



Springer航天技术译丛

空间碎片 ——模型与风险分析

北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译

[德] Heiner Klinkrad 著

钱卫平 译

陈 磊 审校



清华大学出版社

Springer航天技术译丛

空间碎片 ——模型与风险分析

北京跟踪与通信技术研究所 组织翻译

[德] Heiner Klinkrad 著

钱卫平 译

清华大学出版社
北京

Translation from the English language edition:

Space Debris—Models and Risk Analysis, 1st Edition by Heiner Klinkrad

ISBN 3-540-25448-X

Copyright © Springer 2006

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2010-2108

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

空间碎片:模型与风险分析/(德)克林克瑞德(Klinkrad, H.)著;钱卫平译. —北京:清华大学出版社, 2012. 12

(Springer 航天技术译丛)

书名原文: Space Debris—Models and Risk Analysis

ISBN 978-7-302-30010-6

I. ①空… II. ①克… ②钱… III. ①外层空间—残骸分析—研究 IV. ①V445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 211383 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:李海涛

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, cservice@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京雅昌彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:25.5 插 页:8 字 数:442 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:79.00 元

产品编号:034830-01

Springer 航天技术译丛

编译委员会

主 任 钱卫平

委 员 董光亮 朱天林 吴正容

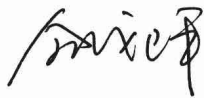
孙 威 李海涛

近年来,空间探索正在成为人类探索自然最为关注的领域之一。随着航天技术的飞速发展,人类探索活动的范围已经从近地球空间延伸到太阳系内广大的行星际空间,并将向更加深远的宇宙空间扩展。中国作为一个已经掌握了载人航天与月球探测技术的航天大国,必将持续不断地开展空间探索和空间应用活动,为拓展人类生存空间,为实现中华民族的伟大复兴不断前行。

在这一领域,世界领先的学术出版公司 Springer 出版了“空间探索丛书”等一大批优秀图书,涵盖了近地空间、地月空间、行星际空间以及载人航天等自人类开展空间探索活动以来的多个领域。内容涉及阿波罗登月任务、载人火星探测任务,以及空间碎片监视等多个方向。这些图书不但总结了人类航天任务中的成功经验,还从理论上系统研究并探索了未来的航天技术,必将会对我国从事航天领域工作的科研和管理人员提供有益的帮助。

北京跟踪与通信技术研究所作作为我国航天测控领域的技术总体单位,始终致力于开展空间信息技术的研究与应用。这套“Springer 航天技术译丛”,是我所组织相关领域专家,在结合我国未来航天工程发展需求的基础上,主要侧重于空间信息技术领域,仔细甄别精选、精心翻译审校而成的。希望这套丛书的出版能够为我国空间信息技术领域广大科技工作者的科研与工程实践提供参考与指导。

北京跟踪与通信技术研究所作



2011 年 11 月

随着人类航天活动的日益频繁,空间碎片数量快速增长,将对人类航天活动构成越来越大的影响。近几年发生的空间目标碰撞事件表明,空间碎片对航天器的在轨安全构成严重威胁,已经成为全世界关注的重要环境问题。我国是世界航天大国,通过空间碎片碰撞预警与规避,保障航天器的在轨安全,受到航天科技界的高度关注。我国 1995 年加入联合国机构间空间碎片协调委员会(IADC),2000 年启动了“空间碎片行动计划”,在空间碎片监测预警、空间碎片减缓和空间碎片防护等领域开展了卓有成效的工作。北京跟踪与通信技术研究所联合国内各相关单位,在载人航天任务中成功开展了空间碎片碰撞预警工作。

《空间碎片——模型与风险分析》(*Space Debris—Models and Risk Analysis*)一书由美国 Springer 出版社和英国 Praxis 出版社于 2006 年联合出版。作者 Heiner Klinkrad 博士是欧洲航天局(ESA)空间碎片办公室主任,同时担任机构间空间碎片协调委员会(IADC)ESA 代表团团长、欧洲空间碎片协调组 ESA 代表团团长、国际标准化组织(ISO)轨道碎片协调工作组成员、*Space Debris* 杂志编委会委员。Klinkrad 博士从事空间碎片研究近 20 年,是欧洲空间碎片研究和应用的领导者,是国际上空间碎片领域的权威之一,有着非常深厚的理论基础和丰富的工程经验。该书从空间碎片环境及来源、空间碎片模型、减缓措施、超高速碰撞评估和防护、碰撞预警与规避机动、再入预报与风险评估、微流星体等各个方面全面介绍了空间碎片相关知识和研究成果,具有重要的理论和工程价值。

本书翻译过程中,北京跟踪与通信技术研究所王东亚、黄建余、李元新、马超伟、郝世峰、陈文丽等同志提供了大力支持和帮助,国防科学技术大学白显宗、黎克波、张力、杨洋、郝嘉、张涛涛、曹玉辉等同志做了大量基础性工作,译者在此一并表示感谢。

本书可供从事空间碎片监测预警、航天器设计、空间环境研究的科研人

空间碎片——模型与风险分析

员和工程设计人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生的教材,还可作为广大航天爱好者的参考读物。

由于译者的学识和水平有限,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正,译者将不胜感激。

译 者

2012 年 10 月于北京航天城

序 言

大多数同行都通过正门进入航天飞行的庄严殿堂,追随一代代卓越先驱者的步伐,努力构想并实现新的开拓性空间任务。由于我研究的是航天飞行的残余物(有时被不尊重地称为太空垃圾),所以是从一条小道通过后门进入了这个殿堂。1978年我参与了装备核反应堆的宇宙-954卫星的再入评估,该卫星将放射性碎片散布到加拿大境内。当时约有6000个可跟踪目标在轨运行,其中超过90%是空间碎片。空间碎片是无用的空间目标,不仅包括废弃的火箭轨道级、失效的卫星、正常任务中释放的小部件以及有意或无意的在轨爆炸产生的解体碎片,还包括一些有趣的`空间活动残余物,如宇航员的手套或螺丝刀。20世纪60年代开始空间碎片的数量持续增加,到2005年14000多个直径大于10 cm的空间目标被跟踪编目,其中只有不到5%是正常工作的航天器。当前空间碎片已占在轨人造目标的绝大多数。心中放着这些数字,并在该领域研究了近20年,我感到现在是写一本关于空间碎片的书的时候了。

本书从构想到成稿用了几年时间。不仅空间碎片环境,对空间碎片的研究活动也处在高度动态的演化过程中。因此,关于空间碎片的书在写作的过程中有可能前后不一致不协调,等到出版时可能已经过时。我想通过提供2002年左右空间碎片态势的特定景象来减小这种可能,同时推导和给出更具持久性和生命力的理论。

本书由作者单独撰写,然而在很多章节中体现了一些同事的研究贡献,引用和致谢不能完全反映这些贡献。在这种情况下,这些同事的名字在章标题中被列为贡献作者。

本书并不是第一本关于空间碎片的著作,也不会是最后一本。可能有很多不同的方法选择材料、组织材料、引用相关工作。本书中看到的是个人主观的或带有无意偏见的表述。本书基于我在欧洲航天局(ESA)工作的25年中收集的信息,其中有20年在德国达姆施塔特市的欧洲空间操作中心(ESOC)。是ESOC的科研环境以及与ESA、欧洲和国际空间碎片机构同行的专业的或私人的交流使得本书的出版成为可能。首先,我要感谢

Walter Flury 的工作,他从 20 世纪 80 年代开始领导 ESA 的空间碎片研究,他的专注和热情推进了 ESA 和欧洲的空间碎片研究,发展了欧洲空间碎片技术,现在已经达到了国际公认的水平。

本书的内容主要关注欧洲的空间碎片研究活动,尤其是由 ESA 领导或参与执行的活动。然而本书中所表达的观点是作者个人的,并不一定反映 ESA 的观点。书中可能有不一致或错误的信息,由作者个人负全责。

书中给出的主题依据我从 2001 年开始给航空航天工程研究生上的课程“空间碎片”的大纲。我尽量保留了各章节的技术细节,使得本书可用于研究生层次的教学使用。本书中没有包括教学应用中实用的课后习题,在以后的版本中可能会给出。

我要感谢 Praxis 和 Springer 出版公司出版人员的耐心和建设性意见,以及在书稿准备和最终排版过程中的指导。本书采用 Latex 软件排版,贡献作者之一的 Clare Martin 专门设计了相应的 Latex 模板文件。除了各位贡献作者,我还要感谢 Ludger Leushacke、Thomas Schildknecht、Frank Schafer、Michael Oswald、Sebastian Stabroth、Gerhard Drolshagen、Michel Lambert、Markus Landgraf、Cristina Hernandez、Inigo Mascaraque、Santiago Llorente、Dorothea Danesy 和 Tom Mohr 的支持、贡献或编辑意见。还有很多没有提到的需要感谢的人,向你们表示歉意。

最后,也是最重要的,我要感谢我的妻子 Angelika 对我的容忍和一如既往的支持。

Heiner Klinkrad

2005 年 7 月于塞海姆-尤根海姆



录

第 1 章 绪论	1
1.1 空间碎片研究历史	1
1.2 本书阅读指南	4
参考文献	4
第 2 章 当前空间碎片环境及其来源	5
2.1 发射历史及其对轨道环境的影响	5
2.2 历史上的在轨解体事件	18
2.3 非解体性空间碎片源	23
2.4 地基雷达和光学测量	28
2.5 在轨测量和回收表面	46
参考文献	56
第 3 章 当前空间碎片环境模型	58
3.1 目标群的轨道传播理论	58
3.2 体积离散化和体元经过事件	59
3.3 可跟踪的空间目标集合	64
3.4 爆炸和碰撞碎片建模	65
3.5 固体火箭发动机熔渣和粉尘建模	73
3.6 钠钾冷却剂液滴建模	79
3.7 “韦斯特福德针簇”建模	82
3.8 表面退化和碰撞喷出物建模	83
3.9 碎片的历史演变和空间分布	87
3.10 测量和模型数据的比较	99
3.11 空间碎片环境模型	106
参考文献	107

第 4 章 当前空间碎片环境的碰撞流量建模	110
4.1 碰撞流量的计算	110
4.2 碰撞几何分析	113
4.3 典型目标轨道的碰撞流量估计	116
参考文献	136
第 5 章 未来空间碎片环境建模	137
5.1 长期预测的轨道传播算法	137
5.2 长期碎片环境预测策略	138
5.3 未来发射和释放事件建模	139
5.4 星座和小卫星的部署	141
5.5 “一切正常”预报场景的定义	145
5.6 “一切正常”情况的变化	152
5.7 可选的碎片环境规划模型	153
参考文献	155
第 6 章 空间碎片减缓措施对环境的影响	157
6.1 空间碎片减缓措施	157
6.2 通过任务后钝化防止在轨爆炸	159
6.3 LEO 目标的任务后处理	162
6.4 GEO 目标的任务后处理	173
6.5 GTO 上面级的离轨	179
6.6 保护区域的确定	182
参考文献	186
第 7 章 超高速碰撞损伤评估和防护技术	188
7.1 超高速加速器和爆炸流体力学模拟	188
7.2 超高速碰撞效果	192
7.3 单壁损伤方程	193
7.4 多壁损伤方程	196
7.5 HVI 防护层设计与应用	199
参考文献	201
第 8 章 编目目标的碰撞预警与规避机动	202
8.1 轨道预报及其不确定性	202

8.2 接近事件的确定	205
8.3 接近事件的碰撞风险评估	208
8.4 规避机动频率的统计预报	212
8.5 运行卫星的规避机动	218
参考文献	225
第 9 章 再入预报与地面风险评估	227
9.1 历史上的危险再入事件	227
9.2 中长期再入预测	230
9.3 短期再入预测	235
9.4 再入目标解体 and 残存的预测	240
9.5 再入事件对地面的风险评估	249
9.6 长期和短期的再入风险管理	255
9.7 危险再入材料	266
参考文献	268
第 10 章 地球流星体环境建模	270
10.1 狄怀恩-史塔贝克(DIVINE-STAUACH)流星体模型 ..	270
10.2 典型目标轨道流星体通量估计	274
10.3 流星体流事件建模	276
10.4 近地目标及其风险	283
参考文献	291
第 11 章 国际背景下的空间碎片行动	292
11.1 国际信息交换论坛	292
11.2 技术层面的国际合作	293
11.3 国际标准和政策	293
参考文献	294
结语	295
附录 A 轨道力学基础	296
A.1 开普勒轨道	296
A.2 平面轨道机动	299
A.3 地球形状及其测量参数	300

A. 4	地球轨道的主要摄动	300
A. 5	牛顿摄动方程	302
A. 6	高斯摄动方程	303
A. 7	拉格朗日摄动方程	304
A. 8	摄动方程积分	304
A. 9	地球轨道上的摄动	306
	参考文献	308
附录 B	地球大气	309
B. 1	(大气)热层模型构成	309
B. 2	热层模型实现	318
B. 3	太阳和地磁活动	320
	参考文献	326
附录 C	地球引力势	328
C. 1	引力势的数学表达	328
C. 2	引力势谐波系数	330
	参考文献	332
附录 D	从轨道视点分析世界人口	333
D. 1	世界人口密度分布模型	333
D. 2	沿地面轨迹的人口采样	334
	参考文献	346
附录 E	中英文名词对照表	347
附录 F	缩略词表	377
	参考文献综合	385

绪 论

H. Klinkrad

我们似乎生活在危险的时刻,在空间飘荡;没有人知道我们什么时候开始,或者已经在这场竞赛中走了多远。

——本杰明·富兰克林

1.1 空间碎片研究历史

1961年6月29日,美国搭载着子午仪-4A卫星的雷神火箭从肯尼迪航天中心发射升空。该卫星部署在881~998 km高度之间的轨道,轨道倾角为 66.8° 。美国空军第一空间控制中队对子午仪-4A卫星进行编目,它是1957年10月4日第一颗人造卫星(Sputnik-1)发射之后的第116个空间目标。6月29日06:08:10,在子午仪-4A和另外两个有效载荷分离入轨后的第77分钟,雷神火箭的上面级发生了爆炸,净质量为625 kg的箭体分解为至少298块可跟踪碎片,其中近200块40年后仍然在轨运行。这是历史上第一次在轨解体事件,它使可观测人造空间目标的数量增加了近3.5倍(Portree和Loftus,1993)。从此,空间碎片开始占可观测空间目标的大多数,在轨解体事件是其最大的来源。

“空间碎片”(space debris)和“轨道碎片”(orbital debris)经常作为同义词使用,机构间空间碎片协调委员会(IADC)对它的定义是:“空间碎片是指所有在轨运行或再入大气层的无法继续工作的人造物体(anon, 2002a)。”根据该定义,在雷神火箭发生爆炸之前已经有近46.5%的编目目标是空间碎片,例如完成任务的火箭上面级和任务过程中释放的碎片(不包含失效的卫星)。

随着人类航天活动的增加,空间碎片环境日益恶化。1964年8月第一颗地球静止轨道人造卫星辛柯姆3号发射入轨。从那时起,在地球静止轨道(GEO)附近部署了超过800个空间目标。在辛柯姆3号发射入轨14年

之后即 1978 年 6 月,地球静止轨道区域发生了第一次航天器解体事件。1979 年鲁伯斯·佩里克发表了“空间活动与外层空间”论文,首次提出空间碎片减缓措施,包括地球静止轨道航天器在任务结束后变轨到更高的“坟墓轨道”等(Portree 和 Loftus, 1993)。这些措施在今天仍然很有意义。

低地轨道(LEO)区域是航天技术的主要试验区。1965 年 10 月低地轨道区域第一次发生人为航天器解体事件,宇宙-50 侦察卫星在任务失败后被引爆。1968 年 10 月,宇宙-249 作为第一个反卫星武器(ASAT),在与宇宙-248 交会过程中利用自爆产生的碎片击毁了目标卫星。一些分析人士认为 20 世纪 70 年代空间碎片数目的激增是由于一系列类似的反卫星试验造成的。但是依据约翰·加伯德设计的新的分析方法,以及唐纳德·凯斯勒基于北美防空司令部(NORAD)空间目标编目数据的分析,表明 1975 年 5 月到 1981 年 1 月 9 个德尔塔火箭二级的爆炸是空间碎片数目增加的主要原因,截至 1981 年这些爆炸产生的碎片占空间目标总编目数的 27%(Portree 和 Loftus, 1993)。火箭制造商在找到爆炸原因后对火箭进行了改进,此后再没有发生过德尔塔火箭二级爆炸事件。这可以看作空间碎片减缓措施的第一次有效实施。

1977 年唐纳德·凯斯勒和伯顿·考尔帕拉斯预言人造轨道碎片将很快超过自然微流星体成为低地轨道区域航天器碰撞风险的主要来源。一年以后,两人发表了论文《人造卫星的碰撞频率:碎片带的产生》。他们断言在几十年内在轨碰撞将成为新的空间碎片的主要来源(Portree 和 Loftus, 1993)。1990 年唐纳德·凯斯勒在论文《链式碰撞:LEO 航天器数量的极限》中对该问题进行了进一步的研究,当某一轨道高度的空间碎片密度达到一个临界值时,碎片之间的链式碰撞过程将会造成轨道资源的永久破坏(后来称之为“凯斯勒综合症”)。这样的链式碰撞过程,一旦产生高级阶段将无法停止,最终会造成相应高度的碎片壳,对航天器安全造成长期威胁。该论文发表七年后的 1996 年 7 月,发生了第一次编目目标碰撞事件,塞赖斯卫星的重力梯度稳定杆被阿丽亚娜火箭上面级于 1986 年 11 月爆炸产生的一块碎片击断。

1971 年礼炮 1 号(Salyut-1)空间站进行了首次任务,为人类在空间长期生存铺平了道路。1973 年礼炮 2 号和天空实验室(Skylab)发射入轨以后至少有一个空间站在轨运行。这些早期的空间站都是一定时期(几个月)内有人照料的。1989 年礼炮 7 号与和平号空间站(MIR)投入运行,人类开始在空间不间断生存。1981 年美国哥伦比亚号(Columbia)航天飞机发射,尽管每次任务时间不超过 17 天,美国航天飞机计划也为人类在太空活动提

供了场所。1998年年底,国际空间站(ISS)的第一个模块发射入轨并在轨组装。自2001年年底开始国际空间站内一直有航天员。在国际空间站和航天飞机的设计和运行中,空间碎片都是非常重要的因素。国际空间站的乘员舱具有加固的防护层,可以防护1 cm以下的空间碎片和微流星体的撞击。该防护层的设计基于1947年弗雷德·惠普尔提出的多层设计原理。20世纪80年代早期,这种防护层在实验室经过超高速撞击测试,所使用的高性能加速器可以将1 cm大的物体加速到轨道速度,撞击释放的能量相当于一枚手榴弹爆炸的能量。

1986年1月挑战者号航天飞机发生事故之后,航天飞机建立了一套飞行规则,形成了对可跟踪空间目标进行碰撞预警的程序,现在的国际空间站也有类似的程序。平均来讲航天飞机每3个月、国际空间站每1年就要进行一次碰撞规避机动。

空间碎片在概念上还包括被地球大气层捕获的再入空间目标。所有编目空间目标的66%已经陨落,其中大多数在再入大气层时由于气动加热被焚烧。但有少数目标会对人类构成威胁,如有的到达地面时尚未烧尽就撞击地面,有的在再入过程中释放危险物质。历史上第一次危险再入目标属于后一类。1964年4月,子午仪5BN-3卫星发射失败后在印度洋上空再入,有1 kg钚从其核辅助动力系统(SNAP-9A)中泄漏到大气层内。1978年1月,装备了核反应堆的宇宙-954卫星在发射3个月之后于加拿大上空无控再入,反应堆的碎片和30 kg放射性铀分散到1000 km长的区域内。这次事故导致了1972年联合国通过的《责任公约》的首次使用,加拿大得到了600万美元的赔偿。这次事件也促使联合国开始起草《联合国关于在空间使用核能的原则》(anon., 2002b)。1983年1月同样装备核反应堆的宇宙-1402卫星在南大西洋上空再入大气层,没有对环境造成破坏。从那时起再没有出现具有核材料的危险再入目标,然而却又有了由于质量太大所产生的碎片对地球上居民造成危险的再入目标。例如天空实验室,质量为74 t,1979年7月在印度洋和澳大利亚上空再入;礼炮7号空间站,质量为40 t,1991年2月在南美洲上空再入。

以上对空间碎片研究历史的简单回顾涉及各种技术方面的问题及其解决方法,也分析了空间碎片来源以及它们对空间碎片环境的长期影响。20世纪70年代只有少数的科学家和工程师意识到空间碎片问题,通过他们长期坚持不懈的努力,如今该问题已经得到科学界的普遍重视。作者希望通过对他们工作的总结来激发读者的兴趣,以学习更多关于空间碎片的理论知识。

1.2 本书阅读指南

本书以下各章基本上自成体系,每章有独立的参考文献以及公式、图表、注释的编号体系。全书或部分章节共有的内容编为附录、符号表、缩略语表,最后是全书索引。

刚涉足空间碎片领域的读者应当按顺序阅读第2~6章,该部分内容主要介绍了基于观测数据的当前空间碎片特性、不同来源的空间碎片如何建模、将来如何发展变化、减缓措施对其有哪些积极的影响。其间可随时参考阅读附录A~C,主要包括轨道力学基础知识、地球大气基本信息以及引力势。第7~9章按照一定的逻辑关系排列,但也可以按任意顺序单独学习。这部分内容主要从在轨防护、碰撞预警和再入风险管理的角度介绍了空间碎片风险评估和风险防范方面的知识。附录D给出了地球人口分布的模型与数据,可以作为风险问题的参考。第10章总结了全书的技术问题,并简单介绍了自然微流星体碰撞问题,及其对航天器和地球上居民的威胁。最后,第11章在国际层次讨论了空间碎片研究以及空间政策和标准问题。

参考文献

- anon. (2002a). *IADC Space Debris Mitigation Guidelines*. issue 1, rev. 1.
- anon. (2002b). *United Nations Treaties and Principles on Outer Space*. United Nations publications, Vienna, Austria.
- Portree, D. and Loftus, J. (1993). *Orbital Debris and Near-Earth Environmental Management: A Chronology*. Technical Report 1320, NASA Reference Publication.