

基于能量谱的时域波形再现瞬态振动环境试验方法

王和^{1†} 刘合锋¹ 杨飞虎²

(1. 天津航天瑞莱科技有限公司, 天津 300462) (2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要 利用外场瞬态振动时间历程数据获得能量谱包络, 借鉴振动台控制理论中随机信号产生原理获得具有包络能量谱幅值特性以及典型外场试验数据相位信息的时域波形, 并用振动台波形再现的方式进行产品瞬态振动环境试验; 该方法为今后直接使用能量谱控制的瞬态振动振动台试验方法提供技术支撑。

关键词 能量谱, 时域波形再现, 瞬态振动, 快速傅里叶变换, 冲击响应谱

DOI: 10.6052/1672-6553-2014-060

引言

航空航天器发射、飞行过程中存在瞬态振动环境。十几年来, 对这种瞬态环境的试验模拟一直是以冲击响应谱峰值等效为原则的^[1]。但冲击的破坏机理较复杂, 冲击谱相同的脉冲时域波形并不一定引起相同的破坏。因此为了更真实地模拟瞬态振动环境, 除了满足冲击谱的要求之外, 必须使模拟波形尽量接近瞬态环境^[2]。

目前, 国内外对这类瞬态振动环境的地面模拟有快速正弦扫描^[3,4]、窄带随机扫描、随机振动^[5,6]、时域波形再现和能量谱^[7-9]等方法, 几种模拟方法各有特点。目前查到关于瞬态振动的模拟试验方法的资料主要是英美两国的军用标准。美军标 MIL-STD-810G(2008 版) 将瞬态振动的模拟试验方法从 MIL-STD-810F 的“炮击振动”一章中独立出来, 单独列为一章, 称为“时域波形再现”。

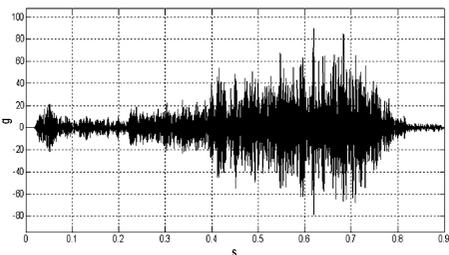


图1 典型外场瞬态振动时间历程

Fig. 1 model outfield transient vibration time history

与典型外场数据相位信息经傅里叶反变换^[10]的时域波形再现瞬态振动试验方法。图1所示为典型外场瞬态振动时间历程图。

1 能量谱密度

能量谱密度或称为瞬态自谱^[11]。对具有随机特性的瞬态信号, 可以用能量谱密度来描述其频率分布:

$$E(f) = \begin{cases} \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |F_i(f)|^2, & f > 0 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i(f)|^2, & f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 n 为平均次数; $F_i(f)$ 表示第 i 个平均数据段的傅里叶谱; 能量谱密度是对 n 个统计上等效的瞬态信号的傅立叶谱的平方平均, 单位 $g^2 \cdot \text{sec}/\text{Hz}$ 。它与功率谱密度计算方法相同。

在不能获得多个瞬态信号样本时, 可对单次瞬态信号傅立叶谱进行谱线平均(按等间隔或倍频程间隔)。

2 基于能量谱反变换的时域波形再现方法

2.1 随时间变化的ESD幅值信息

本文以某型号外场弹射试验获得的大量瞬态振动数据为例^[12]。图1为瞬态振动典型时间历程, 这些试验数据时间历程必须有一定的波形一致性。如图2所示为波形变化趋势一致的三组外场瞬态振动时间历程。由于瞬态振动的非平稳性对这些数

本文介绍一种基于能量谱密度平均幅值信息

据分别进行分段 ESD 估计(傅里叶变换 FFT 点数 1024, ESD 估计点数 1024, 平均次数 5, 信号采样频率 5k), 并对每段 ESD 进行幅值最大包络, 如图 3 所示. 图中大量黑色曲线为外场试验数据 ESD 估计曲线, 红色线为最大包络曲线. 图 4 为不同时间分段平均 ESD 估计, 可以看出 ESD 随时间变化谱值发生变化体现出瞬态振动的非平稳特征. 最后, 通过最大包络 ESD 谱值通过公式(1)获得傅里叶谱幅值信息. 本文 ESD 包络方法采用最大包络, 也可参照随机振动功率谱密度包络方法.

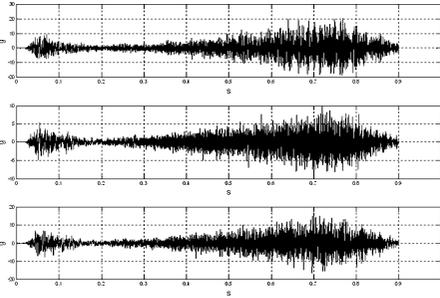


图2 具有一致波形趋势的外场瞬态振动数据

Fig. 2 outfield transient vibration data of consistent waveform

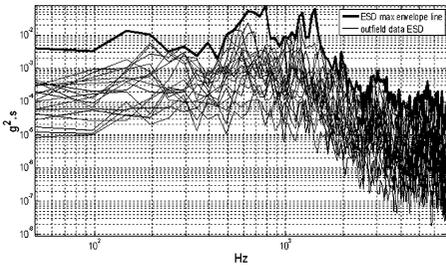


图3 分段能量谱密度最大包络

Fig. 3 subsection ESD max envelope

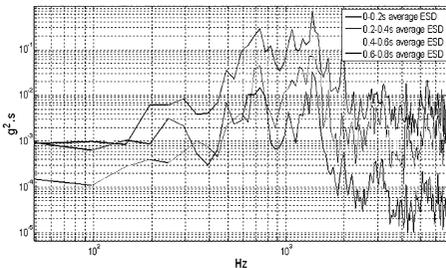


图4 能量谱密度随时间变化曲线

Fig. 4 ESD versus time curves

2.2 典型外场瞬态振动相位信息

在大量试验数据中选取幅值最大的时间历程, 按与 2.1 节谱变化相同的点数进行 FFT 变换获得典型相位. 这里相位不能进行平均处理. 将获得的相位信息与通过 ESD 最大包络获得的傅里叶谱幅

值信息经 FFT 反变换得到振动台开环控制的时域波形, 图 5 为反变换得到的时域波形与具有典型相位信息的外场时间历程比较图. 图 6 为该流程图. 特别指出若外场数据为产品自身响应数据, 需要进行振动台与产品之间的传递标定, 详细步骤见 MIL-STD-810G 附录 A; 若外场数据为产品安装处响应, 则直接应用此方法在振动台上应用时域波形再现模块将反变换的时域波形输入即可.

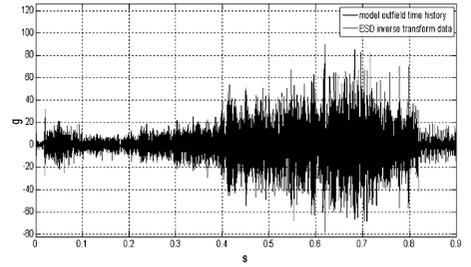


图5 能量谱反变换的时域波形与典型外场时间历程比较

Fig. 5 time waveform after ESD inverse transform and model outfield time history

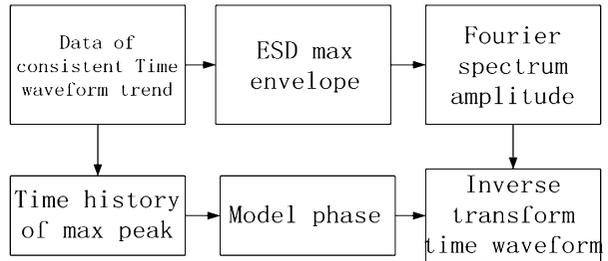


图6 反变化方法流程图

Fig. 6 inverse transform method flow chat

3 与传统试验方法比较

表1 传统试验方法模拟瞬态振动环境能力分析

Table 1 traditional test method capacity analyze of simulating transient vibration environment

Test method	Shortage of simulating transient vibration environment
SRS test	Time waveform of SRS test machine is considerable different from outfield time history
PSD random vibration test	Smooth time waveform of random phase is considerable different from outfield time history
Slow swept	Test time length is considerable bigger than outfield time length
Fast swept	Test time domain peak value is bigger than outfield data It's hard to find an appropriate outfield measurement data as direct time waveform.
Time waveform replication in MIL-STD-810G ^[8]	The method of time waveform replication based stat in MIL-STD-810G addenda B is used to simulate repetition impulse and not used for the transient vibration environment in this paper.

表1给出传统试验室试验方法来模拟瞬态振动环境的不足. 本文着重说明本文提出的方法与美军标直接时域波形再现方法的比较. 使用图1时域波形作为直接时域波形再现的开环波形;图5中红色曲线为反变换方法得到的时域波形. 图7为能量谱反变换均方根值时间历程与典型波形均方根值时间历程比较. 图8为反变换后冲击响应谱与典型波形冲击响应谱比较. 可以看出经过平均统计能量谱反变换的RMS以及SRS基本包络直接波形再现典型波形的RMS以及SRS. 在个别时间点及频率点出现的超差是由于ESD谱变换过程中参与谱变换的点数较多以及平均次数过多. 降低变换点数以及平均次数可以减少超差,但增加计算量.

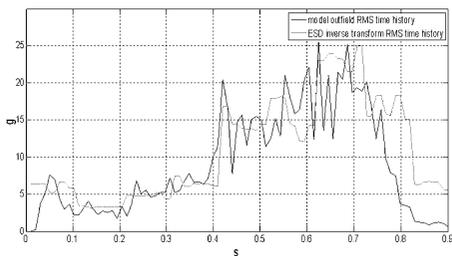


图7 ESD反变换的RMS时间历程与直接波形再现RMS时间历程

Fig. 7 root mean square versus time curve after ESD inverse transform and RMS of direct waveform replication

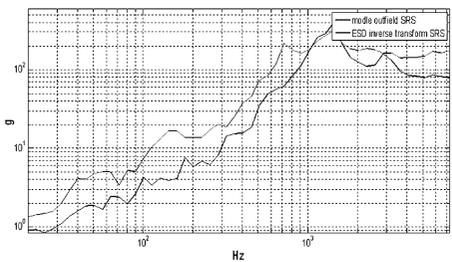


图8 ESD反变换的SRS与直接波形再现SRS比较
Fig. 8 shock response spectrum after inverse transform and SRS of direct waveform replication

4 结论

本文介绍了一种基于能量谱密度平均幅值信息与典型外场相位信息经傅里叶反变换的时域波形再现瞬态振动试验方法. 经过与直接时域波形再现方法的比较发现反变换的时域波形保持了外场数据最大冲击响应谱值的特性,且时域波形趋势特征与外场数据一致. 由于其采用统计平均能量谱对

大量外场数据进行最大包络,其时域均方根值包络覆盖直接时域波形再现方法,此方法更具统计意义,具有工程应用价值. 该方法为今后直接使用能量谱控制的瞬态振动振动台试验方法及振动控制方法提供技术支撑.

参 考 文 献

- 1 张阿舟. 振动环境工程. 北京:航空工业出版社,1986:30~42 (Zhang A Z. Vibration environment engineering. Beijing: Aviation Industry Journal, 1986:30~42 (in Chinese))
- 2 夏益霖,吴家驹. 航天发射的低频振动环境及其模拟. 强度与环境,1998,12:8~10 (Xia Y L, W j j. Low-frequency vibration environment and its simulation for aerospace launch. *Structure and Environment Engineering*, 1998,12:8~10 (in Chinese))
- 3 黄寿康. 流体动力、弹道、载荷、环境. 北京:宇航出版社,1989:55~72 (Huang S K. Hydrodynamics, trajectory, load, environment. Beijing: Aerospace Journal, 1989:55~72 (in Chinese))
- 4 朱银龙,陈怀海,贺旭东,贾良现. 多输入多输出正弦振动试验控制系统算法研究及实现. 振动工程学报,2008,21(1):62~65 (Zhu Y L, Chen H H, He X D, Jia L X. Implementation of an algorithm for MIMO sinusoidal vibration test control system. *Journal of Vibration Engineering*, 2008,21(1):62~65 (in Chinese))
- 5 朱学旺,刘青林. 飞行振动环境随机试验模拟的载荷等效. 航天器环境工程,2006,23(5):257~261 (Zhu X W, Liu Q L. Simulation of excitation in ground random vibration test with respect to flight environment. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006,23(5):257~261 (in Chinese))
- 6 胡志强. 随机振动应用技术. 北京:中国计量出版社,1996,12:119~120 (Hu Z Q. Random vibration technology. Beijing: China Measurement Journal, 1996,12:119~120(in Chinese))
- 7 关晓磊,颜景龙. 爆破振动信号的HHT时频能量谱分析. 爆炸与冲击,2012,32(5):535~541 (Guan X L, Yan J L. The HHT time-frequency power spectrum analysis of the blasting vibration signal. *Blast and Impact*, 2012,32(5):535~541 (in Chinese))
- 8 张献民,宋长柏,刘秀菊. 瞬态振动信号在公路信号检测中的应用. 河北工业大学学报,2001,30(1):57~62 (Zhang X M, Song C B, Liu X J. Applied transient vibra-

- tion signal in highway engineering test. *Journal of Hebei Industry University*, 2001,30(1):57~62 (in Chinese))
- 9 曹希耀. 能量谱法及其在工程中的应用. 河南财经学院学报, 1986,3;5~7 (Cao X Y. Energy spectrum method and engineering application. *Journal of Henan Finance Institute*, 1986,3;5~7 (in Chinese))
- 10 刘益成. 数字信号处理. 北京:电子工业出版社, 2009, 1:86~97 (Liu Y C. Digital signal processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009,1:86~97 (in Chinese))
- 11 陈新之. 关于瞬态振动分析的方法. 西北轻工业学院学报, 1994,10:161~167 (Chen X Z. The method of transient vibration analysis. *Journal of West-North Light Industry Institute*, 1994,10:161~167 (in Chinese))
- 12 冈武民. 弹射动力动态性能参数波形与频谱分析的初步研究. 航空学报, 1998 9(6):241~247 (Gang W M. Preliminary research on wave and frequency spectrum analysis of dynamic performance parameters for ejection power. *Journal of Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 1998 9(6):241~247 (in Chinese))

THE METHOD OF TIME WAVEFORM REPLICATION TRANSIENT VIBRATION TEST BASED ON ENERGY SPECTRUM DENSITY

Wang He^{1†} Liu Hefeng¹ Yang Feihu²

(1. *Tianjin Aerospace Relia Technology Co., Ltd, Tianjin 300462, China*)

(2. *Beijing Institution of Structure & Environment, Beijing 100076, China*)

Abstract This paper used outfield transient vibration time history to gain ESD envelope ; used random signal replication method in vibrator control theory to gain ESD amplitude time history and used vibrator time waveform replication method to take transient vibration test. This method provides technology support for vibrator ESD direct control test method.

Key words energy spectrum density, time waveform replication, transient vibration, fast fourier transform, shock response spectrum