

国家重点基础研究发展计划 (编号: 2013CB036302)
国家自然科学基金资助项目 (编号: 51078316)

联合资助

桥梁结构损伤诊断的 统计学习理论

QIAOLIANG JIEGOU

SUNSHANG ZHENDUAN DE TONGJI XUEXI LILUN

单德山 付春雨 李 乔 著



科学出版社

国家重点基础研究发展计划(编号:2013CB036302)

国家自然科学基金资助项目(编号:51078316)

联合资助

桥梁结构损伤诊断的统计学习理论

单德山 付春雨 李 乔 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家重点基础研究发展计划(“973”计划,编号:2013CB036302)和国家自然科学基金资助项目(编号:51078316)的研究成果。本书针对实际桥梁损伤诊断的复杂性,将统计学习理论引入损伤诊断方法中,内容包括基于统计学习理论的桥梁结构时域损伤诊断、时频域损伤诊断及损伤诊断模型试验。

本书可供智能桥梁监测的设计、实施和研究人员参考,亦可作为高等院校桥梁工程专业研究生以及本科高年级学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构损伤诊断的统计学习理论 / 单德山,付春雨,李乔著. —北京:科学出版社,2014.4

ISBN 978-7-03-039940-3

I. ① 桥… II. ① 单… ② 付… ③ 李… III. ① 桥梁结构-损伤(力学)-诊断-研究 IV. ① U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 040283 号

责任编辑:杨 岭 朱小刚 / 责任校对:葛茂香

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年5月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:320千字

定价:60.00元



前言

为了促进国民经济的发展,我国进行了大规模的桥梁建设。而近年来,由于结构设计施工缺陷、性能退化或长期重载服役等原因,与桥梁结构有关的重大事故时有发生。这些事故直接导致部分交通运输中断,造成巨大的经济损失和社会影响,因此,桥梁的安全运营已成为关系国计民生的重大问题。如何及时了解桥梁结构的实际状态,保证桥梁结构的安全运营,已成为各国共同关注的热点问题。

为了能够监测到桥梁运营时的结构整体信息,很多桥梁上均安装了健康监测系统,如江阴长江大桥、苏通长江大桥、芜湖长江大桥、大胜关长江大桥、天兴洲长江大桥等。随着传感和测试技术的发展,安装了健康监测系统的桥梁基本上实现了结构整体信息的运营监测。但如何利用这些监测数据,对桥梁运营时的结构损伤进行准确的诊断,仍是一个亟须解决的问题。

虽然对结构损伤诊断的相关研究早在 20 世纪 60 年代就已出现,现在相关技术也已在机械、航空航天、军事等领域得到广泛应用,但是桥梁结构自身的构造及受力特点,如跨度大、结构刚度相对小、所承受的活载大等,使得实际桥梁工程的结构损伤诊断表现出以下特点:①荷载激励的不确定性,桥梁结构处于自然环境中,其振动荷载(如风、地震、车辆等)的精确值是无法确定的;②结构状态与荷载的相关性,桥梁本身的结构状态会随着振动荷载大小或位置的变化而发生变化,如当车辆活载值较大时,桥梁可能开裂,而当车辆离开桥梁时,在预应力作用下结构裂纹又闭合;③结构响应的不完备性,由于预算费用或传感技术的限制,监测系统无法监测到结构响应的完整信息,如测点布置有限、测试信息种类不足、振动采样时长的限制等。正是由于这些特点,实际桥梁结构的损伤诊断成为一个在外部荷载未知、结构响应部分已知的情况下,求解桥梁结构时变未知状态的问题,具有很大的难度和复杂度。

为了解决该问题,各国学者提出了各种不同的理论与方法。机器学习领域的统计学习理论便是其中一种方法,但其与其他理论又表现出明显的不同:统计学习理论能够在没有任何求解问题的先验已知信息的情况下,利用少量的样本准确地预测该问题的输出结果。由于该理论是以提高最佳的预测结果为最终目标,而且往往能够提供全局最优解,而不是试图建立所研究问题的精确模型,因此它在解决复杂问题上具有明显的优势。

为此,本书将统计学习理论与损伤诊断方法相结合,做进一步的研究,以期对相关研究和工程实践提供参考。全书共分 6 章。第 1 章系统地介绍桥梁结构损伤诊断的含义、特点及分类情况,回顾并综述结构损伤诊断的研究现状,指出了桥梁结构损伤诊断的困难所在及主要发展方向。第 2 章概述统计学习理论的发展历程、核心内容及其在结构损伤诊断中的适用性。第 3~5 章分别介绍统计学习理论在时域损伤诊断、时频域损伤诊断及损伤诊断试验中的应用。其中,第 3 章直接以车致桥梁结构的振动响应时程作为损伤指标,利用统计学习理论建立相关的损伤诊断模型,对列车荷载作用下的桥梁结构状态进行诊断;第 4 章利用 Hilbert-Huang 变换预先对结构加速度时程响应进行处理,构建结构的时频域

损伤指标，再利用统计学习理论中的支持向量机作为分类工具，分别建立地震荷载作用下和车辆荷载作用下的损伤诊断模型，进行损伤诊断研究；第 5 章以某斜拉-悬吊组合体系桥梁模型为例，对基于统计学习理论的桥梁损伤诊断方法进行验证，同时从试验结构系统、激励输入、损伤模拟及响应测试等方面对损伤诊断试验进行系统的介绍，以为实际桥梁结构的损伤诊断提供参考。第 6 章为对未来研究的展望，描述桥梁结构损伤诊断未来需重点解决的问题。

本书在编写过程中参考了西南交通大学智能化桥梁团队的大量研究成果和试验结果，特向团队成员致以谢意。为了本书的出版，编辑、校对付出了辛勤劳动，在此表示衷心感谢。

历时两年，本书稿方才得以完成。但因编者水平有限，书中难免有疏漏和谬误之处，恳请读者批评斧正。

编 者
2013. 10

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁结构损伤诊断概述	2
1.1.1 桥梁结构健康监测概述	2
1.1.2 桥梁结构损伤诊断的特点	3
1.1.3 桥梁结构损伤诊断分类	5
1.2 结构损伤诊断研究回顾	6
1.2.1 模型修正法	7
1.2.2 损伤指标法	9
1.2.3 模式识别法	13
1.3 桥梁结构损伤诊断研究的主要困难和发展方向	18
1.3.1 主要困难	18
1.3.2 发展方向	19
1.3.3 本书的主要内容	20
参考文献	21
第 2 章 统计学习理论概述	27
2.1 统计学习理论的发展历程	27
2.2 统计学习理论的核心内容	29
2.2.1 学习过程的一致性	30
2.2.2 学习过程收敛速度的界	32
2.2.3 控制学习过程的推广能力	34
2.2.4 构造学习算法——支持向量机	35
2.3 统计学习理论在结构损伤诊断中的适用性	41
参考文献	42
第 3 章 基于车致振动响应的桥梁时域损伤诊断	44
3.1 基本思路	44
3.1.1 损伤诊断的子区域法	44
3.1.2 损伤诊断的步骤划分	45
3.1.3 拟采用的解决方法	47
3.2 损伤预警	48
3.2.1 损伤预警方法	48
3.2.2 数值算例	53
3.3 损伤等级划分	67
3.3.1 损伤等级划分方法	67
3.3.2 数值算例	69

3.4 损伤位置识别	76
3.4.1 损伤位置识别方法	77
3.4.2 数值算例	80
3.5 桥梁结构损伤程度识别	100
3.5.1 损伤程度识别方法	100
3.5.2 数值算例	102
3.6 桥梁结构损伤精确识别	119
3.6.1 桥梁结构损伤精确识别方法	119
3.6.2 数值算例	120
3.7 小结	132
参考文献	134
第4章 基于时频域信号分析的桥梁结构损伤诊断	135
4.1 损伤指标构建	135
4.1.1 Hilbert-Huang 变换简介	135
4.1.2 时频域指标的构建方法	137
4.2 损伤诊断方法	139
4.3 地震荷载作用下桥梁结构的时频域损伤诊断	140
4.3.1 桥梁工程模型	140
4.3.2 结构易损状态及地震波	141
4.3.3 损伤预警	142
4.3.4 损伤位置识别	143
4.4 列车荷载作用下桥梁结构的时频域损伤诊断	146
4.4.1 车桥模型	146
4.4.2 损伤预警	146
4.4.3 损伤位置识别	150
4.4.4 损伤程度识别	153
4.5 小结	155
参考文献	156
第5章 桥梁损伤诊断模型试验	158
5.1 模型试验概述	158
5.1.1 缆索体系	159
5.1.2 主梁	160
5.1.3 结构约束	161
5.2 试验方案	161
5.2.1 加载方案	161
5.2.2 测试系统	163
5.2.3 损伤模拟	165
5.2.4 测试结果示例	167
5.3 计算模型的建立和修正	169
5.3.1 精细化数值模型	169

5.3.2 简化数值模型	174
5.3.3 结果示例及误差分析	176
5.4 响应信号时频域分析	182
5.5 结构损伤诊断	183
5.5.1 静力损伤诊断	183
5.5.2 动力损伤诊断	189
5.6 小结	192
参考文献	193
第 6 章 桥梁结构损伤诊断研究展望	194
6.1 存在的问题	194
6.2 研究展望	195
参考文献	196

第 1 章 绪 论

作为交通运输的咽喉,桥梁工程已成为保证国家经济大动脉畅通的关键。而在桥梁建成通车后,由于车辆重载、交通量增加、自然灾害或环境腐蚀等因素的影响,在役桥梁可能会出现不同程度的损伤,桥梁可靠度下降,结构功能退化,甚至会严重影响桥梁结构的安全运营。

近年来,国内外桥梁工程事故不断发生。仅 2011 年 7 月我国就发生汽车超载引起的公路桥梁事故 4 起:重 80 余吨的运砂车致使武夷山公馆大桥桥面塌落,造成 1 人死亡,22 人受伤;载重达 160t 的砂石车直接压垮北京怀柔宝山寺白河桥;长期超载造成钱江三桥引桥桥面塌落;总重达 160t 的两辆货车引起江苏盐城 328 省道通榆河桥垮塌。据 2008 年 6 月 19 日交通运输部新闻发言人公布的交通路桥损毁数据,在汶川大地震中,有 6140 座桥梁受损。据不完全统计,2000 年到 2009 年 7 月(不包含地震引起的桥梁倒塌),我国媒体公开报道的塌桥事故约有 85 起^[1],其中设计与施工不合理引起的桥梁事故占 41%,撞桥与超载引起的占 28%,洪水、泥石流等自然灾害引起的占 20%。在美国,1951~1988 年共发生了 114 起桥梁倒塌事故^[2];1989~2000 年倒塌桥梁达到 503 座^[3],这是由于期间发生了几次大地震和洪水。

除桥梁倒塌事故外,还有大量现役桥梁出现不同程度的劣化。截至 2007 年年底,我国查出公路危桥 6000 多座;据美国联邦公路局(FHWA)全国桥梁数据库公布的统计数据,截至 2006 年,美国桥梁建造总数为 596808 座,病害桥梁总数为 153879 座,约占 25.8%^[4]。

同时,随着社会经济的发展,我国公路和铁路的运输量会越来越大。到 2011 年年底,我国共有公路桥梁 68.94 万座,33494.4km,公路年旅客运量为 328.62 亿人,年货运量 282.01×10^8 t。截至 2008 年年底,我国营业线路铁路桥梁的数量已达 47524 座,3493735 延米,铁路年旅客运量 146193 万人,年货运量 3303.54Mt。这些运输量每年以约 10% 的速度增长,在如此密集的客货流作用下,一些公路和铁路桥梁正处于超负荷运营状态。

我国也是一个自然地质灾害多发的国家。20 世纪以来,我国共发生 6 级以上地震 800 次左右。在 2011 年,先后有 7 次台风登陆我国大陆地区,共有 260 多条河流发生超警以上洪水,出现了较为严重的洪涝、滑坡、泥石流等灾害。这些频繁的自然地质灾害会强烈地影响着现役桥梁结构的正常运营。

为了保证在各种因素作用下,桥梁结构能够安全地运营,需实时了解桥梁的健康状态,掌握结构可能出现的损伤情况,并及时准确地诊断出已经出现的损伤,为桥梁结构维护加固提供依据。为此,对桥梁结构损伤诊断进行研究是非常必要的,其研究成果具有广泛的直接或间接应用前景,对实际桥梁运营管理、养护等工作具有重要的指导和借鉴意义,桥梁结构损伤诊断问题成为国内外工程界和学术界亟须解决的热点和难点问题。

1.1 桥梁结构损伤诊断概述

1.1.1 桥梁结构健康监测概述

为了能够实时地了解实际桥梁结构的健康状况,及时诊断出桥梁结构可能存在的损伤情况,许多桥梁上均安装了健康监测系统。所谓桥梁结构健康监测系统,就是通过在桥梁结构上安装传感器系统,实时地监测作用在结构上的各种荷载结构的响应,并利用数据传输技术将所监测到的荷载信息和响应信息传输到数据存储中心,以为桥梁结构损伤诊断提供基础数据,如图 1.1 所示。

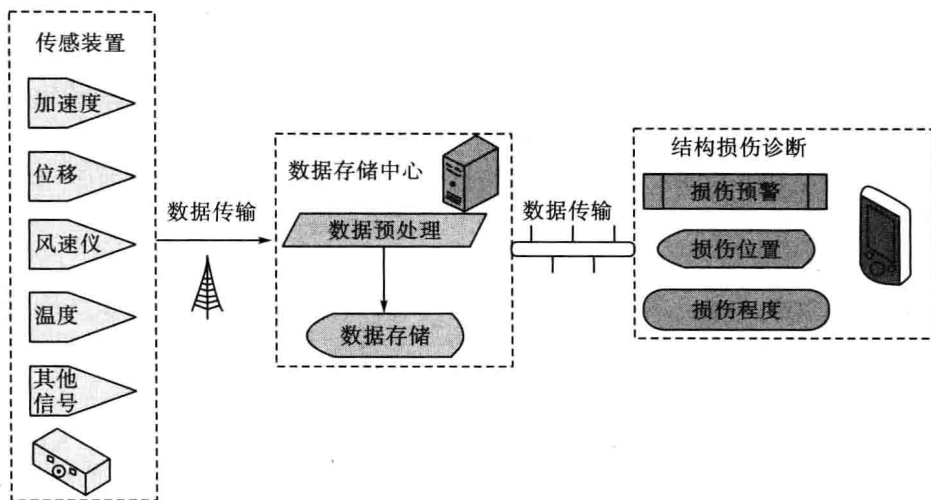


图 1.1 桥梁结构健康监测系统示意图

美国的 Los Alamos 国家实验室对新墨西哥州 I-40 桥进行了大量研究^[5,6],其所提供的试验数据现已成为损伤诊断的标准数据;Drexel 大学的研究人员对美国最大跨度的桁架桥——Commodore Barry 桥进行了综合监测研究^[7,8],研发了该桥的监测、状态识别和可靠度评估系统。此外, Sunshine Skyway 斜拉桥和 HAM42-0992 连续梁桥也安装了健康监测系统。K. U. Leuven 大学对瑞士 Z24 桥进行了多种损伤监测试验^[9,10],获得了大量的损伤实测数据,使得该桥成为桥梁损伤识别的 Benchmark;丹麦的 Great Belt East 悬索桥^[11]、Oeresund 斜拉桥,德国的 Westend 连续梁桥、Zittau 高架桥,以及英国的 Huntingdon 铁路连续梁桥等均安装了健康监测系统。在日本^[12,13],土木结构健康监测的主要目的是研究地震对结构整体性的影响^[14],在一些大跨度桥梁(如明石海峡大桥、多多罗斜拉桥和南备赞瀬户悬索桥)上都安装了健康监测系统。韩国的 Jindo 桥、Dolsan 桥、Namhae 桥、Seohae 桥、Youngjong 桥和 Banghwa 桥等桥梁上也安装了健康监测系统^[15,16]。

在国内,近几年结构健康监测系统的应用逐渐增多,但主要应用于大跨度桥梁^[17]。广东虎门大桥通过安装三维位移 GPS 实时动态监测系统^[18]和应变监测数据处理系统^[19]对桥梁进行实时监测。东南大学建立了润扬长江大桥健康监测系统,并对工程预警进行了深入细致的研究^[20]。此外,东海大桥、东明黄河公路大桥、江阴大桥、南京长江大桥、苏

通大桥、芜湖长江大桥、下白石大桥、湛江海湾大桥、重庆石板坡长江大桥、南京长江三桥、泸州泰安长江大桥^[21]等桥梁上都安装了健康监测系统。在中国香港，青马大桥、汲水门桥和汀九桥上安装了“风和结构健康监测系统”(WASHMS)^[22]，其中针对青马大桥的监测数据，很多学者进行了研究^[23,24]。

总结这些国内外健康监测的实际工程可以看出：绝大部分监测系统的功用是通过实际监测的数据，诊断桥梁结构的损伤状态，为桥梁维护提供依据，这对防止桥梁事故的发生有重要的指导意义。同时也说明桥梁损伤诊断决定着结构健康监测系统的组成及其实现过程。

1.1.2 桥梁结构损伤诊断的特点

虽然通过在桥梁上安装健康监测系统，基本实现了数据的实时采集，但利用这些采集到的数据诊断桥梁的损伤状态，仍是一个亟待解决的工程实际问题。这是因为桥梁结构损伤诊断需要解决的问题是一个难度与复杂度都很大的问题：在结构荷载完全或部分未知的情况下，利用部分已知的响应信息，识别未知的结构损伤状态(图 1.2)。

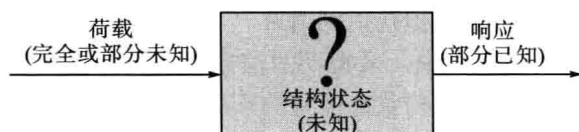


图 1.2 桥梁结构损伤诊断示意图

损伤诊断最早是在航空航天、机械等领域出现，目前已在这些领域得到很好的发展。但与航空航天、机械等领域的识别问题相比，桥梁结构损伤诊断有其自身的特点，下面分别从桥梁结构的荷载、响应和状态三个方面介绍这些特点^[25]。

1. 荷载

受桥梁的设计目的和所处环境的影响，桥梁所承受的荷载具有以下特点：

(1)影响结构损伤状态。桥梁所承受的动力荷载一般比较大，如有时列车荷载在铁路桥梁全部荷载中所占比例接近 50%。这使得动力荷载直接影响结构的损伤状态：当有列车荷载作用，而且荷载值较大时，结构可能会出现裂缝，刚度下降；而当列车荷载消失，或荷载值较小时，裂缝闭合，结构恢复到完好状态^[26,27]。同时不同的荷载种类会引起结构产生不同类型的损伤，如车辆荷载可能引起梁体开裂，而地震荷载会造成梁体移位或落梁、墩身剪断或压溃、支座及垫石损坏等，风荷载会引起涡激共振、拉索风雨振等，船只的撞击作用会引起桥墩的破坏。因此，应针对不同的荷载类型，分析所容易引起的结构损伤，进而对结构状态有深入的认识。

(2)不确定。绝大部分荷载属于非平稳的随机信号激励，很难准确测量。例如，在车桥动力系统中，引起桥梁振动的激励有列车重力荷载、轨道不平顺、蛇行运动等，而这些激励的准确值一般是无法确定的，如轨道不平顺是由不同波长、不同相位、不同幅值的随机不平顺波叠加而成的，是与线路里程有关的复杂的随机过程，蛇行运动始终受到轨道不平顺的激励，其频率和振幅都受到轨道性能和状态的影响。

(3)部分已知。在实际的桥梁结构动力监测中，尽管无法完全准确地测量荷载信息，但荷载的一部分信息是已知的。例如，列车在桥梁上行驶时，只要知道列车速度和驶入桥

梁的时间,就可以确定荷载作用点的位置;地震时,各节点承受相同的基底加速度激励;对于风荷载,相邻层的风力作用具有相关性;对于流水压力或船只撞击作用,其作用点只会在桥墩处出现。

2. 响应

桥梁结构响应根据所布置的传感器类型不同而不同,一般来说,结构响应有位移、加速度、应变等类型,这些响应有以下特点:

(1)不完备。响应信息的不完备性主要表现在3个方面:①测点有限,实际桥梁是一个无限自由度的连续体结构,对其进行理论计算分析时,需先对其进行离散化,再做有限元分析,这就意味着要用有限自由度来模拟实际的无限自由度,然后根据理论计算分析结果,进行传感器测点布置时,又要从这些有限的自由度中选取个别自由度作为测点,所以实际工程中测点是有限的,数目比较少;②信息种类不完备,在动力测试时,通常只能测得结构的位移、速度、加速度响应中的一种;③采样频率与时长的限制,由于受到计算机能力、传输设备与测试手段等的限制,要求数据的采样频率不能过高,时长不能太长,这会影响所得到的信息量,进而影响损伤识别结果。

(2)受噪声污染。在动力监测中,采集到的信号总是包含有噪声。噪声是指存在于环境和测试系统中的不带任何桥梁结构状态信息的不规则信号。按噪声来源分,可分为环境噪声和内部噪声^[28]。环境噪声指外部干扰产生噪声,并经过一定的途径将噪声耦合到信号监测电路,从而对监测系统产生干扰的噪声。这种干扰噪声受桥梁结构环境和测试系统布局的影响很大,其特性既取决于噪声源,又取决于耦合途径,而与系统内部无关。由健康监测系统的内部元件产生的噪声称为系统内部噪声。为了把传感器采集的模拟信号放大到可以感知的幅度,必须使用放大器和其他器件对其进行处理。但是电子系统内部的器件本身往往就是噪声源,在放大有用信号的同时,这些噪声源产生的噪声同样会被放大。内部噪声的大小决定了系统的分辨率和可检测的最小信号幅度,系统内部噪声往往具有随机性,其瞬时幅度不可预测,只能用概率统计的方法来表述其大小和特征。

3. 状态

判别结构状态是损伤识别的直接目的,在实际工程中桥梁的状态有以下特点:

(1)损伤多样性。实际运营中桥梁的损伤可以分为3类:①刚度降低,常见的结构开裂、混凝土压溃、剪断、构件变形等都会引起刚度降低;②质量改变,混凝土表层成块脱落、钢筋锈蚀、地震中挡块损坏等使桥梁的质量发生改变;③边界条件的改变,支座位移、锚固螺栓拔出、剪断、活动支座脱落、伸缩缝阻塞等会引起边界条件的改变,进而改变结构的阻尼特性。

(2)损伤状态与荷载的相关性。这一点与上述荷载影响结构损伤状态的特点相似,只是从不同角度对同一问题进行阐述。桥梁所承受的动力荷载值大,使得结构的损伤状态中存在着与列车荷载相关的损伤,该相关性主要表现在3个方面:①损伤类型与荷载种类相关,不同荷载对应不同的损伤类型;②损伤有无发生与荷载值以及位置相关,当有较大荷载作用在易损部位时,该部位出现损伤,而当荷载值较小,或荷载作用在结构其他部位时,该部位可能会处于完好状态;③损伤程度与荷载值相关,结构损伤程度会随荷载值的增大而增大。

(3)振动分析模型复杂。在理论分析时,为了尽可能准确地反映结构的振动性能,应考虑荷载的随机性、模型的精确性以及求解的有效性,这会使得分析模型变得非常复杂。例如,对于车桥动力系统,其复杂性体现在:①轨道不平顺、蛇行运动等随机过程的实际数据很难准确测量,在理论分析时,只能通过使所采用数据的频谱特性与实际的相接近,来模拟实际的列车荷载;②车辆模型和桥梁模型耦合在一起;通常车辆模型和桥梁模型分别是一个多自由度的复杂有限元模型,而再通过假定的轮轨关系将二者联系起来,对这个耦合系统进行求解会变得非常复杂;③车桥系统动力方程组是一个时变系数的微分方程组,由于各轮对的位置在随时间发生变化,车桥系统振动问题是一个动力瞬态分析问题,在每一个计算时刻,车辆和桥梁的振动都应根据力的平衡及变形协调条件,重新对车桥耦合方程组进行计算,因此动力方程组的求解是复杂的。

(4)模型参数有误差。实际工程中的桥梁随着运营时间增长,其混凝土材料会出现收缩徐变、老化等现象,造成混凝土弹性模量和强度等模型参数的改变;而温度的变化也会引起钢材的弹性模量和强度降低。这些参数的变化可能会直接影响识别结果,因此,为了实现结构状态的合理判别,需对结构行为进行深入研究,同时尽量减小模型参数误差,或减小这些误差对识别结果的影响。

综上所述,桥梁结构损伤诊断就是在无法准确测量的荷载作用的情况下,使用不完备的,又受噪声影响的结构响应信息,识别受外部荷载影响较大的结构状态,是一个具有较高难度的复杂系统识别问题。

1.1.3 桥梁结构损伤诊断分类

由于桥梁结构损伤诊断对桥梁安全运营及维护加固有重要的指导意义,但同时其求解难度又很大,所以国内外许多学者致力于结构损伤诊断研究,这使各种损伤识别方法在近些年来都得到长足的发展。这些损伤诊断研究可以按照诊断内容、采集的数据类型和方法进行分类,如图 1.3 所示。

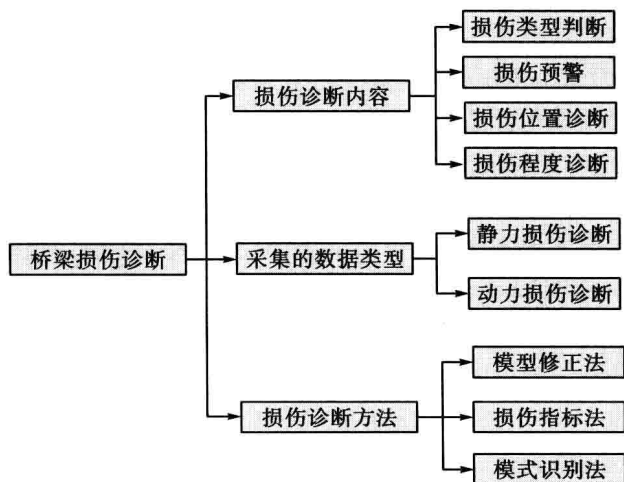


图 1.3 桥梁结构损伤诊断分类

1. 诊断内容

若按照损伤诊断内容进行分类,可以分为以下 4 类:

(1)损伤预警。识别结构是否出现损伤,若出现损伤,则可以进行下面的损伤诊断;否则,直接给出损伤诊断结果——桥梁处于完好状态。

(2)损伤类型判断。桥梁结构损伤类型有刚度折减、质量改变、边界条件改变等,应首先对实际桥梁所发生的损伤类型进行判断,然后才能诊断其位置、程度等。

(3)损伤位置诊断。在准确判断结构损伤类型的基础上,诊断结构具体的损伤位置,或判定损伤所处的区间。

(4)损伤程度诊断。在损伤位置诊断的基础上,针对损伤的具体结构位置或结构区间,进一步诊断该位置或区间的损伤程度。

2. 采集的数据类型

(1)静力损伤诊断。静力损伤诊断就是使用在静态情况下工作的传感器,如位移计、应变计等,监测结构的静力响应,然后利用这些测得的数据进行结构损伤状态的评判。静态测试数据精度高,稳定性好,对测试条件要求较高,是结构模型试验和现场荷载试验中较为普遍的一种方法。但在现场荷载试验时,需中断交通,同时荷载可控,而这两点在实际桥梁工程的健康监测中均无法做到,因此静力损伤识别在实际桥梁的健康监测中应用受限。

(2)动力损伤诊断。动力损伤诊断是利用结构动力响应数据,如加速度传感器采集到的数据,进行损伤识别研究。按照响应数据的处理方法不同,动力损伤诊断分为频域法、时域法和时频域法。频域法一般是首先识别出结构的模态参数,然后利用这些模态参数进行损伤识别研究;时域法是直接利用结构的动力响应时程数据进行损伤识别;时频域方法是使用相关的理论和方法从测试信号中提取时频域特征信息,利用这些特征识别结构损伤。

3. 诊断方法

(1)模型修正法。模型修正法是通过使理论值与实测值之间的误差最小化,建立优化模型,并不断修正该模型,实现结构损伤诊断,但其识别结果易陷入局部极小值。

(2)损伤指标法。损伤指标法是对结构动力响应数据进行处理,从中提取出含有结构损伤信息的指标,通过对指标的直接观察和比较,识别结构损伤,通常用于简单的损伤诊断问题中。

(3)模式识别法。模式识别法按照一定的规则和算法,对损伤指标进行比较,适用于复杂的损伤诊断问题。该方法将损伤指标看作随机分布的变量,考虑了测试误差、结构材料和尺寸的不确定性等因素,能够得到与实际相符的识别结果,被认为是解决结构损伤诊断问题的主要发展方向。

1.2 结构损伤诊断研究回顾

结构损伤诊断的相关研究早在 20 世纪 60 年代就已出现,最早应用于机械、航空航天、军事等领域,后来逐渐扩展到土木工程领域。结构损伤诊断是基于各种监测到的结构整体响应数据(位移、应变、内力、加速度等),对结构有无损伤、损伤的类型、严重性、位置和程度等进行合理评判,涉及信号处理、人工智能、数理统计、随机过程等相关学科

的知识。近20年来,众多学科领域的学者对其进行了研究,取得了一系列的研究成果。

分析这些研究成果可以看出:静力损伤诊断不适合实际桥梁工程的健康监测,为此,本书重点介绍动力损伤诊断的相关研究。动力损伤诊断按照损伤诊断方法的不同,又分为模型修正法、损伤指标法和模式识别法,每种方法按照数据的处理方法不同,又分为频域法、时域法及时频域法。下面分别对这些研究方法进行简要介绍。

1.2.1 模型修正法

模型修正法是先将结构损伤识别问题中待识别的结构参数,如单元刚度、截面面积等,看作优化变量,并赋予该变量一个初值,通过使优化变量计算得到的理论值(频率、振型、加速度、位移等),与实际测量值之间的误差最小,建立损伤诊断的优化模型;然后利用数学中的优化算法对该模型进行优化求解,得到最优变量值,并认为该值为待识别的结构参数。该方法在频域及时域分析中应用较多。

1. 基于频域分析的模型修正法

基于频域分析的模型修正法一般是先识别出结构的模态参数,如振型、频率、阻尼比等,然后利用动力有限元方程建立结构物理参数与模态参数之间的关系,通过建立优化的损伤诊断模型,识别结构的物理参数^[29]。

国内外学者提出了大量的模态参数识别方法,它们可分为时域识别法和频域识别法。时域识别法是采用结构响应的时程数据,直接在时间域内识别模态参数,如ITD法、STD法、ARMA法和随机子空间法;频域识别法是基于结构的传递函数或频响函数,在频域内识别结果的频率、振型等,如对于单自由度体系,有幅值法、分量法、导纳圆法,对于多自由度体系,有单模态识别法和多模态识别法。这些方法的详细过程参见文献^[30]。

基于频域分析的模型修正法按数学优化模型的建立方式不同,一般可以分为最优矩阵修正法、灵敏度分析法和特征结构分配法^[31]。

最优矩阵修正法的基本原理是在特定的约束条件下,利用结构动力特征方程建立目标函数,根据最小范数理论^[32]或最小秩扰动理论^[33]优化求解得到修正的结构刚度矩阵,进而识别结构的损伤位置和损伤程度。最优矩阵修正法经过不断发展,虽然已经成功地解决了许多工程问题,但是如何在测试噪声条件下保证动力矩阵的稀疏性仍未很好地解决。

灵敏度分析法就是利用模态参数对结构刚度矩阵元素(或物理参数)的导数构造一阶Taylor展开式,从而通过测试得到的模态参数直接计算结构的损伤状态^[34]。灵敏度分析方法的优点是概念清晰、计算简单,缺点是灵敏度计算量特别大,尤其是当结构非线性较强需要考虑高阶灵敏度时计算量更是不可接受。如果能够先对结构进行大致定位,再采用灵敏度分析方法,将会大大降低计算量。

特征结构分配法的基本原理是通过合理选择虚拟控制系统中输出影响矩阵和反馈增益矩阵,使增加虚拟控制后的结构动态特性与实际测得的动态特性一致,从而对结构的有限元模型进行修正^[35]。特征结构分配法是结构控制的一种模拟方法,将其用于结构的损伤识别中,还存在诸如矩阵不对称、算法不收敛、不完备测量时识别精度较低等问题,这些问题还需要深入研究。

2. 基于时域分析的模型修正法

采用采集到的结构动力时程数据,直接对结构进行损伤诊断,一般需要针对结构所承

受的荷载进行, 结合不同的荷载分布特点, 分析荷载可能引起的损伤类型。

对于移动荷载作用下的损伤识别, X. Q. Zhu^[36]和 Z. R. Lu^[37]等针对移动荷载值未知的情况, 将损伤识别问题的求解分为两步: 首先用测得的结构动力响应值识别出移动荷载值, 进而计算结构的弹性恢复力; 然后比较该恢复力与由结构刚度矩阵计算出的弹性恢复力的误差, 通过该误差最小化建立优化模型, 并使用优化算法计算出最优变量, 进而确定结构的损伤状态。Z. R. Lu 和 S. S. Law^[38]通过测量的结构动力响应值和优化计算得到的理论值之间的误差最小化, 建立损伤识别优化模型; 并基于该模型, 对结构不同的损伤类型, 如弹性模量、惯性矩和截面面积等的损伤进行识别。Luna Majumder 等^[39,40]将结构单元刚度和支座刚度同时作为优化变量进行损伤识别; 在识别过程中, 使用移动车轮加簧上质量模拟车辆模型, 考虑了车桥相互作用、桥面不平顺、测试数据的不完备以及测试噪声, 并使用一个作用有移动激振器的数值梁模型检验了所提出的方法。卜建清等^[41]基于车激桥梁响应, 采用最小二乘法和正则化方法识别桥梁损伤。

对于地震作用下的损伤识别, 李杰等^[42]利用荷载反演的方法进行研究, 荷载反演方法是在得到部分荷载信息的情况下, 比较该已知部分荷载信息与由优化变量计算理论值间的误差, 并通过该误差最小化, 建立优化模型; 在地震作用下的损伤识别中, 利用“地震动作用下各质点承受相同的基底加速度激励”这一力学背景对等效节点力进行修正, 弥补了因无法测量地震动过程而造成的信息欠缺。Duan Wang 等^[43,44]假定计算区间起始时刻结构的地震输入力为零, 并以此为初始条件进行迭代计算, 最终获得结构的物理参数和输入信息, 达到识别损伤的目的。

对于风荷载作用下的损伤识别, 李杰、陈隽^[45,46]利用风在空间上的相关性, 将结构的等效节点力进行分组, 并认为在同一组内, 脉动风时程完全相关; 然后利用该性质, 对荷载反演的等效节点力进行修正, 直至所得到的优化变量满足误差容许条件, 进而识别结构损伤状态。

除上述结构常遇荷载作用下的时域优化识别方法外, 还有其他一些时域优化识别方法。X. Y. Li 等^[47]利用结构单位脉冲(unit impulse response, UIR)进行损伤识别研究。首先借助离散小波变换从结构加速度响应中计算出 UIR; 基于有限元模型和时间分步积分方法, 获得 UIR 的灵敏度矩阵; 利用该矩阵, 将损伤识别问题分为计算完好和损伤状态的灵敏度矩阵两部分; 使用统计分析方法对这两个矩阵进行研究, 以确定损伤位置和程度。Michael Link 等^[48]分别利用频域和时域残余量对模型进行修正, 以实现结构损伤识别, 并将这两种修正技术同时运用到一梁式结构中。试验结果表明, 使用时域数据残余量修正技术能够利用较少的传感器数量达到较好的识别效果。在结构输入荷载部分已知的情况下, 陈隽、K. D. Hjelmstad 和 Mo. R. Banan 等^[49-51]利用荷载反演的方法对损伤识别问题进行了研究。

通过对基于频域和时域模型修正法具有的相关研究文献进行分析, 可以看出模型修正法具有以下特点:

(1)模型修正法将损伤识别问题看成系统识别的反问题, 直接采用优化算法进行求解, 思路清晰, 易于理解和接受。

(2)模型修正法在求解时采用模型修正技术, 使优化算法和结构有限元分析耦合在一起, 相互之间不断调用, 这增加了识别问题的复杂性; 对于简单的试验模型, 该方法尚可求解, 而对于在车辆、地震和风等荷载作用下的实际复杂结构, 该方法可能会失效。

(3)由于模型修正法包含有限元分析技术,所以其目标函数必然十分复杂,易陷入局部极小值而使结果变得不可靠。

(4)优化变量对噪声敏感,当存在测试噪声的影响时,会出现相互矛盾的优化方程,造成求解困难。

1.2.2 损伤指标法

损伤指标法是指从结构动力响应数据中提取能够表征结构损伤状态的指标,通过直接观察该指标对结构状态进行判别的方法。损伤指标可以在响应数据的频域内分析中得到,也可以在时域或时频域内分析中得到。由于在时域和时频域内进行分析的方法具有较多的关联性,所以将它们放在一起进行介绍。

1. 基于频域分析的损伤指标法

基于频域分析的损伤指标法是指由测试得到的结构模态特征参数——固有频率、振型及应变模态构造能对结构损伤进行指示的损伤指标,通过直接观察损伤指标来对结构是否发生损伤以及损伤发生的位置进行识别的方法。常见的频域损伤指标有以下3类。

1) 简单函数类损伤指标

简单函数类损伤指标是直接将结构的频率、振型、应变模态等作为损伤指标,具有明确的物理意义,同时直接与结构刚度相关,因此可用于识别结构损伤。谢峻^[52]直接利用频率作为指标识别结构损伤;Mayes^[53]采用平移和转动自由度振型的相对变化率对结构进行损伤定位;Rizos^[54]利用振型数据对某悬臂梁进行损伤位置和损伤程度的识别;杜思义^[55]使用应变模态方法对刚架桥的损伤识别进行了研究。

2) 复杂函数类损伤指标

复杂函数类损伤指标是定义一个复杂的函数关系,将结构固有的损伤指标映射到另外一个空间中去而得到的损伤指标。该类指标有模态保证准则、坐标模态保证准则、模态柔度和模态应变能等。

模态置信准则实质是对结构前几阶完好振型与当前检测状态振型相关性的一种描述^[56],其值趋近于1表示结构健康,趋近于0表示结构损伤严重。坐标模态保证准则是针对具体坐标点处的结构状态进行判别,能够用于判别结构损伤位置^[57]。

柔度矩阵的改变主要是由低阶模态引起的,从而只要测量出低阶模态就可以获得精度较好的柔度矩阵,这样得到的柔度矩阵常常被称为模态柔度矩阵。根据损伤前后两个模态柔度矩阵元素的差值,找出差值矩阵各列中最大元素,即可找出损伤位置^[58]。研究表明,模态柔度矩阵比单一的频率或振型具有更好的局部损伤指示能力。

单元的模式应变能够较好地表征该单元的状态,如果单元发生损伤,模式应变能会发生变化。由于模式应变能的计算需要单元的全部节点自由度坐标,而实际测量中往往只能得到位移振型坐标,所以导致计算得到的模式应变能不是理论意义上的结果,这使得模式应变能指纹的损伤指示能力大大减弱。

3) 曲率类损伤指标

曲率类损伤指标是指通过计算前两类指标在某空间坐标方向上的曲率而得到的动力指