

结构动力模型的改进直接修正方法及工程应用

杨朋超¹, 薛松涛^{1,2}, 谢丽宇¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 东北工业大学 建筑系, 宫城仙台 982-8577)

摘要: 直接模型修正方法是一类经典的解析动力模型修正技术, 该方法具有计算高效和精确匹配目标模态参数等优点, 但仅考虑与频率和振型相关的约束, 导致修正模型预测的模态参与因子与实际识别值存在差异。针对该模态参数匹配不完备问题, 提出了一种改进的直接模型修正方法。改进方法考虑模态参与因子在质量矩阵中的修正, 采用约束最小化技术, 推导了质量矩阵的最优解, 并结合已有的刚度矩阵修正技术实现结构模型修正。以一栋实际消能减震建筑结构为应用对象, 利用结构地震监测数据估计的模态参数, 采用改进方法修正结构初始有限元模型, 验证了改进修正方法的准确性。

关键词: 模型修正; 约束最小化; 模态参与因子; 消能减震结构; 地震监测数据

中图分类号: TU311 **文献标志码:** A

An improved direct method for dynamic model updating and its practical engineering applications

YANG Pengchao¹, XUE Songtao^{1,2}, XIE Liyu¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

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

Abstract: The classical direct updating methods are analytical-type techniques for dynamic model updating of structures. These methods have a computationally efficient feature of requiring no iteration computations, and the resulting model can accurately predict the target modal parameters. However, under updating constraints related only with natural frequencies and mode shapes, the predicted modal participation factors of the classical methods, a byproduct, usually deviate from the identified values. To resolve such incomplete-matching problem, an improved direct model updating method was proposed. This improved method takes the modal participation factors into consideration in the mass matrix updating, and adopts the constrained minimization theory for deriving the optimal solution for the mass matrix. In addition, the proposed method was combined with the existing techniques for the stiffness matrix updating to achieve the ultimate goal of model updating for structures. The validation of the proposed method was verified in the finite element (FE) model updating of a real-world passively controlled building, using its estimated modal parameters from a set of earthquake measurements.

Keywords: model updating; constrained minimization; modal participation factor; passively-controlled structure; earthquake measurement

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600) 国家自然科学基金项目(51778490)。

作者简介: 杨朋超, 出生于 1988 年, 男, 博士研究生, 主要从事结构模型修正和贝叶斯方法研究。email: murphy_ypc@126.com

通信作者: 薛松涛, 出生于 1963 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事结构健康监测和防灾减灾研究。email: xue@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019 年 12 月

0 引言

在土木工程领域,有限元技术^[1]已成为重要的结构分析手段,广泛应用于结构不确定分析、振动控制、健康监测及优化设计等方面。但由于实际结构的复杂性及施工误差的不确定性,加之结构分析假设的存在,依据结构设计详细建立的有限元模型通常不能准确模拟真实结构的动力特性,有限元模型预测值与结构实际量测值之间存在不可忽略的误差^[2]。对结构振动的实际量测数据,如模态参数,通常认为能更准确反映结构的真实动力特性,常用于修正结构有限元模型,减小模型预测误差^[3]。与该过程相关的技术称为模型修正或更新,且模型修正技术已在机械和航空航天等领域获得了深入且富有成果的研究^[2-5]。对于复杂的大体积土木工程结构,结构的不确定模型参数较多,而结构量测信息的不完备,使其模型修正问题通常被描述为一病态方程,加之结构分析耗时及模型不确定性,相关模型修正技术研究进展较慢^[6-7]。

模型修正实质为一系统识别问题,属反问题的一种。现有的模型修正技术可分为直接修正方法和迭代修正方法两类^[4]。迭代修正方法的基本思路是选取特定的模型参数为待修正参数,如结构质量和刚度矩阵元素或材料密度、弹性模量和尺寸等参数,利用确定性优化方法^[8]或不确定性更新方法^[9],迭代调整物理参数取值,使修正后的模型预测值与实际量测值趋同。该类方法的修正结果具有明确的物理意义,但严重依赖主观的模型参数选择,不合理的选择会导致不切实际的参数修正结果,且修正过程需要进行大量结构分析,限制了其在复杂土木工程结构中的应用^[10-12]。

直接模型修正方法(亦称矩阵修正方法)则是一类基于约束最小化的经典解析修正技术。Baruch等^[13]最早应用约束最小化方法,利用拉格朗日乘子算法,推导了满足模态正交性和特征方程约束的刚度矩阵最优解。但该方法要求结构质量矩阵被精确估计,在复杂实际工程结构应用中通常难以满足。基于此问题,Berman^[14]利用拉格朗日乘子算法推导了满足模态正交性约束的质量矩阵最优解,并建议结合Baruch方法^[13]修正刚度矩阵,以实现结构动力模型修正^[14]。Baruch方法^[13]和Berman方法^[14]为直接模型修正方法中最具代表性的解析方法,该方法无需迭代分析,具有计算高效且可精确匹配目标模态参数等优点,较早成功应用于大型航空航天结构的模型修正^[15]。但该类方法亦存在明显的缺陷,如对结构矩阵空间连接信息的破坏、修正结果物理

意义不明确和新增虚假模态等问题,后续相关研究亦主要针对上述问题展开,并提出了有效的改进措施^[12,16-20]。例如,文献[12]中提出一种模型修正方法解决量测振型不完备问题,同时亦可避免虚假模态的产生。文献[19]中提出了两阶段修正方法,通过依次修正频率和振型实现质量和刚度矩阵的修正。文献[20]中采用摩尔逆运算替代拉格朗日乘子算法,重构了经典的直接模型修正方法,但修正后的质量和刚度矩阵失去了对称性。另外,当应用于地震激励下结构动力模型修正时,传统直接模型修正方法由于仅考虑与频率和振型相关的约束,修正模型预测的模态参与因子与实际量测值存在误差,这种参数匹配不完备问题不可避免影响修正模型的精度,但鲜有文献涉及相关问题的研究。

针对上述问题,本文中提出一种针对结构动力模型的改进直接修正方法。首先,考虑对称性、模态正交性及模态参与因子等约束,采用拉格朗日乘子算法,推导质量矩阵的最优解,验证公式推导的正确性;其次,利用修正后的质量矩阵,结合已有的刚度矩阵修正技术,实现对结构模型的修正。最后,以一栋实际消能减震建筑结构的模型修正为例,验证建议方法的有效性。

1 改进的直接模型修正方法

1.1 问题描述

不失一般性,假设结构的真实质量矩阵和刚度矩阵表达为

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{M}_a + \mathbf{M}_{a\Delta} \\ \mathbf{K} = \mathbf{K}_a + \mathbf{K}_{a\Delta} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{M}_a \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{K}_a \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别为结构初始有限元模型的质量和刚度矩阵, $\mathbf{M}_{a\Delta} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{K}_{a\Delta} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别为未知的质量和刚度误差矩阵,表征初始有限元模型的建模误差, \mathbf{R} 为实数集, n 为模型自由度个数。

在获取结构模态参数的实测值的基础上,直接模型修正方法采用依次修正质量和刚度矩阵的策略,通过施加正交性和特征方程的约束,利用拉格朗日乘子算法,推导质量矩阵和刚度矩阵的最优解,如Berman方法^[14]给出的质量矩阵解析表达为

$$\mathbf{M}_B = \mathbf{M}_a + \mathbf{M}_a \Phi \mathbf{m}_a^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{m}_a) \mathbf{m}_a^{-1} \Phi^T \mathbf{M}_a \quad (2)$$

其中, $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为对角单位矩阵, $\mathbf{m}_a = \Phi^T \mathbf{M}_a \Phi \in \mathbf{R}^{m \times m}$, m 为实测模态个数, $\Phi = [\phi_1, \dots, \phi_m] \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为实测的完备振型矩阵,对于不完备情形,可利用振型扩阶技术^[15,19]获取完备振型。

式(2)质量矩阵与实测模态参数相匹配,满足模态正交性条件,与其对应的模态参与因子为

$$P_B = \Phi^T M_B I_n = m_a^{-1} \Phi^T M_a I_n \quad (3)$$

其中, $I_n \in \mathbf{R}^n$ 为单位列向量。

不难发现由式(3)计算的模态参数因子与实测振型矩阵相关,其计算结果通常不能精确匹配实际量测值,这一缺陷直接影响修正模型的精度,例如,结构在地震激励下,模态参与因子与地震加速度关联,直接影响模态激励强度,进而影响结构模态响应和模态叠加结果,故有必要进一步对质量矩阵进行修正。

1.2 质量矩阵修正

与传统的直接模型修正方法一致,采用约束最小化方法推导质量矩阵的最优解。

首先,定义质量矩阵的目标误差函数为

$$\varepsilon = \|M_a^{-1/2} (M - M_a) M_a^{-1/2}\| \quad (4)$$

其中, $\|\cdot\|$ 为矩阵的欧式范数。

考虑质量矩阵的对称性、正交性和模态参与因子约束,即

$$M = M^T \quad (5)$$

$$\Phi^T M \Phi = I \quad (6)$$

$$\Phi^T M I_n = P \quad (7)$$

其中, $P \in \mathbf{R}^m$ 为实际量测的模态参与因子列向量。

其次,利用拉格朗日乘子算法,可定义拉格朗日方程

$$J = \varepsilon + \sum_{ij} \psi_{ij} (M - M^T)_{ij} + \sum_{ij} \lambda_{ij} (\Phi^T M \Phi - I)_{ij} + \sum_i \gamma_i (\Phi^T M I_n - P)_i \quad (8)$$

其中, ψ_{ij} , λ_{ij} 和 γ_i 分别为与约束条件对应的未知乘子系数。

将式(8)对质量矩阵中的每一个元素求导,并假设导数为零,通过简单矩阵运算,质量矩阵可表达为

$$M = M_a - \frac{1}{2} M_a (\Phi \Lambda \Phi^T + \Phi \Gamma \Gamma_n^T + \Psi - \Psi^T) M_a \quad (9)$$

其中, $\Psi \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\Lambda \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\Gamma \in \mathbf{R}^m$ 为乘子系数矩阵或向量。

将式(9)代入式(5),即施加对称性约束,可得乘子矩阵 Ψ 的解答,即

$$\Psi - \Psi^T = \frac{1}{2} (\Phi \Lambda^T \Phi^T + I_n \Gamma_n^T \Phi^T - \Phi \Lambda \Phi^T - \Phi \Gamma \Gamma_n^T) \quad (10)$$

进一步,将式(10)代入式(9),质量矩阵可进一步表达为

$$M = M_a - \frac{1}{4} M_a \Phi (\Lambda + \Lambda^T) \Phi^T M_a - \frac{1}{4} M_a (\Phi \Gamma \Gamma_n^T + I_n \Gamma_n^T \Phi^T) M_a \quad (11)$$

将式(11)代入式(6),即施加模态正交性约束,

可得乘子矩阵 Λ 的解答,即

$$\Lambda + \Lambda^T = -4m_a^{-1} (I_m - m_a) m_a^{-1} - \Gamma P_a^T m_a^{-1} - m_a^{-1} P_a \Gamma^T \quad (12)$$

其中, $P_a = \Phi^T M_a I_n$ 。

将式(12)代入式(11),质量矩阵可简化为

$$M = M_B + \frac{1}{4} M_a \Phi \Gamma (P_a^T m_a^{-1} \Phi^T - I_n^T) M_a + \frac{1}{4} M_a (\Phi m_a^{-1} P_a + I_n) \Gamma^T \Phi^T M_a \quad (13)$$

将式(13)代入式(7),即施加模态参与因子约束,可得乘子向量 Γ 的解答,

$$\Gamma = \frac{4}{c} m_a^{-1} (P - P_B) \quad (14)$$

其中, $c = (P_a^T m_a^{-1} \Phi^T - I_n^T) M_a I_n$ 为一常量。

最后,将式(14)代入式(13),经简化整理,可得质量矩阵的最优解,

$$M = M_B + M_\Delta + M_\Delta^T \quad (15)$$

其中,

$$M_\Delta = \frac{1}{c} M_a \Phi m_a^{-1} (P - P_B) (P_a^T m_a^{-1} \Phi^T - I_n^T) M_a \quad (16)$$

值得注意的是,若采用 Berman 方法^[14](式(2))计算的模态参与因子与实际量测值相同,由式(16)可知 M_Δ 将为零矩阵,进而式(15)将退化为式(2),即改进质量矩阵修正方法将等同于 Berman 方法^[14]。

1.3 公式验证

为验证质量矩阵推导的正确性,检验式(15)质量矩阵是否满足预设约束条件。

由式(15)和式(2)较易证明修正质量矩阵满足对称性约束。

将式(15)、(16)和式(2)代入式(6)可得

$$\Phi^T M \Phi = \Phi^T M_B \Phi = I \quad (17)$$

即修正质量矩阵满足正交性约束。

将式(15)、(16)和式(2)代入式(7)可得

$$\Phi^T M I_n = P_B + (P - P_B) = P \quad (18)$$

即修正质量矩阵满足模态参与因子约束。

1.4 刚度矩阵修正

基于式(15)修正质量矩阵,可结合现有的刚度矩阵更新技术修正结构刚度矩阵^[12,16-19]。为简化分析起见,采用 Baruch 方法^[13]修正刚度矩阵,该方法亦采用约束最小化技术,推导满足对称性和特性方程约束的刚度矩阵最优解,即

$$K = K_a + K_\Delta + K_\Delta^T \quad (19)$$

其中,

$$K_\Delta = \frac{1}{2} M \Phi (\Phi^T K_a \Phi + \Omega) \Phi^T M - K_a \Phi \Phi^T M \quad (20)$$

其中, $\Omega = \text{diag}\{\omega_1, \dots, \omega_m\} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为实测频率矩阵, 其中, $\text{diag}\{\cdot\}$ 为对角矩阵符号。

2 实际工程应用

图 1 为一栋油阻尼器钢结构办公楼外观, 位于日本宫城县东北工业大学校园内, 该建筑长 48 m、宽 9.6 m、高 34.2 m, 结构包含 9 个楼层, 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, 第 1 层和第 2 层合并为 1 个楼层, 文中以第 1 层指代。结构中安装了健康监测系统, 用于研究结构及油阻尼器在地震中的实际工作性能。其中, 在结构第 1、4、8 层中布置了双向加速度计(共计 3 个), 用于采集楼层在结构长边和短边方向的加速度响应数据; 在结构第 1 层和第 8 层, 沿结构长边和短边方向选取 4 组油阻尼器, 分别安装了力和位移传感器, 用于采集油阻尼器的力和位移响应数据。图 2 中给出了 1 组实测的楼层地震加速度响应数据^[21] (结构长边方向), 该组数据采集于 2011 年 3 月 9 日发生的日本东北大地震前震。以该组实测地震震动数据为例, 利用识别的结构模态参数, 采用改进方法修正结构的有限元模型, 以验证该方法的准确性。



图 1 油阻尼器钢结构办公楼
Fig. 1 A steel-framed office building equipped with oil dampers

利用 SAP2000 结构分析软件创建结构初始有限元模型^[21], 如图 3 所示, 其中, 为简化结构有限元建模, 忽略楼梯间、内隔墙及外墙装饰等非结构构件。楼板采用壳单元模拟, 梁、柱及阻尼器支撑采用框架单元模拟, 连接方式为刚接, 单元的几何尺寸和材料属性的设定严格依照结构设计图纸和日本钢结构设计规范^[22]。此外, 考虑到结构的加速度量测数据仅包含楼层的平动运动信息, 与结构的平动模态相关, 且初始有限元模型模态分析表明其平动和转动模态相互分离, 故可将初始有限元模型简化处理为平面模型, 并采用结构动力学中对建筑结构常用简化假设^[23]。如假定楼板为刚性、忽略构件竖向变形, 考虑模型侧向变形及节点转动。简化有限元模型仅包含

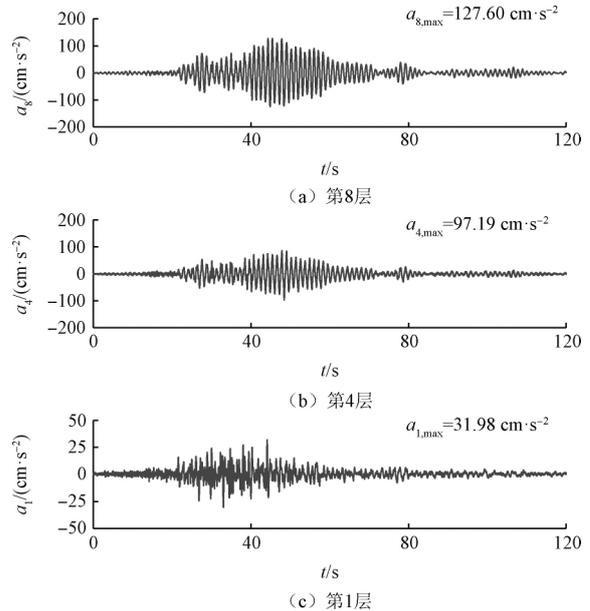


图 2 监测楼层加速度响应数据
Fig. 2 Acceleration measurements of monitored floors

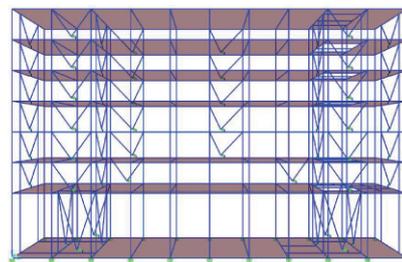


图 3 结构初始有限元模型
Fig. 3 Initial finite element model of building

7 个自由度, 与结构楼层相对应, 结构主体模型(不含油阻尼器)的质量矩阵(单位: t)和刚度矩阵(单位: $\text{MN} \cdot \text{mm}^{-1}$)为

$$M_a = \text{diag}\{446, 348, 337, 334, 328, 324, 311\},$$

$$K_a = \begin{bmatrix} 1.07 & -1.08 & 0.29 & -0.05 & 0.01 & 0.00 & 0.00 \\ -1.08 & 1.89 & -1.16 & 0.31 & -0.05 & 0.01 & 0.00 \\ 0.29 & -1.16 & 1.73 & -1.10 & 0.29 & -0.05 & 0.01 \\ -0.05 & 0.31 & -1.10 & 1.65 & -1.05 & 0.27 & -0.04 \\ 0.01 & -0.05 & 0.30 & -1.05 & 1.57 & -0.96 & 0.20 \\ 0.00 & 0.01 & 0.01 & 0.27 & -0.96 & 1.36 & -0.62 \\ 0.00 & 0.00 & 0.001 & -0.04 & 0.20 & -0.62 & 0.45 \end{bmatrix}.$$

首先, 考察结构初始有限元模型的动力响应预测误差。取第 1 层实测地震加速度作为为模型激励, 并假设上部结构响应的初始态为零, 结构阻尼及阻尼器参数设定如下: 假定结构阻尼为经典的阻尼模型, 取前两阶阻尼比为 0.02, 其余高阶阻尼比取 0.1; 取经典的 Maxwell 模型模拟油阻尼器支撑系统的动力学行为, 参数取基于实测数据的识别值^[21]。图 4 中给出了初始有限元模型预测的监测楼层和油阻尼器在强震阶段(30 ~ 60 s)的加速度和力时程响应。与实际监测数据

对比 结构初始有限元模型预测的油阻尼器加速度和力时程响应精度均较低,初始有限元模型存在较大误差,不能准确模拟真实结构的动力行为,有必要对初始模型进行修正以获取更精确的响应预测。

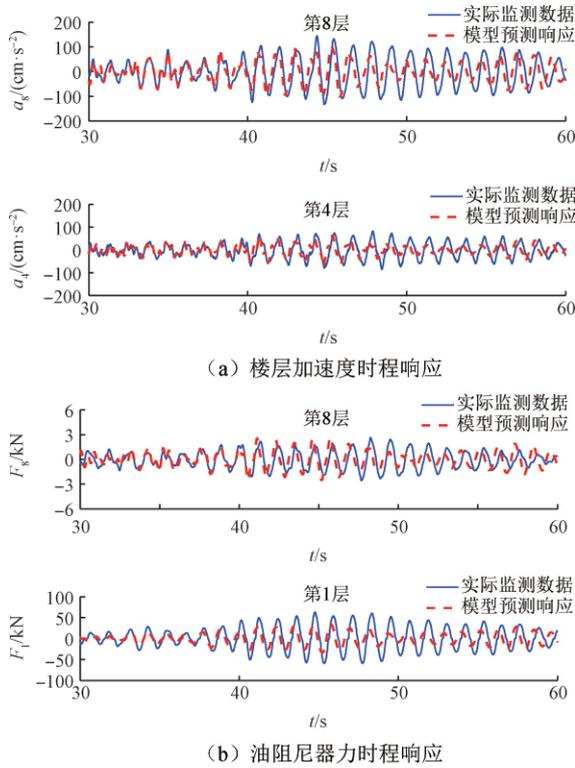


图4 初始有限元模型预测的响应和实际监测数据
Fig. 4 Measured and predicted responses by initial FE model

利用监测楼层的加速度数据可较易获取结构系统的模态参数,其中,以第1层加速度作为输入激励,其余楼层加速度作为输出响应,采用文献[24]的方法识别系统模态参数。考虑油阻尼器设备对结构系统的阻尼和刚度影响,表1中给出了估计的结构主体的前两阶模态参数,包括频率 ω_i 和振型 $\phi_{i,2}$ 、 $\phi_{i,6}$,模态参与因子 p_i 及阻尼比 ξ_i ,其中, $\phi_{i,2}$ 和 $\phi_{i,6}$ 分别对应第4层和第8层的振型。

表1 结构主体模态参数估计值
Table 1 Estimated modal parameters of main body of building

阶次	$\omega_i / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\phi_{i,2}$	$\phi_{i,6}$	p_i	ξ_i
1	5.222	0.014 3	-0.026 1	43.058	0.010 8
2	17.046	0.025 6	0.017 5	-15.224	0.043 4

考虑到直接模型修正方法需要完备的振型,而估计的振型不完整,针对该问题,采用经典的振型扩阶技术扩展振型,扩阶振型可表达为

$$\phi_i = \begin{Bmatrix} \phi_{i,r} \\ \phi_{i,\mu} \end{Bmatrix} = T \phi_{i,r} \quad (21)$$

其中, $\phi_{i,r}$ 为量测的振型, $\phi_{i,\mu}$ 为未量测的振型, T 为转换矩阵,由具体扩阶技术决定,采用文献[19]中建议的方法,转换矩阵可表达为

$$T = \begin{bmatrix} I \\ - (K_{i,\mu}^T K_{i,\mu})^{-1} K_{i,\mu}^T K_{i,r} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,

$$\begin{cases} K_{i,\mu} = K_{a,\mu} - \omega_i^2 M_{a,\mu} \\ K_{i,r} = K_{a,r} - \omega_i^2 M_{a,r} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $K_{a,r}$ 和 $K_{a,\mu}$ 分别为量测和未量测自由度的子刚度矩阵, $M_{a,r}$ 和 $M_{a,\mu}$ 分别为量测和未量测自由度的子质量矩阵。

图5为初始有限元模型的振型与扩阶振型的对比,其中,第2阶振型具有很高的相似性,但第1阶扩阶振型显著不同于其所对应的初始振型,亦体现了该初始模型的建模误差。另外,值得指出的是,不同的扩阶技术可能导致扩阶振型的差异,进而引起不同的质量和刚度矩阵修正结果。

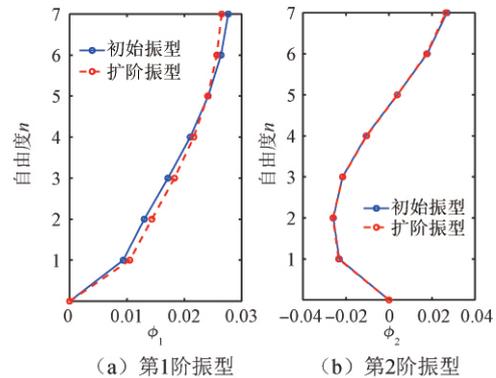


图5 初始振型和扩阶振型
Fig. 5 Initial and expanded mode shapes

为对比说明本文改进方法的有效性,利用估计的扩阶振型和表1中频率和模态参与因子模态参数,采用Berman方法^[14](式(2))和Baruch方法^[13](式(19))分别修正结构主体有限元模型(修正质量和刚度矩阵),为便于描述,称这种方法为Berman-Baruch方法,并与改进方法进行对比,即采用式(15)和式(19)分别修正质量和刚度矩阵。图6为两

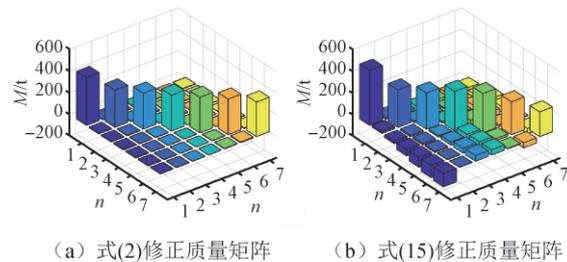


图6 式(2)和式(15)修正的质量矩阵
Fig. 6 Updated mass matrices by eq. (2) and eq. (15)

种方法修正的质量矩阵,不难发现改进方法(式(15))修正结果显著不同于式(2)的修正结果,改进方法的额外修正项 M_{Δ} 对质量矩阵的非对角线元素影响显著,且两种方法对质量矩阵的对角线元素修正亦不相同,上述差异来源于模态参与因子约束的影响。

表2和表3中分别给出了Berman-Baruch方法和改进方法修正模型的前两阶模态参数。对比表1结构主体模型模态参数的估计值,不难发现两种方法的修正模型均能精确匹配频率和振型参数,但Berman-Baruch方法未考虑模态参与因子的约束,其修正模型的预测值由式(3)决定,计算结果与模态参与因子估计值存在明显差异,而改进方法修正模型则可精确预测模态参与因子,如表3所示,说明改进方法具有更完整的模态参数匹配,亦表明改进方法的准确性。

表2 Berman-Baruch方法修正模型的模态参数
Table 2 Modal parameters of updated model by Berman-Baruch approach

阶次	$\omega_i / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	ϕ_{i2}	$\phi_{i\beta}$	P_i
1	5.222	0.014 3	-0.026 1	46.309
2	17.046	0.025 6	0.017 5	-12.681

表3 改进方法修正模型的模态参数
Table 3 Modal parameters of updated model by improved approach

阶次	$\omega_i / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	ϕ_{i2}	$\phi_{i\beta}$	P_i
1	5.222	0.014 3	-0.026 1	43.058
2	17.046	0.025 6	0.017 5	-15.224

采用Berman-Baruch方法和改进方法修正的有限元模型分别预测结构楼层加速度和油阻尼器力响应,取标准均方差(e_N)为衡量指标,量化修正模型的预测精度,定义如下:

$$e_N = 1 - \frac{\|\hat{y} - y\|}{\|\hat{y} - \text{mean}(\hat{y})\|} \quad (24)$$

其中, \hat{y} 为结构响应的量测值, y 为有限元模型的预测值, $\|\cdot\|$ 代表向量的2范数。若标准均方差 e_N 接近1,则代表模型预测值与实测量测值拟合度高,即有限元模型具有较高的预测精度。

表4中给出了初始有限元模型(初始模型)和修正模型预测的结构强震阶段楼层加速度和阻尼器力的标准均方差响应 e_a 和 e_F ,其中,修正模型的前两阶阻尼比取表1估计值,其余动力分析设定不变。由计算结果可知,在预测精度方面,修正模型均优于初始模型,其中,改进方法修正模型具有最高的模型预测精度,与Berman-Baruch方法的修正模型对比,改进方法修正模型的精度提高体现了模态参与因子的影响。图7中给出了在强震阶段改进方法修正模型预

测的监测楼层的加速度和油阻尼器的力响应,修正模型的预测响应精准拟合了实际监测数据。

表4 模型预测响应的标准均方差
Table 4 Normalized root-mean-square errors of predicted responses by models

模型	$e_a / \%$		$e_F / \%$	
	第4层	第8层	第1层	第8层
初始模型	11.52	10.27	-48.10	-8.24
修正模型*	80.42	85.76	82.54	63.88
改进方法修正模型	84.42	90.85	84.33	64.34

注:修正模型*采用Berman-Baruch方法。

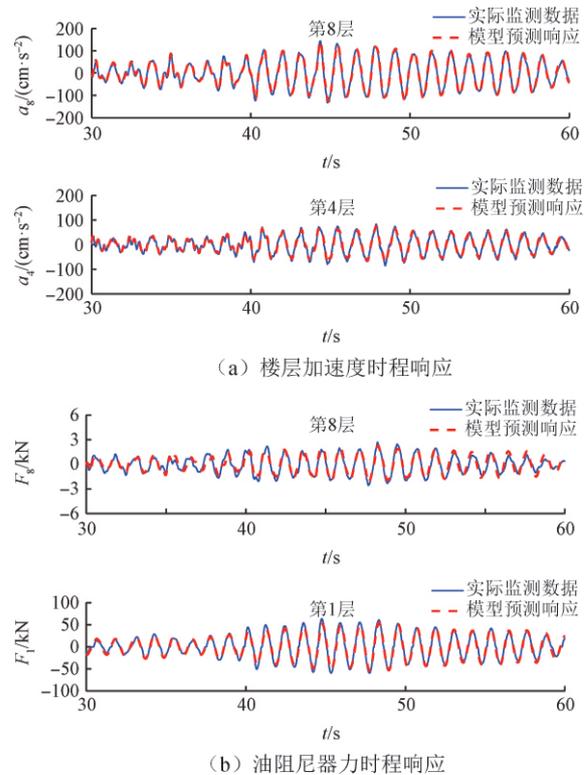


图7 修正有限元模型预测的响应和实际监测数据
Fig. 7 Measured and predicted responses by updated FE models

值得指出的是,改进模型修正方法亦具有传统直接模型修正方法的优点和缺点,如对结构构件空间连接的破坏,修正的质量和刚度矩阵可能显著不同于原矩阵等,限制了其在结构损伤识别等方面的应用,但该类方法具有计算高效和精确匹配目标参数等特点,在大型结构的响应预测和振动控制等方面更具优势。

3 结论

针对传统直接模型修正方法存在的模态参数匹配不完备问题,提出一种改进的直接模型修正方法。通过引入对称性、正交性及模态参与因子等约束,推

导质量矩阵的修正公式,并结合已有刚度矩阵修正技术,实现了对一栋实际建筑结构的有限元模型修正。结论如下:

1) Berman 的方法未考虑模态参与因子约束,其修正质量矩阵的模态参与因子却具有确定性,算例计算结果表明该模态参与因子与实际量测值存在显著差异。

2) 基于约束最小化,利于拉格朗日乘子算法,证明了满足对称性、正交性和模态参与因子等约束的质量矩阵最优解是存在的。

3) 改进方法的修正模型可精确匹配结构的识别模态参数,包括频率、振型和模态参与因子,且修正模型的预测响应与实际监测数据精确符合度较高。

4) 改进模型修正方法计算准确且高效,但其修正质量和刚度矩阵破坏结构构件的空间连接,限制其在结构损伤等方法的应用。

参 考 文 献

- [1] HUGHES T J R. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis [M]. New York: Courier Corporation, 2012: 310-379.
- [2] EWINS D J. Modal testing: theory and practice [M]. Letchworth: Research Studies Press, 1984: 248-284.
- [3] MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Model updating in structural dynamics: a survey [J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 167(2): 347-375.
- [4] FRISWELL M, MOTTERSHEAD J E. Finite element model updating in structural dynamics [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1995: 126-226.
- [5] SEHGAL S, KUMAR H. Structural dynamic model updating techniques: a state of the art review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(3): 515-533.
- [6] YUEN K V. Bayesian methods for structural dynamics and civil engineering [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010: 99-210.
- [7] KRUIS J, TSOMPANAKIS Y, TOPPING B H V. Computational techniques for civil and structural engineering [M]. Stirlingshire: Saxe-Coburg Publications, 2015: 83-99.
- [8] FARHAT C, HEMEZ F M. Updating finite element dynamic models using an element-by-element sensitivity methodology [J]. AIAA Journal, 1993, 31(9): 1702-1711.
- [9] BECK J L, KATAFYGIOTIS L S. Updating models and their uncertainties I: Bayesian statistical framework [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 455-461.
- [10] ZHANG Q W, CHANG T Y P, CHANG C C. Finite-element model updating for the Kap Shui Mun cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 285-293.
- [11] BEHMANESH I, MOAVENI B. Probabilistic identification of simulated damage on the Dowling Hall footbridge through Bayesian finite element model updating [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(3): 463-483.
- [12] CARVALHO J, DATTA B N, GUPTA A, et al. A direct method for model updating with incomplete measured data and without spurious modes [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(7): 2715-2731.
- [13] BARUCH M, BAR ITZHACK I Y. Optimal weighted orthogonalization of measured modes [J]. AIAA Journal, 1978, 16(4): 346-351.
- [14] BERMAN A. Mass matrix correction using an incomplete set of measured modes [J]. AIAA Journal, 1979, 17(10): 1147-1148.
- [15] BERMAN A, NAGY E J. Improvement of a large analytical model using test data [J]. AIAA Journal, 1983, 21(8): 1168-1173.
- [16] KABE A M. Stiffness matrix adjustment using mode data [J]. AIAA Journal, 1985, 23(9): 1431-1436.
- [17] DATTA B N. Finite-element model updating, eigen-structure assignment and eigenvalue embedding techniques for vibrating systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(1): 83-96.
- [18] YANG Y B, CHEN Y J. A new direct method for updating structural models based on measured modal data [J]. Engineering Structures 2009, 31(1): 32-42.
- [19] YUEN K V. Updating large models for mechanical systems using incomplete modal measurement [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 1(28): 297-308.
- [20] LEE E T, EUN H C. Update of corrected stiffness and mass matrices based on measured dynamic modal data [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(5): 2274-2281.
- [21] 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.
- [22] 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. (in Japanese))
- [23] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. New Jersey: Pearson/Prentice Hall, 2007: 755-863.
- [24] CRUZ C, MIRANDA E. Evaluation of the Rayleigh damping model for buildings [J]. Engineering Structures, 2017, 138: 324-336.