空间时代的到来,人们开始关注航天器在空间的安全问题。发生在 1961 年的第一次严重的卫星解体事件使得当时地球空间物体数量瞬间增加了 4 倍。从此,地球空间有限区域内的航天活动安全问题就成为人们感兴趣和关注的课题。20 世纪七八十年代卫星解体碎片的显著增加引起了国际上对此类问题的广泛研究。目前,人们已普遍认识到空间碎片是人类近地空间活动中面临的最大危险,它对在轨航天器和宇航员构成严重的甚至是灾难性的威胁。

广义上的空间碎片可以分为微流星体 (Micrometeoroid) 和人造空间碎片 (Space/Orbital Debris) 两大类,一起并称为 M/OD 环境。其中,微流星体是指太阳系中自然存在的一类固体小颗粒,主要来源于彗星,少数来源于小行星,它们在太阳引力场的作用下,围绕太阳沿椭圆轨道运行,具有较高的速度,一般在 $3 \sim 90\text{km/s}$ 之间,平均速度为 $20\text{km/s}^{[1]}$ 。人造空间碎片是指近地空间中除去现役航天器以外的其他人造物体。联合国和平利用外层空间委员会 (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, COPUOS) 第 32 届会议上明确提出了人造空间碎片的定义:“空间碎片是指位于地球轨道或再入稠密大气层的、所有失效的并且没有理由指望其能继续保有或恢复其原定功能的人造物体及其碎片和零部件,无论是否可以确定这些物体的所有者。”^[2]人造空间碎片的速度虽然不及微流星体,但是在数量和质量上却远大于微流星体,并且由于人造空间碎片产生和运行的空间一般都是目前大部分航天器运行的区域,所以人造空间碎片对航天器造成的威胁远大于微流星体。当前对 M/OD 环境的研究,主要针对的是人造空间碎片,因此,本书研究的空间碎片也主要是指人造空间碎片。

1.1 空间碎片的现状

1.1.1 来源与分类

自从 1957 年苏联发射世界上第一颗人造地球卫星以来,地球上空的碎片数

量与日俱增,空间碎片总数已经超过 4000 万颗^[3]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)空间碎片项目办公室(Orbital Debris Program Office, ODPO)从 20 世纪 90 年代以来一直对空间碎片进行跟踪研究,按季度发行 *Orbital Debris Quarterly News*。美国 www.space-track.org (下文简称为 space-track) 网站定期发布空间监测网(Space Surveillance Net, SSN)所编目物体的空间态势报告(Space Situation Report, SSR),从中可以获取空间碎片的最新变化动态。SSR 主要包括 SSN 编目空间物体的数量、轨道参数和雷达横截面积(Radar Cross Section, RCS)等信息。目前 SSN 编目空间物体数量已近 17000 颗,其中 90% 为空间碎片,碎片特征尺寸的下限约为 10cm,未被 SSN 编目尺寸小于 10cm 的碎片更是难以估量。截至 2013 年 1 月,美国 SSN 编目在轨的空间物体数量如图 1-1 所示^[4],其中 90% 以上属于空间碎片。空间物体的总质量也已超过 600 万千克^[5] (6000t),如图 1-2 所示。目前,空间碎片的数量仍以每年约 5% 的速度在增长,它们不停地围绕地球高速运动,在地球周围形成了独特的空间环境。

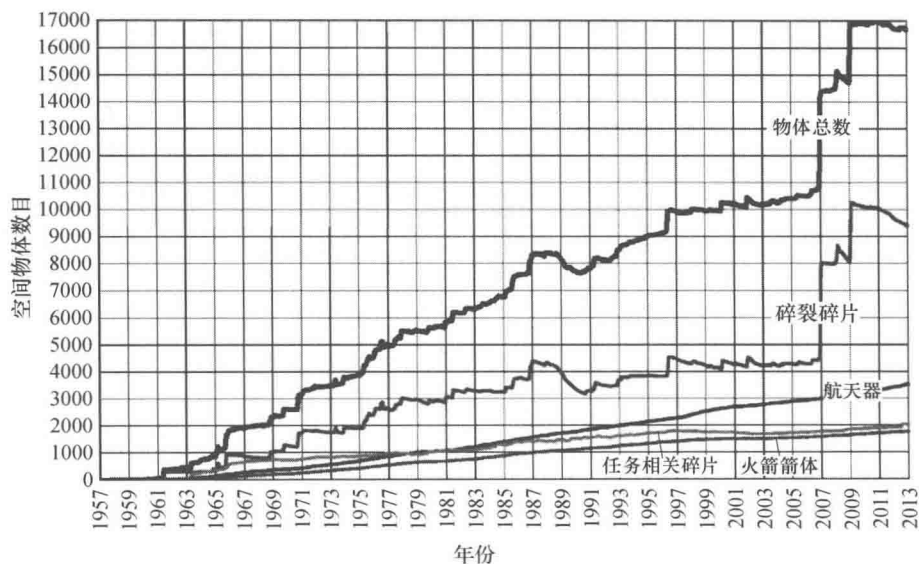


图 1-1 SSN 编目在轨空间物体的数量变化

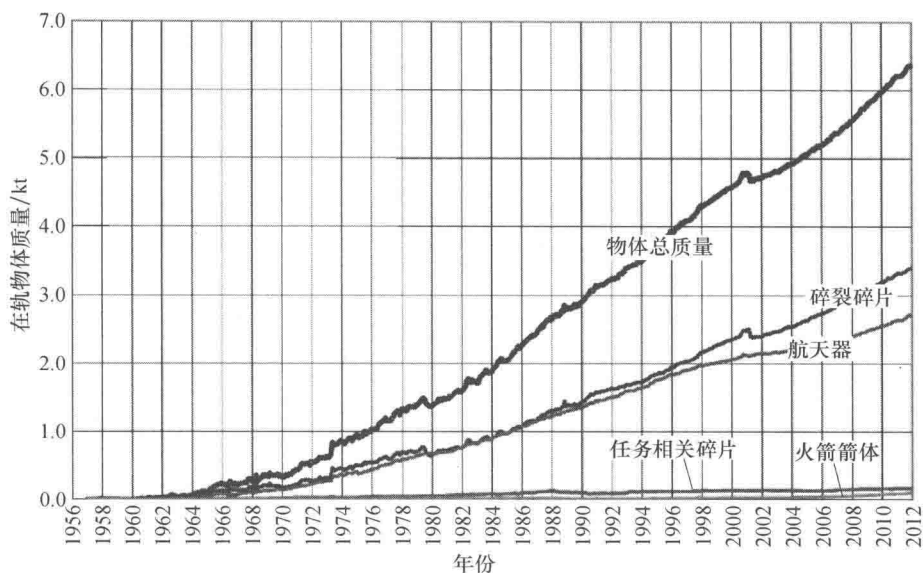


图 1-2 SSN 编目在轨空间物体的质量变化

空间碎片的来源包括火箭箭体、失效航天器、任务相关碎片及碎裂碎片。其中火箭箭体主要指星箭分离后的火箭上面级；失效航天器即过了服役寿命的航天器，目前在地球轨道运行的有上千个失效航天器；任务相关碎片是指在正常的航天活动中有意释放的物体，通常数量比较少；碎裂碎片是空间碎片的最主要来源，碎裂类型可以分为卫星解体 and 卫星异常事件^[6]。卫星解体泛指轨道载荷或者火箭箭体发生破坏性的分裂，解体喷射物通常具有很高的速度，解体原因可分为撞击和爆炸两种，解体行为可能是偶然的也可能是人为的，前者如推进系统故障引发的爆炸，后者如空间武器试验。卫星异常事件是指卫星保护层、太阳电池阵、热防护等卫星部件材料由于退化或遭受小粒子撞击而发生的意外剥落，剥落物体通常速度较低，同时卫星基本上仍保持完整。从一定角度看，卫星解体可视作人类活动对环境的一种影响，而卫星异常则可视作空间环境对人造物体的一种作用。

卫星解体是空间碎片最主要的来源，在 SSN 编目空间物体中，卫星解体碎片所占比重在 50% 以上。图 1-3 是 1960—2006 年间每年卫星解体次数的示意图，从图中可以看出，自 1975 年以后，每年至少有两次卫星解体事件发生。截至 2007 年 8 月 1 日，已经确认有 194 颗卫星发生解体，图 1-4 给出了其中产生碎片最多的 11 次解体事件的信息，包括解体卫星的国际编号以及在轨碎片的数量。

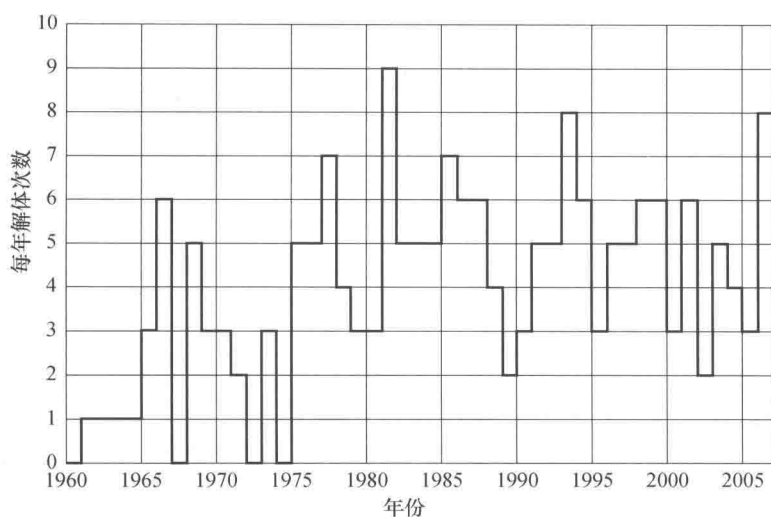


图 1-3 1960—2006 年间卫星每年解体次数

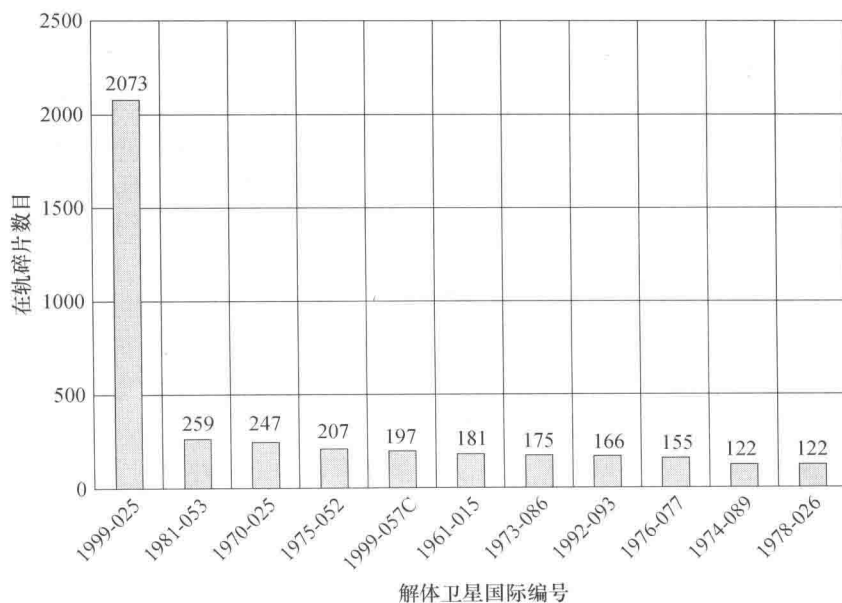


图 1-4 2007 年 8 月 1 日前产生碎片最多的 11 次卫星解体事件

空间碎片的尺寸大小差别极大,小的只有微米量级,大的可达数十米。按其尺寸大小可以分为三类^[3]。

(1) 大空间碎片,直径大于 10cm 的空间碎片,占空间碎片总质量的 99% 以上,主要来源是失效航天器、火箭上面级(火箭箭体),数量最大的还是发生爆炸和撞击的航天器和火箭箭体。

(2) 小空间碎片,直径小于 1mm 的空间碎片,数量巨大,全部是与飞行任务有关的物体(例如,从固体火箭发动机中排放的氧化铝颗粒)或分裂的碎片(破碎或者表面退化的产物)。

(3) 危险碎片,介于大、小空间碎片之间,主要是操作性碎片、爆炸解体碎片、撞击产物、表面剥落物等。对航天器的损坏能力比小空间碎片大,防护困难;数量比大空间碎片多,航天器躲避困难,是十分危险的碎片。

表 1-1 给出了三种碎片的尺寸、质量、数量等基本信息。空间碎片的主要成分是铝合金及铝、锌、钛等金属的氧化物,部分为航天员产生的含钠、钾成分的废物及电子产品产生的含铜、银等成分的碎片,平均密度约为 2.7 g/cm^3 。

表 1-1 空间碎片的基本信息

碎片分类	碎片尺寸	碎片数目	碎片质量	占总质量百分比
大空间碎片	>10cm	>16000	>1kg	>99.5%
危险碎片	1mm ~ 10cm	数百万	1mg ~ 1kg	<0.05%
小空间碎片	<1mm	巨大	<1mg	<0.01%

1.1.2 分布与演化

人类历史上发射入轨的航天器已超过 5500 个,其中绝大多数分布在高度 2000km 以下的低地轨道(Low Earth Orbit, LEO)和高度约 36000km 的地球同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)区域内。目前,这些人造物体有相当一部分仍滞留在地球轨道上,另有一些则或已重返大气层自行陨落、消失泯灭,或已脱离地球引力飞向深空。因此,从空间碎片轨道高度分布看,约 90% 的空间碎片分布在 LEO 区域内,其中又以高度约 800km 的太阳同步轨道(Sun - synchronous Orbit, SSO)区域分布最多、最密集,峰值也集中分布在 800km 轨道高度附近^[7]。图 1-5 是空间物体的分布示意图。

对于编目空间碎片,由于可以被跟踪编目,所以可以根据其编目数据定量描述其空间分布。截止到 2012 年 4 月 1 日,LEO 区域 SSN 编目物体分布密度随轨道高度变化情况如图 1-6 所示^[8]。图中红色柱状图表示在 2012 年 4 月 1 日 SSN 编目物体的空间密度分布。由图可见,高度低于 1000km 的轨道上物体的数量比 2007 年 1 月 1 日(图中蓝色柱状图)增加了一倍多,新增加的碎片主要来源于 2007 年的 1999-025A 卫星解体事件(在 850km 高度)和 2009 年的美、俄

卫星相撞事件(在 790km 高度)。在 LEO 轨道上,在 800km 左右空间碎片的密度最大,主要原因是载荷为光学相机和雷达的卫星多在此高度上,而轨道高度低的卫星由于大气阻力大部分都坠入大气层;在 1400km 左右的高度上有一个第二极大值,因为这个高度适合于海事卫星和低轨的通信卫星,如美国的 Globalstar 星座和苏联的通信和导航星座等。

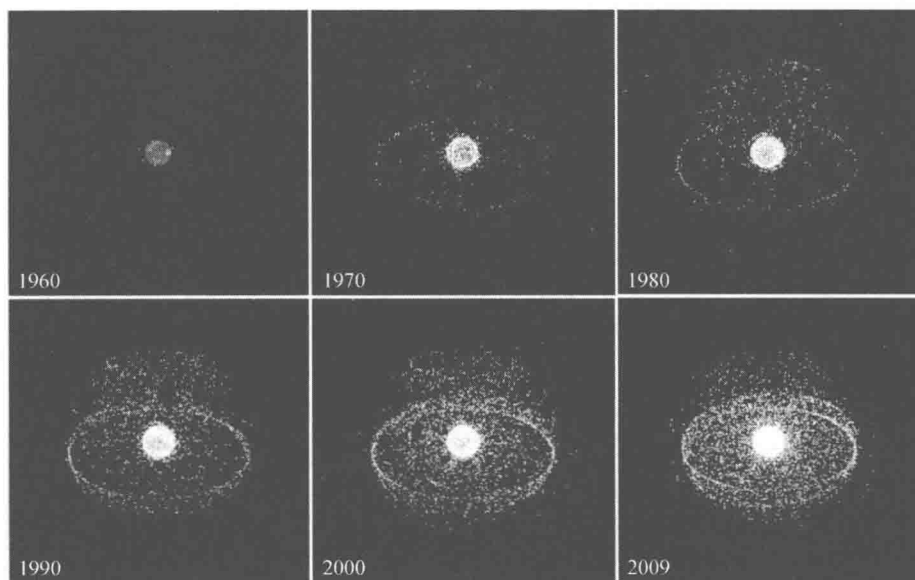


图 1-5 空间物体分布示意图

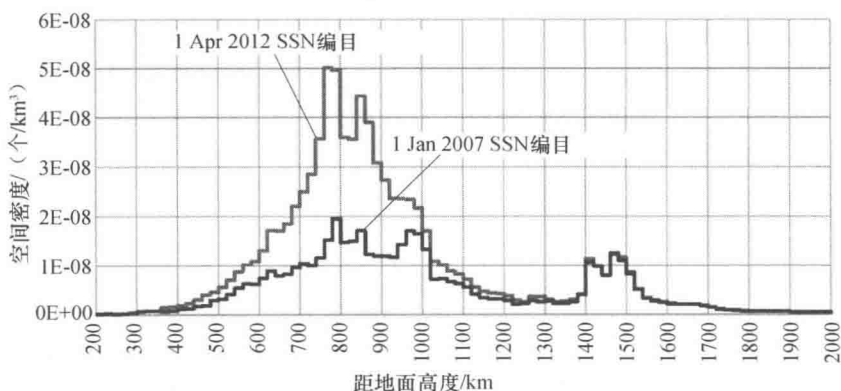


图 1-6 LEO 区域 SSN 编目物体分布密度随轨道高度变化情况(彩色版本见彩图)

(注: $E-08 = 10^{-8}$)

GEO 区域 SSN 编目物体分布密度随轨道高度变化情况如图 1-7 所示。与图 1-6 比较可得以下结论:

(1) 在 GEO 轨道上空间物体的密度曲线随高度的变化没有 LEO 上那么明显(图 1-7 中数据主要是在 GEO 轨道附近,轨道倾角小于 15° 的空间物体)。

(2) LEO 轨道上的空间物体的密度约为 10^{-8} 量级, GEO 轨道上的空间密度从 $10^{-11} \sim 10^{-9}$ 变化。从数量的分析上可以知道相对于 GEO 轨道,空间物体更多地集中在 LEO 轨道上。

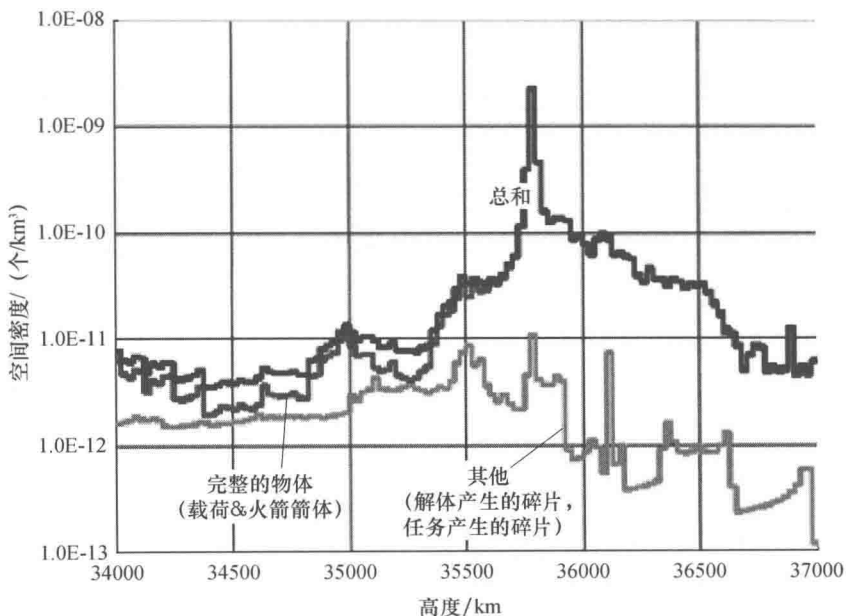


图 1-7 GEO 区域 SSN 编目物体分布密度随轨道高度变化情况

(注: $E-x=10^{-x}$)

虽然通过天基和地基观测网已经获得了有关编目物体的大量数据,但编目物体中的碎片仅代表了空间碎片的一小部分,对未编目碎片数量的估计是由模型的外推和有限的几次轨道探测结果的综合分析获得的。因此,整个碎片数量的任何估计都是不确定的,随着碎片的演化和获得的数据不断变化。

空间碎片的演化机制与过程如图 1-8 所示。航天发射活动在把航天器送入预定轨道的同时,会产生大量的尺寸比较大的空间碎片,如空燃料箱、有效载荷的整流罩、分离装置、自选装置等。完成任务的运载火箭的上面级、寿命到期的航天器是重要的空间碎片源,由于它们具有很大的能量,一旦发生解体会产生大量碎片。非解体事件是小空间碎片的主要来源,固体火箭燃烧剂的燃烧产物、

从航天器表面脱落的油漆涂层以及冷却剂泄漏产生的小液滴都可以归入非解体事件产物的范畴。由于受到各种衰减因素的影响,空间碎片生成后将处于不断演化变动之中。在高密度区域碎片间的二次碰撞会导致大碎片数目的减少、小碎片数目的激增;同时各种自然的摄动力会导致碎片云的轨道倾角发生变动、近地点高度逐渐降低,最终返回地球大气层中被烧毁、湮灭。在低于 900km 的轨道上,大气阻力的影响非常显著;由于小空间碎片一般都有比较大的面积质量比,所以在高轨道上对小碎片演化起决定性作用的是太阳光压的影响。

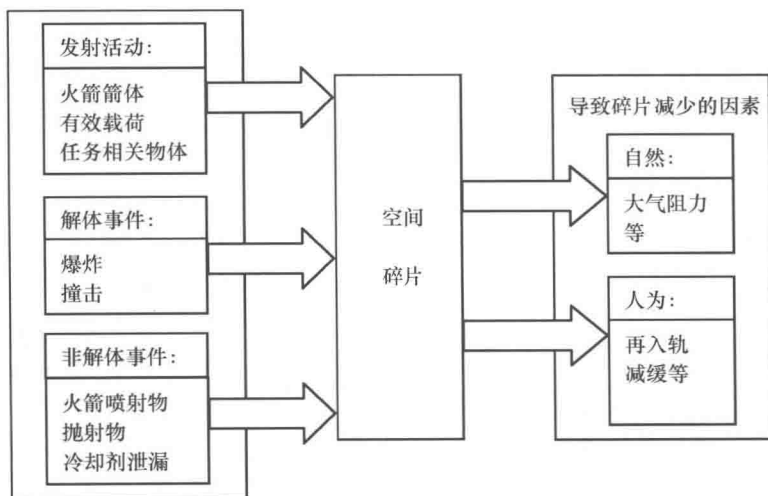


图 1-8 空间碎片的演化示意图

1.2 空间碎片的危害

空间碎片对于航天器的危害主要是由空间碎片撞击时的巨大动能引起的。由于空间碎片的来源和演变进程不同,所以空间碎片在地球轨道上并非均匀分布,具有一定的空间分布特性;同时引起空间碎片的尺寸、质量及速度的不同,使其与空间目标相撞时具有不同的撞击能量,会产生不同的危害。

1.2.1 危害根源及形式

假设空间碎片的质量是 m , 撞击速度是 v , 则其能量为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-1)$$

可见,其毁伤作用与速度的平方成正比。也就是说,一个子弹大的空间碎片,当