

# 统计能量分析法在爆炸分离冲击 响应预示中的应用

王军评<sup>1</sup>, 毛勇建<sup>1</sup>, 黄含军<sup>1</sup>, 董龙雷<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621900; 2. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

**摘要:** 针对复杂结构的爆炸分离冲击问题, 文章采用统计能量分析方法对其响应进行了计算分析。首先对切割索产生的连续载荷进行了离散处理, 然后基于统计能量分析并结合虚拟模态综合法, 对航天器分离过程中的冲击响应进行了预示。得到的结果符合爆炸分离冲击环境下结构响应特征及其传递规律, 对航天器抗冲击设计与评估具有一定的参考价值。

**关键词:** 爆炸分离冲击; 统计能量分析法; 火工品装置; 结构响应

**中图分类号:** O38; TB53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2011)05-0414-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2011.05.002

## 0 前言

航天器的级间分离、有效载荷分离及附件展开等硬件动作大都采用了火工品分离装置。火工品分离装置动作时会对结构产生短时、高频、高幅值的复杂振荡型冲击环境<sup>[1-3]</sup>, 这可能造成航天器系统(尤其是电子设备)的损坏或故障<sup>[4]</sup>, 从而导致航天器无法正常工作。

因此, 在航天器研制的各个阶段, 通常需要在地面进行爆炸冲击环境模拟试验<sup>[5-9]</sup>。但试验存在费用高、安全性差、加载量级离散性大等缺陷。因此对爆炸冲击环境的预示不能仅仅依赖于试验, 还需要进行必要的数值模拟。只有二者相辅相成, 才可能更加深入地认识爆炸冲击环境下的结构响应及其传递规律, 从而缩短研制周期, 减少研制成本。

对爆炸分离冲击响应的预示, 主要的数值方法包括有限元法和统计能量分析法<sup>[1,10]</sup>。对于有限元法, 如果要得到较高频率的瞬态响应, 则在建立模型时对网格的数量和质量要求都比较高, 这往往使得建模和计算所用的时间变得难以承受。因此有限元法大多只是应用于一些局部问题或简单问题的分析<sup>[11-18]</sup>。对复杂结构而言, 一般较少使用有限元计算瞬态冲击响应。而统计能量分析法是基于能量

与统计的思想<sup>[19-20]</sup>, 不再是对结构划分网格, 而是将复杂结构耦合动力学系统分解成若干子系统, 形成统计能量分析模型, 按子系统间的能量流动关系得到功率流平衡方程, 通过功率流平衡方程中的输入功率和损耗因子矩阵求解各子系统的能量, 进而得到子系统的平均动力响应。该方法在中高频的结构动力学响应分析中具有独特的优势。

统计能量分析法主要应用于噪声、声振耦合的响应预示。而在冲击问题方面的应用, 国外于 1990 年代开展了相关研究<sup>[21-22]</sup>, 也有相关标准<sup>[1]</sup>建议采用该方法进行爆炸分离冲击环境预示; 国内近年来也开展了一些探讨和应用<sup>[23-25]</sup>, 但在复杂结构方面的应用还很少见诸文献。

本文针对某一典型航天器的分离冲击问题, 在对切割索载荷进行合理离散的基础上, 采用统计能量分析并结合虚拟模态综合法, 对结构不同位置的响应进行了预示, 取得了良好的效果。

## 1 基本原理

根据统计能量分析法的思想, 将复杂结构耦合动力学系统分解成  $N$  个子系统, 建立统计能量分析模型和各子系统间的功率流平衡方程。因此,  $N$  个子系统组成的复杂结构的功率流平衡方程为<sup>[19-20]</sup>

收稿日期: 2011-04-14; 修回日期: 2011-05-26

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助(项目编号: 2009B0201017)

作者简介: 王军评(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学与环境试验技术研究; E-mail: hjwangjp@caep.ac.cn。  
毛勇建(1976—), 男, 博士学位, 高级工程师, 主要从事冲击动力学与环境试验技术研究; E-mail: maoyj@caep.ac.cn。

$$\omega^*[\mathbf{A}] \begin{bmatrix} E_1/n_1 \\ E_2/n_2 \\ \vdots \\ E_N/n_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,\text{in}} \\ P_{2,\text{in}} \\ \vdots \\ P_{N,\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为分析频段的中心频率;  $E_i$  为子系统  $i$  的振动能量;  $P_{i,\text{in}}$  为外界对子系统  $i$  的输入功率; 矩阵  $[\mathbf{A}]$  为阻尼矩阵,  $[\mathbf{A}] = [\mathbf{L}][n_1 \ n_2 \ \dots \ n_N]^T$ ,  $n_i$  为子系统  $i$  的模态密度,  $[\mathbf{L}]$  是总的损耗因子矩阵, 其矩阵元素为

$$L_{ij} = \begin{cases} -\eta_{ji}, & i \neq j \\ \sum_{k=1}^N \eta_{ik}, & i = j \end{cases} \quad (2)$$

求解以上的方程, 可得到系统在频带内的平均频响函数。

动力学系统在模态坐标下方程为

$$[\tilde{\mathbf{M}}]\{\ddot{\xi}\} + [\tilde{\mathbf{D}}]\{\dot{\xi}\} + [\tilde{\mathbf{K}}]\{\xi\} = [\Phi]^T \{\mathbf{F}(t)\}, \quad (3)$$

式中:  $[\tilde{\mathbf{M}}]$ 、 $[\tilde{\mathbf{D}}]$ 、 $[\tilde{\mathbf{K}}]$  分别为广义质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 全为对角阵;  $[\Phi]$  为模态振型;  $\{\mathbf{F}(t)\}$ 、 $\{\xi\}$  分别为外载和模态坐标。

在欠阻尼情况下, 由式(3)可得到所关心的子系统频响函数的幅值为

$$|H_{ij}(\Omega)| = \frac{|q_i(i\Omega)|}{|F_j(i\Omega)|} = \sum_{m=1}^n \frac{\phi_m \phi_{jm}}{\sqrt{(\omega_m^2 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_m \omega_m \Omega)^2}}, \quad (4)$$

式中:  $H_{ij}(\Omega)$  表示激励位置  $j$  和响应位置  $i$  之间的频响函数;  $q_i(i\Omega)$  为子系统  $i$  的响应;  $F_j(i\Omega)$  为子系统  $j$  上所受的载荷;  $\Omega$  为频率;  $\omega_m$  为子系统  $i$  的第  $m$  阶固有频率;  $n$  为子系统  $i$  的模态数。

对式(4)进行简化处理, 则可表示为

$$|H_{ij}(\Omega)| = [\mathbf{A}]^T \{\Phi\}_{ij}, \quad (5)$$

$$\text{式中: } \{\mathbf{A}\} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{(\omega_1^2 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_1 \omega_1 \Omega)^2} \\ \frac{1}{(\omega_2^2 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_2 \omega_2 \Omega)^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{(\omega_n^2 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_n \omega_n \Omega)^2} \end{Bmatrix};$$

$$\{\Phi\}_{ij} = \begin{Bmatrix} \phi_{i1} \phi_{j1} \\ \phi_{i2} \phi_{j2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \phi_{jn} \end{Bmatrix}.$$

通过组装式(5)所得到各个子系统的频响函数幅值, 可以得到系统的频响函数幅值矩阵  $\{\mathbf{H}\}$ , 矩阵的各元素为

$$|\mathbf{H}(\Omega)|_{ij} = [\mathbf{A}]^T \{\Phi\}_{ij}, \quad (6)$$

式中  $[\mathbf{A}] = \{[\mathbf{A}(\Omega_1)] \ [\mathbf{A}(\Omega_2)] \ \dots \ [\mathbf{A}(\Omega_n)]\}$ 。由式(6)可得:

$$\{\Phi\}_{ij} = ([\mathbf{A}]^T)^{-1} |\mathbf{H}(\Omega)|_{ij}. \quad (7)$$

通过求解统计能量方程(1), 可以得到频带内平均的频响函数; 再通过映射得到各个频率下的频响函数, 把得到的频响函数幅值代入式(7)可得到模态矩阵(虚拟模态矩阵); 然后计算广义质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵(即虚拟模态系数); 通过虚拟模态系数与动力学方程即可得到时域响应和冲击响应谱。

## 2 统计能量模型的建立

在统计能量分析时需要把大系统分解成为若干个独立的由模态群构成的子系统, 保证建立的统计能量分析模型能够清楚地表示出振动能量的输入、储存、损耗和传递的特征。统计能量分析中的子系统必须是可贮存振动能量的子系统, 而只有由一些相似共振模态组成的子系统才能贮存振动能量, 因此相似模态群就可被视为统计能量分析中的一个子系统。在模型建立时, 需要考虑到激励源的差异、边界条件、材料介质特性和模态相似原则。能量及阻尼相近的模态可划分为一个子系统; 如果同一模态群中的模态能量或模态阻尼相差较大时, 则应划分为两个或多个子系统; 不同的激励作用在结构上要划分为不同的子系统。对于要建立统计能量模型的子系统, 应保证模态密度足够高(分析带宽内的模态数要大于 5), 同时还要考虑系统的复杂程度与计算精度和计算量之间的矛盾<sup>[26-28]</sup>。

本文所考虑的航天器结构主要由整流罩、有效载荷、支架、仪器舱和助推器等组成。根据以上原则并综合考虑结构的几何特征和激励源的特点, 建立的统计能量模型如图 1 所示, 共包括 29 个子系统, 由板、壳单元组成。材料为铝、钢和蜂窝材料, 参数如表 1 所示。

在建立了分析结构的统计能量模型的基础上, 根据子系统间的耦合关系构建系统的功率流平衡方

程, 得到在 200~16 000 Hz 频率范围内频率间隔为 200 Hz 的频响函数。在确定外载的情况下, 运用第 1 章所介绍的方法, 即可完成对航天器结构的计算分析, 可得到各子系统的时域响应和冲击响应谱。

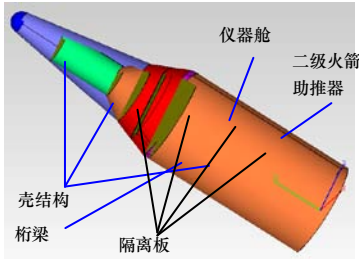


图 1 统计能量结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of SEA model

表 1 统计能量模型的材料参数

Table 1 Material parameters of the statistical energy model

材料类别	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
铝	50	19.23	1 600	0.3
钢	210	80.0	7 800	0.312 5
蜂窝材料	70	26.92	2 700	0.3

### 3 载荷的确定

本文所涉及的火工品分离装置为聚能爆炸切割索, 如图 2 所示。在航天器飞行中的某个时刻, 切割索起爆并切割舱体, 解除级间轴向连接实现分离。切割索工作时会在切割部位内部形成持续的移动载荷, 移动的速度为切割索传爆速度。用统计能量法分析爆炸冲击时必须把这种连续的、持续的移动载荷转换为作用在离散区域上的离散载荷。为此, 本文对结构上聚能爆炸切割索所产生的连续载荷进行了离散处理, 将结构上切割索作用部位的一周分为  $n$  片等距的区域, 在每片区域上离散载荷作用的时间为移动载荷到达这片区域且以传爆速度通过这片区域的时间。在移动载荷还没到达之前该区域上离散载荷为 0, 到达后离散载荷可用半正弦力表示为  $F_0 \sin(\pi t / \tau)$ , 作用点为该片区域的中心位置(如图 3 所示), 其中图 3(b) 的横坐标为移动载荷通过该片区域(等距区域)所用的总时间(即切割索以传爆速度切割该区域所用总时间)。切割索工作时所产生持续载荷的压力时间历程用一个三角脉冲模拟, 如图 4 所示, 图中时间为以传爆速度到达切割部位某点时并在该点上形成载荷的持续时间。

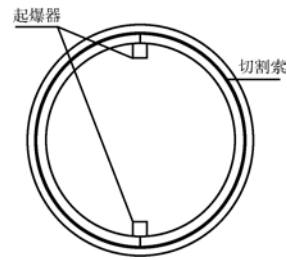
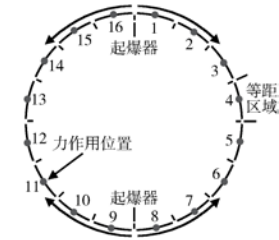
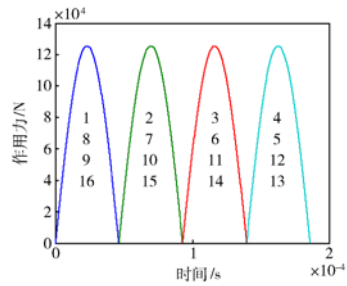


图 2 切割索分离机构  
Fig. 2 The linetype charge separation device



(a) 空间分布



(b) 时域分布

图 3 作用在不同区域的离散载荷  
Fig. 3 Discrete loads on different sectors

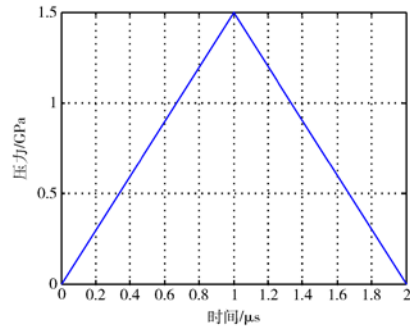


图 4 切割索产生的压力脉冲  
Fig. 4 Pressure history for the linetype charge detonation

在整个过程中, 必须确保移动载荷和离散载荷的总冲量相等, 即

$$\int_0^{2 \times 10^{-6}} p dv(Nt_1) dt \neq n \int_0^{\tau} F_0(\sin t \tau t) dt \quad (8)$$

式中:  $p$  为切割压力;  $v$  为切割索的传爆速度;  $t_1$  为切割索传爆一微小段所用的时间;  $Nt_1$  为切割索以传爆速度绕作用部位一周所用的总时间;  $\tau$  为移动载荷通过划分的每片区域所用的时间;  $n$  为所划分的区域总数。

由式(8)可得

$$F_0 = \frac{\pi \int_0^{2 \times 10^{-6}} p dv dt}{2} \quad (9)$$

划分区域的总数  $n$  由所关心的结构上某一位置的冲击响应谱随一系列  $n$  的增加而达到收敛的程度所决定。作为例子, 本文以结构仪器舱上桁梁为关心位置, 在切割索作用的位置划分不同的区域数  $n$ 。发现在  $n=16$  时所关心位置的冲击响应谱达到收敛, 如图 5 所示。所以本文采用 16 个离散的半正弦力来模拟切割索产生的移动载荷, 如图 6 所示。

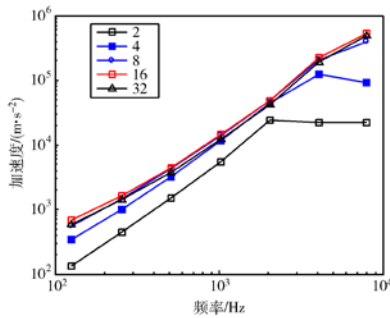


图 5 不同区域总数下的冲击响应谱  
Fig. 5 The SRS for different numbers of sectors

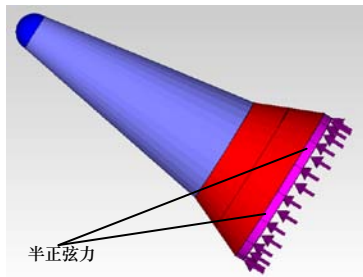
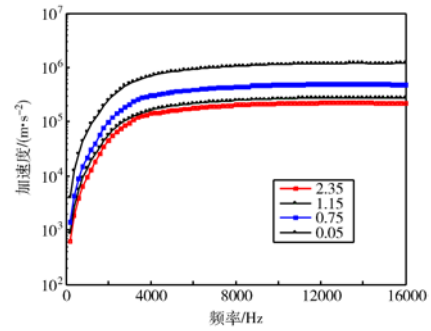


图 6 移动载荷计算模型  
Fig. 6 Computation model of the moving load

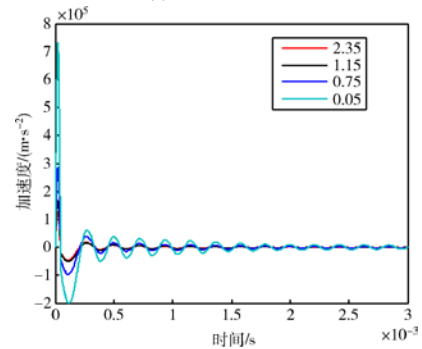
本文分析的结构所加的离散载荷的位置如图 3(a) 所示, 载荷是以起爆器所在的中心线为准呈对称分布。假设传爆速度为 7.62 km/s, 已知分离位置的半径为 0.9m, 通过式(9)就可以得到各个分区的离散载荷的大小, 如图 3(b)所示。

#### 4 计算结果分析

图 7 为相同材料和厚度的圆板结构(即隔离板, 见图 1) 在不同位置的冲击响应谱和加速度时间历程。从图 7(a)中可发现, 随着与冲击源的距离的增加, 冲击谱整体的幅值减小且各个位置都含有较高的频率成分。从图 7(b)中可看出, 加速度的幅值随着与冲击源的距离的增加而减小。



(a) 冲击响应谱



(b) 加速度时间历程

图 7 隔离板结构(包括边界)的冲击响应随与冲击源距离的变化

Fig. 7 Variation of shock responses of the separate plane against distance to the shock source

图 8 为锥壳结构(材料和厚度不同)在不同位置的冲击响应谱和加速度时间历程, 从图中发现与图 7 同样的现象, 即随着与冲击源距离的增加, 冲击谱整体的幅值和加速度的幅值均减小。

图 9(a)为不同位置处 3 种结构的冲击响应。圆板 1 距冲击源的距离为 0.05 m, 圆板 2 距冲击源的距离为 0.75 m, 板的四周与其他结构固结在一起; 带肋薄板距冲击源的距离为 0.4 m, 采用两头固结。由于圆板 1 离冲击源近, 所以圆板 1 的冲击谱幅值比圆板 2 的大; 带肋薄板离冲击源更近, 但其冲击谱幅值却比圆板 2 的小。由此可见, 具有相似结构的圆板(包括边界)的冲击谱随与冲击源距离的增大而减小; 对具有不同结构和边界的情况, 冲击谱的大小不仅与冲击源的距离有关, 还会受到结构的特性和边界条件的影响。图 9(b)为不同位置处 2 种结构的冲击响应, 图中半球壳的形心距冲击源 3.15 m, 截锥壳的形心距冲击源 1.55 m。半球壳的冲击响应谱的幅值比截锥壳的大, 与图 9(a)的圆板和带肋薄板之间的现象相同。

以上这些结果与我们对爆炸分离冲击传递的

物理规律认识是吻合的,即爆炸分离冲击响应的量值与所在部位距冲击源的距离具有很强的相关性,同时结构在一定边界下的动力学特性也对冲击响应有明显影响。

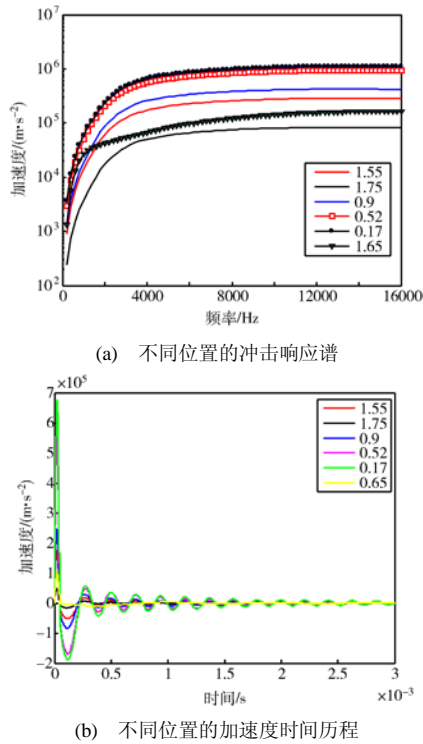


图8 锥壳结构(包括边界)的冲击响应随与冲击源距离的变化

Fig. 8 Variation of shock responses of conical shell structure against distances to the shock source

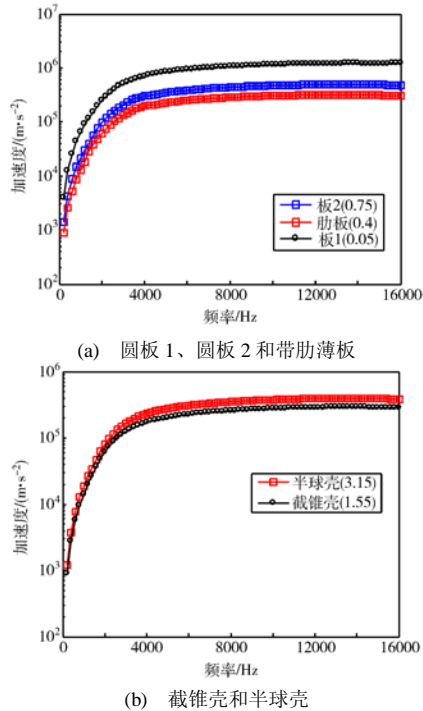


图9 不同位置处各种结构的冲击谱

Fig. 9 The SRS of different structures at different locations

## 5 结束语

本文建立了某航天器典型结构的统计能量模型,对聚能爆炸切割索在结构上所产生的连续载荷进行了离散处理,并根据冲击响应谱的收敛情况确定了离散载荷数,在得到离散载荷的基础上对结构爆炸分离的动态响应进行了仿真分析。结果发现:具有相似结构的圆板(包括边界)的时域响应和冲击谱随与冲击源距离的增大而减小;对不同的结构和边界的情况,它们的时域响应和冲击谱的大小不仅与冲击源的距离有关,还会受到结构的特性和边界条件的影响。这与爆炸分离冲击环境下结构响应特征及其传递物理规律的认识相符。

由于统计能量法建模和计算所需的时间较少,对航天器结构细节的依赖程度也较小,因此非常适用于航天器的设计阶段。本文对爆炸分离冲击响应的统计能量分析进行了初步探索,其分析方法和结果对今后相关工作具有一定的参考价值。

### 参考文献 (References)

- [1] NASA-STD-7003, NASA Technical Standard: Pyroshock test criteria[S], 1999
- [2] MIL-STD-810F, Department of Defense Test Method Standard: Environmental engineering considerations and laboratory tests: method 517[S], 2000
- [3] 张小达, 夏益霖. 爆炸分离冲击试验方法标准研究[J]. 航天标准化, 2002(6): 1-5  
Zhang Xiaoda, Xia Yilin. Study of pyroshock testing standard[J]. Aerospace Standardization, 2002(6): 1-5
- [4] Moening C J. Views of the world of pyrotechnic shock[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1986, 56(3): 3-28
- [5] 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3): 30-36  
Zhang Jianhua. Pyroshock environment of missiles and launch vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(3): 30-36
- [6] 马斌捷, 张建华, 吴江. 火工品爆炸加载方法在火箭分离冲击环境模拟试验中的应用与效果[J]. 强度与环境, 2007, 34(5): 1-7  
Ma Binjie, Zhang Jianhua, Wu Jiang. Applications and effects of pyrotechnic explode loading in shock environment simulation experiment of rocket separation[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(5): 1-7
- [7] 袁宏杰, 姜同敏. 实测爆炸分离冲击数据的分析与处理[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 72-74  
Yuan Hongjie, Jiang Tongmin. Analysis and treatment of

- measured pyrotechnic shock data[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(1): 72-74
- [8] 毛勇建, 李玉龙. 爆炸分离冲击环境的模拟试验技术进展[J]. *导弹与航天运载技术*, 2007(4): 37-44  
Mao Yongjian, Li Yulong. Advances in simulation techniques of pyroshock environments[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2007(4): 37-44
- [9] Mao Y J, Yue X H, Huang H Y, et al. Experimental study on pyroshock responses of a conical shell[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 20/21/22/23: 1458-1462
- [10] Mao Y J, Huang H J, Yan Y X. Numerical techniques for predicting pyroshock responses of aerospace structures[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 108/109/ 110/111: 1043-1048
- [11] 谭雪峰, 阎绍泽. 包带式星箭连接结构的动力学模拟及故障分析[J]. *清华大学学报*, 2010, 50(8): 1205-1209  
Tan Xuefeng, Yan Shaoze. Dynamic simulations and failure analysis of a clamp band system for spacecraft[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2010, 50(8): 1205-1209
- [12] 陈荣, 卢芳云, 王瑞峰, 等. 爆炸分离装置中保护罩安全性能分析[J]. *导弹与航天运载技术*, 2007(4): 13-16  
Chen Rong, Lu Fangyun, Wang Ruifeng, et al. Analyses on the security of retainer in the explosive separation system[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2007(4): 13-16
- [13] 柳征勇, 骆剑, 唐国安. 大型卫星整流罩分离冲击载荷分析研究[J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(5): 467-470  
Liu Zhengyong, Luo Jian, Tang Guoan. The studies on the impact force for separation of the large payload fairing[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(5): 467-470
- [14] 宋保永, 卢红立, 阳志光, 等. 分离结构在冲击载荷作用下的破坏机理研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 102-106  
Song Baoyong, Lu Hongli, Yang Zhiguang, et al. Studies on fracture mechanism of explosive separation device subjected to impact loads[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 102-106
- [15] 阳志光, 陈敏, 隋允康. 响应面法在圆柱壳体结构优化设计中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(3): 127-130  
Yang Zhiguang, Chen Min, Sui Yunkang. Application of response surface methodology in optimum design of cylindrical shell structure[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(3): 127-130
- [16] 陈敏, 隋允康, 阳志光. 宇航火工分离装置爆炸分离数值模拟[J]. *火工品*, 2007(5): 5-8  
Chen Min, Sui Yunkang, Yang Zhiguang. Numerical simulation of exploding separation for aerospace pyrotechnical actuated separation device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(5): 5-8
- [17] 任怀宇. 粘弹阻尼减振在导弹隔冲击结构中的应用[J]. *宇航学报*, 2007, 28(6): 1494-1499  
Ren Huaiyu. The application of viscoelastic damping vibration suppression for shock-isolation structure of multistage missile[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(6): 1494-1499
- [18] Mao Y J, Li Y L, Huang H J, et al. Fast simulation of pyroshock responses of a conical structure using rotation-superposition method[J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2011, 5(2): 185-194
- [19] Richard H L. Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and applications[M]. Massachusetts: MIT Press, 1975
- [20] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京理工大学出版社, 1995
- [21] Lednik D. The application of transient statistical energy analysis and wave propagation approach to coupled structures[D]. University of Southampton, 1994
- [22] Pinnington R J, Lednik D. Transient statistical energy analysis of an impulsively excited two oscillator system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 189(2): 249-264
- [23] 王其政, 刘斌, 宋文滨. 航天事故与动力学环境预示和控制技术研究述评[J]. *环境技术*, 1995(4): 1-6  
Wang Qizheng, Liu Bin, Song Wenbin. Aerospace failure and survey of prediction and control technique of dynamic environment[J]. *Environmental Technology*, 1995(4): 1-6
- [24] 王其政, 宋文滨, 刘斌. 动力学环境质量载荷效应的统计能量分析与试验研究[J]. *强度与环境*, 1998, 25(3): 7-12  
Wang Qizheng, Song Wenbin, Liu Bin. Statistical energy analysis and test investigation of mass loading effects on the dynamic environment[J]. *Structure & Environment Engineering*, 1998, 25(3): 7-12
- [25] 聂旭涛, 熊飞峤. 运用统计能量分析法预示空空导弹舱内动力学环境[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(4): 140-143; 176  
Nie Xutao, Xiong Feiqiao. Predicting dynamic environment of air to air missile module with statistical energy analysis method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(4): 140-143; 176
- [26] 龙志勇. 基于统计能量法的吸尘器噪声分析预测与控制研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008
- [27] 郦茜. 高速船噪声预报与控制的方法研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2007
- [28] 孙明赞. 基于统计能量法的FPSO生活区舱室噪声研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2006



## Application of statistical energy analysis method in prediction of pyroshock responses

Wang Junping<sup>1</sup>, Mao Yongjian<sup>1</sup>, Huang Hanjun<sup>1</sup>, Dong Longlei<sup>2</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In this paper, a statistical energy analysis of pyroshock responses is carried out for complex structures. Firstly, the continuous impact load imposed by the dragline is discretized. Then a statistical energy analysis combined with a virtual mode synthesis is performed to predict the pyroshock responses in a typical spacecraft structure. The results agree with the general trends of the responses and their transfers at related conditions.

**Key words:** pyroshock; statistical energy analysis method; pyrotechnic device; structural response

### 会议短波

#### 2011年中国航天科技集团公司第十信息网学术研讨会圆满结束

一年一度的“中国航天科技集团公司第十信息网学术研讨会”于8月26日~8月30日在辽宁丹东召开。会议由副网长单位北京航空航天大学 and 可靠性与环境工程技术重点实验室主办，网长单位北京卫星环境工程研究所协办。

本次大会共收到征文55篇，主要涉及环境分析模拟试验技术、可靠性试验技术、深空探测环境模拟与试验技术、空间科学等学科领域。共有12个单位41名代表参会。

26日的网务会由北京卫星环境工程研究所技术委员会主任向树红主持，北京航空航天大学，西北工业大学，中国工程物理研究院总体工程研究所，中国科学院空间科学与应用研究中心，中国航天员科研训练中心，以及中国航天科技集团公司下属北京航天试验技术研究所、北京强度环境研究所、八院卫星总装试验部、兰州空间技术物理研究所、山东航天电子技术研究所、陕西动力机械研究所等11家副网长单位的代表参加了会议。首先，北京航空航天大学宇航学院姜志国副院长介绍了大会的筹备工作及会议安排；其次，十网网刊《航天器环境工程》的副主编肖福根详细介绍了编辑部目前的工作情况及期刊未来的良好前景，参会代表热切关注并给予高度评价；最后，副网长单位的代表围绕明年十网学术交流的研究内容等问题进行了讨论。

27日召开了学术交流会议，由主办单位北京航空航天大学（副网长单位）姜志国副院长主持，网长单位向树红研究员致开幕词。会议邀请兰州空间技术物理研究所知名真空专家达道安研究员、北京卫星环境工程研究所向树红研究员、北京航空航天大学曹晋滨教授分别作了题为“宇宙真空学研究”、“空间环境下卫星长寿命评估验证与保证技术”、“太阳风暴及其对地球空间环境的影响”的特邀报告。之后，有18篇论文在大会进行了交流，最后由专家评选出6篇优秀论文。

会议期间，代表们通过深入的学术交流和探讨，加强了专业上的联系和沟通，开拓了视野。通过互相交流、互相磋商，加强了空间环境工程领域的相互合作，为未来的研究发展奠定了良好的基础。

（崔丽娟 供稿）