第54卷第4期
2014年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 54, No. 4
July 2014

文章编号：1000-8608(2014)04-0445-07

结构损伤识别中部分相关噪声模型

李东升*[1]，周　翠[1]，杨新涛[1]，李宏男[1]，任　亮[1]，郭杏林[2]

（1.大连理工大学 建设工程学部，辽宁 大连　116024；
2.大连理工大学 工程力学系，辽宁 大连　116024）

摘要： 详细地讨论了噪声的来源和产生的物理机制，分析了经典不相关噪声模型的物理意义和适用范围，将测试噪声分为与信号大小无关的测试系统基础噪声和与测试信号幅值和相位有关的环境噪声两部分，提出与结构试验实际环境符合的部分相关噪声模型. 计算比较了部分相关噪声模型和传统噪声模型下仿真测试信号的信噪比和方差比，并比较了其对结构振型的识别精度和损伤识别定位的影响. 结果表明，所提出的部分相关噪声模型较为符合工程测试实际，而传统噪声模型未能有效模拟系统和环境噪声.

关键词： 损伤识别；噪声；部分相关噪声模型；随机子空间法；模态参数

中图分类号： TU112　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201404012

0 引　言

近年来随着经济的迅猛发展，高耸、大跨等复杂工程结构的不断涌现，结构健康监测与诊断逐渐成为土木工程领域的研究热点，而损伤识别则是结构健康监测和诊断成功与否的核心与关键[1]. 在损伤识别的各种方法研究过程中，计算机仿真是一个必要环节. 同时，计算机仿真已成为与理论、试验并重的现代工程科学三大支柱之一[2]. 但是只有在计算机仿真模型符合工程实际时，基于计算机仿真的结构损伤识别、优化设计、可靠性分析和响应预报等才有实际意义. 实际工程试验时，由于仪器设备等原因不可避免地存在噪声的干扰，如何合理地在理论计算结果中加入符合试验条件的噪声对计算机模拟过程（包括结构损伤识别方法研究）非常重要.

在计算机仿真中，尤其是在结构损伤识别方法的研究过程中，都需要在仿真的结构响应（加速度、速度、位移或者应变等）或者结构动力响应特征参数（固有频率、振型、阻尼比等）中加入不同的噪声以模拟实际测量时噪声的影响. Yang 等[3]在美国土木工程师学会损伤识别标准结构（ASCE Phase I benchmark structure）的加速度响应中加入方差为 2% 的高斯白噪声进行损伤识别的研究. Sun 等[4]在模拟桥梁冲击响应加速度信号中分别加入信噪比为 20、15、10、5、0 dB 的噪声，研究结果表明当信噪比大于 5 dB 时结构损伤都可以得到准确识别，只有当噪声信号和结构响应信号相当（信噪比为 0）时不能判别损伤的存在. Li 等[5]在结构加速度响应中加入方差为 1% 的高斯白噪声，研究发现测量误差在最终损伤识别结果中有所放大. Liu[6]在结构固有频率和振型中分别加入方差为 1% 的随机噪声，通过扰动分析和蒙特卡罗模拟的方法研究噪声对桁架损伤识别的影响. 曹晖等[7]计算了结构仿真响应中加入随机噪声时噪声水平和信噪比的关系，模拟了结构归一化振型中添加不同水平噪声对结构损伤识别的影响，发现在 30% 的损伤程度下，准确进行损伤定位要求信噪比大于 20 dB. Xia 等[8]和 Papadopoulos 等[9]分别从扰动分析和统计的角度研究了结构频率测量噪声对模型修正和损伤识别的影响.

由此可见，国内外学者采用的噪声模型有较大的随意性，缺乏坚实的理论基础. 有的是在结构仿真响应中加入随机噪声，然后进行系统辨识和

收稿日期： 2013-12-09；　**修回日期：** 2014-03-11.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51121005,51327003).
作者简介： 李东升*(1972-)，男，博士，副教授，博士生导师，E-mail：dsli@dlut.edu.cn.

结构损伤识别;有的是直接在分析模型的理论频率和振型中加入不同水平的噪声,在此基础上进行损伤识别.在理论频率和振型中加入噪声的方式,优点是在仿真试验中操作简单,不需要模态参数辨识这一步骤,缺点是所添加的噪声缺乏明确的物理意义.而在结构仿真响应中加入随机噪声的方式,固然考虑了在测量过程中信号受到的噪声干扰和给系统识别过程带来的误差,但是没有对噪声来源和产生的物理机制进行分析.

本文详细讨论实际工程测试时仪器和线路等的具体情况,将测试噪声分为由测试系统自身决定的内部噪声和由环境与测试系统相互作用产生的外部噪声.进而,分析与之相应的噪声和响应信号相关模型和不相关模型,提出噪声和响应信号部分相关模型,讨论部分相关噪声模型中参数的物理意义,比较与传统模型在信噪比、结构振型和损伤识别效果等方面的差别.

1 传统的不相关噪声模型

目前,一般假定结构响应的真实信号与噪声信号不相关[10],即 $\mathrm{cov}(x(t),n(t))=0$.仿真测试信号则为

$$y(t)=x(t)+n(t) \tag{1}$$

式中:$x(t)$ 和 $n(t)$ 分别为结构响应信号(由理论模型获得的仿真信号)和噪声信号,$y(t)$ 为添加噪声后的仿真测试信号(仿真结构测试时的真实结构响应信号).

一般情况下,仿真信号 $x(t)$ 及其方差 σ_x^2 已知,且 $\sigma_y^2=\sigma_x^2+\sigma_n^2$.噪声的方差 σ_n^2 与仿真测试信号的方差 σ_y^2 之比可用下式来表示,即

$$\sigma_n^2/\sigma_y^2=\alpha(\%) \tag{2}$$

其中 α 为噪声水平.仿真计算开始时,仿真测试信号 $y(t)$ 未知,可用噪声和仿真信号方差之比 $\sigma_n^2/\sigma_x^2=\alpha/(1-\alpha)(\%)$ 表示噪声方差为仿真信号方差的 $\alpha/(1-\alpha)$ 倍.习用 α 表示噪声水平,实际上为 $\alpha/(1-\alpha)$ 倍的真实噪声.

工程上也常用信噪比(R_{sn},dB)表示噪声水平,其常用定义[10]为

$$R_{\mathrm{sn}}=10\log_{10}\left(\frac{\psi_{\mathrm{s}}^2}{\psi_{\mathrm{n}}^2}\right) \tag{3}$$

式中:ψ_{s}、ψ_{n} 分别为信号和噪声的均方根值.在应用于噪声水平的表示方面,信噪比与方差比是一致的.

1.1 均匀分布噪声模型

均匀分布噪声模型假设测试噪声在某个幅值区间均匀分布,噪声分布的区间为$[-C,C]$.则噪声方差由统计理论[11]可知为 $\sigma_n^2=C^2/3$,由此可计算出噪声分布区间噪声水平和仿真信号方差的关系为 $C=\sqrt{\frac{3\alpha}{1-\alpha}}\sigma_x$.

由于仿真信号 $x(t)$ 的方差 σ_x^2 已知,在Matlab中可通过如下的命令产生区间为$[-C,C]$的均匀噪声分布:$n(t)=C(2\times rand(l)-1)$,其中 l 为仿真信号 $x(t)$ 的长度.

1.2 正态分布噪声模型

正态分布噪声模型假设测试噪声符合均值为零、方差为 σ^2 的正态分布,由式(2)可知噪声方差与仿真信号方差的关系为 $\sigma=\sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}}\sigma_x$.

已知仿真信号 $x(t)$ 的方差为 σ_x^2,在Matlab中可通过命令:$n(t)=\sigma\times rand(n(l))$,产生相应的均值为0、方差为 σ^2 的正态分布噪声,其中 l 为仿真信号 $x(t)$ 的长度.

2 结构损伤识别中噪声的来源及物理机制

在结构损伤识别过程中,首先需要测量结构在运行状态下的响应(加速度、速度、位移或者应变等),然后根据所采用结构损伤识别方法的不同,一般需要进行结构频率、振型和阻尼比等的系统识别,最后进行模型修正或直接利用这些结构动力特征参数进行损伤识别.结构损伤识别方法众多[12-14],但基本过程类似.本文仅考虑仿真测试过程的噪声,至于模型误差和测试噪声在结构损伤识别过程中的传播,可参阅相关文献[8-9].

为使仿真结果可信,仿真测试过程的噪声添加应符合工程实际.实际测量时噪声的来源较为复杂,但基本上可归为以下4种:

(1)测试系统元器件在工作时产生的本底噪声.如电阻的理论热噪声,$V_n=2\sqrt{KTRB}$,其中 K 为玻耳兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K),T 为热力学温度,R 为电阻值,B 为噪声的评价频率幅度.只要电阻不在0 K使用,就会产生热噪声,原因在于电阻微观晶粒的接触电阻会由于热振动和机械

振动而产生随机变动[15].

(2) 信号传输线路的噪声. 信号传输线路(包括测试时的信号放大器等) 往往会形成闭合回路,轻微自激振荡而产生一定的线路噪声.

(3) 信号模数转换过程的噪声. 传感器测量信号一般是结构响应的模拟量,需要通过模数转换过程将模拟信号量化,即将在采样点处的模拟信号数值按照仪器精度进行四舍五入,使其数值量化为最相近的给定间隔数值. 如果模数转换模块的最小单位间隔是 Δx,则可知模数转换过程的标准差为 $0.289\Delta x$[10].

(4)环境噪声. 测试仪器和传输线路所在的物理环境存在干扰噪声,主要包括几个方面:空间电磁场辐射使测量电子线路产生感应电流,叠加在信号中而产生干扰噪声;其他电气设备产生干扰信号通过测试设备电源产生的线路串扰噪声;信号在传输过程中由于传输介质的问题产生的传输噪声,比如接插件的接触不良、信号线材质不佳、地电流串扰等.

通过分析测量信号噪声产生的来源可知,测量信号的噪声可分为两部分:一部分是来源于测试系统内部的噪声,包括仪器设备、线路和模数转换过程的噪声,可称为测试系统的基础噪声. 一旦仪器设备和传输线路调试完成,噪声基本固定. 测试系统的基础噪声由测试系统自身特点决定,与待测结构的形式和荷载方式无关,和测量信号不相关,一般通过提高仪器或测试系统的质量可使其有所降低,但是不能完全消除. 实际试验时,可通过将传感器输入端设置为零,然后测量结构响应通道的输出而得到测试系统的基础噪声. 另外一部分测量信号噪声是由环境和测试系统相互作用而产生的外部噪声,即第 4 种噪声,这部分噪声与测试信号的频率、幅值和相位等因素有关,随着测量信号的变化而变化.

3　仿真测试信号的相关噪声模型

通过上述对噪声的来源及产生物理机制分析可知:传统的噪声模型认为测试信号与噪声信号不相关,仅计及了测试系统的基础噪声部分,而没有考虑与测试信号大小相关的环境噪声. 为此,本文提出相应的仿真信号相关噪声模型,以及部分相关噪声模型.

3.1　噪声和仿真信号相关噪声模型

实际测量时信号噪声可由环境作用于测试系统而产生外部环境噪声,与测试信号的幅值、相位等因素相关. 此时,可用下式表示:

$$n_1(t) = \beta(t)x(t) \tag{4}$$

式中:$\beta(t)$ 表示噪声在实际测试过程中与仿真信号的瞬时比例,其中 $\beta(t) = \beta \cdot rand(t)$,$\beta$ 为相关噪声水平,为一常数. 根据该模型,噪声的大小在每一瞬时等于仿真信号的 $\beta(t)$ 倍. $\beta(t)$ 的函数关系由测试仪器、传输线路以及所在的测试环境共同决定.

少数研究者意识到噪声和仿真信号的相关性,试图在模拟信号中添加相关噪声:如文献[7]按照仿真信号的最大幅值添加相关噪声,文献[3-4]按照仿真信号均方根比例添加相关噪声,这样添加的噪声并不符合测试实际. 只有文献[7]按照仿真信号的瞬时比例添加相关噪声,与本文相关噪声模型(式(4))相符.

作者在一个输电塔 5 倍缩尺模型的损伤识别试验中已经得到相关噪声的比例关系,即式(4)中的 $\beta(t)$. 由于篇幅所限,试验结果将另文介绍,本文着重阐述部分相关噪声模型的理论部分.

3.2　仿真测试信号的部分相关噪声模型

前文中,噪声和响应信号的相关模型考虑了噪声与仿真信号的瞬时比例部分,但是由于在实际测试过程中,仿真信号在其前端可能已经受到了不相关噪声的污染,因此相关噪声模型应修正为

$$n_1(t) = \beta(t)(x(t) + n_2(t)) \tag{5}$$

式中:$n_2(t)$ 为式(1) 传统噪声模型中与仿真信号不相关的噪声信号,$\beta(t)$ 为式(4) 相关噪声模型中与仿真信号相关的噪声信号比例.

通过以上的分析可知,噪声和仿真信号相关模型(式(5))和不相关模型(式(1))都仅仅考虑了测试系统中噪声来源的一个方面,即测试系统的基础噪声和环境噪声部分,而在实际测试时两种噪声同时出现. 将测试系统的基础噪声和环境噪声同时考虑,更符合工程结构测试实际,基于此本文提出噪声仿真的部分相关模型为

$$n_3(t) = \beta(t)(x(t) + n_2(t)) + n_1(t) \tag{6a}$$

式中:$\beta(t)$ 为式(4) 相关噪声模型中与仿真信号相关的噪声信号比例,$n_2(t)$ 为在相关环境噪声前

端出现的不相关的噪声信号，$n_1(t)$ 为整个测试过程中与仿真信号不相关的噪声信号(式(1)传统噪声模型). 由统计理论可知，若干个不相关的高斯随机信号叠加后依然为高斯随机信号. 当不相关噪声 $n_2(t)$ 和 $n_1(t)$ 都为高斯随机噪声时，式(6a)中后两项的不相关噪声可合并为一项，即

$$n_3(t) = \beta(t)x(t) + n_4(t) \tag{6b}$$

式(6b)称为参数为 α、β 的部分相关噪声模型，其中 $n_4(t)$ 为不随仿真信号幅值大小、相位变化的测试系统基础噪声，为不相关噪声部分；$\beta(t)x(t)$ 为随仿真信号幅值和相位等变化的环境噪声部分，为相关噪声部分，β 为相关噪声水平，计算方法如式(4).

文献中，常见的噪声模型为式(1)，少数采用相关噪声模型(4)，而这两个噪声模型都仅仅考虑了结构测试时噪声的一个方面，不符合工程测试时的实际状况，同时缺乏物理意义的噪声更使损伤识别方法在实际应用中的效果无法达到仿真试验的有效性，使得计算机仿真丧失原有的价值. 式(6b)的部分相关噪声模型全面考虑了工程测试时噪声产生的来源和物理机制，依据实际情况添加相关和不相关部分噪声，推荐采用. 采用式(6b)的部分相关噪声模型后，仿真测试信号可表示为

$$y(t) = x(t) + n_3(t) \tag{6c}$$

式中：$x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为仿真信号(由理论模型计算得到的结构响应信号)和仿真测试信号；$n_3(t)$ 为噪声信号，包含了相关和不相关噪声两部分.

4 噪声下的仿真试验

仿真试验采用文献[16]的两跨连续梁模型，在通用有限元分析软件 ANSYS 中计算结构各节点加速度信号，然后按不同噪声模型加载白噪声，并利用模态识别方法获得结构模态参数信息，最后利用单元模态应变损伤指数法(EMSDI)判别结构损伤及定位[17]. 模态参数识别方法采用随机子空间法[18-19]，该方法是一种广泛应用的时域辨识算法，不但能够识别系统的频率，也能准确地识别系统的振型和阻尼，并且对噪声有一定的抗干扰能力.

4.1 本文部分相关噪声模型与传统噪声模型的比较

如果噪声的加载方式不同，即使在相同噪声水平下，加噪声后的信噪比也不同. 下面将对本文提出的部分相关噪声模型(下文称本文噪声模型或模型1，式(6c))与文献常采用的相关噪声模型(模型2，即式(4))进行比较.

对仿真连续梁模型施加脉冲荷载，采样频率 2 000 Hz，计算时间 2 s. 对节点加速度模拟值按两种噪声模型添加噪声，按照式(2)计算方差比，比较两种噪声模型所添加的噪声程度. 对模型1和模型2进行分析，取“相同”噪声水平两种情况：(1)模型1参数为 $\alpha=2.5\%$，$\beta=2.5\%$；(2)模型2参数为 $\gamma=\beta=5\%$. 考虑到噪声的随机性，在以下的分析中相同的噪声水平按照30次结果进行统计平均，其比较结果见表1.

表1 两种噪声模型添加噪声后仿真加速度信号的方差比

Tab.1 Variation ratios of simulated accelerations with two noise models after adding noise

节点	模型1方差比/10^{-2}	模型2方差比/10^{-3}	模型1方差比/模型2方差比
15	4.74	2.93	16.17
29	4.89	2.42	20.24
43	4.90	2.70	18.19
57	4.91	2.45	20.05
71	4.81	2.38	20.20
86	4.86	2.11	23.05
115	4.75	2.68	17.74
129	4.98	2.62	18.98
143	4.73	2.35	20.08
157	5.02	2.26	22.23
171	4.84	2.60	18.58
186	4.67	2.62	17.78

从表中可以看出，在“相同”噪声水平下，模型2噪声信号的方差比远远小于模型1的. 表2给出在1%～30%噪声水平下，两种模型的噪声方差与仿真测试信号的方差比值，表中以采样节点15的加速度作为样本，模型中噪声水平关系为 $\alpha=\beta=\frac{1}{2}\gamma$.

在噪声水平较小时，模型1方差比由 α 控制，此时方差比较好地符合噪声水平；在噪声水平较大时，模型1方差比由 β 控制，此时方差比小于噪

声水平.

表 2　两模型“相同”噪声水平下方差比比较

Tab. 2　Comparison of variation ratios of two models under the "same" noise level

噪声水平/%	模型 1 方差比/10^{-2}	模型 2 方差比/10^{-3}	模型 1 方差比/模型 2 方差比
1	1.02	0.252	40.30
2	2.01	0.604	33.30
5	4.81	2.520	19.10
8	7.58	5.980	12.70
10	9.44	8.790	10.70
15	13.60	23.400	5.81
20	17.50	39.600	4.41
25	21.50	60.600	3.54
30	24.80	83.200	2.98

进一步研究 α、β 对信噪比的影响，图 1 给出 α、β 从 0 到 0.1 均匀改变时，信噪比的变化. 从图中可以看出，当 α 一定时(为了易于观察取 $\alpha=0$)β 增大信噪比减小，当 $\beta=0.1$ 时，信噪比为 10.3 dB；当 β 一定时(取 $\beta=0$)α 增大信噪比减小，当 $\alpha=0.1$ 时，信噪比为 10.0 dB，可以看出 α 对信号信噪比影响比 β 大. 在今后的研究中，需要进一步考察测试环境，给出相应环境下的 α、β 参考值.

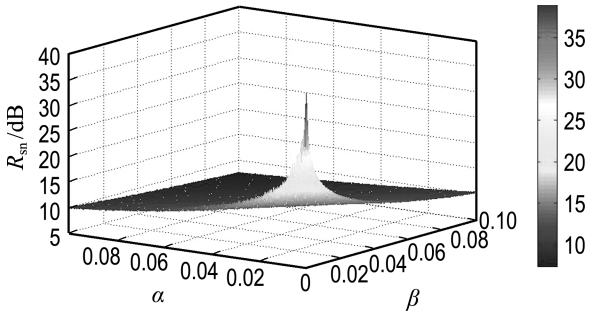

图 1　α、β 与信噪比关系

Fig. 1　The relationship between α, β and SNR

4.2　两噪声模型对振型和结构损伤识别的影响

在噪声水平 0.6% 下，在模型 1 中即 $\alpha=0.003$，$\beta=0.003$，在模型 2 中即 $\gamma=0.006$，对加速度信号施加噪声，用随机子空间方法进行参数识别，得到结构前四阶振型. 比较有无噪声情况下识别的振型差的绝对值(简称为振型差)的平均值，并在表 3 中列出.

从表 3 可以看出，在“相同”噪声水平下，两模型的振型差相差较大，这势必对损伤识别结果造成很大的影响. 同样地在其他噪声水平下两模型表现出相似的振型差关系，这里不再一一列出.

表 3　两模型振型差比较

Tab. 3　Comparison of the mode shapes' differences of two models

模态	模型 1 方差比/10^{-2}	模型 2 方差比/10^{-3}	模型 1 方差比/模型 2 方差比
1	14.00	24.90	5.62
2	10.80	14.70	7.35
3	2.68	3.65	7.34
4	2.30	1.95	11.80

为模拟损伤，使单元 4 刚度折减 10%(工况一)，在无噪声影响、部分相关噪声 $\alpha=\beta=1\times10^{-4}$(对应信噪比为 40 dB)和传统比例噪声 $\gamma=2\times10^{-4}$ 三种情况下，对比结构损伤的识别结果，见图 2(a). 为考察不同损伤程度情况下噪声的影响，同时计算了单元 4 刚度分别折减 30%(工况

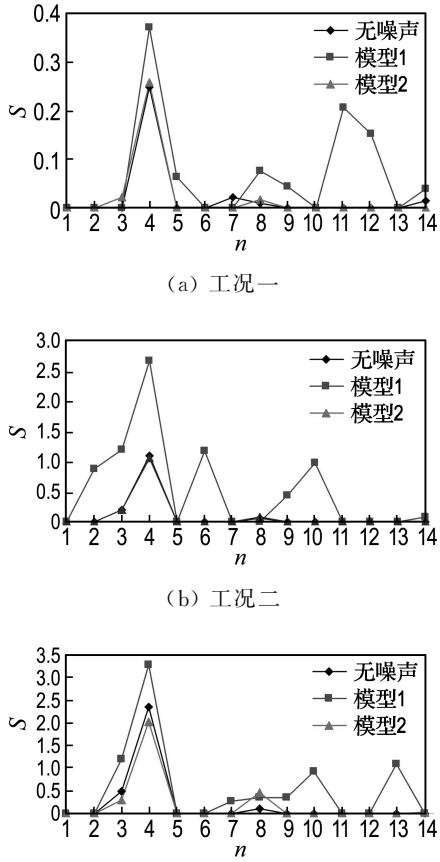

图 2　两种噪声模型的损伤识别结果比较

Fig. 2　Comparison of damage identification results with two noise models

二)和 50%(工况三)的情况. 对于工况二,在无噪声影响、部分相关噪声 $\alpha=\beta=5\times10^{-4}$(信噪比为 29 dB) 和传统比例噪声 $\gamma=1\times10^{-3}$时,结构损伤识别结果见图 2(b);对于工况三,在无噪声影响、部分相关噪声 $\alpha=\beta=3\times10^{-3}$(信噪比为 20 dB) 和传统比例噪声 $\gamma=6\times10^{-3}$时,结构损伤识别结果见图 2(c).

从图 2 中可以看出,按照模型 1 和 2 添加仿真噪声时,都基本可以实现对损伤的定位. 但是,按照模型 2 添加噪声的情况下,损伤识别结果和无噪声情况下基本相同,没有达到在仿真模拟中添加噪声的目的. 诚然,不同的模态识别方法和结构损伤识别方法的抗噪性水平不同. 但是,按照不同的噪声模型对仿真信号添加噪声,会对最后的识别结果有较大的影响.

5 结 论

(1)讨论了部分相关模型中 α、β 的关系:噪声水平较小时,由 α 控制;噪声水平较大时,由 β 控制,α、β 对模型总体影响 α 略大.

(2)本文噪声模型信噪比较小,说明添加的噪声相对较大;本文噪声模型对振型影响较大,传统模型的影响较小.

(3)本文噪声模型损伤识别结果较差,传统模型结果几乎和无噪声条件下的识别结果相同,相当于未有效添加噪声.

(4)提出的部分相关噪声模型得到的仿真信号符合工程实际测试,有效地模拟了与信号大小无关的测试系统的基础噪声和与测试信号大小有关的环境噪声.

综上可以看出,在添加“相同”噪声水平情况下,不同的噪声模型对测试信号、振型识别和损伤识别结果影响很大. 为此提出统一的部分相关噪声模型,该模型符合实际测量现场,可以作为数值试验中推荐的噪声模型. 然而,文中提出的部分相关噪声模型还需要在实践中继续加以检验,尤其是参数 α、β 如何根据工程测试实际确定尚需深入研究.

参考文献:

[1] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(3):82-90.
LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, **22**(3):82-90. (in Chinese)

[2] 郭齐胜,徐享忠. 计算机仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
GUO Qi-sheng, XU Xiang-zhong. **Computer Simulation** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[3] Yang J N, Huang H. Sequential non-linear least-square estimation for damage identification of structures with unknown inputs and unknown outputs [J]. **International Journal of Non-linear Mechanics**, 2007, **42**(5):789-801.

[4] Sun Z, Chang C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2002, **128**(10):1354-1361.

[5] Li X, Law S. Damage identification of structures including system uncertainties and measurement noise [J]. **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal**, 2008, **46**(1):263-276.

[6] Liu P L. Identification and damage detection of trusses using modal data [J]. **Journal of Structural Engineering**, 1995, **121**(4):599-608.

[7] 曹 晖,林秀萍. 结构损伤识别中噪声的模拟[J]. 振动与冲击, 2010, **29**(5):106-109.
CAO Hui, LIN Xiu-ping. Noise simulation in structural damage identification [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, **29**(5): 106-109. (in Chinese)

[8] Xia Y, Hao H. Statistical damage identification of structures with frequency changes [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, **263**(4):853-870

[9] Papadopoulos L, Garcia E. Structural damage identification: a probabilistic approach [J]. **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal**, 1998, **36**(11) :2137-2145.

[10] Bendat J S, Piersol A G. **Random Data Analysis and Measurement Procedures** [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[11] Wolberg J. **Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments** [M]. Berlin: Springer, 2006.

[12] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B, *et al*.

Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review [R] // **Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS**. NM: Los Alamos National Laboratory, 1996.

[13] Farrar C R, Lieven N A. Damage prognosis: the future of structural health monitoring [J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences**, 2007, **365**(1851): 623-632.

[14] Alvandi A, Cremona C. Assessment of vibration-based damage identification techniques [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2006, **292**(1): 179-202.

[15] 三宅和司. 电子元器件的选择与应用[M]. 张秀琴,译. 北京:科学出版社, 2006.
Miyake Yoshinobu. **Selection and Application of Electronic Component** [M]. ZHANG Xiu-qin, tran. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)

[16] 周　翠,李宏男,李东升. 基于模态应变能的损伤识别方法[C] // 2011 年第八届全国土木工程研究生学术论坛会议论文集. 大连:大连理工大学出版社, 2011.
ZHOU Cui, LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Structure damage identification method basing on modal strain energy [C] // **Proceedings of 8th National Civil Engineering Forum for Graduate Students-NCEFGS2011**. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011. (in Chinese)

[17] Guan H, Karbhari V M. Improved damage detection method based on element modal strain damage index using sparse measurement [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2008, **309**(3): 465-494.

[18] van Overschee P, de Moor B. **Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Application** [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[19] Peeters B. System identification and damage detection in civil engineering [D]. Leuven: Katholieke University, 2000.

Partial correlation noise model for structural damage identification

LI Dong-sheng*[1], ZHOU Cui[1], YANG Xin-tao[1], LI Hong-nan[1], REN Liang[1], GUO Xing-lin[2]

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The sources and physical mechanism of various noises are discussed in detail and the physical significance and application scope of traditional uncorrelated noise model are analyzed. Based on these discussions, various noises are further classified into two groups: system fundamental noise and environmental noise. The first group of noises is independent of the measured signal and the second is closely correlated to the amplitude and phase of the measured signal through interacting with environmental interferences. A partial correlation noise model is thus proposed to account for the uncorrelated system fundamental noise and correlated environmental noise. Variation ratios and signal to noise ratios of the simulated test signals with traditional uncorrelated noise model and the partial correlation noise model developed are compared. Furthermore, the influences of both models on the identification of mode shapes and damages of a beam are analyzed. It is found that the proposed partial correlation noise model agrees well with engineering practice, while the traditional uncorrelated noise model could not effectively simulate the system and environmental noises.

Key words: damage identification; noise; partial correlation noise model; stochastic subspace method; modal parameters