

瞬态时域数据合成冲击响应谱算法研究

何志勇, 宋少伟, 邓长华, 王 珺
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 某液体火箭发动机的部件采用振动台进行模拟冲击环境试验, 冲击控制谱的冲击时域波形由软件采用基本波形合成, 基本波形有正弦波、合成小波、Chirp 波形, 而国内常用正弦波合成冲击谱进行冲击环境试验。给出了瞬态冲击数据合成法的算法过程, 提取某液体火箭发动机试车过程中的冲击时域数据来合成冲击控制谱的冲击时域波形, 计算结果表明算法有效, 所合成的冲击时域数据能够满足冲击响应谱的精度要求。

关键词: 冲击响应谱; 时域冲击波形; 振动台; 液体火箭发动机

中图分类号: V416.5-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0055-05

Research on transient time-domain data synthesis of shock response spectrum

HE Zhi-yong, SONG Shao-wei, DENG Chang-hua, WANG Jun
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Shaker is adopted to simulate the shock environment in the test for parts of the liquid rocket engines. In the test, the shock time-domain waveform of shock response spectrum (SRS) is composed of sine wave, compound wavelet and Chirp wave. The sine wave composed shock spectrum is often used in China to perform the shock environment test of the liquid rocket engines. The shock time-domain waveform of SRS is composited according to the data extracted from shock time-domain signal in the liquid rocket engines testing. The calculated result proves that the algorithm is effective, and the composited shock time-domain data can meet the accuracy requirement of the reference shock response spectrum.

Keywords: shock response spectrum; time-domain shock waveform; electrodynamic shaker; liquid rocket engine

收稿日期: 2012-08-13; 修回日期: 2012-11-16

作者简介: 何志勇 (1978—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机振动信号处理与分析

0 引言

冲击是指一个结构系统所受到的瞬态载荷,是能量从外界传递到一个结构系统的短暂过程。液体火箭发动机在试车和发射过程中都会承受冲击作用,冲击往往会使它的部件激起强迫振动和固有频率响应,使它的部件性能和结构强度受到不同程度的损害甚至失效。为了保证液体火箭发动机的部件承受非重复性机械冲击的适应性,许多部件都需要经受冲击试验的考核。

目前,在试验室利用电动振动台对发动机产品进行冲击模拟试验时,国内多采用经典波形和冲击谱试验技术。因为经典冲击波其波形简单,与实际复杂的冲击环境相差甚远,往往会导致在试验室里已通过冲击试验的发动机产品,在实际环境中又有损坏。冲击谱试验技术则是以参考冲击谱为标准,以等效损伤原则为依据,采用波形综合法合成满足冲击谱条件的瞬态冲击波来模拟复杂冲击环境。所谓波形综合法,就是用若干个频率不同、幅值不同、持续时间不同的简单脉冲求和。国外冲击试验谱控制软件正弦波、合成小波、Chirp 波形等求和,综合得出一个组合瞬态冲击波,该瞬态冲击波对应的冲击响应谱在一定精度范围内与已知给定的参考冲击响应谱相同。文中采用某液体火箭发动机试车过程中的冲击时域数据,合成发动机部件冲击试验的冲击谱,能够满足冲击参考谱要求,并且时域数据有复杂的震荡特性,并与试车过程中的冲击时域数据相关。

1 冲击响应谱原理

冲击响应谱 (Shock Response Spectrum, SRS) 简称冲击谱,是指一系列单自由度振动系统在冲击激励函数作用下,响应最大值与系统固有频率之间的关系。对于一个质量为 m , 刚度为 k , 阻尼为 c 的单自由度系统 (如图 1 所示), 输入 $u(t)$ 作用在基础上, 响应为 $x(t)$ 。

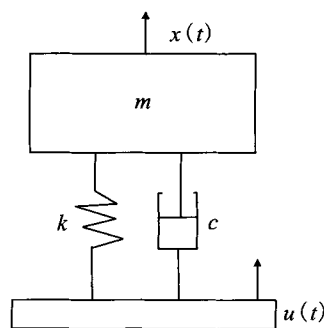


图 1 单自由度系统

Fig. 1 Single-degree-of-freedom vibration system

一般情况下,冲击加速度的测量比较容易实现,因此当基础受到加速度作用时, m 的运动方程可表示为:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = c \cdot \dot{u} + k \cdot u \quad (1)$$

式中: x 为质量块的绝对位移; u 为基础位移。

对式 (1) 两边进行拉式变换, 经整理可得加速度传递函数为:

$$H(S) = \frac{\ddot{x}(s)}{\ddot{u}(s)} = \frac{c \cdot s + k}{m \cdot s^2 + c \cdot s + k} \quad (2)$$

传递函数 S 到 Z 变换有斜波响应不变法、脉冲响应不变法和双线性变换法。式 (2) 采用斜波响应不变法进行传递函数 S 到 Z 变换, 结果如下:

$$H(z) = \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot z^{-1} + \beta_2 \cdot z^{-2}}{1 + \alpha_1 \cdot z^{-1} + \alpha_2 \cdot z^{-2}} \quad (3)$$

其中

$$\beta_0 = 1 - e^{-\frac{(A)}{B} \sin(B)}$$

$$\beta_1 = 2e^{-\frac{(A)}{B}} \left[\frac{\sin(B)}{B} - \cos(B) \right]$$

$$\beta_2 = e^{-\frac{2(A)}{B}} - e^{-\frac{(A)}{B} \frac{\sin(B)}{B}}$$

$$\alpha_1 = -2e^{-\frac{(A)}{B}} \cos(B)$$

$$\alpha_2 = -e^{-\frac{2(A)}{B}}$$

式中: $A = \xi \cdot \omega_0 \cdot T$; $B = \omega_0 \cdot T \sqrt{1 - \xi^2}$; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$;

$\xi = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_0}$; T 为 Z 离散传递函数的时间间隔。

冲击响应谱是指一系列不同固有频率、一定

阻尼比 ξ 和 Z 离散传递函数的时间间隔 T , 按式 (3) 计算出一系列最大加速度与固有频率之间的关系曲线。

2 冲击谱的合成法

冲击谱试验一般规范是给出加速度谱 (g)。依据冲击谱试验规范, 参考冲击响应谱由低频上升段和低频水平段组成, 两段的交点所对应的频率称为拐点频率。为了保证合成的时域冲击波满足冲击谱的精度要求, 试验规范中还规定了冲击谱的容差范围为 ± 3 dB。在合成冲击谱的冲击波形时, 为了保证冲击波的频率成分与试验规范给出的冲击谱的频率范围一致, 选用一系列频率基本数据。波形合成是一个反复迭代, 逐次逼近的过程, 直至合成的冲击响应谱满足容差。

国外冲击谱控制软件采用基本波形合成法, 这种方法是首选择系列的一种波形, 波形种类有正弦波、小波、Chirp 波形, 波形初步幅值根据参考冲击谱确定, 波形频率对参考冲击谱的频率范围进行间隔取样, 通用间隔是 $1/6$ 倍频程, 波形持续时间 T 根据冲击时间确定。这系列波形按正一负一顺序相乘再加汉宁窗合成冲击时域波形, 判断合成冲击波形的冲击响应谱是否在容差之内, 如果不在容差之内, 波形幅值修正, 修正系数是参考冲击谱与此合成冲击波形的冲击响应谱幅值比值。

根据基本波形合成法, 提出瞬态冲击数据合成法, 与基本波形合成法的计算过程相似。瞬态冲击数据合成法计算过程为: 首先对冲击数据滤波提取主频数据, 再对主频数据合成冲击波形, 判断此波形冲击响应谱的容差, 最后进行主频数据修正。

根据冲击谱的合成法的原理, 设计提取主频数据的离散滤波器, 滤波器参数有共振频率、阻尼比和离散滤波器的时间间隔。根据参考冲击谱的频率范围进行间隔取样选择频率, 并加上冲击响应谱的拐点频率作为滤波器共振频率, 此间隔通用 $1/6$ 和 $1/12$ 倍频程, 那么 2 个相邻主频 f_{i-1}

和 f_i 间存在关系为: $\lg\left(\frac{f_i}{f_{i-1}}\right)/\lg 2$, 等于间隔倍频程。

滤波器阻尼比依据共振频率间隔来选择, 如果主频间隔比较窄, 滤波器要选小的阻尼比, 这将使滤波器会消除其它频率的数据; 如果主频间隔比较宽, 滤波器要选大的阻尼比, 这时滤波器将补充其它频率的数据。离散滤波器的时间间隔根据瞬态冲击数据间隔时间确定。

利用滤波器从瞬态冲击数据中提取主频数据后进行合成冲击波形, 合成法是各个主频数据叠加。数据合成前进行主频数据加汉宁窗并按顺序乘 ± 1 , 最后叠加合成冲击波形。合成冲击波形进行冲击谱和参考冲击谱的幅值比较分析, 如果主频幅值不在容差之内, 则对主频时域数据进行修正, 修正方法是主频时域数据乘修正系数, 修正系数为这个频率的参考冲击谱的幅值与合成冲击波形的冲击响应谱幅值比值。瞬态冲击数据合成冲击时域波形算法过程如下:

1) 根据参考冲击谱的频率范围进行间隔取样选择频率, 并加上冲击响应谱的拐点频率作为主频: $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$;

2) 根据主频间隔值大小, 选择滤波器的阻尼比, 按瞬态冲击数据时间间隔值确定离散滤波器的时间间隔参数, 再利用式 (3) 按 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ 主频设计离散滤波器;

3) 利用滤波器提取瞬态冲击数据的主频数据, 如: $f_1(t), f_2(t), f_3(t), \dots, f_n(t)$;

4) 对主频数据加汉宁窗并合成冲击时域波形, 如: $Tcj(t) = \sum_{i=1}^n (-1)^i \cdot \bar{\omega}(t) \cdot f_i(t)$;

5) 冲击时域波形 按式 (3) 计算出冲击响应谱 $A(f_i)$, 与参考冲击响应谱 $A_{ms}(f)$ 进行比较, 如果冲击响应谱在谱容差之内, 如: $|A(f_i) - A_{ms}(f_i)| < \varepsilon$, 则冲击时域波形合成完成;

6) 若冲击响应谱超过容差, 如: $|A(f_i) - A_{ms}(f_i)| > \varepsilon$, 则对主频数据 $f_i(t)$ 进行修正, $f_i(t)' = f_i(t) \frac{A_{ms}(f_i)}{A(f_i)}$ 最后 $f_i(t)'$ 按第 4 步进行合成冲击时域波形。

3 瞬态冲击数据合成法和基本波形合成法的算法比较

采用基本波形合成法和瞬态冲击数据合成法,对液体火箭发动机的部件冲击试验参考谱生成冲击波形。冲击试验谱: 100~200 Hz, 6 dB/Oct; 200~2 000 Hz, 400 g; 试验持续时间: ≤ 30 ms; 冲击响应谱最大误差 ± 3 dB; 冲击试验参考谱如图 2 所示。

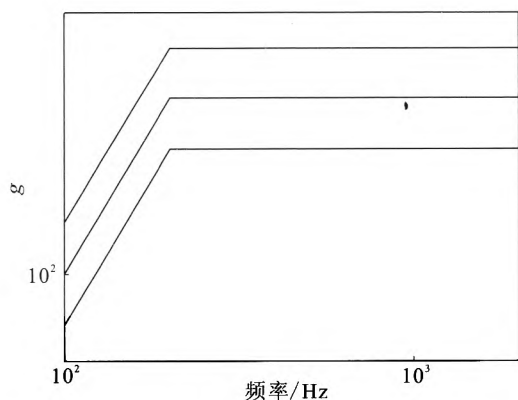


图 2 冲击响应谱

Fig. 2 Shock response spectrum

瞬态冲击数据合成法选取某液体火箭发动机试车过程中的冲击时域数据, 如图 3 所示。

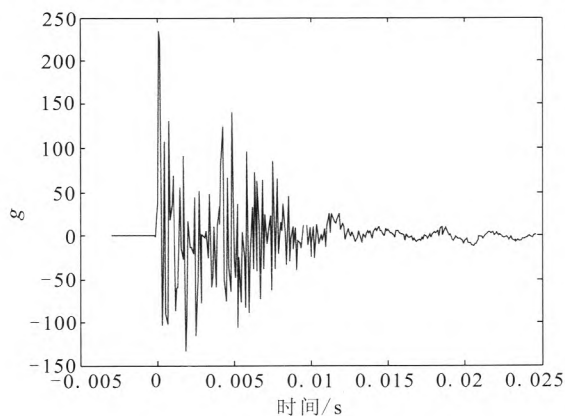


图 3 试车过程中的时域冲击数据

Fig. 3 Time-domain shock data in liquid rocket engine test

离散滤波器按式 (3) 设计, 根据冲击参考谱的频率范围, 滤波器共振频率按 1/12 倍频程间隔提取并加上拐点频率, 阻尼比设为 0.025, 离

散滤波器的时间间隔和试车冲击数据时间间隔值相同。利用滤波器, 试车冲击数据提取主频时域数据。按照循环算法过程, 主频时域数据合成瞬态冲击波形。基本波形合成法选取正弦波, 正弦波频率也按 100~2 000 Hz 频率范围按 1/12 倍频程间隔采取并加上拐点频率, 正弦波的相位设为随机数据, 冲击波形按照算法进行合成。瞬态冲击数据合成法和基本波形合成法的合成冲击波形如图 4 所示。

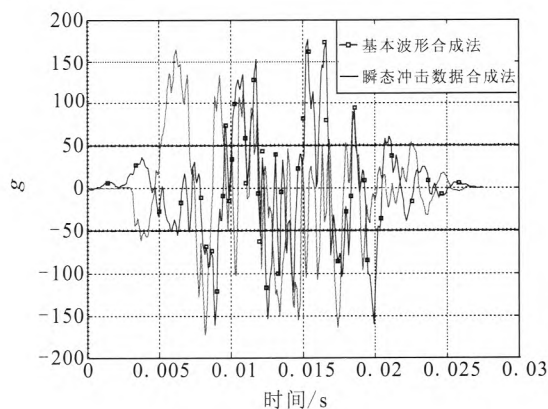


图 4 时域冲击波形

Fig. 4 Time-domain shock waveform

按阻尼比为 0.05, 频率间隔为 1/12 倍频程, 瞬态冲击数据合成法和基本波形合成法的合成冲击波形进行冲击响应谱计算, 计算结果见图 5。按阻尼比为 0.05, 频率间隔为 1/24 倍频程, 瞬态冲击数据合成法和基本波形合成法的合成冲击波形进行冲击响应谱计算, 计算结果见图 6。

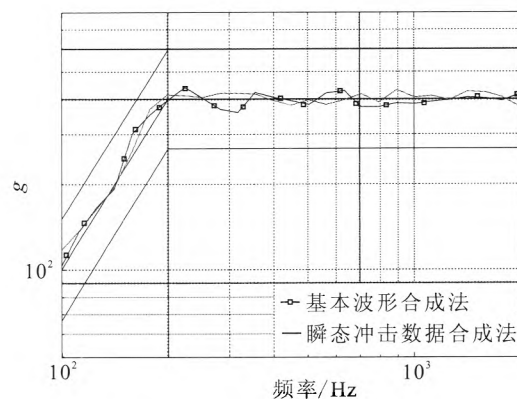


图 5 频率 1/12 倍频程间隔冲击响应谱

Fig. 5 Shock response spectrum at intervals of 1/12 octave

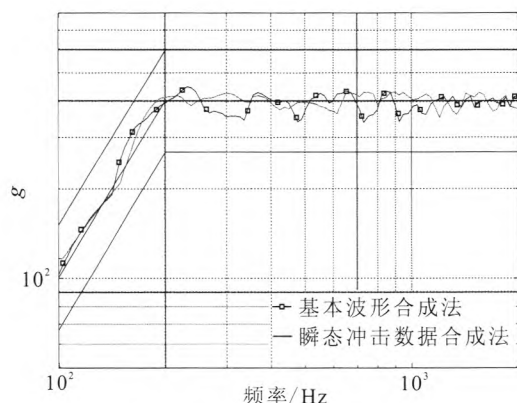


图 6 频率 1/24 倍频程间隔冲击响应谱

Fig. 6 Shock response spectrum at intervals of 1/24 octave

图 3~图 6 的结果表明, 基本波形合成法和瞬态冲击数据合成法所合成的时域冲击波形能够满足给定的发动机部件试验持续时间要求, 并且对应的冲击响应谱满足参考冲击谱形的要求, 并在给定的误差范围内。瞬态冲击数据合成法时域冲击波形符合发动机试车过程中的冲击时域数据变化趋势, 并和正弦合成冲击波形值的范围一致。瞬态冲击数据合成法的冲击响应谱较平坦、容差较小, 而基本波形合成法的冲击响应谱不平坦、容差较大。

4 结束语

从冲击响应谱时域合成的基本方法出发, 提出瞬态冲击数据合成法, 给出了瞬态冲击数据合成法的算法过程, 并和基本波形合成法比较。瞬态冲击数据合成的时域波形能够满足冲击响应谱要求, 为液体火箭发动机冲击试验的冲击控制谱算法提供了一种思路。

参考文献:

- [1] 李锋, 邓长华, 鲍福廷. 液体火箭发动机冲击响应谱分析计算方法[J]. 西安工业大学学报, 2009, 29(1): 28-31.
- [2] 胡志强. 随机振动试验应用技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1996.
- [3] YANG R C, LEBRUH H R. Development of a waveform synthesis technique: a supplement to response spectrum as a definition of shock environment [J]. The Shock and Vibration Bull, 1972, 42(2): 45-53.
- [4] 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, 276(3): 30-36.
- [5] 卢来洁, 马爱军, 冯雪梅. 冲击响应谱试验规范述评[J]. 振动与冲击, 2002, 21(2): 18-21.
- [6] 华师韩, 田恒春. 冲击响应谱计算相关参数选择的研究[J]. 遥测遥感, 2005, 26(6): 50-55.
- [7] 刘洪英, 马爱军. 冲击响应谱时域合成算法研究[J]. 航天医学与医学工程, 2002, 15(6): 438-441.
- [8] 王翠荣, 施广富, 郭军. 固体火箭发动机冲击信号响应谱分析[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(2): 57-60.
- [9] 袁宏杰, 李传日. 冲击响应谱控制的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(4): 494-496.
- [10] 王敬永. 冲击响应谱控制时域匹配的研究 [J]. 环境技术, 1998 (2): 29-33.
- [11] 刘纪元, 杨者青, 刘剑锋. 冲击响应谱自适应控制系统[J]. 计算技术与自动化, 1995, 14(4): 53-55.
- [12] 朱子宏. 大型航天产品冲击响应谱试验方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2001 (3): 49-54.
- [13] 任昌, 潘宏侠. 基于冲击信号的冲击响应谱研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010 (3): 21-24.
- [14] 郝大海. 基于 Hilbert-Huang 变换的发动机振动信号特征提取[J]. 兵工自动化, 2007, 26(12): 81-83.
- [15] 张燕琦, 徐秉恒. 固体火箭发动机轴向冲击响应有限元分析[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(6): 400-403.
- [16] 王承禹, 常汉宝, 郑仁伯, 等. 基于 DYTRAN 的发动机曲轴系冲击动力学仿真 [J]. 内燃机工程, 2009, 30(4): 87-92.

(编辑: 张永秀)