

文章编号:1671-8879(2014)04-0052-10

基于桥梁健康监测的有限元模型修正 研究现状与发展趋势

梁 鹏^{1,2}, 李 斌^{1,3}, 王秀兰¹, 王晓光¹, 吴向男¹, 马旭明¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 桥梁结构安全技术国家工程实验室,
陕西 西安 710064; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘 要:为了提高有限元模型修正技术的建模精度,从模型修正的对象、信息来源和其他方法 3 种分类方法出发,系统阐述各种有限元模型修正方法的原理,梳理各种方法的脉络关系及技术演变;从理论研究和桥梁健康监测应用 2 个方面,分析各种方法的应用现状及其优缺点。研究表明:有限元模型修正研究发展的 7 大方向为:①多尺度、分散子结构、代理模型、随机、非参数的模型修正方法;②基于强度理论及非线性理论的模型修正方法;③通用的模型修正算法和统一的评价准则;④数值模拟、理论分析和工程应用相结合;⑤充分利用桥梁工程特有的全过程信息;⑥开发针对桥梁结构的模型修正软件;⑦有限元模型确认。

关键词:桥梁工程;健康监测;有限元模型修正;基准有限元模型;有限元模型确认;多尺度;分散子结构

中图分类号:U446

文献标志码:A

Present research status and development trend of finite element model updating based on bridge health monitoring

LIANG Peng^{1,2}, LI Bin^{1,3}, WANG Xiu-lan¹, WANG Xiao-guang¹, WU Xiang-nan¹, MA Xu-ming¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. National Engineering
Laboratory for Bridge Structure Safety Technology, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100027, China)

Abstract: In order to improve modeling accuracy of finite element model updating technology, this paper systematically discussed the principle of various methods of finite element model updating according to three classification methods, including object-based model updating method, information-source-based model updating method and another method, and sorted out the context of their relationships and the technology evolution of various model updating method. It also analyzed the application status of various methods and their advantages and disadvantages in two aspects including theoretical research and bridge health monitoring applications. The results show that there are 7 further research fields of the finite element model updating technology: ① multi-scale, isolated substructure, agent models, stochastic and nonparametric model updating meth-

收稿日期:2013-06-26

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC077,2014G2210001);

广东省交通运输厅科技项目重大工程专项(2011-01-001)

作者简介:梁 鹏(1977-),男,江西高安人,教授,工学博士,E-mail:BridgeDoctor@126.com。

od; ② the model updating method based on strength theory and nonlinear theory; ③ general model updating algorithm and unified evaluation criteria; ④ the model updating method combining numerical simulation, theoretical analysis and application in engineering; ⑤ making full use of the whole-process information which is unique to bridge engineering; ⑥ developing software for model updating of bridge structure; ⑦ finite element model validation. 3 figs, 70 refs.

Key words: bridge engineering; health monitoring; finite element model updating; baseline finite element model; finite element model validation; multi-scale; isolated substructure

0 引言

结构健康监测(structural health monitoring, SHM)是国内外的热点研究领域,是指在有限元模型(finite element model, FEM)精确模拟的基础之上,利用安装在桥梁上的传感器采集到的信号和数据,运用一定的损伤识别方法和评估方法,实现桥梁安全及可靠性评估^[1-5]。有限元模型修正(finite element model updating, FEMU)的目的是得到描述真实结构完好状态时结构性能的 FEM。在 SHM 中,这个模型称为基准有限元模型,一个准确有效的“基准”(Baseline)有限元模型是必不可少的。基准有限元模型的首要目标是准确模拟桥梁结构的静动力行为,为损伤识别和状态评估提供真实的结构响应。由于有限元建模和试验都可能存在误差,故两者结果往往不一致^[6]。在 SHM 系统中应使建立的 FEM 能够全面、正确地反映结构真实性,如何使理论结果和实测数据偏差尽可能小,已成为研究的热点之一^[7-9]。

FEMU 技术是损伤识别的一种方法,已经在结构损伤识别和评估中得到了广泛的应用^[10]。在 SHM 领域,把直接或间接测知的加速度时程记录、模态参数、频率响应函数等量测参数,与 FEM 结果进行综合比较,通过条件优化约束等一系列数学方法,不断地修正 FEM 中的刚度,得到结构刚度变化,从而实现损伤的定位和损伤程度的评估。FEMU 研究内容包括待修正参数选取、构造目标函数、算法、结果误差判别等内容。一般认为试验模型具有更高的可信度,可以作为评价、验证 FEM 的基本依据。如果 FEM 与试验模型得到的结构特性之间的差异高于一定的阈值,就需要对 FEM 进行必要的修正,使得两者之间的差异降低到可以接受的范围。FEMU 流程如图 1 所示。

本文从模型修正的对象、信息来源和其他方法这 3 种分类方法出发,阐述各种 FEMU 方法的原

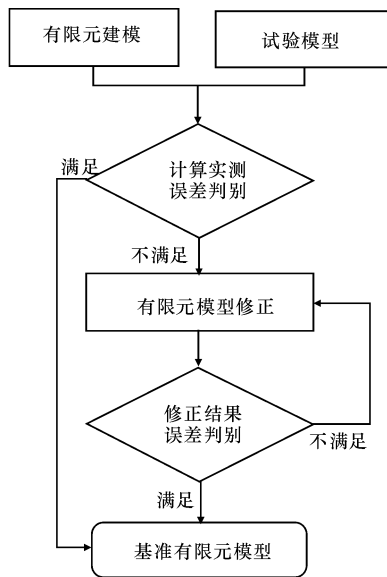


图 1 有限元模型修正流程

Fig. 1 Flow of finite element model updating

理,梳理各种方法的脉络关系及技术演变,最后指出存在的问题、可能的解决方案,并展望发展趋势。

1 有限元模型修正方法分类

结构建模理论主要有结构识别(structural identification)理论和模型修正理论。结构识别理论依据一定的数学模型,由试验测量的结构动力响应数据来反演出 FEM 中的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵等动力响应参数,还可以根据选取的识别精度的要求识别出结构中每个构件的质量、刚度等参数^[11-12]。对于土木结构而言,刚度矩阵主要受高阶模态影响较大,而受测量仪器频宽的限制和“漏频”的影响,识别的参数往往会偏离其原有的物理意义。基于这个原因,Berman 认为大型土木结构不适合用结构识别理论来直接识别结构的物理参数,应该用 FEMU 来解决大型结构的建模问题^[13];1965 年 Guyan 发表了模型缩聚方面的文章,开创了 FEMU 方面的研究工作^[14]。经过 40 多年的发展,国内外发表了大量有关 FEMU 的研究成果。FEMU

的核心是通过选定合适的修正参数,运用一定的数学理论,使得 FEM 的计算结果与测试的结果相吻合。FEMU 是一个“反问题”,很多方面仍需要进一步的研究。目前利用大跨桥梁成桥试验所获得的“原始指纹数据”来修正和验证根据设计图纸建立的初始有限元模型,使模型的理论计算结果能够更准确地描述桥梁的结构状态,是面向 SHM 建立大跨桥梁基准有限元模型的重要途径^[15]。

根据结构荷载试验实测的动力响应(频率、振型等)和静力响应(位移、应变、转角和曲率等)信息进行 FEMU,从数学概念上讲是个优化问题^[16]。根据修正对象的不同,FEMU 可以分为矩阵型和设计参数型两大类。根据修正信息的来源,FEMU 又可以分为基于动力的 FEMU、基于静力的 FEMU、联合静动力的 FEMU^[17]。根据优化使用的优化方法的不同又衍生出了其他的修正方法。3 种分类方法如图 2 所示。

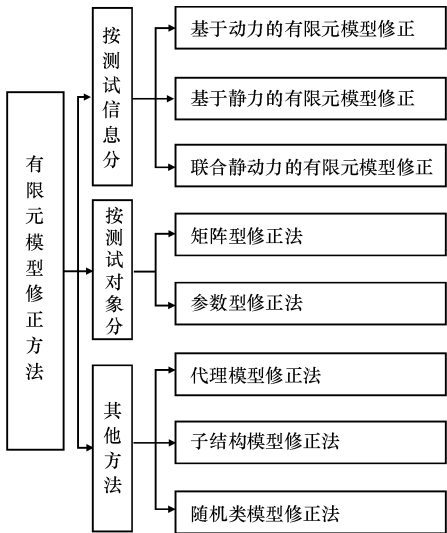


Fig. 2 Classification of finite element model updating methods

2 按修正对象分类的模型修正方法

最早用于 FEMU 的矩阵型修正方法是直接修改系统的动力参数,其基本思想是根据一定的准则和结构动力学关系来修正 FEM 的刚度矩阵、质量矩阵或阻尼矩阵,使修正后的模型计算的模态与试验结果一致。矩阵型修正法通常可以分为:结构矩阵的全元素修正法、子结构矩阵校正因子修正法、结构矩阵的非零元素修正法^[18-21]。由于大型复杂结构的各类矩阵很难得到,并且修正结果难以与结构设计参数相关联,使得矩阵型修正方法在工程应用中具有一定难度。

与矩阵型修正法不同,设计参数型修正法以灵敏度分析为基础,确定适合修正的设计参数,通过构造理论模型与实际模型之间在同一激励下的响应的误差(目标函数),选择一定的修正量使该误差满足最小化来达到修正的目的^[22]。设计参数型修正直接以结构的设计参数为修正对象,把系统的固有频率、振型展开成结构参数的 Taylor 级数,用最优化方法求解,较好地解决了矩阵型修正方法存在的问题^[23]。结构响应对模型参数的灵敏度分析是 FEMU 优化问题的关键环节,但通过数值差分得到的结构灵敏度存在计算精度不易控制的问题,同时修正参数的选择对 FEMU 的结果具有决定性的影响,因此选择的参数应尽可能的少^[24-25]。但是,如果选择的参数不充足,也难以得到真实满意的修正模型。典型的设计参数型 FEMU 流程如图 3 所示。

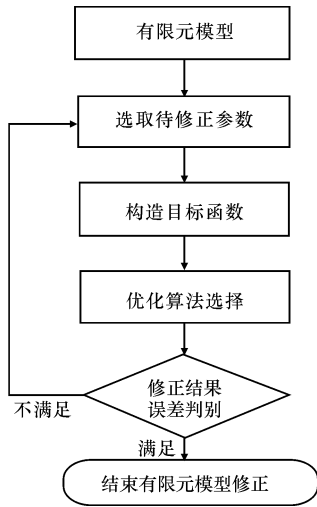


Fig. 3 Flow of finite element model updating of design parameters

3 按信息来源分类的模型修正方法

根据信息来源对 FEMU 方法进行分类,从本质上为依据修正信息构造不同优化的目标函数而引起的不同分类。该领域针对设计参数型 FEMU 方法的研究较多,研究主要集中于设计参数的选择、构造优化目标函数、优化算法选取以及参数灵敏度分析等^[26]。

3.1 基于静力的有限元模型修正法

在测量的精度方面,静态应变及位移测量比振动特性测量更为准确,因而基于静态应变、位移等响应的参数识别技术高效、可靠。目前基于静载试验

测试数据进行桥梁 FEMU 的研究较少,这类数据在桥梁 SHM 中的应用大多集中在桥梁的参数识别上。Hajela 等探讨了综合利用模态试验和静载试验结果进行结构参数识别的可能性^[27];Banan 等提出了相互残余能量法,把基于动力反应和静力反应的结构参数识别算法统一起来,使之成为求解非线性方程组的问题^[28-29];随后,很多学者进行了基于静态测量值的 FEMU 方法的研究^[30-31]。相对基于动力的 FEMU 技术,静力修正技术可以利用的数据量有限。同时在结构运营中,由于不能妨碍正常交通,所以静力损伤识别方法不能进行在线的损伤识别。

3.2 基于动力的有限元模型修正

相对而言,结构动力测试信息比较容易得到,利用动力信息进行 FEMU 一直是损伤识别领域的热点课题。动力测试信息可以利用自然环境下的荷载(比如风、地脉动、随机的车辆和人群等)作为激励,通过加速度传感器获取结构动力信息,选取适当的修正目标作为状态变量,例如频率、振型、模态柔度等,进行模型修正计算。由于可以选择的状态变量比较多,因而该类方法的研究很多。基于动力的 FEMU 克服了基于静力的 FEMU 的先天性不足,可以用于桥梁的在线监测^[32]。根据修正参考基的不同,基于动力的 FEMU 可以分为基于模态参数的模型修正和基于频响函数(frequency response function, FRF)的模型修正 2 类^[17]。基于模态参数的模型修正方法也可以分为矩阵型修正方法和设计参数型修正方法 2 类,目前的研究应用主要集中于设计参数型修正方法。这类方法应用的前提是进行灵敏度分析,识别模态参数,计算工作量比较大,并且选取不同的参数可能会导致不同的修正结果^[33]。在选取模态参数时,也将模态参数识别的误差带入了 FEMU 计算中,使得模型修正的误差增大,影响了该类方法的计算精度和效率。同时,试验模态不完备、噪声干扰、测试误差,以及质量、阻尼难以测量导致振型正则化困难等问题也没有很好解决^[28]。

基于 FRF 的 FEMU 则可以很好地避免这个问题。该类方法从 20 世纪 90 年代以来一直引起学者们的广泛关注。FRF 反映了系统的输入和输出之间的关系,反映了系统的固有特性,是系统在频域中的一个重要特征量。基于 FRF 的 FEMU 能够直接利用振动试验测量所得的频响函数矩阵,不需要进行模态分析,避免了模态分析引起的误差,修正结果

比模态参数类方法更为精确。该方法尤其适合于模型模态分布相近且密集的情况,并且通过选择不同的测点所得到的 FRF 可以很方便地对修正结果进行校核,因而具有较大的工程实用价值而受到广泛关注。因此,基于 FRF 的 FEMU 技术有十分重要的意义。Lin 等最先通过构造实测 FRF 与原模型 FRF 之间的误差,并使其最小化来修正模型的单元刚度和质量矩阵^[24];随后,Imregun 等对此进行了系统的理论研究^[35-37];Link 等提出给位移响应形式的残差左乘阻抗矩阵,利用结构的力响应信息来修正模型^[38]。目前 FRF 修正方法还处在探索和研究阶段,并且研究多见于航空、机械领域,关于桥梁结构的 FRF 修正方法研究还很少^[39]。FRF 修正方法的缺点在于需要完整的频响函数值,因此修正前实测的 FRF 必须要进行扩展或者将模型进行缩聚。另外,测量结构的 FRF 必须要对结构施加可控激励,这对于桥梁工程这样的大型土木结构是很难做到的。

3.3 联合静动力的有限元模型修正

联合静动力的 FEMU 的特点是既增加了 FEMU 的可利用信息,又克服了单独运用静力或动力试验数据进行 FEMU 的不足,具有很大的发展潜力。

联合静动力的 FEMU 主要集中于设计参数型 FEMU 法的研究,由于 FEMU 是个优化问题,根据不同的静态数据和动力数据的组合可以产生不同的优化目标函数,构建一个包含静动力信息的合理的目标函数是该领域的核心问题^[40-42]。如以频率等模态信息为修正的目标函数、联合静态位移及模态柔度目标函数、动力参数频率联合模态置信准则及静力位移目标函数等^[43-45]。张启伟等利用推广的子矩阵方法,联合运用静动力测试数据进行 FEMU 和损伤识别,在悬臂梁上验证了该方法的可行性^[46]。

联合静动力的 FEMU 方面的研究已经开始引起土木工程界的注意,但是目前各种方法的研究大都局限在数值模拟和室内模型方面,离实际工程应用仍有一定距离。桥梁结构特有的施工监控、交工动静载试验为建立 SHM 基准模型提供了绝佳的静力损伤识别机会,结合动力试验数据丰富的特点,使得联合静动力的 FEMU 方面具有较大的发展潜力^[47]。

4 其他模型修正方法

FEMU是个优化迭代过程,基于不同的优化方法衍生出了其他各种修正方法,这些方法本质上也属于矩阵型修正法或设计参数型修正法。这里主要介绍代理 FEMU 法、子结构 FEMU 法和随机类 FEMU 算法。

4.1 代理模型修正法

由于 FEMU 存在迭代次数多,计算量巨大等问题,不少学者采用代理模型进行 FEMU,其中以响应面法为代表^[48-49]。响应面(response surface)法是近几年应用到桥梁 FEMU 的一种新方法,是试验设计与数理统计相结合的方法^[50-51]。基于响应面模型的 FEMU 方法利用试验设计和回归分析技术,构造显式的响应面模型逼近特征量与设计参数之间复杂的隐式函数关系,用得到简化的结构模型(meta-model)代替原有的 FEM;然后在替代模型上进行迭代修正,避免每次迭代都进行有限元计算,从而大大提高了计算效率^[31]。响应面法可较方便地在通用有限元平台上进行二次开发实现,本质上也是处理设计参数修正问题。任伟新等通过对用数值模拟算例和六跨连续梁桥环境振动试验结果实现基于响应面模型的土木结构 FEMU^[50]。响应面法的计算精度受简化模型和设计参数的影响,如何合理地选取参数,构造可靠的简化结构模型是该方法的核心问题^[31]。

4.2 子结构修正模型法

子结构 FEMU 法本质上属于矩阵型修正法,1993 年, Farhat 等首先提出了逐个在单元子结构范围内进行 FEMU 的方法,以单元模态动力残差矢量模最小为目标函数^[52];郭力把修正过程分步实现,先误差定位,再参数修正,建立多重子步 FEMU 方法^[53];侯吉林提出约束子结构 FEMU 方法,实现了利用少量传感器和局部结构动力响应修正识别局部子结构或整体结构^[54]。子结构 FEMU 法计算精度受到子结构单元划分的影响比较大,同时要求振型关于质量归一化,而在实际中,大型结构在环境激励下的模态分析得到的阵型并不是关于质量归一的振型^[44]。另外,如何识别子结构的单元刚度、质量、阻尼、边界荷载或动力响应等参数的工作增加了识别的未知数,增大了计算量,修正结果缺乏比较准确的物理意义解释,使得该方法难以在实际中应用。

4.3 随机类优化模型修正方法

FEMU 中的一个核心难题在于所构造的目标函数通常具有高度非线性和多个局部极值点,使得传统优化搜索方法,如梯度法和牛顿迭代法,很难找到全局最优解。随机类优化方法不依靠目标函数,具有全局搜索最优解的能力,并且收敛速度比传统的优化算法快,因而在复杂结构 FEMU 方面具有很大的潜力。大多随机类方法的内在并行性非常适合多核技术、CPU-GPU 耦合体系、网格计算、云计算等高性能计算。

随机类优化 FEMU 方法主要包括遗传算法、神经网络法和贝叶斯(Bayes)概率方法^[55-56]。Mares 等首先尝试利用遗传算法优化实测的结构固有频率和振型构建模态力残值误差函数,籍此调整结构参数,结果证明遗传算法具有较强的抗噪声能力^[57];中国学者也在这方面做了相应的研究和简单的数值模拟^[58-59]。但这类算法存在收敛速度慢、迭代次数多等缺点。

神经网络方法修正首先被用来修正悬臂梁等简单结构的动力模型^[60]。随后,相继有学者利用神经网络法进行了矩阵型 FEMU 和设计参数型 FEMU 的研究^[61-63]。神经网络法可以将 FEMU 归结为正问题,避免了现有的基于反问题的修正方法所面临的难点。但是网络的学习收敛速度太慢,学习时间长,即使是一个比较简单的问题,也需要几百次甚至上千次的学习才能收敛,并且不能保证收敛到全局最小值。同时网络的学习、记忆具有不稳定性。神经网络的这些缺点,影响了它在很多方面的应用。目前这方面的研究主要集中于神经网络的收敛速度和尽量避免陷入“局部极小”2 方面的问题。

Bayesian 理论是与经典概率理论并列的数理统计理论,基于实测数据的 Bayesian 模型修正技术已经被应用于系统参数识别、损伤诊断和 SHM 中^[64]。

5 结 语

(1)结构 FEMU 基本是沿着矩阵型修正方法和设计参数型修正方法这 2 条途径发展,涉及的领域从线性到非线性,从小摄动到大摄动,从实模态到复模态,从独立根到重根,从理论研究、数值模拟到模型试验、实桥应用等各个方面。虽然 FEMU 在概念上简洁并已取得丰富的研究成果,但在应用中往往是病态、非唯一解的逆问题,离实际桥梁工程应用还

有很大距离^[65]。在以下方面进行深入研究,对推进 FEMU 技术的发展具有重要意义。

(2)多尺度 FEMU 方法、分散子结构的 FEMU 方法、代理模型 FEMU 方法、随机 FEMU 方法、非参数 FEMU 方法、全局优化算法是本领域研究的前沿课题。此外,与结构耐久性理论、疲劳与断裂理论、结构极值分析理论相结合的模型修正方法在结构安全评定中愈来愈受到重视^[66]。尤其值得一提的是多尺度 FEMU 方法,对于大型土木结构来说,多尺度模型考虑了计算量和分析细部及整体分析之间的问题,对结构的应力分析可以取得比较好的效果^[67]。模态分析由于结构固有频率和振型主要取决于结构质量分布和刚度分布,不存在类似应力集中的现象,因而模态分析中采用均匀网格使结构刚度矩阵和质量矩阵的元素不致相差太大,藉此减小数值计算误差。静力分析与动力分析对于 FEM 的不同要求构成了一个矛盾。妥善处理好两者之间的关系不仅有利于 FEMU 技术的发展,同时有利于具有较大发展潜力的基于静力的损伤识别技术和基于静动力联合损伤识别技术的发展应用。

(3)研究基于强度理论及非线性理论的 FEMU 方法。由于损伤识别理论是基于刚度理论发展起来的,FEMU 理论研究重点也是集中于寻求测试信息与结构刚度之间的对应关系来达到 FEMU 的目的,因而基于 FEMU 的损伤识别理论是目前桥梁 SHM 研究的热点领域之一。FEMU 方法利用的静力测量值信息或是动力模态信息均是在弹性范围内的线性分析,而损伤的发生往往是由于材料强度因素引起的,属于非线性问题。利用线性分析评估非线性结果,将难以保证分析效果和分析结果的准确性。利用现代非线性动力学的方法能够更加接近结构损伤的本质,但目前这方面的研究还处于初级阶段^[68]。因此,基于强度理论和非线性动力学的 FEMU 技术和损伤识别理论亟需发展和完善。

(4)建立通用 FEMU 算法和统一有效的评价准则。目前 FEMU 技术主要实现频率等与实测结果吻合,修正后的 FEM 对于未测的结构响应的吻合情况难以保证,同时以模型内力和实测内力相吻合为目标的修正技术还不成熟。评价准则单一,无法兼顾结构其他相应修正结果。FEMU 算法也仅局限于选定的修正对象和修正参数有效,修正效果缺乏系统性和整体性。因此,迫切需要建立一套通用的 FEMU 算法和统一的评价准则,以满足实际应用

的需要。

(5)将理论分析、数值模拟、模型试验和工程应用相结合。目前各种 FEMU 方法大多仅在理论分析和简单结构上进行了确定性的数值模拟验证或模型试验^[6,9,45],实桥应用较少^[17, 22, 31, 44, 50];而实桥基于 SHM 的应用则鲜有报道,这是由于计算模型、测试数据和环境干扰都具有很大的不确定性^[4,22]。采用确定性分析方法处理本质不确定性的桥梁 FEMU,会导致理论方法和实际应用不符的矛盾,这也是 FEMU 技术很难应用于实桥的主要原因之一。基于不完备测试信息的 FEMU 技术和噪声干扰处理技术有望较好地解决这个问题,目前关于这方面的研究还很少,是亟需发展方向^[69-70]。

(6)充分利用桥梁工程特有的全过程信息。目前 FEMU 研究重点集中于利用运营模态测试信息进行模型修正,未能充分考虑施工监控、交工静动载试验、病害数据库和人工巡检等其他方面信息,而这些信息提供了试验结果之外的结构真实的状况,充分利用这些信息可以缩小模型修正范围、降低修正难度、提高修正精度^[47]。常规的施工监控和成桥荷载试验无法满足 FEMU 的要求,例如,FEMU 需要更高测试精度,静力测试需要更多工况,动力测试应得到更高阶的频率、模态和阻尼信息。如何改进和妥善利用这些信息需要进一步研究。

(7)开发针对桥梁结构的 FEMU 软件。将理论转化为软件,是理论对实践最有效的指导方式,也是实践对理论最直接的检验。国外已有一些 FEMU 方面的商业软件问世,如比利时 LMS 公司的 GATEWAY,比利时 Dynamic Design Solutions 公司的 FEMTools,美国 SDRC 公司的 I-DEAS 等。但这些软件多面向航空、机械等领域,针对土木结构,尤其是桥梁结构特点的 FEMU 软件很少。较多用于桥梁 FEMU 的通用软件平台是 ANSYS,虽然其自带的优化程序支持用户指定设计参数、状态变量和目标函数进行优化计算,但是优化方法有限,效果往往得不到较好的保证。基于现代软件开发技术,开发将有限元分析、参数识别、模型修正一体化的软件,并与 SHM 系统集成,是亟需发展方向。

(8)大力发展有限元模型确认(model validation & verification, MV&V)技术。FEMU 的目的是能重现已有试验结果,而 MV&V 对结构模型的输入参数和试验响应进行不确定性分析,最终目标不再限于重现试验结果,而且能检验模型精度,进而预报

结构行为,并评估置信度。美国能源部所属的 Los Alamos National Laboratory 的工作值得密切关注。

参考文献:

References:

- [1] 李宏男,高东伟,伊廷华.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].力学进展,2008,38(2):151-166.
LI Hong-nan,GAO Dong-wei,YI Ting-hua. Advances in structural health monitoring systems in civil engineering[J]. Advances in Mechanics,2008,38(2):151-166. (in Chinese)
- [2] 梁 鹏,李 斌,王晓光,等.基于桥梁健康监测的传感器优化布置研究现状与发展趋势[J].建筑科学与工程学报,2014,31(1):120-129.
LIANG Peng,LI Bin,WANG Xiao-guang,et al. Research status and development trend of optimal sensor placement based on bridge health monitoring [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(1):120-129. (in Chinese)
- [3] Doebling S W,Farrar C R, Prime M B,et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics:a literature review[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory,1996.
- [4] Liu X G,Fan J S,Nie J G,et al. Behavior of composite rigid frame bridge under bi-directional seismic excitations [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition,2014,1(1):62-71.
- [5] 于金良,杨东升.高墩大跨连续刚构桥梁长期健康监测研究[J].筑路机械与施工机械化,2012,29(8) 72-74.
YU Jin-liang,YANG Dong-sheng. Study on healthy monitoring of high-pier and long-span continuous rigid frame bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2012,29(8):72-74. (in Chinese)
- [6] 方 志,张国刚,唐盛华,等.混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J].中国公路学报,2013,26(3):77-85.
FANG Zhi,ZHANG Guo-gang,TANG Sheng-hua,et al. Finite element modeling and model updating of concrete cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(3):77-85. (in Chinese)
- [7] Brownjohn J M W,Xia P Q,Hao H,et al. Civil structure condition assessment by FE model updating: methodology and case studies[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2001,37(10):761-775.
- [8] Zapicoa J L,Gonzaleza M P,Friswellb M I,et al. Finite element model updating of a small scale bridge [J]. Journal of Sound and Vibration,2003,268(5):993-1012.
- [9] 范立础,袁万城,张启伟.悬索桥结构基于敏感性分析的动力有限元模型修正[J].土木工程学报,2000,33(1):9-14.
FAN Li-chu,YUAN Wan-cheng,ZHANG Qi-wei. Sensitivity-based FE model updating of a suspension bridge[J]. China Civil Engineering Journal,2000,33(1):9-14. (in Chinese)
- [10] Brownjohn J M W,Xia P Q. Dynamic assessment of curved cable-stayed bridge by model updating [J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(2):252-260.
- [11] Hart G C,Yao J T P. System identification in structural dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division,1977,103(6):1089-1104.
- [12] Liu S C,Yao J T P. Structural identification concept [J]. Journal of the Structural Division,1978,104(12):1845-1858.
- [13] Berman A. Limitations on the identification of discrete structural dynamic models[R]. New York:OTIC Document,1984.
- [14] Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices [J]. AIAA Journal,1965,3(2):380-380.
- [15] Ren W X,Peng X L. Baseline finite element modeling of a large span cable-stayed bridge through field ambient vibration tests[J]. Computers & Structures,2005,83(8):536-550.
- [16] Sanayei M,Imbaro G R,McClain J A S,et al. Structural model updating using experimental static measurements[J]. Journal of Structural Engineering,1997,123(6):792-798.
- [17] 宗周红,任伟新.桥梁有限元模型修正和模型确认[M].北京:人民交通出版社,2012.
ZONG Zhou-hong,REN Wei-xin. Finite element model updating and model validation of bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press,2012. (in Chinese)
- [18] Berman A. Mass matrix correction using an incomplete set of measured modes[J]. AIAA Journal,1979,

- 17(10):1147-1148.
- [19] Baruch M. Optimal correction of mass and stiffness matrices using measured modes[J]. AIAA Journal, 1982,20(11):1623-1626.
- [20] Natke H G, Cottin N. Updating mathematical models on the basis of vibration and model test results-a review of experience [C]//IMAC. Proceeding of 4th IMAC. Austin:IMAC,1986:103-108.
- [21] Kabe A M. Stiffness matrix adjustment using mode data[J]. AIAA Journal,1985,23(9):1431-1436.
- [22] Park W, Kim H K, Jongchil P. Finite element model updating for a cable-stayed bridge using manual tuning and sensitivity-based optimization[J]. Structural Engineering International,2012,22(1):14-19.
- [23] Chen J C, Garbat J A. Analytical model improvement using modal test results[J]. AIAA Journal, 1980, 18 (6):684-690.
- [24] Ozaki I, Kimura F, Berz M. Higher-order sensitivity analysis of finite element method by automatic differentiation[J]. Computational Mechanics, 1995, 16(4): 223-234.
- [25] Kim G H, Park Y S. An improved updating parameter selection method and finite element model update using multi objective optimization technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(1): 59-78.
- [26] Jaishi B, Ren W X. Structural finite element model updating using ambient vibration test results[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(4): 617-628.
- [27] Hajela P, Soeiro F J. Recent developments in damage detection based on system identification methods[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1990, 2 (1):1-10.
- [28] Banan M R, Hjelmstad K D. Parameter estimation of structures from static response 2 numerical simulation studies[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11):3259-3283.
- [29] Banan M R, Hjelmstad K D. Parameter estimation of structures from static response 1 computational aspects[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (11):3243-3258.
- [30] 张启伟. 桥梁结构模型修正与损伤识别[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- ZHANG Qi-wei. Bridge structure model updating and damage detection[D]. Shanghai: Tongji University, 1999. (in Chinese)
- [31] 邓苗毅. 基于静力的结构有限元模型修正研究[D]. 福州: 福州大学, 2008.
- DENG Miao-yi. Based on the static research on structure finite element model updating [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2008.
- [32] Wang M L, Heo G, Satpathi D. Dynamic characterization of a long span bridge: a finite element based approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, 16(7): 503-512.
- [33] Link M. Updating of analytical models-review of numerical procedures and application aspects [C]// Ewins D J, Inman D J. Processing of the Structural Dynamics Forum SD 2000. Los Alamos: Research Studies Press, 1999: 193-224.
- [34] Lin R M, Ewins D J. Model updating using frf data [C]//IMAC. Proceedings of the 15th International Seminar on Modal Analysis. Belgium: IMAC, 1990: 141-162.
- [35] Imregun M, Sanliturk K Y, Ewins D J. Finite element model updating using frequency response function data; ii. case study on a medium-size finite element model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995, 9(2): 203-213.
- [36] Imregun M, Visser W J, Ewins D J. Finite element model updating using frequency response function data; i. theory and initial investigation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1995, 9(2): 187-202.
- [37] Visser W J, Imregun M. A technique to update finite element models using frequency response data [C]// IMAC. Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference. Firenze: IMAC, 1991: 462-468.
- [38] Link M, Zhang L. Experience with different procedures for updating structural parameter of analytical models using test data [C]//IMAC. Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference. Sandiego: IMAC, 1992: 730-738.
- [39] 徐张明, 高天明, 沈荣瀛, 等. 一种改进的利用频响函数进行有限元模型修正的方法[J]. 振动与冲击. 2002, 21(3): 43-45.
- XU Zhang-ming, GAO Tian-ming, SHEN Rong-ying, et al. Improved finite element model updating method based on frequency response functions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 43-45. (in Chinese)
- [40] 崔 飞. 桥梁参数识别与承载力评估[D]. 上海: 同济

- 大学,2000.
- CUI Fei. Bridge structural parameter identification and bearing capacity evaluation[D]. Shanghai: Tongji University,2000. (in Chinese)
- [41] 袁旭东,周 晶,黄 梅. 基于静力位移及频率的结构损伤识别神经网络方法[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2005,37(4):488-490.
- YUAN Xu-dong,ZHOU Jing,HUANG Mei. A method of structural damage identification using neural networks based on static displacements and natural frequencies[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2005,37(4):488-490. (in Chinese)
- [42] 宗周红,夏樟华. 联合模态柔度和静力位移的桥梁有限元模型修正方法[J]. 中国公路学报,2008,21(6):43-49.
- ZONG Zhou-hong,XIA Zhang-hua. Finite element model updating method of bridge combined modal flexibility and static displacement[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(6):43-49. (in Chinese)
- [43] 田 军. 有限元模型静力-模态协同修正技术[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- TIAN Jun. Finite element model of static and modal synergy updating technique[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2004. (in Chinese)
- [44] Jaishi B, Ren W X. Structural finite element model updating using ambient vibration test results [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 (4): 617-628.
- [45] 方 志,唐盛华,张国刚,等. 基于多状态下静动态测试数据的斜拉桥模型修正[J]. 中国公路学报,2011,24(1):34-41.
- FANG Zhi,TANG Sheng-hua,ZHANG Guo-gang,et al. Cable-stayed bridge model updating based on static and dynamic test data of multi-state[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (1): 34-41. (in Chinese)
- [46] 张启伟,范立础. 利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别[J]. 同济大学学报:自然科学版,1998,26(5):528-532.
- ZHANG Qi-wei,FAN Li-chu. Based on dynamic and static measurements of the damage identification of bridge structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition,1998,26(5):528-532. (in Chinese)
- [47] 吴向男,徐 岳,梁 鹏,等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报:自然科学版,2013,33(6):49-58.
- WU Xiang-nan,XU Yue,LIANG Peng,et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2013,33(6):49-58. (in Chinese)
- [48] Rutherford B M,Swiler L P,Paez T L,et al. Response surface (meat-model) methods and applications[C]// IMAC. Proceedings of the 24th International Modal Analysis Conference. Albuquerque: IMAC, 2006: 184-197.
- [49] Batmaz I,Tunali S. Small response surface designs for meta model estimation[J]. European Journal of Operational Research,2003,145(2):455-470.
- [50] 任伟新,陈华斌. 基于响应面的桥梁有限元模型修正[J]. 土木工程学报,2008,41(12):73-78.
- REN Wei-xin, CHEN Hua-bin. Response-surface based on finite element model updating of bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(12):73-78. (in Chinese)
- [51] 宗周红,高铭霖,夏樟华. 基于健康监测的连续刚构桥有限元模型确认(I)-基于响应面法的有限元模型修正[J]. 土木工程学报,2011,44(2):90-98.
- ZONG Zhou-hong,GAO Ming-lin,XIA Zhang-hua. Based on the health monitoring of continuous rigid frame bridge finite element model confirmation (I) - based on the response surface method for finite element model updating [J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(2):90-98. (in Chinese)
- [52] 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.
- [53] 郭 力. 面向结构状态评估的大跨桥梁有限元模拟及其应用[D]. 南京:东南大学,2005.
- GUO Li. Structural state assessment oriented finite element modeling of long bridge and application[D]. Nanjing:Southeast University,2005. (in Chinese)
- [54] 侯吉林. 约束子结构模型修正方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- HOU Ji-lin. The constraint substructure method of model updating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010. (in Chinese)
- [55] Hua H X,Sol H,Wilde D W P,et al. On a statistical

- optimization method used in finite element model updating[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(4):1071-1078.
- [56] Alvin K. Finite element model update via bayesian estimation and minimization of dynamic residuals[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(5):879-886.
- [57] Mares C, Surace C. An application of genetic algorithm to identify damage in elastic structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 195(2):195-215.
- [58] 闫桂荣, 段忠东, 欧进萍. 遗传算法在结构模型修正中的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(2):181-186.
YAN Gui-rong, DUAN Zhong-dong, OU Jin-ping. Genetic algorithm in the application of structural model updating[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(2):181-186. (in Chinese)
- [59] 周星德, 明宝华, 潘瑞鸿, 等. 基于遗传算法的降阶模型修正方法研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2007, 27(1):25-28.
ZHOU Xing-de, MING Bao-hua, PAN Rui-hong, et al. Research on modification of model reduction based on genetic algorithms[J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2007, 27(1):25-28. (in Chinese)
- [60] Atalla M J, Inman D J. On model updating using neural networks[J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 1998, 12(1):135-161.
- [61] 何浩祥, 闫维明, 王 卓. 基于子结构和遗传神经网络的递推模型修正方法[J]. *工程力学*, 2008, 25(4):99-105.
HE Hao-xiang, YAN Wei-ming, WANG Zhuo. Step-wise model updating method based on substructures and GA-ANN[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(4):99-105. (in Chinese)
- [62] Xu B, Wu Z S, Chen G D, et al. Direct identification of structural parameters from dynamic responses with neural networks[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, 17(8):931-943.
- [63] 费庆国, 李爱群, 张令弥. 基于神经网络的非线性结构有限元模型修正研究[J]. *宇航学报*, 2005, 26(3):267-269, 281.
FEI Qing-guo, LI Ai-qun, ZHANG Ling-mi. Study on finite element model updating of nonlinear structures using neural network[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(3):267-269, 281. (in Chinese)
- [64] 宗周红, 牛 杰, 王 浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(8):121-130.
ZONG Zhou-hong, NIU Jie, WANG Hao. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(8):121-130. (in Chinese)
- [65] Farrar C R, Sohn H, Hemez F M, et al. Report 14051-ms, damage prognosis: current status and future needs[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [66] 李 惠, 欧进萍. 大型复杂结构的健康监测、损伤累积与安全评定[C]//茹继平, 刘加平, 曲久辉, 等. 中国科学院 2011-2020 年学科发展战略研究专题报告集: 建筑、环境与土木工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011:50-55.
LI Hui, OU Jin-ping. Large complex structure health monitoring, damage accumulation and safety assessment[C]//RU Ji-ping, LIU Jia-ping, QU Jiu-hui, et al. The Research Report of Discipline Development Strategy of the Chinese Academy of Science in 2011-2020: Architecture Environmental and Civil Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011:50-55. (in Chinese)
- [67] 孙正华, 李兆霞, 陈鸿天. 大跨斜拉桥结构行为一致多尺度有限元模拟[J]. *中国公路学报*, 2009, 22(5):68-74.
SUN Zheng-hua, LI Zhao-xia, CHEN Hong-tian. Concurrent multi-scale finite element modeling of long-span cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(5):68-74. (in Chinese)
- [68] Hadjileontiadis L J, Douka E, Trochidis A. Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, 19(3):659-674.
- [69] Friswell M I, Penny J E T. Updating model parameters from frequency domain data via reduced order models[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1990, 4(5):377-391.
- [70] Larsson P O, Sas P. Model updating based on forced vibrations[C]//IMAC. Proceedings of the Testing Using Numerically Stable 10th International Modal Analysis Conference. San Diego: IMAC, 1992:968-974.

