

【美】

杨开忠 译

空间碎片 与其他外太空威胁

Space Debris and Other Threats
from Outer Space



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer

空间碎片与其他外太空威胁

Space Debris and Other Threats from Outer Space

[美]约瑟夫·N·佩尔顿 著

杨开忠 译

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了可能对人类空间活动带来不同威胁的空间碎片和各种空间自然现象,阐述了消除减轻这些威胁可以采取的技术、经济和管理方面的思路和方法,并就未来应对外太空安全威胁的问题提出了战略性的思考。

本书可供从事航天工程分析设计、系统运行管理以及空间任务操作的研究人员和技术人员参考,也可以作为大专院校相关专业高年级本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

空间碎片与其他外太空威胁/(美)约瑟夫·N.佩尔顿
(Joseph N. Pelton)著;杨开忠译. —北京:国防工业出版社,
2017.10

书名原文:Space Debris and Other Threats from Outer Space
ISBN 978-7-118-11334-1

I. ①空… II. ①约… ②杨… 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(2017)第232386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印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 3 $\frac{3}{4}$ 字数 80千字

2017年10月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价46.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着人类开发利用外太空的活动不断增多,空间碎片与其他外太空威胁已经成为我们难以回避的现实问题,需要我们严肃对待、深入研究,并采取有效的应对措施,以确保人类空间活动的安全。《Space Debris and Other Threats from Outer Space》一书是由国际空间安全推进协会(IAASS)执行委员会成员兼学术委员会主席约瑟夫·N·佩尔顿著。

本书综合阐述了可能对人类空间活动带来不同威胁的空间碎片和各种空间自然现象,以及当前人们对这些问题理解认知的基本状况,提出了应对这些威胁所涉及的跨领域多学科的观点,并探讨了消除减轻这些威胁可以采取的技术、经济和管理方面的策略和方法。本书深入浅出,简明扼要,可以帮助人们较全面地了解人类所面临的太空威胁的基本问题,增强对保护人类空间活动和生存安全的认识。

本书在翻译和成稿过程中,得到宇航动力学国家重点实验室专家同仁的支持和帮助,韩民章、李少敏、郭荣、辛蕾、李淑兰参与了翻译校对工作,张荣之、魏峻、马鑫等提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限,书中难免有纰漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2016年10月

· III ·

目 录

第一章	来自外太空的严峻威胁	1
第二章	空间碎片威胁与凯斯勒综合症	22
第三章	空间碎片问题的解决途径	31
第四章	谁来解决轨道碎片问题?	39
第五章	碎片移除与减缓技术	44
第六章	来自空间天气的威胁	54
第七章	空间辐射、臭氧层和其他空间环境问题	62
第八章	近地天体、彗星、小行星、火流星和流星	70
第九章	应对彗星和潜在危险小行星	78
第十章	关于外太空威胁的十大思考	82
缩略语和主要术语		94
参考文献		96
关于作者		99

第一章 来自外太空的严峻威胁

我们思考问题的出发点……必须立足于科学探索的广袤新空间……以及浩瀚无际的外太空。

阿德莱·史蒂文森(1965年在哈佛大学的演讲)

太空威胁对我们最大的影响

你是否担心会被从天而降的空间垃圾击中? 其实,这完全是杞人忧天,因为地球上生物被轨道碎片或陨石击中的概率极小。打个比方,它比患有世界上最罕见疾病的概率还要小,也比在热带景区一小时游览时被突然掉落的椰子砸中的概率要小得多。在长达半个多世纪的空间活动中,似乎只有非洲发生过一起空间碎片砸中奶牛的事件,而且那也是几十年前的事了。最近的此类报道发生在1997年,据悉一名妇女被陨落的微小碎片擦伤到肩部。

虽然太空碎片击中人类的概率微乎其微,但此书仍然值得大家仔细阅读,从而探索来自空间碎片与其他外太空的威胁。实际上,对人类来说,太空威胁已愈加严峻,人们应清醒面对并制定消除威胁的有效措施。日益增多的空间碎片,给未来空间开发利用造成许多困难,如通信、导航、遥感、气象、军事监视、核监测和空间

探测等活动都有可能受到影响。当今世界,许多科学、经济与军事活动都依赖于航天器的操作与控制。据悉,穿过臭氧层的太阳辐射能导致皮肤癌,并且随着臭氧层的变化,这种担忧与日俱增。如果不加以防护,源于伽马射线的强烈宇宙辐射,将会对人类造成巨大伤害甚至基因突变,从而影响人类健康生活与正常繁衍。

1989年3月13日,曾发生一次严重的日冕物质抛射事件。通过该事件人们意识到,太阳耀斑或日冕物质抛射(CME)可能会危及宇航员的生命,或瞬间毁坏电子栅格(Electrical Grids)。尽管可能性极小,但大量有潜在威胁的近地小行星可能会摧毁地球上的许多生命,如6500万年前的K-T事件(即白垩纪—第三纪大规模物种灭绝事件),导致地球上包括恐龙在内的65%~70%的物种消亡^[1]。从毁灭程度上看,该事件属于极其严重的宇宙大灾难。

今天,让我们从太空时代开始,重新审视所发生的一切。我们思考:为什么与过去相比人类对宇宙的威胁了解甚多?为什么在发射探测器探索太空的过程中,人类又不断制造出一系列后果严重的新问题?

太空时代的开始

1957年10月4日,苏联成功发射第一颗人造卫星“斯普特尼克”1号(Sputnik 1),拉开了人类进入太空、探索宇宙的序幕。作为首颗发射至地球轨道的航天器,Sputnik 1被认为是人类科学与工程领域的一大进步^[2]。然而,美苏冷战的严峻现实,给这次航天发射抹上了浓厚的军事色彩。苏联的此次太空壮举,极大地刺激了美国航天项目的飞速发展。在之后的几年中,美国与苏联都相继发射了一系列航天器与导弹^[3]。

早在 1957 年,几乎无人意识到过多航天发射活动所带来的风险。然而,半个多世纪后,人类空间活动所造成的在轨空间碎片不断增加,造成非常严峻的现实问题。目前,越来越多的空间垃圾已经成为人类进入太空和利用太空的严峻威胁。人类在通信、导航、对致命风暴的跟踪以及利用卫星提供有效军事防御能力等许多方面都依赖于卫星,而太空垃圾却已成为人类时刻需要面对的威胁。

虽然人类能够有效抑制新碎片的产生,却对于已存在碎片所产生的威胁无能为力。实际上,仅仅由于现有空间垃圾的撞击,就会导致 50 年后碎片在轨道上的积聚更加严重。更何况随着新发射卫星的增多,空间碎片还会持续增加。

预见性设想容易被人忽视

大约 25 年前,以唐纳德·凯斯勒(Donald Kessler)为代表的航天科学家提出:空间碎片可能会对长期的航天计划构成严峻威胁。可是,当时人们对此一笑了之。图 2.1 非常形象地描述了过去几十年中空间碎片对我们的威胁及影响。人类从来都不缺乏“怀疑精神”,但有时却会因此扼杀一些重要的新观点,在太空领域也不例外。

现代火箭之父罗伯特·戈达德(Robert Goddard)和其他革新者告诉我们:预见性设想与不切实际的幻想其实只有一线之隔。

1919 年,美国史密斯森学会(Smithsonian Institute)出版了罗伯特·戈达德撰写的一篇报告,描述了他计划发射液体燃料推进火箭的构想。在该报告中,他提出液体火箭最终抵达月球的方式。1920 年,由于罗伯特·戈达德大胆设想火箭终有一天会搭载人类

冒险家抵达月球表面,而被《纽约时报》的一篇社论讽刺为“月亮人”。1926年3月16日,在他的坚持不懈下,第一枚液体燃料推进火箭终于发射成功。罗伯特·戈达德有句名言:“每一种幻想在有人率先实现它之前都被看成一个笑话。一旦实现,幻想即变为现实。”直到1969年7月17日,“阿波罗”飞船成功登陆月球后的一天,《纽约时报》刊登一则更正声明,为其1920年发表的错误社论致歉——虽然该道歉迟到了大约49年^[4]。

现在,空间碎片问题不再被当成“笑料”。21世纪,越来越多的人将有机会搭乘政府和商业航天器飞往太空。截至2012年底,约有500余人已经去过太空。随着21世纪商业航天的成熟,越来越多的“普通太空人”将在亚轨道上飞行甚至进入轨道。不幸的是,无论是政府还是私人支持的太空人,将来搭载火箭或在太空站生活时,他们都要面对空间碎片的威胁。而对于绝大多数人来说,也许永远不会冒险进入太空,但仍需面对诸多威胁,因为空间碎片随时会陨落,并可能在“不幸的”时间、“不幸的”地点,给人们带来不幸的灾难。

空间碎片问题日益严重

目前,我们面临的最大的太空威胁是以超过马赫数20高速运行的空间垃圾,它们有可能撞毁重要的通信卫星或其他关键航天器。因此,我们必须认真考虑这样一个问题:太空中的空间碎片有可能撞毁航天器甚至危害到航天员的生命。当然我们也要关注坠落碎片可能给人类造成的财产损失,甚至伤亡事故,虽然这种可能性微乎其微。面对这些威胁,人们应意识到解决这些问题的紧迫性。

那么,空间碎片问题是如何产生的呢?在过去一段时期内,人们将越来越多的航天器送入太空。然而,随着航天器的升空,各种各样的空间碎片开始在太空中积聚。太空中散布着爆炸螺栓、已爆炸的燃料箱、航天器涂层碎片、火箭上面级残骸、用于保护卫星的整流罩、报废的卫星,以及近年来卫星相撞及人们“蓄意”从地面发射导弹摧毁报废卫星所造成的空间碎片。

起初,太空中只有少量垃圾,但是几十年来,空间垃圾不断增加,尤其是在某些特定轨道上逐渐形成不断扩散的“空间垃圾堆”,科学家们最终已意识到空间碎片带来的严重威胁。目前,大量的空间垃圾已经对人类长期进入太空构成了威胁。如同担心“温室气体”和“人口爆炸”会威胁地球生命的可持续发展一样,我们也担心空间碎片增多将会影响人类持续进入太空。

大量由人类产生的空间碎片环绕在地球周围。科学家们认为:在地球轨道上运行着数以百万计的空间碎片,其中,以近地轨道的居多,但也遍布于中高轨道上,所有这些轨道上都堆满了空间垃圾。

数以百万计的碎片,如航天器涂层碎片等,其实尺寸非常微小。据估计,目前太空中直径约为1cm的碎片大约有500,000~750,000个。因此,大多数人对于空间垃圾的第一反应是:那只不过是小的碎片,肯定不会造成严重危害。

图1.1展示了留在哈勃太空望远镜高增益天线上1cm长的撞击孔。以17,000mile/h或高于28,000km/h高速运行的航天器涂层碎片,可以导致航天飞机的窗户出现严重的裂痕,或者刺穿宇航员的宇航服。直径为1cm的碎片也可能造成巨大伤害,图1.1中哈勃望远镜高增益天线上的划痕就是空间碎片造成的。而直径为

10cm(约为4in)大小的空间垃圾则能够摧毁一颗通信卫星或遥感卫星,或者其他价值昂贵的太空资产。安装在卫星表面用于保护卫星免受空间碎片撞击的保护罩,只能保护卫星不受小于1cm的碎片撞击。

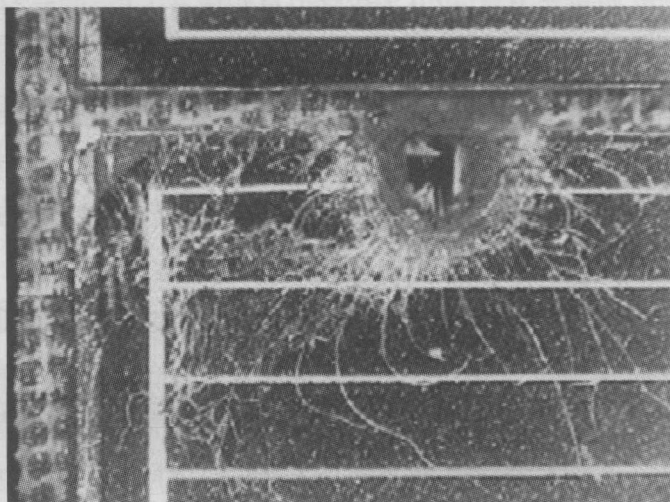


图 1.1 空间碎片击穿哈勃太空望远镜帆板留下的小孔

(图片来源:NASA)

跟踪空间垃圾面临的挑战

1980年,可有效跟踪的空间碎片(在近地轨道上运转、直径大于10cm的碎片)数量不超过5,400个;2010年,较大尺寸的空间碎片数量已经增加到15,639个。目前,由陆基和天基跟踪系统组成的美国空军空间监视系统(AFSSS),可跟踪到尺寸为10cm或大于10cm的空间碎片约为22,000个。

美国目前使用的超高频雷达正处于升级阶段,升级后的新型S

波段“空间篱笆”雷达系统,雷达的分辨率将更高。早在1961年,作为导弹跟踪系统的一部分,空军空间监视系统(图1.2)开始投入运行,如今该系统已逐渐老化。美空军部门已经签署了一份合同,旨在建造新的空间碎片跟踪系统,该系统将于2017年全面投入运行。2012年3月对该新系统进行了测试,系统准确跟踪了空间碎片,充分证明“空间篱笆”雷达系统具有精确跟踪空间碎片的能力以及系统整体设计的有效性。本书第二章将详细阐述这一系统^[5]。

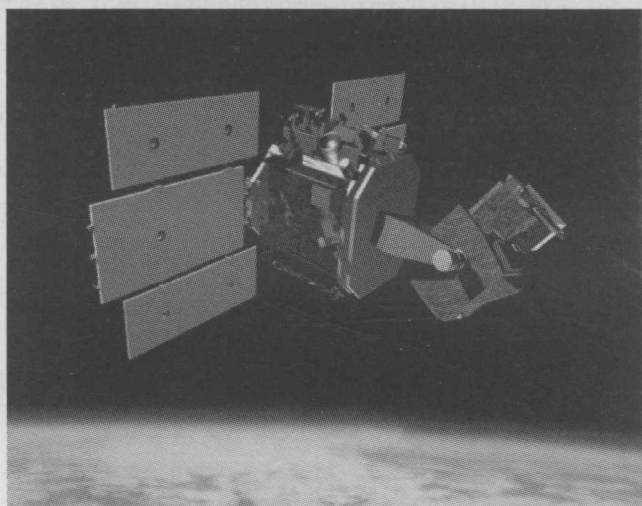


图 1.2 可跟踪空间碎片的美国空军卫星

(图片来源:美国空军)

目前,美国空军空间监视系统所跟踪到的22,000个空间目标中只有大约1,000个是可以正常运行的卫星,剩余的全是报废卫星或其他形式的空间垃圾。

体积较大的碎片是跟踪的重要目标,其原因至少有以下两点:

首先,由于这些体积较大的碎片具有巨大的动能(相当于大型炸弹所释放的能量),所以能够彻底摧毁国际空间站和其他价值数亿美元的太空设施;其次,这些大体积的空间目标相撞(无论运行状态如何)极可能会产生上千块危害较大的新的空间碎片。探寻减少各种空间碎片的方法、系统地清除太空轨道中的所有垃圾势在必行,但如何阻止大体积空间目标相撞则刻不容缓。

地球轨道上空间碎片已超过 6300t

过去 20 年所累积的各种尺寸的空间碎片,令人担忧。图 1.3 描述了不同种类碎片的大小以及相应的分布。所幸的是,地球轨道上近亿块碎片中的绝大多数都是类似盐粒大小的涂料渣,但因其运行速度约为 28,000km/h (17,500mile/h),仍会造成很大冲击,足以穿透宇航服或者使飞船的舷窗凹陷甚至穿透。



图 1.3 地球轨道上 6300t 空间碎片分类

(图片来源:NASA)

在过去 10 年里,曾发生过大型空间目标相撞事件。人类历史上首次卫星相撞事件发生在 2009 年 2 月 10 日,当时一颗正在使用的美国移动通信卫星“铱星”33 (Iridium 33) 和一颗已废弃的俄罗斯气象卫星“宇宙”-2251 (Cosmos 2251) 发生碰撞,产生数千空间碎片;2007 年,一枚导弹摧毁了一颗废弃的卫星,也造成了大量空间碎片。每次事件都可能导致新增约 3000 个可跟踪的空间碎片,这两次事件使可跟踪碎片数量激增了约 6000 个,对国际空间站产生了新的威胁。图 1.4 为导弹击中某卫星所产生的碎片,以及这次新产生的碎片云对国际空间站轨道带来的影响,在图中表示为“白轨道”。

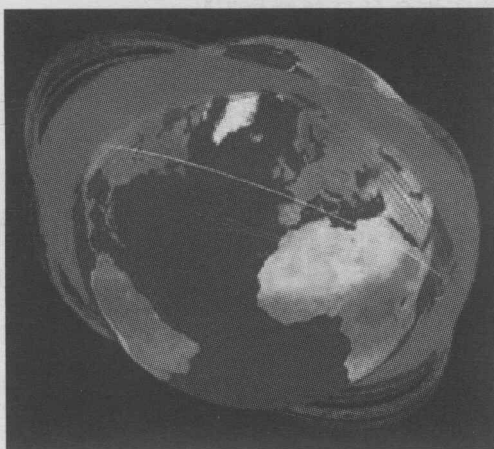


图 1.4 某卫星被导弹击毁之后产生的轨道碎片
(图片来源:NASA 空间碎片项目办公室)

空间碎片中,最令人担忧的是所谓的“凯斯勒综合症”(Kessler Syndrome),即空间垃圾相互碰撞必然造成越来越多的更小空间碎片雪崩式反应。1978 年,航天专家唐纳德·凯斯勒在一篇论文中

曾警告此类问题时有发生^[6]。

唐纳德·凯斯勒在论文中提出,空间碎片的一系列碰撞,一旦到达了触发点,可能会导致链式反应,使该问题不断恶化。唐纳德·凯斯勒警告或称为“凯斯勒综合症”,指出一旦到达了触发点,问题就失控了。然而他对此效应的早期预见没有引起人们足够重视。

起初,英国科幻小说家亚瑟·克拉克爵士(Sir Arthur Clarke)曾对全球卫星通信以及罗伯特·戈达德关于载人探月做出早期预言时,总是受到嘲讽或忽视。现在,空间碎片已经发展成为唐纳德·凯斯勒所预见的情形,这一问题才引起广泛关注^[7]。实际上,2011年9月美国国家研究委员会的一份报告给出的结论,认为该问题“要比以前所想象的还要糟糕”^[8]。

目前,清除空间碎片的唯一措施是通过大气阻力或地球引力造成轨道衰减,并最终导致航天器再入。可是,只有低轨卫星上的碎片才能通过引力方法有效地清除。对于“范艾伦辐射带”以上的中轨卫星,要花几百年或几千年才能重新进入地球大气。地球同步轨道到地球的距离实际上只有地月距离的 $1/10$,在同步轨道上的目标所受引力只有在地球表面上所受引力的 $1/50$,所以该轨道上引力对碎片的衰减过程实质上是可以忽略不计的。地球同步轨道卫星(GEO)再入地球理论上需要花费几百万年的时间。因此,对于中高轨轨道(MEO)和GEO轨道碎片却没有有效的清除措施,除非设计出可以控制离轨的火箭。

如图1.3所示,低轨轨道(LEO)上,极地上空的空间碎片目前已累积到2700t,远远超过由引力作用造成的一年几十吨的衰减能力。图1.5表明美国跟踪系统所跟踪的LEO上面的碎片在极地上空尤为拥挤。

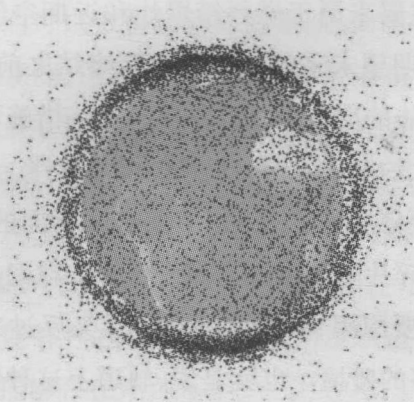


图 1.5 南美以及非洲上空近地轨道碎片
(图片来源:NASA 空间碎片项目办公室)

碎片增加的速度比陨落的速度更快

历史统计数字表明:碎片产生的速度远远超过碎片的移除速度,导致每年 LEO 轨道碎片总量净增长 5% 左右,虽然听上去似乎并不多。然而,事实上目前轨道碎片数量已非常巨大,而且根据以往的经验仍将持续增长。

由于空间碎片围绕地球旋转时在北极和南极地区上空的距离会更加接近,因此碰撞机会将大幅增加。

为了更清晰地说明该问题,图 1.4 使用 1000 万:1 的比例尺,从视觉角度显示,碰撞的风险实际上可能比看上去要低。就好像某人观看后视镜,他从镜中看到的后车距离比实际距离更为接近。同理,图 1.4 所示的空间碎片之间的实际距离是图示距离的 1000 万倍,地球的实际体积和空间碎片所占空间的实际大小是图示的 10^{21} 倍。

目前,碎片主要来源于燃料箱爆炸和近期空间目标碰撞事件所产生的碎片。期望未来能在卫星寿命终结之前,排空燃料来最大程度地降低爆炸的次数。要广泛实施这一措施可能需要几十年时间,目前每年大约发生4次燃料箱的爆炸事件。

近几年,几项环境研究表明:随着未来不同的发射频度,LEO轨道某些高度的碎片总量也许会完全饱和。空间目标碰撞事故将是产生碎片的主要原因,所产生的新碎片又反过来对空间环境产生影响,造成更多的碰撞。也就是说,轨道上这种链式反应将产生越来越多的碎片。

根据 NASA 科学家 J - C Liou 和 N. L. Johnson 的研究结论,最活跃和最危险的 LEO 区域位于 900 ~ 1000km 高度之间,就算没有新的发射,这一区域也已经非常不稳定了。处在“红色区域”的碎片总量(尺寸大于或等于 10cm 的空间目标)在未来 200 年内将增长至现在的 3 倍,从而导致此区域的碰撞概率增加近 10 倍^[9]。实际上,未来的碎片环境要比 J - C Liou 和 N. L. Johnson 所设想的还要糟糕,因为卫星仍旧源源不断地被发射入轨。2012 年 6 月底,作者在肯尼迪航天中心观看“德尔它”-4 重型火箭发射一颗监视卫星,包括星上用于机动的燃料,该卫星重达 30t。

J - C Liou 和 N. L. Johnson 在论文中提出,为了更有效地制约未来碎片总量的增长,需要考虑主动碎片移除方法(ADR)。本书后面的章节将讨论这些不同的移除技术和操作方案。

碎片所在的轨道越高,对其跟踪的难度就越大。地球同步轨道上可跟踪碎片的最小直径是 30cm,而近地轨道上则是 10cm。可跟踪到约有 200 颗报废卫星分布在地球同步轨道上,这些空间碎片占据或漂移在有价值的轨道位置,给可用的航天器带来很大的碰