



在役桥梁结构疲劳 监测与评估

Fatigue Analyses and Evaluation of Existing
Bridges with Monitoring Data

李兆霞 王莹 著



科学出版社

U441
2013/

内 容 简 介

在役桥梁结构疲劳监测与评估

Fatigue Analyses and Evaluation of Existing Bridges with Monitoring Data

李兆霞 王莹 著

科学出版社

北京

结构在服役期间所承受的荷载是随时间变化的，这种变化不仅表现在荷载的大小和位置，还表现在荷载的持续时间、频率和幅值等方面。随着交通量的增加，桥梁结构承受的荷载越来越大，这给桥梁结构的疲劳损伤带来了巨大的影响。疲劳损伤是桥梁结构失效的主要原因，它不仅会降低结构的承载能力，还会导致结构的脆性破坏。因此，对桥梁结构的疲劳监测与评估具有重要的意义。

本书作者至今仍记得在青马大桥结构健康监测系统的筹建过程中，目睹大桥桥上实时显示的青马大桥结构响应监测曲线时的兴奋，那一个个加速度、索力、桥梁位移、局部应力时程曲线的实时再现，似乎标志着桥梁大型且传力机制复杂的结构的精细化、自动化管理的开端。从那时起，作者也就开始了监测信息的结构状态识别方法研究和结构损伤过程与机理的识别。SHM系统发挥作用以确保结构安全的关键。这十多年来结构健康监测对桥梁损伤识别领域的大量研究也证实，SHM系统重要的作用应该不是检测已经在结构中发生了的损伤的“结果”，而是协助预测结构中可能发生损伤的“预后”。只有结构损伤预后才能允许桥梁管理方在严重损伤发生前及时采取措施，减轻将要发生的损伤或者修复结构以制止灾难性破坏。如同医生给病人诊断和预后时，不仅需要医疗设备的检测监测数据，还需要对疾病发生机理的认识以及长期积累的医术和经验，结构损伤预后除了需要 SHM 系统以外，更需要我们对结构损伤

内 容 简 介

本书介绍了作者十多年来在大型桥梁结构疲劳状态监测与评估方法领域的主要研究成果及其在重要桥梁工程中的应用,包括桥梁结构疲劳应力场的监测与分析方法,基于监测信息的桥梁结构疲劳状态分析理论及其实施方法。重点介绍了在桥梁结构疲劳分析与评估过程中的关键理论与方法,包括钢桥梁在服役荷载下的高周疲劳损伤力学理论、基于监测信息的桥梁疲劳状态评估的确定性方法、以疲劳状态评估为目标的大型桥梁结构多尺度有限元模拟、基于桥梁交通荷载测量系统的活载模型的建立、在役桥梁结构的关键疲劳构件识别与疲劳累积过程仿真分析方法、在役桥梁结构疲劳寿命可靠性评估方法,以及在役桥梁结构基于监测、数值分析、人工检测等多方面信息进行疲劳状态综合评估的方法。同时介绍了上述理论和方法在青马大桥、润扬大桥、苏通大桥等重大桥梁工程中的应用,包括监测与评估方法实施过程中所需的相关软件。

本书可以作为力学、土木、交通相关专业研究生的参考读物,也可供相关领域科研人员、桥梁运营管理和设计的技术人员在其研究和工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

在役桥梁结构疲劳监测与评估=Fatigue Analyses and Evaluation of Existing Bridges with Monitoring Data/李兆霞,王莹著. —北京:科学出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-03-036585-9

I. ①在… II. ①李…②王… III. ①桥梁结构-疲劳-监测②桥梁结构-疲劳-评估 IV. ①U441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 019417 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:张 倩 / 封面设计:科地亚盟

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 12 月第一次印刷 印张:17

字数:330 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

结构中的疲劳损伤演化与累积过程令人难以察觉,但随时可能导致结构在服役期内未达到设计寿命就突然失效,造成毫无预警的破坏。这样的疲劳损伤演化累积诱致结构失效的过程,突出地显现为损伤从材料中的微细观缺陷开始发展到大型结构失效的跨尺度演化与崩溃行为,事实上这已成为大多数结构强度的控制因素。这样的问题一头连着固体力学期长期面临的且难以解决的材料与结构失效强度中的非线性科学问题,另一头维系着众多重大工程结构安全服役的迫切需求,因而长期以来一直是学术界和工程界持续关注的亟待解决的难题。

大型桥梁结构中的疲劳累积更是桥梁失效的主要因素。虽然建造桥梁的传统钢材的疲劳特性被认为早已研究得很清楚,但桥梁的疲劳失效仍然屡屡发生,造成重大人员伤亡和巨大经济损失。大型桥梁等土木工程结构具有现场施工、运营环境复杂等特点,且无法像小型结构那样可作为成品在测试其性能与强度后再改进设计和建造。结构在现场施工过程中难以避免的细观层次上的缺陷必然在结构运营荷载的作用下产生局部应力集中和损伤演化,在无法通过现场测试发现的情况下经过非线性跨尺度演化极易诱致突发灾变,这些都使得桥梁结构疲劳状态的监测与评估比其他结构更为困难。

桥梁结构健康监测(structural health monitoring, SHM)系统在 20 世纪末的兴起和多尺度科学的发展,使得结构疲劳问题的研究具备了更好的条件和理论基础。本书作者至今仍然记得 1998 年首次进入安装了结构健康监测系统的青马大桥的监控室,目睹大屏幕上实时显示的青马大桥结构响应监测曲线时的兴奋,那一个个加速度、索力、桥梁位移、局部应力时程曲线的实时再现,似乎标志着桥梁这类粗大且传力机制复杂的结构的状态可被随时监控,预示着桥梁结构精细化、自动化管理的开端。从那时起,作者也意识到基于监测信息的结构状态识别方法研究和对结构损伤过程与机理的认识,是可望使 SHM 系统发挥作用以确保结构安全的关键。这十多年来结构健康监测与损伤检测领域的大量研究也证实:SHM 系统最大的作用应该不是检测已经在结构中发生了的损伤的“结果”,而是协助预测结构中可能发生损伤的“过程”及其可能的后果,即结构损伤预后。只有结构损伤预后才能允许桥梁管理方在严重损伤发生以前就及时采取措施,减轻将要发生的损伤或者维修结构以制止灾难性结构失效的发生。如同医生给病人诊断和预后时,不仅需要医疗设备的检查结果,更需要对相关病象和致病机理的认识以及长期积累的医术和经验,结构损伤预后除了需要 SHM 系统以外,更需要我们对结构损伤

机理的认识和损伤过程的准确描述。显然,这样的研究是涉及固体力学前沿科学问题的艰难历程。作者在1998年选择了当时认为可作为突破口的桥梁结构疲劳问题开始起步研究,因为疲劳损伤在突发结构失效以前都是相当局部化的现象,无法基于SHM系统监测到的结构动态特性变化来检测。10多年来,作者及其研究团队围绕基于结构健康监测信息的疲劳状态评估和疲劳损伤预后分析方法开展研究,成果逐步积累的同时也在逐步深化认识。

多尺度科学研究针对的是不同时间、空间尺度相互耦合的现象。显然,自然界中任何一种现象在不同尺度观察都会有不同的发现,因此需要用不同尺度的定律、理论解释不同尺度下观察到的现象。随着科学技术发展和人类认识自然的深化,单一尺度的方法论在某些情况下不再有效,对更深层次现象就不得不需要从多个尺度耦合一起来研究。例如,固体与结构破坏过程,要深入解释其中的破坏机理,必须从更低层次的原理出发才能解释发生在高层次上的物理现象。对于桥梁结构疲劳损伤累积导致失效就是这样一个多尺度耦合的情形:始自焊接连接细节处材料中的微细观缺陷和局部应力集中,在施加于达到千米级整个结构上的工作荷载作用下,局部细观损伤的演化造成庞大结构的失效。因而结构疲劳过程实际上是位于局部细节尺度与结构整体尺度这样两个不同量级的空间尺度上。另外,疲劳累积过程漫长而持久,其间又可能有突发过载造成的损伤与长期累积的疲劳损伤交互作用,突发过载损伤通常发生在极短的时间内,而疲劳损伤的累积则是发生于结构漫长的服役期,因而演化过程在时间上也会是一个多尺度耦合的描述。上述认知也是在我们长期研究不断深入的过程中逐步清晰起来的,而研究的内容也经历了一个从单纯的基于结构监测信息进行疲劳状态评估,到综合疲劳损伤多尺度模拟与分析 and 监测信息进行结构疲劳损伤预后的逐步深化过程。期间,作者完成了国家自然科学基金项目“基于健康监测的大型钢桥梁疲劳损伤早期识别方法及应用(50178019)”、“大跨结构多尺度损伤模拟与失效行为仿真分析(50278017)”、“结构劣化的时空多尺度模拟和多因素同步分析方法及其应用(10672038)”,国家自然科学基金重大研究计划项目“重大工程结构损伤破坏非线性效应的多尺度模拟与分析(90715014)”,香港特别行政区政府资研局(RGC)资助项目“Fatigue Evaluation of Existing Bridges Based on Continuum Damage Mechanics and Online Monitoring”(PolyU5042/01E)和“Non-linear Physical-based Modeling of Long-span Steel Bridges for Health Assessment in Structural Health Monitoring”(PolyU5034/03E)以及相关的国家重点工程项目“润扬桥结构健康监测评估系统研究”和“润扬大桥结构健康监测系统维护与结构状态评估”等。在上述项目完成过程中取得的有关桥梁结构疲劳监测与分析、评估方法的研究成果将在本书中系统地总结。

作者在此感谢国家自然科学基金委员会的长期资助,也感谢为上述研究提供

了宝贵桥梁工程结构设计、施工与测试资料和长期监测数据的桥梁管理部门,如江苏省润扬大桥发展有限公司和香港特别行政区政府路政署。感谢东南大学土木工程优势学科专著出版基金对本书出版提供的资助。还要感谢长期的科研合作者高赞明教授、陈鸿天教授及作者所在研究团队中的老师和研究生们,尤其是郭力和周太全、孙正华、王春苗、吴佰建等。特别感谢陈鸿天教授惠允作者在本书第7章概要介绍其在桥梁荷载模拟方面的研究成果。正是我们之间长期的、配合默契的合作研究,以及与研究生们在学位论文研究过程中完成的部分具体计算和分析,这些点滴工作汇聚起来才能够形成本书展现给读者的研究成果的整体。作者也深知,虽集一个团队10多年来的努力形成本书介绍的成果,但作者对自然现象的认识永远是阶段性的、有局限的;同时,作者的水平也有限,书中恐有疏漏与表述不当之处,热诚盼望同行和读者予以指正。

李兆霞 王莹

2012年夏于南京

2.3.1 应变传感器优化布置的原则	15
2.3.2 主要监测截面的确定	17
2.3.3 监测截面上的测点选择	20
2.3.4 局部联接细节处的热点应力监测	23
2.4 在役桥梁结构疲劳应力特征	24
2.4.1 应变响应监测信息的时间多尺度特征及其物理意义	28
2.4.2 不同类型索桥在相似荷载环境下的响应特征	34
第3章 基于监测信息的桥梁疲劳状态分析方法和实施步骤	38
3.1 基于监测信息的桥梁疲劳损伤分析方法	38
3.2 基于监测信息的桥梁疲劳状态评估实施流程与主要步骤	42
3.3 分析与评估过程中的关键理论与方法	47
第4章 在役桥梁高周疲劳损伤力学理论	51
4.1 损伤力学概述	51
4.2 适合于在役桥梁分析的疲劳损伤律	52
4.3 桥梁疲劳损伤律中参数的确定方法	54
4.4 桥梁结构疲劳损伤律模型的验证	57
4.5 超载对疲劳损伤累积的影响	60
4.5.1 基本方程与研究思路	60
4.5.2 荷载相互作用的影响引起的疲劳寿命缩减	61
4.5.3 超载的影响	64
第5章 基于监测信息的桥梁结构疲劳状态评估方法及其应用	68
5.1 动态应变监测数据分析方法	68
5.1.1 统计方法	68
5.1.2 多尺度分离和提取小波方法	76
5.1.3 简便的分离方法——平均-插值-扣除(AIT)	90

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
第 2 章	在役桥梁结构疲劳应力场监测	6
2.1	大跨桥梁结构健康监测系统概述	6
2.2	动态应变监测方法	12
2.3	应变传感器优化布置方法	15
2.3.1	应变传感器优化布置的原则	15
2.3.2	主梁监测截面的确定	17
2.3.3	监测截面上的测点选择	20
2.3.4	局部焊接细节处的热点应力监测	23
2.4	在役桥梁结构疲劳应力特征	24
2.4.1	应变响应监测信息的时间多尺度特征及其物理意义	28
2.4.2	不同类型索桥在相似荷载环境下的响应特征	34
第 3 章	基于监测信息的桥梁疲劳状态分析方法和实施步骤	38
3.1	基于监测信息的桥梁疲劳损伤分析方法	38
3.2	基于监测信息的桥梁疲劳状态评估实施流程与主要步骤	42
3.3	分析与评估过程中的关键理论与方法	47
第 4 章	在役桥梁高周疲劳损伤力学理论	51
4.1	损伤力学概述	51
4.2	适合于在役桥梁分析的疲劳损伤律	52
4.3	桥梁疲劳损伤律中参数的确定方法	54
4.4	桥梁结构疲劳损伤律模型的验证	57
4.5	过载对疲劳损伤累积的影响	60
4.5.1	基本方程与研究思路	60
4.5.2	荷载相互作用的影响引起的疲劳寿命缩减	61
4.5.3	过载的影响	64
第 5 章	基于监测信息的桥梁结构疲劳状态评估方法及其应用	68
5.1	动态应变监测数据分析方法	68
5.1.1	统计方法	68
5.1.2	多尺度分离和提取的小波方法	76
5.1.3	简便的分离方法——平均-插值-扣除(AIT)	90

5.2	雨流计数法与疲劳应力谱	96
5.2.1	雨流计数法原理概述	96
5.2.2	疲劳应力(应变)谱	98
5.2.3	从动态应变监测数据提取疲劳应力谱的实例	101
5.3	正常运营环境下疲劳累积评估的有效应力幅方法	102
5.3.1	基于应变能等效获得的有效应力幅	103
5.3.2	考虑疲劳损伤影响基于应变能的有效应力幅	104
5.3.3	有效应力幅理论用于在役桥梁疲劳分析	110
5.4	台风等突发过载下的疲劳损伤累积量评估	114
5.4.1	台风“约克”及其监测信息	114
5.4.2	台风导致的应力谱分析	118
5.4.3	台风引起的变幅应力循环的有效应力幅	120
5.4.4	台风引起的疲劳损伤累积增量	121
第6章	以疲劳状态评估为目标的桥梁结构多尺度有限元模拟及其应用实例	125
6.1	建模策略与方法	127
6.1.1	建模需要的策略分析	127
6.1.2	多尺度建模问题的一般性物理描述和解决思路	130
6.1.3	多尺度建模方法	133
6.1.4	多尺度模型的衔接方式和衔接区域的处理	135
6.2	模型修正和验证方法	138
6.2.1	模型修正的过程与目标	138
6.2.2	多重子步模型修正方法	141
6.2.3	多因素同时优化模型修正技术	143
6.2.4	模型验证方法	147
6.3	青马大桥结构多尺度模型的建立、修正和验证	148
6.4	润扬大桥结构多尺度模型的建立、修正和验证	155
第7章	桥梁交通荷载的实测与模拟	160
7.1	桥梁公路活载测量系统	160
7.2	桥梁公路活载模型的建立和确认	161
7.2.1	基于 WIM 数据建立荷载模型的统计方法	162
7.2.2	基于 WIM 数据的统计参数	163
7.2.3	香港桥梁活载标准卡车荷载模型	164
7.3	桥梁上的铁路荷载模拟	166
第8章	在役桥梁结构疲劳累积过程数值分析方法及其应用实例	168
8.1	关键疲劳构件识别	168

8.2	关键疲劳构件焊接细节处的热点应力分析	171
8.3	关键疲劳构件焊接细节处的疲劳裂纹扩展过程分析	173
第9章	在役桥梁结构疲劳寿命可靠性评估方法	180
9.1	疲劳应力谱的统计分析 with 概率密度函数	180
9.1.1	应力幅概率密度函数	183
9.1.2	疲劳损伤相对增量的统计分析	186
9.2	用于疲劳可靠性评估的分析模型	187
9.2.1	疲劳累积损伤模型	187
9.2.2	剩余强度模型	188
9.2.3	疲劳寿命模型	189
9.3	关键构件的疲劳可靠性分析	193
9.3.1	基于健康监测统计信息求解显式的极限方程的疲劳可靠指标	193
9.3.2	隐式极限方程的疲劳可靠指标的计算	196
9.4	钢箱梁系统的体系疲劳可靠性分析	203
9.4.1	结构系统疲劳可靠性分析模型	203
9.4.2	失效模式的功能函数	204
9.4.3	系统综合失效概率计算	207
9.4.4	大跨桥梁钢箱梁结构体系的失效模式搜寻	211
第10章	在役桥梁结构疲劳状态综合评估方法及其应用实例	221
10.1	确定桥梁结构关键疲劳构件的模糊综合评估模型	221
10.1.1	建立判断矩阵	223
10.1.2	计算权重向量和判断矩阵的一致性	224
10.2	综合评估的主要因素及其归一化指标确定方法	225
10.3	应用实例	226
10.3.1	确定评估集	227
10.3.2	确定向量权重	230
参考文献	235
附录	疲劳评估软件中的主要程序代码	238
F.1	应变监测数据预处理程序 (PPICK)	238
F.2	雨流计数程序 (RAIN)	241
F.3	有效应力幅计算程序 (EFFECT)	252
F.4	疲劳损伤评估程序 (FATIGUE)	257

第 1 章 绪 论

过去几十年中,在我国已建造了上百座大跨桥梁,20 世纪 90 年代至今已经建成和正在建设中的主跨在 400m 以上的悬索桥和斜拉桥就有近 30 座。其中,有主跨 1000m 以上的悬索桥如香港的青马大桥(主跨 1377m)(图 1.1)、江苏的江阴长江大桥(主跨 1385m)和我国最大跨度的悬索桥润扬长江大桥(主跨 1490m)(图 1.2),还有主跨度 1088m 的斜拉桥苏通长江大桥(图 1.3),以及世界最长的杭州湾跨海大桥等。这些桥梁都投资巨大,位于所在地区的交通中枢,有些还成为当地的标志性建筑,在经济建设和国民生活中的地位十分重要。对此类重要的大型桥梁在其服役期内进行结构安全性、整体性、耐久性的监测,确保其安全正常运营已经成为一个随之而来的重要课题。



图 1.1 青马大桥



图 1.2 润扬大桥南汊悬索桥

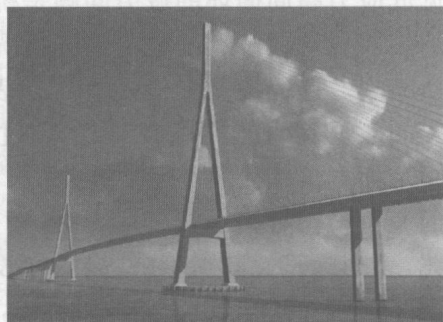


图 1.3 苏通长江大桥

大部分大跨索桥的箱梁结构是钢结构的。众所周知,钢桥梁结构细节附近的疲劳累积以及因此而发生的脆断是桥梁破坏的主要根源。因此,在役大型桥梁在运营荷载作用下的疲劳累积状态评估应该是此类结构安全性和耐久性监测的主要目标。此外,我国现有的大量铁路桥梁也以钢结构为主,有很多已经进入了其设计工作寿命的后期,有的已明显存在隐患。在铁路提速的大环境下,这些桥梁的安全性、疲劳寿命、极限荷载的评估都成为亟待解决的问题。而国际上一些发达国家在20世纪建造的桥梁有许多已开始进入服役中后期,已发现大量的安全隐患。

大跨桥梁结构具有体积大、跨度大、使用期限长等特点,在服役期间,气候、环境等自然因素的作用和日益增加的交通量及重车、超重车过桥数量的不断增加,都给桥梁结构带来疲劳损伤的累积。另外,桥梁结构在建造过程中,无论是钢箱梁中桁架的焊接,还是用于组成缆索的高强度钢丝的制造,总是不可避免地存在某些细小结构缺陷。这些缺陷大多以焊缝或者微观裂纹的形式出现。在我国,因为种种的人为和技术原因经常不能发现的初始缺陷在以现场施工为主的大型结构中尤为突出,也成为一个不可忽视的因素。此外,在结构服役过程中,超载和超限等“中国特色”因素的存在,也使得“人祸”成为和自然灾害并列的造成结构失效的主要外因。在漫长的结构服役期内,由于环境的侵蚀、材料的老化及自然灾害,交通荷载的反复疲劳作用,疲劳损伤的不断积累使得危险性大大增加。桥梁结构整体抵抗自然灾害,甚至正常服役荷载的能力逐渐下降,极端情况下会引发灾难性事故。很多研究都表明,许多桥梁的破坏原因起源于局部构件的疲劳破坏,最终导致整体结构的灾难性破坏。

在桥梁服役的寿命期中,总的卡车通过量可能超过 $10^6 \sim 10^7$ 次以上。大部分情况下,每辆卡车的通过在桥梁结构中都会引起一个应力循环,有些情况(取决于桥梁结构构形)下可能会引起1.5~2个等量的应力循环。因此,考虑交通流量的相当增长和不确定性,大部分的桥梁在使用寿命中都会承受超过 $10^7 \sim 10^9$ 的应力循环数。所有的卡车荷载在结构中产生的应力,无论是高于还是低于允许应力范围,都会引起疲劳损伤并不断累积,最终可能导致未来的失效。可见低应力高周循环的疲劳问题是桥梁的最主要问题之一。而疲劳损伤累积造成的失效通常在没有明显的征兆情况下发生,并可能最终导致结构关键部位的突然断裂。这种疲劳失效的严重性表现在:①破坏广泛,美国联邦公路总署2006年的数据表明,美国24.5%的超过6m的大桥都存在着“结构性缺陷”和“功能过时”;而据美国土木工程协会(ASCE)统计,80%~90%钢结构的失效与结构中的疲劳损伤有关。②破坏力大,疲劳损伤累积导致的失效过程往往事先毫无征兆,表现为脆性断裂,往往导致在役结构发生突然的毁灭性破坏,造成人员伤亡和经济损失。据统计,在1982年,美国由于结构的疲劳破坏造成的损失多达1000亿美元,占其当年国民生产总值的3%。例如,美国明尼苏达州I-35W高

速公路上的钢桥在 2007 年 8 月 1 日交通高峰时突然坍塌,造成数人死亡的悲剧。而早在 2001 年明尼苏达大学土木系的一份报告就指出:“I-35W 大桥的纵梁已扭曲变形,还发现该桥桁架疲劳的证据;一旦桁架承受不了庞大车流,I-35W 大桥恐将坍塌。”令人遗憾的是,该报告并未引起相关人员的足够重视,从而导致桥毁人亡的悲剧发生。

限于研究手段和测试技术,以往的桥梁结构疲劳分析只能局限于构件或细节表面已出现肉眼可见的疲劳裂纹,距离疲劳损伤的早期(裂纹萌生期)侦测和跟踪分析尚有很大的差距。显然,对于上述重要钢桥结构,这样的疲劳分析及其以无损检测为主的手段已经远远落后于形势的要求。新的形势要求桥梁结构的疲劳分析要能综合在线运营监测、动力测试和整桥结构数值模拟等各种现代技术手段的优势,尽早地发现疲劳损伤和跟踪其演化累积过程。在复杂结构的在线监测与诊断、数值模拟和结构识别技术方面,近 20 年来也有很大进步,尤其是在航天和汽车工业领域。但是,这些现代技术手段在大型土木结构中的综合应用还不多见。土木结构在这方面的发展比较滞后的主要原因是难以进行整体结构的试验和测试,因为土木结构大都体积巨大且不可移动,做结构试验在技术和经费方面难度很大。这方面典型的比较可见于文献所详述的在美国 Los Alamos 国家实验室进行的 FORTE 卫星项目和位于新墨西哥州 Rio Grande 河上的 I-40 桥梁更换项目。这两个 20 世纪 90 年代后期进行的项目费用相当,都采用了有限元法作结构分析,I-40 桥梁项目的目的是研究桥梁结构识别和损伤识别技术,可算是过去五年中美国在桥梁结构识别研究领域的典型作品,但它仅作了静载分析,动力分析采用了将地震和风荷载等效为静荷载的方法。而 FORTE 卫星项目不仅作静载分析,而且作了全面的动力分析,包括气动紊流、溅落、火箭点火和脱落引起的冲击等。由此比较可见土木的结构分析与其他工业结构的明显差距。

近年来,结构健康监测系统在大型重要桥梁上的应用,为突破上述限制土木结构分析发展的“瓶颈”提供了极好的机遇。目前国内外已经有不少大跨桥梁上安装了结构健康监测系统。丹麦在主跨 1624m 的 Great Belt East 悬索桥上较早安装了较为完整的结构健康监测系统,它实现了实时监测、实时分析和数据网络共享,并开始尝试把极端记录与正常记录分开处理的技术以期减小数据存量。我国自 20 世纪 90 年代起也在一些大型重要桥梁上建立了不同规模的结构监测系统,如香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥、江阴长江大桥和润扬长江大桥等。桥梁结构健康监测系统建立以后,可以对桥梁结构各部位实施连续的在线监测,产生大量的监测信息。结构健康监测系统提供了桥梁在线运营状态下的结构真实响应,给桥梁结构的模型识别提供了可靠的实测根据,但目前有效利用这些监测信息进行分析、处理以识别结构的状态或者损伤还很困难。

目前桥梁结构上设置的结构健康监测系统通过对结构重点部位内力与应力的

监测,来考察结构主要构件上的应变随外界荷载作用的变化历程,为结构疲劳寿命评估提供依据。既然结构疲劳总是萌生于结构最不利局部的连接处,理论上对于含大量焊接细节的钢箱梁主梁来说,必须布置足够多的应变传感器来实现对疲劳应力和疲劳状态的监测。但是,由于经济和施工条件等方面的制约,目前系统中的应变传感器还只能布置在主梁结构中受力的关键截面以及这些关键截面上少数构件上,距离疲劳损伤萌生的连接细节处通常有相当的距离,应变计的数量也很少。因此,在役结构的疲劳监测与评估比结构整体响应和健康状态的监测与评估更加困难,因为结构疲劳在发生疲劳裂纹扩展导致突然失效以前,是高度局部化的损伤现象,无法由结构整体响应的监测信息反演得到。由此可见,基于结构监测信息进行结构疲劳状态或者潜在疲劳损伤累积程度的分析与识别,不仅仅依赖于结构健康监测系统的硬件设备,更在很大程度上依赖于结构模拟方法与技术的提高和损伤预后分析方法的最新研究结果。

顺应现代科学技术的发展和形势的要求,多年来我们综合运用动态测试技术、复杂结构模拟计算和结构在线监测等方面的最新发展,探讨在大型桥梁结构动力响应的有限元模拟过程中的关键技术问题,以实现重要大型桥梁结构疲劳损伤的早期(裂纹萌生期)识别和疲劳损伤跟踪分析。在学术上,通过结构动力响应模拟、损伤局部分析、疲劳早期识别及其跟踪分析,可望综合了解桥梁结构的疲劳失效行为及其路径乃至结构的准确极限状态,填补目前在这些重要性能了解方面的空白,为桥梁结构疲劳设计理论和管理维修提供基础理论。在工程应用方面,结构疲劳损伤分析和早期识别方法的应用,可望为桥梁结构疲劳损伤的及早侦测和发现提供定向的(疲劳损伤关键构件部位)和定量的(疲劳损伤累积程度)参考。就新桥而言,可以为桥梁管理部门进行定期疲劳检测提供一定程度的指引;就旧桥而言,进一步还可进行桥梁结构极限分析,为管理部门的决策(维修还是拆除)提供理论的和计算的依据。

本书的写作目的旨在总结作者多年来在桥梁结构疲劳损伤理论、疲劳状态监测与评估方法方面的研究成果,将作者在以下几方面的研究成果系统地呈现给相关专业的读者与工程界:目前在重要大型桥梁中已安装的桥梁结构健康监测系统和疲劳应力场的监测方法,基于结构健康监测信息的桥梁疲劳状态分析方法、实施策略以及在结构疲劳分析与评估过程中的关键理论与方法。这些关键理论与方法包括:钢桥梁构件在服役荷载下的高周疲劳损伤力学理论,基于监测信息的桥梁疲劳状态评估的确定性方法,以疲劳状态评估为目标的大型桥梁结构多尺度有限元模拟,基于桥梁交通活载(weigh in motion, WIM)测量系统的活载模型的建立,在役桥梁结构的关键疲劳构件识别与疲劳累积过程仿真分析方法,在役桥梁结构疲劳寿命可靠性评估方法,以及在役桥梁结构基于监测、数值分析、人工检测等多方面信息进行疲劳状态的综合评估的方法。同时,介绍这些理论和方法在青马大桥、

润扬大桥等重大桥梁工程中的应用。

本书的出版可望使作者在桥梁结构疲劳损伤监测与评估领域的研究成果在学术界和工程界得到进一步的发展和應用,从而发挥其科学价值和社会经济价值:基于连续损伤力学理论建立的桥梁构件在实测随机变幅荷载下的疲劳损伤演化率的疲劳损伤演化模型符合桥梁结构中疲劳累积的物理现象与规律,加强了作者对桥梁关键部位疲劳损伤过程中损伤特性的了解,建立了桥梁运营过程中发生的局部疲劳损伤程度与交通荷载循环量的定量描述,为桥梁结构疲劳损伤分析奠定了基础,是对损伤力学理论的创新与发展。基于桥梁结构健康监测系统的输出信息和桥梁结构动力响应有限元模拟,综合运用动态测试、结构参数识别、损伤局部分析及无损检测等理论与技术,提出了大型钢桥梁结构疲劳损伤早期识别方法。同时,所提出的基于健康监测信息进行疲劳分析的理论体系和随之建立的疲劳评估方法和流程,使得有效利用结构健康监测系统输出的“海量”信息进行桥梁运营过程中的疲劳评估成为可能。这些成果加强了作者对大型桥梁结构疲劳损伤累积过程和疲劳状态评估的认识,为大型桥梁结构疲劳早期识别和评估提供了理论和技术依据。提出的基于运营荷载监测信息建立桥梁移动荷载模型的方法,解决了模拟桥梁活载的困难和进行桥梁结构疲劳损伤分析时输入动态荷载的问题,使得桥梁结构损伤仿真计算分析成为可能。研究解决了大跨桥梁结构多尺度模拟和分析中的关键理论和技术问题;首次提出了针对大跨桥梁结构特性进行结构响应与损伤的多尺度模拟和计算分析的方法与策略并付诸实现。这包括:提出了面向结构损伤分析的多尺度建模策略、基于子结构技术或多点约束衔接的多尺度建模方法,提出了适用于复杂结构模型的多重子步模型修正方法,以及应用多尺度模型进行结构损伤分析的方法与策略,为大跨桥梁结构服役过程中损伤累积的仿真分析提供理论基础和技术路径。

(1) 报告大桥工作环境和荷载变化;

(2) 报告大桥主要构件的应力(内力)及变形状况;

(3) 记录大桥主要构件的损伤累积或局部破坏;

(4) 报告大桥主要构件是否有任何损伤累积或局部破坏;

本页面为空白页,请勿在此处填写任何内容,以免影响后续内容的正常显示。

第2章 在役桥梁结构疲劳应力场监测

传统的桥梁结构隐患检测主要是定期的人工检测,其局限性比较多:需要大量的人力、物力,费用巨大,检查周期长,缺少整体性,影响正常交通运行,而且检查和评估的结果往往取决于检查人员的专业知识水平、经验以及现场检测的条件,检查结果往往具有主观性,同时难以及时发现在检查的间隔期内的损伤;而大跨桥梁结构构形复杂,很多结构部位是检查员难以到达的。与人工检测相辅的传统的无损检测技术(non-destructive technology, NDT)是可视化或者局部化的试验方法,通常要求事先知道结构损伤发生的大致位置。由于这些限制,上述结构检测方法都只能针对中小型桥梁,并且只能检测结构表面的损伤,对于损伤位置未知的大型复杂结构,这类检测则无法全面覆盖。所以需要发展利用仪器和损伤识别技术进行结构响应与状态的在线监测,能够长期并且实时地识别结构状态和潜在的损伤以改进人工检查的不足,这种具有美好前景与优越功能的结构健康监测(structural health monitoring, SHM)系统也导致了结构健康监测技术与结构状态评估理论的发展。

为了准确评估桥梁结构中的疲劳损伤状态和结构的剩余疲劳寿命,首先需要保证用于桥梁构件疲劳评估的应力谱是精确的。以往获取疲劳应力谱的一个途径是建立在对桥梁上的标准车辆荷载的估计与交通荷载调查统计的基础上,建立代表运营状况的车辆交通荷载谱,从而实现荷载历程的模拟和疲劳应力谱的计算。但是这种交通荷载的模拟实际上很难准确再现随时间变化的在役桥梁实际承受的动态工作应力。随着桥梁结构健康监测技术的发展,以往不得不建立在经验以及统计基础上的应力谱计算将被安装在桥梁上的结构健康监测系统实时采集的应力-时程所替代,由此得到的疲劳应力谱较按照规范或统计的车辆荷载计算得到的应力谱,更加真实和准确地再现了结构的工作状态,在实现疲劳寿命的精确评估方面迈进了一大步,保证了疲劳寿命评估的准确性和可靠性。因而如何充分利用桥梁结构健康监测系统的实时监测数据,以获取被监测桥梁结构的疲劳应力特征和疲劳累积状态就成为在役桥梁结构疲劳评估的首要课题。

2.1 大跨桥梁结构健康监测系统概述

桥梁结构健康监测系统也称为桥梁安全监测与评价系统,其目标在于通过永

久性布设在桥梁结构中的传感器系统在线测量反映大桥环境激励和结构响应状态的实时信息,监测大桥的工作性能和评价大桥的健康状态,以保证大桥的安全运营及为大桥的养护维修提供科学依据。

与传统的桥梁监测方法(包括众多的无损检测技术)不同的是,桥梁结构健康监测系统是在线实时监测与评价的系统,理论上可随时诊断可能发生的结构损伤或引发灾难的条件和环境因素,评估结构性能退化的征兆和趋势,以便及时采取养护维修措施。而传统的检测方法只能在损伤发生以后检查损伤的存在并采取维修加固的手段,因此,桥梁结构健康监测与评价系统的概念具有根本性的变革。随着传感器的革新和自动远程监控技术的更新换代,桥梁结构安全监测与评价系统正向结构简单、经济可行、持久可靠的方向发展,并已开始成为许多重大桥梁工程建设的一部分。可以预计,随着我国和世界各国越来越多的大桥结构健康监测与评价系统的研究与实践,和监测系统在桥梁管理与维护中发挥越来越大的作用,一个桥梁数字化管理与控制的时代即将来临。

桥梁结构健康监测系统综合了现代传感技术、网络通信技术、信号分析与处理技术、数据管理方法、知识挖掘、预测技术及结构分析理论等多个领域的知识,极大地延拓桥梁检测领域,提高预测评估的可靠性。理论上而言,当结构出现损伤后,结构的某些局部和整体的响应参量将表现出与正常状态不同的特征,通过安装的传感器系统便可能即时捕捉到这些信息,而对响应信息的差异识别则可能确定损伤的位置及相对程度;经过对结构状态的敏感特征量的长期观测及分析,可掌握桥梁性能劣化的演变规律,以部署相应的改善措施,延长桥梁使用寿命。

桥梁结构健康监测系统通常由以下四个系统构成:传感器系统、数据采集系统、数据通信与传输系统和数据分析与处理系统。它们由计算机、外站工控机、光纤环网以及各种传感器、信号处理器等组成。外站工控机实时采集信号调理器、传感器等监测数据,监测数据通过光纤环网在安全监测系统计算机中进行处理和显示。桥梁 SHM 系统通过各种传感设备对大桥在运营期间进行实时监控,通过测量荷载源及桥梁结构响应等信息,实时监测大桥的工作性能和评价大桥的工作条件,及时掌握桥梁的结构状态,全面了解桥梁的运营条件及质量退化状态,为运营养护、可靠性评估提供科学的依据。目前,SHM 系统的预期功能主要包括:

- (1) 报告大桥工作环境和荷载变化;
- (2) 报告大桥主要构件的应力(内力)及变形状况;
- (3) 记录异常荷载事故,如台风、地震、超重交通荷载及船撞等;
- (4) 报告大桥主要构件是否有任何损伤累积或局部破坏;
- (5) 实现异常状态下(包括荷载、环境和结构响应)的预警;

- (6) 推断大桥主要构件是否存在潜在损坏危机;
- (7) 推算大桥承载能力及验证设计施工假设和参数的有效性;
- (8) 推算大桥及其主要构件的剩余使用寿命;
- (9) 为大桥运营养护、可靠性评估提供科学依据。

桥梁健康监测系统的成功实现上述预期目标,将起到确保桥梁安全运营、延长桥梁使用寿命的作用,同时通过早期发现桥梁病害能大大节约桥梁的维修费用,可以避免最终频繁大修关闭交通所引起的重大损失。为了能够达到上述目标,桥梁结构的健康监测系统需具有下面几点要求:①现场测试。系统只能在真实结构上测试,传感设备必须能承受恶劣的气候条件,要能全天候工作。②永久性工作。监测系统是永久地安装在桥梁上的,所以要保证监测系统在桥梁使用期间的耐久性与稳定性。③数据存储。监测系统每秒钟都在采集数据,而且随着监测系统的长期连续工作,数据采集也是长期连续的,所以必须解决数据存储的问题。④不影响桥梁的正常使用。⑤信号长距离传输。大跨桥梁的主跨常常上千米,全长则几千米,传感器的信号须经长距离传输才能到达处理中心,因此必须解决信号的长距离传输问题。⑥具有能够有效利用监测信息进行结构损伤识别与评估的理论和办法,以及基于这些理论和办法开发的可与 SHM 系统配套实施的结构状态评估(structural health evaluation, SHE)系统。

目前,世界上已有许多国家在大跨桥梁上安装了 SHM 系统,我国的一些重大桥梁工程如润扬长江大桥、苏通大桥、江阴大桥、香港青马大桥等都安装了 SHM 系统。润扬长江公路大桥是由南汊悬索桥和北汊斜拉桥组合而成的特大型跨江大桥,其中的南汊悬索桥目前保持主跨国内第一、世界第三的纪录,其重要地位不言而喻。润扬长江大桥结构健康监测系统的传感器系统包括安装在桥上的加速度计(Acc)、应变计(Str)、温度传感器(T-V、T-Of)、位移计(Dspl)和 GPS 等,另外还有车速车载感应系统和数据采集($K_i, i=1\sim 11$)及处理系统。润扬大桥南汊悬索桥和北汊斜拉桥上布置的传感器类型及其位置大致如图 2.1 和图 2.2 所示。香港青马大桥是连接市区和大屿山国际机场的主要通路,也是世界上目前最长的公铁两用悬索桥。青马大桥主跨 1377m,上层为双向三车道的快车道,下层设有两条高速铁路和两条备用车道。为了对青马大桥进行结构安全性评估,青马大桥的风与结构健康监测系统^[1]永久性地安装了总共 265 个传感器,包括加速度计、应变计、位移传感器、水平仪、风速计、温度传感器、车速车载感应系统和数据采集及处理系统。青马大桥上布置的传感器类型及其位置大致如图 2.3 所示。

虽然国内外在众多的重要桥梁上安装了 SHM 系统并开展了很多相关的科研工作,但是目前把大桥的监测系统和结构损伤识别与状态评估结合起来实现在线