

文章编号: 1000-4750(2009)05-0121-09

基于贝叶斯统计推断的框架结构损伤诊断研究

易伟建, *周 云, 李 浩

(湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 介绍了贝叶斯统计的基本理论, 针对贝叶斯方程中分母由于维数较大难以积分的困难, 引进了基于马尔可夫链的蒙特卡罗模拟方法, 利用先验概率产生多维空间样本, 得到的后验分布能诊断结构的损伤。在实验室的地基上进行了框架结构局部加强柱的损伤前后的模态实验, 得到损伤前后的模态参数。利用非损伤状态下的模态参数经过贝叶斯估计得到后验分布的均值, 作为第一步模型修正过程; 第二步过程采用前次后验分布的均值先修正模型, 再重新计算后验分布。利用第二步得到的均值能有效地识别损伤的位置。识别结果还发现地基对识别的结果有较大的影响。

关键词: 框架结构; 模型修正; 损伤诊断; 贝叶斯估计; 马尔可夫链的蒙特卡罗模拟

中图分类号: TU375.4; TU317⁺.1 **文献标识码:** A

DAMAGE ASSESSMENT RESEARCH ON FRAME STRUCTURE BASED ON BAYESIAN STATISTICAL INFERENCE

YI Wei-jian, *ZHOU Yun, LI Hao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Basic theory of Bayesian statistics is introduced in this paper, in order to solve the difficulties of the denominator hardly in integral due to the larger dimensions, the method of Markov chain's Monte Carlo (MCMC) simulation is introduced, the samples in multi-dimension space are produced by prior probability, the damage in structures can be deduced by posterior distribution. The modal experiments were done on a frame structure by enhancing the local column on soil foundation in the laboratory before damage and after damage, the modal parameters were obtained. The modal parameters in non-damage status are used to obtain the mean value of posterior distribution by Bayesian inference, and it is used as the first step of model updating. In the second step, the mean value of the former distribution has been used to update the model, and then the posterior distribution is recalculated. The mean value obtained in step two can identify the location of the damage. The identification results also show that the foundation has important influence on the identification results.

Key words: frame structure; model updating; damage assessment; Bayesian estimation; Markov chain's Monte Carlo simulation (MCMC)

结构的损伤导致结构动力特性的变化, 在结构损伤前后分别测试得到结构模态值, 利用确定性的损伤指标方法能有效地识别结构的损伤。然而, 实际工程中存在着许多不确定性因素, 例如温度变

化、力振幅的变化、动力测试噪声、模型误差等等。所有这些因素构成了动力损伤中不确定性, 如何利用不确定性的方法来识别损伤是学者们关心的问题。

收稿日期: 2008-01-07; 修改日期: 2008-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678064); 湖南省科技厅科技计划重点项目(06FJ3003)

作者简介: 易伟建(1954—), 男, 长沙人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土结构基本理论以及结构损伤诊断研究(E-mail: wjyi@hnu.cn);

*周 云(1979—), 男, 长沙人, 博士生, 从事结构健康监测和损伤诊断研究(E-mail: zhouyun05@gmail.com);

李 浩(1976—), 男, 南昌人, 博士生, 从事工程中的不确定性分析研究(E-mail: cyberraid@163.com).

贝叶斯理论是与经典概率理论并列的数理统计理论, 贝叶斯方法将样本信息和其它确切的先验信息结合起来, 得到后验信息。贝叶斯学派认为先验分布反映了试验前对总体参数分布的认识, 在获得样本信息后, 人们对这个认识有了改变, 其结果反映在后验分布中。

国内外学者利用贝叶斯方法进行了结构健康监控和损伤诊断研究。其中最出色的为 Beck 教授。他于 1998 年提出了基于贝叶斯模型修正及统计推断的基本框架^[1-2]。1999 年他提出了基于贝叶斯理论的在线健康监控方法^[3]。2002 年提出了一种基于 Metropolis-Hastin 算法的自适应的 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 方法, 并用两自由度模型进行了验证^[4]。2004 年, 针对 IASC-ASCE 的 Phase I Benchmark 框架模型研究, 提出了利用贝叶斯系统识别来修正结构的模型参数的两步法^[5]。针对 Phase II Benchmark 模型, 利用损伤前后的数据进行了两步法识别, 并利用 Expectation-Maximization 算法进行了参数最大概率识别^[6]。

Los Alamos 实验室的 Sohn^[7]于 1997 年提出了贝叶斯概率方法来诊断最可能损伤位置和损伤量, 应用了分支跳跃搜索方法识别最可能的损伤情况。2000 年, Sohn^[8]利用提出的贝叶斯方法进行了实验室混凝土柱的拟动力试验中塑性铰的预测定位。国内, 易伟建^[9-10]、瞿伟廉^[11]等利用贝叶斯方法进行基于应变模态的损伤诊断研究。

本文先分析贝叶斯基本原理, 然后介绍了马尔可夫链以及 MCMC 中关键步骤 Metropolis 准则, 基于结构损伤诊断问题, 提出了进行基于贝叶斯损伤诊断的基本方法以及编制 MCMC 程序的关键步骤、原理和流程。最后, 结合本文框架结构的局部加强的损伤情况, 利用基于贝叶斯理论的 MCMC 方法进行了实际结构损伤诊断研究, 诊断结果能有效表明损伤的位置。

1 贝叶斯理论及 MCMC 方法

贝叶斯后验概率表达式为:

$$\pi(\theta|x) = \frac{h(x,\theta)}{m(x)} = \frac{p(x|\theta)\pi(\theta)}{\int_{\Theta} p(x|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (1)$$

式中: $p(x|\theta)$ 为给定 θ 的条件分布; $\pi(\theta)$ 为 θ 的先验分布; $m(\theta)$ 与 θ 无关, 起一个正则化因子的作用, 一般情况下, 式(1)难以用解析表达式表达, 对式(1)后验概率计算宜用 MCMC 方法进行。

1.1 马尔可夫过程

在式(1)中, $h(x)$ 与样本观测值 x 有关, 一般的蒙特卡罗模拟难以有效计算, MCMC 方法通过在蒙特卡罗模拟中引进 Metropolis 准则, 将模拟过程看作一个马尔可夫过程, 模拟采样最终收敛于式(1)所定义的概率分布, 定义^[12]:

$$P(i,j) = P(i \rightarrow j) = P_r(X_{t+1} = s_j | X_t = s_i) \quad (2)$$

为随机变量 x 的状态转移概率, 它只取决于随机变量取值的当前状态, 而与过程无关。以此转移概率定义的随机变量 x 将最终达到一个静态分布 π , 而与 x 的初始状态无关, 满足 $\pi = \pi P$, 此时将存在局部平衡:

$$P(j \rightarrow k)\pi_j^* = P(k \rightarrow j)\pi_k^* \quad (3)$$

它是 π 存在的充分条件。

1.2 Metropolis 准则

假定在分布 $p(\theta)$ 中采样, $p(\theta) = f(\theta)/K$, 其中 K 常数为未知并难以积分, 对应于式(1)中的分子和分母。以下 Metropolis 算法将产生由式(1)定义分布的随机序列^[12-14]:

1) 开始利用初始值 θ_0 满足 $f(\theta_0) > 0$ 。

2) 利用当前的 θ_i 值, 从一系列的跳跃分布 $q(\theta_i, \theta_{i+1})$ 中采样候选解 θ_{i+1}^* , $q(\theta_i, \theta_{i+1})$ 是指在给定 θ_i 下得到 θ_{i+1} 的概率。这一分布通常称为候选产生分布。

3) 根据候选点 θ_{i+1}^* , 计算密度比 α :

$$\alpha = \frac{p(\theta_{i+1}^*)}{p(\theta_i)} = \frac{f(\theta_{i+1}^*)}{f(\theta_i)} \quad (4)$$

由于计算密度比, 在式(1)中分母就被约去。

4) 如果新产生的数使密度比变大 ($\alpha > 1$), 则接受候选点(设置 $\theta_i = \theta_{i+1}^*$)并返回步骤 2)。如果新产生的数减小了密度比 ($\alpha < 1$), 则以概率 α 接收参予点。否则拒绝它并返回步骤 2)。

以上的采样过程实质就是一个马尔可夫过程, 总结 Metropolis 采样为先计算式(5):

$$\alpha = \min\left(\frac{f(\theta_{i+1}^*)}{f(\theta_i)}, 1\right) \quad (5)$$

然后以概率 α 接受参予点。这产生了一条马尔可夫链 $(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_k, \dots)$, 因为其从 θ_i 到 θ_{i+1} 的转移概率依靠 θ_i 而不是 $(\theta_0, \dots, \theta_{i-1})$, 在 k 步 Burn 周期以后, 去除开始值对于收敛值的影响, 该马尔可夫链能达到稳态分布。Metropolis 采样过程中的转移概率满足局部平衡条件, 因此算法将最终收敛于静态

分布。

2 基于贝叶斯理论的损伤诊断方法

根据有限元理论，一般的参数化的单元刚度矩阵可以写为：

$$K(\theta) = K_0 + \sum_i^{N_\theta} \theta_i K_i \quad (6)$$

K_i 是单元刚度矩阵对于整体刚度矩阵的贡献。 θ 是无量纲的参数，表示子结构对于总体刚度矩阵的贡献，当 θ 值小于 1 时，则可以判定结构损伤， θ 的值恒大于 0。当模态实验重复 N_s 次时，总的 N_s 组模态数据可以表示为：

$$\hat{\psi}_{N_s} = \{\hat{\psi}(n) : n = 1, \dots, N_s\} \quad (7)$$

其中第 n 组模态数据包括：

$$\hat{\psi}(n) = [\hat{\omega}_1^n, \hat{\omega}_2^n, \dots, \hat{\omega}_{N_m}^n, \hat{\phi}_1^{nT}, \hat{\phi}_2^{nT}, \dots, \hat{\phi}_{N_m}^{nT}] \quad (8)$$

其中 N_m 表示在数据组中总的组成分量。

2.1 条件概率

由于结构的模态各不相同，且测量相互独立，其联合概率密度函数为：

$$p(x|\theta) = \prod_{r=1}^{N_m} p(\bar{\psi}_r|\theta) \quad (9)$$

结构模态测试中，结构的频率和模态振型是相互独立的，因此由式(9)可得到下式：

$$p(x|\theta) = \prod_{r=1}^{N_m} p(\hat{\omega}_r|\theta)p(\hat{\phi}_r|\theta) \quad (10)$$

其中： $\hat{\omega}_r$ 为测试模态中的频率部分； $\hat{\phi}_r$ 为测试模态中的模态振型部分。 $p(\hat{\omega}_r|\theta)$ 以及 $p(\hat{\phi}_r|\theta)$ 为当给定结构的模型参数时结构第 r 阶模态频率和模态振型的分布。模态振型的条件概率密度分布可设计为^[7]：

$$p(\hat{\phi}_r|\theta) = k_1 \exp(-J(\hat{\phi}_r, \theta)) \quad (11)$$

其中， $k_1 = (2\pi)^{\frac{N_s}{2}} \|C_\phi\|^{-\frac{1}{2}}$ 。

$$\|C_\phi\| = \det[\text{diag}[\sigma_1^2, \dots, \sigma_{N_i}^2]] = \prod_{i=1}^{N_i} \sigma_i^2 \quad (12)$$

$$J(\hat{\phi}_r, \theta) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_s} (1 - \sqrt{MAC_n}) / MAC_n \quad (13)$$

$$MAC_j = \frac{(\phi_{aj}^T \phi_{ej})^2}{(\phi_{aj}^T \phi_{aj})(\phi_{ej}^T \phi_{ej})} \quad (14)$$

σ_i 为振型方差， ϕ_{aj} 为理论模态振型， ϕ_{ej} 为测试模态振型。另外模态特征值的条件概率可以表

示为：

$$p(\hat{\omega}_r|\theta) = k_2 \exp(-J(\hat{\omega}_r, \theta)) \quad (15)$$

其中， $k_2 = (2\pi)^{\frac{N_s}{2}} \|C_\omega\|^{-\frac{1}{2}}$ ， C_ω 为频率的协方差矩阵。其中：

$$J(\hat{\omega}_r, \theta) = \left(\frac{\hat{\omega}(n) - \omega(n)}{\hat{\omega}(n)} \right)^2 \quad (16)$$

2.2 先验概率

试验的结构物理参数的信息反应在先验概率分布函数上，结构的先验概率主要来源于经验和历史资料，先验分布可以表示为任何形式的分布类型，我们以先验分布服从 Normal 分布为例，结构物理参数的先验信息可以表示为：

$$\pi(\theta) = k_3 \exp(-J(\theta)) \quad (17)$$

先验分布可以选择均值为 θ_0 ，协方差矩阵为 C_θ 的联合高斯分布：

$$\pi(\theta) = (2\pi)^{-\frac{N_\theta}{2}} |C_\theta|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\theta - \theta_0)^T C_\theta^{-1}(\theta - \theta_0)\right) \quad (18)$$

其中 C_θ 为各参数方差构成的对角矩阵。

3 MCMC 的程序实现

由于以上分析得到的基于贝叶斯理论的后验概率复杂，并且与实验测试得到的结果有关，用一般的概率求解方法难以解答，因此需利用 MCMC 方法。基于 MCMC 的原理和基于贝叶斯理论的损伤诊断方法，本文编制了基于 MCMC 的结构损伤诊断程序，流程图如图 1 所示。

该程序主要包括两部分：第一部分为流程图中步骤 1—步骤 6，该部分是利用先验分布产生随机数并利用 Metropolis 准则进行样本选择，从初始状态开始，开始值高度依赖于初始值，当序列长度增加后，经过各态历过程，达到稳态平衡，其后过程与初始值无关，其中 Burn 阶段为去除初始值影响，Sample 阶段为正式采样；第二部分为流程图中步骤 7—步骤 14，其核心思想是充分利用前次的采样结果产生候选样本，以减小样本拒绝概率，其中包括定义概率取值窗口，计算概率密度核函数值，计算选择概率，根据样本协方差产生新样本等步骤，其中 Burn 阶段为减少样本相关性，Sample 阶段为正式采样。经过设定 Schedule 的多次循环，得到的样本值能最终收敛到目标值，经过频率直方图法和经过统计假设检验就能判定后验分布。



图1 MCMC 计算方法流程图

Fig.1 Flow chart of calculating method of MCMC

在第二步中，利用窗函数的思想^[15]，为达到减小拒绝概率的目的，利用前次生成样本构造新的候选生成概率密度函数，考虑概率累积函数为[0,1]区间，利用[0,1]区间随机数求取候选生成概率累积函数的反函数即可生成样本，主要包括以下几个步骤：1) 由窗函数计算各样本的概率，即“权重”；2) 由各样本及其概率权重构造候选生成概率累积函数；3) 由随机数选择前次样本，以样本值为中心，保持方差不变，以正态分布生成新样本。

4 框架结构损伤诊断研究

4.1 框架结构模型及实验

4层1跨2开间钢筋混凝土框架结构模型，模型的比例为1:3。框架结构的总体尺寸为 $L \times B \times H = 2.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 4.333\text{m}$ (如图2)。原型框架按抗震设计规范设计，底层层高为1.333m，2层—4层层高为1m。框架模型的基础为 $L \times B \times H = 0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.06\text{m}$ 的柱下独立板式埋置基础。柱尺寸为133mm \times 133mm，楼板厚度为30mm。框架模型的梁、柱、板的受力钢筋为I级，设计混凝土强度为C25。关于模型及其它信息见文献[16]。

框架第二层柱位置处，利用高强砂浆和红砖砌筑120mm \times 115mm \times 933mm的砖块，对第二层中间柱位置局部加厚，加强部分与上层框架梁顶紧，在如图3所示。在填充墙体方向，进行脉冲锤击法模态测试，脉冲锤击力大小为500N，得到整体平动频率和振型信息，实验共进行5次，比较测量前后

平均的振型测试结果如图4所示。由测试结果可以看出，除了第4阶振型有明显地改变外，其它3阶的变化不明显。损伤前后的模态频率及阻尼比的平均测试值如表1所示。根据模态测试信息，难以利用确定性问题的损伤诊断方法来进行识别研究。

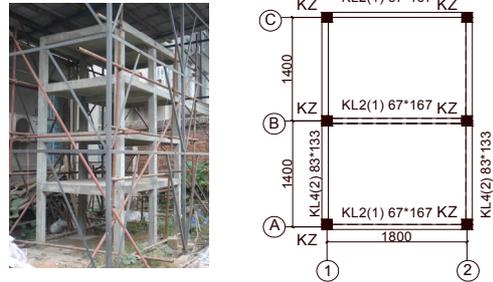


图2 混凝土框架模型及平面图

Fig.2 Model of frame structure and plane schematics

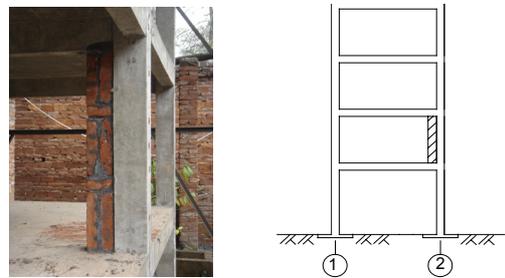
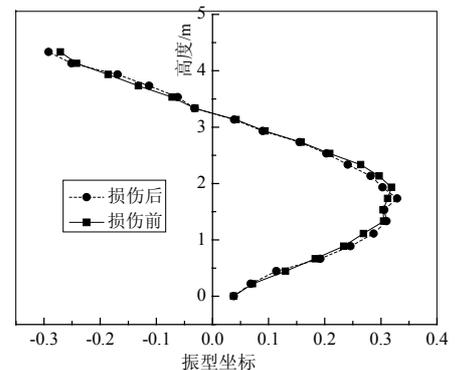
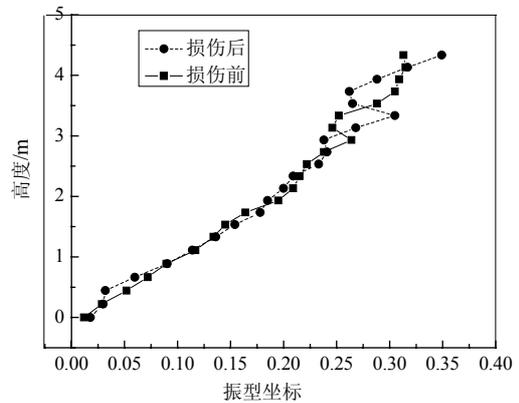


图3 损伤制造示意图

Fig.3 Schematic diagram of producing the damage



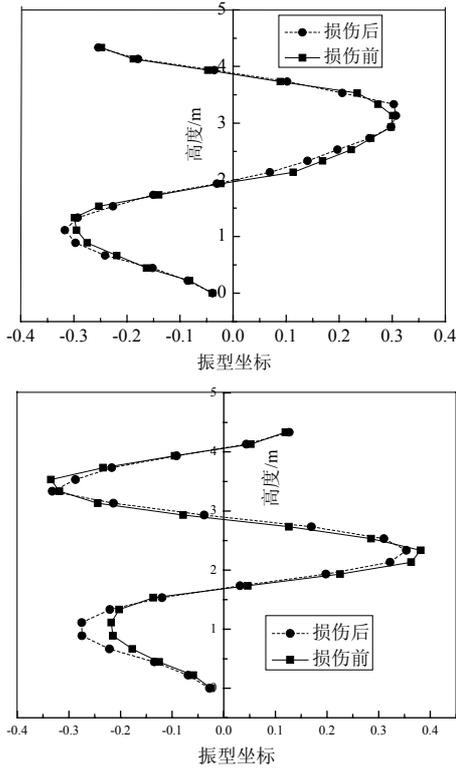


图4 损伤前后四阶振型图

Fig.4 Four modal shapes before and after damage

表1 损伤前后频率阻尼比

Table 1 Frequencies and damping ratios before and after damage

阶数	项目	损伤前		损伤后	
		频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)
第一阶	平均值	7.65	2.25	7.65	1.81
	标准差	0.006	0.049	0.013	0.003
第二阶	平均值	25.21	2.41	25.12	2.82
	标准差	0.001	0.086	0.027	0.001
第三阶	平均值	50.13	0.91	50.97	1.11
	标准差	0.002	0.012	0.041	0.002
第四阶	平均值	76.05	1.38	77.63	1.28
	标准差	0.0577	0.034	0.099	0.001

建立平面框架计算模型如图5所示，将结构划分为12个构件，共有10个节点，20个自由度，每根梁柱简化为一根杆件，实际框架为空间模型，将三榀框架简化为一榀。结构共分4次浇筑，每层混凝土的强度对应待识别结构参数弹性模量为 E_1 ， E_2 ， E_3 ， E_4 ，地基结构采用地基阻抗函数模型，平动阻抗、摇摆阻抗、平动摇摆耦合阻抗由地基动剪切模量 G_d 确定，因此将 G_d 设为地基待识别参数。相关信息见文[16]。利用 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 表示识别得到的弹性模量与测试得到的弹性模量的比值，利用 θ_5 表示识别得到的地基动剪切模量与测试得到的地基动剪切模量的比值。当这些值为1时，表示测试值与识别值符合良好。

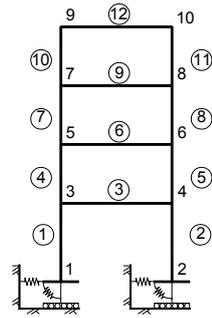


图5 计算模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of calculating model

利用MCMC方法来进行损伤诊断研究，由先验分布产生 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 的样本值，由基于贝叶斯理论的损伤诊断方法计算式(1)中的分子项，经过Metropolis准则计算，得到样本接受或拒绝的概率，通过设置不同的Schedule进程，使计算得到样本值逐渐向目标值收敛，当样本的方差值达到一定程度，停止搜索过程。将各Schedule进程的样本值累加起来，经过假设检验可以得到后验概率，然而通常后验样本的分布形式复杂，难以利用经典分布来描述。经研究发现，在最后的Schedule中样本值反应了后验分布的最大似然概率点，能有效地被利用来进行损伤诊断，以下计算分析过程将按照这一思路进行。

考虑到测试结果受噪声的影响较大，采取两步进行：第一步，利用完好状态下结构的模态测试信息进行基于MCMC的贝叶斯估计，这样能得到带识别参数的最后Schedule过程的后验分布，得到最大似然概率点的均值和方差；第二步，将各待识别物理参数的均值带入计算模型中作为已知值进行模型修正，再利用损伤状态下的结构模态测试信息进行贝叶斯损伤诊断，得到新的待识别参数的最后Schedule的后验分布。该方法可以用来进行损伤判别。

4.2 第一步

利用频率和振型的组合信息作为最后Schedule中贝叶斯公式中的条件概率。依据对于实验测试物理参数的相信程度，假设 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 为满足服从Normal的先验分布(也可用其它分布类型)，满足：

$$\theta_i \sim N(1.0, 0.1), \quad i=1,2,3,4 \quad (26)$$

地基模量的离散性较大，因此采用：

$$\theta_5 \sim N(1.0, 0.2) \quad (27)$$

任意设置5个参数的初始参数为1.3、0.8、0.7、

0.9、1.3, 启动马尔可夫链时以先验概率生成候选样本, 去除前 100 个数以去除初值的影响, 其后过程用窗函数法以前部分产生的样本值的核概率密度函数为候选样本生成新的样本值, 程序运行到 14 次 Schedule 过程。

运行过程中各 Schedule 进程的样本群如图 6 和

图 7 所示, 图中各分图分别表示 Schedule 为 1、8、14 时的样本值。最后得到样本值的收敛于一个小区域内, 根据 Schedule=14 样本值画出柱方图如图 8 所示。得到 Schedule=14 时样本值得到均值和方差如表 2 所示。

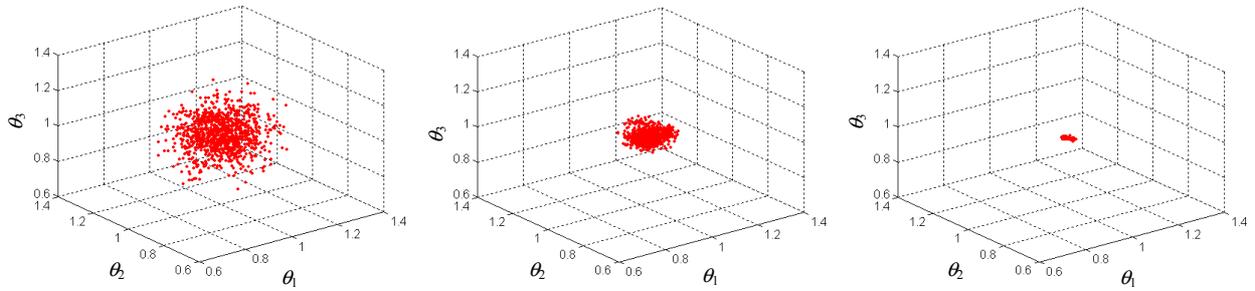


图 6 第一步不同 Schedule 中的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的数值
Fig.6 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ value in different Schedule in step one

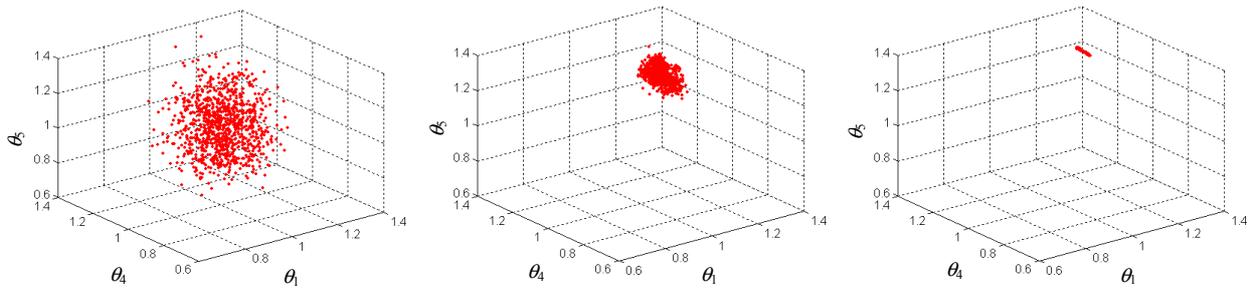


图 7 第一步不同 Schedule 中的 $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ 的数值
Fig.7 $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ value in different Schedule in step one

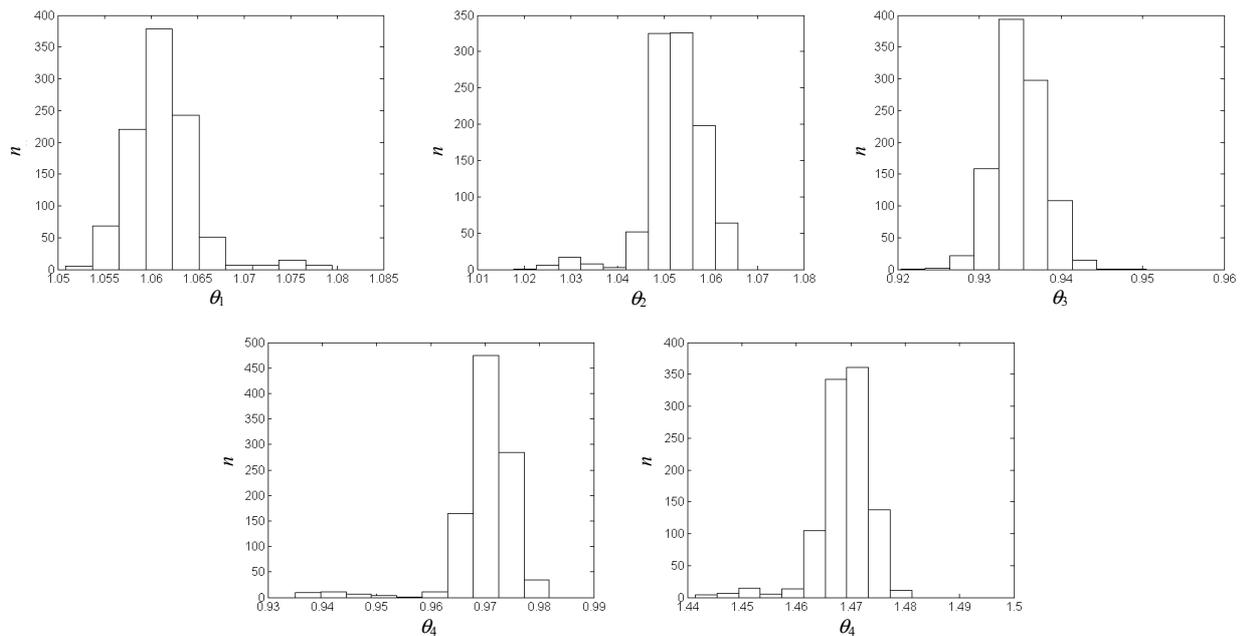


图 8 第一步 Schedule=14 时 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 的后验柱方图
Fig.8 Posterior histograms of $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ when schedule=14 in step one

表 2 第一步中根据后验柱方图得到的均值和方差
Table 2 Mean and variance value according to posterior histograms in step one

参数	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
μ	1.0612	1.0525	0.9349	0.9701	1.4689
σ	0.0037	0.0062	0.0030	0.0060	0.0049

4.3 第二步

将损伤前后两次实验看作两次独立的计算过程，将第一步进行 MCMC 计算得到的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 的均值作为模型修正的修正值，代入计算模型中，这样完成了模型修正。在完成第一步后， $\theta_1 - \theta_5$ 的含义是实验得到的物理参数值和用完好状态下模态值识别得到的物理参数值之差，其值表现的是测量误差和模型误差之和。在完成第二步计算后 $\theta_1 - \theta_5$ 的含义就变为基于已修正模型的损伤诊断，因此，这些参数均可以用 1 做为标准判断，大于 1 表示刚度提高，小于 1 表示刚度降低。

因此在第二步中，将第一步产生的均值代入计

算模型中，在第一步的基础上减小方差，然后选择 $\theta_i \sim N(1.0, 0.05)$ ，地基模量的离散性较大，采用 $\theta_5 \sim N(1.0, 0.1)$ ，初始参数分别选为 1.1、0.9、0.9、0.9、1.1，程序运行 15 次 Schedule 过程。运行过程中各 Schedule 进程的样本群如图 9 和图 10 所示，图 9 和图 10 中各分图分别表示 Schedule 为 1、8、15 时的样本值。得到 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 的在 Schedule=15 时的后验柱方图 11 所示。根据后验分布得到均值，方差如表 3 所示。定义 $\delta\theta_i$ 的如下：

$$\delta\theta_i = |u_b(\theta_i) - 1| \quad (29)$$

式中 $u_b(\theta_i)$ 为根据第二步 Schedule=15 时的均值， $\delta\theta_i$ 则表示的是损伤后结构物理参数的变化绝对值。将 $\delta\theta_i$ 列入图 12 中，可以看到 θ_2 的变化最为明显，表示第二层刚度有明显地变化，明确地反应出了结构损伤位置，说明了该方法能有效地识别结构损伤位置。在图 12 中，发现地基参数 θ_5 变化也比

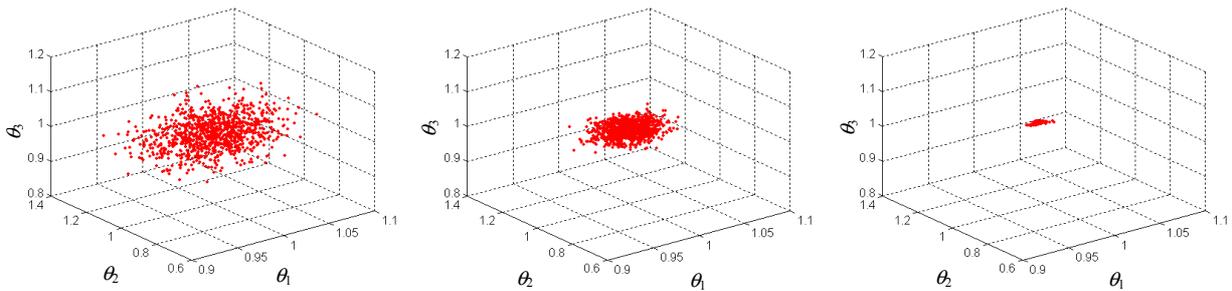


图 9 第二步不同 Schedule 中的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的数值
Fig.9 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ value in different Schedule in step two

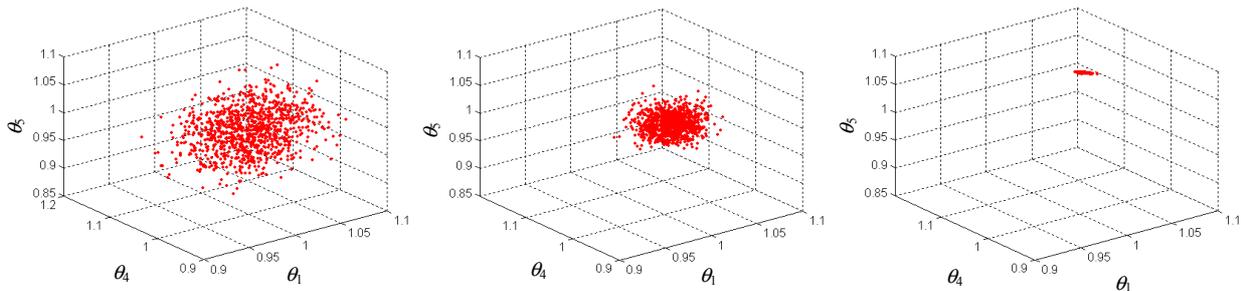
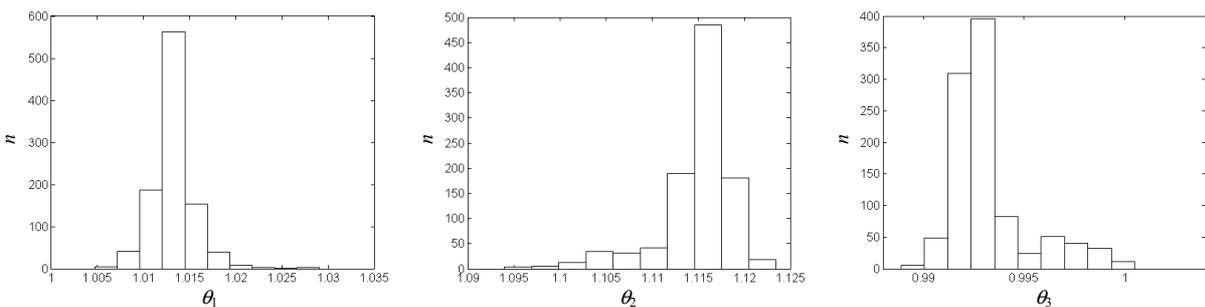
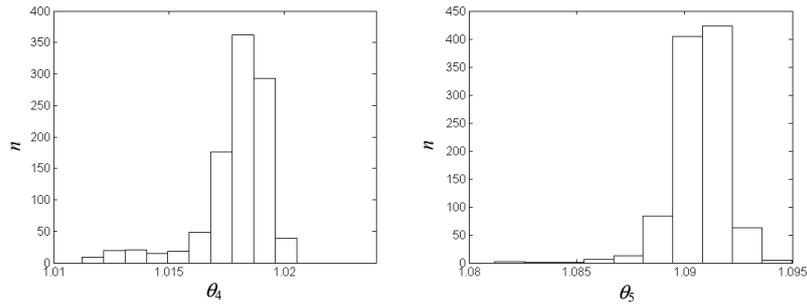


图 10 第二步不同 Schedule 中的 $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ 的数值
Fig.10 $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ value in different Schedule in step two



图 11 第二步 Schedule=15 的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 的后验柱状图Fig. 11 Posterior histograms of $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ when Schedule=15 in step two

较明显，这是因为对于地基模型的选择上值得进一步研究，对于利用结构的动力参数来进行地基参数的反演是利用的间接信息。这也说明地基参数对于结构动力特性影响的复杂性。

表 3 第二步中根据后验柱状图得到的均值和方差
Table 3 Mean and variance value according to posterior histograms in step two

参数	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
μ	1.0132	1.1149	0.9932	1.0180	1.0908
σ	0.0023	0.0040	0.0020	0.0015	0.0012

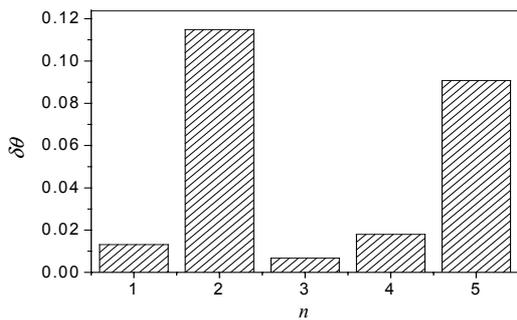


图 12 第二步方法二得到的均值差

Fig. 12 Difference of mean value between two posterior distributions

5 结论

贝叶斯统计学是和经典统计学并立的两大统计学门派，更重视已出现的样本观察值，重视先验信息的搜集、挖掘和加工。由于贝叶斯公式的多维积分形式复杂，极大地限制了它的应用，本文研究了基于贝叶斯方法进行损伤诊断的问题，得到的主要结论如下：

(1) 分析了贝叶斯统计的原理、马尔可夫过程以及 Metropolis 准则，建立了基于贝叶斯统计进行损伤诊断的方法，利用 MCMC 来计算贝叶斯公式的方法，编制了 MCMC 方法进行损伤诊断的程序。

(2) 对实验室内弹性地基上的框架结构进行了

局部加强柱的脉冲锤击法模态实验，得到了损伤前后结构的各 5 次的模态参数值。

(3) 利用得到的模态参数分两步进行损伤诊断研究。第一步利用完好状态的模态信息经过 MCMC 的模拟计算得到后验分布的均值，第二步利用前次后验分布得到的均值先修正模型，然后再利用损伤状态下的模态参数计算后验分布。计算得到第二步最大似然点能有效识别损伤的位置，识别结果还发现地基对识别结果有较大的影响。

参考文献：

- [1] Beck J L, Katafygiotis L S. Updating models and their uncertainties I: Bayesian statistical [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 455—461.
- [2] Katafygiotis L S, Beck J L. Updating models and their uncertainties II: Model identifiability [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 463—467.
- [3] Vanik M W, Beck J L, Au S K. Bayesian probabilistic approach to structural health monitoring [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7): 738—745.
- [4] Beck J L, Au S K. Bayesian updating of structural models and reliability using markov chain monte carlo simulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(4): 380—391.
- [5] Yuen K V, Au S K, Beck J L. Two-stage structural health monitoring approach for phase I Benchmark studies [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 16—33.
- [6] Ching J, Beck J L. Bayesian analysis of phase II IASC-ASCE structural health monitoring experimental Benchmark data [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(10): 1233—1244.
- [7] Sohn H, Law K H. A Bayesian probabilistic approach for structure damage detection [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 1259—1281.
- [8] Sohn H, Law K H. Bayesian probabilistic damage detection of a reinforced concrete bridge column [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 1131—1152.
- [9] 徐丽, 易伟建, 吴高烈. 结构局部损伤诊断的应变模态方法一分析与应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(3): 157—163.
Xu Li, Yi Weijian, Wu Gaolie. Strain mode method for

- diagnosis of local damage of structure: analysis and application [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(3): 157–163. (in Chinese)
- [10] 易伟建, 吴高烈, 徐丽. 模态参数不确定性分析的贝叶斯方法研究 [J]. *计算力学学报*, 2006, 23(6): 700–705. Yi Weijian Wu Gaolie, Xu Li. A study on the uncertainty of model parameters by Bayesian method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(6): 700–705. (in Chinese)
- [11] 李功标, 瞿伟廉. 基于应变模态和贝叶斯方法的杆件损伤识别[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(1): 135–138. Li Gongbiao, Qu Weilian. Damage detection of bars based on strain mode and Bayesian statistical method [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(1): 135–138. (in Chinese)
- [12] Paninski L. Markov Chain Monte Carlo and Gibbs Sampling [R]. Lecture Notes for EEB 596z, www.stat.columbia.edu. 2002.
- [13] Fitzgerald W J. Markov Chain Monte Carlo methods with applications to signal processing [J]. *Signal Processing*, 2001, 81: 3–18.
- [14] Karandikar R L. On the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method [J]. *Sadhana*, 2006, 31(2): 81–104.
- [15] Marques J P. 模式识别: 原理、方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. Marques J P. *Pattern recognition Concepts, methods and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [16] 周云, 易伟建. 考虑土-结构动力相互作用的框架结构的参数识别研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(6): 14–19. Zhou Yun, Yi Weijian. Parameter identification for frame structure considering dynamic soil-structure-interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(6): 14–19. (in Chinese)

(上接第 120 页)

参考文献:

- [1] 王君利, 吴曾谋, 陆希. 黄河公伯峡水电站混凝土面板堆石坝工程特点[J]. *西北水电*, 2005(1): 30–33. Wang Junli, Wu Zengmou, Lu Xi. Engineering characteristics of concrete face rockfill dam of Gongboxia hydropower station on the Yellow river [J]. *Northwest Water Power*, 2005(1): 30–33. (in Chinese)
- [2] 孙玉军, 洪韬, 武选正. 公伯峡面板堆石坝混凝土挤压式边墙技术的应用 [J]. *水力发电*, 2002(8): 45–47. Sun Yujun, Hong Di, Wu Xuanzheng. Application of the concrete crushing-type sidewall technology in Gongboxia concrete face rockfill dam [J]. *Water Power*, 2002(8): 45–47. (in Chinese)
- [3] 苗树英, 白昭鹏. 挤压式边墙施工法在混凝土面板坝工程中的应用[J]. *陕西水力发电*, 2001, 17(4): 42–46. Miao Shuying, Bai Zhaopen. Application of sidewall extrusion method to concrete face slab dam construction [J]. *Journal of Shanxi Water Power*, 2001, 17(4): 42–46. (in Chinese)
- [4] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1985, 111(6): 793–815.
- [5] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(3): 14–22. Yin Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(3): 14–22. (in Chinese)
- [6] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 21–25. Zhang Ga, Zhang Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 21–25. (in Chinese)
- [7] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]. 第五届土力学及基础工程学术讨论会论文集, 北京, 1990: 101–105. Shen Zhujiang. A new model for stress-strain relationship analysis of soil [C]. *Proceeding 5th Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Beijing, 1990: 101–105. (in Chinese)
- [8] 张建民, 张嘎, 刘芳. 面板堆石坝挤压式边墙的概化数值模型及应用[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(3): 249–253. Zhang Jianmin, Zhang Ga, Liu Fang. A simplified equivalent numerical model of extrusion-sidewall for CFRD and its application [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(3): 249–253. (in Chinese)
- [9] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(10): 1175–1179. Zhang Ga, Zhang Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(10): 1175–1179. (in Chinese)
- [10] 张嘎, 张建民. 接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(4): 5–10. Zhang Ga, Zhang Jianmin. Application of elastoplasticity damage interface model in stress-strain analysis of CFRD [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 24(4): 5–10. (in Chinese)