



水工建筑技术研究论丛

高桩码头基桩损伤识别方法 及承载力检测技术研究

DAMAGE IDENTIFICATION METHOD AND
BEARING CAPACITY TEST TECHNOLOGY
OF HIGH-PILED WHARF PILES

孙熙平 王元战 张 强◎著



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



水工建筑技术研究

高桩码头基桩损伤识别方法 及承载力检测技术研究

DAMAGE IDENTIFICATION METHOD AND
BEARING CAPACITY TEST TECHNOLOGY
OF HIGH-PILED WHARF PILES

孙熙平 王元战 张 强◎著



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

内 容 提 要

本书主要内容包括基于动力特性的高桩码头基桩损伤诊断方法研究、现役高桩码头基桩承载力检测方法研究两大部分。本书涉及的主要科学技术问题包括:环境激励下高桩码头模态参数识别方法、高桩码头基桩损伤识别方法、高桩码头现役基桩承载力检测方法等。本书提出了对现役的高桩码头基桩进行损伤识别及承载力检测方法,可为相关研究工作与工程应用提供一定参考。

图书在版编目(CIP)数据

高桩码头基桩损伤识别方法及承载力检测技术研究 /
孙熙平, 王元战, 张强著. —北京: 人民交通出版社股
份有限公司, 2017. 6

ISBN 978-7-114-13534-7

I. ①高… II. ①孙… ②王… ③张… III. ①高桩码
头—损伤—识别 ②高桩码头—承载力—检测—IV.

①U656.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308129 号

水工建筑技术研究论丛

书 名: 高桩码头基桩损伤识别方法及承载力检测技术研究

著 作 者: 孙熙平 王元战 张 强

责任编辑: 崔 建 朱明周

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.ccpres.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: 720 × 960 1/16

印 张: 7.75

字 数: 130 千

版 次: 2017 年 6 月 第 1 版

印 次: 2017 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13534-7

定 价: 25.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

高桩码头是应用广泛的码头结构形式之一。我国现有大量的使用了几十年的老旧高桩码头,这些老码头在船舶撞击、使用荷载、环境侵蚀等作用下,基桩普遍存在损伤破坏的问题。高桩码头基桩作为支承码头上部结构的主要受力构件,一旦破坏就会严重影响码头的安全,因此基桩损伤检测是保证码头安全使用、安全维护和安全管理的必要技术措施。同时,对于老旧的高桩码头,现有基桩承载力的检测是进行码头检测评估、升级改造的必要前提条件。但高桩码头基桩上部存在复杂的结构形式,现阶段对于桩顶为非自由端这样的结构,没有有效可行的基桩损伤诊断和承载力检测方法。因此,如何对现役的高桩码头基桩进行损伤识别及承载力检测是亟须研究解决的课题。

本书拟将基于动力特性的检测方法引入高桩码头基桩的损伤识别中,突破传统的低应变反射波法,从另外一个新的角度研究高桩码头基桩检测方法。首次提出区域堆载法检测高桩码头现役基桩承载力技术,该方法无须打开码头基桩上部的结构约束,即可实现高桩码头现役基桩承载力的无损检测。

本书研究内容主要包括基于动力特性的高桩码头基桩损伤诊断方法研究、现役高桩码头基桩承载力检测方法研究两大部分。涉及的主要科学技术问题包括:环境激励下高桩码头模态参数识别方法、高桩码头基桩损伤识别方法、高桩码头现役基桩承载力检测方法等。

(1)环境激励下高桩码头模态参数识别方法研究。针对高桩码头原型动力试验激励难的问题,研究根据正常工作时通过环境荷载激励下的动力响应去识别高桩码头模态参数的方法。

①提出了一种适用于环境激励下高桩码头模态参数识别的 ERA 方法。依据自然激励技术和系统最小实现的基本原理,详细推导 ERA 算法,编制了 NExT-ERA 高桩码头模态识别程序。

②制作了考虑桩—土作用的大比尺(1:10)高桩码头物理模型,并将本书提出的基于环境激励的模态参数识别理论方法应用到物理模型模态试验中,结合动力特性的数值计算分析,揭示了高桩码头模型在环境荷载激励下的模态阶次和模态特性。

(2)高桩码头基桩损伤识别方法。针对高桩码头基桩本身的结构特点,首次提出了基于模态应变能的高桩码头基桩损伤诊断方法。依据振动微分方程,

详细推导了模态应变能表达式,并对模态应变能损伤定位原理进行证明。给出MSE损伤定位的实施步骤,编制了基于模态应变能的高桩码头基桩损伤识别程序。以高桩码头一个排架为研究对象,通过数值算例分析,对不同工况下高桩码头基桩的损伤进行诊断。研究显示,模态应变能变化率对损伤单元有较强的敏感性,能够识别出高桩码头基桩不同工况下的损伤。研究结果可为基于动力特性的高桩码头动力无损检测提供有益参考。

(3)高桩码头现役基桩承载力检测方法。首次提出区域堆载法检测高桩码头现役基桩承载力技术,解决了堆载区域、测试内容、加载卸载终止条件等关键技术问题。首次实施高桩码头基桩承载力原型试验,测试在分级荷载作用下码头整体变形变位、基桩沉降、结构构件应变等,结合数值计算分析,确定了基桩的竖向承载力。依据原型试验检测结果,对依托工程提出灌注桩加纵梁的改造方案,提高了码头整体竖向承载力,同时保持了结构整体性、受力合理性及变形协调性。

本书主要成果得到了交通运输部科技项目“在役高桩码头结构整体安全性评估技术”(2014-328-224-040)、国家自然科学基金“不完备模态测试下高桩码头基桩损伤识别方法研究”(51409134)的资助与支持,在此表示衷心感谢!同时,本书的部分主要研究成果“高桩码头动力无损检测、整体安全度评估及加固技术研究”“高桩码头升级改造原型试验检测技术研究”分别获得2013年度中国航海学会科学技术进步二等奖、中国水运建设行业协会科学技术进步三等奖,并获得了科研同行的认可与支持,在此一并表示衷心感谢!

本书的主要内容是在作者孙熙平的博士论文基础上修改完成,在论文完成期间得到导师王元战教授、赵冲久研究员无微不至的指导与帮助,在此对两位导师表示深深的感谢!作者诚挚感谢所有为本书做出贡献的同事与学者们:感谢交通运输部天津水运工程科学研究所张勇高级工程师、齐广政工程师、崔衍强工程师,他们与作者一起完成了高桩码头基桩竖向承载力现场原型试验工作;感谢交通运输部天津水运工程科学研究所韩阳工程师、张干工程师,本书中的“环境激励下高桩码头模态试验”是他们与作者一起合作完成。感谢他们为本书研究做出的卓有成效的贡献!

科学技术是不断发展的,人们对科学问题的认知也是不断深入完善的。本书涉及的范围较广、较新,其中一些观点、方法仅为作者当前对于这些问题的认识,某些观点与方法会随着研究工作的不断深入而得到改进。鉴于作者的水平及经验所限,书中存在的缺点和不足之处,敬请读者批评指正。

作 者
2016年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 环境激励下模态参数识别研究	4
1.2.2 基于动力特性的损伤识别方法	7
1.2.3 在役高桩码头基桩承载力检测方法	10
1.3 本书的主要研究工作	11
1.4 本书的特色及创新点	13
第 2 章 高桩码头模态参数识别方法研究	14
2.1 自然激励技术	14
2.2 特征系统实现算法	16
2.2.1 状态方程	17
2.2.2 实现和最小实现	18
2.2.3 脉冲响应矩阵的建立	18
2.2.4 构造 Hankel 矩阵	18
2.2.5 系统最小实现	19
2.2.6 ERA 算法实现	21
2.2.7 噪声模态的剔除	25
2.2.8 ERA 程序算法程序流程	27
2.3 ERA 算法模态参数识别数值验证	28
2.3.1 ERA 程序算法识别模态参数	28
2.3.2 高桩码头有限元模态分析	29
2.4 本章小结	31
第 3 章 环境激励下高桩码头模态试验研究	32
3.1 物理模型制作	32
3.2 试验测试	34
3.3 试验测试结果及分析	34
3.3.1 试验测试结果	34



3.3.2 ERA 算法模态参数识别结果	38
3.4 物理模型的有限元模态分析	41
3.4.1 有限元模型的建立	41
3.4.2 有限元模型计算结果	41
3.4.3 试验结果与计算值对比分析	42
3.5 本章小结	43
第4章 高桩码头基桩损伤识别方法研究	45
4.1 基于 MSE 损伤定位	45
4.1.1 模态应变能基本概念	45
4.1.2 基于 MSE 的损伤定位原理	47
4.1.3 损伤定位步骤	49
4.2 数值算例验证分析	50
4.2.1 有限元模型的建立	50
4.2.2 动力响应分析	50
4.2.3 模态参数识别	52
4.3 损伤诊断分析	53
4.3.1 单一位置的损伤识别	53
4.3.2 不同位置的相同损伤程度的损伤识别	54
4.3.3 不同位置的不同损伤程度的损伤识别	55
4.4 本章小结	56
第5章 高桩码头基桩竖向承载力检测方法	57
5.1 工程背景	57
5.2 试验区域确定	58
5.3 试验测试内容	59
5.3.1 基桩竖向位移测试	59
5.3.2 应变测试	60
5.3.3 码头结构整体位移测试	61
5.4 仪器选型及仪器参数	62
5.5 加载方式及要求	62
5.6 测试系统	63
5.6.1 基准桩的选型制作	63
5.6.2 基准桩的打设安装	64
5.6.3 基准框架焊接成型	64



5.7 加载、卸载终止条件	65
5.8 本章小结	66
第6章 高桩码头基桩竖向承载力原型试验研究	67
6.1 试验仪器安装及调试	67
6.1.1 竖向位移测试仪器	67
6.1.2 应变测试仪器	68
6.1.3 测试数据采集系统和采集软件	69
6.1.4 安全监测系统	70
6.2 试验数据	71
6.2.1 基桩竖向位移数据	72
6.2.2 基桩应变数据	80
6.3 试验数据分析及结论	82
第7章 高桩码头基桩竖向承载力有限元分析	84
7.1 概述	84
7.2 有限元模型的建立	84
7.2.1 结构模型计算参数	84
7.2.2 桩—土作用模拟	85
7.2.3 土体初始应力场的模拟	85
7.3 有限元模型修正	86
7.4 有限元模型分析结果与试验对比分析	88
7.5 本章小结	94
第8章 高桩码头升级改造方案研究	95
8.1 依托工程码头前承台改造方案设计	95
8.2 依托工程前承台改造后设计荷载作用下的有限元分析	99
8.3 结论	102
第9章 结论与展望	103
9.1 结论	103
9.2 展望	106
参考文献	107

第1章 绪 论

1.1 概 述

高桩码头是港口工程领域应用广泛的结构之一,在经历了大规模的港口建设期后,我国现阶段存在大量使用了几十年的老旧高桩码头。这些老码头在使用期内,由于荷载作用、船舶撞击、岸坡土体变形挤压、混凝土材料劣化、自然环境侵蚀等原因,高桩码头基桩普遍地存在损伤和破坏的问题。图 1-1 为天津港某高桩码头由于岸坡土体变形造成基桩位移,严重影响码头结构的安全;图 1-2 为船舶撞击造成高桩码头基桩顶端断裂破损;图 1-3 为船舶撞击造成高桩码头基桩水上部位发生倾斜变形,而对于水下及泥面以下是否出现损伤未知;图 1-4 为船舶撞击造成高桩码头前沿基桩变位,潜水人员进行水下损伤检测,但对于泥面以下部位是否破损无法检测。

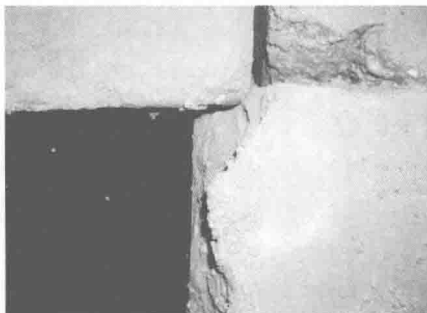


图 1-1 岸坡变形造成基桩移位



图 1-2 船舶撞击造成基桩桩顶断裂

高桩码头基桩作为支承码头上部结构的主要受力构件,对码头的安全性具有至关重要的作用。高桩码头基桩一旦破坏就会严重影响码头的安全,因此基桩损伤检测是保证码头安全使用、安全维护和安全管理的必要技术措施。

同时,对于老旧的高桩码头,现有基桩承载力的确定是进行码头检测评估、升级改造的必要前提条件,因此如何对现役的高桩码头基桩的承载力进行检测



也是亟须研究解决的课题。

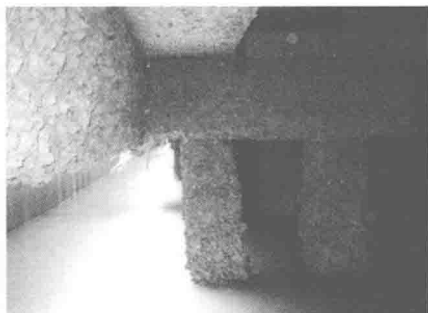


图 1-3 船舶撞击造成基桩倾斜变位



图 1-4 潜水人员进行水下基桩损伤检测

现阶段,对于桩顶为自由端的单桩,损伤检测已有较多研究,也发展出较多比较成熟的检测方法,如低应变反射波法、静载法、钻孔取芯法和声波透射法等,而对于高桩码头基桩的损伤检测没有成熟可靠的方法,国内外的研究成果也很少。实际工程中,对高桩码头基桩进行损伤检测大多仍沿用在单桩检测中应用广泛的低应变反射波法,只是对反射波波形的分析处理方法、应力波的激振和接收位置等进行了研究和改进。南京水利科学研究院^[1]采用物理模型实验和数值模拟研究承台—桩结构应力波反射特点,指出利用反射波波形对高桩码头基桩的损伤进行诊断是很困难的。中交四航局港湾工程设计院有限公司^[2]研究在桩身一侧进行切槽,然后在桩身另一侧放置传感器,利用低应变反射波法判断基桩完整性。中船第九设计研究院研究在桩身植入膨胀螺栓后进行激振,然后在桩身一侧放置传感器接收信号,同样利用低应变反射波法判断基桩完整性。交通运输部天津水运工程科学研究所^[3-4]也开展过基于反射波法的高桩码头基桩完整性检测的研究,重点研究了最佳的激振和接收位置、波形分析方法、波形分离和重构技术。但以上研究成果经过实际工程检验,效果都不是很理想。其主要原因是:高桩码头基桩与普通单桩相比,结构形式存在较大不同,高桩码头基桩上部存在桩帽、横梁、纵梁和面板等结构。使用低应变反射波检测基桩完整性时,在面板与横纵梁、横纵梁与桩帽、桩帽与桩顶等接触面以及基桩损伤处等均会出现应力波的多次反射,给基桩损伤检测带来很大的困难。同时,反射波法是在单桩检测的基础上发展起来的,其理论基础是一维弹性杆模型,而高桩码头基桩上部有复杂的结构,应力波反射有明显的三维效应,因此低应变反射波法应用于高桩码头基桩检测有较大的缺陷。

相关研究也表明^[1-4],在实际工程中采用低应变反射波法检测高桩码头基



桩时,很难得到基桩完整的反射信号,对水下及泥面以下隐蔽性部位的损伤无法做出有效的识别,并且检测时要对桩身进行切槽或植入膨胀螺栓,会对码头基桩造成较大的损伤。综上,应用传统的反射波法进行高桩码头基桩的损伤检测存在较大的不足,如何有效地对高桩码头基桩进行无损检测,特别是能检测水下及泥面以下隐蔽性部位的损伤是亟待研究解决的课题。

基于动力特性的结构健康监测、检测是当前土木工程领域研究的热点。频率、振型等模态参数是结构物的固有属性,结构的损伤会引起模态参数的变化,通过在结构物上布设传感器测试结构的动力响应信息,利用模态参数识别方法识别动力参数,结合相应的损伤诊断方法,即可对结构物进行损伤识别,这就是基于动力特性结构健康检测的基本原理。本书拟将基于动力特性的检测方法引入高桩码头基桩的损伤识别中,突破传统的低应变反射波法,从另外一个新的角度研究高桩码头基桩检测方法。

同时,对于单桩承载力的测试,当前已有较多比较成熟的方法,如静载荷试验、高应变动力测试法、动静结合测桩法等。然而,高桩码头基桩上部存在复杂结构,桩顶已不再是自由端,上述进行单桩承载力测试的方法已不再适用于高桩码头基桩。高桩码头现役基桩承载力的确定是进行码头检测评估和升级改造的重要参数和必要前提条件。因此,亟须研究高桩码头基桩承载力检测的方法。

本书采用理论分析、有限元数值模拟、物理模型试验、现场实测相结合的方法研究高桩码头基桩检测技术,研究内容主要包括基于动力特性的高桩码头基桩损伤诊断方法研究、现役高桩码头基桩承载力检测方法研究两大部分。涉及的主要科学技术问题包括:环境激励下高桩码头模态参数识别方法、基于动力特性的高桩码头基桩损伤识别方法、高桩码头现役基桩承载力检测方法等。

1.2 国内外研究现状

基于动力特性的结构物无损检测方法在航空航天、道路桥梁、航电枢纽、海洋平台等领域已取得一定的研究成果。大型结构模态参数识别方法开展研究的时间最早,也取得了较多研究成果,目前在桥梁、航天等实际工程中已有一定程度的应用。在此基础上发展的损伤诊断方法,近些年来一直是工程界研究的热点,但对于大型复杂结构的损伤诊断方法研究仍很不成熟,目前大多仍停留在理论研究阶段。对于基桩承载力检测的研究,大多研究关于单桩承载力的检测方法,如静载荷试验、高应变动力测试法、动静结合测桩法等。然而,对于高桩码头基桩,基桩作为整个结构体系的一部分,现阶段对于类似这样结构的承载力检测



尚没有成熟的方法。

1.2.1 环境激励下模态参数识别研究

对于大型结构,如高桩码头、桥梁、大坝、海洋平台等,进行在线实时的模态参数识别往往只能依靠环境荷载的激励。与传统的模态参数识别方法相比,基于环境激励的结构模态参数识别仅仅需要环境荷载的激励,不需要额外的激振设备,不影响结构物的正常使用,并且操作方便、测试费用较低,因此具有广泛的发展空间和应用前景。但是,对于结构物系统而言,环境激励下模态参数识别方法的输入荷载(环境荷载)是未知的,在这种输入荷载未知的情况下,如何有效获得结构物的模态参数是研究的关键问题^[5-6]。

环境激励下模态参数识别问题的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代 B. L. Clarkson^[7] 的研究。1973 年, Ibrahim^[8] 创立的仅利用时域振动响应信号进行参数识别的方法,极大地促进了模态分析技术的发展,在随后的多年,该方法又不断得到完善,形成了独具一格的时域 ITD 方法^[9]。该方法的特点是,能够在未知输入条件下,直接根据响应时域信号进行模态参数识别,识别时采用了全部测试数据提供的信息量,无须将测试信号进行不同域之间的变化,避免了由数据变换而引起的截断误差,但该方法要求信号是平稳、均值为零的高斯分布,实际应用时测试量大、不易克服噪声影响。1976 年, Box 与 Jenkins 出版专著详细论述了用于时域参数识别的时序分析方法^[10],该方法利用能反映系统特性的一组有序的按时间次序排列的随机数据,通过建立描述这些随机数据内在规律的自回归模型(AR)或自回归滑动平均模型(ARMA)来识别系统模态参数,其优点是无能量泄漏,分辨率较高,可以方便地用于在线模态分析,但该方法属于局部识别法,仅适用于白噪声激励,实际应用时模型定阶比较困难,并且常规时序模型无法识别振型。近 20 年来,环境激励下的模态参数识别方法受到了航空、航天、航海、汽车等领域中的专家、学者的极大重视,也受到国际、国内工程界内人士的重视,如每年在美国举办的国际模态学术会议 IMAC 上,有很多文章研究和讨论环境激励下的工程结构的模态参数识别问题^[11-31]。1983 年, Mergeay 研究了单参考点复指数 SRCE 法^[32],其核心是最小二乘估计和脉冲响应函数关于各阶模态的复指数展开理论的结合,但该方法是一种局部识别法。后来, Leuridan 和 Vold 在此基础上进一步发展了多参考点复指数 PRCE 法^[33],该方法同时利用所有激励点和响应点的数据进行分析,与 SRCE 法相比,扩大了参数识别的信息量,使识别的模态参数具有整体统一性,并具有较强的对虚假模态的辨识能力,识别精度大大提高,但该方法所要求的激振技术较为复杂,测试数据量和运算量



很大,且难于运用到大型工程结构上。1984年,J. N. Junang 和 R. S. Pappa 首先提出了基于实现的子空间方法的特征系统实现算法(ERA)^[34],该方法利用了 n 自由度线性系统的状态方程和系统最小实现理论,属于多输入、多输出的时域整体模态参数识别方法,它以多点激励得到的脉冲响应函数矩阵为基础,构造 Hankel 矩阵,利用奇异值分解技术,确定出最小阶数的用于描述状态方程的系统。矩阵和输入、输出矩阵,构成最小阶的系统实现,通过求解系统矩阵特征值问题得到模态参数。1985年,Juang 提出了另一类确定系统最小实现的算法,其核心是 QR 分解技术,并进一步研究了模型缩聚减小解算量问题。特征系统实现法的理论推导严密,它以最少的参数、最小的阶次来描述系统的特征和进行求解,该方法识别精度高,是比较完善和先进的时域参数识别方法之一,当时已在航空航天复杂结构中得到良好应用,但在测点较多时 Hankel 矩阵阶次很高,对计算硬件要求较高。1986年,他们进一步研究了噪声对模态参数识别结果的影响^[35]。1988年,他们研究了用数据相关来提高模态参数识别精度^[36]。1986年,S. C. Braun 提出将 Prony 方法应用于结构模态参数识别,该方法使用自由振动数据或脉冲响应数据,当使用脉冲响应数据时,该方法就是复指数方法,该方法的主要限制就是所需数据的瞬态性,对数据的采样要求比较高。1986年,S. G. Braun 提出的两级最小二乘方法(Two Stage LS,简称两级 TSLS)也是基于 ARMAX 模型的,但它将参数的非线性估计问题转化为二级线性最小二乘问题,与下文提到的 PEM 方法相比,计算大为简化,参数估计也能达到次优的效果。Ljung, L. 在 1987 年^[37]提出了预测误差方法(Prediction Error Method, PEM),它是基于有确定性输入的 ARMA 模型即 ARMAX 模型的,可以把它看作广义的最小二乘方法,PEM 误差平方最小化方程是待估参数向量的非线性方程,必须进行迭代优化,但会引起算法稳定性问题和计算上的复杂性。但理论上该方法给出的参数估计是统计意义上最优的。Ljung, L 在 1987 年又提出了辅助变量(Instrumental Variable,简称 IV)方法,它是基于与 ARX 相类似的模型,但需要迭代步骤,尽管每一步的迭代计算得到的是统计一致的估计,但为了收敛性要求,需要的迭代次数太多。Fassois S. D. 和 Lee J. E. 在 1993 年^[39]提出了线性多级(linear-min-tistage,简称 LMS)方法,他们使用多级线性 LS 方法并进行解卷积计算,计算效率与两级 TSLS 方法相类似。Hyoung M kim 等在 1994 年^[40]开始研究采用 ERA 方法识别结构模态参数,并把研究成果应用于识别和平号空间站和国际空间站的模态参数^[41-42]。1995 年,James 等^[43]从解析结果推导证明了系统任意点的脉冲响应,与白噪声激励时两点之间的响应互相关函数具有相似的解析表达式,从而可以将运用脉冲响应函数进行参数识别的时域基本方法扩展到运



用相关函数进行参数识别,并进一步提出了利用互相关函数识别工作模态参数的 NExT 技术,运用该技术对一座公路桥在交通车辆环境激励下的模态参数进行了识别,并与力激励下的结果进行比较,结果表明差异较小。1997 年,Her-mans 利用响应互相关函数替代自由响应信号并结合传统的 ITD 法进行模态参数识别^[44]。1997 年,丹麦的 John Christian Asmussen 博士^[45]对 Vestvej 大桥进行了环境激励下模态参数识别问题的研究,用随机减量和频域谱分析技术获取该大桥的模态参数,美国费城运输安全部在 1998 年对新泽西州的两座大桥进行了环境激励下模态参数识别问题的研究。1999 年,Lawrence 采用 Laplace 小波与信号的脉冲响应函数,然后进行相关处理,将多频的脉冲响应函数分解为单频的脉冲响应函数,然后进行模态参数的估计^[46]。1999 年,Preeter 提出了改进的随机子空间方法,其本质就是将响应互相关函数与传统的特征系统实现法相结合,该方法采用响应参考点,并采用采样数据缩减技术,一定条件下解决了实际应用中数据采样量较大给分析带来的困难,通过一个发射塔结构演示了它的具体应用^[47]。2000 年,Jyrki Kullaa 对位于加拿大的 Vancouvee 地区的一个古代宫廷城堡,使用随机子空间方法进行了模态参数辨识,识别出了前三阶的弯曲和扭转模态^[48]。2000 年,Rune Brincker 等根据小汽车车体在发动机振动激励下的响应数据,使用随机子空间技术和对测量响应的功率谱密度矩阵进行分解,把响应分解成各单个模态的响应,识别了车体的前 16 阶模态,对有较高噪声水平的数据也得到了较高精度,模态阻尼的识别精度也较高^[49]。2001 年,A. Fasana 采用 ARMAV 方法和 ITD 方法对意大利的一座大桥进行了模态参数识别,并对两者结果进行了比较。R. Bolton 对一钢筋混凝土公路桥的模态参数识别问题,使用了 ITD 等识别方法,并与单输入多输出(SIMO)识别方法得到的结果进行比较,结果显示对于低阶模态的结果,几种方法相差不多。

自 20 世纪 80 年代起,国内的学术界与工程界对环境激励下的大型工程结构的模态参数识别方法进行了理论和应用方面的研究^[50-67]。1981 年,宝志雯等研究用峰值拾取法对某高层建筑进行了模态参数识别研究^[68-69]。1994 年,曾庆华等^[70]用频域的有理分式正交多项式方法及时域的最小二乘复指数(LSCE)方法对飞机颤振试验数据进行了模态参数识别。研究表明,考虑有噪声影响时,正交多项式拟合方法比最小二乘复指数(LSCE)法有效。1999 年,于开平等^[71]研究了从结构系统的脉冲响应函数的小波变换提取模态参数的方法。1999 年,张令弥等^[72]提出了一种改进的特征系统实现算法(FERA),这种算法先用相关滤波方法对测量数据进行预处理,然后以递推形式形成一个对称半正定阵,采用特征值分解代替奇异值分解,以减少计算工作量和提高模态识别精



度。2000年,邹经湘和于开平等^[73-74]研究用ARMA模型与NARMA模型识别线性时变和非线性时不变结构系统。2001年,作者研究用FERA方法识别了青马悬索桥模态参数。2001年,陈鹏程等选用峰值拾取法对集装箱装进行模态分析。2001年,李中付等^[61]根据线性系统在环境激励下各输出点响应之间的相关函数与系统的脉冲响应函数具有相同的数学表达式等特点,提出了模态参数识别的新方法,该方法与以ITD法为基础的NExT法相比,采用奇异值分解的原理提高了数值稳定性,避免了ITD法中的系统特征值虚部的多值性,且识别结果具有鲁棒性。2001年,吕志民等^[60]使用非线性自回归模型和小波变换方法检测出我国某大型水轮机轴的动态固有频率和黏性阻尼系数。

2003年,金新灿等^[77]用多参考点LSCE法对环境随机激励下的高速列车进行了工作模态识别,并与FRF模态识别法进行了对比和分析。试验结果显示,两种方法对模态频率和阻尼比的识别误差分别不超过5.4%和9.9%。2004年,陈隽等^[78]研究使用HHT(Hilbert-Huang)方法识别出青马大桥在台风作用下的固有频率和阻尼比。2005年,杨和振等^[66]对位于渤海湾的“埕岛二号”中心生活平台利用峰值拾取法和ERA方法分别进行模态参数识别,结果比较吻合。2005年,Yu Dan-Jiang等^[79]发展了基于HHT方法的核心经验模型分解(EMD)的随机子空间方法,从结构工作状态下测量的非平稳响应信号识别模态参数。2005年,庞世伟、邹经湘和于开平^[80]研究用改进子空间方法识别线性时变结构系统模态参数。

上述基于环境激励的结构模态参数识别方法中,频域分解法和特征系统实现算法是频域法、时域法中精度最高的,但应用到环境激励下的高桩码头工作模态参数识别还存在以下几方面问题:

①高桩码头所受的环境激励荷载复杂,如波浪力、码头面上车辆荷载、船舶撞击力等,因此对环境激励荷载能否作为未知输入进行模态参数识别还有待进一步分析和研究。

②由于高桩码头建立在软土地基之上,高桩码头的动力特性势必受到土—结构物相互作用的影响,考虑土—结构物相互作用的高桩码头动力特性分析还有待进一步研究。

③基于环境激励的水工结构模态参数识别中,由于波浪力等环境荷载较小,不同工况下的环境激励到底激发了结构几阶振动模态也是需要研究的问题。

1.2.2 基于动力特性的损伤识别方法

结构损伤诊断,也称为损伤检测或损伤辨识,一直都是结构识别研究的核心



内容和主线。尤其是近 30 年来,基于结构振动信息的损伤识别研究一直是工程界的热点问题,相应地发展了很多损伤诊断方法。基于振动的结构损伤识别方法种类繁多,包括:基于损伤灵敏特征量比较的损伤识别方法、基于模型修正的损伤诊断方法、基于人工智能的损伤识别方法等。

(1) 基于损伤灵敏特征量比较的损伤识别方法

结构损伤会引起结构动力特性变化,因此只要能找到某些反映结构动力特性变化的量,即损伤敏感因子,直接对比其在损伤前后的变化情况即可识别损伤。这将损伤检测问题的关键转化为选取合适的损伤指标特征量。基于损伤敏感特征量比较的方法方便直观、易于实施。该类方法的识别效果关键在于损伤敏感因子的选取,研究有效的损伤敏感因子一直是损伤识别研究中的重点和热点。目前结构损伤识别时常用的损伤敏感因子有:频率、振型、模态保证准则(MAC)、坐标模态保证准则(COMAC)、模态曲率振型、模态应变能、模态柔度、剩余模态力等。

由于结构频率测试简便,准确性高,自 1979 年 Cawley 和 Adams^[81] 首次利用频率作为敏感因子识别结构损伤以来,基于频率的损伤识别方法已经得到了广泛的应用。然而,1997 年,Salawu^[82] 指出仅依靠自振频率的变化难以实现结构的损伤定位。此外,1999 年,Cornwell 等^[83] 研究了温度改变对自振频率的影响。结果表明,结构频率在一天 24h 之内的变化可达 6%,这说明仅依靠频率变化识别损伤是非常困难的。由于结构频率对环境因素的敏感性限制了频率在损伤识别中的应用,Patil 和 Maiti^[84] 采用灵敏度分析的方法建立了固有频率的相对变化率与梁中各单元损伤参数的关系,从而确定结构单元中的裂纹位置和裂纹深度。

模态振型及其衍生的损伤指标特征量具有更多的损伤信息,可以用于进行损伤定位。但振型的测量误差明显大于频率的测量误差,而且这些测量误差会降低识别精度。研究表明,相对于模态振型本身,振型的衍生指标如 MAC、COMAC、模态曲率振型、模态应变能、模态柔度等对损伤更为敏感。1998 年,Farrar 等^[85-86] 以 I-40 桥为研究对象,比较了 MAC、模态曲率振型、模态应变能、模态柔度等常用损伤敏感因子的实际应用效果。研究表明,就损伤定位而言,模态应变能效果最好,模态曲率振型改变次之,MAC 最差。2000 年,Wang 等^[87] 以青马大桥为研究对象,比较了 COMAC、增强的坐标模态保证准则、模态曲率、模态应变能及模态柔度五种损伤因子的识别效果。随后,Catbas 和 Aktan^[88] 通过对比研究,给出了一个好的损伤敏感因子所需具备的一些基本条件。Sun^[89] 进一步总结了评价损伤敏感因子的基本准则,将损伤敏感特征量法与其他结构损伤识



别方法进行有机融合,研究损伤识别的多步、交叉融合型损伤识别方法将是以后的研究方向之一^[90-91]。

模态应变能是应用较广泛的损伤诊断指标,它与其他损伤识别方法相比有如下优点:①仅需要结构损伤前后较低的几阶振型就可以进行损伤诊断,在实际应用条件下,对于大型结构动力测试得到的前几阶振型比较精确,也往往仅能测得前几阶振型;②不需要质量归一化的振型,解决了仅知道输出条件时模态参数识别得到的振型无法质量归一化的难题。詹宇翀^[92]将模态应变能作为损伤指标对海洋平台结构的损伤诊断进行研究;张吉刚^[93]、张庆^[94]研究了基于模态应变能的桥梁损伤识别;郑飞,许金余等^[95]利用模态应变能对地下框架结构的损伤诊断进行了研究;李火坤等^[96]研究了基于模态应变能的水工泄流结构损伤识别等。

损伤敏感特征量法概念明确、易于实施,并且计算工作量较小。但是损伤敏感因子法中频率指标不能反映局部信息,振型虽能够反映局部信息,但是测试精度较低;然而计算这些损伤敏感特征量时往往需要完备的模态信息。但实际工程中不可能测得结构全部自由度的模态信息,即实际工程中对大型工程进行损伤诊断都是在模态测试信息不完整情况下实施的,因此需要研究测试信息不完备的情况下基于损伤敏感特征量的识别方法。

(2) 基于模型修正的损伤诊断方法

基于模型修正的损伤诊断方法的原理是根据实测结构响应数据或试验模态分析的结果对数学模型进行不断的改进,使数学模型能够更接近实际结构的状态。模型修正的损伤诊断方法本质是一个优化问题,优化目标是结构有限元模型最直接反映实际损伤结构的动力特性,而优化的参数是结构的物理参数。常用的基于模型修正的损伤识别方法有最优矩阵修正法、特征结构配置法和灵敏度法等^[97]。

最优矩阵修正法(Optimal Matrix Updating Method)具体算法主要包括最小范数摄动法、基于最小范数的拉格朗日乘子法和基于最小秩的摄动法等^[98-99]。Kammer^[100]基于模态力误差最小准则和矩阵的对称性约束进行了模型修正问题的研究。Zimmernra 和 Koaku^[101]提出一种基于最小秩摄动的损伤识别方法。Doebing^[102]以参数矢量作为最终修正目标,提出了最小秩算法,并通过桁架试验研究证明最小秩摄动法优于最小范数摄动法。特征结构配置(Eigenstructure Assignment Method)通过虚拟控制器最小化模态力残差,进而将求解结果转化为模型修正结果的修正方法。Zimmerman 和 Kaouk^[103]于1992年首先将特征结构配置技术引入结构损伤识别问题中。Lim 和 Kashnagaki^[104]于1994年对该方