

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.021

动力荷载下结构非线性概率模型参数估计及失效概率预测

丁福凡¹, 王佐才^{1,2}, 辛宇^{1,2}, 袁子青¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省基础设施安全检测与监测工程实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章提出基于贝叶斯推理的结构非线性概率模型参数估计方法, 结合非线性参数的后验概率分布估计结果, 实现结构在动力荷载作用下的失效概率预测。利用结构实测加速度响应作为输入, 构建贝叶斯推理的似然函数, 采用过渡马尔可夫蒙特卡罗(transitional Markov chain Monte Carlo, TMCMC)算法估计非线性概率模型参数的后验概率分布。当模型参数的后验概率分布被计算之后, 利用更新后的参数后验概率分布作为输入, 通过随机抽样算法预测结构在动力荷载作用下的失效概率。为验证方法的可行性, 对地震荷载作用下的 5 层钢框架结构进行数值模拟, 通过钢框架结构的缩尺振动台试验进一步验证该方法的有效性。研究表明: 该方法能够准确实现非线性模型参数的后验概率密度计算, 能够对结构在地震荷载下的失效概率进行有效预测。

关键词:结构非线性; 概率模型; 贝叶斯推理; 后验概率分布; 失效概率

中图分类号:TU311.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1434-07

Parameter estimation of structural nonlinear probabilistic model and prediction of failure probability due to dynamic load

DING Fufan¹, WANG Zuocai^{1,2}, XIN Yu^{1,2}, YUAN Ziqing¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Laboratory for Infrastructural Safety Inspection and Monitoring, Hefei 230009, China)

Abstract: A Bayesian inference-based method was proposed for parameter estimation of structural nonlinear probabilistic model, and the estimated posterior probability distributions of nonlinear parameters were further used for structural failure probability prediction subjected to dynamic load. The measured accelerations were used as input to construct the likelihood function of Bayesian inference. The transitional Markov chain Monte Carlo(TMCMC) algorithm was performed to estimate the posterior probability distributions of structural nonlinear probabilistic model parameters. Once the posterior probability distributions of the nonlinear parameters were calculated, the posterior distributions could then be further used as input to predict the failure probability of structures subjected to dynamic load by stochastic sampling algorithm. To validate the feasibility of the proposed method, the numerical simulation on a five-story steel frame structure under earthquake excitations was conducted. Then the proposed method was further verified through the scaled shaking table test of the steel frame structure. The results indicate that the proposed method can accurately estimate the posterior probability density of nonlinear model parameters and effectively predict the failure probability of structures due to dynamic load.

Key words: structural nonlinearity; probabilistic model; Bayesian inference; posterior probability distribution; failure probability

收稿日期:2023-02-24;修回日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(51922036);国家自然科学基金资助项目(52278301)

作者简介:丁福凡(1998—),男,安徽宣城人,合肥工业大学硕士生;

王佐才(1982—),男,湖南双峰人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

为有效预测工程结构在动力荷载作用下的动力学行为,需要利用结构的实测响应对其非线性模型参数进行估计。然而在实际工程应用中,由于测试噪声、环境扰动等不确定性因素的影响^[1-2],导致结构非线性模型参数具有不确定性,需要对结构非线性概率模型的参数进行估计。贝叶斯方法是解决概率模型参数估计的一种重要方法,该方法结合工程结构的先验信息和实测数据构建似然函数,通过随机采样类算法估计参数的后验概率分布,获得后验概率分布结果,从而获得结构概率模型参数的统计特性^[3]。文献[4]利用贝叶斯方法和 MH(Metropolis-Hastings)算法对剪切框架模型层间刚度的概率模型参数进行估计;文献[5]采用贝叶斯方法结合延缓拒绝自适应(delayed rejection adaptive metropolis, DRAM)算法获得人行桥模型参数的后验概率分布;文献[6]利用标准马尔可夫蒙特卡洛(Markov chain Monte Carlo, MCMC)方法和差分进化算法计算结构非线性概率模型参数的后验样本,并量化由噪声引起的不确定性;文献[7]利用非线性结构在地震激励作用下的主分量瞬时幅值构建贝叶斯方法的似然函数,并结合最大似然估计获得非线性概率模型参数的后验概率分布,由此量化测量噪声引起的模型参数的不确定性;文献[8]利用结构动力响应主分量的瞬时特征参数构建似然函数,利用贝叶斯方法和 DRAM 算法对结构非线性概率模型参数进行不确定性量化;文献[9]进一步基于贝叶斯推理开展结构可靠度的更新方法研究,从概率角度定量地评价结构的失效概率。

本文利用结构实测加速度响应作为输入,构建贝叶斯推理的似然函数,采用过渡马尔可夫蒙特卡洛(transitional Markov chain Monte Carlo, TMCMC)算法估计非线性概率模型参数的后验概率分布。利用计算后的结构非线性概率模型参数统计特性作为输入,通过随机抽样算法预测结构在动力荷载作用下结构的失效概率,实现结构的安全评估。

1 理论背景

1.1 结构非线性概率模型参数估计

1.1.1 概率模型参数的后验概率密度函数

结构非线性概率模型参数估计是一个逆向不确定性量化过程,利用结构在动力荷载作用下的结构实测响应的不确定性来逆推结构非线性概率模型参数的统计特性。假设结构在动力荷载作用

下的实测响应向量 $\mathbf{y} = \{y \in \mathbf{R}^{N_0}\}$, 结构理论响应向量为 $\mathbf{u}(\theta)$, θ 为待估计概率模型的参数, N_0 为观测次数, 则两者关系如下:

$$\mathbf{y} = \mathbf{u}(\theta) + \mathbf{e} \quad (1)$$

其中, \mathbf{e} 为结构响应考虑模型误差、测量噪声等不确定性因素引起的误差向量。通常可以假定 \mathbf{e} 独立同分布于期望为 0、方差为 σ^2 的正态分布。基于贝叶斯推理的结构非线性概率模型参数估计过程可表示为^[10]:

$$p(\theta | \mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta)}{p(\mathbf{y})} = \frac{p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta)}{\int p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta)d\theta} \quad (2)$$

其中: $p(\theta)$ 为参数 θ 的先验概率密度分布; $p(\mathbf{y} | \theta)$ 为参数 θ 的似然函数; $p(\theta | \mathbf{y})$ 为参数 θ 的后验概率密度函数; $p(\mathbf{y}) = \int p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta)d\theta$ 为边缘概率密度函数, 其结果与参数 θ 无关。因此, 式(2)可表示为:

$$p(\theta | \mathbf{y}) = c p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta) \propto p(\mathbf{y} | \theta)p(\theta) \quad (3)$$

本文采用基于无信息先验分布的贝叶斯假设作为参数 θ 的先验概率密度函数 $p(\theta)$, 记为:

$$p(\theta) = \begin{cases} 1/a - b, & \theta \in [a, b]; \\ 0, & \theta \notin [a, b] \end{cases} \quad (4)$$

其中, a 和 b 分别为参数 θ 的下、上界限值。

当观测数量为 N_0 次时, 参数 θ 的似然函数可以表示为:

$$p(\mathbf{y} | \theta) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{N_0} \det(\Sigma_e)}} \exp[J(\theta)],$$

$$J(\theta) = -\frac{1}{2} [\mathbf{y} - \mathbf{u}(\theta)]^T \Sigma_e^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{u}(\theta)] \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(2), 可以求得基于实测结构响应的非线性模型参数的后验概率密度函数为^[11]:

$$p(\theta | \mathbf{y}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_0} [\mathbf{y} - \mathbf{u}(\theta)]^T \Sigma_e^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{u}(\theta)] \right\} \quad (6)$$

1.1.2 TMCMC 算法

为解决复杂后验概率分布采样困难的问题, 文献[12]提出 TMCMC 算法, 该算法避开直接从复杂难以采样的目标概率分布采样, 通过创造一系列的中间概率分布, 利用采样和重采样的策略使抽样样本成为目标样本, 由式(3)可知, 结构非线性概率模型参数的后验概率分布服从以下关系:

$$p(\theta | \mathbf{y}) \propto p(\mathbf{y} | \theta) p(\theta) \quad (7)$$

TMCMC 算法是一种构建中间后验概率分布的方法,其中间后验概率分布为:

$$p_j(\theta | \mathbf{y}) \propto p(\mathbf{y} | \theta)^{q_j} p(\theta),$$

$$j = 0, 1, \dots, m; 0 < q_0 < \dots < q_m = 1 \quad (8)$$

其中: j 为阶号,当 $j=0$ 时, $q_0=0$,此时,第一阶段的中间后验概率分布 $p_0(\theta | \mathbf{y}^m) = p(\theta | \mathbf{y}^m)$ 即为先验分布,当 $j=m$ 时,此时,第 m 阶段的后验概率密度 $p_m(\theta | \mathbf{y}^m) = p(\mathbf{y} | \theta) p(\theta)$ 为目标后验概率分布,最终利用 TMCMC 算法可以估计参数的后验概率密度函数。

1.1.3 高斯过程模型

TMCMC 算法通过采样与重采样解决了从复杂后验概率分布直接采样的问题,但每次重采样的迭代均需调用有限元模型进行结构非线性动力分析,导致计算效率低。为实现参数后验概率密度函数的快速计算,采用高斯过程模型代替有限元模型进行结构非线性动力响应计算,从而提高参数后验样本的计算效率。高斯过程模型由均值函数和协方差函数所确定,记为:

$$f(x) = G(m(x), k(x, x')) \quad (9)$$

其中: $m(x)$ 为高斯过程均值函数; $k(x, x')$ 为协方差函数。

采用零均值的高斯过程模型,协方差函数包括自相关项、线性回归项、常数项以及噪声项,即

$$k(x, x') = \phi_0 \exp\left\{-1/2 \sum_{l=1}^d \rho_l (x_l - x'_l)^2\right\} + \eta_0 + \eta_1 \sum_{l=1}^d x_l x'_l + \phi_1 (x - x') \quad (10)$$

其中: $\delta(x, x')$ 为具有 Dirac 函数性质的协方差函数项; $\phi_0, \phi_1, \rho_1, \dots, \rho_d, \eta_1, \eta_0$ 为超参数,利用共轭梯度法进行求解。

对于一个具有 n 个观测值的训练集 $\{(x_i, f_i) | i=1, 2, \dots, n\}$,其中: x_i 为第 i 个 d 维的输入向量 $x_i = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_d]^T$; f_i 为输出向量。为了简化推导,记训练样本集为 $\mathbf{D} = (\mathbf{X}, \mathbf{F})$,其中 $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$, $\mathbf{F} = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n]^T$,因此,训练集的联合概率分布为:

$$p(\mathbf{F}) \sim G[m(\mathbf{X}), k(\mathbf{X}, \mathbf{X}')] \quad (11)$$

对于测试点 x_* 处的预测值 f_* ,则 (\mathbf{F}^T, f_*) 也服从高斯分布,即

$$p(\mathbf{F}^T, f_*) \sim G\left[\begin{bmatrix} m(\mathbf{X}) \\ m(x_*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} k(\mathbf{X}, \mathbf{X}) k(\mathbf{X}, x_*) \\ k(x_*, \mathbf{X}) k(x_*, x_*) \end{bmatrix}\right] \quad (12)$$

由条件概率公式可以得到基于训练集的预测

值 f_* 的后验分布,且为高斯过程:

$$\begin{cases} p(f_* | \mathbf{X}, \mathbf{F}^T, x_*) = \frac{p(f_*, \mathbf{F}^T | \mathbf{X}, x_*)}{p(\mathbf{F}^T | \mathbf{X})}, \\ p(f_* | \mathbf{X}, \mathbf{F}^T, x_*) \approx G(\hat{m}_*, \hat{k}_*) \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{m}_* &= m(x_*) + k(x_*, \mathbf{X}) [k(\mathbf{X}, \mathbf{X})]^{-1} [\mathbf{F} - m(\mathbf{X})]; \\ \hat{k}_* &= k(x_*, x_*) - k(x_*, \mathbf{X}) \times \\ & \quad [k(\mathbf{X}, \mathbf{X})^{-1} k(\mathbf{X}, x_*)] \end{aligned} \quad (14)$$

由式(13)可知,基于训练样本可得到测试点 x_* 处的预测值 f_* 的均值 \hat{m}_* 及其方差 \hat{k}_* 。因此对于 TMCMC 算法生成的候选样本 θ^* ,根据式(14)可以计算得到相应的动力响应值 $y(\theta^*)$ 。

1.2 结构失效概率预测

结构失效概率是评价结构安全性能的一项重要指标。假设定义 q 为由结构输出响应计算得到的一个标量值,当 q 超过设定的阈值 B ,结构发生破坏。利用结构非线性概率模型参数的后验概率密度函数来计算结构的失效概率是结合了参数先验信息和实测响应数据,能够更准确地表示结构的不确定性。因此,在获得结构实测响应的情况下,利用结构非线性概率模型参数的后验概率密度函数来计算结构的失效概率,其表达式为:

$$p_{f_{-posterior}}(q) = \int_{q>B} p(q | \theta) p(\theta | \mathbf{y}) d\theta \quad (15)$$

其中: $p(\theta | \mathbf{y})$ 为模型参数的后验概率密度函数; $p(q | \theta)$ 为 q 的条件概率密度函数。

2 数值模拟

2.1 5层框架结构模型概况

通过 OpenSees 软件对 1 个 5 层钢框架结构进行数值模拟,该框架结构截面尺寸如图 1 所示。框架柱平面方向间距分别为 6.0、4.5 m,层高均为 3 m。结构顶层楼板的质量设置为 7.231×10^3 kg,其他楼层质量为 7.408×10^3 kg。梁、柱单元采用标准 HW 型钢进行定义,截面尺寸如图 1 所示。该非线性模型设置瑞利阻尼来模拟结构在地震作用下的阻尼耗能特性。框架模型的梁和柱均采用 NonlinearBeamColumn 单元进行模拟,楼板假定为刚性楼板,梁柱连接处和框架模型底部固结。为了模拟结构在动力荷载作用下的非线性行为,模型采用 Steel02 材料定义结构的梁、柱单元。

Steel02 材料的本构关系曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,Steel02 材料模型主要包括材料初始屈服强度 f_y 、初始弹性模量 E 以及应变硬化比 b 3 个参数。基于文献[9]的研究,本节选取 f_{y_Col} 、 E_{Col} 、 b_{Col} 、 f_{y_Beam} 、 E_{Beam} 、 b_{Beam} 作为待估计参数。其理论值见表 1 所列。

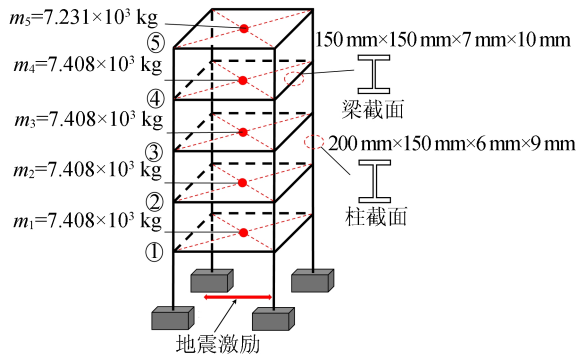


图 1 5 层框架结构模型

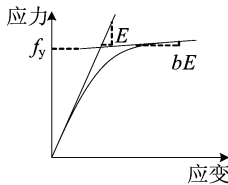


图 2 Steel02 材料本构关系曲线

表 1 5 层框架结构非线性概率模型参数的理论值

柱的材料参数	数值	梁的材料参数	数值
$f_{y_Col}/(10^{11} \text{ Pa})$	2.35	$f_{y_Beam}/(10^{11} \text{ Pa})$	1.65
$E_{Col}/(10^8 \text{ Pa})$	2.06	$E_{Beam}/(10^8 \text{ Pa})$	2.06
b_{Col}	0.16	b_{Beam}	0.08

2.2 5 层框架结构的高斯过程模型

为模拟 5 层钢框架结构在地震荷载作用下的动力响应,选用 1994 年 Northridge 地震波作为该非线性结构的外部激励,采用 Newmark- β 积分算法对该框架结构在地震荷载作用下的非线性动力响应进行计算,采样频率设置为 240 Hz。利用 OpenSees 软件计算其动力响应,其中结构顶层加速度响应如图 3 所示。

为提高非线性概率模型参数后验概率密度函数的计算效率,且保留加速度响应中蕴含的结构非线性信息,从结构顶层加速度响应中每隔 24 个数据点选取 1 个数据点作为输入。因此,选取的特征指标包含 300 个加速度的数据点,标记为 $[a_1^{\text{train}} \ a_2^{\text{train}} \ a_3^{\text{train}} \ \dots \ a_{300}^{\text{train}}]$ 。由于高斯过程的训练精度将直接影响到后续的参数不确定性量化精度,因此,本文分别利用 100、300、500、800 组训

练数据,进行高斯过程模型训练,训练数据均采用 Sobol 采样方法进行选取,设置参数的分布区间为 $[0.7\theta, 1.3\theta]$ 。

待获取训练样本之后,便可以利用输入-输出数据对高斯过程模型进行训练。为了验证高斯过程模型的拟合精度,以每组的 a_{150}^{train} 为例,预测加速度响应点与真实数据点之间的对应关系,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,随着样本组数的增加,高斯过程模型的预测精度逐渐提高。本文选取经过 800 组训练样本数据训练后的高斯过程模型替代结构有限元模型进行非线性动力响应计算。

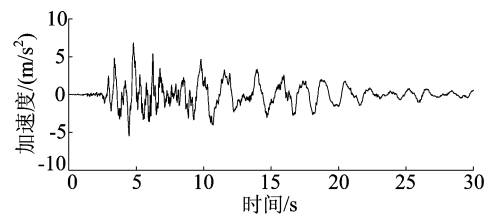


图 3 5 层框架结构顶层加速度响应

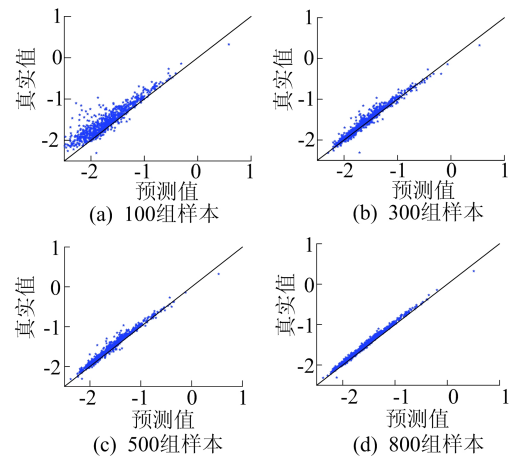


图 4 不同训练数据样本组数的高斯过程模型的训练结果

2.3 5 层框架结构非线性概率模型参数估计

2.3.1 噪声影响的概率模型参数估计

为研究噪声因素对非线性概率模型参数的影响,本文分别在模拟的加速度响应信号中加入 5%、10%、20% 的高斯白噪声作为结构响应的观测值,然后利用提出的方法对 5 层框架结构的非线性概率模型参数的后验样本进行估计,计算过程中,将 TMCMC 算法在每个阶段的采样数目设置为 1 200,控制采样拒绝率的比例因子 β 设置为 0.2。除初始阶段 $p_0 = 0$ 以及最后阶段 $p_m = 1$ 外,其余各个阶段的回火参数 $\{p_1, p_2, \dots, p_{m-1}\}$ 依照可信度权重的变异系数为 1 自动计取。所有参数的真实值均设置为 1,即真实值/理论值。最

终计算获得结构非线性概率模型参数结果见表 2 所列,参数的后验样本概率密度函数(probability density function,PDF)分布如图 5 所示。

由表 2 和图 5 可知,所提出的结构非线性概率模型参数估计方法具有较强的噪声鲁棒性,即使在 20% 的噪声影响下,参数估计的期望值的最大误差为 4.9%。

由图 5 可知,参数估计的变异系数随着测量噪声水平的增加而增大,参数估计的最大变异系数为 3.96%,表明在高水平噪声影响下,所提方法可以对结构非线性概率模型参数进行有效估计。

表 2 考虑噪声影响的结构非线性概率模型参数估计值

参数	类型	5%	10%	20%
f_{y_Col}	实际值/理论值	0.983	0.980	0.975
	变异系数/%	1.15	1.44	2.09
E_{Col}	实际值/理论值	0.995	1.002	1.016
	变异系数/%	0.74	0.95	1.32
b_{Col}	实际值/理论值	1.023	1.019	1.020
	变异系数/%	1.05	1.45	2.03
f_{y_Beam}	实际值/理论值	0.984	0.984	0.986
	变异系数/%	0.80	1.05	1.41
E_{Beam}	实际值/理论值	1.007	1.006	0.994
	变异系数/%	0.59	0.78	1.06
b_{Beam}	实际值/理论值	1.039	1.042	1.049
	变异系数/%	2.26	3.20	3.96

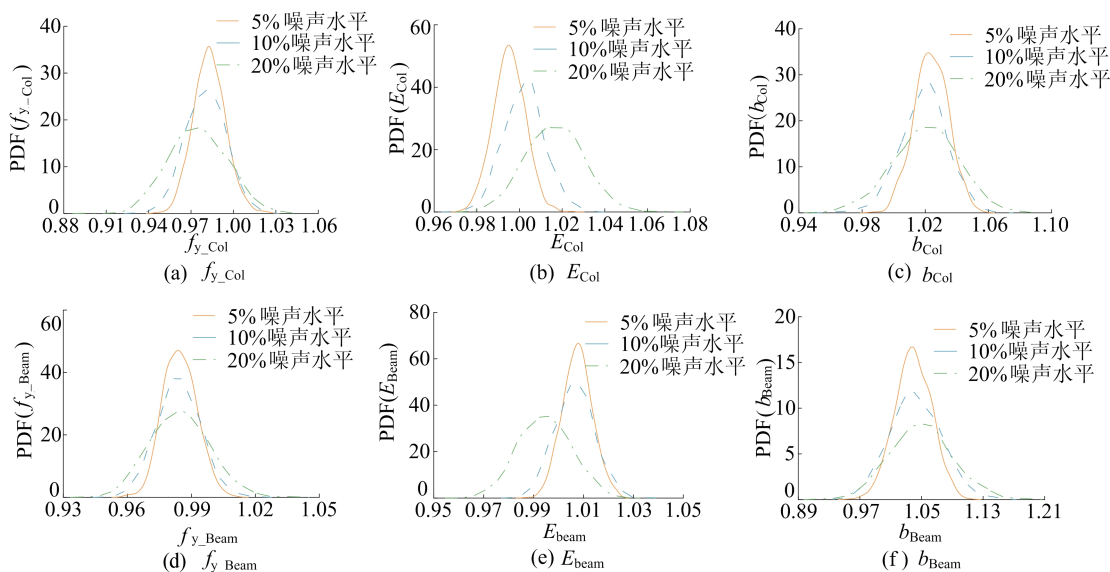


图 5 考虑噪声影响的 5 层框架结构非线性概率模型参数后验概率分布

2.3.2 模型随机性的结构概率模型参数估计

为考虑模型随机性的结构非线性概率模型参数的估计,将结构非线性模型参数假设为符合正态分布的随机变量,均值见表 1 中的理论值,变异系数假定为 5%,随机生成 100 组参数样本组合,并分别计算各参数组合下的结构非线性动力响应。模拟响应中增加 5% 的高斯白噪声,用来模拟结构的实测响应。

基于 2.2 节中的方法提取观测样本来构建似然函数,并通过 TCMCMC 算法估计结构非线性概率模型参数的后验概率分布,结果见表 3 所列,后验样本概率分布如图 6 所示。

由表 3 可知,最大的变异系数为 2.76%。由图 6 可知,各参数的后验概率分布近似服从高斯分布。因此,在考虑模型随机性的影响下,本文方法可以对结构非线性概率模型参数的统计特性进行有效估计。

表 3 模型随机性的 5 层框架结构非线性概率模型参数估计值

参数	f_{y_Col}	E_{Col}	b_{Col}	f_{y_Beam}	E_{Beam}	b_{Beam}
实际值/理论值	0.994	0.987	0.968	0.976	1.020	1.013
变异系数/%	1.25	0.80	1.79	0.96	0.6	2.76

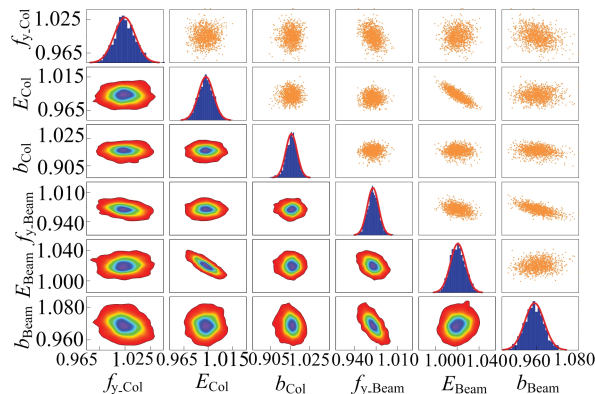


图 6 5 层框架结构非线性概率模型参数后验分布

3 5 层框架结构失效概率预测

依据我国建筑抗震设计规范规定,对于多、高层钢结构建筑,其弹塑性层间位移角限值^[13]一般为 $B=1/50$,因此,本文以层间位移角 $1/50$ 作为判断结构失效的指标。结构在动力荷载作用下的失效概率可定义为:

$$P_f = P(Z_{\max,i} < Z_{\text{design}}) \quad (15)$$

其中: Z_{\max} 为动力荷载作用下框架结构的最大层间位移角; Z_{design} 为框架结构的允许层间位移角。

采用超拉丁随机抽样方法从结构非线性概率模型参数的后验概率分布中抽取 500 组参数样本组合进行失效概率计算。分别计算该框架结构在 $0.21g$ 、 $0.22g$ 、 $0.23g$ 、 $0.24g$ 、 $0.25g$ 作用下峰值响应处的层间位移角,从而预测结构的失效概率。结构失效概率的计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着地震荷载的逐渐增加,结构的失效概率也随之增加,分别从 0.02% 增加到 100% ,当地震加速度为 $0.23g$ 时,结构的失效概率为 43.0% 。

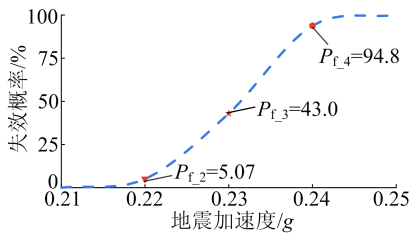


图 7 地震作用下 5 层框架结构失效概率图

4 缩尺试验验证

4.1 试验基本概况

通过钢框架结构的缩尺振动台试验验证该方法的有效性,试验结构总体装置如图 8 所示。

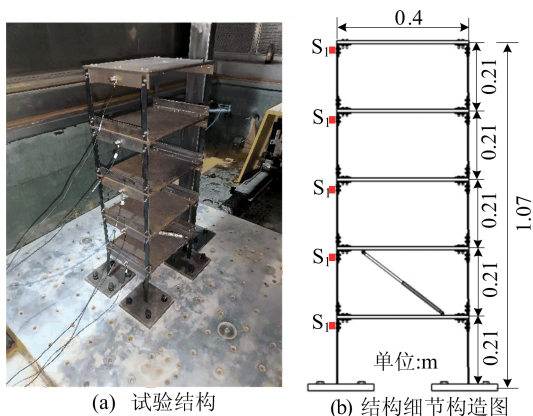


图 8 试验结构总体装置图

该钢框架由角钢、钢片以及钢板通过螺栓连接而成,钢材型号为 Q235,框架结构的整体几何尺寸如图 8b 所示。试验选取 1940 年的 El-Centro 地震波作为结构的外部激励,荷载作用时间为 30 s ,采样频率为 100 Hz ,并实测结构在地震激励下的顶层加速度响应。

4.2 试验结构非线性概率模型参数估计

利用 OpenSees 软件建立该结构的非线性模型,结构的框架柱采用非线性梁柱单元进行定义,结构阻尼器采用 Maxwell 单元模拟,钢材材料采用 Steel02 单元定义。选取钢材的屈服强度 f_y 、弹性模量 E 与 Maxwell 单元的轴向刚度 K 、速度指数 a 这 4 个非线性参数,初始模型的非线性参数设置见表 4 所列。根据本文提出的非线性概率参数估计方法,估计试验结构的非线性概率参数,结果见表 4 所列。由表 4 可知,所提方法可以对试验结构非线性概率模型参数进行有效估计,其中变异系数最大值为 1.69% 。

非线性概率模型参数的后验概率分布如图 9 所示。由图 9 可知,参数后验样本大致服从正态分布,且表现出良好的收敛性。

表 4 试验结构非线性概率模型参数估计值

参数	$f_y/(10^8\text{ Pa})$	$E/(10^{11}\text{ Pa})$	$K/(N/m)$	a
初始值	2.35	2.06	5 000	0.30
样本均值	2.06	2.46	5 630	0.35
变异系数/%	1.69	0.05	1.10	0.45

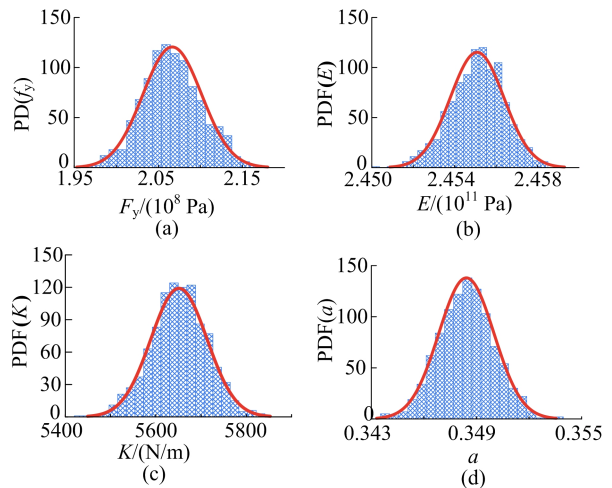


图 9 试验结构非线性概率模型参数后验概率分布

4.3 试验结构失效概率预测

同样采用超拉丁采样方法,从非线性概率模型参数的后验概率分布中随机抽取 700 组参数样本进行非线性动力响应分析,并计算试验结构在

0.10g 和 0.15g 地震荷载作用下的层间位移角, 2 种工况下的框架结构最大层间位移角预测结果分别如图 10 所示。将结构的允许层间位移角设置为 $1/50$, 2 种工况下的结构失效概率如图 11 所示。由图 11 可知, 当外部激励为 0.10g 时, 结构的失效概率接近 0; 当外部荷载为 0.15g 时, 结构的失效概率为 37.4%。研究表明, 基于结构非线性概率模型参数的后验概率分布估计, 可进一步实现地震荷载作用下的结构失效概率预测。

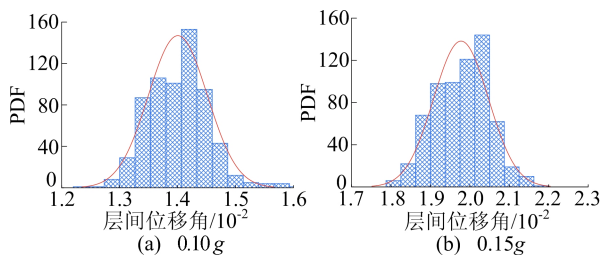


图 10 试验结构层间位移角分布结果

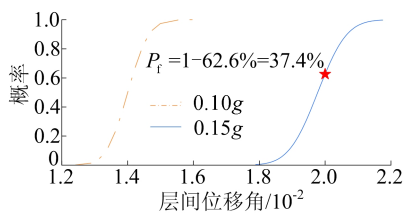


图 11 试验结构失效概率预测结果

5 结 论

本文提出基于贝叶斯推理的结构非线性概率模型参数估计方法, 利用更新后的参数后验概率分布, 预测结构在动力荷载作用下的失效概率。通过地震激励下非线性框架的数值模拟和缩尺试验, 得到结论如下。

1) 利用本文所提出的基于贝叶斯推理的非线性概率模型参数估计方法, 能考虑噪声、模型不确定性, 并对结构的非线性概率模型参数进行估计。

2) 通过 TMCMC 算法估计的非线性概率模型参数的后验样本期望逼近名义值, 最大误差为 4.9%, 并具有良好的噪声鲁棒性。

3) 利用计算得到的结构非线性概率模型参

数后验概率分布, 可以对结构在动力荷载作用下的失效概率进行预测, 为工程结构动力灾害后的安全评估提供了一种有效途径。

[参 考 文 献]

- [1] 侯立群, 赵雪峰, 欧进萍, 等. 结构损伤诊断不确定性方法研究进展[J]. 振动与冲击, 2014, 33(18): 50-58.
- [2] 鄧伦海, 詹娟娟, 李阿龙. 基于改进 EWT 的超高层建筑模态参数识别[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 45-52.
- [3] 刘佩, 袁泉, 魏庆朝. 基于反应数据的贝叶斯概率方法在恢复力模型选择中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1666-1671.
- [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] 万华平, 任伟新, 黄天立. 基于贝叶斯推理的随机模型修正方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(4): 67-76, 95.
- [6] 刘纲, 罗钧, 秦阳, 等基于改进 MCMC 方法的有限元模型修正研究[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 138-145.
- [7] XIN Y, HAO H, WANG Z C, et al. Bayesian based nonlinear model updating using instantaneous characteristics of structural dynamic responses [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 459-474.
- [8] DING Y J, WANG Z C, CHEN G, et al. Markov chain Monte Carlo-based Bayesian method for nonlinear stochastic model updating [J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 520: 116-595.
- [9] 刘佩. 基于贝叶斯理论的结构动力可靠度更新方法与分析 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(12): 29-34.
- [10] YUAN K V. Bayesian methods for structural dynamics and civil engineering [M]. Clementi Loop: John Willy & Sons, 2010: 10-23.
- [11] 张建新. 基于贝叶斯方法的有限元模型修正研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [12] CHING J, CHEN Y C. Transitional Markov chain Monte Carlo method for Bayesian model updating, model class selection, and model averaging [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(7): 816-832.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 31-48.

(责任编辑 吴 亮)