

# 天基平台激光清除厘米级空间碎片关键问题探讨

洪延姬, 金星, 常浩

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘要:** 利用激光方式清除低轨大量的厘米级空间碎片已经成为国际上的研究热点。激光清除空间碎片是巧妙地利用了碎片在激光辐照下的冲量耦合特性和冲量作用下的减速降轨特性。围绕着冲量耦合和减速降轨特性, 讨论了激光辐照下空间碎片等离子体羽流喷射、激光辐照空间碎片冲量耦合效应测试、天基平台激光辐照下空间碎片轨道预测以及用于碎片清除的天基平台激光器参数设计四个关键问题, 分析了涉及的技术难点, 可采用的研究方法, 以及能够实现的技术水平。通过对关键技术问题的探讨, 为进一步开展天基激光清除碎片技术工程化奠定基础。

**关键词:** 天基激光; 空间碎片; 等离子体羽流; 冲量; 降轨

**中图分类号:** V416.5; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0229001

## Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal

Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Using the way of laser in centimeter scale space debris removal has been the hot research topic around world. The characteristics of impulse coupling and reducing the speed and de-orbit with space debris induced by laser irradiation are utilized in their removal. According to the two characteristics, four key problems, that were space debris plasma plume induced by laser ablation, measurement of space debris impulse by laser ablation, space debris orbit estimating and laser parameters in space debris removal, were discussed in detail. The concerned technology difficulties, the adopting research methods and the realized ability level were analyzed. Based on the above discussion, it can provide solid basis for its future project realization.

**Key words:** space based laser; orbital debris; plasma plume; impulse; de-orbit

收稿日期: 2016-01-11; 修订日期: 2016-01-25

基金项目: 国家 863 计划; 国家自然科学基金(11502301)

作者简介: 洪延姬(1963-), 女, 研究员, 博士后, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: hongyanji@vip.sina.com

通讯作者: 金星(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术、激光清除空间碎片技术研究。Email: jinxing\_beijing@sina.com

## 0 引言

随着日益频繁的人类航天活动,造成空间碎片数目急剧增加,其中尺寸为 1~10 cm 的厘米量级的空间碎片,由于数目较多无法规避、尺寸较大结构防护困难,被公认为是对在轨航天器威胁最大的空间碎片<sup>[1-3]</sup>。国内外学者一直在探寻清除厘米级空间碎片的有效方法,其中,高能纳秒脉冲激光清除方法脱颖而出,成为研究热点<sup>[4-7]</sup>。

目前,激光清除空间碎片以欧盟和 NASA 分别资助的 CLEANSPACE 计划<sup>[3]</sup>和 ORION 计划<sup>[8-10]</sup>最具代表性。CLEANSPACE 和 ORION 计划主要研究地基激光平台下的厘米级空间碎片清除技术,但随着高能量、轻质化固体激光器技术的不断发展,同时由于天基平台激光不受大气传输效应影响、空间碎片目标捕获和跟踪方便,以及适合于消除碎片对大尺寸和长寿命的重大航天器撞击的影响,也有学者提出了天基平台激光的空间碎片清除技术。早在 1989 年, Metzger<sup>[11]</sup>等学者就提出了天基激光清除空间碎片的构想,将激光器安装在核动力的宇宙飞行器或卫星上,利用单脉冲激光能量 10 kJ、重频 1 Hz、波长 248 nm 的氟化氦激光清除空间碎片。德国航天研究中心 Wolfgang<sup>[12]</sup>等对天基激光清除空间碎片进行了进一步的系统研究, Wolfgang 对碎片及激光器运行轨道、激光器参数、激光光束传播、碎片材料及质量、碎片环境等多方面进行了分析,并对天基激光站系统参数进行了初步设计,提出了可行的技术方案。此文通过分析天基平台激光清除空间碎片原理,梳理总结相关关键技术;在关键技术问题中,分析面临的技术难点,可采用的研究方法,以及需要实现的技术水平。通过开展激光与空间碎片的冲量耦合机理实验,为空间碎片降轨操作提供冲量大小和方向;通过开展空间碎片变轨分析和清除方案设计,为空间碎片清除技术的进一步工程化奠定基础。

## 1 天基平台激光清除空间碎片原理

激光清除空间碎片技术是激光技术与推进技术的交叉和融合技术,它巧妙地利用了空间碎片在激光辐照下的冲量耦合特性和冲量作用下的减速降轨

特性。激光辐照下的冲量耦合特性是指激光与碎片相互作用,将激光能量转化为机械能,产生烧蚀反喷冲量的特性;冲量作用下的减速降轨特性是指空间碎片在反冲冲量作用下,碎片的轨道速度减小,进而降轨进入大气层的特性,最终碎片在气动加热下烧毁达到清除的目的。天基平台激光清除空间碎片同样是巧妙地利用了碎片在激光辐照下的冲量耦合特性,如图 1 所示;和冲量作用下的减速降轨特性,如图 2 所示。因此,冲量耦合特性和减速降轨特性是激光清除空间碎片中的核心问题。

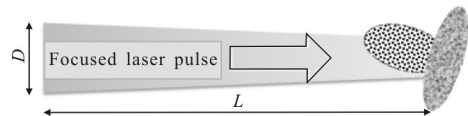


图 1 脉冲激光与空间碎片作用的冲量耦合过程  
Fig.1 Impulse coupling progress of pulse laser and space debris interaction

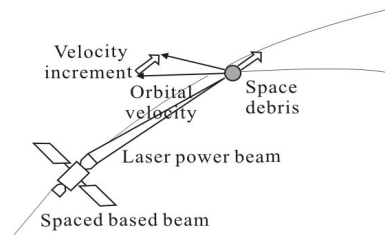


图 2 天基平台激光清除空间碎片原理示意图  
Fig.2 Principle diagram of space based laser orbital debris removal

## 2 关键问题

围绕着激光清除空间碎片中的两大核心问题,国内外学者初步开展了理论和实验研究工作,但从激光清除空间碎片工程化需求出发,仍有许多基础性工作需要突破。如在冲量耦合阶段中,激光辐照下空间碎片等离子体羽流喷射决定了碎片获得冲量方向及作用时间,由于激光作用时间极短,等离子体羽流喷射时间也极短,即超快过程下的等离子体喷射测量问题和瞬间作用下的高精度冲量测量问题;碎片在冲量的作用下,轨道速度变化导致飞行轨道发生改变,即天基平台激光辐照下空间碎片轨道预测关键问题;综合激光与碎片的冲量耦合特性,碎片减速降轨所需的激光能量等约束条件,优化激光器参

数指标设计问题,即用于空间碎片清除的天基平台激光器参数设计关键问题。

**2.1 激光辐照下空间碎片等离子体羽流喷射测量**

激光辐照下碎片等离子体羽流演化过程是碎片获得反喷冲量的复杂过程,其基本物理过程为:激光辐照空间碎片表面,随着入射激光功率密度增大,空间碎片表面物质熔融、汽化、离化,形成等离子体羽流,等离子体羽流的超高速反喷使得碎片获得反喷冲量,将激光能量转换为反喷动能。并且,随着入射激光功率密度进一步增大,等离子体羽流离化程度加强,对后续入射激光产生屏蔽作用。

对于冲量方向测量,可通过对烧蚀产生的等离子体羽流反喷方向规律获得。纳秒激光辐照典型空间碎片材料形成的流场具有以下特征:自发光强,由于激光峰值功率密度较高,形成的等离子体强烈自发光对于流场显示有极大的干扰;时间尺度短,等离子体流场高速膨胀,因此形成时间很短,时间尺度小于 100 ns;流场尺寸小,典型流场视场实际尺寸一般小于 10 mm×10 mm,而且,由于分辨率的需求较高,分辨能力不低于 1 mm;以上特征给等离子体流场瞬时诊断带来了较大的难度。激光纹影/阴影法作为一种成像诊断技术,广泛应用于流场显示领域,可以对流场进行定性或定量的分析。脉冲激光烧蚀碎片产生瞬变等离子体流场,等离子体流场的密度变化导致流场各处折射率不同。通过探测光经过等离子体流场发生偏折,改变相机 CCD 上的光强分布,并将光强分布转换成明暗不同的阴影图像获得等离子体演化过程,如图 3 所示。针对冲量方向测量,利用上

述方法,通过合理设计光路,探测光衰减抑制,纳秒级曝光以及激光器与相机的精确控制时序,最终实现纳秒量级时间分辨率、毫米量级空间分辨率,获得等离子体流场演化过程<sup>[13-14]</sup>,得到冲量方向和作用时间的演化规律。

**2.2 激光辐照下空间碎片冲量耦合效应测试技术**

冲量耦合系数定义为碎片获得冲量与注入碎片表面的激光能量比值。冲量耦合系数越大,碎片所获得的冲量越大,即碎片获得的速度增量越大。冲量耦合系数随着激光功率密度变化规律,称为冲量耦合特性,采用冲量耦合特性曲线表示。冲量耦合特性曲线分为两个阶段,第一阶段冲量耦合系数逐渐增大阶段,表示空间碎片表面物质熔融、汽化、离化过程,第二阶段冲量耦合系数逐渐减小阶段,表示由于离化程度加强对后续入射激光产生屏蔽过程。在两个阶段的过渡区,冲量耦合系数最大,称为最佳冲量耦合区,如图 4 所示。

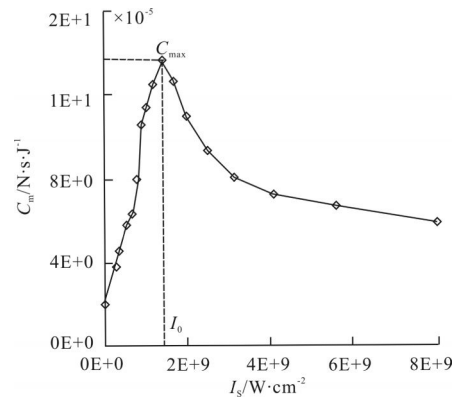


图 4 铝冲量耦合系数随激光功率密度变化

Fig. 4 Impulse coupling coefficient of Al vs laser power density

在最佳冲量耦合区,碎片获得最大反喷冲量,即最大反喷速度增量。在激光辐照下,为了碎片获得最大速度增量,激光功率密度选择大于等离子体形成阈值功率密度(大于 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup>)且在最佳冲量耦合区。

冲量耦合效应测试技术,主要采用缩比测试技术。在激光功率密度大于 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup> W/cm<sup>2</sup> 条件下,对于瞬间作用冲量(时间小于 100 ns),进行大量重复性同比测试,获得冲量耦合效应数据集,对于典型铝碎片材料,1J 激光器,所产生冲量为 10<sup>-5</sup>~10<sup>-4</sup> Ns 量级,因此,冲量耦合效应测试技术难点在于瞬间作用

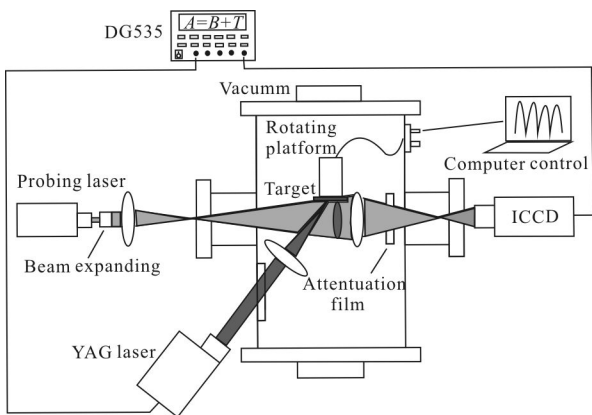


图 3 等离子体反喷羽流特性测量系统

Fig. 3 Plasma plume inject measurement system

的微小冲量的高精度测量。

针对瞬间作用、微小冲量、高精度测量的技术难点,可通过研究激光干涉差动转角高分辨率测量方法,以及高精度激光光学系统设计、连续波激光干涉角位移测量、高刚度枢轴和电磁阻尼补偿等相结合的扭摆测量冲量方法<sup>[15-17]</sup>,研究隔振平台和滤波方法降低测试系统噪声,利用微冲量测量系统的附加质量块和电磁力自标定方法,实现  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  Ns 量级瞬间作用微冲量的高精度测量,解决碎片冲量耦合测试中微小冲量高精度测量难题,为构建典型碎片材料的冲量耦合特性数据集,提供测试和评价技术。

### 2.3 天基平台激光辐照下空间碎片轨道预测技术

空间碎片在激光作用下获得反喷冲量,导致碎片轨道速度减小,近地点高度降低。激光辐照下空间碎片获得的反喷冲量与激光参数、空间碎片形状等因素有关。因此,有必要对空间碎片由于反喷冲量引起的轨道变化问题进行研究,为激光清除空间碎片方案设计和效果评估提供依据。

以往国内外研究方法的主要缺点在于不考虑碎片形状特性,将其当作球形或无旋转碎片,并且清除方法上,主要采用激光辐照下碎片获得变轨速度增量,降低碎片近地点高度,坠入大气层烧毁方法。实际上空间碎片旋转运动是存在的,并且目前还无法探测和辨识。空间碎片的旋转运动是以下原因引起的:(1)形成碎片过程中,造成自身转动;(2)形成碎片后与其它物体碰撞,改变运动状态,造成转动;(3)激光清除碎片过程中,产生的冲量矩,造成转动。并且碎片坠入大气层后,旋转运动不断改变气动阻力。

针对空间碎片旋转运动无法辨识的技术难点,认为碎片随机旋转,可建立随机旋转碎片的速度增量和角速度增量分析模型,进而提出激光辐照下旋转碎片的速度增量计算方法和旋转碎片大气环境下气动阻力计算方法<sup>[18]</sup>。并且建立碎片清除的降轨/升轨、同面/异面变轨模型,提出碎片激光烧蚀驱离指定轨道方法,例如驱离重大航天器轨道(包括降轨坠入大气层烧毁方法),以及碎片激光烧蚀驱入指定轨道方法,例如驱入指定的废弃轨道,达到激光清除碎片目的。通过上述研究,可解决碎片激光辐照下运动状态分析难题,为激光清除空间碎片提供碎片轨道分析和变轨清除设计方法和手段。

### 2.4 用于空间碎片清除的天基平台激光器参数设计

激光器参数设计过程涉及碎片冲量耦合效应、激光传输特性等多种因素,是多参数综合设计过程。激光与碎片物质相互作用过程,涉及激光波长、脉宽和功率密度;激光传输特性涉及激光传输的能量衰减和光束质量;激光器参数包括波长、脉宽、单脉冲能量、重复频率和平均功率。

激光器参数设计的优化目标是最佳冲量耦合,使得碎片获得最大速度增量。要求激光功率密度大于等离子体形成阈值,并在最佳冲量耦合区。激光波长选择,主要考虑远场光斑尺寸大小,激光波长越大,远场光斑尺寸越大,获得最佳冲量耦合条件下,对激光器平均功率要求越高。激光脉宽选择,主要考虑最佳冲量耦合效应,激光脉宽与最佳冲量耦合的激光功率密度,存在非线性关系,称为非普斯幂指数律。激光器参数设计方法是按照激光聚焦方式远距离传输并远场光斑覆盖碎片条件下,以远场激光满足最佳冲量耦合为目标,再考虑激光传输过程中能量衰减和光束质量,反演计算确定近场激光光斑尺寸和近场功率密度,进一步换算为激光器参数。

针对激光器参数设计是多参数综合设计的技术难点,以碎片获得最大速度增量为设计优化目标,在冲量耦合效应实验数据集基础上,进一步实验验证非普斯幂指数律,为多参数综合设计奠定实验基础;根据远场激光获得最佳冲量耦合条件,确定激光波长、脉宽和功率密度,再考虑激光传输过程中能量衰减和光束质量,反演计算确定近场光斑尺寸和近场功率密度,并换算为激光单脉冲能量;根据激光清除空间碎片方案中对总冲量的要求,确定激光器重复频率和平均功率,具体过程如图 5 所示。解决激光器

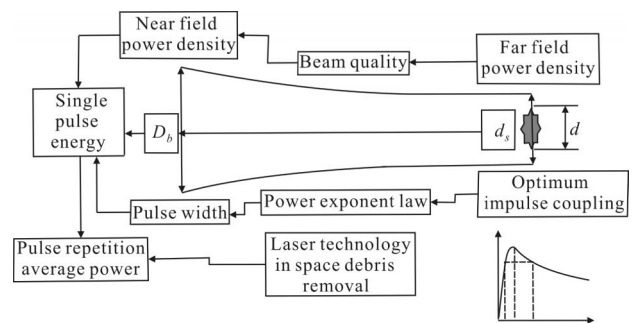


图 5 用于碎片清除的激光多参数设计

Fig. 5 Laser parameters design for space debris removal

参数的多参数综合设计难题,为激光清除碎片中激光器参数选择和方案设计,提供设计和分析方法。

必须要指出的是在激光清除空间碎片中,空间碎片的捕获、跟踪同样也是一个重要环节。一般采用被动光学系统、雷达和激光雷达系统等,分为粗跟踪和精跟踪。首先是用大视场捕获搜寻和发现目标,将捕获目标信息交给粗跟踪控制系统,随后将目标引导到精跟踪传感器视场时进入精跟踪状态,进一步修正发射轴方向对准目标完成跟踪瞄准。以天基平台激光清除碎片为例,进一步说明相关参数。以天基激光器 100 km 作用距离为例,雷达视场角为  $0.5^\circ$  (相当于  $8\,700\ \mu\text{rad}$ ) 时,可以在 100 km 距离上探测区域  $200\ \text{m} \times 200\ \text{m}$ ; 根据国外数据推断<sup>[9]</sup>, 空间中小型物体流量在高密度区域(一般在 800 km 轨道高度左右)峰值达到  $1.4 \times 10^{-4}\ \text{m}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ , 假设在高密度轨道上, 以每小时均能探测到 10 个小型碎片保守估计, 那么粗跟踪区域约为  $300\ \text{cm} \times 300\ \text{cm}$ , 还需要精跟踪机制, 远场推进激光的光斑大小为  $50\ \text{cm} \times 50\ \text{cm}$ , 那么碎片定位的激光雷达角分辨率需要达到约  $0.09\ \mu\text{rad}$ 。一旦粗跟踪激光指向预测的碎片位置, 并且将光斑减小到推进激光最小光斑尺寸, 推进激光重复发射强激光, 进行碎片降轨操作, 在降轨操作过程中保持粗跟踪和交接, 一旦碎片离开推进激光发射窗口, 雷达信息处理控制系统可评估前一次碎片降轨效果并进行降轨轨道参数记录。

### 3 结束语

激光清除空间碎片具有无污染、高效率、低成本等优点, 被公认为是减缓空间碎片危害的一种有效途径。以激光清除空间碎片为应用背景, 紧密围绕核心问题: 碎片的冲量耦合特性和碎片的减速降轨特性, 系统地讨论了激光辐照碎片等离子体羽流喷射测量、激光辐照空间碎片冲量耦合效应测试技术、空间碎片的轨道预测问题以及天基平台激光器参数优化设计问题等亟待解决的关键问题研究。在激光辐照空间碎片等离子体羽流喷射测量中, 重点研究等离子体羽流的喷射方向及作用时间, 获得冲量耦合方向规律; 在激光辐照空间碎片冲量耦合效应测试研究中, 重点研究缩比实验下的冲量耦合数据, 获得冲量大小规律; 在空间碎片轨道预测问题中, 重点研

究碎片在激光辐照下的轨道变化问题, 获得碎片降轨规律; 在天基平台激光器参数设计中, 重点考虑多参数影响下的最优激光器方案设计, 为未来激光清除空间碎片技术工程化奠定技术基础。

### 参考文献:

- [1] Bonnal C, Ruault J, Desjean M. Active debris removal: Recent progress and current trends [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 85: 51-60.
- [2] Kaplan M H. Survey of Space Debris Reduction Methods[R]. AIAA-2009-6619, 2009.
- [3] Bruno Esmiller, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusion of the European project CLEANSPACE [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 45-54.
- [4] James T Early, Camille Bibeau, Claude Phipps. Space debris de-orbiting by vaporization impulse using short pulse laser [C]// High-Power Laser Ablation V, Proceedings of SPIE, 2004, 5448(PART1): 441-449.
- [5] Shen Shuangyan, Jin Xing, Chang Hao. Cleaning space debris with a space-based laser system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(4): 805-811.
- [6] Remi Soulard, Mark N Quinn, Toshiki Tajima, et al. ICAN: a novel laser architecture for space debris removal [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105: 192-200.
- [7] Phipps C R. A laser optical system to re-enter or lower low earth orbit space debris[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93: 20-33.
- [8] Phipps C R, Reilly J P. ORION: clearing near-Earth space debris in two years using a 30-kW repetitively pulsed laser [C]// XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, Proceedings of SPIE, 1996, 3092: 728-731.
- [9] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(9): 1283-1300.
- [10] Phipps C R, Albrecht G, Friedman H, et al. ORION: Clearing near-Earth space debris using a 20-kW, 530-nm, Earth-based, repetitively pulsed laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, 14(1): 1-44.
- [11] Metzger J D, Leclaire R J, Howe S D, et al. Nuclear-powered space debris sweeper[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(5): 582-590.
- [12] Schall W O. Laser radiation for cleaning space debris from

- lower earth orbits [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(1): 81–91.
- [13] Chang Hao, Jin Xing, Zhou Weijing. Experiment research on plasma plume expansion induced by nanosecond laser ablation Al [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S): 43–46. (in Chinese)  
常浩, 金星, 周伟静. 纳秒激光烧蚀铝等离子体羽流膨胀特性实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S): 43–46.
- [14] Ye Jifei, Hong Yanji. Plume field evolvement characteristics of the laser micro ablation for solid target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S): 47–51. (in Chinese)  
叶继飞, 洪延姬. 激光微烧蚀固体靶材羽流流场演化特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S): 47–51.
- [15] Wang Guangyu, Jin Xing, Ye Jifei. Principle of micro – impulse measurements using laser interferometry [J]. *Journal Propulsion Technology*, 2007, 28(5): 530–533. (in Chinese)  
王广宇, 金星, 叶继飞. 激光干涉仪测微冲量原理[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 530–533.
- [16] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 102–106. (in Chinese)  
叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 102–106.
- [17] Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Research progress in micro – laser plasma propulsion [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 319–326. (in Chinese)  
叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 激光等离子体微推进技术的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 319–326.
- [18] Chang Hao. Nanosecond laser ablation impulse coupling characteristics and its application in space debris removal[D]. Beijing: Academy of Equipment, 2014: 99–115. (in Chinese)  
常浩. 纳秒激光烧蚀冲量耦合特性及在空间碎片清除中的应用[D]. 北京: 装备学院, 2014: 99–115.
- [19] Heiner Klinkrad. Space Debris Models and Risk Analysis [M]. Germany: Springer, 2005: 59–112.