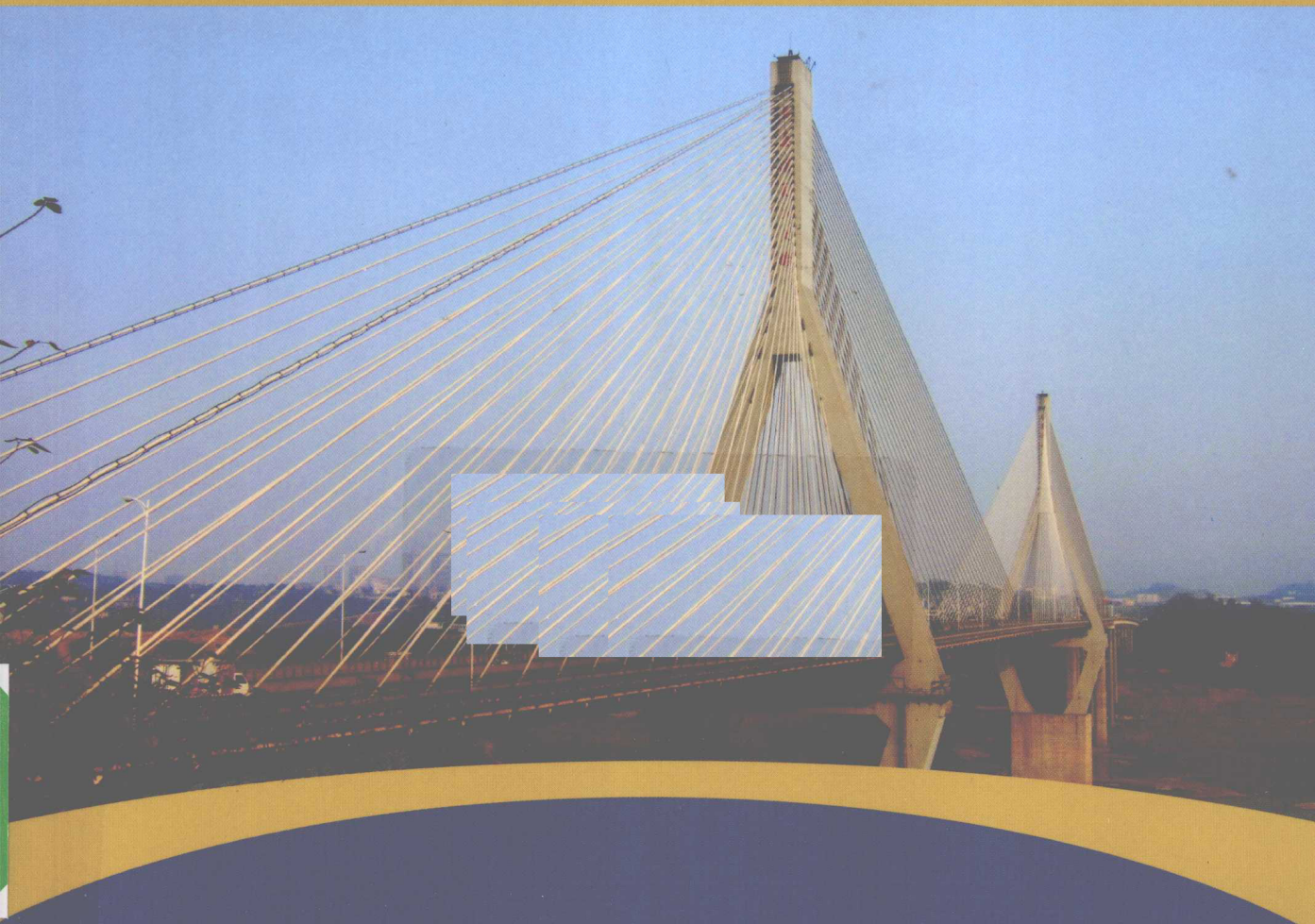


实时监测桥梁寿命预测 理论及应用

周建庭 杨建喜 梁宗保 著



科学出版社
www.sciencep.com

实时监测桥梁寿命预测理论及应用

周建庭 杨建喜 梁宗保 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统阐述了基于桥梁实时健康监测系统的寿命预测理论、方法和应用。主要内容包括桥梁结构动力分析原理、桥梁健康监测系统方案设计、桥梁健康监测信息预处理、基于混沌时间序列的结构响应信息的非线性分析、基于桥梁健康监测信息的结构抗力衰变特征分析、桥梁营运期随机荷载效应及其演化规律、桥梁营运使用寿命评估与预测研究。

本书可供从事土木工程和工程力学研究、设计和管理以及信息科学研究的广大科技人员及铁道、机械、电子、通信等专业相关专业人员参考,也可作为土木工程、结构动力学、信息科学等专业研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

实时监测桥梁寿命预测理论及应用/周建庭, 杨建喜,
梁宗保著.—北京: 科学出版社, 2010.5
ISBN 978-7-03-027387-1

I. ①实… II. ①周…②杨…③梁… III. ①桥梁结构-
检测-研究 IV. ①U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 077609 号

责任编辑: 杨岭 张珏 封面设计: 陈思思

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

*

2010 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2010 年 5 月第一次印刷 印张: 19.25

印数: 1—1 000 字数: 450 千字

定价: 59.00 元

前 言

桥梁是确保公路畅通的咽喉，而其承载能力和通行能力，更是沟通全线的关键。我国大型桥梁的设计基准期是 100 年。然而，实践中往往由于桥梁设计时考虑因素欠周全，设计标准偏低，施工时受到材料、几何尺寸等不定性影响，营运过程中未跟上科学、合理的养护措施，加上材料与结构的自然老化、使用环境变化，且受到超重车辆、偶然荷载的破坏作用……在这些因素作用下，桥梁的使用寿命受到了严峻的挑战，容易引发灾难性的突发事故。为了确保桥梁营运安全，利用现代电子、通信、信息、结构工程等多学科融合技术，对在役桥梁进行实时监测、安全评估以及寿命预测成为当前桥梁安全领域研究的热点和难点。

随着桥梁长期监测硬件条件发展，获取可靠、稳定的桥梁长期监测信息成为现实。由此，从基于实时监测信息及桥梁施工阶段的材料、几何尺寸、计算模式不定性中获取相关参数，以此为基础，充分运用数学、信息、力学手段，可以达到建立基于实时监测的桥梁安全评估和寿命预测模式的目的。

本书 8 章内容较系统的阐述了信息论、非线性分析、混沌以及时间序列在桥梁实时监测安全评估和寿命预测中应用的理论和工程应用过程。第 1 章详细介绍了桥梁健康监测的背景、意义以及桥梁安全评估和寿命预测研究的现状和发展。第 2 章全面总结、分析了结构动力学中的模态识别、结构物理参数识别以及桥梁结构动力学监测的基本原理。第 3 章详细分析了利用现代通信、电子、信息等构建的桥梁健康监测系统的方案以及方案设计中涉及的传感器优化布设、测点相关性的分析等内容。第 4 章全面总结了桥梁健康监测信息预处理的基本理论及工程应用流程。第 5 章对混沌动力学和时间序列的基本理论进行了全面总结，同时详细分析了桥梁监测响应信息的混沌特性，提出了混沌时间序列在桥梁安全评估中应用的发展方向。第 6 章在总结结构本构理论的基础上，详细介绍了结构抗力特征因子以及利用多种特征因子完成桥梁结构抗力评估的理论和应用流程。第 7 章在总结小波理论的基础上详细介绍了基于实时监测信息进行结构荷载效应提取的方法和工程应用。第 8 章详细介绍了利用人工智能算法、结构物理参数识别、模式识别以及最优停时理论进行桥梁营运期使用寿命评估和预测的理论和应用。

本书的研究工作先后得到了国家自然科学基金（50608072、50878219）、西部交通科技项目（200731895041、200831895076）、教育部新世纪优秀人才资助计划（NCET-08-0931）、重庆市杰出青年基金（2008BA6038）、重庆市重大科技攻关项目（CSTC2009AB6149、CSTC2009AB6148）等项目的资助；同时得到了韩逢庆、蓝章礼、胡必锦、陈悦等同志的大力帮助；另外，本书参考并引用了国内外有关专家的研究成果。在此对上述项目单位、提供帮助的同志及相关专家表示谢意！

本书总结了作者关于在役桥梁实时监测寿命评估和预测的成果，提出了一些较前沿的研究思路 and 方向，其中一些观点仅代表作者当前对上述问题的认识，有待进一步的补充、完善和提高。由此，本书中难免存在不足乃至错误之处，敬请读者予以批评和指正。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 桥梁结构健康监测的背景及意义	1
1.2 桥梁健康监测系统的发展及应用现状	4
1.2.1 桥梁健康监测的发展历程	4
1.2.2 桥梁健康监测系统的应用现状	5
1.3 桥梁结构的安全性评价与寿命预测的发展	9
1.3.1 常规工程结构耐久性、使用寿命预测研究现状及分析	9
1.3.2 基于远程实时监测的使用寿命预测理论研究相关前期工作	11
参考文献	13
第2章 桥梁结构动力监测原理	15
2.1 概 述	15
2.2 结构系统动力计算	15
2.2.1 单自由度系统	16
2.2.2 多自由度系统	18
2.2.3 桥梁结构动力系统	20
2.3 结构模态参数识别	25
2.3.1 单自由度系统传递函数、频响函数及参数识别	25
2.3.2 多自由度系统传递函数和频响函数	27
2.3.3 结构模态参数辨识	29
2.4 结构物理参数的识别	35
2.4.1 模态转换理论的频率识别法	35
2.4.2 动力复合反演的时域识别法	47
2.5 桥梁结构动力学监测	59
2.5.1 桥梁结构动力学特性测试	59
2.5.2 桥梁健康监测动力学特征应用	60
2.6 小 结	61
参考文献	62

第 3 章 桥梁健康实时监测系统方案设计	63
3.1 桥梁健康实时监测信息采集系统研究及应用	63
3.1.1 总体设计原则	63
3.1.2 桥梁健康实时监测内容的选择	64
3.1.3 主要参数的监测方法	65
3.2 桥梁健康监测传感器布设优化方法	80
3.2.1 传感器优化布置原则	80
3.2.2 基于遗传算法的传感器优化布设方法	81
3.3 典型桥梁安全远程实时监测集群系统	84
3.3.1 马桑溪长江大桥健康监测系统	85
3.3.2 重庆高家花园大桥	94
3.4 基于线性与非线性桥梁监测测点信息分析及应用	100
3.4.1 桥梁健康监测测点关联特性	100
3.4.2 基于时延转移熵与时延互信息的测点非线性关联特性分析	100
3.4.3 基于线性相关性的桥梁监测多传感器测点间关联分析	104
3.5 桥梁监测测点相关性在结构安全评估和预测中的应用	109
3.5.1 基于测点相关性的结构安全可靠度评估	109
3.5.2 基于相关度的结构损伤识别	110
3.6 小结	111
参考文献.....	111
第 4 章 桥梁健康监测信息的预处理	112
4.1 概述	112
4.2 海量数据处理	112
4.2.1 海量数据	112
4.2.2 海量数据的特点	112
4.2.3 海量数据管理的需求	113
4.2.4 海量数据的处理方法	114
4.3 数据失真的处理	116
4.3.1 监测信息数据失真的提出	116
4.3.2 数据失真的特点	117
4.3.3 数据失真的分类与表现形式	118
4.4 数据失真的识别方法	122
4.4.1 单点数据失真的识别	123
4.4.2 连续数据失真判断	127
4.5 数据失真的修复	129
4.5.1 趋势曲线修复法	129
4.5.2 神经网络修复法	136

4.5.3 修复方法的优缺点分析	138
4.6 数据换算处理	139
4.7 小结	141
参考文献	142
第5章 基于混沌时间序列的结构响应信息非线性分析	144
5.1 混沌动力学概述	144
5.1.1 混沌基本理论	144
5.1.2 混沌系统识别	146
5.2 时间序列	149
5.2.1 时间序列组成及分解	149
5.2.2 信号的奇异性检测与消噪	154
5.2.3 时间序列的时频特性分析	158
5.2.4 时间序列 ARMA 模型	164
5.3 混沌时间序列	170
5.3.1 基本理论	170
5.3.2 计算混沌特征参数	170
5.4 桥梁结构实时响应时间序列的混沌性分析	174
5.4.1 桥梁结构的非线性	174
5.4.2 基于 Melnikov 方法的桥梁结构混沌临界分析	176
5.4.3 桥梁健康实时监测时间序列	180
5.4.4 基于桥梁健康实时监测数据的混沌指标分析研究	182
5.5 基于混沌时间序列的桥梁结构状态评估研究	184
5.5.1 基于混沌时间序列的桥梁结构状态评估及预测	184
5.5.2 混沌在桥梁监测、评估与预测中应用展望	186
5.6 小结	186
参考文献	187
第6章 基于桥梁健康监测信息的结构抗力衰变特征分析	188
6.1 概 述	188
6.2 结构本构关系理论	189
6.2.1 线弹性模型	189
6.2.2 非线性弹性本构模型	190
6.2.3 弹塑性本构模型	191
6.3 影响桥梁抗力衰变的内、外因素分析	192
6.3.1 不确定性影响因素	193
6.3.2 收缩、徐变及松弛	194
6.3.3 碱-集料反应	195

6.3.4	混凝土、钢筋强度的时变效应	197
6.3.5	预应力损失	197
6.3.6	混凝土的碳化	198
6.3.7	钢筋的锈蚀	199
6.3.8	结构裂缝	202
6.3.9	荷载效应	202
6.4	结构抗力衰变特征因子的分析	204
6.4.1	静力特征因子	204
6.4.2	动力特征因子	205
6.4.3	基于混沌非线性分析的信号特征因子	210
6.5	基于桥梁实时监测信息的抗力特征因子分析及提取	211
6.5.1	基于桥梁健康监测信息的结构静、动力特征因子的提取	211
6.5.2	基于实时监测时间序列的混沌特征因子提取	219
6.6	基于桥梁实时监测信息反演物理参数的结构抗力分析研究	223
6.6.1	桥梁结构物理识别法方法分析	224
6.6.2	基于结构物理参数识别的结构抗力演变分析	225
6.7	基于动力特征因子的结构抗力分析研究	230
6.7.1	单因子对结构抗力的反映	230
6.7.2	多因子对结构抗力的反映	231
6.7.3	基于BP神经网络的结构抗力评估研究	234
6.8	基于混沌特征的桥梁结构抗力状态辨识研究	237
6.9	小结	239
	参考文献	239
第7章	桥梁营运期随机荷载效应及其演变分析	241
7.1	桥梁营运期荷载效应特性分析	241
7.1.1	主梁挠度和应变的主要影响因素分析	241
7.1.2	营运期桥梁荷载效应特性演变分析	244
7.1.3	营运期桥梁荷载效应特性指标的构建	245
7.2	活载效应和劣化效应信息的提取技术	248
7.2.1	结构响应监测信息的时间多尺度特点	248
7.2.2	小波分析理论	249
7.2.3	多尺度分析及Mallat算法	250
7.2.4	活载效应信息的提取	251
7.2.5	劣化效应信息的提取	254
7.3	基于实时监测信息的桥梁结构荷载效应演变规律分析	255
7.3.1	马桑溪长江大桥健康监测系统	255
7.3.2	荷载效应的提取及其演变规律分析	255

7.4 小结	262
参考文献	263
第 8 章 桥梁运营期使用寿命评估及预测研究	264
8.1 在役桥梁剩余寿命概述	264
8.1.1 结构寿命的定义	264
8.1.2 钢筋混凝土结构寿命预测的准则	264
8.1.3 桥梁寿命评估及预测方法	265
8.2 大型在役桥梁结构时变可靠度分析	266
8.2.1 可靠度理论	266
8.2.2 基于 BP 神经网络的桥梁可靠度分析	278
8.2.3 GA-BP 神经网络在桥梁可靠度评估中的应用	283
8.3 基于结构物理参数和荷载效应的时变可靠度结构寿命 评估及预测	285
8.3.1 基于桥梁健康监测信息动态调整的时变可靠度寿命评估预测	285
8.3.2 传统桥梁结构寿命预测模式分析	288
8.3.3 基于结构物理参数和荷载效应的时变可靠度结构寿命评估	289
8.4 基于“一类学习”模式识别的桥梁寿命预测分析	290
8.4.1 基于一类 SVM 模式识别的桥梁寿命预测分析	290
8.4.2 基于信息几何混沌 SVM 桥梁寿命预测模型修正	292
8.5 基于最优停时理论的桥梁抗力及寿命演变研究	294
8.5.1 最优停时理论	294
8.5.2 基于最优停时理论的桥梁结构寿命演变研究	296
8.6 小结	297
参考文献	298

第 1 章 绪 论

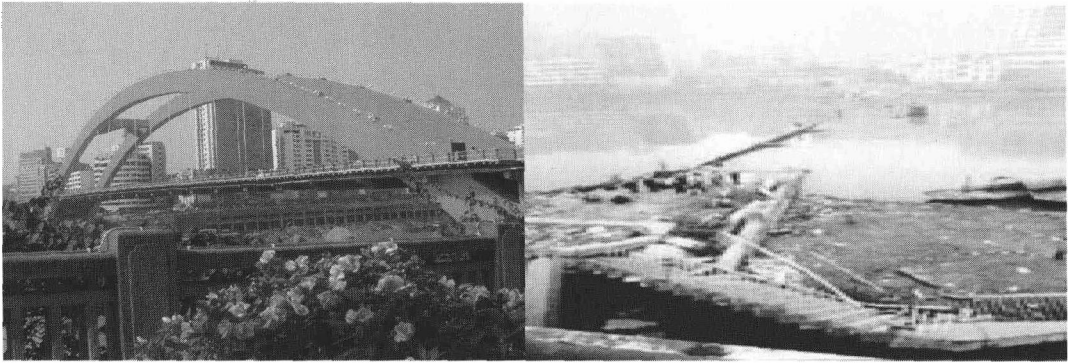
1.1 桥梁结构健康监测的背景及意义

桥梁是确保公路畅通的咽喉，而其承载能力和通行能力，更是沟通全线的关键。我国大型桥梁的设计基准期是 100 年，然而，实践中往往由于桥梁设计时考虑因素欠周全，设计标准偏低，施工时受到材料、几何尺寸等不定性影响；营运过程中未跟上科学、合理的养护措施；加上材料与结构的自然老化、使用环境的变化，且受到超重车辆、偶然荷载的破坏作用等，在这些因素的共同作用下，桥梁的使用寿命受到了严峻的挑战。

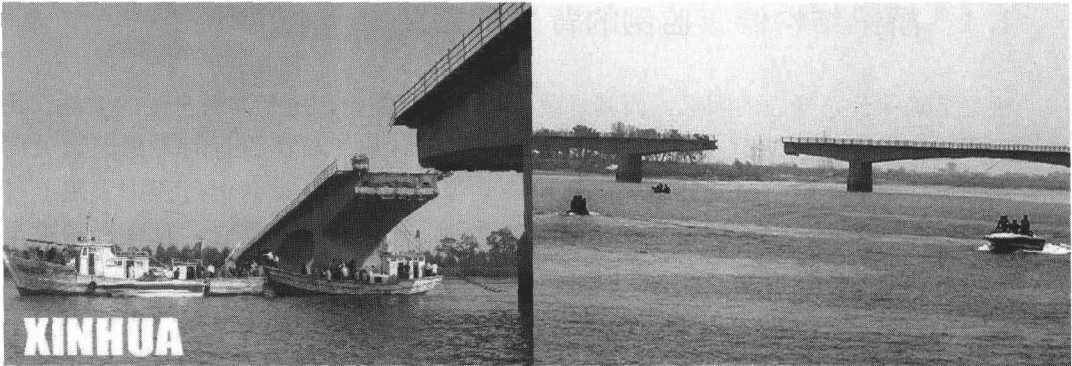
2001 年 11 月 7 日，曾被评为四川十大标志性建筑、号称“亚洲第一拱”的长江上游宜宾市南门大桥的 17 对承重钢缆吊杆中的 4 对（8 根）突然断裂，导致大桥两端发生坍塌，造成 3 车坠江、1 船被毁、2 人死亡、2 人失踪、多人受伤的悲剧。该桥建成通车至垮塌事故发生不到 12 年。武汉长江大桥建成使用至今已有 47 年，先后被过往的船舶撞击 73 次，桥梁的安全性和剩余寿令人担忧。交通系统在长江中下游首座自行设计的湖北境内的黄石长江大桥自 1995 年 12 月开通至今，桥梁结构裂缝众多，已经有非常明显的不可恢复的永久性变形，并且发生船只碰桥事故数十起，船只碰撞对桥梁造成较大损伤，桥梁的安全问题令人担忧，该桥目前的使用时间仅为 15 年。北京西直门立交桥，使用不到 19 年，就已报废重建。一些钢管砼桥梁使用不到 10 年，便因损害加剧而需进行加固处治甚至是拆除重建。

另一方面，桥梁这一公路咽喉，一旦垮塌，后果不堪设想：1999 年重庆綦江彩虹桥悲剧，给重庆市留下了惨痛的教训；2000 年宁波招宝山大桥的意外断塌，使数亿元的投资付诸东流；1994 年韩国汉江圣水大桥的断裂，波及韩国政界；2001 年葡萄牙 70 余人丧生的垮桥事件，造成交通部部长引咎辞职。

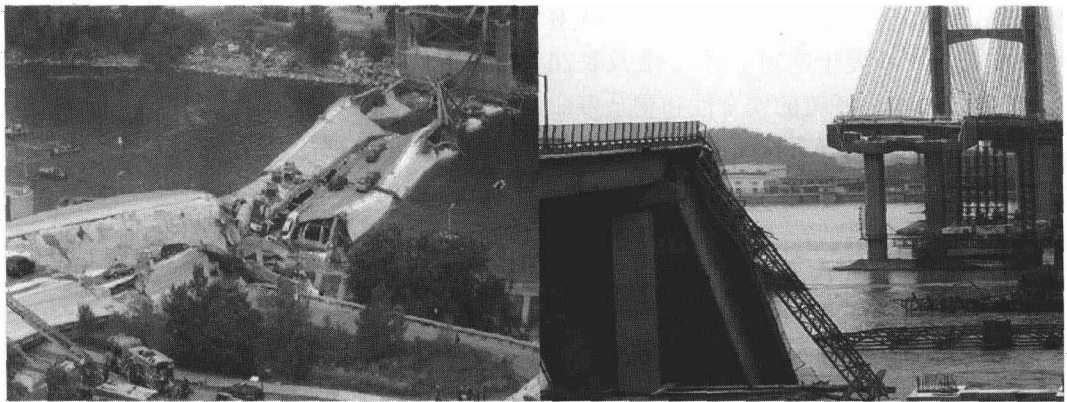
沉痛的教训使人们认识到，桥梁的安全性不仅仅只是其一年两载的建造期间的质量控制问题，更是其数十年服役期间的安全性评价、鉴定、剩余寿命预测与维护、加固处治、管理问题。然而，根据公路普查结果，我国建成的 32 万座各类公路桥梁中，已查出危桥 1 万余座，更有 1/3 以上的桥梁存在结构性缺陷或不同程度的功能失效隐患。可见，桥梁的安全性和使用寿命问题是我国大跨径桥梁的“心病”，科学、实时评价桥梁的安全性并自动预报桥梁的剩余寿命意义重大。



(a) 重庆綦江彩虹桥



(b) 辽河大桥



(c) 美国密西西比河大桥

(d) 九江大桥

图 1.1 国内外重大桥梁垮塌事故

随着交通事业的快速发展,大跨度及超大跨度的桥梁被大量兴建,作为交通网络关键节点的桥梁,其安全性、耐久性和适用性是大家一直关心的问题。这些桥梁在建造和运营过程中,受到各种荷载、自然环境的作用以及材料本身的退化影响,桥梁结构将不可避免的出现各种损伤。面对日益复杂的桥梁结构以及庞大的桥梁规模,传统的养护管理方法越来越不能满足要求。为了能够及时了解桥梁安全运营情况,对有病害的桥梁采取相应的技术措施进行维护,有必要发展新的养护管理方法——监测技术及相应的评估

理论和方法,桥梁结构健康监测系统正是在这样一种情况下应运而生的^[1]。

由于大型桥梁的力学和结构特点以及所处的特定环境,在大桥设计阶段完全掌握和预测结构的力学特性和行为是非常困难的。结构理论分析往往基于理想化的有限元离散模型,并且分析时常以很多假定条件为前提,这些常常与实际的真实条件不相符。因此,通过桥梁健康监测所获得的数据来推求实际结构动力和静力行为具有重要意义。

合理保守的设计是结构安全的根本保证,但是限于当前对大型复杂结构的认知程度,人们对许多未知因素都不能准确预测和有效控制,只有借助先进的检测手段来了解桥梁的安全状况。传统的桥梁保障体系以人工定期检测为主要特征,测试手段虽然较20世纪七八十年代有了长足进步,但其固有缺陷依然存在。人工检测需要预先知道损伤发生的大概位置,不易发现某些重要结构的内部损伤,无法检查人员和设备难以到达的部位,而且检查结果需要专业人员解释判断,带有很大主观性。此外,人工检测周期长,不能应付突发事件,难以为桥梁管理部门及时提供决策依据。

结构健康监测系统是集结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。Housner等人将结构健康监测系统定义为^[2]:一种从营运状态的结构中获取并处理数据,评估结构的主要性能指标(如可靠度、耐久性等)的有效方法。它结合了无损检测和结构特性分析(包括结构响应),目的是为了诊断结构中是否有损伤发生,判断损伤的位置,估计损伤的程度以及损伤对结构将造成的后果。根据上述定义,结构健康监测系统可以划分为^[3]在线测试、实时分析、损伤诊断、状态评估以及维护决策等五个部分。

结构健康监测技术的兴起为桥梁的安全保障另辟蹊径,可以彻底克服人工检测的滞后性和低效性。其方法主要是运用现代传感技术与通信技术,通过实时获取结构状态和环境信息的各种数据,监测桥梁运营阶段的结构响应与动态行为,并依靠智能分析软件评估桥梁结构的安全状态。桥梁健康监测的意义主要有以下几个方面^[4]:

(1) 可以实时掌握桥梁现场的交通状况,有利于桥梁管理部门进行合理的交通管制。

(2) 可以及早发现桥梁病害,确定桥梁损伤部位并进行定性和定量分析,在突发事件之后还可以评估桥梁的剩余寿命,为维修养护和管理决策提供依据和指导。

(3) 可以在桥梁运营状况严重异常时触发预警信号,有效预防安全事故,保障人民生命财产的安全。

(4) 可以验证桥梁结构的设计模型和计算假定,提高人们对大型复杂结构的认识,为实现桥梁结构的“虚拟设计”奠定基础。

作为基础设施的桥梁工程,其建设规模越来越大,造价越来越高,在国民经济和社会生活中起着举足轻重的作用越来越突出。在气候、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的情况下,对已有桥梁特别是对交通运输有重大影响的大跨径桥梁进行必要的监测和相应的养护,对于确保桥梁安全运营,延长桥梁的使用寿命是十分必要的。

1.2 桥梁健康监测系统的发展及应用现状

1.2.1 桥梁健康监测的发展历程^[5]

传统上,桥梁结构健康状况评估是通过人工目测检查或借助于便携式仪器测量得到的信息进行的。但人工检查方法在实际应用中有很大的局限性,美国联邦公路委员会的最近调查表明,由人工目测检查做出的评估结果有 56% 是不恰当的。传统检测方式的不足之处主要表现在^[6]: ①需要大量人力、物力和财力,并有诸多检查盲点; ②主观性强,难于量化; ③缺少整体性; ④影响正常交通运行; ⑤周期长,实时性差。

因此,为把握桥梁结构在运营期间的承载能力、运营状态,保证桥梁结构的安全性、适用性和耐久性,需要建立桥梁结构健康监测,加强对桥梁健康状况的监测和评估。

构建桥梁健康监测系统的关键问题是:如何根据安装在桥梁上的传感器系统采集到的桥梁静态与动态数据来分析评估桥梁的健康状况及进行寿命预测。简单地说,它包含了三方面的内容:

(1) 可靠而长期连续性工作的传感器的选择与安装、定位。

(2) 数据的长距离传输、误差噪音的分析消除,以及海量数据的存储、管理,并实现网络共享。

(3) 对采集到的数据进行处理分析,对桥梁的健康状况进行实时分析评估和完成寿命的预测,并能做出预警报告。

大型桥梁健康监测力求对桥梁结构进行整体行为的实时监控和结构状态的智能化评估。在结构经过长期使用或遭遇突发灾害之后,通过测定其关键性能指标,获取反映结构状况的信息,分析其是否受到损伤,可否继续使用以及预测剩余寿命等。这对确保桥梁的运营安全,及早发现桥梁病害,延长桥梁的使用寿命起着积极的作用。

桥梁的安全检测始于 20 世纪 50 年代,而 1967 年 12 月俄亥俄河上的一起导致 46 人丧生的桥梁倒塌事故促使美国于 1971 年制定了国家桥梁检测标准(NBIS),用于全面指导桥梁检测的各个环节。20 世纪 80 年代后,国外已有为数不少的大型桥梁建立了较为完备的健康监测系统。

威斯康星州一座已有 65 年历史的提升式桥 Michigan Street Bridge,安装了世界上第一套全桥远程监测系统,以监测将达到设计寿命的该桥梁裂缝的扩展情况和其他状态的变化。FHWA 资助研究的无线桥梁整体评估与监测系统(Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System)包括位移、应变、转角、加速度等项目的测量。

直到 90 年代光纤传感器产品得以在土木工程领域应用以后,特别是光纤光栅传感器在这一领域的应用实现了监测系统的长期稳定和有效性,推动了桥梁健康监测技术的长足进步,这时才开始真正意义上的桥梁在线长期健康监测。

在欧洲,Smartec 公司将长标距的光纤应变传感器应用于多座大桥,长期监测这些桥梁的关键部位应变历程曲线,据此判断结构的安全耐久性,取得很好的应用成果。

1996年,瑞士的Samuel Vurpillot等人对Versoix桥进行了以光纤传感器为主的实时监测,整个监测系统由传感器和信息处理器两个部分组成,利用该系统已成功地对五座桥梁进行了实时监测。同年瑞典在Winterther的Storchen Brucke斜拉桥上应用光纤传感器成功地解决了斜拉桥索力的长期实时监测问题。

1999年夏,美国新墨西哥Las Cruces 10号州际高速公路的一座钢结构桥梁上安装了120个光纤光栅温度传感器,创造了单座桥梁上使用该类传感器最多的纪录。佛蒙特大学的一个研究小组用光纤光栅传感器远距离监测沃特伯里佛蒙特钢结构大桥,这些研究取得了良好的效果,并有力地推动了桥梁工程科学的发展。

我国桥梁健康监测工作起步相对较晚,始于上世纪90年代末,究其原因主要是由于观念、资金、测试技术和监测手段的落后。随着我国改革开放的不断深入,对外经济、文化、科学技术等方面交流的不断扩大,综合国力的不断增强,交通基础设施和大型桥梁的建设得到了前所未有的关注,基础建设的投入迅速增加。多次桥梁垮塌的事故给桥梁工程技术人员和管理部门敲响了警钟,桥梁健康监测的意义和作用已逐步为桥梁建设者、设计人员和管理人员所认识。同时测试技术和监测手段的全面提高和更新,桥梁监测的软、硬件条件都发生了很大的改变,使得我国的桥梁健康监测成为可能。

1.2.2 桥梁健康监测系统的应用现状^[7]

自英国早在80年代后期,对爱尔兰的新Foyle桥安装了长期监测仪器和自动数据采集系统,以校验大桥的设计、测量和研究车辆、风和温度荷载对大桥动力响应的影响,并试图探索出一套有效的、可应用于其他类似桥梁的长期监测系统以来。近年来许多国家都开始在一些新建(或在建)和既有大型桥梁中建立结构健康监测系统。

随着桥梁结构健康监测技术的发展,以及为了掌握大桥更多的信息,特别是初始状态信息,在20世纪90年代以后新建的国内外大型桥梁,一般都安装有长期结构健康监测系统,图1.2详细绘出几座代表性桥梁传感器布置示意图。根据监测的目的不同,各个桥梁测试的内容也不同,现列举国内外一些著名桥梁介绍如下:

(1) 韩国Seohae桥,Youngjong桥:建成后分别安装了结构健康监测系统,监测内容包括结构的静动态性能和环境荷载,其中Seohae桥安装了各种类型传感器120个,Youngjong桥安装各种类型传感器380个。

(2) 英国的Flintshire桥:为确保该桥在施工过程和运营过程的安全,安装了一套长期健康监测系统。该系统监测的内容包括风速监测、预应力张拉束的工作环境监测、应力状态监测、拉索索力监测、整体动力特性监测、加速度监测等。

(3) 丹麦Great Belt East桥:为评估该桥结构整体性、耐久性和可靠性,COWI公司为该桥设计一套多达1000个传感器的监测系统。该系统监测的内容包括主缆、吊杆和索夹的应力;桥面箱梁的加速度、应力、支撑处的位移;下部结构的腐蚀监测、桥墩的倾角、桥塔混凝土应变;基础的土质监测;气候监测等。

(4) 日本明石海峡大桥:为证实在强风和地震时的设计假定和有关参数的取值,以及为确定该桥在温度变化和受其他条件影响的变形特性,安装了包括地震仪、风速计、加速度计、速度计、全球卫星定位系统(GPS)、测量主梁边缘位移的位移计、测量调

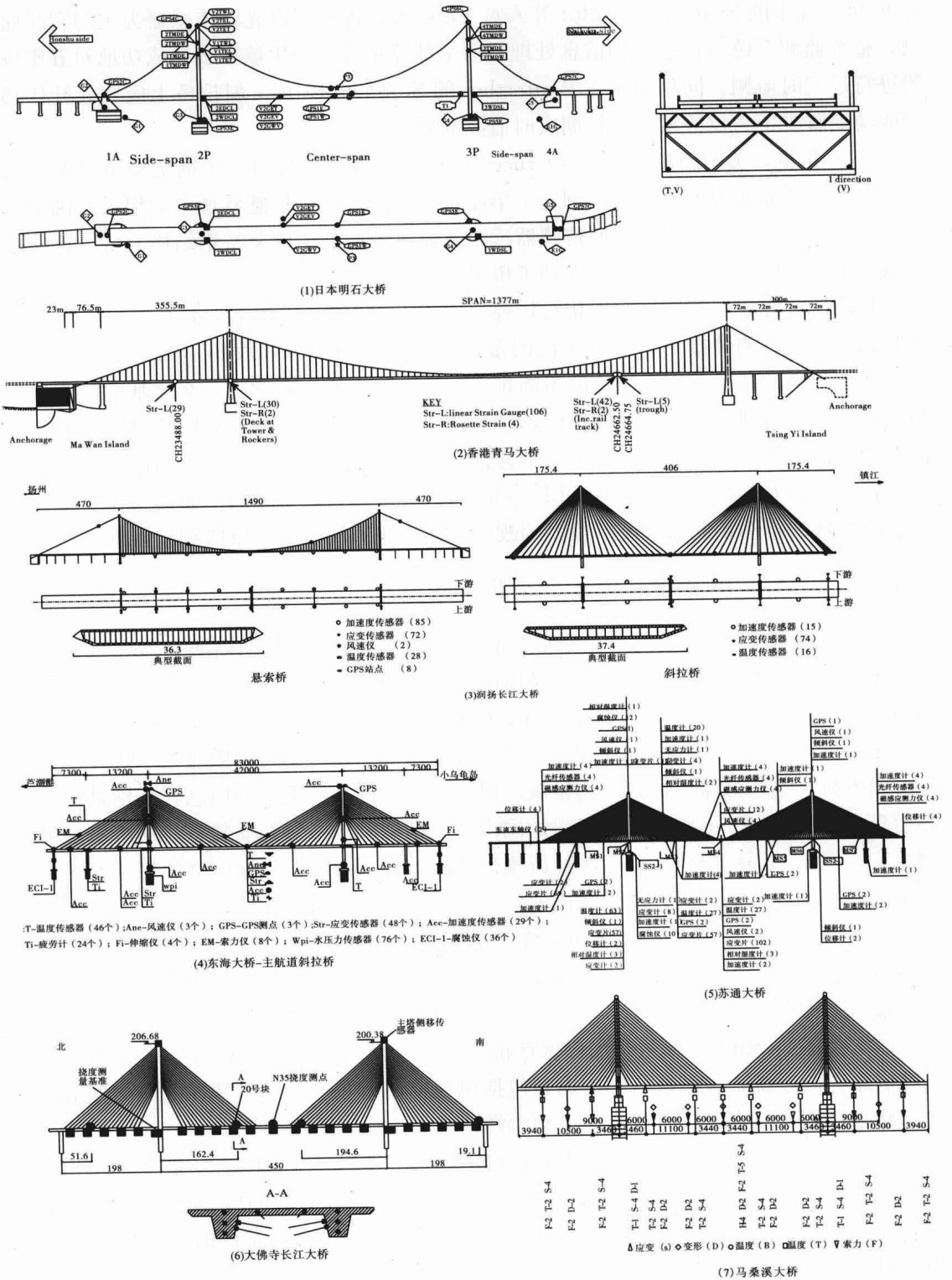


图 1.2 代表性大跨度桥梁监测传感器布置示意图[8~14]

质阻尼器 (TMD) 的位移计及温度计等传感器的监测系统, 参见图 1.2 (1)。

(5) 哥伦比亚 Pereira-Dosquebradas 桥: 建成后政府用约 150 万美元建立结构静动态健康监测系统。该系统包括加速度计、位移计、倾角仪、温度计、腐蚀传感器等各类传感器 300 多个。

(6) 香港青马大桥、汲水门桥和汀九桥: 由于索支撑桥对风比较敏感, 香港路政署于 1998 年在三桥上安装了保证桥梁运营阶段安全的“风和结构健康监测系统”(WASHMS)。其硬件设施十分完善, 包括传感器系统、数据采集和传输系统、数据存储管理系统等。该系统安装了 GPS、风速风向仪、加速度计、位移计、应变计、地震仪、温度计、动态地磅等各类传感器 774 个, 参见图 1.2 (2)。该系统是目前世界上投资最大、规模最大的桥梁健康监测系统之一。

(7) 加拿大 Confederation 桥: 1997 年建成, 因为世界上当时还没有一种规范或标准能涵盖该桥的设计标准, 于是实施一套综合监测计划, 以便对桥梁在冰荷载作用下的性能, 桥梁的短期和长期变形, 温度应力, 车辆荷载及荷载组合, 在风和地震荷载下的动力响应以及环境对桥梁的腐蚀进行研究。监测系统所用的加速度计、应变计、倾斜计、水荷载传感器以及热电偶等各种传感器 740 个。

(8) 美国 Commodore Barry 桥: 安装的长期健康监测系统内容包括桥面的加速度、桥墩和桥面的倾角、桥面的温度、环境引起的应变、活载引起的应变、图像监测系统、大气环境、风速测量、车辆荷载测量、位移测量等。该系统总共有 100 多个数据通道, 这些通道的数据分别来自应变仪、加速度计及摄像头, 并以 Lab View 为平台进行了集成。

(9) 中国湛江海湾大桥^[15]: 该桥的健康监测系统是目前国内第一座在设计阶段就考虑健康监测系统的的项目, 也是第一座由设计与科研单位合作进行健康监测系统设计的项目。此系统从动力和静力两方面桥梁结构进行监测, 实现数据采集、分析处理以及对当前桥梁结构的异常行为自动诊断, 进行安全性评估和多级预警, 并提供相关信息给交通监控系统实施交通控制。

(10) 中国苏通大桥^[12]: 因考虑该桥结构规模宏大, 其结构健康监测系统中传感器将有超声风速仪、车速车轴仪、全球定位系统、加速度传感器等 16 类。包括由 788 个各类传感器所构成上部结构固定式传感器系统, 由 16 只高精度加速度传感器构成的便携式传感器系统及包含 636 只传感器的基础监测传感器系统, 传感器总数达到 1440 只, 参见图 1.2 (5)。

(11) 中国润扬长江公路大桥: 该大桥健康监测与安全评估系统由传感器子系统、数据采集子系统、数据通信与传输子系统、数据处理与管理子系统、结构损伤预警子系统、结构损伤评估子系统和结构安全评定子系统等七个子系统组成。润扬大桥结构健康监测系统主要对南汊悬索桥的主缆、吊索, 北汊斜拉桥的斜拉索, 主梁和索塔的几何状态、静动力响应、大桥所处的自然环境、交通荷载状况等进行实时在线监测, 参见图 1.2 (3)。主要监测项目包括: ①缆索: 斜拉桥拉索索力监测、斜拉索的振动监测。悬索桥主缆内力监测、振动监测、吊索内力监测、振动监测。②主梁: 主梁线形监测、应力监测、振动监测和温度监测。③索塔: 索塔位移与沉降、索塔的振动监测和索塔的温度监测。④特殊结构设计: 悬索桥中央扣连接处的应力监测。⑤交通荷载监测: 各个车