



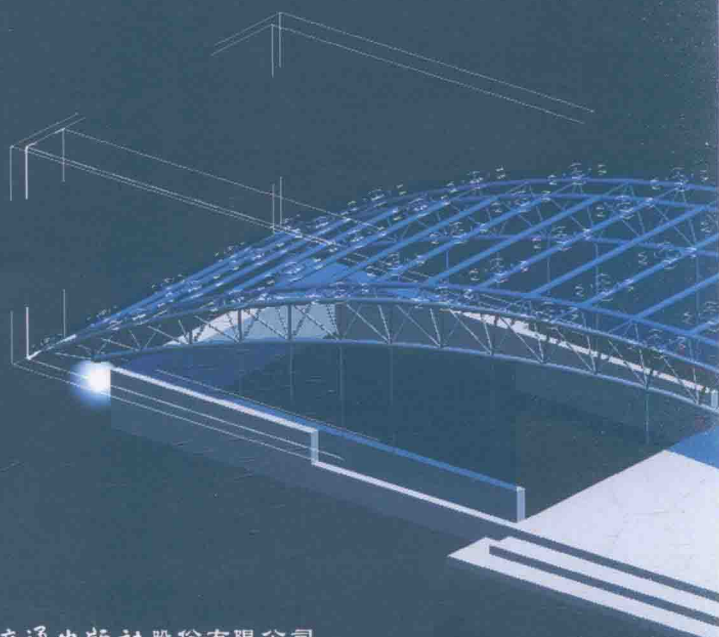
Finite Element Model

Updating Technique

of Bridge Structure Based on Meta Model

基于代理模型的 桥梁结构有限元模型修正技术

刘 洋 / 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

基于代理模型的桥梁结构有限元 模型修正技术

刘 洋 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统总结和阐述了基于代理模型的桥梁结构有限元模型修正技术的算法理论及工程应用成果。第1章及第2章具体介绍了结构有限元模型修正技术的算法理论;第3章详细阐述了代理模型的基本原理及在桥梁有限元模型修正应用中的关键问题;第4章介绍了 Kriging 代理模型在桥梁结构随机有限元模型修正中的应用;第5~7章系统介绍了虚拟变形法作为一种新型代理模型在桥梁结构有限元模型修正应用中的算法原理,并讨论了虚拟变形法在既有损伤桥梁有限元模型修正及桥梁精细化建模中的最新应用成果。

本书可供从事桥梁工程研究、设计及管理的广大科技人员及土木、力学、机械、航天等相关专业人员参考,也可作为上述专业的研究生及高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于代理模型的桥梁结构有限元模型修正技术 / 刘洋著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.9
ISBN 978-7-114-14217-8

I. ①基… II. ①刘… III. ①桥梁结构—结构分析—有限元分析 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 239059 号

书 名: 基于代理模型的桥梁结构有限元模型修正技术

著 作 者: 刘 洋

责任编辑: 王 霞 李 娜

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.5

字 数: 272 千

版 次: 2017 年 9 月 第 1 版

印 次: 2017 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14217-8

定 价: 65.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前言

桥梁结构使用期长,其在服役期内不可避免地受到环境腐蚀、材料老化、荷载的长期效应等因素的影响,导致工作能力逐渐衰退。桥梁结构一旦失去工作能力,将带来巨大的损失,后果不堪设想。因此,对桥梁结构进行服役期内的安全运营监测,及时诊断并发现问题,消除潜在隐患是十分必要的。结构损伤识别是桥梁结构安全运营监测的核心内容。结构损伤识别技术往往需要利用精确的基准模型对桥梁结构的潜在损伤进行定位与定量,这一精确基准模型通常为结构的解析有限元模型,而建立桥梁基准模型则需要利用结构有限元模型修正技术。

利用模型修正技术建立实际桥梁结构的基准有限元模型时,通常会面对算法无法实现的问题。这是由于结构有限元模型修正技术往往需要大量的迭代优化搜索,在每一次迭代运算中,通常需要解析计算桥梁结构的动力特性(频率、阻尼比、振型等),而桥梁结构本身体型巨大、结构自由度趋于无限,通过解析有限元模型求解其动力特性往往需要耗费大量的计算时间,占用大量的计算机存储空间,有些大型桥梁结构的求解甚至无法实现。针对这一问题,建立桥梁结构解析有限元模型的替代模型,即代理模型(Meta-model),提高实际桥梁结构有限元模型修正的计算效率,从而使大型复杂桥梁结构的有限元模型修正得以实现。因此,建立合理的代理模型以实现实际桥梁结构的有限元模型修正具有重要的理论研究意义与实际工程应用价值。

基于上述背景,通过选取解析有限元分析得到的结构响应与修正参数特征样本,利用数理统计与回归分析,建立桥梁结构响应与模型修正参数之间的关系模型,利用该代理模型去替代结构的解析有限元模型,从而为解决实际大型桥梁结构有限元模型修正的计算效率问题提供了一种有效手段。本书系统总结了结构有限元模型修正的算法理论,具体讨论了代理模型在桥梁有限元模型修正应用中的关键问题,详细阐述了新型代理模型在桥梁结构有限元模型修正中的应用情况。本书第1章及第2章具体介绍了结构有限元模型修正技术的算法理论;第3章详细阐述了代理模型的基本原理及在桥梁有限元模型修正应用中的关键问题;第4章介绍了Kriging代理模型在桥梁结构随机有限元模型修正中

的应用;第5~7章系统介绍了虚拟变形法作为一种新型代理模型在桥梁结构有限元模型修正应用中的算法原理,并讨论了虚拟变形法在既有损伤桥梁有限元模型修正及桥梁精细化建模中的最新应用成果。

本书的研究工作先后得到了住房城乡建设部科学技术项目计划(资助号:2016-K4-068、2015-K5-014)、战略性国际科技创新合作重点专项(资助号:2016YFE0202400)、国家自然科学基金(资助号:51008097)、黑龙江省自然科学基金面上项目(资助号:E201431)等项目的资助;同时得到了研究生聂珏光、李阳、谭志成、杨昌熙、秦龙飞、徐德建等的大力协助,作者有幸能够与研究生们共同探索基于代理模型的桥梁结构有限元模型修正技术这一富有挑战性的研究方向,部分研究成果为作者与研究生们合作完成;另外,本书参考并引用了国内外有关专家的研究成果,在此对上述单位、提供帮助的同志及相关领导专家表示衷心的感谢!

作者

2017年6月

目录

第1篇 结构有限元模型修正技术

第1章 绪论	3
1.1 结构有限元模型修正方法概述	3
1.2 结构有限元模型修正方法的研究现状	4
1.3 模型修正技术在桥梁工程应用中的关键问题	9
第2章 结构有限元模型修正技术	12
2.1 结构有限元模型修正的前处理技术	12
2.2 直接类有限元模型修正方法	17
2.3 迭代类有限元模型修正方法	25
2.4 基于智能优化技术的模型修正方法	32

第2篇 代理模型在桥梁有限元模型修正中的应用

第3章 代理模型及其在有限元模型修正中的应用	55
3.1 代理模型的基本思想	55
3.2 代理模型的组成	56
3.3 响应面代理模型	63
3.4 Kriging 代理模型	65
3.5 人工神经网络代理模型	68
3.6 响应面与 Kriging 代理模型的性能比较	69
3.7 基于代理模型的有限元模型修正方法	81
第4章 基于 Kriging 的桥梁结构随机有限元模型修正	85
4.1 随机有限元模型	85

4.2	基于 Kriging 的桥梁结构随机有限元模型修正	86
4.3	某一连续刚构桥的代理模型建立	89
4.4	某一连续刚构桥的随机有限元模型修正	96
 第 3 篇 新型代理模型在桥梁有限元模型修正中的应用		
第 5 章	基于虚拟变形法的桥梁有限元代理模型	105
5.1	虚拟变形法的基本理论	105
5.2	基于虚拟变形法的杆单元代理模型	110
5.3	基于虚拟变形法的平面梁单元代理模型	113
5.4	基于虚拟变形法的空间梁单元代理模型	117
5.5	基于虚拟变形法的超单元代理模型	118
5.6	基于虚拟变形法的桥梁有限元模型修正	121
5.7	某一连续梁桥梁的有限元模型修正	127
第 6 章	基于超单元虚拟变形法的损伤桥梁模型修正	132
6.1	损伤桥梁工程概况	132
6.2	损伤桥梁静力荷载试验	133
6.3	损伤桥梁代理模型的建立	135
6.4	损伤桥梁结构有限元模型修正	142
第 7 章	超单元虚拟变形法在桥梁精细化建模中的应用	151
7.1	实桥工程概况	151
7.2	实桥静力荷载试验	152
7.3	基于组合截面超单元虚拟变形法的实桥代理模型	153
7.4	基于组合截面超单元虚拟变形法的桥梁精细化建模	162
参考文献		171

第1篇

结构有限元模型修正技术

第1章 绪论

1.1 结构有限元模型修正方法概述

随着国家经济的发展,大型桥梁与基础设施建设在当代社会中的需求也愈发强烈。对于桥梁工程结构而言,其设计寿命周期可达到一百年;同时,由于桥梁结构不可避免地会受到外界环境侵蚀、动荷载疲劳效应与结构自身材料老化的影响,从而导致其安全性与稳定性下降,甚至引发重大事故。因此,近年来国内外大批学者都聚焦于桥梁结构安全运营监测与评估方向的研究,而建立精确的桥梁结构基准有限元模型则正是这一研究方向的核心内容之一。

由于桥梁工程结构分析模型自由度众多,土体和结构存在相互作用、无法定量确定阻尼耗能机制等困难,再加上各种理论假设的引入、边界条件的近似性、节点连接刚度的不恰当模拟等因素的影响,使得理论的有限元模型与真实结构行为之间存在较大的差异。为了消除这一差异,就要依靠模型修正技术来校正理论的有限元模型,进而获得与实际结构相一致的分析模型。因此,如何有效地修正结构的有限元模型就具有重要的意义,而且一直是国内外研究的重要课题,在机械、航天、汽车等领域都有深入研究。

结构有限元模型修正是典型的结构动力反问题,即通过结构的测试信息识别结构的物理参数或模态参数。由于反问题的解具有非唯一性,而且求解的方程通常是病态的,所以从理论上讲,有限元模型修正理论存在很大的挑战。此外,结构有限元模型修正的成功与否,往往与结构测试信息的数量及精确性息息相关。土木工程结构的实测信息往往十分有限,而且测试信息通常受到各种噪声的干扰,从而使得模型修正技术在实际桥梁工程的应用中受到了很多限制。因此,结构有限元模型修正技术一直是桥梁结构健康监测领域的研究热点。

本章主要介绍结构有限元模型修正技术的原理、方法分类及其在桥梁工程结构应用中所面临的问题等内容。

结构有限元模型修正技术采用反映结构真实动态特性的测试模态参数(频率、振型)或频响函数修正理论的有限元模型,使得修正后的结构有限元模型的解析模态参数或频响函数与实测结果相一致。该项技术的原理如图1-1所示。

通常,结构有限元模型修正最终都要转化为一个优化问题,因此,结构有限元模型修正的成功与否取决于如下因素:所选择的优化变量(结构模型修正参数)是否合理、所建立的优化目标函数是否正确、所采用的优化算法是否高效且具有全局寻优性等。综上,结构有限元模型修正的整体流程如图1-2所示。

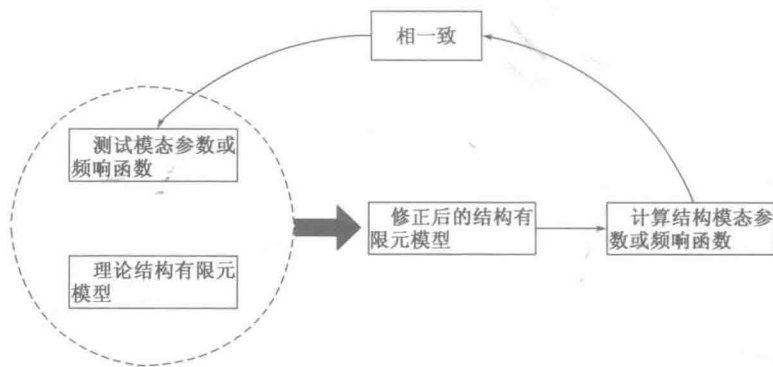


图 1-1 结构有限元模型修正的原理框图



图 1-2 结构有限元模型修正的整体流程

1.2 结构有限元模型修正方法的研究现状

根据结构有限元模型修正技术所采用的修正参数与优化算法的差异,将修正方法分为三类,即:直接类修正算法、迭代类修正算法以及基于智能优化技术的修正算法。

1.2.1 直接类修正算法

此类修正算法在结构有限元模型修正中的应用较早。其核心思想可以概括为直接修正结构的刚度矩阵与质量矩阵,从而实现对结构有限元模型的修正,其主要可分为参考基修正算法与元素型最优矩阵法两大类。

1.2.1.1 参考基修正算法

参考基修正算法是一种对模型的质量矩阵与刚度矩阵直接修正的算法,其最初由 Baruch 与 Berman 提出,修正过程为:以质量、刚度或模态参数中的某一参数作为参考基准,构造优化目标函数并确定模型约束条件,进而对另外两个参数进行修正。相较于矩阵型修正算法,其结构有限元模型修正对象为模型中的某一不确定性参数,如:弹性模量、位移、频率等,故在修正过程中,其对修正参数的正确选取就显得尤为重要。该方法虽然解决了测试模态参数的非完整性问题,但对模型矩阵的修改却破坏了其稀疏对称性,无法保持模型的物理意义。

在国内外的研究中,很多学者都做出了大量贡献。为了弥补参考基修正算法无法保持模型的物理意义的不足,Neidbai 通过理论分析得到模型的模态参数,在满足其关于质量与刚度矩阵的加权正交性的要求下,再修正结构有限元模型的质量与刚度矩阵,从而保证了有限元模

型的物理意义。Masoud Sanayei 与 Christopher DiCarlo 将这一算法运用到了大型桥梁结构的有限元模型修正之中,并用一座两跨桥梁结构的 17 阶实测频率与振型数据对该修正方法进行了验证,证明了修正后结构有限元模型的正确性。Masoud Sanayei 与 Peeyush Rohela 还提出了自动化的结构有限元模型修正的思想,该方法通过使用已建立的大型工程结构健康监测的参数识别系统,进而对结构有限元模型的相关参数进行自动化修正,达到有限元修正的目的。而该系统的有效性也已由两个大型结构的破坏性试验结果得到了验证,为该系统后续发展推广奠定了坚实的基础。

1.2.1.2 元素型最优矩阵法

元素型最优矩阵法由离散化的矩阵型修正方法得到,即针对模型矩阵的不同区域进行修正。相较于矩阵型修正算法,该算法能更容易保证修正后模型矩阵的带状稀疏性,进而保证模型与实际结构间的物理相关性,即元素型修正算法能够更加自由地选取修正参数。不过这两种算法的优化目标函数在形式上大致相同,其区别只是修正对象的差异,一个是模型整体矩阵,而另一个则是矩阵中的某一元素。

其中最优元素法最受学者推崇,Kabe 最开始指出模型特性矩阵中的相应元素应向较小的趋势修正,而这一过程可使绝对值小的元素发生过大改变,从而带来巨大误差。此后,Kabe 提出的改进思路则是采用元素变化的相对误差作为模型修正的优化目标函数,但经研究发现,该方法存在计算量过大、耗时过多等缺点。因此,为了提高计算效率,张德文改进了该方法修正的约束条件,提出了一种效果良好的基于简化约束条件的等效方法。此后,Kammer 在 Kabe 的方法基础上找到了另一个效率更高的切入点,即模型的质量矩阵。另一方面,Lim 在矩阵型修正算法中引入了子结构的思想,即通过对子结构的表征元素进行修正而间接地修正模型的刚度矩阵。相较于上述其他算法,该算法获得的修正后模型则能够更好地保持其物理意义,且鉴于其以子结构为修正参数,因此该算法还适用于结构损伤识别。

在国内的相关研究中,吴晓菊曾综述了结构动力模型修正方法的一般理论及其发展,并提出在矩阵型修正算法中将质量矩阵与刚度矩阵进行摄动的思想,进而通过数学方法得到其摄动量的大小,修正质量矩阵与刚度矩阵的同时还考虑二者的相关性。基于子结构校正因子的矩阵型修正算法便应运而生,讨论了有限元模型修正方法中的若干重要技术问题,还指出了其能用于结构系统识别、损伤识别以及健康监测等领域的广阔前景。

1.2.2 迭代类修正算法

相比于直接类修正算法,迭代类修正算法有着可灵活选择修正参数、易于保证修正后模型物理意义的优点,但缺点是需要求解非线性优化问题,故存在计算量庞大的隐患。其主要可分为:基于灵敏度的修正算法,基于概率论的修正算法,基于频响函数的修正算法与基于反共振频率的修正算法。

1.2.2.1 基于灵敏度的修正算法

基于灵敏度的修正算法的理论基础为一阶泰勒级数,其能简化修正参数与计算模态参数之间的关系,以线性代替非线性,迭代优化过程使得修正参数具有稳定的变化步长,最终得到

修正后的结构有限元精确模型。基于灵敏度的修正算法在选取修正参数时具有较大灵活性,还能有效地保证修正后模型的物理意义,但由于迭代优化需要求解最小二乘问题,为了保证求解过程能顺利进行,修正参数的选择需要合理化,使其数量小于测试模态参数的数量。除此之外,灵敏度矩阵存在病态问题这一缺点,因此在计算时需要进行正则化,而导致该算法的计算量相对较大,耗时也相对较多。

针对这一问题,Link 就对基于灵敏度分析的模型修正方法进行了深入研究,并提出有效方法以解决模型修正过程中的优化迭代问题,起到了确定模型修正参数、定位模型误差的效果。模型参数选择的重要性也更加显露无遗,其对结构有限元模型修正结果的正确性起着至关重要的作用。Q. W. Zhang、T. Y. P. Chang 与 C. C. Chang 则将参考基修正算法引入到斜拉桥的频率求解之中,利用一座主跨为 430m 的双索面斜拉桥的荷载试验数据对各种结构参数的灵敏度进行了研究,并以此为依据修正结构有限元模型,得到的修正后模型分析结果与实测数据吻合度较高,进一步证明了该修正方法对精确预测斜拉桥动态响应的可行性。

在国内的相关研究中,为了解决结构有限元模型修正的计算效率问题,大批学者也在不断探索尝试以得到更多更高效的修正算法。刘洋、段忠东与周道成便提出了基于模态综合技术的结构有限元模型修正方法,以解决结构动力分析中庞大的计算量问题,主要通过联立转换后的振型与缩减后的频率来构造优化目标函数,并在此基础上进行结构优化迭代求解。该方法能有效地提高计算效率并保证计算精度,是大型桥梁结构有限元模型修正的上选方法。

1.2.2.2 基于概率论的修正算法

此类算法中被广为接受的是最小方差法。该算法假设的前提条件为:结构的实测模态参数与结构的修正参数预估值都存在一定程度的误差。虽然考虑结构修正参数的不确定性,但该算法最终通过使结构修正参数估计值的误差(以方差形式表示)最小而得到的修正参数为确定值,并非一个不确定的区间结果。

最小方差法最初由 Collins 提出,其假定实测参数的方差与修正参数预估值的方差二者之间相互独立。在此基础上,Friswell 指出,上述假设在模型修正的第一步迭代是正确的,但是在后续的迭代过程中,测试参数的误差参与计算修正参数估计值。在之后的研究中,Beck 提出的算法则成为基于概率论的修正算法的代表,其实现结构有限元模型修正的方式主要为对结构修正参数的概率分布进行优化搜索。但是,由于每次的估计计算均需要进行高维积分,会产生庞大的计算量,因此 Beck 又提出了近似的计算方法以解决这一问题。假设在进行结构有限元模型修正时的数据点数量足够多,且结构的模型与测试模态参数误差也均相对较小,则在对结构修正参数的概率分布进行估计时,那些来自未测试自由度的影响则可酌情忽略,从而使计算效率得以提升。以此为基础,Beck 在后续的研究中又进一步利用贝叶斯统计理论,而其最新的研究成果也表明,结构有限元模型修正结果的不唯一性也能在考虑贝叶斯的修正方法中得到更好的解决。

1.2.2.3 基于频响函数的修正算法

基于频响函数的修正算法是从频域的角度考虑结构有限元模型的修正问题,一般分为以下两类:结构输入误差最小修正算法与结构输出误差最小修正算法。这两种算法的基础都

是结构频域振动方程,由于精确模拟阻尼的难度较大,故通常采用比例阻尼的方法解决此问题。

结构输入误差最小修正算法的优点为:目标函数与结构修正参数之间呈线性关系。但该方法需要对结构的全部自由度进行测试,而这在实际工程中必然无法实现。若采用模型缩聚技术对结构自身的自由度数量进行降维处理,则又会导致目标函数与修正参数之间的非线性关系,将大幅提升模型修正的难度。在国内外的相关研究中,Fritzen 提出利用工具变量法对估计参数的有偏性进行消除,Wang 也利用类似的算法进行研究,而为了得到参数的无偏估计值,又引入了一个与测量噪声不相关的系数矩阵。Goyder 提出降低参数估计值的有偏性的方法为给误差函数加权处理,其算法的有效性也从一个单自由度结构得到了验证。在后续的研究中,Friswell 则将该算法推广至多自由度结构的有限元模型修正之中。

结构输出误差最小修正算法的优点为:若实测数据的噪声均值为零,则所得到的估计参数具有无偏性,而且该算法甚至不需要对结构有限元模型进行缩聚处理。然而此类算法也有其自身的缺点,例如:优化迭代计算时需要求解非线性问题,而且计算耗时较多。在国内外有关结构输出误差最小修正算法的研究中,Mottershead 与 Shao 的优化求解是通过最小二乘法进行的。在此以后的研究中,Arruda 又将优化求解的算法拓展至线性搜索的领域。在上述两种优化算法的基础上,Simonian 又提出了基于频域滤波器的结构有限元模型修正算法。

基于频响函数的修正算法的优点在于能够避免由模态参数识别而带来计算误差,但是该算法的使用却不得不将阻尼引入模型修正。由于结构阻尼的机制十分复杂,通常情况下对阻尼大小进行准确估计是无法实现的,因此这也为结构有限元模型修正带来了巨大困难。

1.2.2.4 基于反共振频率的修正算法

许多现有的结构有限元模型修正算法都要依靠识别得到的频率,振型等模态信息进行模型修正。但相较于频率而言,结构振型在有限元模型修正中的应用往往具有更大的阻力。鉴于测试识别振型具有较大的误差,而在使用振型时还需要经过进一步扩展,而且其灵敏度的计算方法也比较复杂等原因,振型的应用难度将远远高于频率。但是,为了尽可能利用更多的测试信息,在进行结构有限元模型修正时又往往必须利用振型信息。因此,一些学者提出利用反共振频率代替结构振型进行后续计算,而这一算法也得到了较好的结构有限元模型修正效果。

相对振型而言,反共振频率具有更易测量且精度较高的优点。在国内外的研究中,Mottershead 便首先指出能够利用反共振频率对结构的振型信息进行很好的代替;除此之外,他还给出了基于反共振频率的灵敏度的具体计算方法。Lallement 也将反共振频率应用于模型修正工作中,并用一个数值算例证明了该方法的有效性与可行性。Jones 则利用反共振频率的修正算法对一个试验结构的有限元模型进行了修正。

尽管反共振频率能够较好地应用于结构有限元模型修正,但计算反共振频率需要使用系统的输入信息。而对于实际桥梁工程结构,结构的模态测试工作往往是利用环境激励来进行,即结构的输入信息为未知的或不可测的,因而此类方法还很难应用于桥梁工程结构的有限元模型修正问题中,仅适用于输入已知的结构有限元模型修正问题。

1.2.3 基于智能优化技术的修正算法

究其本质,结构有限元模型修正问题实则为一个优化求解问题。对于结构有限元模型修正的优化目标函数而言,其往往具有较高的非线性,因此其优化结果将具有多个局部最优点。由此可知,结构有限元模型修正结果的好坏取决于能否很好地跳过局部最优点而对全局最优点进行搜索。根据搜索方法类别的不同,其主要可分为:基于梯度搜索的优化算法,基于随机搜索的优化算法,人工神经网络算法以及多目标优化算法。

1.2.3.1 基于梯度搜索的优化算法

在国内外的研究中,Modak 与 Chang 主要探索了基于梯度搜索的结构有限元模型修正优化算法的应用。该算法具有较高的计算效率,然而却十分容易陷入局部最优解的情况。此后,为了解决上述问题,Teughels 提出了耦合局部最优法。该算法的核心思想为:虽然同样采用多点同时搜索,但其具有独特的协同搜索机制。具体而言,在进行优化搜索时,各点数据之间可通过相互交换信息而确定最优的搜索方向,从而使得各点均沿着最优搜索方向共同变化,并最终收敛于计算结果的全局最优点。

虽然耦合局部最优法具有其独特性与高效性,但其在实际工程中的应用也存在着一些问题,具体包括:参数取值的好坏直接决定算法效率的高低;初始种群的选择对最终搜索结果具有较大影响;该算法主要依赖梯度信息,而一旦梯度信息无法精确确定时,该算法便容易陷入局部最优的情况。

1.2.3.2 基于随机搜索的优化算法

基于随机搜索的优化算法在实际工程中具有相当广泛的应用,具体而言其可分为以下几类:模拟退火算法、遗传算法以及混沌优化算法。在国内外的相关研究中,Levin 首先在结构有限元模型修正的应用中讨论了模拟退火算法与遗传算法的特点与区别,并进一步提出了一种新型的混合模拟退火算法。他认为对于较传统的遗传算法而言,该算法对于解决结构模型修正的问题具有更强的适应性。混沌优化算法的特点为利用混沌运动本身所具有的遍历性而对修正目标进行优化搜索,例如产生混沌系统的来源可采用一维的 Logistic 映射。

总之,由于上述方法的搜索均具有随机性特点,所以其计算效率难免相对较低,从而导致其难以解决大型结构的有限元模型修正问题。

1.2.3.3 人工神经网络算法

作为一种智能优化算法,人工神经网络算法在解决结构有限元模型修正问题时能够利用其特有的学习能力,这样便大大提高了算法的有效性。其算法基本思想可概括为:首先根据结构实际情况采集各种不同的训练样本,从而使搭建的神经网络平台具有学习能力,而该网络中每个样本的来源则是所选修正参数的不同组合;然后再将结构的模态或频率信息以向量的形式输入所训练的网络中;最后的修正参数结果即为通过网络计算机而得到的输出向量。简而言之,该算法即将修正参数代入原始有限元模型之中,从而由输出结果得到修正后的结构有限元模型。

相较于其他修正算法,人工神经网络修正算法的优点有:在优化迭代的计算过程中,其独有的学习能力能够有效地避免使结构陷入局部最优解;算法具有一定的抗噪能力;算法并非需要完备的结构测试自由度信息。综上所述,此类算法适用于大型结构的有限元模型修正问题,然而该算法的计算时间需求较大,而且为了得到良好的学习能力通常需要大量的训练样本,这些问题将是算法后续发展所面临的挑战。

1.2.3.4 多目标优化算法

上文所介绍的各类优化算法在解决结构有限元模型修正中的问题时均是从单目标优化的角度出发,因而不需考虑多目标优化过程中如何确定优化目标函数中的权值。多目标优化的本质就是要求各个优化目标分量均能达到最优状态,然而这一过程的实现通常都十分困难,因此,对多目标优化问题而言,满足约束条件的最优解将不再具有唯一性,而实际修正结果往往是得到一组结构的非劣解,亦即 Pareto 解集。

虽然相较于单目标优化算法而言,基于多目标优化算法的结构有限元模型修正算法能够很好地解决优化目标函数中权值选择的问题,但此类算法仍然具有计算效率较低的缺点,从而限制了其在大型结构有限元模型修正中的应用。

1.3 模型修正技术在桥梁工程应用中的关键问题

虽然结构有限元模型修正技术已经发展了几十年,但该项技术在土木工程结构中的应用仍然面临着巨大的挑战。这是由于该技术结构体型庞大、自由度众多,而且往往得到的测试信息十分有限;节点连接复杂,通常很难精确地给予模拟;结构可选的修正参数众多,而且参数本身往往具有不确定性;结构的阻尼机理复杂,很难准确地修正结构的阻尼等。上述这些因素的存在,使得土木工程结构的有限元模型修正问题变得更加复杂、更具有挑战性。

1.3.1 高性能优化算法的应用问题

通过前述修正方法的讨论可知,模型修正问题最终将转化为一个优化问题。模型修正的目标函数往往是非线性的,而且具有多个局部最优点。因此,如何有效地跳出局部最优点而到达全局最优点对修正结果的好坏至关重要。同时,随着结构愈加复杂,优化变量的数量呈几何级数增长,目标函数曲面变得十分复杂,从而要求优化算法又要具有高效性。

许多学者都针对这一问题进行了探讨和研究。Levin 建立了基于频响函数的优化目标函数,分别利用模拟退火算法、遗传算法寻找该优化问题的最优解。经过计算,Levin 得出结论:模拟退火算法比遗传算法更适合于解决模型修正问题。但无论是模拟退火算法还是遗传算法,均是基于随机搜索的优化算法。因此,其计算效率较低,难以解决大型结构的模型修正问题。

Modak 和 Chang 探索了基于梯度信息的优化算法在模型修正中的应用。同遗传算法相比,基于梯度信息的优化算法计算效率较高,但容易陷入局部最优解。最近,Teughels 提出了耦合局部最优法,该法是一种高效的全局优化算法。Kwon 将 Taguchi 方法引入模型修正中,

该法不但是一种高效的优化方法,而且其修正结果还具有很好的抗噪能力。但以上两种算法目前仅用于解决简单结构的修正问题,能否解决大型结构的模型修正问题还是未知。

尽管已有多钟不同的优化方法用于解决模型修正的优化问题,但还无法确定哪种算法最为有效。不同的算法还只适用于解决不同具体结构的模型修正问题,仍不具备普适性。因此,高性能优化算法的开发仍是模型修正技术所需解决的一个重要问题。

1.3.2 模型修正参数的选择问题

修正结构有限元模型时,可供选择的修正参数通常有很多,如结构的单元刚度矩阵、结构的几何参数、结构的物理参数等。而修正结果的成功与否同所选的修正参数是息息相关的。因此,如何从众多的参数中准确地选择修正参数是模型修正的一个重要问题。

针对这一问题,一些学者进行了探讨和研究。Mottershead 对如何修正结构的节点有限元模型进行了探索。他的研究表明,在节点处,对测试模态参数比较敏感的参数往往不是结构的刚度,而是节点处的几何参数。Gladwell 则以单元的形函数为出发点提出了 Generic 单元。该单元矩阵中含有优化变量(修正参数),若以此单元建立结构的有限元模型,则可通过修正较少的参数从而修正整个结构模型。该法适用于建模误差较大时的情况。Kim 提出通过灵敏度分析将结构划分成不同的子结构,以子结构为单位进行修正。这样可大大减少修正参数的数量,该法适用于解决板壳结构的修正问题。此后,Friswell 提出利用特征子集选择的方法进行修正参数的选择,该方法还可用于识别结构的损伤。

总之,选择不同的参数及不同参数组合,其修正结果往往不同,而且修正参数的选择还要依靠工程技术人员经验,从而导致修正参数的选择具有一定的主观性。因此,参数选择问题仍然是模型修正面临的一个挑战。

1.3.3 节点及边界条件的修正问题

结构节点及边界条件往往是容易产生建模误差的地方。这是由于:一方面,有限元理论采用了一定的理论假设,只是将节点的连接简单地处理为刚接或铰接;另一方面,节点处的构造通常比较复杂,难以精确地模拟。

实际结构的节点连接方式通常很难简单地用理想的铰接或刚接来模拟。节点的真实状态往往处于铰接与刚接之间,即半刚性连接。为了考虑节点半刚性的影响,Law 提出了一种混合单元。在该混合单元中,含有模拟节点半刚性的优化变量,模型修正时,通过调节变量值以达到修正节点刚度的目的。此后,Law 将超单元引入该方法中,有效地减少了修正参数的数量,并采用该方法修正了青马大桥有限元模型。

目前,针对土木结构中节点及结构边界条件的修正问题的研究还十分有限。因此,如何解决结构的节点及边界条件的修正问题,仍是一个不可忽视的方面。

1.3.4 不确定性因素对模型修正结果的影响问题

结构的不确定性可以分为两类:一类不确定性存在于测试结果本身,这类不确定性往往来自于测试噪声、信号处理方法误差、测试设备的系统误差等原因,通常此类不确定性被称为