

# 随机减量函数触发条件分析

刘彬<sup>1</sup>, 丁桦<sup>1</sup>, 时忠明<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080; 2. 中国海洋石油总公司研究中心, 北京 100027)

**摘要** 针对随机减量技术应用过程中有关触发条件的选择问题进行了详细的分析, 对随机减量函数进行了相应的扩展, 并且在传统的水平穿越触发条件的基础上, 又提出了零穿越触发、极值点触发和随机采样触发三种简单实用的触发条件, 克服传统触发条件对于触发点数和截取幅值的局限, 拓宽了随机减量技术的应用范围。通过实际的数值算例及其进行模态参数识别的应用, 验证了几种触发条件的实用性, 计算结果表明, 对于实际采样信号长度有限或响应幅值较小的情况下, 上述提出的方法比传统方法能得到更理想的效果。

**关键词:** 随机减量, 自由响应信号, 触发条件, 相关函数, 模态识别

**中图分类号:** O327, TH113.1 **文献标识码:** A

在结构振动分析中, 随机减量技术 (Random Decrement Technique) 是从结构随机响应信号获取结构自由衰减信号的一种非常方便有效的方法。因为, 很多结构, 特别是现代的大型复杂结构如高层建筑、桥梁、海洋平台等, 处于复杂的环境载荷作用下, 这些环境载荷经常是无法测量的, 而且要实现对这些结构的人工瞬态激振是难以实现的或者花费太大。而随机减量技术的最主要的特点就是它对外激励只有定性要求, 而仅仅对响应的信息做数据处理。

振动特征分析的随机减量技术是由 Cole<sup>[1,2]</sup> 在 70 年代首先提出的。随机减量技术的基本思想<sup>[3]</sup> 是建立在线性系统的叠加原理基础上的, 既对于结构随机响应, 指定某种条件, 将响应中确定性的和随机的两部分实现分离, 然后利用统计平均的方法将随机的部分排除掉, 过滤出确定性的自由衰减信号。由于随机减量技术的实现简单, 同时在实际工况下可以实现数据实时分析, 现在已经成为一项提取结构自由衰减信号非常成熟的技术, 并且在振动模态分析<sup>[4]</sup>、结构损伤检测等<sup>[5]</sup> 领域中得到广泛的应用。

对于随机减量技术中的应用, 其中有几个关键问题。其一, 对外激励提出定性的要求, 即要求均值为零的稳态随机激励,  $E[f(t)] = 0$ ,  $E(\cdot)$  为数学期望运算,  $f(t)$  为外激励函数。这一条件也并不是非常严格的要求, 实际上如果  $E[f(t)] = C \neq 0$ ,  $C$  为常数, 增加的直流分量并不影响衰减曲线的形状和计算频率与阻尼的精度<sup>[3]</sup>。其二, 信号截取幅值的选取, 即在结构随机响应结果中如何选取子信号段的触发值。特别是对响应采样信号本身激励量比较小的情况下, 触发值对计算结果更是一个重要因素。其三, 实际应用中是利用算术平均代替数学期望的计算, 在有限的随机响应信号

中, 如何保证子信号有足够的平均次数, 从而得到满意的随机减量信号。其中问题二、三之间有一定的关联性, 不同的子信号触发条件可能得到不同的子信号平均次数, 同时也可以根据不同的平均次数来确定相应的触发条件。本文针对这两个问题, 首先对随机减量函数触发条件进行全面的分析和研究, 然后在传统的水平穿越触发条件的基础上, 对随机减量函数进行了相应的扩展, 又提出三种不同的触发条件, 并且通过相应的数值算例, 进一步说明这几种方法的有效性和实用性。

## 1 随机减量技术的数学基础

考虑两个随机过程  $X(t)$  和  $Y(t)$ , 自随机减量函数和互随机减量函数可分别定义为<sup>[6]</sup>,

$$D_{XX}(\tau) = E[X(t+\tau) | T_{X(t)}] \quad (1a)$$

$$D_{YY}(\tau) = E[Y(t+\tau) | T_{Y(t)}] \quad (1b)$$

$$D_{XY}(\tau) = E[X(t+\tau) | T_{Y(t)}] \quad (1c)$$

$$D_{YX}(\tau) = E[Y(t+\tau) | T_{X(t)}] \quad (1d)$$

式中,  $D_{XX}(\tau)$ 、 $D_{YY}(\tau)$  为自随机减量函数,  $D_{XY}(\tau)$ 、 $D_{YX}(\tau)$  为互随机减量函数,  $T_{X(t)}$ 、 $T_{Y(t)}$  为随机减量函数触发条件。

对于随机减量函数的严格的数学描述, 是 Vandiver 等<sup>[7]</sup> 在 1982 年首先明确提出的。Vandiver 的结论为, 在满足高斯分布、均值为零的随机过程这一个特定的情况下, 随机减量函数正比于相应随机信号的自相关函数。随后很多学者又进一步得到了互随机减量函数与响应相关函数的关系<sup>[8,9]</sup>。但是这些推导都是基于水平穿越触发条件, 即触发条件为以常数值  $T_{Xt} = C_0$ 。而根据一般形式的触发条件, Asmussen<sup>[6]</sup> 和 Brincker 等<sup>[10]</sup> 推导出了随机减量函数与响应相关函数之间更一般性的数学关系。即对于一般的触发条件可表示为

$$T_{Xt} = \{X(t) = x | a_1 \leq x < a_2, \dot{X}(t) = x | b_1 \leq x < b_2\}, \text{Asmussen 给出的表达式为,}$$

$$D_{XX}(\dot{x}) = \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x^2} \cdot a - \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x} \cdot b \quad (2a)$$

$$D_{YX}(\dot{x}) = \frac{R_{YX}(\dot{x})}{x^2} \cdot a - \frac{R_{YX}(\dot{x})}{x} \cdot b \quad (2b)$$

式中,  $R_{XX}(\dot{x})$ 、 $R_{XX}(\dot{x})$ 、 $R_{YX}(\dot{x})$ 、 $R_{YX}(\dot{x})$  为随机响应的自相关函数和互相关函数及其导数,  $\dot{x}^2$ 、 $\dot{x}^2$  为随机响应的方差及其导数,  $\dot{x}^2 = R_{XX}(0)$ 、 $\dot{x}^2 = R_{XX}(0)$ , 其中

$$a = \frac{\int_{a_1}^{a_2} x p_X(x) dx}{\int_{a_1}^{a_2} p_X(x) dx} \quad b = \frac{\int_{b_1}^{b_2} x \dot{p}_X(x) dx}{\int_{a_1}^{a_2} \dot{p}_X(x) dx}, \quad p_X(x) \text{ 和 } \dot{p}_X(x) \text{ 为概率分布密度函数。}$$

对于随机减量信号的基于触发条件的条件方差, Brincker和 Chiu Jen Ku<sup>[5]</sup>给出的结果为

$$\text{Var}[X(\cdot) | X(0) = x_0, \dot{X}(0) = \dot{x}_0] = R_{XX}(0) - \frac{R_{XX}^2(\dot{x})}{x^2} - \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x} \quad (3a)$$

$$\text{Var}[X(\cdot) | Y(0) = x_0, \dot{X}(0) = \dot{x}_0] = R_{YY}(0) - \frac{R_{XY}^2(\dot{x})}{x^2} - \frac{R_{XY}(\dot{x})}{x} \quad (3b)$$

因此可以看出, 随机减量函数触发条件的选择对于随机减量技术的应用是一个非常重要的研究环节。

## 2 随机减量函数触发条件的研究

针对公式 (1), 在随机减量技术的实际应用中是利用子信号的算术平均作为随机减量函数的估计值。一般的表达式为

$$\hat{D}_{XX}(\dot{x}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \cdot) / T_{x(t_i)} \quad (4a)$$

$$\hat{D}_{YX}(\dot{x}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i + \cdot) / T_{x(t_i)} \quad (4b)$$

式中,  $N$  为截取子信号数或随机减量函数的触发点数。

那么必然有

$$E[\hat{D}_{XX}(\dot{x})] = \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x^2} \cdot a - \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x} \cdot b = D_{XX}(\dot{x}) \quad (5a)$$

$$E[\hat{D}_{YX}(\dot{x})] = \frac{R_{YX}(\dot{x})}{x^2} \cdot a - \frac{R_{YX}(\dot{x})}{x} \cdot b = D_{YX}(\dot{x}) \quad (5b)$$

$$\text{Var}[\hat{D}_{XX}(\dot{x})] = \frac{1}{N} \left[ R_{XX}(0) - \frac{R_{XX}^2(\dot{x})}{x^2} - \frac{R_{XX}(\dot{x})}{x} \right] \quad (5c)$$

$$\text{Var}[\hat{D}_{YX}(\dot{x})] = \frac{1}{N} \left[ R_{YY}(0) - \frac{R_{XY}^2(\dot{x})}{x^2} - \frac{R_{XY}(\dot{x})}{x} \right] \quad (5d)$$

因此, 对于实际操作中, 除了上文提到的触发条件的选择外, 子信号平均次数也是一个非常重要的影响因素。因为, 如果平均次数太少, 那么算术平均作为随机减量函数的估计值效果变差; 如果利用传统的水平截取的触发条件, 平均次数增多必然降低触发值, 而小幅度触发产生的位移值偏小, 可能平均效果也不理想。

对于传统公式 (4a)、(4b) 给出的运算都是针对触发条件  $T_{x(t_i)}$  中的触发点  $x(t_i)$  为同号的情况, 因此对上两式进行一下扩展, 使得可以实现对于  $x(t_i)$  可以任意取值。即有

$$\hat{D}_{XX}(\dot{x}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i + \cdot) | T_{x(t_i)} \quad (6a)$$

$$\hat{D}_{YX}(\dot{x}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i + \cdot) | T_{x(t_i)} \quad (6b)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} 1 & T_{X(t)}(X(t) \geq 0) \\ -1 & T_{X(t)}(X(t) < 0) \end{cases}$$

式 (6) 的扩展不影响式 (5) 的结果。虽然对于触发条件的选择有各种各样的形式, 例如可以将响应信号的全部正值都选为触发点, 但是在实际应用中, 触发条件的选择首先需要产生合适的平均次数, 其次在计算上简单容易实现, 最后保证得到一个满意的结果。基于此文本总结出几种相应的触发条件进行进一步的分析。

### 2.1 水平穿越触发条件

目前对于触发条件应用最广泛的是传统水平触发条件, 即

$$T_{X(t)} = \{ X(t) = x_0 | x_0 \leq x < x_0 + x_0, -x_0 \leq \dot{X}(t) + \cdot \}$$

其中,  $x_0 > 0$  为一常数。基于应用的更一般性, 同时为了增加平均次数, 基于式 (6), 对此触发条件进行扩展, 如图 1 所示, 即

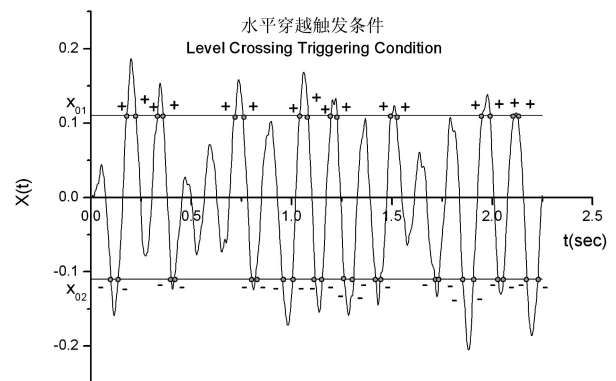


图 1 水平穿越触发条件

$$T_{X(t)} = \left\{ \begin{array}{l} \forall x_{01} > 0, X(t) = x_{01} | x_{01} \leq x < x_{01} + x_{01} \\ \forall x_{02} < 0, X(t) = x_{02} | x_{02} \leq x < x_{02} + x_{02} \\ - \leq \dot{X}(t) < + \end{array} \right\} \quad (7)$$

则随机减量函数 (6) 式中,

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad T_{X(t)} (X(t) = x_{01}) \\ -1 \quad T_{X(t)} (X(t) = x_{02}) \end{array} \right.$$

将 (7) 式代入到 (5) 式中, 有

$$a = \frac{x_{01} - x_{02}}{2}, b = 0$$

而且方程 (3) 使条件方差最小化时, 同样可以得到最优的触发水平为  $a = \sqrt{2} x_0$ .

### 2.2 零穿越触发条件

图 2 给出了一种特殊的水平穿越触发条件, 即用  $X(t) = 0$  截取触发点, 称为零穿越触发条件, 此时有

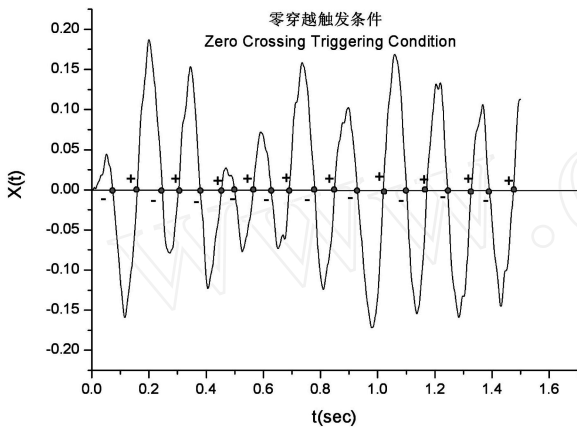


图 2 零穿越触发条件

$$T_{X(t)} = \left\{ \begin{array}{l} X(t) = 0 | 0 \leq X(t) < 0 + 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X(t) < + \\ - \leq X(t) < 0 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (8)$$

此时, 随机减量函数式 (6) 中,

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad T_{X(t)} (0 \leq X(t) < +) \\ -1 \quad T_{X(t)} (- \leq X(t) < 0) \end{array} \right.$$

将方程 (8) 代入式 (5) 中, 得

$$a = 0, b = \sqrt{2} \dot{X}(t)$$

### 2.3 极值点触发条件

另一种比较简单的触发条件是极值点触发条件, 即选取随机响应函数的极值点作为触发点, 如图 3 所示。此时触发条件可表示为

$$T_{X(t)} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X(t) < \max(X(t)) \\ \min(X(t)) \leq X(t) < 0 \\ X(t) = 0 | 0 \leq \dot{X}(t) < 0 + 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

此时, 随机减量函数 (6) 式中,

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad T_{X(t)} (0 < X(t) \leq \max(X(t))) \\ -1 \quad T_{X(t)} (\min(X(t)) \leq X(t) < 0) \end{array} \right.$$

将方程 (9) 代入式 (5) 中, 得

$$a = \sqrt{2} X(t), b = 0$$

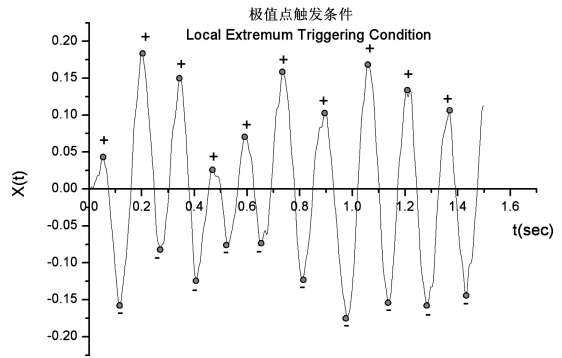


图 3 极值点触发条件

### 2.4 随机采样触发条件

前面给出的三种触发条件都是在给定触发值的前提下, 而平均次数是不确定的。下面讨论一种根据给定平均次数  $N$  选取触发点的随机采样触发条件, 如图 4 所示。首先, 已知随机响应数据的长度为  $T$ , 在时间区间  $[0, T]$  之间按照某种概率分布进行随机采样, 采样次数为给定的平均次数  $N$ 。例如, 利用简单的均匀分布进行采样, 得到采样序列  $t_i, i = 1, \dots, N$ , 而此序列的分布密度为  $p(t) = \frac{1}{T}, 0 \leq t \leq T$ 。则此时的触发条件为

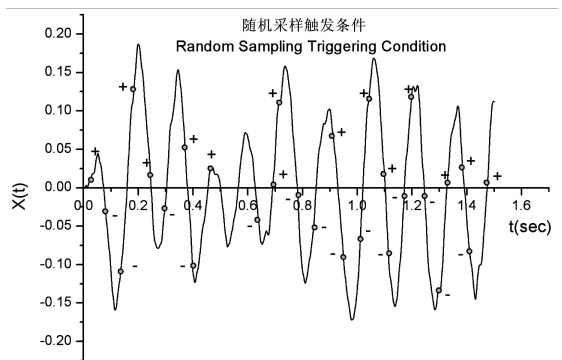


图 4 随机采样触发条件

$$T_{X(t)} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq X(t) < \max(X(t)) \\ \min(X(t)) \leq X(t) < 0 \\ - \leq \dot{X}(t) < + \end{array} \right\} \quad (10)$$

此时, 随机减量函数 (6) 式中,

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad T_{X(t)} (0 \leq X(t) \leq \max(X(t))) \\ -1 \quad T_{X(t)} (\min(X(t)) \leq X(t) < 0) \end{array} \right.$$

将方程 (10) 带入式 (5) 中, 得

$$a = \sqrt{\frac{2}{N}} x(t), b = 0$$

### 3 应用实例

为了进一步说明上文分析的随机减量函数触发条件, 引入两个数值算例进行说明。算例 1 所用的结构如图 5 所示为一单自由度系统, 其中刚度  $K = 4 \times 10^7 \text{ N/s}$ , 质量  $M = 1 \times 10^6 \text{ kg}$ , 阻尼  $C = 1.04 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ , 施加零均值、高斯平稳随机分布的载荷  $F(t)$ 。表 1 给出了采样频率为 66.7 Hz, 采样点数分别为 5 000 和 30 000 时不同触发条件下, 利用所得自由响应信号识别出的结构固有频率和模态阻尼比。图 6 给出采样点数为 5 000 时, 几种触发条件下所得自由响应信号, 所得触发点数  $N_{\text{random}} > N_{\text{slope}} > N_{\text{extremum}} > N_{\text{level}} > N_{\text{tradition level}}$ ,  $N_{\text{random}}$  也可以根据需要进行选择。由图 6 的结果可以看出, 不同触发条件下得到的自由响应信号的效果, 受到所得触发点数的影响, 因此, 保证适当的触发点数在随机减量运算中是必要的, 特别是采样信号长度有限的情况下。根据表 1 的计算结果, 在结构随机响应的采样数据有限时, 利用极值点触发和零穿越触发都可以增加触发点数, 更可以利用随机采样触发条件直接给定合适的触发点数, 这样可以大大提高结构特征识别精度。尤其是模态阻尼的识别精度对于触发点数的多少更加敏感。

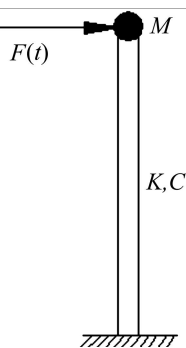


图 5 单自由度系统

机减量技术得到相应的自由响应信号, 进一步识别出结构固有频率和模态阻尼比, 表 1 列出了结构第一阶固有频率和模态阻尼比的识别结果。识别结果表明, 本文给出的触发方法可以提高有效的子信号平均次数, 尤其在结构信号采样信号长度有限的情况下, 自由响应信号的计算效果明显提高, 因此对于结构固有特征的识别效果好于传统触发条件下得到的结果。另外, 像图 8 给出的节点 7 的 y 方向随机响应采样数据, 基于本例给出的载荷情况, 由于结构 y 方向的位移激励量值较小, 位移响应量也较小, 采样信号中各种干扰量影响比较大, 所得自由响应信号效果较差, 对于此种情况, 图 9 给出几种触发条件下节点 7 y 方向所得自由衰减信号, 利用极值点触发条件所得到的效果比较理想。

表 1 单自由度系统固有特征识别结果对比

采样点数 5000 (采样频率 66.7 Hz)					
触发方法	触发点数	识别频率 (Hz)	识别模态阻尼	频率理论值 (Hz)	模态阻尼理论值
传统水平穿越触发条件	28	0.98	0.029	1.01	0.082
水平穿越触发条件	63	0.98	0.064	1.01	0.082
零穿越触发条件	188	1.01	0.063	1.01	0.082
极值点触发条件	201	1.07	0.078	1.01	0.082
随机采样触发条件	500	0.99	0.081	1.01	0.082
采样点数 30000 (采样频率 66.7 Hz)					
触发方法	触发点数	识别频率 (Hz)	识别模态阻尼	频率理论值	模态阻尼理论值
传统水平穿越触发条件	208	1.00	0.058	1.01	0.082
水平穿越触发条件	441	0.99	0.072	1.01	0.082
零穿越触发条件	1173	1.00	0.071	1.01	0.082
极值点触发条件	1301	1.06	0.081	1.01	0.082
随机采样触发条件	2500	1.01	0.080	1.01	0.082

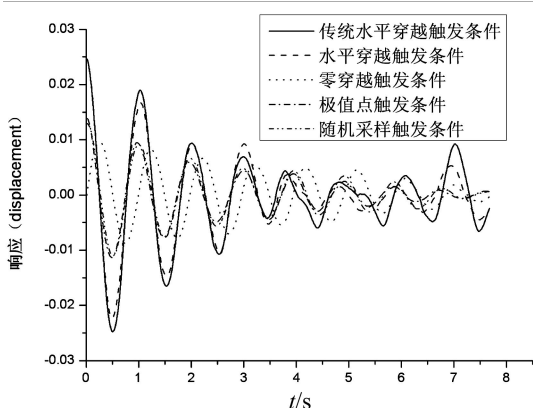


图 6 采样点数为 5 000 时所得自由响应信号

算例 2 如图 7 所示, 为高 1m, 宽 1m 的二维框架结构, 其有限元离散结果为 10 个节点, 12 个梁单元, 其中节点 9, 10 固支约束。在节点 1 的 x 方向施加随机载荷  $F(t)$ , 载荷的特征为零均值、高斯平稳随机分布。对各个节点进行响应数据采样, 给出了分别利用各节点 x 方向采样数据和 y 方向采样数据两种情况下, 利用随

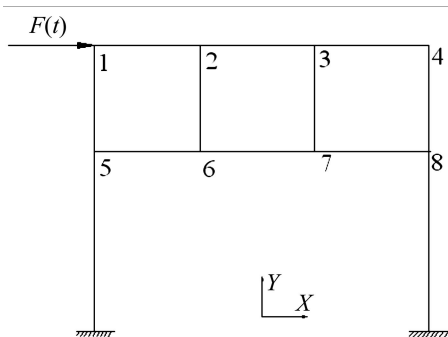


图 7 二维框架结构

表 2 二维框架结构第一阶固有频率和模态阻尼识别结果对比

触发方法	采样点数 5000(采样频率 666.7Hz)					
	识别频率 (Hz)		识别模态阻尼		频率理论值 (Hz)	模态阻尼理论值
	节点 X 方向采样	节点 Y 方向采样	节点 X 方向采样	节点 Y 方向采样		
传统水平穿越触发条件	6.03	6.76	0.026	0.066	6.39	0.033
水平穿越触发条件	6.29	6.76	0.023	0.072	6.39	0.033
零穿越触发条件	6.63	6.92	0.034	0.039	6.39	0.033
极值点触发条件	6.79	6.93	0.032	0.032	6.39	0.033
随机采样触发条件	6.41	6.50	0.031	0.037	6.39	0.033

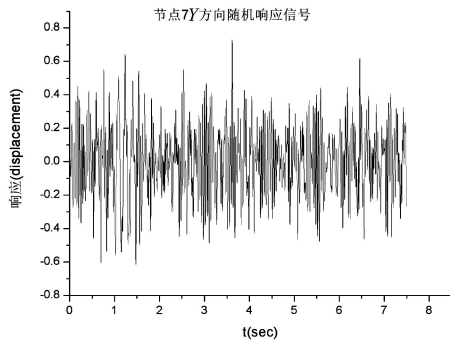


图 8 节点 7 的 y 方向随机响应 5 000 点采样数据

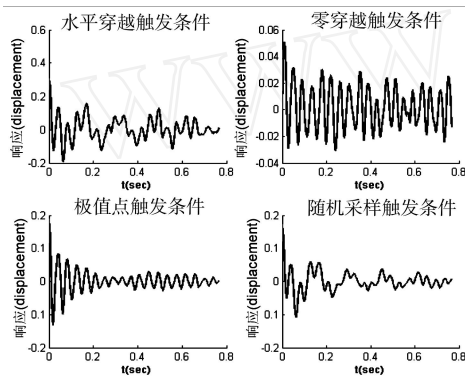


图 9 节点 7Y 方向所得自由响应信号

### 4 结 论

本文对随机减量技术应用中的触发条件问题进行了详细的分析,并且在传统的水平触发条件的基础上,又提出了三种简单实用的触发条件,最后通过数值算例的应用计算,验证了这几种触发条件的实用性。通过本文的分析和讨论可以得到以下几点结论:

1) 随机减量技术在实际应用中,是利用子信号的算术平均来估计相应的数学期望值,因此子信号的平均次数是触发条件选择的以个重要因素,本文采用全域同时截取的方法,很好的增加了子信号的平均次数,改善平均效果。

2) 利用水平穿越触发条件得到的自由衰减信号往往有比较大的初始位移;利用零穿越触发条件可以得到给定初始速度时的自由衰减信号;当小幅值的激振效果比较差,结构响应信号比较小时,利用极值点触

发条件往往能够得到比较理想的计算效果;随机采样触发条件可以预先给定触发点数,即先给定平均次数再去选定触发点,对于结构响应信号采样样本较小,数据不足的情况下,利用此方法可以得到比较理想的结果。

3) 另外,本文给出的触发条件是利用直线穿越进行取值,也可以给定一个小的区间进行区间穿越取值,即  $T_{X(t)} = \{X(t) = [x_-, x_+] | a_1 \leq x < a_2, \dot{X}(t) = [x_-, x_+] | b_1 \leq \dot{x} < b_2\}$ , 可以进一步增加触发点数。

4) 对于采样信号中的干扰和耦合等影响,也可以先对采样信号进行一次滤波处理,再进行随机减量处理,计算效果会较好。

5) 随机减量技术的数学基础是在假定激励为零均值、高斯平稳随机激励的前提条件下得到的,当激励信号为其它情况,例如激励信号存在不平稳性时,仍需进行相应的研究。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Cole H A. On-the-line analysis of random vibration A AA / ASME 9<sup>th</sup> Structure, Structural Dynamics and Materials Conference, 1968, A AA PaperNo. 68—288
- [ 2 ] Cole H A. Method and apparatus for measuring the damping characteristic of a structure United State Patent NO. 3, 620, 069, 1971.
- [ 3 ] 陈德成, 姜节胜. 随机减量技术的方法与理论 [J]. 振动与冲击, 1984, 3(4): 31—39.
- [ 4 ] Ibrahim S R, Mikulcik E C. A method for the direct identification of vibration parameters from free responses Shock and Vibration Bulletin, Bulletin 47, 1977.
- [ 5 ] Chiu Jen Ku. Random decrement based method for parameter identification of wind-excited building models using acceleration responses Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, 2004.
- [ 6 ] Amussen J C. Modal analysis based on the random decrement technique application to civil engineering structures Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark, 1997.
- [ 7 ] Vandiver J K, Dunwoody A B, Campbell R B, Cook M F. A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, 1982, 104: 307 - 313.
- [ 8 ] Bedewi N E. The mathematical foundation of the auto and cross-random decrement techniques and the development of a system identification technique for the detection of structural deterioration Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, 1986
- [ 9 ] 吴家驹. 随机减量特征矩阵和相关函数矩阵的关系 [J]. 应用力学学报, 1987, 4(3): 1—10.
- [ 10 ] Brincker R, Krenk S, Kirkegaard P H, Rytter A. Identification of dynamical properties from correlation function estimates Bygningssstatistiske Meddelelser, 1992, 63(1): 1—38.

## MULTI-INPUT/MULTI-OUTPUT (M/MO) ACTIVE OPTIMAL CONTROL FOR FLOOR VIBRATION SUPPRESSION

ZHOU Mi, FANG Zhi-chu

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** Lightweight floor systems are subjected to uncomfortable levels of vibration caused by occupant activities such as walking, dancing and aerobics. How to use multiple pairs of actuator/sensor multi-input/multi-output (M/MO) for effective vibration control of a floor system is a new challenge, also one of the hottest research topics in engineering. A new M/MO active and optimal control strategy and its implementation algorithm for reducing floor system vibration are developed here. The strategy proposed can simultaneously determine optimal placement of multiple pairs of actuator/sensor and appropriate feedback gain of each channel. A new type and comprehensive Performance Index PI is proposed. This PI not only contains the vibrating energy of a floor system, but also its input energy from actuators. Its minimization can not only mean minimization of the system vibrating energy, but also minimization of its input energy. This will bring realizing more economical and feasible actuators. Numerical simulation results show that using the new proposed optimal control strategy and its algorithm can very effectively and rapidly suppress the vibrating responses of the floor system.

**Key words:** floor system, placement of actuator/sensor, multi-input/multi-output (M/MO), active optimal control, performance index, feedback gain

## TRIGGERING CONDITION ANALYSIS TO RANDOM DECREMENT TECHNOLOGY

LU Bin<sup>1</sup>, DING Hua<sup>1</sup>, SHI Zhong-ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2. Research Center, China National Offshore Oil Corp., Beijing 100027, China)

**Abstract** Triggering condition is a very important requisite for random decrement technique in random signal analysis. The general triggering condition is discussed in detail and an extended random decrement function is put forward based on a more general triggering condition. Because the traditional threshold level crossing triggering condition is limited due to the number of triggering points and the crossing threshold value, three simple and effective triggering conditions are presented and they make use of random decrement technology more widely. Especially, the proposed methods are effective in the condition that the length of the sampled signal is limited or the amplitude of the response signal is small. A numerical example and the structural modal identification based on random decrement signals are presented to verify the usability of the proposed methods.

**Key words:** random decrement technology, free response signal, triggering condition, correlation function, modal identification

## ANALYSIS OF WIND-INDUCED BUFFETING RESPONSES OF RETICULATED CYLINDRICAL SHELLS

MI Fu-sheng, ZHOU Xuan-yi, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Based on wind tunnel test of a rigid model, wind-induced responses of a reticulated cylindrical shell structure are computed in time domain, and then the nodal displacement, element stress, gust response factor and response spectrum are analyzed. The results show that the displacements of some typical modes and the stresses of some typical elements are largest when the reticulated cylindrical shell is subject to skew wind. This means that the skew wind con-