

doi: 10.7690/bgzdh.2018.02.017

航天器碰撞解体模型分析比较

齐 跃¹, 李怡勇², 来嘉哲²

(1. 装备学院研究生院, 北京 101416; 2. 装备学院航天指挥系, 北京 101416)

摘要: 针对航天器空间碰撞解体碎片对在轨航天器造成威胁的问题, 对空间航天器撞击解体模型进行分析比较。对目前国内外的航天器空间碰撞解体模型做了综述, 并介绍 3 种国内外具有代表性的空间航天器撞击解体模型——Battelle 撞击解体模型、NASA 标准模型以及我国中国空气动力学研究与发展中心的 CARDC-SBM 撞击解体模型, 以 P-78 卫星为例通过 Matlab 计算航天器碰撞解体模型结果并分析其各方面异同。分析结果表明: 从碎片的尺寸、面质比和分离速度的分布来看, 3 种模型各有优劣。该研究为后续相关研究梳理了理论思路。

关键词: 航天器; 空间碰撞; 解体; 模型; 碎片

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Comparison and Analysis on Spacecraft Collision Breakup Model

Qi Yue¹, Li Yiyong², Lai Jiazhe²

(1. College of Graduate, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Department of Equipment Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to solve the problem of spacecraft collision caused by space debris, the collision model is analyzed and compared. This paper mainly introduces three kinds of spacecraft collision breakup models which are representative at home and abroad, including Battelle collision breakup model, NASA standard collision breakup model and CARDC-SBM of China Aerodynamics Research and Development Center. Finally, taking P-78 satellite as example, calculate spacecraft collision breakup model by Matlab and analyze the similarities and differences. The results show that the models have their own advantages and disadvantages in terms of the size of the fragments, area-to-mass distributions and delta velocity distributions. It provides theoretical foundation for the further study.

Keywords: spacecraft; space collision; collision breakup; model; fragment

0 引言

世界航天领域快速发展也加快了空间环境的恶化。据统计, 截止目前共发生过 200 次以上空间航天器解体事件, 产生的碎片占据了地球轨道物体的一半^[1]。这些碎片主要集中分布在近地轨道和地球同步轨道, 对于航天活动来说就如同定时炸弹一样, 时刻威胁着在轨的航天器^[2]。一次航天器在空间的高速碰撞解体会带来几千颗甚至几万颗碎片^[3]。研究航天器空间碰撞解体、建立空间航天器撞击解体模型, 对于预测和描述碰撞解体所产生的碎片尺寸、面质比和分离速度等特性, 以及航天器的风险评估都具有非常重要的意义。

从 20 世纪 70 年代初开始, 人们就开始了空间航天器撞击问题的研究。因为航天器撞击解体是一个非常复杂的过程, 并且对试验的条件要求较高, 所以直到目前人们还无法对其进行理论描述, 现有模型主要来源于利用试验数据拟合的经验模型。在前人的不懈努力下, 先后也发展了几种模型^[4]: 欧

空局的 Battelle 撞击解体模型、美国 Aerospace 公司的 IMPACT 模型、Kamman Science 公司的 FAST 模型、目前应用最广泛的是 NASA 建立的标准模型、我国的中国空气动力学研究与发展中心针对 NASA 标准模型的不足进行改进, 建立了 CARDC-SBM 模型。笔者针对 3 种国内外主要的模型进行综述, 并在此基础上进行数据的比较分析。

1 3 种解体模型介绍

1.1 Battelle 模型

20 世纪 90 年代, 欧空局在继承早期方法的基础上, 对早期模型进行参数修正, 建立了 Battelle 撞击解体模型, 之后 Battelle 模型应用于欧空局的空间碎片环境模型 MASTER 99^[5]。该模型对质量分布采用了一个早期模型相似的幂律公式, 表达式如下:

$$N(m) = A \left(\frac{m}{m_{\text{tot}}} \right)^{-B} \quad (1)$$

收稿日期: 2017-10-14; 修回日期: 2017-11-22

作者简介: 齐 跃(1993—), 男, 辽宁人, 蒙古族, 从事兵器科学与技术研究。

其中： A 为比例系数； B 为幂系数； m 为分布质量，kg； m_{tot} 为总的解体质量， $m_{\text{tot}} = m_e$ ， m_e 是喷出部分的质量，kg。

B 不再是一个常数，而被定义为一个与碰撞影响程度有关的变量：

$$B = 0.6 + 0.15P(1 - \hat{E}_p^* / \hat{E}_p) \quad (2)$$

式中： \hat{E}_p 为比能，定义为 $\hat{E}_p = \frac{m_p v^2}{2m_t}$ ， m_p 为射弹质量；

修改临界比能 $\hat{E}_p^* = 40 \text{ J/g}$ ，即当比动能大于临界值时，目标与射弹均完全解体；式中 $P \in [0,1]$ 为喷出质量与相撞物体总质量的比例：

$$P = \begin{cases} \frac{m_e}{m_t + m_p}, \hat{E}_p < \hat{E}_p^* \\ 1, \hat{E}_p > \hat{E}_p^* \end{cases} \quad (3)$$

根据质量守恒定律推算得出

$$A = \left(\frac{1-B}{B}\right)^B \quad (4)$$

Battelle 模型仍然使用早期模型的碎片质量和有效面积，并将碎片等效为一个球，但是对密度的公式进行了修改：

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\text{max}}, d \leq d^0 \\ \rho^* \hat{d}^{2p-3}, d > d^0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\hat{d} = d/d^*$ 为无量纲量， $d^* = 1 \text{ cm}$ 为参考直径； $d^0 = 0.47281 \text{ cm}$ 为切换直径，表示碎片平均分离速率最大时对应的碎片直径； $\rho^* = 2700 \text{ kg/m}^3$ 是参考密度； $\rho_{\text{max}} = 4700 \text{ kg/m}^3$ 是密度上限；系数 $q=1.13$ 。整理上述公式可以得到以特征尺寸为独立变量的幂律公式：

$$N\left(\frac{\pi}{6}\rho d^3\right) = \left(\frac{1-B}{B}\right)^B \left(\frac{\pi}{6}\frac{\rho d^3}{m_{\text{tot}}}\right)^{-B}, \rho = \begin{cases} \rho_{\text{max}}, d \leq d^0 \\ \rho^* \hat{d}^{2p-3}, d > d^0 \end{cases} \quad (6)$$

Battelle 模型继续采用早期的速度分布模型：

$$\lg \Delta \hat{v} = \begin{cases} b_0 + b_2 \lg^2 \hat{d}, d \geq d_{\text{max}} \\ b_0, d < d_{\text{max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\Delta \hat{v} = \Delta v/v$ ， Δv 为碎片的平均速率，m/s， v 为撞击速率， μm ； $\hat{d} = d/d^*$ 为无量纲量； d_{max} 为切换直径，m。在早期模型的基础上对射弹的质量重新设置，对试验数据进行分析得出：

$$b_0 = -0.125, b_2 = -0.0676, d_{\text{max}} = -0.0676 \quad (8)$$

1.2 NASA 标准撞击解体模型

自 1970 年以来，NASA 轨道碎片计划办公室就开始收集在轨航天器爆炸和碰撞解体产生碎片的尺寸和速度分布，并对试验和空间收集的数据进行拟合建立解体模型。该模型在很大程度上是有限的，依赖于地面爆炸和超高速撞击试验。2011 年，NASA 又设计了 Debrisat 计划用来完善 NASA 标准模型^[6-7]，但是相关研究进展还未发布。NASA 模型依然使用 Battelle 模型规定的完全解体的条件，临界比能大于 40 J/g 时，完全解体。在一定程度上使高速碰撞解体模型有了质的飞跃，选取了碎片的尺寸作为模型的独立变量，用碎片的面质比代替早期模型和 Battelle 模型的形状和密度的描述，使模型更加符合碎片的实际，详细模型描述见文献[5]。

模型的尺寸分布为

$$N(L_c) = 0.1 \times (m_{\text{tot}})^{0.75} \times L_c^{-1.71} \quad (9)$$

式中：碎片的特征尺寸描述为 $L_c = (x+y+z)/3$ ， x 、 y 、 z 分别表示 3 个方向的最大长度，m； m_{tot} 为撞击体和目标的总质量，kg。当灾难性条件不满足时， m_{tot} 为撞击体质量与速度的乘积。

解体产生的碎片的面质比 (A/M) 分布^[8]为：

$$D_{A/M}(\lambda_c, \chi) = \alpha(\lambda_c)N(\mu_1(\lambda_c), \sigma_1(\lambda_c), \chi) + (1 - \alpha(\lambda_c))N(\mu_2(\lambda_c), \sigma_2(\lambda_c), \chi) \quad (10)$$

式中： $\lambda_c = \lg(L_c)$ ； $\chi = \lg(A/M)$ ； $N(\mu, \sigma, \chi)$ 是标准正态函数。如果碎片特征尺寸超过 11 cm 时，采用双正态分布来描述，即 $\alpha \neq 1$ ；而碎片特征尺寸小于 8 cm 时，就采用单个正态分布描述，即 $\alpha=1$ 。

面值比分布中，航天器的相关系数^[9]如下：

$$\alpha = \begin{cases} 0, \lambda_c \leq -1.95 \\ 0.3 + 0.4(\lambda_c + 1.2), -1.95 < \lambda_c < 0.55 \\ 1, \lambda_c \geq 0.55 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_1 = \begin{cases} -0.6, \lambda_c \leq -1.1 \\ -0.6 - 0.318(\lambda_c + 1.1), -1.1 < \lambda_c < 0 \\ -0.95, \lambda_c \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} 0.1, \lambda_c \leq -1.3 \\ 0.1 + 0.2(\lambda_c + 1.3), -1.3 < \lambda_c < 0.3 \\ 0.3, \lambda_c \geq -0.3 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} -1.2, \lambda_c \leq -0.7 \\ -1.2 - 1.333(\lambda_c + 0.7), -0.7 < \lambda_c < -0.1 \\ -2, \lambda_c \geq -0.1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} 0.5, \lambda_c \leq -0.5 \\ 0.5 - (\lambda_c + 0.5), -0.5 < \lambda_c < -0.3 \\ 0.3, \lambda_c \geq -0.3 \end{cases} \quad (15)$$

解体产生碎片的速度增量 Δv 用单个正态分布描述^[10]，具有如下形式：

$$D_{\Delta v}(\chi, \delta) = N(\mu(\chi), \sigma(\chi), \delta) \tag{16}$$

式中：

$$\delta = \lg(\Delta v); \mu = \begin{cases} 0.9\chi + 2.9, & \chi \leq -0.1 \\ 0.2\chi + 2.83, & \chi > -0.1 \end{cases}; \sigma = 0.4$$

1.3 CARDC-SBM 模型

中国空气动力研究与发展中心在“空间碎片计划”项目支持下，系统地开展了卫星碰撞解体碎片特性的研究及建模。在 CARDC 的弹道靶设备上先后开展了多次模拟卫星的超高速撞击解体试验^[11]。模拟卫星采用铝合金六面体外形，包括简单和复杂 2 种内部结构。通过地面试验建立了如下模型^[1]：

依然采用特征尺寸 $L_c = (x + y + z) / 3$ 描述碎片大小。累积数量用 $N(L_c)$ 表示：

$$N(L_c) = t_0 \left(\frac{L_l}{\rho_l}\right)^{t_1} (m_p + \mu_c m_l)^{t_2 \lg\left(\frac{e_m}{0.3623}\right)} \times L_c^{(-1.47 - \lg \frac{v}{5.4})} \tag{17}$$

式中： L_l 为卫星尺寸； ρ_l 为卫星密度； m_p 为射弹质量； e_m 为弹丸撞击通道内的能量密度； μ_c 为卫星的解体程度，描述卫星完全解体粉碎质量与卫星初始质量的比值； v 为撞击速度； t_0 、 t_1 、 t_2 为常数。可以看出：表达式右边第一项反映的是卫星尺寸和体密度对其的影响，即在相同外形尺寸下，卫星体密度越大表明其内部结构和部件越复杂，对二次碎片具有更强的阻挡能力，产生的碎片数量越少。第 2 项 $m_p + \mu_c m_l$ 反映解体碎片的来源，幂指数 $t_2 \lg\left(\frac{e_m}{0.3623}\right)$ 表示撞击能量密度越大，产生的碎片数量也越多。第 3 项的幂指数表明撞击速度越高，碎片数量增长越快。

面质比分布模型为：

$$D(\chi) = \alpha_1 N(\sigma_1, \mu_1, \chi) + \alpha_2 N(\sigma_2, \mu_2, \chi) + \alpha_3 N(\sigma_3, \mu_3, \chi) \tag{18}$$

式中： χ 为碎片面质比的对数， $\chi = \lg(A/M)$ ； $N(\sigma, \mu, \chi)$ 为标准正态分布函数。3 个正态函数项分别代表卫星中主要的 3 种材料。

对于分离速度分布，此模型还没有相关描述，继续采用 NASA 标准模型的分离速度模型。

2 3 种模型计算案例比较

2.1 数据比较

经过几十年的发展，空间高速碰撞解体模型也经历了丰富发展的过程，试验环境和相关仿真软件

都取得了很大的进步，所以模型的精度也越来越贴近实际，逐渐完善。NASA 标准模型最具有代表性，相比早期模型和 Battelle 模型都有了质的飞越，使模型的输入更符合实际。NASA 标准模型以碎片的特征尺寸作为独立变量，代替了早期模型和 Battelle 模型中使用的碎片质量为独立变量的情况，在根本上改变了数据流。中国空气动力学研究与发展中心在分析 NASA 标准模型的基础上，以地面实验为数据来源，对 NASA 模型提出了改进的 CARDC-SBM 模型，为我国的空间高速碰撞的研究提供有力的基础支撑。

以上 3 种模型各有优缺点：在碎片的面质比方面，NASA 模型和 SBM 模型都抛弃了 Battelle 模型中碎片为球形和平均密度的假设，可以是任意的形状，用碎片的特征尺寸描述碎片的大小尺寸；NASA 模型和 SBM 模型分布分别采用了双正态分布和 3 次正太分布的形式描述面质比的概率分布。在碎片的分离速度方面，Battelle 模型仍然采用早期模型的基于碎片直径的平均分离速率；NASA 模型建立了面质比和分离速率的关系，由轨道的衰减速率计算的大碎片的面质比和速度具有较高的精度，所以 NASA 模型采用用面质比描述分离速度的方法是比较可信的；CARDC-SBM 模型在分离速度方面也继续采用 NASA 的速度分布公式，对于分离速度的方向假设为全向均匀分布。

2.2 解体模型仿真比较

由于难以在空间开展空间航天器高速碰撞方面的试验，所以数据来源不多，但美国 P-78 卫星撞击试验为模型的建立提供了可靠的数据来源。现以 P-78 卫星撞击试验作为典型案例，比较分析各种撞击解体模型之间的异同，即假定目标质量 $m_t=850$ kg，射弹质量 $m_p=16$ kg，撞击速度 $v=7.6$ km/s，发生了灾难性撞击，卫星完全解体。利用 3 种模型对事件进行仿真分析的结果如图 1 所示。

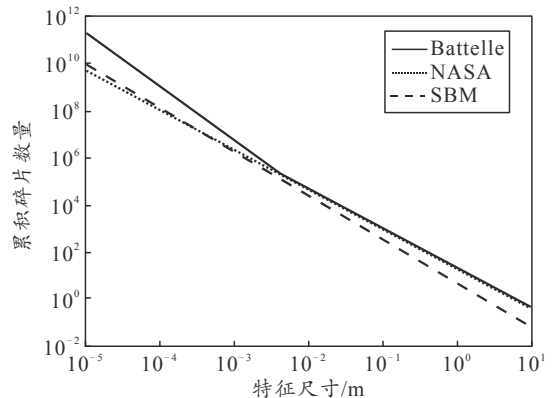


图 1 3 种模型尺寸分布比较

在对数坐标系中可以看出：3 种模型的大体趋势较为一致，都是随着尺寸的增大，表现出碎片的数量减少的性质，小尺寸碎片数量远远多于大尺寸碎片的数量。在图中 Battelle 模型受密度分段影响，在切换直径处出现一个转折点，跟其他 2 种模型相比数量较多，符合 Battelle 建模数据来源为地面试验的情况。

面质比分布如图 2 所示，可以看出：Battelle 模型由于密度分段的影响，使得其表现出在切换直径处出现了突变，并在后续过程中表现出递增的趋势。NASA 模型和 SBM 模型表现出相似的趋势，面质比相对分布比较集中。Battelle 模型表现出相同特征尺寸碎片具有相同的面质比，显然在这方面 Battelle 模型稍有欠缺。SBM 模型采用了 3 个正太分布的组合形式，表征航天器的 3 种主要材料，要比 NASA 标准模型从形式上更加贴切实际。

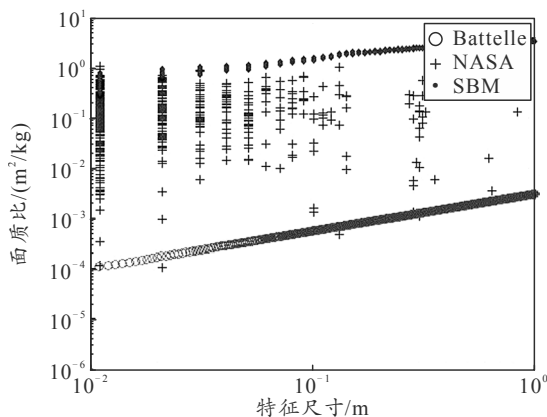


图 2 3 种模型碎片面质比分布的比较

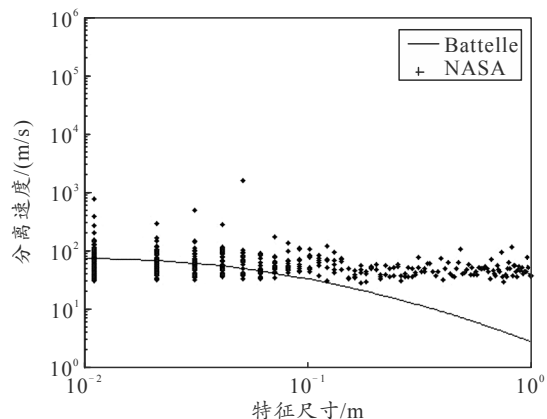


图 3 NASA 标准模型和 Battelle 模型分离速度比较

图 3 为 Battelle 模型和 NASA 标准模型计算得到的分离速度分布情况。从图中可以看出模型反映的一个大体趋势：随着特征尺寸的增大分离速率变小，NASA 标准模型的分离速率分布比 Battelle 模型更为广泛，CARD-C-SBM 模型由于采用 NASA 模型对于

分离速度的描述，所以和 NASA 的结果一样。

3 结束语

该系统总结介绍了 3 种国内外航天器碰撞解体模型，包括欧空局的 Battelle 模型、NASA 的 NASA 标准模型以及中国空气动力学研究与发展中心的 CARD-C-SBM 模型。对 3 种模型引用试验的数据进行分析，利用 Matlab 计算碎片的特性，包括碎片的尺寸、面质比和分离速度的分布。通过计算结果可以看出：在碎片尺寸分布方面，SBM 模型较 NASA 标准模型以及 Battelle 模型有一定的优势，更加精确，考虑的因素较多；在面质比分布方面，Battelle 模型具有局限性，而 NASA 标准模型和 SBM 模型表现出广泛性，更加合理；对于分离速度方面，显然 NASA 标准模型比 Battelle 模型更具有说服力；SBM 模型采用了 3 个正太分布的组合形式，表征航天器的 3 种主要材料，要比 NASA 标准模型从形式上更加贴切实际。该研究为后续的研究梳理了理论思路。

参考文献：

- [1] 兰胜威, 柳森, 李毅, 等. 航天器解体模型研究的新进展[J]. 实验流体力学, 2014, 28(2): 73-78.
- [2] 龚自正, 李明. 美俄卫星太空碰撞事件及对航天活动的影响[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 101-106.
- [3] 刘静. 空间碎片模式研究现状和进展[C]. 全国空间碎片学术研讨会, 2003.
- [4] 柳森, 兰胜威, 李毅, 等. 航天器解体模型研究综述[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 14-23.
- [5] AIAA. Upgrading the ESA-Master Model[Z]. 2000.
- [6] LIU J C, CLARK S, FITZ-COY N, et al. Debrisat - A Planned Laboratory-Based Satellite Impact Experiment for Breakup Fragment Characterization[C]// ESA Special Publication. ESA Special Publication, 2013.
- [7] JOHNSON N L, KRISKO P H, LIU J C, et al. NASA's new breakup model of evolve 4.0[J]. Advances in Space Research, 2011, 28(9): 1377-1384.
- [8] SAKURABA K, TSURUDA Y, HANADA T, et al. Investigation and comparison between new satellite impact test results and NASA standard breakup model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1567-1572.
- [9] KRISKO P H. The new NASA orbital debris engineering model ORDEM 3.0[C]// AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 2014.
- [10] 王一博, 谢玉龙, 陈侠, 等. 基于 Vega Prime 的飞行碰撞检测仿真系统设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(6): 84-86.
- [11] 柳森, 黄浩, 李毅, 等. 中国空气动力学研究与发展中心的空间碎片超高速撞击试验研究进展[J]. 载人航天, 2011, 17(6): 17-23.