

消能减震建筑结构模态参数识别的贝叶斯方法

杨朋超¹, 薛松涛^{2,3}, 谢丽宇²

(1. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112; 2. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092;
3. 日本东北工业大学建筑系, 日本 仙台 982-8577)

摘要: 为研究消能减震建筑结构中阻尼器的附加阻尼和刚度贡献, 建议一种基于贝叶斯统计推断的模态参数识别方法, 可用于定量估计阻尼器对结构模态参数的影响, 包括阻尼比、频率和振型, 以及参数的估计不确定性。为精确建立模态参数与质量和刚度矩阵的函数关系, 采用直接模型修正技术进行模型参数化建模, 利用模态参数以解析方式重构结构质量、刚度和阻尼矩阵。考虑模型误差和量测误差对模态参数估计的影响, 采用基于随机模拟的贝叶斯方法量化模态参数估计不确定性。以一栋油阻尼器钢框结构为例, 利用结构的地震动监测数据, 采用建议方法分别识别主体和整体结构的模态参数, 定量估计了油阻尼器的附加阻尼和刚度贡献, 验证了方法的有效性。

关键词: 消能减震结构; 模态参数识别; 油阻尼器; 地震动数据; 贝叶斯方法

中图分类号: TU352.1; O327 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0671-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.002

引言

消能减震技术通过在结构中增设阻尼器, 如黏滞、黏弹及摩擦阻尼器, 显著增强结构在地震作用下的耗能能力, 进而减弱结构地震响应、减小结构损伤, 是一类较成熟的结构被动控制方法。消能减震技术已经受住了实际大地震的考验, 在新建结构性能设计和既有结构加固改造等方面具有良好的应用前景, 已在土木工程领域获得了深入的理论和应用研究^[1-5]。

在消能减震结构的设计和性能评估中, 需要准确定量估计阻尼器附加给结构的阻尼和刚度, 通常以对结构模态参数的影响为量化指标, 如有效或等效阻尼比^[6-7]。针对有效阻尼比估计问题, 诸多文献提出了不同的近似估计方法^[8-12], 但均需引入简化分析假设, 如应变能方法需假设结构和阻尼器处于简谐运动状态, 且上述方法通常需要借助于结构有限元模型或其模态参数, 计算结果为确定性且唯一。

在工程实践中, 由于结构的复杂性和施工误差的不确定性, 消能减震结构的设计和性能评估是依据可靠度理论展开的^[6-7], 设计和评估结果通常偏于保守, 且存在很强的不确定性。对于实际消能减震结构, 依据结构设计详细(图纸)建立的初始有限元

模型通常存在不可忽略的模型误差。这一误差来源于多方面, 如材料参数、几何尺寸及边界条件的不确定性, 以及建模简化假设的引入。这些误差导致初始有限元模型不能准确代表结构实体^[13-14], 造成不准确的结构和阻尼器响应预测, 影响实际消能减震结构性能评估的准确性。

本文研究了一栋油阻尼器建筑结构的附加阻尼和刚度评估问题, 采用贝叶斯概率推断方法定量估计油阻尼器对结构模态参数的影响, 包括频率、阻尼比和振型, 以及由模型误差和量测误差导致的参数估计不确定性。首先, 详细介绍模型参数识别的贝叶斯概率推断方法^[15-17], 引入一种基于随机模拟的参数后验概率分布估计方法, 量化参数的估计不确定性。其次, 引入直接模型修正技术^[13, 18]建立模态参数与结构质量、刚度和阻尼矩阵的函数关系, 解决基于贝叶斯概率的模型参数化建模关键问题。最后, 以一组地震动监测数据为例, 采用建议方法量化估计油阻尼器对结构模态参数的影响, 验证模态参数估计的准确性和方法的有效性。

1 基于贝叶斯推断的模型参数识别

不失一般性, 假设消能减震结构的主体结构为线弹性, 在地震激励作用下其运动控制方程可描述为

$$M(\theta)\ddot{x} + C(\theta)\dot{x} + K(\theta)x + f_D(\theta, x, \dot{x}) = M(\theta)\ddot{x}_g \quad (1)$$

式中 $M(\theta) \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $K(\theta) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $C(\theta) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别为主体结构的质量、刚度和阻尼矩阵, n 为自由度个数; $\theta \in \Theta \in \mathbf{R}^m$ 为待识别的模型参数向量, 文中取低阶模态参数, 包括频率、阻尼比和振型, m 为待识别模态参数的数量; $f_D(\theta, x, \dot{x}) \in \mathbf{R}^n$ 为与阻尼器阻尼力相关的恢复力向量, 通常与结构位移 $x \in \mathbf{R}^n$ 和速度 $\dot{x} \in \mathbf{R}^n$ 相关连; $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^n$ 为单位列向量, $\ddot{x}_g \in \mathbf{R}$ 为模型激励, 文中取结构底层加速度量测数据。

1.1 贝叶斯概率推断

获取了结构的实际监测数据 D , 如结构的地震加速度数据, 可利用贝叶斯统计推断方法修正结构初始模型, 即推断未知的模型参数, 这一推断过程可由经典的贝叶斯定理表达

$$p(\theta|D) = c^{-1} p(\theta) p(D|\theta) \quad (2)$$

式中 $p(\theta)$ 为参数的先验概率分布, 通常依据参数的初始设计信息确定; $p(\theta|D)$ 称为后验概率分布, 描述了参数的估计不确定性; c 为后验概率分布的归一化常数, 也称为模型证据值; $p(D|\theta)$ 为似然函数, 描述了参数取值的概率值。

似然函数在刻画后验概率分布中占据核心位置, 常由误差模型决定。误差模型描述结构响应的模型预测值与实际量测值之间的差异, 在工程实践中, 这一差异实质由模型自身的预测误差和量测噪声两部分组成。基于最大熵原理, 利用无偏估计及有限方差约束, 最优误差模型为均值为零的高斯白噪声^[14-16]。具体地, 假定 Q 和 $\hat{Q}(\theta)$ 分别为模型预测响应和实际量测响应, 模型误差 e 为

$$e = \hat{Q} - Q(\theta) \quad (3)$$

式中 $e \sim N(0, \Sigma)$, Σ 为未知协方差矩阵, 可并入模型参数向量 θ 更新。基于上述误差模型假设, 似然函数可进一步表达为

$$p(D|\theta) = \frac{|\Sigma|^{-n_d/2}}{(2\pi)^{n_d n_c/2}} \exp\left(-\frac{J(\theta)}{2}\right) \quad (4)$$

式中 n_c 为数据通道数, n_d 为同一通道数据数量, $J(\theta)$ 为拟合度指标, 具体表达为

$$J(\theta) = [\hat{Q} - Q(\theta)]^T \Sigma^{-1} [\hat{Q} - Q(\theta)] \quad (5)$$

对于时域模型修正问题, 即模型预测需求动力时程分析, 参数后验概率分布不可解析, 仅能利用数值方法近似估计, 如 Laplace 方法^[15] 和马尔可夫蒙特卡洛方法 (MCMC)。Laplace 方法假设后验概率分布为高斯分布, 需要利用优化算法搜寻参数的最大后验估计值, 不适用于复杂后验概率分布。MCMC 则是一类一般性的随机模拟方法, 无需分

布假设, 可生成渐进服从后验概率分布的随机样本, 在实际的工程应用中获得广泛关注和研究。本文选取渐变马尔科夫蒙特卡洛算法 (TMCMC)^[17] 估计参数的后验概率分布, 该算法是一种改进的 MC-MC, 适用于复杂后验概率分布的抽样问题, 如分布呈尖峰、多峰和流形等形态, 且抽样效率高、具备并行运算等优势。

1.2 渐变马尔科夫蒙特卡洛

TMCMC 实质是一种序列蒙特卡洛算法, 针对复杂后验概率分布抽样困难的问题, 该方法利用模拟退火构造了一个渐变概率分布序列

$$p_i(\theta) \propto p(D|\theta)^{\alpha_i} p(\theta), \quad i = 0, \dots, n_a \quad (6)$$

式中 α_i 为退火系数, $0 = \alpha_0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_{n_a} = 1$ 。 α_i 由 0 逐步增大到 1, 该渐变概率分布由先验概率分布逐步过渡到后验概率分布。基于渐变概率分布序列, TMCMC 引入序列抽样方式, 从简单易抽样的先验概率分布开始, 结合重采样技术和逐步修正随机样本, 生成渐变概率分布和目标后验概率分布的随机样本。

具体抽样步骤如下:

(1) 先验概率分布随机抽样, 获得样本 $\{\theta_{0,k}, k = 1, \dots, N\}$, 其中, N 为样本数量, 本文通过考察样本数量对参数估计的影响, 依据估计结果确定 N 的取值。

(2) 依据下式确定第 $i+1$ 个渐变概率分布的退火系数 $\alpha_{i+1}, i = 0, \dots, n_a - 1$

$$\alpha_{i+1} = \arg \min_{\alpha_{i+1} \in (\alpha_i, 1]} [|\text{cov}(\omega(\theta_{i,k})) - 100\%|] \quad (7)$$

式中 cov 为变异系数, $\omega(\theta_{i,k}) = p(D|\theta)^{\alpha_{i+1} - \alpha_i}$ 为样本的权重系数。

(3) 利用重选样技术, 生成第 $i+1$ 个渐变概率分布的初始样本, 即

$$\tilde{\theta}_{i+1,k} = \theta_{i,l}, \text{ w.p. } \bar{\omega}(\theta_{i,l}) = \frac{\omega(\theta_{i,l})}{\sum_{l=1}^N \omega(\theta_{i,l})} \quad (8)$$

式中 w.p. 代表以权重进行重选样

(4) 采用 Metropolis-Hasting 算法^[17] 修正式 (8) 生成的初始样本, 获得新随机样本 $\{\theta_{i+1,k}, k = 1, \dots, N\}$ 。取 $\tilde{\theta}_{i+1,k}$ 为马尔科夫链的初始值, 取高斯分布为建议分布, 均值取当前马尔科夫链值, 协方差矩阵定义为

$$\Sigma_i = \beta^2 \sum_{k=1}^N \bar{\omega}(\theta_{i,k}) \{\theta_{i,k} - \bar{\theta}_i\} \{\theta_{i,k} - \bar{\theta}_i\}^T \quad (9)$$

式中 $\bar{\theta}_i = \sum_{l=1}^N \bar{\omega}(\theta_{i,l}) \theta_{i,l}$, β 为缩尺参数, 取 0.5^[17]。

(5) 重复步骤 (2) 到 (4), 直至获取目标后验概率

分布的随机样本为止。

2 基于模态参数的模型参数化建模

考虑到以模态参数为待识别量,借助经典的直接模型修正技术实现模型参数化建模,即,确定 $M(\theta)$, $K(\theta)$ 和 $C(\theta)$ 与模态参数的具体函数关系。首先,采用 Berman-Nagy 方法^[18] 重构质量和刚度矩阵,该方法依据给定的目标模态参数,包括频率和振型,利用约束最小化原理,给出的最优质量矩阵和刚度矩阵的表达式为:

$$M(\theta) = M_a + M_a \Phi m_a^{-1} (I_q - m_a) m_a^{-1} \Phi^T M_a \quad (10)$$

$$K(\theta) = K_a + K_\Delta + K_\Delta^T \quad (11)$$

式中 $M_a \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $K_a \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 常取结构初始有限元模型的质量和刚度矩阵; $I_q \in \mathbb{R}^{q \times q}$ 为对角单位矩阵; $m_a = \Phi^T M_a \Phi \in \mathbb{R}^{q \times q}$; $K_\Delta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为刚度摄动矩阵,具体表达式为

$$K_\Delta = \frac{1}{2} M \Phi (\Phi^T K_a \Phi + \Omega) \Phi^T M - K_a \Phi \Phi^T M \quad (12)$$

式中 $\Omega = \text{diag} \{ \omega_1, \dots, \omega_q \} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ 为待识别目标频率矩阵, q 为模态数量; $\Phi = [\phi_1 \dots \phi_q] \in \mathbb{R}^{n \times q}$ 为待识别目标振型矩阵。值得指出的是,式(10)质量矩阵和式(11)刚度矩阵可精确匹配目标频率 Ω 和振型 Φ , 即与质量和刚度矩阵对应的模态参数与目标模态参数相同^[13,18]。

与质量和刚度矩阵不同,阻尼矩阵通常不具备明确的物理意义,较难准确定义和估计。假定结构阻尼为经典的模态阻尼模型,在获取质量和刚度矩阵的基础上,阻尼矩阵采用下式进行参数化

$$C(\theta) = M(\theta) \left(\sum_{i=1}^q 2\omega_i \zeta_i \phi_i \phi_i^T + \sum_{j=q+1}^n 2\omega_j \zeta_j \phi_j \phi_j^T \right) M(\theta) \quad (13)$$

式中 ζ_i 为待识别目标阻尼比; ω_j 和 ζ_j 分别为其他高阶频率和阻尼比。

3 实际消能减震结构应用研究

研究对象为一栋油阻尼器钢框架建筑结构,如图1所示。该建筑位于日本宫城县仙台市东北工业大学校园内,长48 m,宽9.6 m,高34.2 m,地下1层为钢筋混凝土结构,地上8层为混凝土预制楼板钢框架结构,其中,结构第1层和第2层合并为一公共空间,文中称为第1层。为提高结构的抗震性能,沿结构楼层及长短边方向均匀布置了共计56组油阻尼器,图2

为油阻尼器在结构中的布置图,阻尼器固定在楼板上,通过V型支撑与临近楼板连接,如图3所示。



图1 一栋油阻尼器钢框架建筑结构

Fig. 1 A steel-framed building structure with oil dampers

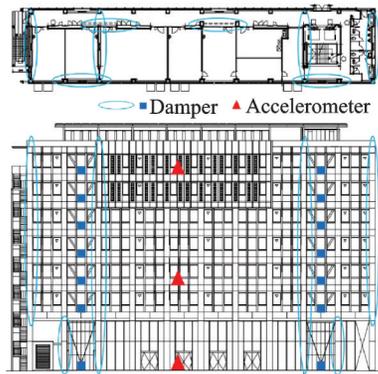


图2 油阻尼器及加速度计布置

Fig. 2 Distribution of oil dampers and accelerators



图3 油阻尼器支撑系统

Fig. 3 The oil damper brace system

为研究结构和油阻尼器在地震中的实际工作性能,结构中装配了健康监测系统:(a)在结构第1,4,8层中布置了双向加速度计,如图2所示,采集监测楼层沿结构长边和短边方向的地震加速度响应数据;(b)在结构第1层和第8层中沿结构长边和短边方向,选取了共4组油阻尼器,安装了力和位移传感器,采集油阻尼器的力和位移响应数据。图4给出了1组实测的楼层加速度响应数据(结构长边方向)及其傅里叶幅值谱。该组数据采集于2005年8月16日发生的一次矩震级为7.2级的大地震,以该组地震数据为例,采用建议方法量化研究油阻尼器

对结构模态参数的影响,验证该方法的有效性。

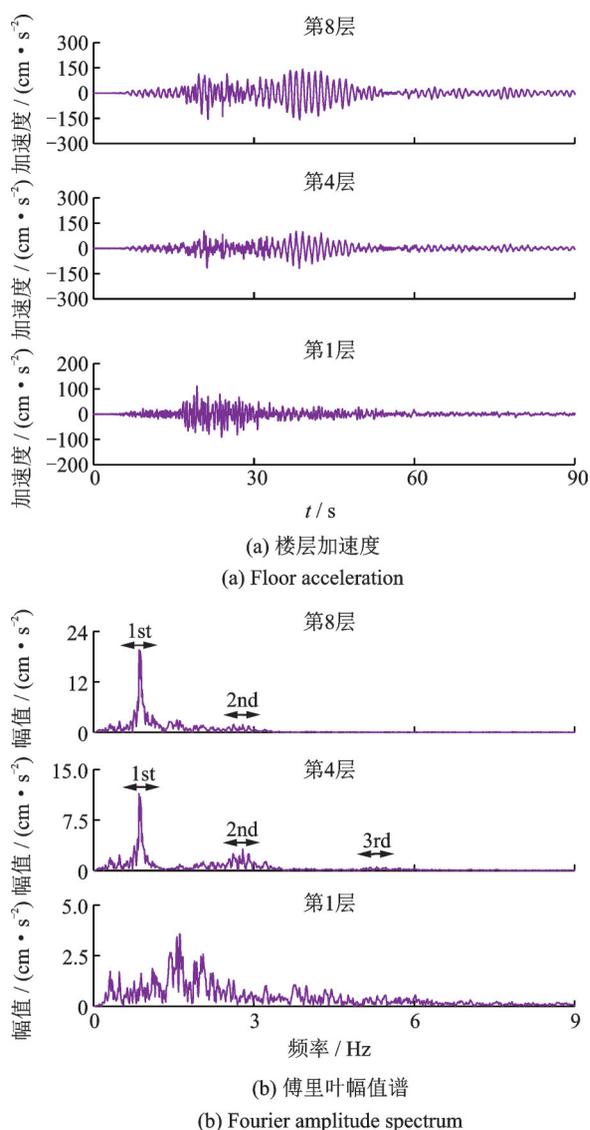


图4 楼层加速度数据及其傅里叶幅值谱

Fig. 4 Acceleration measurements of monitored floors and Fourier amplitude spectrum

图5为利用SAP2000结构分析软件建立的结构初始有限元模型^[19],该模型的材料和构件参数严格依照结构设计图纸和日本钢结构设计规范^[20]创建完成。采用框架单元模拟梁、柱及阻尼器钢支撑,连接方式为刚接,采用壳单元模拟混凝土预制楼板,单元

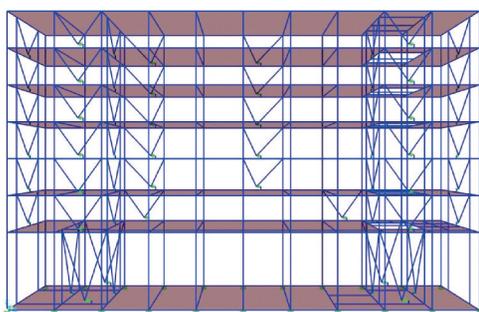


图5 结构初始有限元模型

Fig. 5 Initial finite element model of the structure

的几何尺寸取设计值,材料参数取设计值。

考虑到识别对象为结构系统层次模态参数,且结构量测数据仅包含楼层的平动响应信息,首先,将初始有限元处理为平面框架模型,即保留模型的平动模态;其次,引入结构动力学中对建筑类型结构的常用简化分析设定^[21-22]:不考虑模型竖向变形,保留节点的同平面转动和平动自由度。简化后的有限元模型仅包含7个自由度(对应结构楼板总数),准确保留了原模型的主要低阶模态信息,例如,原有限元模型前3阶频率(长边方向)分别为:0.862,2.506和4.565 Hz,而简化模型前3阶频率为:0.864,2.504和4.569 Hz。简化模型自由度个数较少、计算高效,便于利用贝叶斯方法识别结构模态参数。

值得指出的是,建议模型修正方法可精确匹配目标模态参数,且不受初始有限元模型的自身模型误差的影响^[13-18]。为说明该修正方法的这一特性,分别取简化模型和结构的“剪切型”模型为待修正模型,后者可从原有限元模型中简化获得,剪切型模型的前3阶频率为:1.258,4.23和7.680 Hz。取目标频率为原有限元模型前3阶频率,目标振型取简化模型的前3阶振型,采用式(10)和(11)修正简化模型和剪切模型的质量和刚度矩阵。修正简化模型的前3阶频率计算结果为:0.862,2.506和4.565 Hz;修正剪切型模型计算结果为:0.862,2.506和4.565 Hz。修正模型具有相同的频率,验证了建议模型修正方法精确匹配目标模态参数的特性。

取楼层加速度监测数据用于结构模态参数识别,取第1层底部加速度数据为模型激励,第4层和第8层加速度数据为目标拟合数据,假定模型的初始状态为静止。考察结构在强震阶段的动力学行为,截取15-50 s的加速度输出数据(重采样率为40 Hz)用于结构模态参数识别。

由图4(b)加速度傅里叶幅值谱可以看出:结构前两阶模态响应占据主导,第3阶模态响应较弱,其他高阶模态不明显,故取结构的前3阶模态参数为识别对象。考虑到结构楼层监测数据的不完整,待识别参数设定为:频率、阻尼比及振型参数比,其中,振型参数比与监测楼层(第8层与第4层楼板)相对应。假设模态参数的先验概率分布相互独立、均服从均匀分布^[15-17],并依据初始有限元模型的模态信息,确定参数分布的上下界,表1给出了模态参数的先验概率分布。此外,假设模型误差 e 相互独立^[15-17],其方差参数也服从均匀分布,即 $\sigma_{acc,i}^2 \sim U[0, \tilde{\sigma}_{acc,i}^2]$, $i=2,6$,其中, $\tilde{\sigma}_{acc,i}^2$ 为加速度数据(15-50 s)的方差值。

考虑到结构质量和刚度矩阵的重构需要完整的

表 1 模态参数的先验概率分布

Tab. 1 Prior probability distribution of modal parameters

阶次	$\omega_i/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	ζ_i	$\phi_{i,6}/\phi_{i,2}$
第 1 阶	$[0.5\ 1]\times 2\pi$	$[0\ 0.1]$	$[1\ 2]$
第 2 阶	$[2\ 3]\times 2\pi$	$[0\ 0.1]$	$[-3\ 0]$
第 3 阶	$[4\ 6]\times 2\pi$	$[0\ 0.2]$	$[-3\ 3]$

低阶振型,利用振型比参数($\phi_{i,6}/\phi_{i,2}$)和振型扩阶技术获取完整振型,即获取未监测楼层的振型,计算过程如下:首先,利用 $\phi_{i,6}/\phi_{i,2}$ 获取量测振型 $\phi_{i,r}$,即采用下式进行标准化

$$\phi_{i,r} = \frac{\phi_{a,i}^T \phi_{i,r}^0}{(\phi_{i,r}^0)^T \phi_{i,r}^0} \phi_{i,r}^0 \quad (14)$$

式中 $\phi_{i,r}^0 = [1, \phi_{i,6}/\phi_{i,2}]$; $\phi_{a,i}$ 为初始有限元模型的质量标准化振型,与量测振型对应。值得指出的是,式(14)标准化过程实质假定初始有限元模型能够近似代表真实结构,则有限元模型振型与结构真实振型相近。

其次,采用振型扩阶技术获取完整振型,扩阶振型可表达为

$$\phi_i = T_e \phi_{i,r} \quad (15)$$

式中 $T_e \in \mathbb{R}^{n \times q}$ 为坐标变换矩阵,由具体扩阶技术决定,采用文献[23]建议方法,坐标变换矩阵具体表达为

$$T_e = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_q \\ -(\mathbf{K}_{i,u}^T \mathbf{K}_{i,u})^{-1} \mathbf{K}_{i,u}^T \mathbf{K}_{i,r} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{i,u} = \mathbf{K}_{a,u} - \omega_i^2 \mathbf{M}_{a,u} \\ \mathbf{K}_{i,r} = \mathbf{K}_{a,r} - \omega_i^2 \mathbf{M}_{a,r} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\mathbf{K}_{a,r}$ 和 $\mathbf{K}_{a,u}$ 分别为与量测和未量测自由度对应的子刚度矩阵, $\mathbf{M}_{a,r}$ 和 $\mathbf{M}_{a,u}$ 为对应的子质量矩阵。

基于上述对频率、阻尼比和扩阶振型的取值设定,采用式(10),(11)和(13)重构结构质量、刚度和阻尼矩阵。此外,考虑到高阶模态对结构响应可忽略,取高阶模态阻尼比均为 0.1,以经典的 Maxwell 模型模拟油阻尼器,模型参数取值为基于实际监测数据的识别值,如表 2 所示。其中,结构第 1 层油阻尼器取 Model I,其余楼层油阻尼器取 Model II。

首先,利用加速度输监测数据识别主体结构模态参数。据式(2)参数后验概率分布描述,利用 TMCMC 算法对主体模态参数进行随机抽样,量化

表 2 Maxwell 模型参数

Tab. 2 Parameters of Maxwell models

模型	$c_d/(\text{Ns}\cdot\text{mm}^{-1})$	$k_d/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
Model I	437.67	3500.70
Model II	382.88	1616.60

参数的估计不确定性。

考察样本数量 N 对模态参数识别结果的影响, N 分别选取为 200, 400, 600, 800 和 1000 共计 5 种工况,采用 TMCMC 算法对参数后验概率分布进行随机抽样。图 6 给出了模态参数均值和均值加减两倍标准差估计值随抽样数量变化的趋势,包括前三阶频率和阻尼比。由图 6 计算结果可知:前两阶频率的均值估计较稳定,第 3 阶频率的均值估计随抽样数量增加逐步收敛;阻尼比的均值估计具有相似规律,第 2 阶和第 3 阶阻尼比的标准差估计值较大。

由上述分析可知,随机抽样数量越多,模态参数估计越准确,1000 个随机抽样数量足够准确描述参数后验概率分布,这与文献[17]的研究结果一致,以下分析均取 $N=1000$ 。

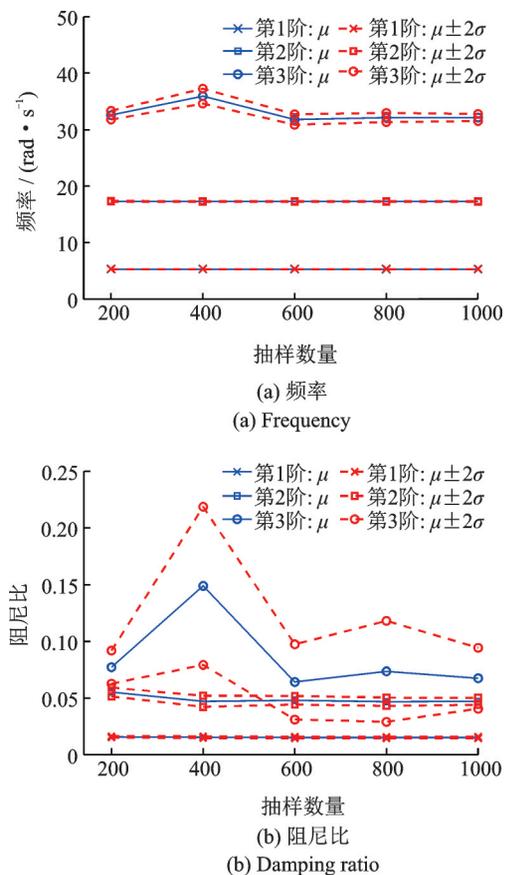


图 6 不同抽样数量计算结果对比

Fig. 6 Results comparison of different sampling numbers

图 7 给出了主体结构模态参数后验概率分布的样本分布图和统计直方图,不难发现后验概率分布近似呈单峰对称状,与高斯分布相近。表 3 给出了模态参数的均值和标准差估计值。图 8 给出了基于后验随机样本的扩阶振型与初始有限元模型的振型对比,包括其均值和均值加减两倍标准差的估计值。

由表 3 和图 8 计算结果可知:模态参数估计的标准差随着模态阶次升高而逐步增大,前两阶模态参

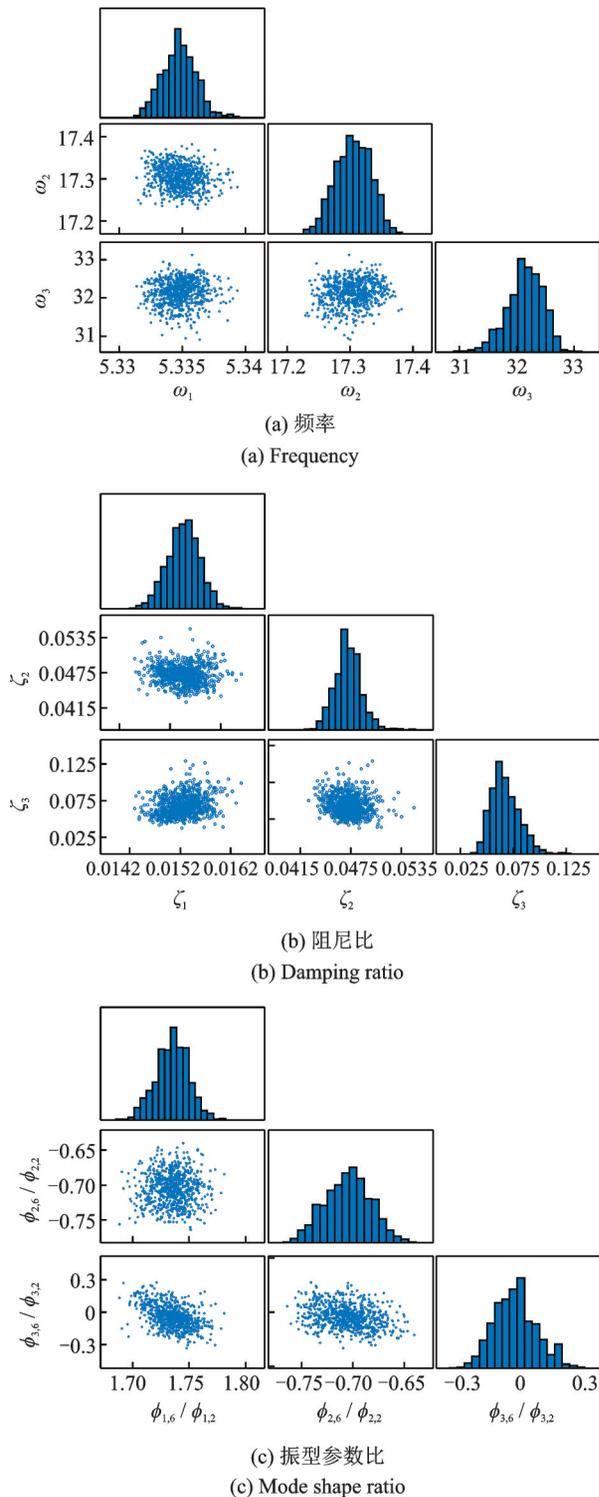


图7 主体结构模态参数后验分布的随机样本

Fig. 7 Posterior samples of modal parameters of the main structure

数的估计(识别)较为可靠,第3阶模态参数的估计存在较强不确定性,特别是阻尼比和扩阶振型。这是因为结构模态响应的信噪比随模态阶次升高而逐步增大,高信噪比造成参数识别困难。

此外,值得指出的是,模态参数估计的不确定性间接反应参数对结构响应的重要性(或结构响应对模态参数的敏感性)。具体地,对于同一阶模态参数,频率估计的不确定性较小,代表结构响应对频率

表3 主体结构模态参数的均值(标准差)估计值

Tab. 3 Mean and std of modal parameters of the main structure

阶次	$\omega_i/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	ζ_i	$\phi_{i,6}/\phi_{i,2}$
第1阶	5.334 (0.001)	0.015 (0.000)	1.734 (0.014)
第2阶	17.304 (0.027)	0.047 (0.002)	-0.704 (0.022)
第3阶	32.142 (0.315)	0.067 (0.013)	-0.044 (0.102)

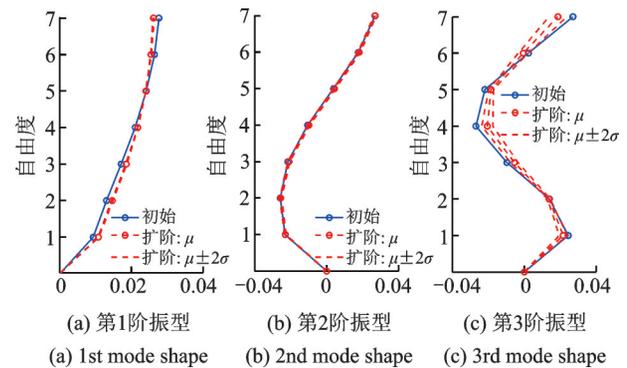


图8 初始有限元振型和修正扩阶模态振型

Fig. 8 Initial and expanded mode shapes

更为敏感:阻尼比和振型估计不确定性相对较强,意味着结构应对这些参数的变化迟钝、不敏感。

为验证建议模型修正方法的有效性,取与模态参数均值估计对应的修正模型预测结构响应。图9给出了修正模型预测的结构强震阶段响应(15-50 s),包括楼层加速度和油阻尼器阻尼力时程响应。由图9计算结果可知修正模型预测响应精确拟合实际监测数据,说明了建议模型修正方法的有效性,也表明了主体结构模态参数估计的准确性。

此外,考察振型修正的必要性,取初始有限元模型的计算振型替代扩阶振型,修正主体结构的频率和阻尼比参数,采用渐变马尔柯夫蒙特卡罗算法估计参数的后验概率分布。表4给出了频率和阻尼比的均值和标准差估计值。对比表3计算结果,频率的均值和标准差估计值相同,阻尼比均值的估计值存在显著不同,表4计算结果大于表3计算结果,说明了振型误差(如图8所示)会显著降低阻尼比估计的精度。

为量化振型误差对模型响应预测精度的影响,取标准均方差(NRMSE)为衡量指标,定义如下

$$e_N = 1 - \frac{\|\hat{z} - z\|}{\|\hat{z} - \text{mean}(\hat{z})\|} \quad (18)$$

式中 z 为模型预测响应, \hat{z} 为结构响应数据, $\|\cdot\|$ 代表向量的2范数。标准均方差接近1代表结构模型具有较高的预测精度。

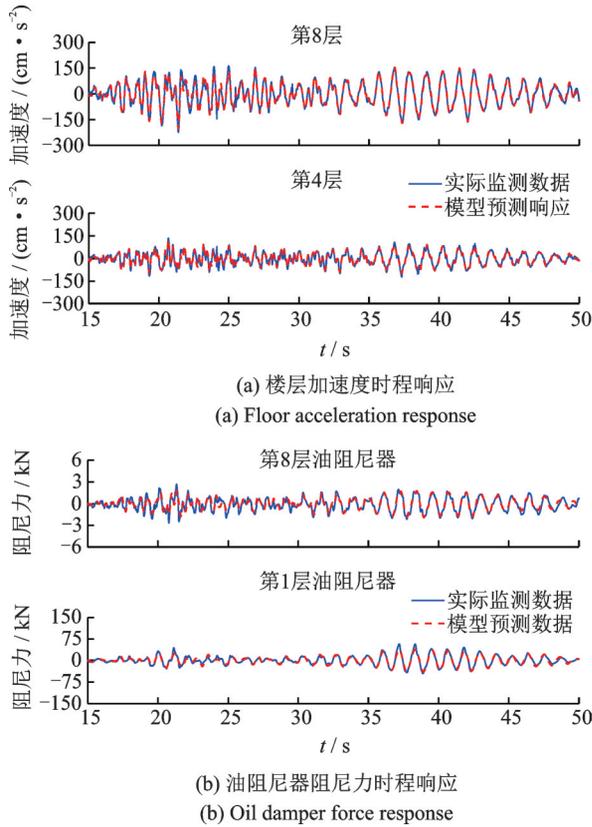


图 9 修正有限元模型预测响应和实际监测数据

Fig. 9 Measured and predicted response by the updated FE model

表 4 主体结构频率和阻尼比的均值(标准差)估计值:不考虑振型修正

Tab. 4 Mean and std of frequencies and damping ratios of the main structure: without updating mode shapes

阶次	$\omega_i/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	ζ_i
第 1 阶	5.341(0.001)	0.019(0.000)
第 2 阶	17.366(0.028)	0.062(0.002)
第 3 阶	32.274(0.315)	0.054(0.016)

表 5 给出了修正有限元模型预测的结构楼层加速度和油阻尼器阻尼力的标准均方差值。对比采用表 3 和表 4 修正有限元模型的预测精度,振型误差显著降低阻尼器阻尼力的预测精度。综上所述,初始有限元模型的振型误差显著降低阻尼比估计精度和修正模型的预测精度,有必要修正有限元模型的振型。

表 5 修正有限元模型预测响应的标准均方差

Tab. 5 NRMSEs of predicted responses by updated FE models

模型	加速度		阻尼器阻尼力	
	第 4 层	第 8 层	第 1 层	第 8 层
修正模型-表 3	74.24%	83.70%	70.41%	68.03%
修正模型-表 4	69.47%	80.03%	56.03%	31.26%

注:修正模型-表 3 代表采用表 3 参数均值修正有限元模型,修正模型-表 4 代表采用表 4 参数均值修正有限元模型。

最后,研究油阻尼器附加给结构的阻尼和刚度贡献,采用建议模型修正方法识别整体结构的模态参数,并与主体结构模态参数对比,量化阻尼器对结构模态参数的影响。结构运动控制方程式(1)将不包含与油阻尼器相关的恢复力 $f_D(\theta, x, \dot{x})$, $M(\theta)$, $K(\theta)$ 和 $C(\theta)$ 将代表整体结构的质量、刚度和阻尼矩阵。

图 10 给出了整体结构模态参数的后验概率分布随机样本,与图 7 结果类似,整体结构模态参数的后验概率分布与高斯分布相近。表 6 给出了整体结构模态参数的均值和标准差估计值。对比表 3 结果,整体和主体结构模态参数估计值不同,特别是前两阶阻尼比,表明油阻尼器对结构阻尼贡献较为显著。

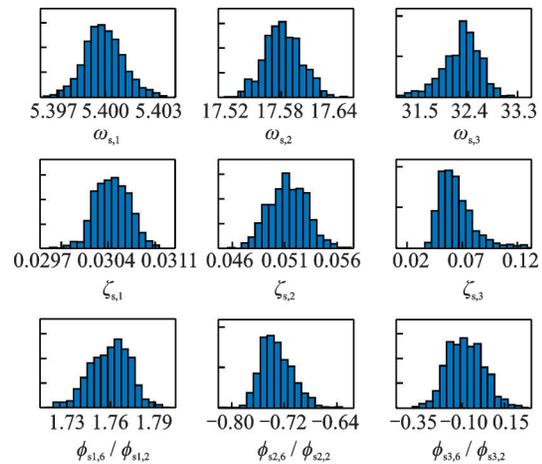


图 10 整体结构模态参数后验分布的随机样本

Fig. 10 Posterior samples of modal parameters of the whole structure

表 6 整体结构模态参数的均值(标准差)估计值

Tab. 6 Mean and std of posterior samples of modal parameters of the whole structure

模态阶次	$\omega_{s,i}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\zeta_{s,i}$	$\phi_{s,i,6}/\phi_{s,i,2}$
第 1 阶	5.400 (0.001)	0.030 (0.000)	1.759 (0.014)
第 2 阶	17.583 (0.027)	0.051 (0.002)	-0.732 (0.024)
第 3 阶	32.276 (0.334)	0.064 (0.016)	-0.078 (0.105)

注:下标 s 代表整体结构

整体和主体结构模态参数的差异体现了油阻尼器对结构阻尼和刚度的影响,借鉴规范^[6-7]对阻尼器附加有效阻尼的定义,本文将上述模态参数差异称为油阻尼器附加给结构的有效模态参数,即有效频率 $\Delta\omega_i$ 、有效阻尼比 $\Delta\zeta_i$ 和有效振型参数比 $\Delta(\phi_{i,6}/\phi_{i,2})$ 。图 11 和表 7 分别给出了有效模态参数的样本分布及均值和标准差估计值,图 11 所示随机样本由图 10 和图 7 随机样本一一一对应相减获得。由计算结果可知:前两

阶有效模态参数估计不确定性较小,估计值相对可靠,而第3阶有效模态参数的估计不确定性较强,估计(识别)值不可靠;有效频率和有效振型参数比相对较小,且其均值估计逐步趋近于零;第1阶有效阻尼比估计值接近主体结构自身阻尼比估计值,其他阶有效阻尼比估计值迅速减小,均值估计接近零,这一衰减趋势与文献[8]研究结果相似。

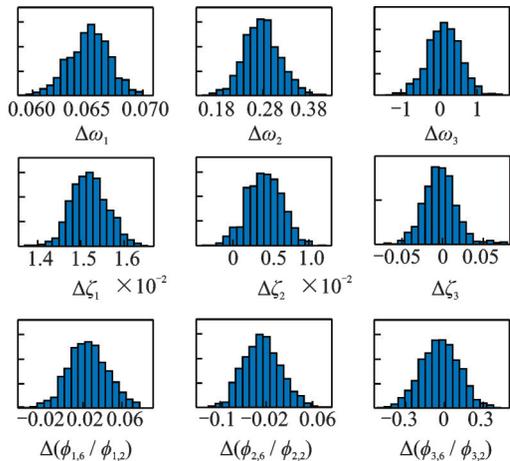


图 11 油阻尼器附加有效模态参数的估计样本

Fig. 11 Samples of estimation of effective modal parameters provided by oil dampers

表 7 有效模态参数的均值(标准差)估计

Tab. 7 Mean and std of effective modal parameters

模态阶次	$\Delta\omega_i/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta\zeta_i$	$\Delta(\phi_{i,6}/\phi_{i,2})$
第1阶	0.065(0.002)	0.015(0.000)	0.025(0.020)
第2阶	0.278(0.039)	0.004(0.002)	-0.027(0.032)
第3阶	0.134(0.445)	-0.003(0.021)	-0.034(0.147)

另外,由上述分析可知:随模态阶次升高,油阻尼器的有效模态参数贡献呈逐步减小的趋势,包括有效阻尼比、有效频率和有效振型参数比,这是因为结构的侧向刚度由高阶模态参数主导^[21,24],油阻尼器对结构的侧向刚度贡献相对较小,仅能影响结构低阶模态信息,并随模态阶次的升高,这种影响逐步减弱。

4 结 论

为研究消能减震建筑结构中阻尼器的阻尼和刚度贡献,文中提出了一种基于贝叶斯统计推断的模态参数识别方法,可用于量化研究阻尼器对结构模态参数的影响。以一实际油阻尼器钢框架结构为研究案例,采用建议方法量化研究了油阻尼器设备对结构模态参数的影响,验证了方法的有效性。案例研究结果表明:

1)建议方法可量化结构模态参数的不确定性,结构前两阶模态参数的估计不确定较小,估计(识

别)值较可靠,而第3阶模态参数估计值具有较强不确定性,估计值不可靠。

2)修正模型可精确预测结构的加速度响应和油阻尼器阻尼力时程响应,表明修正模型的高预测精度,也说明模态参数识别值的准确性。

3)油阻尼器对结构模态参数影响主要体现在有效阻尼比方面,对频率和振型参数比的影响较小,且随着模态阶次的升高,有效阻尼比、有效频率和有效振型比呈逐步减小趋势,估计不确定性逐步增强。前者是由于油阻尼器对结构侧向刚度贡献较小造成,后者是因为高阶模态响应的信噪比较大造成识别不准确。

值得指出的是,受结构量测数据不完备的限制,文中仅识别了结构的低阶平动模态参数,不包含扭转模态参数,采用的是简化有限元模型预测结构响应,而非三维有限元模型。在结构中密集增设传感器可显著改善结构模态参数的可识别性,进而可利用三维有限元模型分析阻尼器对扭转模态参数的影响。

参考文献:

- [1] Soong T T, Dargush G F. Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering [M]. Buffalo: State University of New York, 1997:25-169.
- [2] Symans M D, Charney A, Whittaker A S, et al. Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice and recent developments [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1):3-21.
- [3] Takewaki I. Building Control with Passive Dampers: Optimal Performance-based Design for Earthquakes [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011:249-301.
- [4] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京:地震出版社, 1997:159-206.
Zhou Fulin. Structure Vibration Control [M]. Beijing: Seismological Press, 1997:159-206.
- [5] 黄 镇, 李爱群. 新型黏滞阻尼器原理与试验研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42(6):61-65.
Huang Zhen, Li Aiqun. Experimental study on a new type of viscous damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6):61-65.
- [6] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [7] JGJ 297-2013, 建筑消能减震技术规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
JGJ 297-2013, Technical specification for seismic energy dissipation of building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [8] Ji X, Hikino T, Kasi K, et al. Damping identification of a full-scale passively controlled five-story steel building structure [J]. Earthquake Engineering and Structural

- Dynamics, 2013, 42(2):277-295.
- [9] Lee S H, Min K W, Hwang J S, et al. Evaluation of equivalent damping ratio of a structure with added dampers[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(3): 335-346.
- [10] Occhiuzzi A. Additional viscous dampers for civil structures: Analysis of design methods based on effective evaluation of modal damping ratios [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(5): 1093-1101.
- [11] 胡岫岩,任晓崧,翁大根,等.附加黏滞阻尼器结构附加等效阻尼比算法研究[J]. *力学季刊*, 2013, 34(1): 114-124.
Hu Xiuyan, Ren Xiaosong, Weng Dagen, et al. Research on calculation of equivalent damping ratio of structure with viscous dampers [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2013, 34(1): 114-124.
- [12] 吴旭,周美容,陈曦,等.黏滞阻尼器在时程分析下的附加有效阻尼比研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(4): 258-262.
Wu Xu, Zhou Meirong, Chen Xi, et al. A study on additional effective damping ratio of viscous dampers from time-history analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(4): 258-262.
- [13] Friswell M, Mottershead J E. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1995:126-157.
- [14] Yuen K V. *Bayesian Methods for Structural Dynamics and Civil Engineering* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010:161-193.
- [15] Beck J L, Katagiotis L S. Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4):455-461.
- [16] Beck J L. Bayesian system identification based on probability logic [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(7): 825-847.
- [17] 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.
- [18] Berman A, Nagy E J. Improvement of a large analytical model using test data [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(8):1168-1173.
- [19] Xie L, Cao M, Funaki N, et al. Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 Great East Japan earthquake part 1: Structural identification and damage reasoning [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2015, 14(1):181-189.
- [20] 日本建築学会.鋼構造設計規準許容応力度設計法[S]. 東京:日本建築学会,2005.
Architectural Institute of Japan. Design standard for steel building based on allowable stress concept[S]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2005.
- [21] Chopra A K. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*[M]. New Jersey: Pearson/Prentice Hall, 2007:345-729.
- [22] Cruz C, Miranda E. Evaluation of the Rayleigh damping model for buildings[J]. *Engineering Structure*, 2017, 138(1):324-360.
- [23] Alvin K. Finite element model update via Bayesian estimation and minimization of dynamic residuals[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(5):879-886.
- [24] Berman A, Flannelly W G. Theory of incomplete models of dynamic structures [J]. *AIAA Journal*, 1971, 9(8):1481-1488.

Bayesian modal parameters identification of passively controlled building structures

YANG Peng-chao¹, XUE Song-tao^{2,3}, XIE Li-yu²

(1.China Construction Eighth Engineering Division Corp. LTD., Shanghai 200112, China;

2.Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3.Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract: This study proposes a Bayesian modal identification approach for assessing the contributions of supplemental damping and stiffness provided by dampers to building structures. The proposed approach can be utilized to quantitatively estimate the effect of such contributions on modal parameters, such as damping ratios, frequencies, and mode shapes, as well as their associated estimation uncertainty. The proposed approach adopts a new probabilistic modelling strategy, in which a direct model updating technique is utilized to establish the accurate relationship between the modal parameters and mass, stiffness and damping matrices of the structure. Given certain values of modal parameters, these matrices are uniquely determined. Then, a time-domain Bayesian model updating method is utilized to identify the modal parameters and quantify their estimation uncertainty resulting from unavoidable modelling and measurement errors. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated with a real-world passively controlled building, in which the modal parameters of the structure system and of the main frame are separately identified by using its acceleration measurements during a selected large earthquake. By comparing those identification results, the modal contributions, the change between the identified modal parameters, provided by the added oil dampers are discussed.

Key words: passively controlled structures; modal parameters identification; oil damper; earthquake measurements; Bayesian inference

作者简介: 杨朋超(1988-),男,博士,工程师。电话:(021)65982390;E-mail:murphy_ypc@126.com

通讯作者: 薛松涛(1963-),男,教授,日本工程院外籍院士。电话:(021)65982390;E-mail:xue@tongji.edu.cn