# 水利水运工程学报

#### HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

#### 采用贝叶斯理论的渡槽结构有限元模型更新方法

吴西杰,张龑,尹进步,何军龄,张曜

#### A finite element model updating method for aqueduct structures based on Bayesian theory

WU Xijie, ZHANG Yan, YIN Jinbu, HE Junling, ZHANG Yao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12170/20231011001

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 基于区间型贝叶斯模型的湟水干流水质评价

Water quality evaluation in Huangshui mainstream based on interval type Bayesian model 水利水运工程学报. 2020(2): 15 https://doi.org/10.12170/20191220002

#### 基于有限元法的船舶抛锚贯入深度探讨

Discussion of penetration depth of ship anchoring based on finite element method 水利水运工程学报. 2022(3): 100 https://doi.org/10.12170/20210430001

#### 桩承式加筋路堤有限元几何建模方法及边坡效应研究

Geometrical modelling with finite element method and slope effect of geosynthetic reinforced and pile–supported embankments

水利水运工程学报. 2020(1): 84 https://doi.org/10.12170/20181206001

#### 基于XGBoost算法的堆石料南水模型参数反演及应用

NHRI model parameter inversion and application of rockfill based on XGBoost 水利水运工程学报. 2023(3): 111 https://doi.org/10.12170/20221019002

#### 涟漪算法及其在马斯京根模型参数优化中的应用

The ripple algorithm and its application in optimizing the parameters of the Muskingum model 水利水运工程学报. 2024(2): 81 https://doi.org/10.12170/20221011004

#### 基于MCMC法的混凝土坝坝体坝基变形模量随机反演

Stochastic inversion of deformation moduli of concrete dam body and foundation based on Markov chain Monte Carlo method

水利水运工程学报. 2020(2): 99 https://doi.org/10.12170/20181218001





扫码进入官网,阅读更多精彩文章

关注微信公众号, 获得更多资讯信息

No. 6 Dec. 2024

DOI:10.12170/20231011001

吴西杰, 张龑, 尹进步, 等. 采用贝叶斯理论的渡槽结构有限元模型更新方法 [J]. 水利水运工程学报, 2024(6): 148-156. (WU Xijie, ZHANG Yan, YIN Jinbu, et al. A finite element model updating method for aqueduct structures based on Bayesian theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(6): 148-156. (in Chinese))

### 采用贝叶斯理论的渡槽结构有限元模型更新方法

吴西杰1,张 龑2,尹进步1,何军龄1,张 曜1

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟 与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:渡槽在服役过程中,其结构状态受到多种因素影响会发生改变,在进行有限元分析时,建模所用参数并不是结构实时参数。因此,需要通过监测结构的动力响应来对结构的有限元模型参数进行更新,达到准确评价结构实际运行状态的目的。提出了一种基于贝叶斯理论的有限元模型更新方法,该方法以确定性模型更新结果作为不确定性更新的初始模型参数值,使用 MH 算法得到模型参数的后验分布,通过 ABAQUS 有限元模型与MATLAB 更新程序的交互访问,实现复杂结构有限元模型参数的自动更新。开展了渡槽模型试验,利用所提方法对渡槽有限元模型进行更新。结果表明,以确定性更新结果作为贝叶斯更新的参数初始值,有限元模型更新的计算效率提高了 25%,更新后的误差为 0.19%~6.42%,该更新方法能有效改善有限元模型的预测能力。

关 键 词:有限元模型;模型参数更新;贝叶斯理论; MH 算法;随机子空间法

中图分类号: TV312 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2024)06-0148-09

渡槽作为一种跨越山谷、河流等的空间薄壁输水建筑物,在农田灌溉和大型水利工程中得到了广泛应用门。然而渡槽容易受到自身结构、水流,以及风和温度等环境荷载因素影响,会出现裂缝、渗漏和疲劳损伤等问题[2-4]。中国早期修建的渡槽很多出现了不同程度的损伤[5]。对结构损伤进行识别,进而对结构的剩余寿命进行评估[6],是保障其安全运行的有效手段。结构健康监测(structural health monitoring, SHM)针对工程结构长期服役安全的需求,通过实时分析结构材料参数及其几何特征的改变,可确定当前结构的健康状况。当前利用结构健康监测数据进行结构状态评估和损伤识别有数据驱动和基于模型两类方法[7]。数据驱动方法通过研究监测数据本身的变化规律及概率分布以识别结构状态的变化模式,多基于统计学理论进行识别,识别精度对监测数据数量有较高的要求。基于模型方法本质上是结构有限元建模、模型更新、系统参数反演的过程,对理论模型精度和监测数据质量有很高的要求。而将二者结合是近年来新的研究方向,利用对监测数据的认知进行结构的有限元模型更新,建立能反映实际结构的精准有限元模型,从而实现对结构当下损伤状况更加准确的判定。

确定性模型更新方法是将环境因素、有限元建模和实际结构等许多不确定性因素考虑为确定性的误差,在结构健康监测和损伤识别领域有着广泛应用,但在工程实践中又常会存在不确定性因素。虽然许多更新方法已经可以评估某些不确定性,但根据实测数据校准不确定的结构模型参数仍至关重要。贝叶斯方法是一种常用的不确定性模型更新方法,Beck等<sup>[8]</sup> 首次将贝叶斯理论应用于不确定性模型更新领域,通过结合 MH(Metropolis-Hastings)算法,实现了对多自由度模型的不确定性分析。之后学者们对贝叶斯模型更

收稿日期: 2023-10-11

基金项目:水利青年人才发展基金资助项目(JHQB202215);中国水利水电科学研究院五大人才计划项目

(SD0145B042021); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SKL2020ZY10)

作者简介:吴西杰(1998—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事水工结构有限元模型更新研究。

E-mail: 2801571499@qq.com 通信作者: 张 龑(E-mail: zcy881120@126.com)

新方法进行了大量研究, Asadollahi 等<sup>[9]</sup> 提出了鲁棒贝叶斯推理方法, 该方法将预测误差精度边缘化, 并采 用过渡马尔可夫链蒙特卡罗算法,基于斜拉桥的长期监测数据进行有限元模型更新; Behmanesh 等[10] 提出 了一种用于结构系统不确定性量化和损伤识别的分层贝叶斯有限元模型更新方法, 该框架在有建模误差的 情况下也能准确预测更新参数的总体不确定性; Lam 等[11] 采用一种新的 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)算法来处理模型更新问题,提出的贝叶斯方法着重于计算不确定模型参数的后验概率分布函数。目 前,模型更新方法广泛应用于土木、交通等领域。对于大型土木交通结构,由于有限元模型普遍较大,涉及 的参数和网格数量多,模型更新的速度较慢,所以更关注模型更新的计算效率。水工结构的激励方式和结 构特点与桥梁等相比更为复杂,需要考虑水体和结构的相互作用,例如渡槽在运行时槽体内存在水荷载。 因此有必要开展水工结构有限元模型更新方法的研究,提高水工结构有限元模型更新的计算效率。

基于上述研究背景,本文以某灌区一座老旧矩形渡槽为研究对象,提出一种基于贝叶斯理论的水工结 构有限元模型更新方法。首先通过设计渡槽物理模型振动试验,进行结构实测动力响应分析和模态参数识 别: 然后建立渡槽有限元模型, 基于确定性更新确定模型参数初始值, 通过 MATLAB 和 ABAOUS 的交互技 术实现参数更新;最后利用确定的模型参数初始值,建立基于贝叶斯理论的不确定性更新模型,对渡槽模型 进行校准,并对比使用该方法和传统的经验确定初始值法进行更新的结果差异。

#### 有限元模型更新理论 1

有限元模型更新的本质是目标函数的优化,该目标函数通常是模型预测数据与实测数据之间的误差。 确定性模型更新方法主要有矩阵型修正法和参数型修正法[12-13]。本文所用确定性更新方法属于参数型修正 法,是以有限元计算得到的模态参数(频率和振型)与实测模态参数的残差来构造目标函数,通过最小化目 标函数的残差平方和更新有限元模型参数。参数型修正法的具体原理可参考文献[12],本文主要采用贝叶 斯更新理论。

#### 1.1 贝叶斯更新理论

经典贝叶斯定理可表示如下:

$$p(\theta|d) = \frac{p(d|\theta)p(\theta)}{p(d)} \tag{1}$$

式中:  $p(\theta|d)$ 为联合后验概率密度函数, d 为实测数据,  $\theta$ 为待更新参数;  $p(d|\theta)$ 为似然函数或条件概率, 表示给 定参数 $\theta$ 的观测值的概率;  $p(\theta)$ 为先验概率, 反映在进行测量之前对参数更新的先验判断; p(d)为边缘概率。 假设为无信息先验分布,如均匀分布,则 $p(\theta)$ 是常数项,均匀分布使参数值限定在合理范围内,使其不超出可 行物理范围。将式(1)中的常数项合并为c,得到如下公式:

$$p(\theta|d) = cp(d|\theta) \tag{2}$$

为了评估似然函数, 定义了误差函数来表示模型预测和试验识别数据特征之间的差异。根据固有频率 和振型, 误差函数 e 满足以下关系式:

$$\tilde{\Lambda}_m - \lambda_m(\theta) = e_{\lambda} \sim N(0, \sigma_{\lambda}^2) \tag{3}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\lambda}}_{m} - \lambda_{m}(\theta) = e_{\lambda_{m}} \sim N\left(0, \sigma_{\lambda_{m}}^{2}\right)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{m} - a_{m}\boldsymbol{\Phi}_{m}(\theta) = \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{\Phi}_{m}} \sim N\left(0, \Sigma_{\boldsymbol{\Phi}_{m}}\right); \quad a_{m} = \frac{\left(\tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{m}^{T}\boldsymbol{\Phi}_{m}(\theta)\right)}{\left(\boldsymbol{\Phi}_{m}^{T}\boldsymbol{\Phi}_{m}(\theta)\right)}$$

$$(4)$$

式中:  $e_{\lambda_m}$ 和 $e_{\Phi_m}$ 分别为模态 m 的固有频率和振型系数的误差函数项;  $\tilde{\lambda}_m$ 和 $\tilde{\Phi}_m$ 分别表示模态频率和振型;  $\lambda_m(\theta)$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_m(\theta)$ 为各自模型预测的对应值;  $a_m$ 为比例因子, 以确保模态振型具有可比性。

基于最大熵原理, 假设误差函数的固有频率和模态振型误差项服从均值为零的高斯分布, 具有标准偏差:

$$\sigma_{\lambda_m} = \omega_m C_{\lambda} \tilde{\lambda}_m \tag{5}$$

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{N_{\rm S}} \omega_m C_{\omega} \tag{6}$$

式中:  $\sigma$ 为标准差;  $\omega_m$ 为不同模态的权值, 可以根据测量精度确定, 本文取 1;  $C_\lambda$ 和 $C_\varphi$ 分别为频率变异系数和振型变异系数(标准差与均值之比);  $N_s$  为试验时所用的传感器数量。

误差函数分量通常假设为统计独立的高斯分布。这是一个保守的假设,基于最大熵原理将使后验概率密度函数的不确定性最大化。假设误差函数是独立的,则似然函数可写成:

$$p(\boldsymbol{d} \mid \boldsymbol{\theta}) = p(\tilde{\lambda}, \tilde{\boldsymbol{\Phi}} \mid \boldsymbol{\theta}) = \prod_{m=1}^{N_m} p(\tilde{\lambda}_m \mid \boldsymbol{\theta}, \varsigma_{\lambda_m}^2) p(\tilde{\boldsymbol{\Phi}}_m \mid \boldsymbol{\theta}, \Sigma_{\boldsymbol{\Phi}_m})$$
(7)

对似然函数 $p(d|\theta)$ 取负对数,则有:

$$J(\theta) = -\ln p(d \mid \theta)$$
  

$$p(d \mid \theta) \propto \exp(-J(\theta))$$
(8)

$$J(\theta) = \sum_{m=1}^{N_m} \frac{1}{2\sigma_{\lambda_m}^2} (\tilde{\lambda}_m - \lambda_m(\theta))^2 + \sum_{m=1}^{N_m} \frac{1}{2\sigma_{\boldsymbol{\phi}}^2} (\tilde{\boldsymbol{\phi}}_m - a_m \boldsymbol{\phi}_m(\theta))^{\mathrm{T}} (\tilde{\boldsymbol{\phi}}_m - a_m \boldsymbol{\phi}_m(\theta))$$
(9)

式中:  $N_{\rm m}$  表示数据集 d 中可用的模态数目。从式(9)不难看出,  $J(\theta)$ 的最小化等价于似然函数和后验概率密度函数的最大化。贝叶斯方法也提供了更新参数的估计不确定性以及模型证据。通过最小化 $J(\theta)$ , 可以得到最大似然函数的估计值, 这与确定性更新方法类似。

目标函数的建立是基于贝叶斯理论更新方法的关键问题之一,但是基于贝叶斯理论所构造的更新参数的目标函数涉及对复杂多维概率分布进行积分,在多数情况下,这种积分是无法计算的。Markov Chain Monte Carlo (MCMC)是一种可以通过随机抽样程序逼近复杂积分的方法,原理是建立一个与目标问题相似的概率模型,通过大量抽样获取一个平稳分布的 Markov 链,将样本统计特征值作为目标问题的近似解。Gibbs 抽样和 Metropolis Hastings (MH)抽样是产生 Markov 链的最基本方法。本文采用 MH 抽样算法,具体计算步骤如下:

- (1)初始化马尔科夫链的状态 $\theta_i = \theta_1, i = 1, 2, \dots, N, N$ 为总迭代次数。
- (2)利用当前的 $\theta_i$ ,从建议分布 $q(\theta^*,\theta_i)$ 中抽取 1 个候选样本值 $\theta^*$ 。
- (3)计算候选样本值 $\theta$ \*的接受概率:

$$\alpha(\theta_{i}, \theta^{*}) = \min \left[ 1, \frac{\pi(\theta^{*} \mid D) q(\theta_{i} \mid \theta^{*})}{\pi(\theta_{i} \mid D) q(\theta^{*} \mid \theta_{i})} \right]$$
(10)

(4)在(0,1)均匀分布随机产生 1 个u,根据下式确定 $\theta(i+1)$ :

$$\theta(i+1) = \begin{cases} \theta^*, u \le \alpha \\ \theta(i), u > \alpha \end{cases}$$
 (11)

(5)令i = i + 1, 重复步骤 $(2) \sim (4)$ , 直至产生 1 个收敛序列 $\{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n\}$ 。

在 MH 算法中,需要确定算法的终止原则,为便于操作,本文计算中设置固定的迭代次数。

#### 1.2 模型更新

有限元模型更新的具体流程如图 1 所示, 其中目标函数根据实测数据经模态参数识别后的试验模态参数与有限元模态分析计算出的计算模态参数的差值构造。

本文通过 MATLAB 和 ABAQUS 的交互访问技术,完成对有限元模型的自动更新。MATLAB 能够修改有限元分析的输入参数和访问有限元分析输出的数据库,完成必要的迭代优化,实现将更新后的参数返回有限元软件重新计算。交互访问的具体流程如图 2 所示。

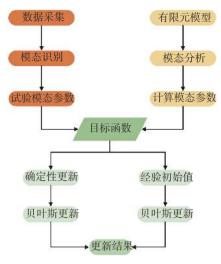


图 1 有限元模型更新流程

Fig. 1 Finite element model updating process

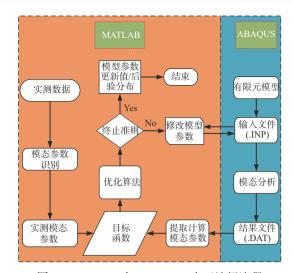


图 2 MATLAB 与 ABAQUS 交互访问流程

#### Fig. 2 Interaction process between MATLAB and ABAQUS

#### 2 渡槽物理模型试验

#### 2.1 渡槽模态试验设计

渡槽物理模型根据某矩形渡槽的结构形式进行制作,该矩形渡槽的槽身由钢丝网水泥侧壁和钢筋混凝土槽形底板组成。渡槽物理模型如图 3 所示,模型由横梁、侧壁、底板和基础等 4 个部分组成,模型比尺为1:10,满足几何相似。制作材料为有机玻璃,材料的密度 M 和弹性模量 E 分别为 1 200 kg/m³ 和 3 000 MPa, 泊松比为 0.3。测试所用仪器有电动式激振器、信号发生器、功率放大器、加速度传感器和采集仪。模态测

试时,信号发生器输出正弦激励信号,在模型侧壁和底板各布置 4个加速度传感器用来采集加速度信号。

试验时,设置信号发生器产生的信号频率为 15 Hz,采样频率为 500 Hz,采集时长为 120 s。对渡槽模型进行了多次数据采集,并对采集的实测数据进行处理分析。经 MATLAB 软件对采集的 8 通道加速度数据进行时域处理和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),限于篇幅,图 4 和图 5 显示的是对模型侧壁 1 个测点的采集数据进行处理得到的加速度时程曲线和频率结果。

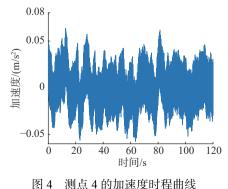


Fig. 4 Acceleration time history curve at measurement point 4

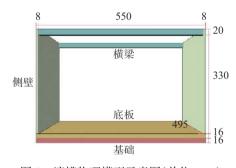


图 3 渡槽物理模型示意图(单位: mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the aqueduct physical model (unit: mm)

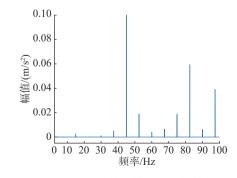


图 5 测点 4 的快速傅里叶变换结果

Fig. 5 Fast Fourier transform results at measurement point 4

#### 2.2 模态参数识别

由于 FFT 不能得到结构的振型和阻尼比,需要对采集数据进行模态识别。随机子空间法(Stochastic Subspace Identification, SSI)可以从环境激励的结构响应中获取模态参数,属于时域辨识方法。关于随机子空间识别的完整理论可以参考文献 [14-15],本文不再赘述。随机子空间可以分为数据驱动和协方差驱动两种,协方差驱动的随机子空间法(Covariance Driven Stochastic Subspace Identification, COV-SSI)通过分解结构振动响应输出数据协方差矩阵的奇异值得到系统矩阵来识别模态参数,该方法的关键是确定系统的阶次。稳定图是一种有效的确定系统阶次的方法,同时可以剔除识别的虚假模态[16]。本文用 COV-SSI 对各测点的加速度数据进行模态参数识别,得到的频率与阻尼比识别结果如表 1 所示,各阶振型的模态置信度(MAC)均接近 1。稳定图识别的模态参数结果如图 6 所示。由表 1 可知,采用 COV-SSI 法识别的模态频率与 FFT 结果一致,具有较高的识别精度。

表 1 COV-SSI 模态识别结果 Tab. 1 COV-SSI modal identification results

Tuo. 1 Co v Sol modal identification results								
阶数	频率/Hz	阻尼比/%	阶数	频率/Hz	阻尼比/%			
1	14.979	0.129	7	67.472	0.003			
2	29.991	0.060	8	74.972	0.004			
3	37.487	0.015	9	82.463	0.001			
4	44.982	0.001	10	89.965	0.005			
5	52.481	0.002	11	97.460	0.001			
6	59.976	0.005	12	104.323	0.327			

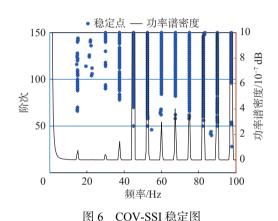


Fig. 6 COV-SSI stabilization diagram

#### 3 有限元模型更新

#### 3.1 数值计算

应用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立渡槽的有限元模型并进行模态计算。初始有限元模型取上述有机玻璃材料参数, 网格单元为线性六面体单元(C3D8R), 网格单元总数为 66 270, 网格划分见图 7, 对模型基础采用固支约束的边界条件。表 2 为有限元模态分析计算得到的前 12 阶结构固有频率。由表 1、表 2 可知, 有限元初始计算值与试验值存在一定偏差, 需要根据试验值对有限元模型进行更新。限于篇幅, 图 7 只给出前 3 阶的振型计算云图。从图 7 可以看出渡槽模型的前 3 阶位移变化主要在侧壁位置,由于传感器布置在渡槽模型的侧壁和底板处,故选择侧壁和底板振型明显变化的阶数进行更新。根据有限元计算的振型结果, 对模型槽身位置振型变化明显的 1、2、3、5、7、9、11 和 12 阶的结构频率和振型系数进行更新。

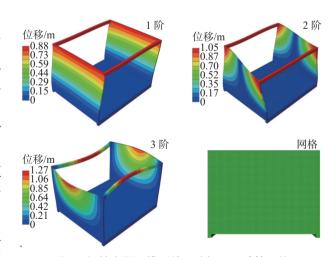


图 7 初始有限元模型前 3 阶振型和计算网格

Fig. 7 First three mode shapes and computational mesh of the initial finite element model

	element			

阶数	计算值/Hz	阶数	计算值/Hz	阶数	计算值/Hz	阶数	计算值/Hz
1	15.326	4	48.377	7	61.102	10	93.276
2	24.394	5	52.863	8	61.176	11	95.576
3	34.909	6	54.903	9	92.989	12	103.590

#### 3.2 更新参数初始值的确定

模型更新的关键环节之一,就是待更新参数的选取,如果选择更新参数过多,不仅增加了计算量,还容易出现病态解。结构的模态频率对刚度的变化非常敏感,而弹性模量是衡量材料刚度和变形能力的重要指标;调整有机玻璃材料的密度,会改变结构的动态响应和振动特性。因此,选取有机玻璃材料的弹性模量和密度作为更新参数。为便于计算,定义更新参数 $\theta=x/x_0,x$ 为更新后的参数值, $x_0$ 为初始参数值,即 $\theta=[\theta_E,\theta_M]$ ,下标 E 和 M 分别表示弹性模量和密度。更新参数 $\theta$ 的初始取值没有固定标准,取决于具体的问题、模型及所使用的算法。 $\theta$ 的取值应该根据实际情况和经验进行调整。一般先选择 1 组适当的初始值,然

后根据模型的性质、求解目标和先验知识,进行试验和优化,逐步调整更新参数,找到最佳的参数组合。通过参考相关文献和经验知识,选择更新参数初始值 $\theta_0 = [0.850,0.850]$ 。确定性更新目标函数的收敛曲线如图 8 所示,确定性更新在程序迭代 65 步时就得到最优解,更新后的 $\theta = [0.846,0.892]$ 。由图 9 可知,选取的 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11 和 12 阶模态频率在更新之后达到稳定。图 10 为 2 个更新参数的空间样本分布图,分布点集中的位置为确定性更新后的参数值。

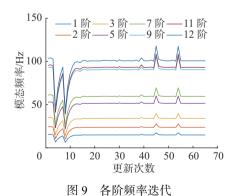


Fig. 9 Iteration of each frequency order

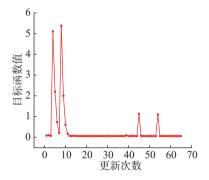


图 8 目标函数收敛曲线

Fig. 8 Objective function convergence curve

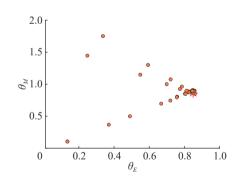


图 10 确定性更新参数的分布

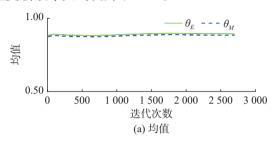
Fig. 10 Iteration of each frequency order

#### 3.3 基于贝叶斯理论的模型更新

根据确定性更新结果,即取 $\theta_0$  = [0.846,0.892]作为贝叶斯更新的初始参数值,并进一步更新迭代。更新时以标准差为 0.002 的正态分布作为 MH 抽样的建议分布。设置更新次数为 3 000,即利用 MH 算法生成 3 000 个后验概率密度函数样本。然后去除前 300 个样本作为燃烧值(burn-in),消除过渡样本的影响,并且过渡样本被排除在图表之外。更新完成后样本的接受率为 36.5%。图 11 为弹性模量和密度的样本点分布,图 12 表示更新参数 $\theta_F$ 和 $\theta_M$ 时生成样本的均值和标准差的演化过程。由于剔除了前 300 个样本,样本的均

值在横轴原点位置已收敛,标准差则从 1 200 步后开始收敛,标准差接近于零,表明更新后的模型与实测结构匹配度较高。

若不采用确定性更新的结果作为初始值,依据经验取θ=[0.850,0.850],同样利用 MH抽样生成3000个样本,更新完成后的样本接受率为35.4%,得到的更新结果如图13和图14所示。通过比较确定性结果作为初始值与以经验值作为初始值的更新结果发现,前者在更新迭代到1200步时标准差已经稳定收敛,而后者的标准差则在2000步之后才开始收敛,模型更新效率大约提升了25%。



0.90 0.90 ★ 0.86 0.84 0.86 0.88 0.90 0.92

图 11 MH 样本点分布(确定性结果作为初始值)

Fig. 11 Distribution of MH sample points (deterministic results as initial values)

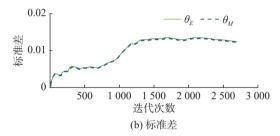


图 12 更新参数的均值和标准差迭代过程(确定性结果作为初始值)

Fig. 12 Iteration process of the mean and standard deviation of updating parameters (deterministic results as initial values)

以确定性结果作为初始值进行更新后,渡槽模型结构的弹性模量和密度分别为 2 681.4 MPa 和 1 060.4 kg/m³;而以经验值作为初始值进行更新后的弹性模量和密度分别为 2 628 MPa 和 1 040.8 kg/m³。将两种更新方法得到的结构参数结果输入 ABAQUS软件进行模态计算,得到结构各阶频率的计算结果如表 3 所示。有限元模型更新后,以确定性更新结果作为贝叶斯更新的参数初始值和选择经验值作为初始值,在样本足够多的情况下,两者的更新结果相差不大,除第二阶之外,更新后的各阶频率误差为0.19%~6.42%。第二阶频率误差很大,可能是由于数据采集或考建模的原因。有限元结果与实测频率本身。

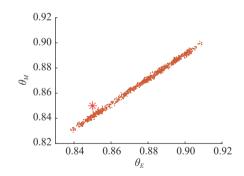
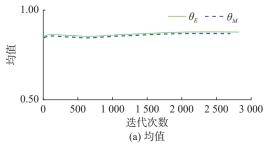


图 13 MH 样本点分布(经验值作为初始值)

Fig. 13 Distribution of MH sample points (empirical values as initial values)

据采集或者建模的原因,有限元结果与实测频率本身的差别较大。



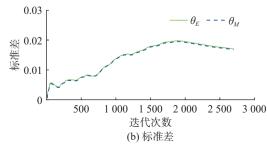


图 14 更新参数的均值和标准差迭代过程(经验值作为初始值)

Fig. 14 Iteration process of the mean and standard deviation of updating parameters (empirical values as initial values)

#### 表 3 有限元模型更新结果

Tab 3	Finite element model updating results
1 au. 5	I mite cicinent model updating results

 阶数	实测频率/	有限元结果/	确定性结果作为	经验初始值	更新前	确定性结果作为	经验初始值
門奴	Hz	Hz	初始值结果/Hz	更新结果/Hz	误差/%	初始值误差/%	更新误差/%
1	14.96	15.30	15.40	15.40	2.27	2.95	2.97
2	29.96	24.30	24.52	24.52	18.89	18.17	18.16
3	37.49	34.90	35.08	35.09	6.91	6.42	6.41
5	52.48	52.86	53.13	53.13	0.73	1.23	1.24
7	59.98	61.10	61.41	61.41	1.88	2.38	2.39
9	89.96	92.99	93.45	93.46	3.36	3.87	3.89
11	97.46	95.58	96.05	96.06	1.93	1.45	1.44
12	104.32	103.59	104.10	104.12	0.70	0.21	0.19

注: 误差=(计算频率-实测频率)/实测频率

尽管本文建立的是渡槽物理模型的有限元模型,结构比较简单,但生成3000个样本并成功完成更新所用时间长达70h。若是选择更为复杂的原型结构进行更新,计算时间会更长;加之样本数量的选择需要根据经验逐步尝试,很难在短时间内完成模型更新。而采用确定性更新结果作为更新初始值,可以提高计算效率,减少有限元模型更新所用时间。

#### 4 结 语

通过结合渡槽物理模型的振动测试结果和有限元预测结果,基于贝叶斯理论提出了一种不确定性有限元模型更新方法,采用 MH 算法优化目标函数,通过 MATLAB 与 ABAQUS 交互访问实现对渡槽有限元模型参数的自动更新,结果表明:相比于根据经验设置更新参数的初始值,以确定性更新结果作为贝叶斯更新参数的初始值,有限元模型更新的计算效率更高;利用协方差驱动的随机子空间法识别的结构模态参数具有较高的识别精度,识别结果可以作为进行有限模型更新的参考数据;在对复杂的大型水工结构进行有限元模型更新时,采用以确定性更新的结果作为不确定性更新的参数初始值进行更新的方法,可以提高计算效率。更新后的有限元模型可以作为渡槽损伤识别的基准有限元模型,为开展环境激励下的结构整体安全评价与损伤精确识别研究提供支持。

本文进行有限元模型更新的对象为一个与渡槽槽身结构相似的简化有机玻璃模型,虽然通过试验数据验证了所使用的有限元模型更新方法可以提高更新效率,但是在将其应用于原型渡槽的建模参数更新时,还需进行更深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] WANG L Z N, SU C. Design optimization of concrete aqueduct structure considering temperature effects[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(Pt.41): 6679047.
- [2] ZHANG C Y, XU J G, QIAN Y L, et al. Seismic reliability analysis of random parameter aqueduct structure under random earthquake [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153: 107083.
- [3] 张建伟, 张天恒, 华薇薇. 渡槽结构运行状态监测技术研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 1-7. (ZHANG Jianwei, ZHANG Tianheng, HUA Weiwei. Research progress of aqueduct structure operation monitoring technology[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(4): 1-7. (in Chinese))
- [4] 尚洪彬, 李宗利, 李泽前, 等. 大温差作用下矩形渡槽横截面温度梯度分析 [J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 84-92. (SHANG Hongbin, LI Zongli, LI Zeqian, et al. Temperature gradient analysis of rectangular aqueduct transverse section under the effect of large temperature difference [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 84-92. (in Chinese))
- [5] 黄君宝,邓成发. 基于三维激光扫描的老旧渡槽结构性能安全评估[J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 142-145. (HUANG Junbao, DENG Chengfa. Safety assessment of old aqueduct structure performance based on three-dimensional laser scanning[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 142-145. (in Chinese))
- [6] EBRAHIMIAN H, ASTROZA R, CONTE J P, et al. Nonlinear finite element model updating for damage identification of civil

- structures using batch Bayesian estimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 84: 194-222.
- [7] 黄民水, 罗金, 雷勇志. 基于改进 MH 算法的结构损伤识别[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(8): 136-141. (HUANG Minshui, LUO Jin, LEI Yongzhi. Damage identification based on improved MH algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 136-141. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] ASADOLLAHI P, HUANG Y, LI J. Bayesian finite element model updating and assessment of cable-stayed bridges using wireless sensor data [J]. Sensors, 2018, 18(9): 3057.
- [10] BEHMANESH I, MOAVENI B, LOMBAERT G, et al. Hierarchical Bayesian model updating for structural identification [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 64: 360-376.
- [11] LAM H F, YANG J H, AU S K. Markov chain Monte Carlo-based Bayesian method for structural model updating and damage detection [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(4): e2140.
- [12] SONG M M, YOUSEFIANMOGHADAM S, MOHAMMADI M E, et al. An application of finite element model updating for damage assessment of a two-story reinforced concrete building and comparison with lidar[J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(5): 1129-1150.
- [13] 刘佩, 朱海鑫, 连鹏宇, 等. 基于环境振动和贝叶斯定理的有限元模型自动修正方法及应用[J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2019, 47(7): 49-57. (LIU Pei, ZHU Haixin, LIAN Pengyu, et al. Automatic updating method of finite element model and its application based on ambient vibration and Bayesian theorem[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 49-57. (in Chinese))
- [14] 王燕, 杭晓晨, 姜东, 等. 协方差驱动随机子空间的 Toeplitz 矩阵行数选择方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 71-75, 92. (WANG Yan, HANG Xiaochen, JIANG Dong, et al. Selection method of Toeplitz matrix row number based on covariance driven stochastic subspace identification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 71-75, 92. (in Chinese))
- [15] LI S, WANG J T, JIN A Y, et al. Parametric analysis of SSI algorithm in modal identification of high arch dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105929.
- [16] FENG W H, WU C Y, FU J Y, et al. Automatic modal identification via eigensystem realization algorithm with improved stabilization diagram technique [J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116449.

## A finite element model updating method for aqueduct structures based on Bayesian theory

WU Xijie<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, YIN Jinbu<sup>1</sup>, HE Junling<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The structural condition of aqueducts changes over time due to various influencing factors. Consequently, parameters used in finite element analysis may not reflect the real-time state of the structure. Therefore, it is necessary to update the finite element model parameters by monitoring the dynamic response of the structure to accurately assess its operational state. This paper proposes a finite element model updating method based on Bayesian theory. The method uses deterministic model updating results as the initial parameters for the uncertain model update. The posterior distribution of model parameters is obtained using the Metropolis-Hastings (MH) algorithm. By integrating ABAQUS finite element models with MATLAB updating programs, automatic parameter updating for complex structural finite element models is achieved. An aqueduct model test was conducted to validate this method. Results indicate that using deterministic updating results as initial parameters for Bayesian updating improves computational efficiency by 25%, with an updated error range of 0.19% to 6.42%. This updating method effectively enhances the predictive capability of finite element models.

**Key words:** finite element model; model parameter updating; Bayesian theory; MH algorithm; stochastic subspace identification method