

基于 STFT 的最大预示环境波形重构新方法

邱伟, 师培峰, 任燕, 樊孝春
(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 振动过程的最大预示环境 (MEE) 是指在某个关心的结构区域内, 通过测量或预示手段获得的以谱形式表示的振动环境数据保守极限。然而, 很多振动试验方法, 特别是用振动台模拟低频瞬态环境时 (低于 100 Hz), 需要给出试验信号的参考波形。文章结合振动模拟试验及短时傅里叶变换 (STFT) 时频分析, 提出一种振动过程最大预示波形 (MEW) 的重构新方法。数值仿真结果表明, 与传统方法相比, 使用新方法重构的 MEW 误差更小, 且试验控制更加灵活、高效, 更适合于工程应用。

关键词: 最大预示环境; 波形重构; 振动模拟试验; 短时傅里叶变换

中图分类号: V416.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2016)01-0042-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.01.007

A new waveform reconstruction method based on STFT in the maximum expectant environment

Qiu Wei, Shi Peifeng, Ren Yan, Fan Xiaochun

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The maximum expectant environment (MEE) of a vibration process means that in an area of a structure, the conservative limit of the vibration environmental data is obtained in the form of a spectrum by measurement or prediction methods. However, for many test methods, especially when the vibration table is used to simulate the low frequency transient environment (with frequency less than 100 Hz), the test reference signal waveforms have to be given. Based on the MEE of the vibration process besides the time and frequency analysis, a new method is proposed to reconstruct rapidly the maximum expectant environmental waveform (MEW) in the vibration simulation test. The numerical simulation results show that the error of the calculations by the new method is reduced, and the control is more flexible and efficient as compared with the traditional method, thus the new waveform reconstruction method can be used in the vibration environment test.

Key words: maximum expectant environment; waveform reconstruction; vibration simulation test; STFT

0 引言

有可能出现的最恶劣环境称之为最大预示环境 (maximum expectant environment, MEE), 是飞行器设计师关心的一个重要问题。每一个产品都是在一定的环境中工作, 为保证产品应用的可靠性, 都会制定出 MEE 标准^[1-2]。MEE 标准的制定一般都是保守的, 产品一定要满足 MEE 标准要求才能出厂。

军用标准的 MEE 通常以加速度等参数的傅氏谱的形式给出。一方面, 需要得到产品结构的响应,

即对结构响应进行预示: 一般是预示出结构上某一点的响应, 很多情况是给出一个小区域内的响应, 它不一定与形成设计/试验标准时的有关点相符合, 且标准中所使用的动力学载荷是通过计算、假定和测量给出的, 不能反映每次飞行之间载荷的潜在差异。因此, 有必要在预示振动量级的基础上, 增加一定的余量来得出一个 MEE, 使振动量级更加保守, 以便有更大的适应性: 适应不同空间的差异以及不同工况的差异^[2]。另一方面, 在产品的振

动模拟试验中, MEE 的给出一般以参考谱的形式来设置。但在很多情况下, 试验需要循环进行, 即要求系统是闭环控制, 这时不仅要实时控制谱形, 还要控制时域的预示波形。因为波形给试验人员及时提供了 MEE 的直观信息, 所以在地面时域激励振动试验 (或者随机振动试验) 加载中, 重构出最大预示波形 (MEW) 很有必要。然而传统的 MEW 都是通过所选结构区域的多条傅氏谱确定极大谱, 进而通过傅氏逆变换来确定^[3]。这种方法的缺陷在于无法同时反映信号的时频域特性, 即无法将时间、频率、幅值对应起来, 它确定的 MEW 只能反映过去一段时间的环境状态, 因而很难灵活适应实时变化的环境。

本文引入短时傅里叶变换 (STFT) 方法做时频分析, 根据试验环境变化实时计算傅氏谱包络, 进而重构出适应环境变化的 MEW, 以更好地适用于工程应用。

1 STFT 定义

STFT 方法是最早使用的一种时频分析方法, 广泛应用于信号处理和分析领域^[4-5]。

STFT 的连续形式定义为

$$\text{STFT}_X \{x(t)\}(\tau, \omega) = X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w(t-\tau) \cdot \exp(-j\omega t) dt, \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为时域信号; $w(t)$ 为窗函数; t 为时间; ω 是角频率。STFT_X 是信号 $x(t)$ 乘以平移的窗函数 $w(t-\tau)$ 再做傅里叶变换而得, 因此有效抑制了窗函数以外的信号, 可反映局部谱。

STFT 离散形式定义为

$$\text{STFT}_X \{x[n]\}(m, \omega) = X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} x[n] \cdot w[n-m] \cdot \exp(-j\omega n), \quad (2)$$

式中: $x[n]$ 为时域信号; $w[n]$ 为窗函数。时频分辨率受窗函数影响, 由于受不确定原理^[6]的限制, 不可能同时获得高的时间分辨率和频率分辨率。

STFT 是一种线性变换, 避免了高次型非平稳分析方法中出现的交叉项干扰, 是分析非平稳信号的强有力工具。

2 传统波形重构

传统的预示波形重构是先经计算得出试验环境的最大预示谱, 然后通过频域滤波去噪后进行傅氏逆变换得到时域波形。这个时域波形就表征了试验环境的 MEW, 可以用来直观地评估潜在的最大预示环境。其中预示谱的计算方法为: 设有 N 个传感器采集得到 N 个信号序列 x_1, x_2, \dots, x_N (x_i 为行向量) 作为输入信号, 各个信号序列的傅氏谱为 $X=(X_1, X_2, \dots, X_N)^T$ (X_i 为行向量), $E_i=(0, 0, \dots, 1, \dots, 0)^T$ (第 i 行为 1 的单位向量), 则根据多个信号序列的傅氏谱就可以估计试验环境的最大预示谱^[7], 即

$$S = \arg[\max(XE_1), \max(XE_2), \dots, \max(XE_N)]. \quad (3)$$

传统的波形重构方法用于地面振动模拟试验时有以下缺陷: 1) 试验一般以设定的参考谱为依据进行, 不能随时间变化实时观测信号频域信息, 即不能进行时频分析, 而有些试验 (如地面瞬态激励振动试验) 对某时刻的频域信息很关心; 2) 这种方法不够灵活, 涉及大量的矩阵运算, 显示上不够高效。

3 基于 STFT 的波形重构方法

为了在地面振动模拟试验中更好地完成 MEE 的预示, 从而重构出时域波形, 对传统的波形重构方法做了修改, 即: 引入 STFT 时频分析工具, 对信号序列进行时频分析后, 再计算包络最终输出 MEW。MEW 重构算法流程见图 1。

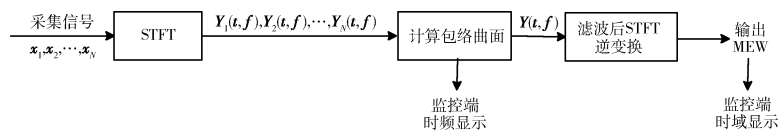


图1 MEW 重构算法流程

Fig. 1 Flow chart of MEW reconstruction method

MEW 重构算法具体步骤如下:

1) 振动模拟试验中布设 N 个振动传感器, 其安装位置要呈均匀分布, 能够表征整个试验件台面的振动信息; 将 N 个传感器采集得到 N 个信号序列 x_1, x_2, \dots, x_N 作为输入信号。

2) 在监控端用软件对 N 个输入信号进行 STFT 变换, 得到 N 个时频分布曲面 $Y_1(t, f), Y_2(t, f), \dots, Y_N(t, f)$ 。

3) 通过二维峰值搜索算法从 N 个时频分布曲面中寻找包络曲面 $Y(t, f)$ 。

4) 对包络曲面 $Y(t, f)$ 进行短时傅里叶域滤波。

5) 对滤波后的包络曲面 $Y(t, f)$ 再进行 STFT 逆变换输出 MEW。

4 振动试验仿真分析

对某产品地面振动模拟试验过程进行仿真分析, 试验主要由随机信号源、功率放大器、振动台、信号采集设备、监控计算机组成。信号源发送随机信号到功率放大器, 功率放大器的输出作为驱动信号输入到振动台, 振动台对试验件驱动; 试验件与振动台连接部分安装 4 个振动传感器, 传感器与采集设备连接, 采集设备与监控计算机连接(见图 2)。

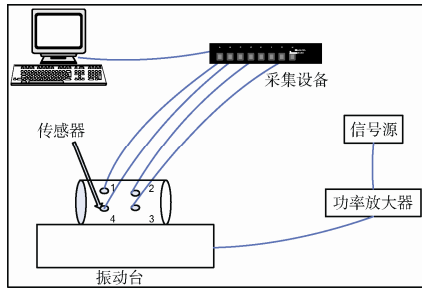


图 2 地面振动模拟试验连接示意图
Fig. 2 Connections in ground vibration simulation test

经过一段时间(大约 24 s)后系统达到稳定状态, 具体试验结果见图 3~图 10。其中: 图 3 为试验中设置的参考谱; 图 4 为参考谱对应的时域波形; 图 5、图 6 分别为系统稳定后测点 1 和测点 2 的时频分布; 图 7 为应用 STFT 时频分析新方法在系统稳定后计算出的包络谱, 频率成分主要在 10~30 Hz 频带内; 图 8 为应用传统重构方法在系统稳定后计算出的包络谱, 频率成分也集中在 10~30 Hz 频带内; 对图 7 进行逆 STFT 得到图 9, 给出了应用 STFT 时频分析新方法在系统稳定后重构出的

MEW; 对图 8 进行逆 FFT 得到图 10, 给出了应用传统方法在系统稳定后重构出的 MEW。

将图 7、图 8 分别与图 3 对比, 可以看出应用 STFT 时频分析新方法在系统稳定后计算出的包络谱与参考谱之间更吻合, 在试验中控制起来更灵活、高效。将图 9、图 10 分别与图 4 对比, 可以看出应用 STFT 方法重构出的 MEW 与参考谱对应的时域波形更吻合, 相较传统方法误差更小, 预示结果更接近真实环境。

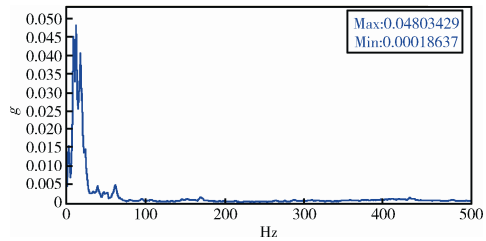


图 3 振动模拟试验参考谱

Fig. 3 Reference spectrum of vibration simulation test

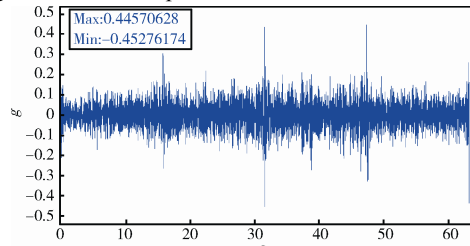


图 4 参考谱对应的时域波形

Fig. 4 Time-domain wave corresponding to reference spectrum

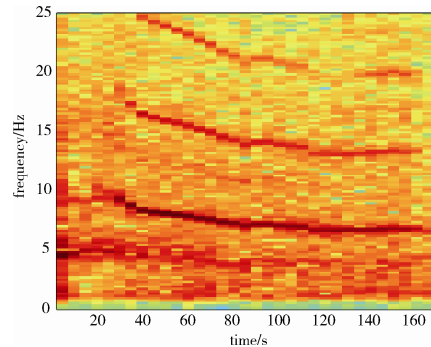


图 5 测点 1 的 STFT 时频分析

Fig. 5 Time-frequency analysis by STFT of the point 1

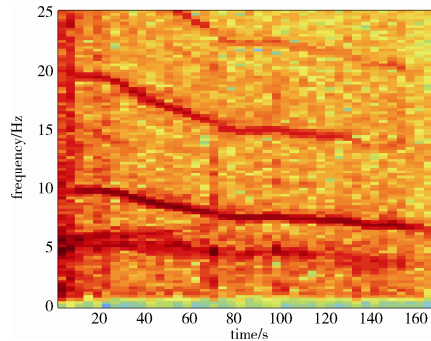


图 6 测点 2 的 STFT 时频分析

Fig. 6 Time-frequency analysis by STFT of the point 2

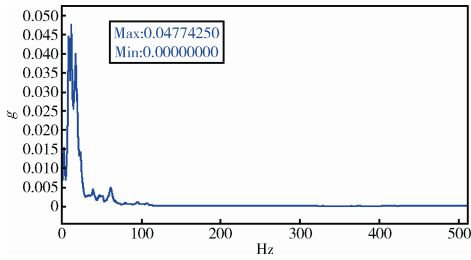


图7 本文STFT方法计算出的包络谱

Fig. 7 Envelope spectrum calculated with the proposed STFT method

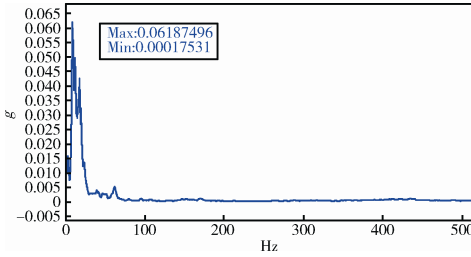


图8 传统FT方法计算出的包络谱

Fig. 8 Envelope spectrum calculated with the traditional FT method

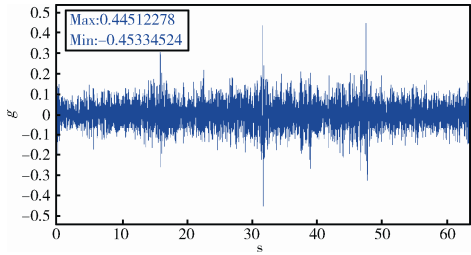


图9 本文STFT方法重构出的MEW

Fig. 9 MEW reconstructed by the proposed STFT method

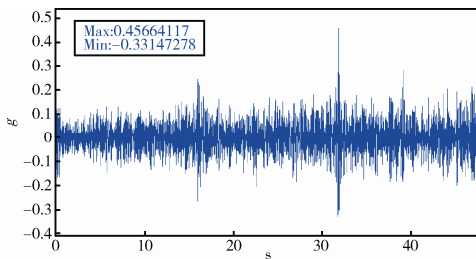


图10 传统FT方法重构出的MEW

Fig. 10 MEW reconstructed by the traditional FT method

5 结束语

本文以产品振动模拟试验过程中潜在的最大预示环境为背景,提出了一种以STFT时频分析为依托的最大预示波形重构新方法。仿真分析表明,这种环境预示方法较传统方法更方便有效,在产品振动模拟试验中具有广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Hughes W O, McNelis A M, Himelblau H. Investigation of acoustic fields for the Cassini spacecraft: reverberant versus launch environments[C] // 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit. Bellevue, WA, 1999: 1193-1203
- [2] Wilby J F, Piersol A G. Analytical prediction of aerospace vehicle vibration environments, ASME Paper 81-DET-29[R], 1981
- [3] Scharton T D. Force limited vibration testing monograph, NASA Reference Publication RP-1403[R], 1997
- [4] Quyang X, Amin M. Short-time Fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spread spectrum communication[J]. IEEE Trans on Signal Proc, 2001, 49(4): 851-863
- [5] 李亚安, 王军. 自适应核时频分布在抑制交叉项中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(11): 1567-1569
Li Ya'an, Wang Jun. Application of adaptive kernel time-frequency distribution in cross-components suppression[J]. System Engineering and Electronics, 2004, 26(11): 1567-1569
- [6] 张资达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1-528
- [7] Worth D B. A method for implementing force-limited vibration control[J]. Journal of the Institute of Environment Sciences, 1997, 16(4): 34-41

(编辑: 许京媛)