空间碎片云演变过程的阶段划分

董云峰 肖业伦 刘 佳 汪 颋

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 根据碎片云从破碎点开始向空间扩散过程中碎片密度和形状的变化规律,以几何形状和起主要作用的因素为特征,定义了球形、椭球形、绳形、螺旋线形、全方位弥漫直至球壳形六个演变阶段. 论述了在各个阶段的主要特征和对演变过程起主要作用的因素. 总结了与演变过程相关的轨道运动理论和研究方法,分析了各个阶段演变的动力学原理. 在球形阶段起主要作用的是分离速度;椭球形阶段可以利用线性化相对运动方程进行分析;绳形与螺旋线形在几何上有质变,但都有结点和结线,并可以利用速度增量理论分析和解释其存在的原因. 轨道摄动力消除了结点和结线,导致碎片云的全方位弥漫,并最终使碎片云趋于球壳形. 推导和罗列了各阶段转换标志点时刻的计算公式,利用计算机仿真的方法,给出了近地轨道各个阶段碎片云分布示意图,验证了演变过程阶段划分的合理性.

关 键 词: 碎片云; 空间碎片; 空间飞行; 飞行动力学

中图分类号: V 412.4^{+}1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0148-05

Orbital debris clouds evolution phase definition

Dong Yunfeng Xiao Yelun Liu Jia Wang Ting

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Orbital debris clouds evolution phase was defined as sphere, spheroid, rope, spiral, spreading and shell, based on the geometry shape and debris density in the evolution from the initial breakup point to the final coverage of earth. The shape character and the key drive sources were addressed in each phase. Space craft orbital mechanics theory and research method were reviewed. The evolution dynamics principle was analyzed. The separate velocity decides the shape and size during the sphere phase. Linear relative motion differential equation can be used to reduce the debris density model. Rope and spiral is distinguished from geometry, orbital maneuver theory is used to analysis the existence of pinch point and pinch line. The orbital perturbation differences of each debris in clouds eliminate the pinch region and induce the omnibearing spreading and the final figuration of the shell. The time mark between the phases was given and calculation formula was reduced and listed. The debris clouds evolution phase was visualized through computer simulation and the phase definition rationality was verified.

Key words: orbiting debris clouds; space debris; space flight; flight dynamics

过去几十年人类对太空的开发导致地球周围存在大量空间碎片,对未来空间任务的实施构成了威胁. 空间碎片绝大部分是由于空间飞行器及其运载器解体后形成的,新的爆炸事件可能会引起空间碎片密度的进一步增大. 另一方面,在爆炸发生后较短的时间内,某个区域的碎片密度会显著增大,影响航天任务的执行. 例如,载人飞船与运载器末级分离后,如果末级发生爆炸,载人飞船

收稿日期: 2005-08-12

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2004AA811054)

作者简介: 董云峰(1965-), 男, 内蒙古包头人, 副教授, sinosat@buaa.edu.cn.

可能会经过或穿过由爆炸产生的碎片云.

国内外学者对碎片云的演变已做了很多研究工作. V. A. Chobotov 在 1987 年列出了碎片相对释放卫星位置随时间变化的线性化方程[1],指出了碎片云演变阶段中具有代表性的结点与结线的形成. 1990 年, Gautam D. Badhwar 和 Arjun Tan 对卫星碎裂时各碎片获得的分离速度进行分析和统计,把碎片云近似为球形,根据球形假设计算出碎片云的体积和密度[2]. 1992 年, Kevin R. Housen 以卫星轨道动力学为理论基础,比较全面地总结了碎片云的短期演变问题[3],明确划分了碎片运行一个周期后的螺旋线形阶段以及全方位弥漫阶段. J. P. Oliver 等也研究了碎片云短期演变特性[4],以 R. R. Nazirov 和 J. Ashenberg 为代表的其他一些学者更偏重研究长期摄动对碎片云演变的影响[5,6]. 时至今日,空间碎片仍然是人类关注的焦点[7].

1　碎片云演变的研究方法

描述碎片云在演变过程中的主要参数是碎片云的密度和形状. 从动力学过程分析,碎片云的演变完全由碎裂时的空间环境和每个碎片的初始运动状态决定.

影响演变过程的主要因素是碎裂前飞行器的飞行轨道和碎裂时各个碎片的质量、面积大小与分离速度. 碎片的分离受多种因素的干扰,特别是失效航天飞行器的碎裂,人类目前对其了解还很不足,只知道碎裂的核心原因是飞行器失控后仍含有内能. 碎片云的分离是一个不确定性事件,必须用概率论的方法描述分离速度.

概率论描述一个不确定物理参量是用分布的概念. 本文演示案例假设碎片向空间各个方向均匀散布,各年碎片的质量、面积和分离速度服从正态分布. 不同分布对演变阶段的划分影响较小[8].

碎片云中包含的碎片数量众多,根据碎片质量、面积和分离速度的概率描述,可以得到一组符合概率分布的采样值. 得到了每个碎片的分离速度,把对不确定性事件的研究转变为对确定性事件的研究,再给定碎裂时刻和碎裂前飞行器飞行轨道,得到了每个碎片的初始运动条件. 不带电碎片相互间的万有引力极小,完全可以忽略. 将每个碎片看作独立运行的航天器,这样就可以通过求解航天飞行器轨道动力学方程计算给定时刻每个碎片的位置,得到不同时刻碎片云演变示意图.

在本文所给的示意图中,碎裂前飞行器飞行在高度为 600 km,倾角为 97.78°的近地圆轨道上,碎裂时碎片以 200 m/s 的速度向空间均匀释放.

2　碎片云演变阶段的划分

本文把碎片云的演变阶段划分为球形阶段、椭球形阶段、绳形阶段、螺旋线形阶段、全方位弥漫和球壳形六个阶段.

2.1　球形阶段

球形阶段是指碎片云释放初期在分离速度的作用下急剧向外扩张的阶段.

在分离初期,影响碎片云演变的主要因素是碎片间的分离速度. 分离速度的大小决定碎片云体积增大的速率,分离速度的方向决定碎片云的形状.

若碎片以固定速度向空间均匀释放,则碎片云呈球壳形;若速度大小服从正态分布,则碎片云为实体球;若碎片云定向释放,则碎片云呈以分离点为顶点的圆锥体. 由于圆锥体是球体一部分,因此选取球形为这一阶段命名.

图 1 是碎片分离 60 s 时在碎片云中心为原点的轨道坐标系中的形状示意图.

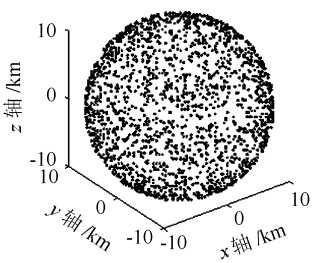


图 1　碎片释放 60 s 后形状

2.2　椭球形阶段

碎片云的椭球形阶段是指碎片云由初始分离阶段形成的球体不断扩大的同时演变为一个椭球的过程. 图 2 给出了碎片云椭球形阶段示意图.

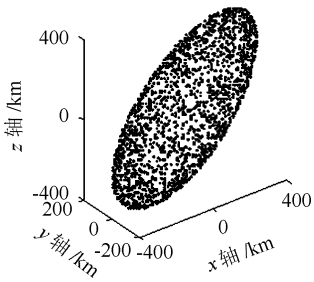


图 2　碎片释放 1 400 s 后形状

定义椭球形阶段的主要目的是突出表明相对运动规律已开始对碎片云的演变产生影响. 在这一阶段,碎片间相对运动可以利用线性化方程描

述.

碎片分离获得速度增量后,将速度增量正交投影在飞行速度方向、轨道法向方向和与飞行速度垂直的径向方向. 飞行速度方向的速度增量造成沿飞行方向的长期漂移运动,其它两个分量不产生长期项,轨道法线方向的速度增量造成沿轨道法向方向的周期振荡运动,沿径向方向的速度增量造成轨道平面内的椭圆运动,三个运动情况的叠加形成了总运动规律.

获得沿飞行方向速度增量的碎片,其机械能增加,轨道半长轴增大,轨道周期增大,碎片与地心连线的角速度减小,向碎片云中心的后上方漂移;与此相反,获得逆飞行方向速度增量的碎片,其机械能减小,轨道半长轴减小,轨道周期减小,碎片与地心连线的角速度增大,向碎片云中心的前下方漂移. 这样形成的椭球是朝前下方倾斜的.

在碎片云演变的椭球阶段,分离速度与相对运动规律同时在起作用,椭球的体积仍在增大,不仅是沿飞行速度方向在拉长,沿轨道法线方向和径向方向也都在扩张.

需要强调的是,如果某一碎片获得了沿飞行速度方向的速度增量,分离速度的作用是让这一碎片沿飞行速度方向往前飞,而相对运动规律是让这一碎片飞往后上方,碎片飞行过程是这两种运动的叠加,其相对飞行轨迹与霍曼变轨的飞行轨迹一致,只是在方向上是相逆的.

同样的情况也发生在法向和径向上,分离速度的作用是让碎片云这两个方向扩张,而相对运动规律的作用是让碎片在此方向上作周期运动.

随时间增加,分离速度的影响越来越小,相对运动规律的影响占统治地位. 例如在法向和径向上,当演变到某一时刻,分离速度的作用再不能增大椭球在这两个方向上的轴距,而是完全由周期运动决定这两个方向上的轴距时,表明分离速度的作用已经终止. 这标志椭球形演变阶段的结束,绳形阶段的开始.

在球形阶段,分离速度占统治地位;到了椭球形阶段,分离速度和相对运动规律共同起作用;在绳形阶段,相对运动规律占统治地位,定义了椭球形演变阶段就将这种过渡过程表示清楚了.

由于从球形演变到椭球形没有明显的突变,因此定义椭球形阶段的起始标志点就有一定的主观因素. 当演化时间超过0.05个轨道周期时,最长轴比最短轴长5%,本文规定该时刻为椭球与球的分界点. 利用轨道周期计算公式可推出椭球形阶段的起始时刻为

$$T_{\text{ellipse}} = \frac{\pi}{10}\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \tag{1}$$

其中,a 为轨道半长轴;μ 为地球引力常数.

2.3 绳形阶段

碎片云的绳形阶段是指碎片云沿椭球的半长轴不断拉开,从而形成两头尖中间粗的绳形过程. 图3给出了碎片云绳形阶段示意图.

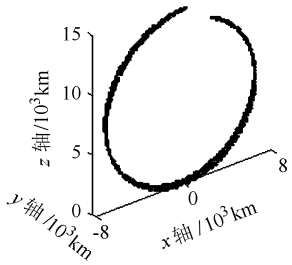


图3 碎片释放10 h后碎片云形状

进入绳形,相对运动规律对碎片云的演变起统治作用. 根据线化后的C-W方程,碎片在1/4个轨道周期内完成轨道平面内的一次相位转换. 也就是原来在轨道坐标系 x 轴方向和中心点有偏差的碎片,在1/4个轨道周期内转到了 z 轴方向上,z 轴方向的转到了 x 轴方向上,y 轴上作正弦振荡. 原来为最大位移处的碎片经1/4个轨道周期内位移为零,相对速度最大;原来位移为零的刚好与上述情况相反. 这种转换的完成标志着分离速度对碎片云演变影响的结束,可以定义为由椭球形阶段至绳形阶段的分界点,利用轨道周期公式推导出绳形阶段的起始时刻为

$$T_{\text{rope}} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \tag{2}$$

如果碎片分离速度较小,绳形阶段要延续好几个轨道周期,在此期间内,绳形并不是总保持二头尖中间粗的形状不变. 在经过碎裂点时,绳形变细,这就是节点,节点的特性在下节讨论.

碎片云进入绳形阶段后,由于绳头和绳尾轨道周期不同,绳子会越拉越长. 当相对距离超出一定范围后,线性化C-W方程已不适应了. 采用碎片云中心点轨道坐标系描述碎片云形状也缺乏几何根据,这也表明了绳形与椭球形的不同.

碎片云沿绳形继续拉长直至绳头追上绳尾,从几何图形上有了质的变化,这标志绳形阶段的结束,螺旋线形阶段的开始.

2.4 螺旋线形阶段

碎片云的螺旋线形阶段是指碎片云从整体上

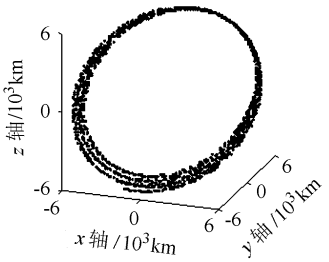


图 4　碎片释放 1.5 d 后碎片云形状

表现为一条螺旋线形到螺旋线逐步解体的过程. 图 4 给出了在地球中心惯性坐标系中碎片云螺旋线形阶段示意图.

碎片云首尾相联的时刻为绳形阶段到螺旋线形阶段的分界点. 利用轨道周期计算公式,推导绳头与绳尾的角速度差,简化后得出碎片云螺旋线形阶段起始时刻的计算公式为

$$T_{\mathrm{ring}} = \frac{\pi}{3}\frac{a}{V_{\max}} \tag{3}$$

其中 $V_{\max}$ 为碎片的最大分离速度.

随着时间的推移,在轨道平面,螺旋线不断增长,绳头一次又一次的追上绳尾,螺旋线螺旋的圈数不断增加. 每增长一圈螺旋线所需要时间与 T_{ring} 相同.

在碎片云演变的螺旋线阶段,有两个碎片云高度集中的地方,文献上称之为结点和结线.

结点在空间碎片发生碎裂的地方,在碎裂发生时刻,各个碎片都在这一点,只是每个碎片的速度不同. 根据能量守恒原理,每个碎片都飞行在一条闭合轨道上,所以经过约一个轨道周期后,每个碎片还要通过这一点,就形成了碎片高度集中的结点.

结线在结点与地心连线的延长线上. 碎裂发生时,每个碎片有不同的分离速度,相当于获得了不同的速度增量,如果速度增量在轨道法线方向有分量,则这个碎片的轨道面发生了改变,结点与地心连线是新旧轨道平面的交线. 每个碎片轨道面的改变不一样,但结点与地心连线是它们共同的交线,此时若沿结点向地心看,碎片云类似双扇形. 显然,结线是共同交线的一部分,由于每个碎片都要在结点的另一端通过交线,所以在结线上碎片也高度集中,形成了密集的一条线.

碎片云在螺旋线形阶段的最主要特征是结点和结线的存在. 在碎片云演变的绳形阶段,结点与结线也存在,只是当飞离结点与结线时便不可见了. 当进入螺旋线形阶段后,结点与结线是一直存在的,直至在轨道摄动力的作用下,结点与结线模糊了. 结点与结线的消失标志着螺旋线阶段的结束.

2.5　全方位弥漫阶段

碎片云的全方位弥漫阶段是指碎片云中原来碎片密集的极点与极线区域变得不再密集,碎片向空间各个方向不断扩散的过程. 在这个阶段,影响碎片云演变的主要因素是轨道摄动力的作用. 与前面演变阶段不同的是,轨道摄动与碎片云中心的轨道根数有密切的关系. 不同的轨道要素导致不同的碎片云弥漫形状.

当碎片云中心轨道为近地圆轨道时,主要摄动力为地球扁率和大气阻力. 由于各个碎片的轨道半长轴和轨道倾角不一致,地球扁率造成的轨道进动角速度不一致. 因此,原本相贴近的轨道面逐渐拉开,升交点赤经向各个经度弥漫. 由于轨道面拉开了,各个轨道面不再有共同的相交线,因此极线就不存在了. 图 5 给出了各个碎片轨道平面不断被拉开的示意图.

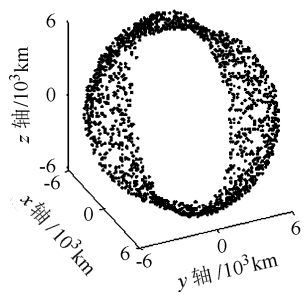


图 5　近地轨道碎片释放半年后碎片云形状

地球扁率同样也引起各碎片轨道近地点幅角漂移率的不一致,这一因素使得各个碎片不再通过相同的结点,导致结点散开并最终消失.

大气阻力摄动使得碎片运行的高度不断下降,因此碎片云最终演变为球壳形. 由于大气阻力总是存在的,在经过漫长的岁月后,碎片都会在大气中烧毁,碎片云的演变过程彻底结束. 各个碎片的面积质量比的不一致对碎片消失的时间也有一定影响. 图 6 给出近地轨道碎片云全方位弥漫阶段的示意图.

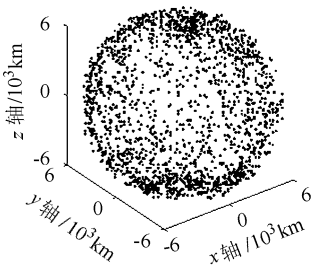


图 6　近地轨道碎片释放 2 a 后碎片云形状

当碎片云中心轨道为地球静止轨道时,引起各个碎片轨道平面进动的是日月引力摄动,引起星下点漂移的是地球非球形和太阳光压. 由于星下点经度的漂移比轨道进动要快得多,所以在静止轨道上,结点的消失比结线的消失快.

从原理上说,只有轨道平面与黄道和白道接近垂直,碎片轨道平面的进动才会停止. 由于黄道与赤道相差约23°,白道与黄道相差约5°,碎片在终止轨道进动时轨道倾角约67°. 考虑到在地球静止轨道,碎片还可能受到其它一些未知的摄动力的影响,碎片云应该最终能完成对空间的全向覆盖. 由于这一过程相对于人类的航天史太漫长了,现在还无法验证.

目前还未能找到一个突变或质变点来定义全方位弥漫阶段的起始时刻. 如果加入主观因素,认为碎片轨道间升交点赤经相差10°时结线已消失,进入了全方位弥漫阶段. 利用升交点漂移公式可以推出这一起始时刻的时间.

相对来说,全方位弥漫阶段的终止点更容易定义. 比如在近地轨道,当升交点赤经漂移最快的碎片轨道平面再一次追上升交点赤经漂移最慢的碎片轨道平面时,碎片云完成了对地球的包围,这一时刻可以定义为全方位弥漫阶段的终止.

通过升交点漂移公式得出最大漂移角速度差与分离速度的关系,2π 除以最大漂移角速度差可得到近地轨道全方位弥漫阶段的终止时刻的表达式[3]

$$T_{\text{space}} = \frac{2\pi a^3}{3J_2R_e^2V_{\max}\sqrt{(7\cos i)^2 + \sin^2 i}} \quad (4)$$

其中,J_2 为地球引力摄动系数;R_e 为地球半径;i 为轨道倾角.

碎片云完成全方位弥漫后,基本上已经完成在方位上对地球的全方位覆盖,或者说,碎片已均匀分布在各个方向上了,但碎片半长轴的衰减是很缓慢的,这时候碎片云的演变就进入了最后的球壳形阶段.

2.6 球壳形阶段

碎片云进入球壳形阶段后最重要的特征是稳定和消亡. 稳定是指碎片在球壳内部分布是相对均匀的,不会随时间进一步出现较大的变化了. 消亡是指由于大气阻力的作用,球壳的外径和内径都在逐步减小,最终消失在大气层中. 因此,从原理上说,经过漫长的时间后,人类航天活动留下来的空间碎片会从很远的静止轨道一直延伸到大气层顶部.

3 结束语

以轨道动力学为基础,针对不带电碎片,根据影响碎片云演变的因素和碎片云形状的几何特征划分碎片云的演变阶段是基本上能形成一套完整理论体系的. 碎片云演变的力学分析过程也得到了动力学仿真结果的认同. 将碎片云的演变过程划分为球形、椭球形、绳形、螺旋线形、全方位弥漫到球壳形阶段是基本合理的.

参考文献(**References**)

[1] Chobotov V A. Dynamics of orbiting debris clouds and the resulting collision hazard to spacecraft[R]. IAA-87-571, 1987

[2] Gautam D Badhwar, Arjun Tan. Velocity perturbation distributions in the breakup of artificial satellites[J]. January of Spacecraft, 1990, 27(3):299~305

[3] Kevin R Housen. The short-term evolution of orbital debris clouds[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 1992, 40(2): 203~213

[4] Oliver J P, Weinberg J L, Singer S F. Estimation of debris cloud temporal characteristics and orbital elements[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(8):103~106

[5] Nazirov R R. One approach to the analysis of space debris evolution due to atmospheric drag[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(8):161~165

[6] Ashenberg J, Broucke R A. The effects of the earth's oblateness on the long-term dispersion of debris[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(8): 171~174

[7] Carsten Wiedemann, Michael Oswald, Sebastian Stabroth. Cost of space debris impacts on a LEO satellite [R]. AIAA 2004-5922, 2004

[8] 董云峰. 空间目标演变与预报的几个问题[D]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2005
Dong Yunfeng. Space target orbit determination and space debris clouds evolution and collision probabilities[D]. Beijing: School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (in Chinese)