

航天器爆炸冲击环境模拟装置仿真研究

张华, 吴斌

(西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要:爆炸冲击环境对航天器具有较大的影响。摆锤式冲击试验台是模拟爆炸冲击环境的一种较好的手段。应用有限元理论, 以显式有限元动力分析软件 LS-DYNA 和大型商用有限元软件 ANSYS 为工具对摆锤式冲击试验台进行仿真研究; 得到了不同条件下的响应谱曲线, 并进行了讨论研究, 给出了响应板设计参数、试验台支撑条件和冲击脉冲对响应谱曲线的影响, 模拟了满足几种典型冲击响应谱试验规范的响应谱曲线。得出了摆锤式冲击试验台可以较好的模拟爆炸冲击环境的结论。

关键词:爆炸冲击; 航天器; 冲击响应谱; 有限元法; 仿真

中图分类号:V411.8 **文献标识码:**B

Simulation of the Testing Equipment Used for Simulating Pyroshock Environment of Missiles and Launch Vehicles

ZHANG Hua, WU Bin

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: Pyroshock has biggish influence on missiles and launch vehicles. The pendulum hammer shock response spectra testing equipment has been simulated with finite method software -- LS-DYNA and ANSYS in this article. Several shock response spectra testing criteria have been simulated and the relationship between the testing parameter and the shock response spectra has been revealed. The conclusion is that the pendulum hammer shock response spectra testing equipment can simulate the pyroshock environment preferably.

KEYWORDS: Pyroshock; Missiles and launch vehicles; Shock response spectra; Finite element method; Simulation

1 引言

航天器在发射及工作过程中将经历各种冲击环境, 其中对航天器影响较大的是爆炸冲击环境, 航天器经受的爆炸冲击环境主要来自航天器及其运载器上各种火工装置工作时所产生的复杂震荡型冲击。在冲击过程中外界的能量在瞬间传递到航天器及其部件上, 所产生的位移、速度和加速度的突然变化有可能造成航天器结构和仪器、仪表等部件的损坏及故障, 从而导致航天器无法正常工作。因此, 航天器及其上的各类装置、各类产品均需在地面进行爆炸冲击环境模拟试验。

目前, 模拟爆炸冲击试验的方法主要有以下三类: ①火工品爆炸方式; ②机械撞击方式; ③振动台模拟^[1]。火工品爆炸方式模拟试验技术具有模拟精确, 加速度和频率范围高, 但试验费用大, 安全性差, 加载量级离散性大; 振动台模

拟方式设备规范, 模拟成本低, 可控性高, 但该方式试验量级低。

机械撞击方式主要有两类: 跌落式谐振板模拟装置和水平冲击模拟装置。跌落式谐振板模拟装置在国内已有了较为成熟的研究和应用^[2], 但对摆锤式冲击试验台的研究却十分不足。王永联^[8]对摆锤式冲击试验台进行了理论计算和实验研究, 将冲击试验台作为质量弹簧系统处理, 这与试验台的工作原理并不相符, 且其试验研究仅为定性分析; 赵清望^[7]试验台进行了理论计算研究, 具有较好的理论指导意义, 然而亦为定性研究。以上二文均缺乏对摆锤式冲击试验台结构的分析研究, 且受研究手段的限制, 无法定量的确定实验条件, 从而无法确切给出冲击谱曲线三大要素: 低频上升斜率, 高频峰值和拐点与试验参数的对应关系。本文应用有限元理论, 以显式有限元动力分析软件 LS-DYNA 和大型商用有限元软件 ANSYS 为工具对摆锤式冲击试验台进行了仿真研究, 对摆锤式冲击试验台进行了系统的分析; 分析研究了试验台结构对试验效果的影响; 直观, 定量的设定了不

同的实验条件,进而对仿真结果进行了确切的定量分析,从而使较为精确地给出响应谱曲线与试验参数的对应关系成为可能。

2 仿真原理

摆锤式冲击试验台的冲击原理如图 1 所示, y 轴方向为垂直于 x, z 平面向外,它主要由摆锤,响应板和后座支撑组成。

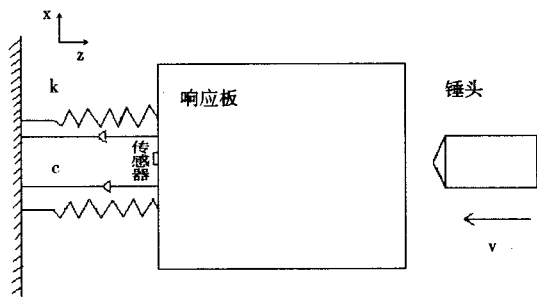


图 1 摆锤式冲击试验台冲击原理图

本文采用有限元方法,使用 ANSYS 作为前处理器,利用显式动力分析软件 LS-DYNA 对摆锤式冲击试验台进行的仿真分析。本文采用 SOLID164 实体单元和 COMBI165 弹簧阻尼单元建立摆锤式冲击台的有限元模型,如图 2 所示。

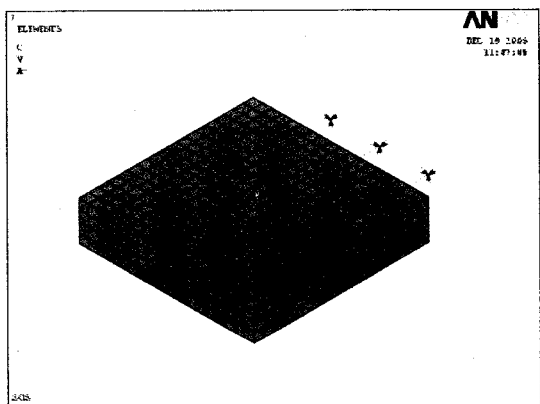


图 2 摆锤式冲击台有限元模型

LS-DYNA 采用中心差分时间积分的显式方法。仿真研究时间自施加冲击载荷开始至 T_i (本文中取为 10—20ms) 结束,中间共分为 n 个时间步。结构系统各节点在第 n 个时间步结束时刻 t_n 的加速度向量为:

$$\{a\}(t_n) = [M]^{-1}[\{F\}(t_n) - \bar{F}^{int}(t_n)] \quad (1)$$

式中 $\{F\}$ 为施加的外力向量,在本文中是由摆锤锤头冲击试验台所产生的冲击脉冲,可写为半正弦形式:

$$\{F\} = \{A\} \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) \quad (2)$$

其中, $\{A\}$ 为振幅向量, T 为冲击波形的脉冲宽度。 $[M]$ 为系统的质量矩阵, \bar{F}^{int} 为内力矢量,其表达式为:

$$\bar{F}^{int} = \int_{\Omega} [B]^T [\sigma] d\Omega + \bar{F}^{hg} + \bar{F}^{contact} \quad (3)$$

式中三项分别为 t_n 时刻单元应力场等效节点力、沙漏阻力和接触力矢量。对有限元模型施加冲击脉冲 $\{F\}$,进行系统动态响应仿真运算,进而得到系统加速度时域响应。本文采用改进的递归数字滤波法^[9]计算冲击响应谱进而得到系统的加速度相应谱曲线。

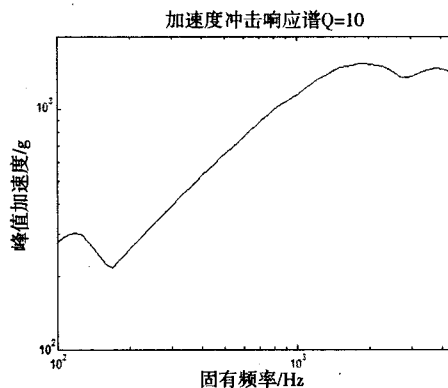


图 3 低频峰值现象

3 仿真的分析

3.1 试验台结构分析

摆锤式冲击试验台响应板的长度和宽度均取为 $a = 500\text{mm}$,厚度取为 b ,在仿真研究中发现,当 a/b 值过大,即台体厚度过小时,在水平冲击载荷下,台体的 y (垂直方向) 向加速度响应峰值等于甚至大于台体 z 向水平方向的加速度响应峰值,这显然是不利的。经优化设计选择 $a/b = 5$,此时 y 向加速度响应峰值大约等于 z 向加速度响应峰值的 15% ~ 20%,满足冲击规范对横向运动比的要求。

在仿真研究中,试验台的水平加速度响应谱曲线出现了低频峰值现象,如图 3 所示。分析系统的前六阶频率如下所示: 114.3 Hz、1431.8 Hz、2115.8 Hz、2528.7 Hz、3327.9 Hz、3327.9 Hz。响应谱曲线低频峰值所对应的频率恰为冲击试验台的一阶频率。不同后座支撑刚度条件下的冲击试验台的加速度响应谱曲线亦出现了此种现象。对不同后座支撑刚度条件下的冲击试验台进行的模态计算发现响应谱曲线低频峰值所对应的频率均为冲击试验台的一阶频率,且试验台的二阶及其以上各阶的频率保持不变,仅一阶频率发生变化,即冲击试验台的一阶频率由其后的后座支撑刚度和台体质量所决定,其高阶(二阶及以上)频率由试验台的台体的外形尺寸和材料所决定。

机械撞击式响应谱冲击试验所适用的多数冲击谱试验条件的起始频率均为 100Hz,可以通过降低试验台一阶频率,使其远低于 100Hz 的方法解决这一问题。合理设计后座支撑刚度 K ,可使系统一阶固有频率低于 100Hz,本文的仿真

研究中均采用此方法。

3.2 不同参数下的仿真结果

1) 台体后座支撑刚度对冲击响应谱斜率的影响

保持水平冲击载荷 $\{F\}$ 脉宽为 T 、峰值为 A 不变, 改变后座支撑刚度的大小, 仿真结果如图 4 所示。曲线 1、2、3 所对应的后座支撑刚度分别为 k 、 $5k$ 、 $10k$ 。

2) 水平冲击载荷 $\{F\}$ 的脉宽对响应谱转折点的影响

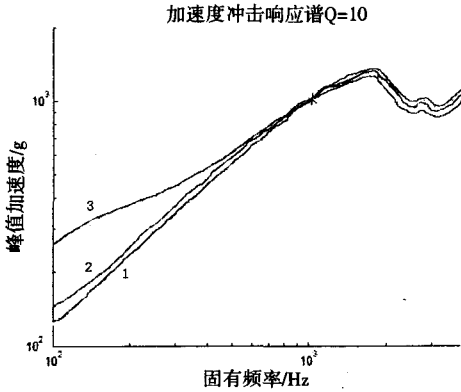


图 4 不同支撑刚度下的响应谱图

取试验台后座支撑刚度值为 k 、水平冲击载荷 $\{F\}$ 的峰值为 A 并保持不变, 改变水平冲击载荷的脉宽, 仿真结果如图 5 所示。曲线 1、2、3 所对应的水平冲击载荷的脉宽分别为 $2T$ 、 T 、 $\frac{T}{2}$ 。

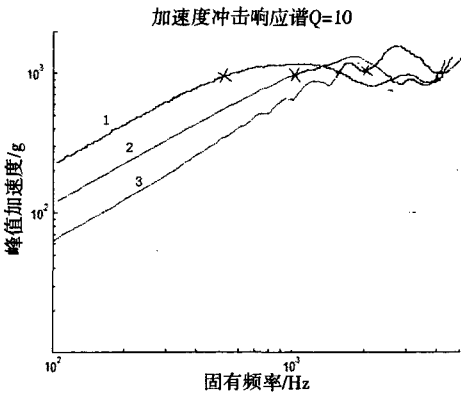


图 5 不同冲击脉宽下的响应谱曲线

3) 水平冲击载荷 $\{F\}$ 的峰值对冲击响应谱峰值的影响

取试验台后座支撑刚度为 k 、水平冲击载荷 $\{F\}$ 的脉宽为 T 并保持不变, 改变水平冲击载荷的峰值, 仿真结果如图 6 所示。曲线 1、2、3 所对应的水平冲击载荷的峰值分别为 $0.8A$ 、 A 、 $2A$ 。

3.3 仿真结果的分析

由图 4 可知, 随着支撑刚度的降低, 响应谱曲线低频部

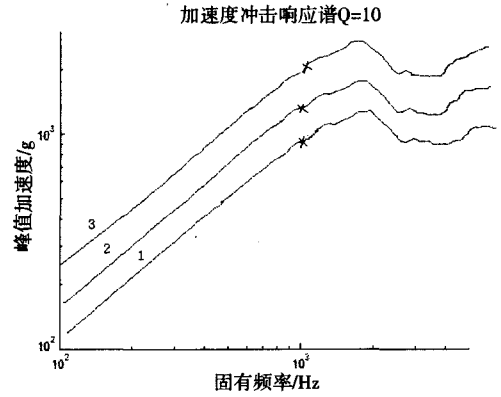


图 6 不同峰值下的响应谱曲线

分的斜率逐渐增大^[3], 而其拐点和高频部分基本不受影响, 响应谱曲线的低频部分斜率主要由试验台的支撑条件确定。图 5 的仿真结果表明随着冲击脉冲宽度的减小, 响应谱曲线的拐点频率值 f_2 逐渐增高而峰值稍有增高, 低频部分的斜率基本保持不变。响应谱曲线的拐点频率 f_2 与冲击载荷脉宽 T 的关系可近似表示为: $f_2 = \frac{1}{2T}$ 。这与国内外试验研究所得到的经验值吻合^[1]。图 6 的仿真结果表明, 随着冲击峰值的增大, 响应谱曲线的峰值也逐渐增大, 其拐点稍有前移, 低频部分斜率基本保持不变。响应谱曲线的高频幅值 ϕ_2 基本等于冲击载荷的峰值。在试验中, 随着摆锤角度的增大(相当于增大冲击峰值), 响应谱曲线的 ϕ_2 值亦随之增大, 与仿真结果相符^[8]。这说明仿真结果是可信的。

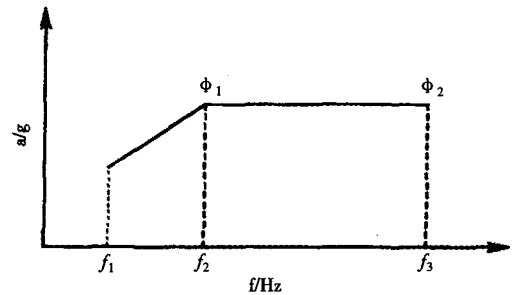


图 7 冲击响应谱试验规范

4 几种典型响应谱试验规范的仿真结果

响应谱试验规范如图 7 所示。其中 ϕ_1 为低频部分的上升斜率、 ϕ_2 为高频部分的冲击谱幅值; f_1 、 f_2 、 f_3 分别为起始频率、拐点频率。

选冲击试验台响应板长度和宽度 $a = 500\text{mm}$, 厚度 $b = 100\text{mm}$, 响应板上加 20kg 的配重, 模拟三种典型的冲击响应谱试验规范, 见表 1。容差为 3dB , 品质因子 $Q = 10$ 。仿真结果见图 8 - 10——图中横坐标为频率, 单位为 Hz , 纵坐标为

加速度,单位为g;右下角小图为冲击试验台加速度时域响应曲线,其横坐标为时间,单位为s,纵坐标为加速度,单位为 m/s^2 。

表1 冲击谱试验规范条件

条件	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	ϕ_1 (db/oct)	ϕ_2 (g)
一	100	500	4000	9	800
二	100	1000	4000	9	1000
三	100	1000	5000	6	1500

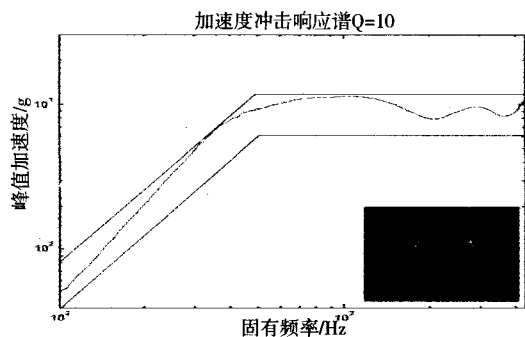


图8 满足试验规范条件一的响应谱曲线

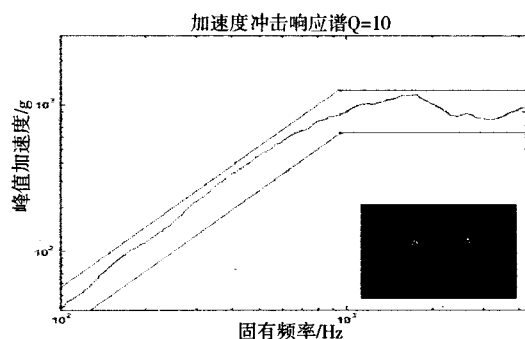


图9 满足试验规范条件二的响应谱曲线

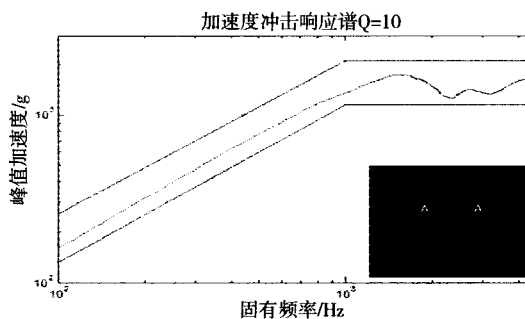


图10 满足试验规范条件三的响应谱曲线

满足三种实验规范的实验条件分别为:

条件1:冲击峰值 $A = 800g$ 、冲击脉宽 $T = 1ms$ 、后座支撑刚度 $K = 2.5 \times 10^4 \times 3N/m$ 。

条件2:冲击峰值 $A = 1000g$ 、冲击脉宽 $T = 0.5ms$ 、后座支撑刚度 $K = 2.5 \times 10^4 \times 3N/m$ 。

条件3:冲击峰值 $A = 1500g$ 、冲击脉宽 $T = 0.5ms$ 、后座支撑刚度 $K = 10^5 \times 3N/m$ 。

5 结论

1) 响应板的厚度不宜过薄,否则会造成台体垂直于台面方向的加速度响应过大,超过规范对横向运动比的要求;

2) 合理选择支撑刚度,使一阶频率低于100Hz,以避免响应谱曲线出现低频峰值;

3) 响应谱的低频斜率随试验台的后座支撑刚度的增大而降低;其拐点频率可近似表示为 $f_2 = \frac{1}{2T}$,并随冲击峰值的增大而稍有前移,响应谱曲线的高频幅值 ϕ_2 基本等于冲击载荷的峰值;

4) 仿真结果表明,摆锤式冲击试验台可以较好的模拟爆炸冲击环境,其响应谱容差满足 $\pm 3dB$ 要求,符合试验规范。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王朝贵, 李含忠. 利用谐振板装置模拟冲击环境[J]. 环境技术, 1996, (4): 12-15.
- [3] 李蓓蓓. 冲击响应谱的规范[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 12-13.
- [4] 徐伟民. 基于 Matlab 脉冲激励下振动系统冲击响应谱的数值解[J]. 矿山机械, 2004-6: 62-63.
- [5] 尚晓江, 等. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006-1.
- [6] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003-9.
- [7] 赵清望. 摆锤式冲击试验机的加速度频率响应谱及基本参数计算式[J]. 上海机械学院学报, 1994, 16(4): 51-57.
- [8] 王永联. 模拟冲击响应谱的摆锤式水平冲击试验机设计计算及实验研究[J]. 振动与冲击, 1993-6, (3): 16-24.
- [9] 中华人民共和国航天工业部部标准 QJ1174-87. 导弹、火箭低频冲击、振动数据处理准则[S]. 1987.

【作者简介】



张 华(1981.11-),男(汉族),河北省石家庄人,西北工业大学航天学院研究生,主要从事航天器动力学环境虚拟仿真研究。

吴 斌(1965-),男(汉族),四川简阳人,硕士,西北工业大学航天学院副教授,主要从事航天器结构动力学模拟与试验研究。