



Zhongxia Chengshi Gongqiao Jianmo Yu Sunshang Shibie

陈 淮 杜思义 何 伟 殷学纲◎编著

中下承式拱桥

建模与损伤识别



人民交通出版社

China Communications Press



Zhongxia Chengshi Gongqiao Jianmo Yu Sunshang Shibie

陈 淮 杜思义 何 伟 殷学纲◎编著

中下承式拱桥

建模与损伤识别



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书结合中、下承式拱桥的结构特点,采用理论分析、模型试验、数值仿真、实桥测试等方法系统地研究了中、下承式拱桥健康监测与损伤识别中的基本理论、关键技术及监测实现等。全书分为10章,主要内容包括:结构损伤识别技术;吊杆系张力计算;矩阵摄动相关理论;模型修正与损伤识别相关理论与方法;结构损伤识别的单元矩阵摄动方法研究;中、下承式拱桥的损伤特点;梁式构件损伤方法;吊杆张力计算模型;中、下承式拱桥吊杆损伤识别方法;结合郑州黄河二桥主桥结构特点,探讨了中、下承式拱桥健康监测技术。

本书可供桥梁、建筑结构、交通、力学、水利等工程领域的技术人员参考,也可供相关专业的老师、学生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

中下承式拱桥建模与损伤识别/陈淮等编著. —北京:人民交通出版社,2012.9

ISBN 978-7-114-09973-1

I. ①中… II. ①陈… III. ①中承式桥—拱桥—建立模型②下承式桥—拱桥—建立模型③中承式桥—拱桥—损伤(力学)④下承式桥—拱桥—损伤(力学) IV. ①U448.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第173835号

书 名: 中下承式拱桥建模与损伤识别

著 作 者: 陈 淮 杜思义 何 伟 殷学纲

责任编辑: 刘彩云

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 13

字 数: 210千

版 次: 2012年9月 第1版

印 次: 2012年9月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09973-1

定 价: 39.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

中、下承式拱桥因其桥型美观、跨越能力强、整体稳定性好等优点而成为目前大跨径桥梁建设中的常用桥型。由于中、下承式拱桥结构受力复杂,运营期监测技术不成熟,也出现了多起中、下承式拱桥垮塌事故,造成较大的人员伤亡和经济损失。桥梁垮塌等突发性事故一般与其健康状态有关,若能及时对桥梁进行健康监测与损伤识别,多数桥梁重大事故是可以避免的。本书作者在高等学校博士学科点专项科研基金(200804590006)、河南省杰出人才计划项目(084200510003)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2010GGJS-127)等多个科研项目的资助下,结合中、下承式拱桥的结构特点,采用理论分析、模型实验、数值仿真、实桥测试等方法系统地研究了中、下承式拱桥健康监测与损伤识别中的基本理论、关键技术及监测实现等,现将主要成果分10章结集出版。

第1章从桥梁健康监测系统、桥梁检测、模态分析、模型修正、损伤识别、状态评估等方面介绍了桥梁结构健康监测技术,阐述了结构损伤识别技术与中、下承式拱桥吊杆张力测定技术的相关研究成果,提出了中、下承式拱桥健康监测与损伤识别亟待研究的几个问题。

第2章介绍了中、下承式拱桥结构特点与吊杆系张力计算。根据中、下承式拱桥结构特点,分别介绍了拱肋、桥面系、吊杆系等刚度矩阵的形成,探讨了吊杆系张力计算方法。

第3章介绍了矩阵摄动相关理论基础、单元矩阵摄动的显式表达式以及单元矩阵摄动的基本动力学公式。

第4章论述了模型修正与损伤识别有限元基准模型建立的相关理论与方法,分析了模型误差与测量噪声对结构损伤识别的影响,介绍了模型修正与损伤识别的算法,提出了结构损伤识别的筛选法及联合筛选法。

第5章进行了结构损伤识别的单元矩阵摄动方法实验验证研究,提出了采用附加质量模拟结构损伤的动测识别实验方法。从理论上给出了改变结构质量、刚度后的特征对表达式,证明了结构在只有一处损伤的情况下,单元质量增加与刚度减少的等价关系;采用附加质量模拟简支钢梁结构损伤,进行了结构损伤识别的单元矩阵摄动方法的动力检测实验验证。

第6章介绍了中、下承式拱桥的损伤特点。以郑州黄河二桥主桥为研究对象,建立了其有限元初始模型,并采用摄动理论修改了郑州黄河二桥主桥的主要设计参数,建立了其基准模型,为进行该桥梁的损伤识别和健康监测打下了基础。

第7章针对中、下承式拱桥中横梁、系杆梁等梁式构件,提出了基于频率和振型摄动识别梁式构件损伤的方法,给出了基于频率和振型摄动的结构损伤识别方程组的构成方式。损伤识别时,根据振型变化建立损伤识别初定方程和确定方程,通过振型摄动求解损伤单元位置和损伤程度,再将识别结果代入基于频率摄动建立的损伤校核方程进行校核,以保证损伤识别结果的准确性和唯一性,提高损伤识别的精度和效率。

第8章研究了基于振动法测试吊杆张力的计算模型。考虑中、下承式拱桥吊杆结构特点,给出了复杂边界条件下吊杆张力与其横向振动频率关系的隐式表达式。为便于工程应用,分别给出了考虑简单边界条件时吊杆张力计算的显式表达式和实用计算式,以及复杂边界条件下吊杆张力与其横向振动频率关系的显式表达式;基于 Rayleigh 法给出了吊杆张力与其第一阶频率关系的显式表达式。根据郑州黄河二桥主桥吊杆现场测试数据,分析了各公式的特点与应用条件。

第9章研究了中、下承式拱桥吊杆损伤识别方法。基于摄动有限元理论研究了吊杆钢丝断裂、钢丝锈蚀、锚固失效、钢丝屈服等损伤对吊杆系内力和桥梁位移的影响;以郑州黄河二桥主桥为背景,给出了吊杆损伤对桥梁结构静力性能与动力特性的影响规律,提出了通过吊杆张力变化、桥面位移变化,或基于节点间位移差变化来识别吊杆损伤的方法。

第10章结合郑州黄河二桥主桥结构特点,探讨了中、下承式拱桥健康监测技术,给出了郑州黄河二桥主桥健康监测流程以及健康档案的建立方法,并对郑州黄河二桥主桥进行了健康状态评估。

本书由陈淮教授、杜思义副教授、何伟副教授和殷学纲教授编著,在项目研究过程中,孙增寿、李静斌、胡锋等同志参加了相关模型实验和现场测试工作,在此表示感谢。

由于著作者水平有限,本书的错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 6 月于郑州

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 桥梁结构健康监测技术	2
1.2 结构损伤识别技术研究概况	11
1.3 中、下承式拱桥吊杆张力测定技术研究概况	16
1.4 中、下承式拱桥健康监测与损伤识别技术亟待研究的几个问题	18
第 2 章 中、下承式拱桥结构特点与吊杆系张力计算	29
2.1 中、下承式拱桥结构特点	29
2.2 中、下承式拱桥吊杆系张力计算	30
2.3 实例分析	50
第 3 章 结构振动分析的矩阵摄动基本理论	66
3.1 矩阵摄动理论基础	66
3.2 单元矩阵摄动的显式表达式	67
3.3 单元矩阵摄动的基本动力学公式	73
3.4 计算实例	77
第 4 章 基于频率变化与单元矩阵摄动理论的结构损伤识别方法	81
4.1 模型修正的相关理论	81
4.2 结构损伤识别的数学模型	82
4.3 模型误差与测量噪声对结构损伤识别的影响	87
4.4 模型修正与结构损伤识别的算法	88
4.5 结构损伤识别的联合筛选算法	96
第 5 章 结构损伤识别的单元矩阵摄动方法实验证明	98

5.1	结构损伤识别的实验方法	98
5.2	结构单损伤时单元质量增加与刚度减少的等价关系	101
5.3	采用附加质量模拟结构损伤的动测识别实验	103
5.4	简支钢梁附加质量模拟结构损伤动测识别实验	104
第6章	中、下承式拱桥损伤特点与有限元模型	114
6.1	中、下承式拱桥的损伤特点	114
6.2	郑州黄河二桥主桥有限元初始模型	116
6.3	郑州黄河二桥主桥有限元基准模型	119
第7章	基于频率和振型摄动识别梁式构件损伤	123
7.1	基于频率和振型摄动的结构损伤识别方法	123
7.2	基于频率和振型摄动的结构损伤识别方程组的构成	124
7.3	计算实例	125
第8章	复杂边界条件下吊杆张力计算	130
8.1	振动频率法测试吊杆张力的基本理论	130
8.2	复杂边界条件下吊杆张力与横向振动频率关系的隐式表达式	142
8.3	吊杆参数的确定	145
8.4	吊杆边界参数灵敏度分析	147
8.5	简单边界条件时吊杆张力计算	148
8.6	复杂边界条件下吊杆张力与横向振动频率关系的显式表达式	158
8.7	计算实例	165
第9章	中、下承式拱桥吊杆损伤识别	170
9.1	吊杆损伤对吊杆系内力和桥梁位移的影响	170
9.2	吊杆损伤识别方程的构建与求解	174
9.3	郑州黄河二桥主桥吊杆损伤识别实例	176
第10章	中、下承式拱桥健康监测	190
10.1	郑州黄河二桥主桥健康监测流程	190
10.2	郑州黄河二桥主桥健康档案的建立	192
10.3	郑州黄河二桥主桥健康状态评估实例	193

第1章 概述

近年来,我国的交通运输事业得到了长足发展。据中华人民共和国交通运输部《2011 年公路水路交通运输行业发展统计公报》^[1],截至 2011 年年底,全国公路桥梁达 68.94 万座、3349.44 万 m。其中,特大桥梁 2341 座、404.28 万 m,大桥 55229 座、1330.05 万 m。这说明我国的桥梁建设事业已经达到了一个崭新的发展阶段,并在向更高目标快速发展。

桥梁在运营过程中,由于受到环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应以及突发性灾害等多种因素的影响,其结构损伤不断累积、抗力不断减弱,从而导致其抵御自然灾害的能力下降,正常使用功能降低,在极端情况下将可能引发严重的桥梁垮塌事故。为了保障桥梁结构的安全性、适用性和耐久性,对已建成的大跨度桥梁常需要进行健康监测和安全评价,以便能及时修复和控制结构的损伤^[2-4]。

中、下承式拱桥因其外形美观、跨越能力强等特点而成为目前国内外大跨度桥梁建设中的一种主要桥型,且正向更大跨径、更大规模的方向发展^[5]。中、下承式拱桥的上部结构主要由拱肋、吊杆、桥面系三大部分组成,其中吊杆既是该类型桥梁的主要传力构件,又是整体结构的薄弱环节。吊杆的损伤乃至破断,直接影响到中、下承式拱桥的运营安全。1999 年重庆綦江彩虹桥的垮塌事故,2001 年四川宜宾小南门金沙江拱桥的桥面断裂事故,都与吊杆锚固失效、吊杆锈蚀断裂有关^[6-7]。分析这些事故可知,中、下承式拱桥垮塌事故大多与吊杆的健康状态有关,若能对吊杆的健康状态进行健康监测与损伤诊断,多数拱桥的重大事故是可以避免的。此外,有一些中、下承式拱桥虽然并未发生严重的垮塌事故,但自通车运营以来即病害缠身、多次维修,已严重影响了该桥梁的正常通行,造成了不良的社会影响,其中广州丫髻沙大桥就是一个典型的例子^[8]。从目前国内外对桥梁健康监测的研究与应用情况来看,其研究对象主要是悬索桥与斜拉桥等,对中、下承式拱桥的研究较少,还没有关于其健康监测的成熟理论与方法,更没有完整可用的技术。因此,开展中、下承式拱桥健康监测与损伤识别方法研究,不仅具有重要的理论意义和学术价值,还具有广阔的工程应用前景。

1.1 桥梁结构健康监测技术

目前大型桥梁健康监测方式一般有两种。

一种是安装实时健康监测与智能诊断系统,对桥梁的结构振动响应、主要承载构件的受力以及桥梁工作环境进行全天候、全方位的实时监测。在国外,一些大跨度桥梁已经安装了这种健康监测系统。如丹麦主跨 1624m 的 Great Belt East 悬索桥、挪威主跨 530m 的 Skarnsundet 斜拉桥和总长 1726m 的 Faroe 跨海斜拉桥、墨西哥总长 1543m 的 Tampico 斜拉桥等。在我国,一些重要的大型桥梁也装有健康监测系统,如香港青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥,广东虎门大桥,上海徐浦大桥,江阴长江大桥,苏通大桥等。这种方法的优点是能够实时监测结构的健康状态,评价结构的可靠性,但投资巨大,仅适合重要的新建桥梁,因而应用范围有限。

另一种是定期对桥梁主要部位进行监测和检测,用所得数据对桥梁的工作状态进行评定。这种方法投资少,适用于各类大、中、小型桥梁的健康检测,以及已建成桥梁的健康检测。

1.1.1 桥梁健康监测系统概述

桥梁健康监测系统(Bridge Health Monitoring System)是集桥梁结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。根据 Housner 的定义,它是一种从运营状态的桥梁结构中获取并处理数据,进而评估桥梁结构主要性能指标的有效方法^[9]。桥梁健康监测系统结合了无损检测技术和结构特性分析,目的是诊断桥梁结构中是否有损伤发生,判断损伤的位置,估计损伤的程度,并根据状态评估结果提出相应的维护策略。根据以上定义,桥梁健康监测系统的功能框架如图 1-1 所示^[10]。

从图 1-1 中可以看出,桥梁健康监测系统可以分为在线测试、实时分析、损伤诊断、状态评估和维护决策 5 个部分。

(1)通过在线测试模块,依靠传感器测试以及网络通信技术对桥梁在运营状态下的响应进行在线测试。

(2)将上述信息转入实时分析模块,依靠修正后的精确有限元模型进行桥梁结构仿真模拟计算,得到桥梁在当前时刻的结构状态。

(3)在此基础上,通过损伤诊断模块为桥梁在特殊气候、交通条件及运营状况异常时进行损伤预警及损伤定位。

(4)在状态评估模块中,依据更新后的指标参数,对构件以及整个结构的承载



力和耐久性进行评估。

(5)在维护决策模块中,为桥梁的运营管理、养护维修以及科学决策提供建议^[10]。

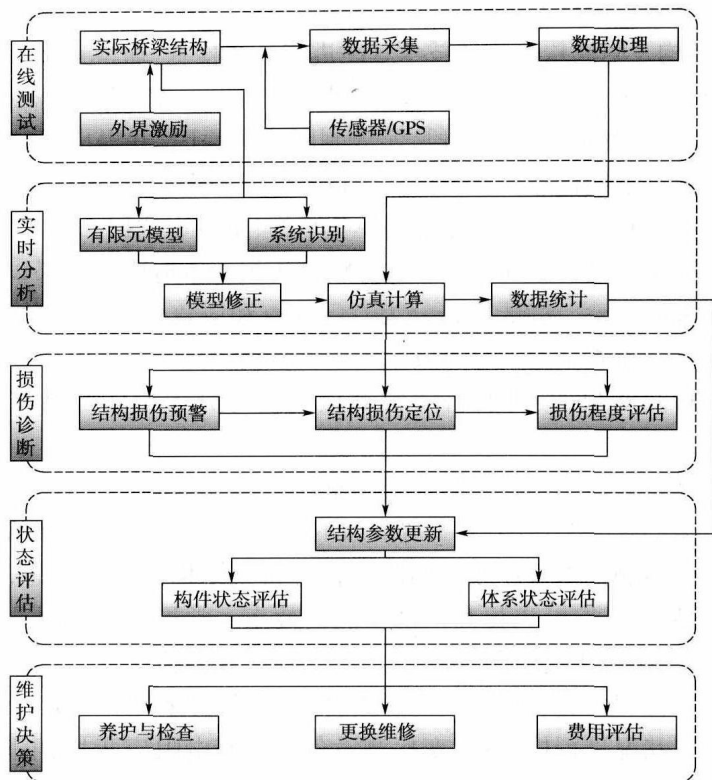


图 1-1 桥梁健康监测系统的功能框架

整个桥梁健康监测系统涉及众多的研究领域,主要包括桥梁检测、模态分析、模型修正、损伤识别与状态评估等。下面围绕桥梁健康监测系统的功能框架,简要介绍这几个相关领域的国内外研究现状。

1.1.2 桥梁检测

桥梁检测是进行桥梁健康监测和状态评估的基础。通过使用各种桥梁检测技术和手段,对处于运营状态的桥梁结构进行检测,以判断结构是否存在损伤,并进一步判定损伤的位置和程度,以及对结构目前的损伤发展趋势、使用功能、安全状况和剩余寿命提出正确的评估结论。桥梁检测可分为常规检测和在线监测两种类型。

1) 桥梁常规检测

桥梁常规检测又可称为桥梁检查。根据检测的周期,桥梁检查可分为经常检查、定期检查和特殊检查三种^[11]。

经常检查由路政检查人员或桥梁养护人员进行巡视检查,主要对桥面设施、上部结构、下部结构及附属构造物的技术状况进行外观检查,通常每月不少于一次。

定期检查是依靠有丰富经验的专职桥梁检查工程师,以目视外观检查为主,辅以必要的工具、常规测量仪器等手段,实地判断病害原因,并提出特殊检查或下次定期检查的要求。定期检查周期根据桥梁技术状况确定,最长不得超过3年。

特殊检查由具有相应资质和能力的单位承担,由专家依据一定的物理、化学等无损检测手段对桥梁进行全面的察看、检测,分析损坏所造成的后果以及潜在缺陷可能给结构带来的危险。特殊检查分为专门检查和应急检查,具体的检查周期由有关部门根据定期检查结论及是否发生灾害性损伤决定。

根据桥梁检测对象的不同,桥梁常规检测又可分为整体检测和局部检测两大类^[12]。

整体检测以桥梁的整体状态为检测对象,通过对表征结构整体特性的量,如结构变形、应变、振动频率及振型、索力等参数的测量,实现对结构整体状况的检测和评估。采用整体检测技术可连续或间隔地检查桥梁结构的安全状态,并可用来指导对可能损伤部位的评估,以提高局部检测的效率。常规整体检测方法基本上是以人工检测方法为主,主要有位移检测、应变检测、振动检测等。位移检测仪器主要有接触式位移计、张弦式位移计、手持式引伸仪、水准管式倾角仪等,用来对各种桥梁构件的变形状况进行检测;应变检测设备主要有电阻应变片、电阻应变仪、钢弦式传感器等,主要用于检测结构构件的应变发展及混凝土的裂缝发展状况;振动检测使用各种压电式、电容式、伺服式振动传感器,通过观测并记录桥梁振动信号,对收集的信号进行时域或频域分析,从而得到桥梁振动模态及行车响应等桥梁动力指标,以揭示桥梁结构的整体动力特性^[13]。

局部检测以桥梁结构各个组成部分的局部状态为检测对象,以各种局部检测技术为手段,通过对结构局部部位的集中检测,可较准确地对结构缺陷部位进行定位、探查,有时还可进行定量分析。结构局部检测方法主要有目检法、压痕法、回弹法、染色法、超声脉冲法、声发射法、射线法、磁粉法、光学法、涡流法、泄漏法、红外法等^[14]。采用上述各种局部检测方法进行桥梁检测,均需要预先大致了解损伤的位置,并且结构中的这些位置应当易于接近。这种检测方法所需周期长,费用高,并会影响或中断桥梁的正常使用,因此其在工程应用中有一定的局限性。在大型桥梁结构检测中,往往将整体检测与局部检测两种方法综合使用,互为补充。

2) 桥梁在线监测

桥梁常规检测的检测周期是间断的、非连续的、非实时的,检测结果不能及时地反映桥梁在运营过程中的状态变化,当灾害性因素发生时,或者当桥梁的损伤累积达到影响桥梁正常运营乃至垮塌的临界点时,常规检测手段不能及时预警,从而有可能造成重大人员伤亡和财产损失。因此,随着科学技术的发展,综合现代测试与传感技术、网络通信技术、信号处理与分析技术的桥梁在线监测技术得到了迅速发展,大大地拓展了桥梁检测的内涵,并可连续地、实时地、在线地对桥梁结构的健康状态进行监测和评估,以确保桥梁运营安全和提高桥梁管养水平。据统计,目前国内外已经安装在线健康监测系统的桥梁达 50 多座,桥型主要为特大跨度的悬索桥、斜拉桥,以及少量的大跨度梁桥等。

桥梁在线监测系统的硬件包括在桥梁上布设的各类传感器,用来完成各种监测信号的拾取和转换。传感器种类繁多,按其是否产生信号可分为主动(Active)传感器和被动(Passive)传感器。其次,桥梁在线监测系统还需要配置一套功能完备的数据采集系统,包括各类放大器、传输光缆及计算机等。目前,光纤光栅传感器技术、传感器最优布设方案、基于全球定位系统(GPS)技术的在线监测技术等已成为桥梁健康监测的研究热点之一^[15-18]。

除了硬件设备外,桥梁在线监测系统还需要有一套高效、完备的数据处理与分析系统,并可根据实时在线监测数据进行桥梁健康状态实时评估。主要涉及的内容与技术包括模态分析、系统辨识、模型修正、损伤识别、状态评估等。

1.1.3 模态分析

随着计算机技术和数字信号处理算法的迅速发展,通过实验及数据处理来识别实际结构的动力学模型,已成为解决现代复杂结构动态特性设计的重要手段。应用模态分析方法,人们有可能把复杂的试验结构简化为模态模型,来计算系统响应,从而简化系统的数学运算。

模态分析理论是在机械阻抗与导纳的概念上发展起来的。模态分析的经典定义为:将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程组解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数^[19]。模态分析理论的核心内容是模态参数辨识,模态分析的最终目的是识别系统的模态参数,为结构系统的振动特性分析、动力优化设计、动力载荷识别、动力模型修正与基于振动测试与分析的结构损伤诊断提供依据。由于目前桥梁健康监测系统通常采用基于振动理论的在线监测与实时分析技术,因此,模态分析理论也是桥梁健康监测与损伤诊断的重要理论基础。

目前,模态参数的辨识方法可以分为两类:频域识别法和时域识别法。

1) 频域识别法

频域识别法发展较早,在 20 世纪 70 年代,发展成熟的频域识别方法有多点稳态正弦激振法和单点激励频响函数法。20 世纪 60 年代出现的快速傅立叶变换方法(FFT 法)对单点激励频响函数法的发展产生很大影响,它是通过 FFT 将测得的时域数据转换到频域内,由功率谱密度函数(PSD)进行辨识。因为频域法的物理概念清楚,不容易遗漏模态或产生虚假模态,模态的可靠性较高,因此该方法在模态分析中应用广泛。

目前常用的一种频域识别方法是峰值拾取法(PP 法)^[20]。该方法基于频响函数(FRF)在结构固有频率处达到峰值的原理进行模态参数识别,算法简单,易于实现。但在环境振动测试中,如果只有输出响应数据,而输入未知时,则无法获得频响函数。这时如要进行模态参数辨识,可用输出响应的自功率谱密度 PSD 函数代替频响函数。在阻尼较低、频率不太密集的前提下,固有频率由 PSD 曲线上的峰值确定,而 PSD 是通过 FFT 将加速度传感器测得的数据转化到频域后得到的。阻尼比常采用半功率带宽法得到,而振型则通过计算各响应点同参考点之间的互谱密度与参考点自谱密度的比值得到。峰值拾取法操作简单,运行速度快,多数情况下能够很好地识别出固有频率,但存在响应数据易为测量噪声污染的弊端,并且当频响函数或谱密度函数的峰值不明显时,固有频率的拾取由使用者主观决定,且不能违背低阻尼、频率易分离的基本假设,否则识别结果误差较大,对阻尼比的识别也不尽如人意。

2) 时域识别法

时域识别法直接利用时域内的数据进行辨识,可以避免频域识别法因 FFT 变换所带来的误差,一般都能得到较精确的辨识结果,已成为近年来在实验模态分析领域的主要研究热点。目前比较成熟的时域识别方法主要有 Ibrahim 时域法(ITD 法)、时间序列识别方法、特征系统实现算法(ERA 法)、随机子空间识别方法等^[21-24]。ITD 方法基于结构的自由振动模型,以黏性阻尼多自由度系统的自由响应为基础,依据结构被测试的振动信号识别结构模态参数。时间序列识别方法是最早用于结构参数识别的方法之一,该方法基于离散滑动平均自回归模型,通过被测试的结构输出信号识别模型参数,然后将模型参数转换为结构的模态参数。ERA 算法基于离散状态空间模型,以多输入、多输出的脉冲响应为基础,依据结构被测试的振动信号识别结构模态参数。随机子空间识别方法基于受随机激励作用的离散状态空间模型,以多输入、多输出的随机响应为基础,依据结构被测试的振动信号识别结构模态参数。

以上各种时域识别方法的主要优点是只使用实测的响应信号,无需进行 FFT 变换,因而可进行在线分析,使用设备简单,特别适合于大型桥梁结构的在线监测系统。但由于不采用脉冲响应信号,不使用平均技术,因而分析信号中包含噪声干扰,所识别的模态中除系统模态外,还包含有一定的噪声模态^[25]。

在模态参数识别中,对于小型简单结构,无论是时域还是频域方法都能得到满意的结果,而对于中、下承式拱桥这样的大型复杂结构,要想保证精度就必须通过多次试验来得到。因此,没有一种明确的辨识方法适用于所有的结构类型,应根据实际情况选择合理模态参数的辨识方法。

1.1.4 模型修正

模型修正问题实际上是一个系统建模问题。系统建模有 3 种类型:理论建模、试验建模和系统辨识建模^[26]。大型复杂桥梁结构的理论建模当前一般采用有限元方法进行,但模型的精度与建模人员的工程实践经验密切相关,并且模型的物理参数(材料密度、弹性模量、截面几何尺寸)等会因环境的变化和施工过程中而存在误差,因此结构系统的初始理论模型必须通过结构试验和模型修正技术对其进行修正,以达到正确预测结构行为的目的^[27]。使动力测试试验结果与结构的有限元模型求解的动力学特征量相吻合的方法称为结构动力模型修正。目前,大多数模型修正技术都是以模态参数和有限元模型作为参考,这是由于模态参数最易获取。

模型修正的方法可大致分为两类,即矩阵型法和参数型法。

1) 矩阵型法

矩阵型法是模型修正方法中发展最早也最成熟的一类方法。该方法以结构有限元模型的物理参数矩阵为修正对象,直接修正上述各物理参数矩阵的元素,以使实测模态和有限元模型的解析模态一致。最具有代表性的矩阵型模型修正方法是 Berman-Baruch 法^[28],其修正原理是基于拉格朗日乘子技术,建立修正后矩阵的拉格朗日函数,利用实测的结构前几阶固有频率及与之对应的模态构建出可用以求解的矩阵方程。Berman-Baruch 法需要对质量矩阵和刚度矩阵直接求逆,其他部分仅涉及简单的矩阵加法和乘法运算,不需要迭代和重复分析特征值,因而具有精度高、易执行的优点。但由于修正模型的物理意义不明显,会丧失原模型物理参数矩阵带状、稀疏的特点。

为改进矩阵型法的上述缺点,Kabe^[29]、张德文等^[30]提出了元素型矩阵修正法,可根据用户的判断或由建模错误定位技术所得结果,指定有误差的非零元素作为待修正元素,而让原零元素始终保持为零,从而保持了原有限元模型物理矩阵带状、稀疏的特性。

混合矩阵法^[31]和误差矩阵法^[32]是有限元模型修正的另外两种矩阵型方法。其主要思想前者是通过测试和分析的数据来共同产生结构的质量矩阵和刚度矩阵,避免了 Berman-Baruch 法中对质量矩阵和刚度矩阵的直接求逆,缺点是该方法得到的质量和刚度矩阵为满阵,失去了原模型的意义;后者是在假设模型误差较小的前提下修正质量矩阵和刚度矩阵,虽然修正后的模型有与实验模型接近的特征结构,但在理论上难以证明该方法一定可以重现测试的特征结构。

2) 参数型法

对大型结构建立有限元模型,最原始的数据是各种设计参数,包括物理参数、几何参数和边界条件等,如弹性模量 E 、材料密度 ρ 、截面面积 A 、边界支承条件等。若直接以结构的设计参数作为修正对象,不仅物理意义明确,而且便于在模型优化过程中引入设计准则。参数型修正法的基本思路与结构优化理论类似,通过构造理论模型与实际模型之间在同一激励下动力特性的误差,然后选择一定的修正量使该误差最小来达到修正的目的。虽然这一类型方法需要最小化非线性的罚函数,多数归结为一个逐步迭代的优化问题,计算量大,但修正后模型的设计参数易于与工程实际对照,是目前研究和应用的主流。

在参数型修正法中,应用最为广泛的方法是通过灵敏度分析来修正模型参数^[33]。灵敏度分析是参数型模型修正的重要环节,其目的是获取结构特征量对于设计参数的偏导数,其数学基础主要依赖于泰勒展开式或摄动原理。目前已经发展比较成熟的参数型修正法主要有特征对展开法^[34]、物理参数矩阵展开法^[35]、摄动法等。特征对展开法是将修正模型的特征对(根据实测得到的固有频率及振型)在分析模型邻域内相对于设计参数 p 作泰勒展开,然后利用修改结构动力特性的各种快速分析方法完成特征导数的解析式计算。物理参数矩阵展开法是直接将修正模型的物理矩阵作一阶泰勒展开,其显著的优点是不需要实测模态,仅需实测的固有频率和模态质量。摄动法是将修正模型的有关参量关于小参数 ε 展开,然后令等式两边关于 ε 的同次幂系数相等即可得到摄动法的修正公式,但其计算精度与小参数 ε 的大小有关,仅适用于小误差分析模型的修正,当模型的误差较大时,摄动法所得修正模型可能具有较大的误差。

基于灵敏度分析的参数型修正方法在桥梁结构模型修正中得到了应用,如文献[36]利用环境振动测量值对江阴长江大桥进行了有限元模型修正。

1.1.5 损伤识别

损伤识别又可称为损伤诊断,包括损伤预警、损伤定位和损伤状态评估三个方面。换句话说讲,根据损伤诊断的各个阶段性目标,先后解决在工程结构中是否发

生了损伤、损伤出现的位置以及损伤程度大小这三个问题。根据进行损伤诊断所选择结构参数的不同,又可分为基于静力特性参数的损伤诊断方法和基于动力特性参数的损伤诊断方法。鉴于结构的损伤识别技术在识别桥梁结构损伤方面的重要作用,在下节将重点说明结构损伤识别技术的研究与发展方向。本节仅简要说明桥梁结构损伤识别技术。

1) 基于静力特性参数的损伤诊断

桥梁结构的静力特性参数主要有结构静态位移、静态应变、斜拉索或吊杆的张力等。桥梁结构发生损伤后会引引起结构刚度的变化,从而使结构位移、应变、张力等参数发生相应的改变。通过对上述静力特性参数的测量,并同结构完好时的相应参数对比,可以实现桥梁结构的损伤识别^[37]。

结构静力特性参数的信息量相对较少,在大型桥梁上进行静力加载时费用较大,周期较长,因此该方法的使用还处于初步发展阶段。研究成果主要为:把结构的静态响应区分为已测基本参数和未测参数两部分,使用缩减技术来缩减未测的静态响应,从而利用已测量的静态响应数据识别出结构的单元参数^[38-39],研究对象也仅局限于梁、板等简单构件,该方法研究重点是根据损伤检测的结果建立以残余力或位移等参数误差最小为目标函数的优化方程,以及对该类型方程的迭代求解算法开展研究^[40-41]。

如前所述,相比基于动力特性的桥梁结构损伤检测技术,基于静力特性的桥梁结构损伤检测技术可以利用的测试信息量较少,往往难以得到理想的识别结果。此外,对于桥梁结构,特别是对于大型桥梁结构,由于静力加载工况的数量有限,对所加载工况作用下受结构变形影响较小的那些损伤构件更加难以识别。虽然基于静力特性参数的损伤检测和诊断方法有以上缺点,但由于该方法只需要使用结构的刚度特性,且只要有足够的静力测试结果就可以推算出结构的刚度,同时静力测试数据具有较高的精度和稳定性。因此基于静力特性的桥梁损伤检测方法仍然是一种具有广阔应用前景的方法,并往往同动力特性参数相结合使用^[42]。

2) 基于动力特性参数的损伤诊断

结构动力特性是结构的固有属性,结构的损伤必然会引起结构动态响应的变化,进而引起由结构损伤检测试验所获取的结构动力特性参数的变化。通过安装在结构上的传感设备,对结构的动态响应进行实时监测,可获得结构的振动特性。对获取的结构振动特性的变化进行分析和处理,就有可能获得结构物理参数的变化情况,从而达到损伤检测的目的。

桥梁结构的动力特性参数信息量丰富,检测费用低,并且在检测过程中不需要中断桥梁的正常运营,因此相对于静力检测以及传统的局部检测方法具有很大的