

空间碎片问题的现状和未来

童国梁

太空时代

自 1957 年 10 月 4 日前苏联发射世界上第一颗人造地球卫星 Spulnik 1 算起, 人类进入太空时代已有 50 年, 从此大约又进行了 4500 次太空发射。人造航天器大体可分为两类。一类是无人航天器, 包括人造地球卫星和各种空间探测器。人造地球卫星是一种环绕地球在空间轨道上运行的无人航天器。按用途可分为科学卫星、技术试验卫星和应用卫星, 应用卫星直接为国民经济和军事服务, 因而用途也最广。在人类发射的人造卫星中, 90% 以上是应用卫星。应用卫星按其用途又可具体分为空间物理探测卫星、通信卫星、天文卫星、气象卫星、地球资源卫星、侦察卫星、导航卫星、测地卫星等。在人类发射的卫星中, 既有重十几吨的大型卫星, 也有重几十千克的微型卫星以及由多颗小型卫星组成的卫星星座。习惯上把探测地球以外太阳系天体的无人航天器叫探测器, 如绕太阳飞行并进行探测的叫太阳探测器、绕月球飞行并进行探测的叫月球探测器等等。另一类是各种载人航天器, 例如载人飞船、空间站和航天飞机等, 其特点是可以搭载航天员完成空间探测、试验和运输等任务。俄罗斯的“东方”号飞船、美国的“水星”号飞船和中国的“神舟”号飞船都曾把本国第一位航天员送入太空, 美国的“阿波罗”号飞船还实现了人类首次登月。美国的“空间实验室”、苏联的“和平号轨道站”、国际合作的“国际空间站”等大型空间站都曾经或者仍然是重要的空间试验基地。

在人类发射的探测器中, 地球卫星占了 90% 以上。目前, 地球上空有大约 850 颗人造卫星正在工作, 它们运行在各自的轨道上, 并属于至少 40 个国家。表 1 列出了现有各类卫星所占比例。

人造地球卫星按其高度大致分为 4 种: ①低地卫星轨道 (LEO), 其高度小于 2000 千米; ②

表 1 现有各种用途卫星比例

用途	通信	导航	军事 监视	地球观察 和遥感	天体物理和 空间物理	地球科学和 气象学	其他
所占百分比 (%)	66	7	6	5	5	5	6

地球同步轨道 (GEO), 其高度为 35876 千米, 轨道周期为 1 天; ③中地轨道 (MEO), 其高度处于 LEO 和 GEO 之间; ④所谓 Molniya 轨道, 是以 12 小时为周期的高椭圆轨道。表 2 列出了现有卫星按其轨道所处高度的分类。

表 2 现有卫星按其轨道所处高度的分类

轨道高度	LEO	GEO	MEO	Molniya	其他
所占百分比 (%)	46	43	6	2	3

图 1 展示了美国、俄罗斯、中国以及其他一些国家所拥有的卫星数目。这些卫星有的是民用的、有的是军用的。其中美国拥有的卫星数量差不多占了总数的一半。

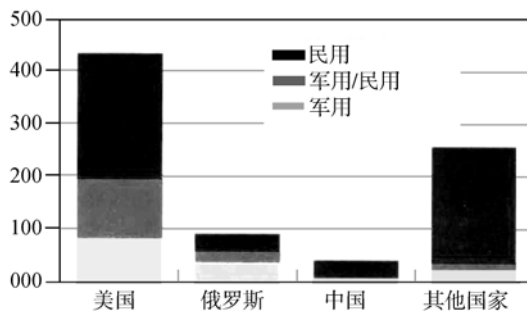


图 1

人类空间活动的废弃物称为太空垃圾, 也叫空间碎片, 是空间环境的主要污染源。空间碎片问题受到越来越多的关注, 这是因为它们在轨道上的运行速度很高, 即使是相当小的垃圾碎片在碰撞中也会伤害甚至毁坏卫星。由于高空碎片可以在轨道中停留数十年, 并且会越积越多, 与卫星的碰撞危险也就越来越大。如果某些高度上的碎片足够多, 就很难再在这样的区域使用卫星。目前尚无有效方法从轨道上清除大量的碎片, 所以控制碎片的产生仍是保护空间合理利用的基本手段。

反卫星武器 (ASAT) 可以摧毁失效的卫星, 美国、俄罗斯和中国都使用过, 但这样做会明显增加空间碎片的密度。2007 年 1 月 12 日中国发射的一种反卫星武器——弹道导弹摧毁了老化的“风云”1

表 3 太空碎片按几何大小的数量分布

尺寸	0.1~1 厘米	1~10 厘米	>10 厘米
在所有高度上的总碎片	1.5 亿	65 万	2.2 万
低地轨道碎片	1600 万	27 万	1.4 万
5~10 吨卫星碎裂产生的碎片	800~1400 万	15 万~25 万	3000~5000
风云 1C 卫星碎裂产生的碎片	200 万	4 万	2000

来源：欧洲太空署 MASTER 2005 垃圾环境模型，并加上来自中国 2007 年 1 月反卫星试验产生垃圾的估计。

号 C 气象卫星。“风云”1 号 C 气象卫星是极轨气象卫星，围绕地球南北两极运行，运行周期约 115 分钟，其轨道在地球上空约 850 千米 (*Physics Today*, March 2007: 29 和 100)。

目前的空间碎片状况

表 3 给出了空间轨道碎片按其几何大小的数量分布。实际上轨道粒子的形状是不规则的，所谓“大小”是指这些碎片的特征尺寸。在太空中还存在一些自然的流星体，这些又增加了尺寸在 0.1~1.0 厘米范围的碎片数量。但是流星体这类碎片对卫星的威胁较小，因为其数量密度很小不会产生显著伤害。

美国太空监视网 (Space Surveillance Network, SSN) 实时跟踪尺寸达到一定大小的轨道物体，SSN 由一组雷达和光学传感器组成。这组系统可以跟踪 LEO 上几何尺寸为 5~10 厘米的物体和 GEO 上 1 米大小的物体。利用 SSN 的数据，美国战略司令部 (US Strategic Command) 对观测到的物体编目登记在册。SSN 不仅跟踪全部登记在册的物体，还设法知道其来源。现在 SSN 共记录了 1.2 万个物体，其中包括 850 个正在工作的卫星以及几千个尚不明来历的物体。

碎片的空间分布并不均匀，它们集中分布在那些卫星轨道常处的高度。图 2 展示了 2007 年 1 月中

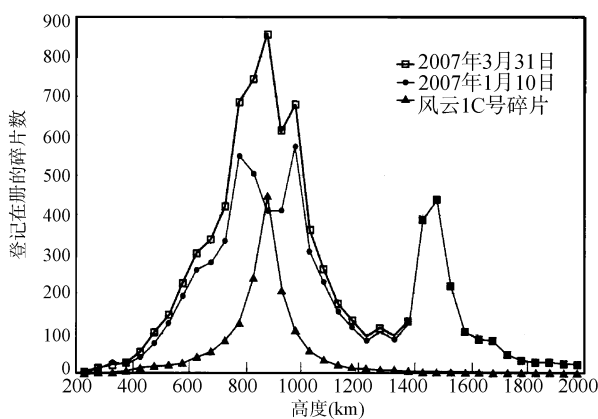


图 2 LEO 碎片随高度分布

国摧毁“风云”1 号 C 卫星试验前后 LEO 碎片随高度的分布：图中带黑点的曲线是 2007 年 1 月 10 日绘成的；图中带空方块的曲线是 2007 年 3 月 31 日绘成的；而上述两条曲线之差（带黑三角的曲线）则表示 2007 年 1 月 12 日中国“风云”1 号 C 卫星被摧毁时形成的。而更高的碎片则集中在地球同步轨道带上 (图 3)。

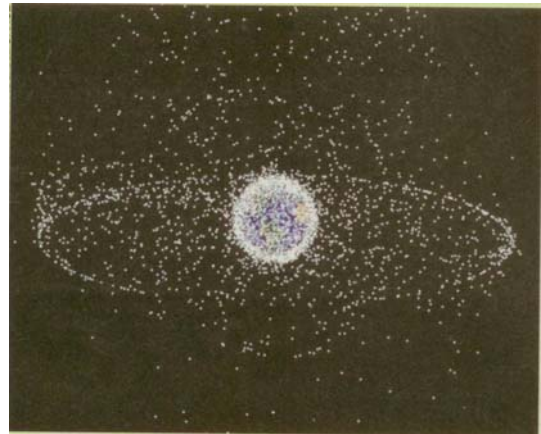


图 3 登记在册碎片的分布：除在地球 2000 千米高度内呈现的高密度壳层外，空间碎片还集中在高度为 35876 千米的地球同步高度带上

LEO 轨道速度大于每秒 7 千米，而碎片飞向一颗轨道卫星的相对速度可以达到每秒 10 千米，甚至更高。为了理解具有这样速度的碎片可能造成的破坏，我们可以想象一个速度以每秒 10 千米飞行的 1 克质量物体所具有的动能实际上和一个速度超过每小时 100 千米的 100 千克的物体相同。换句话说，当达到每秒 10 千米的速度时，一个质量为 m 的物体粗略相当于一个 $10m$ 质量的高性能炸药爆炸时释放的能量。

1 毫米~1 厘米几何大小的碎片如果击中易受伤害的部位就会损害一颗卫星。虽然使用护罩可以抵御这种伤害，但加上护罩不仅增加了卫星的覆盖物，而且也需增加发送卫星火箭的力量。实际上许多卫星都采用尽可能小的护罩。

大于 1 厘米的碎片在碰撞时会严重损害甚至毁

坏一颗卫星，在这种情况下尚无有效抵御这种碎片的护罩。1 厘米大小的碎片由于太小而很难跟踪，也就不能警示卫星与这类物质的碰撞，所以显得特别危险。大于 10 厘米的碎片由于质量大，在与卫星或其他大碎片碰撞时会产生大量附加的碎片。

空间碎片的来源

轨道碎片有两个主要来源。第一个来源是常规的太空活动以及在轨道上参与此类活动物体的意外破裂。这部分人类在太空活动中产生的废弃物及其衍生物,包括丢弃的设备、运载火箭末节、废弃的卫星、卫星展开时释放的螺钉和其他硬件、卫星和分级火箭分离时的碎片、固体火箭燃料燃烧时向空间的喷射物、航天员遗弃的工具(扳手、手套、摄像机灯等)以及航天器与原来空间碎片撞击产生表面材料剥落等等。目前国际社会日益关注这类来源,采取的措施之一是发展旨在限制常规太空活动碎片产生的清污指南。第二个碎片来源是人类试验或采用(ASAT)摧毁卫星过程中产生的碎片。美国、俄罗斯和中国都曾用这种方法销毁废弃卫星。中国在 2007 年 1 月试验了利用动能 ASAT 摧毁老化卫星,那种碰撞产生了比通常理解的要大得多的轨道碎片。

空间中 1/4 的“有效载荷”是正在运转的卫星,其余是废弃的卫星,后一部分可以看成碎片。碎片总数中约有一半是由轨道物体的碎裂形成的。由于推进系统的故障或分级火箭中剩余推进物的爆炸是形成偶然碎裂的最大来源。中国 ASAT 试验增加了约 2000 个碎片,使碎片总数增加了 35%。苏联在二十世纪七八十年代的 ASAT 销毁了一颗卫星,产生了 700 多块大碎片,其中的 300 块至今仍留在轨道上。而美国在 1985 年 9 月也进行了一次 ASAT 试验,这次试验产生的最后一块碎片直到 2004 年才从轨道上消失。

2007 年美国和俄罗斯分别占登记到太空物体的 35%,2007 年 ASAT 试验后,中国占了 20%。但到 2008 年俄罗斯的份额将会上升到 40%,那时 2006 年发射、2007 年 2 月破裂的 **Briz-M** 增强级火箭的碎片也将被登记在册。这些年来,国际上正努力控制当前太空活动碎片的产生。20 世纪 90 年代中期美国发展并发布了一系列空间碎片除污指南;接着其他国家也发展了类似的国家指南。1993 年美、俄、

日、欧洲空间局联合发起成立“机构间空间碎片协调委员会”(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC),中国国家航天局于 1995 年成为这个委员会的正式成员。到 2002 年世界上主要航天国家都加入机构间空间碎片协调委员会。IADC 致力于制定各种标准,使航天器在设计、生产过程中就考虑到碎片因素。该组织制定了非强制性的空间碎片除污指南,以减少卫星和火箭末级在轨道上被轨道碎片撞击发生爆炸的机会。指南也谈到卫星运行情况,对运行在非地球静止轨道上的卫星(非地球同步卫星),其飞行计划中必须指出,卫星运营商将使该卫星远离其他轨道物体,或在低地轨道上远离国际空间站或其他载人航天器。另外,需要安排非地球静止轨道卫星退役的计划。如使废弃的卫星直接下降再进入大气层烧毁;或在工作寿命行将结束之前,利用剩余的推进剂将其推到一条专用于“收容”退役航天器的轨道。不幸的是,这些指南并无法律约束。

尽管如此,这些努力还是取得了部分成功。被登记物体数目自 20 世纪 60~90 年代中期呈线性增加,但在 1997~2006 年,增速变慢,其中的部分原因是由于飞行任务以及分裂残骸的减少。但是,2007 年 1 月的 ASAT 试验和 2 月的 **Briz-M** 爆炸至少产生 1000 个可跟踪碎片,使过去 10 年的成就被部分抵消。目前在试验或利用军事系统销毁卫星方面并不存在国际性的限制。

空间碎片对卫星的威胁

空间碎片对卫星的威胁包括近期和远期两个方面。近期的威胁来自现有的碎片数目。远期威胁则决定于太空环境的长期发展,事实上在未来的几个世纪由于正在进行的空间活动以及已经在太空中的大物体的可能碎裂必然使空间碎片不断增加。

就近期而言,空间碎片的密度对于使用寿命期内的卫星产生严重伤害的可能性还是非常低的。但在某些高度仍会在卫星运行时由于其他原因而造成风险。如果这种碎片密度显著增加,则由碎片造成伤害的几率在空间的某些部分将会对卫星构成主要威胁。

虽然近期碎片对卫星的伤害风险还是相对低的,但太空中意外碰撞事件还是发生了。1996 年 7 月,法国一颗名叫“樱桃”(Cerise)的军用卫星曾经被一块太空垃圾击中,而这块公文包大小的垃圾是 10 年前法国“阿丽亚娜”火箭末级爆炸后产生的

残骸，这块碎片 10 多年来每天在太空中高速游荡，所幸的是碎片并没有直接击中卫星，而是击中了卫星的平衡臂。“樱桃”被击中后，臂膀断裂，卫星严重倾斜，曾经一度失去控制。空间碎片与废弃卫星的碰撞也发生了。1991 年一颗弃用的俄罗斯卫星 Cosmos 1934 被一块来自 Cosmos 926 卫星的碎片击中。研究人员还观测到 1997 年 NOAA7 卫星和 2002 年 Cosmos 539 卫星的轨道发生了改变，并伴随释放了少量碎片，人们相信这是由于它们与 1~10 厘米大小的碎片发生碰撞的结果。观测还发现源于 2000 年 3 月爆炸的一枚中国火箭体碎片在 2005 年 1 月撞击了已有 31 年寿命的一枚美国火箭体。

其他事例，包括卫星破碎或故障，可能也源自空间碎片的撞击，但有时由于这些垃圾太小而无法跟踪，事故就不能确定。根据现有的卫星和碎片数，每天会有几百次碎片与卫星距离小于 1 千米的近距离接触发生。

因为碎片在太空中不是均匀分布的，对卫星的威胁依赖于卫星所处轨道。卫星轨道密集的区域，往往也是碎片数目最多的区域。

2007 年 1 月中国 ASAT 试验以前，两块大的 LEO 物体发生碰撞的平均时间估计为 11~12 年。而在人类进入太空时代的头几个 10 年，碰撞率却要低得多。碰撞物体完全碎裂的那种所谓“灾难性”碰撞估计每 19 年发生一次。对于未来的几个十年，那次中国试验产生的碎片预期会把碰撞率增加到每 7~8 年一次，而灾难性碰撞也会上升到每 12~14 年一次。

更多研究指出，中国试验前大于 1 厘米的一块碎片与在 LEO 正在运行的卫星估计每 5~6 年发生一次碰撞。那样的碰撞会明显伤害卫星，但不至于发生故障。事实上想要追查卫星发生故障究竟由哪一块空间碎片引发，是很困难的，因为绝大多数碎片太小，很难用 SSN 观察它们。中国试验的碎片预期会把卫星发生故障的几率增加 50%，所以这类碰撞在以后的 10 年中将缩短为每 3~4 年发生一次。

另一种碎片风险的估计认为在 800~900 千米高空的卫星轨道密集高度上任一颗寿命为 5~10 年的卫星与大于 1 厘米碎片碰撞的机会大于 1%。中国 ASAT 试验产生的碎片集中在这个高度带，对未来 5~10 年，这种碰撞威胁可能翻番。

空间碎片的长期发展

如果在某种高度空间碎片的密度变得足够大，

那些空间区域就会变得“超临界”，这是说，物体之间碰撞的频率将变得足够高，使产生附加碎片的速度比大气把这个区域中拖走碎片的速度快得多。这些附加的粒子又进一步增加了该区域的碰撞几率，这就导致一种慢性链式反应，轨道上的大物体会被捣成较小的碎片。在中国试验前的 2006 年 NASA（美国国家航空和宇宙航行局）的轨道碎片计划办公室（Orbital Debris Program Office）公布的研究结果表明部分空间已经达到超临界的碎片密度。研究还特别指出在 900~1000 千米的卫星轨道常用高度区，即使不再对这高度区域发射物体，大于 10 厘米的碎片数在今后的 200 年中也仍将增至 3 倍多。研究还指出在没有另加发射的前提下，这段时间中 LEO 中大碎片的数目也将增加近 40%。ASAT 试验产生的碎片将使情况变得更糟。

这项研究得到一个重要启示，即只有能把已在轨道上的大块物体清除的除污措施才有希望阻止碎片不断增加。类似于机器人太空碎片清除行动或利用分级火箭清除废弃卫星的做法虽然非常昂贵，但这些除污措施也都在研究之中。

另一个结论是国际销毁卫星的行动将会在已经拥挤的高度上增加空间碎片量，并显著增加碰撞率以及级链效应，最终增加碎片数量。

动能 ASAT

原则上，一个国家可以采用某些武器干扰卫星的运行，例如使用激光或电磁干扰发射机。但是，那样做的武器有效性并不确定。如果采用动能 ASAT 对卫星实施成功攻击会损害卫星，而损害的结果也可以用地面传感器进行探测。探测到严重的有形损坏明显表明被攻击的卫星不再具有运行功能。如果一颗卫星被认定具有足够的军事威胁性，那么这个国家就会使用动能 ASAT 实施摧毁。

超速碰撞是指发生比每秒几千米更高速度的物体间的碰撞，那种碰撞会导致极高的温度和压力，并在非常短的时间内发生，要模拟那种碰撞的物质反应是相当复杂的。虽然流体力学方法已被用于模拟相对简单的冲撞，但是想模拟卫星上或其他复杂体的一次冲撞效果而言，尚力不能及。然而，过去 10 年中由地面试验和观察空间碎裂现象基础上发展的计算机模型可以近似描述一颗卫星在高速碰撞时产生碎片的情形。其中 NASA 的标准碎裂模型（Standard Breakup Model）是最全面和比较深入的一种。

把 NASA 的碎裂模型用到一个质量为几十千克的物体与一个质量为 10 吨、速度超过 7 千米/秒的卫星碰撞可以勾画出一枚动能反卫星武器攻击卫星时出现的效果。模拟计算给出在碰撞中产生的碎片粒子的数目、大小、质量、面积质量比以及粒子的速度分布。把这些信息连同大气密度数据即可计算这些粒子的轨道并估计它们的寿命。

如果粒子直接击中卫星的中心质量部位，这样的碰撞将是灾难性的。的确，根据 NASA 的碎裂模型，一个大物体与一个较小物体在碰撞时，如果较小物体的碰撞动能与较大物体质量之比大于每千克 40 千焦耳，将是灾难性的。这意味着一个速度为每秒 7.5 千米的 20 千克拦截器击中一颗卫星，就可以把质量达 14 吨的大卫星完全击毁。这个条件与 GEO 卫星所处情况相似，因为那里的轨道速度大约为每秒 7.5 千米，这个结果也确定了攻击的拦截速度。在 GEO 中约有 400 颗正在工作的卫星，其中 200 多颗的质量大于 450 千克、60 多颗超过 1 吨、约 15 颗大于 5 吨。

轨道卫星的灾难性碎裂可以使空间碎片数量急剧增加。NASA 的碎裂模型展示了 5~10 吨单颗卫星灾难性碎裂时产生的碎片粗略地为当前在 GEO 中大于 1 毫米的碎片数量的两倍（表 3）。这个场景特别适用于在 GEO 上收集地面高分辨图像的美国侦察卫星，因为这种质量约为 10 吨的卫星常被考虑作为 ASAT 攻击的靶子。

这种碰撞发生的碎裂过程估计会产生 3000~5000 块大碎片，这个数目约为 800~900 千米卫星常用高度带上当前大于 10 厘米碎片数 1500 块的 2~3 倍。如果被攻击卫星的轨道处于这个高度带

上，碎片最终也将集中在相同的区域，这必然使该高度的碎片问题趋于严重。对于其他高度上的攻击，那里碎片数量的百分比也会有很大提升。

该表同时给出了 2007 年 1 月由于中国摧毁“风云”1 号 C 卫星产生碎片数量的估计。这次反卫星攻击显著增加了 800~900 千米高度的碎片数（图 2）。

空间碎片的寿命

一块碎片的轨道寿命依赖于它受到大气阻力的影响有多强。它依次依赖于物体质量、大小、形状以及碎片所处轨道高度处的大气密度。因为大气密度随高度粗略呈指数下降，轨道高度对阻力和碎片寿命有巨大影响。例如，一个物体在 300 千米高度的轨道有几周的使用寿命，在 500 千米高度的轨道上则有 1 年的寿命，在 700 千米高度的轨道上有几十年的寿命，而在 800 千米高度的轨道上，寿命可以超过 1 个世纪。如果用 ASAT 摧毁一颗轨道高于 800 千米的卫星，那么碰撞中产生的大部分碎片粒子将会留在轨道上长达 10 年，甚至更多的时间。一定高度的大气密度与太阳活动周期有关，也会以 11 年的周期变化。太阳活动的变化会使大气外层膨胀和收缩。这个效应在高度低时更显著，例如 500 千米高度处的大气密度在整个太阳周期内的变化可以超过 10 倍。于是，碎片的轨道寿命明显受到太阳的影响。图 4 为 11 年太阳周期中，一颗卫星发生灾难性碎裂而产生大于 10 厘米碎片粒子并留在轨道上的比例，随卫星发生碎裂后时间的变化。此图展示了卫星处于 4 种不同高度圆轨道时的结果，这是由 NASA 碎裂模型计算得到的。计算用到的大气模型：(a) 太阳最大活动期（1980 年 1 月 1 日），(b) 太阳最小活动

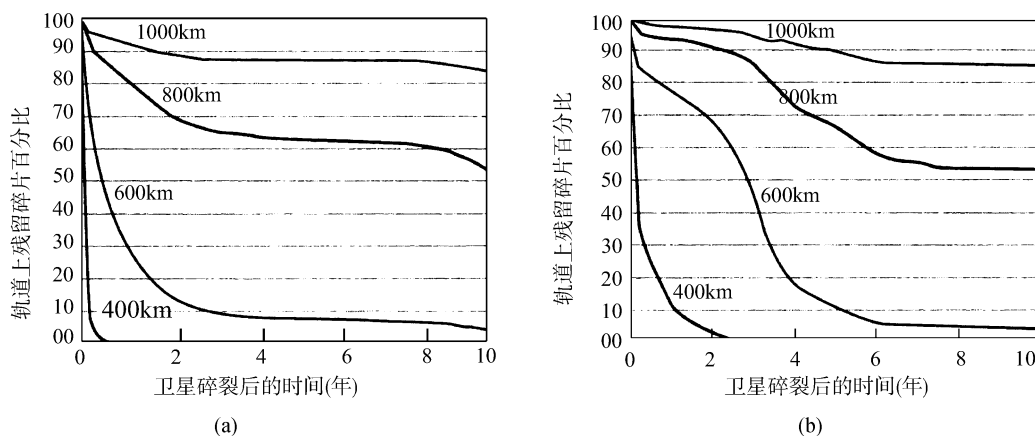


图 4 11 年太阳周期效应

期（1986年1月1日）。

中国 ASAT 试验之前，美国在 1985 年 9 月使用动能拦击器摧毁一颗卫星。那次美国试验产生的大于 1 厘米的碎片量与中国试验产生的相当（虽然大碎片较少），因为两颗卫星的质量都约为 1 吨。由于美国试验发生在约 500 千米的高度，而中国试验的高度为 850 千米，所以美国试验产生的碎片停留在轨道上的时间明显要短。美国试验产生的大多数大碎片将在 10 年中衰减完，而中国试验产生的相当一部分碎片预期会在轨道上停留更长的时间。

ASAT 产生碎片的分布

通常设想在某次攻击中摧毁的卫星碎片，相对于原卫星的质心以球对称方式向外扩散。根据 NASA 的碎裂模型，这种碰撞中产生的大多数碎片粒子对碎片云质心的相对速度要比卫星的轨道速度小得多。这里以一次典型碰撞为例，碰撞产生的大于 10 厘米粒子中，约 80% 的相对速度小于每秒 0.25

千米，这个速度仅是轨道卫星速度每秒 7.5 千米的 3%。对更小的碎片粒子也有类似结果。

因为大多数碎片粒子的相对速度与轨道卫星的速度相比是很小的，碎片粒子的总速度与卫星原来的轨道速度非常接近，因此这些粒子（特别是具有大质量的粒子）将沿着与原卫星轨道高度接近的轨道飞行。

碎片粒子的速度分布使碎片在几天内沿原卫星轨道向外扩散（见图 5a 和 5b）。如果这些碎片一旦散开，就会有与相近高度的轨道上飞行的所有卫星发生碰撞的危险。

随着时间的推移，地球引力场的非各向同性力使碎片轨道以很小的变化率环绕地球轴发生进动，碎片将在原轨道平面展开（图 5c）。对于接近极轨道的碎片，几年后碎片粒子基本上在围绕地球的壳上均匀分布（图 5d）。接近赤道轨道的碎片将缓慢扩展为环绕原轨道的一条带子。

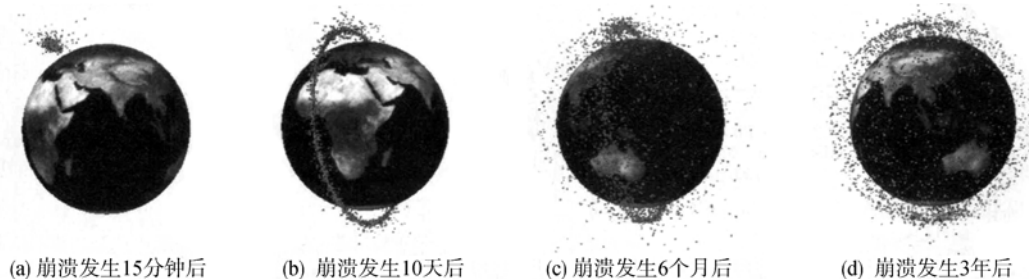


图 5 ASAT 袭击卫星产生的大于 10 厘米碎片轨道的发展

关注太空环境的保护

太空是唯一适于开展诸如通信、地球观察、定位和导航等一系列重要用途的地方，自 Sputnik 1 号发射以来，50 年中，社会已变得高度依赖卫星。现在人类已踏进太空时代的第二个 50 年。如不采取步骤保护人类使用太空的能力，无疑是一种惊人的短视行为，控制碎片的产生对于使用太空至关重要。

国际社会已对于日常空间活动制定了碎片除污

指南，这无疑是正确的。然而，在试验或使用武器来销毁轨道上的卫星方面还没有法律约束。销毁卫星时会产生的大量碎片，那可能对空间环境造成明显和长期的冲击。如何规范这类行动是应该优先考虑的。

（北京市中国科学院高能物理研究所 100049）

文中的数据来自美国关注公益科学家联盟 David Wright 撰写的 *Space Debris*, *Physics Today* 07-10, page100。

北京同步辐射装置介绍

北京正负电子对撞机(BEPC)通过高能加速器加速正负电子，利用高速正负电子的对撞研究高能物理的基本过程；同时高能带电粒子加速运动产生的副产物——同步辐射可提供真空紫外至硬 X 光波段的高强度光源，可用来开展各领域的研究工作。北京同步辐射装置(BSRF)是利用同步辐射光源进行

科学研究的装置，是对社会开放的大型公用科学设施，是我国凝聚态物理、材料科学、化学、生命科学、资源环境及微电子等交叉学科开展科学研究的重要基地。目前已建成若干条光束线和实验站的同步辐射装置。BSRF 有两种运行模式：兼用或专用模式，兼用模式用于高能物理对撞实验，同时也提供同步辐射光；专用模式专用于同步辐射研究。