



桥梁结构健康监测

Health Monitoring of Bridge Structures

李爱群 缪长青 编著

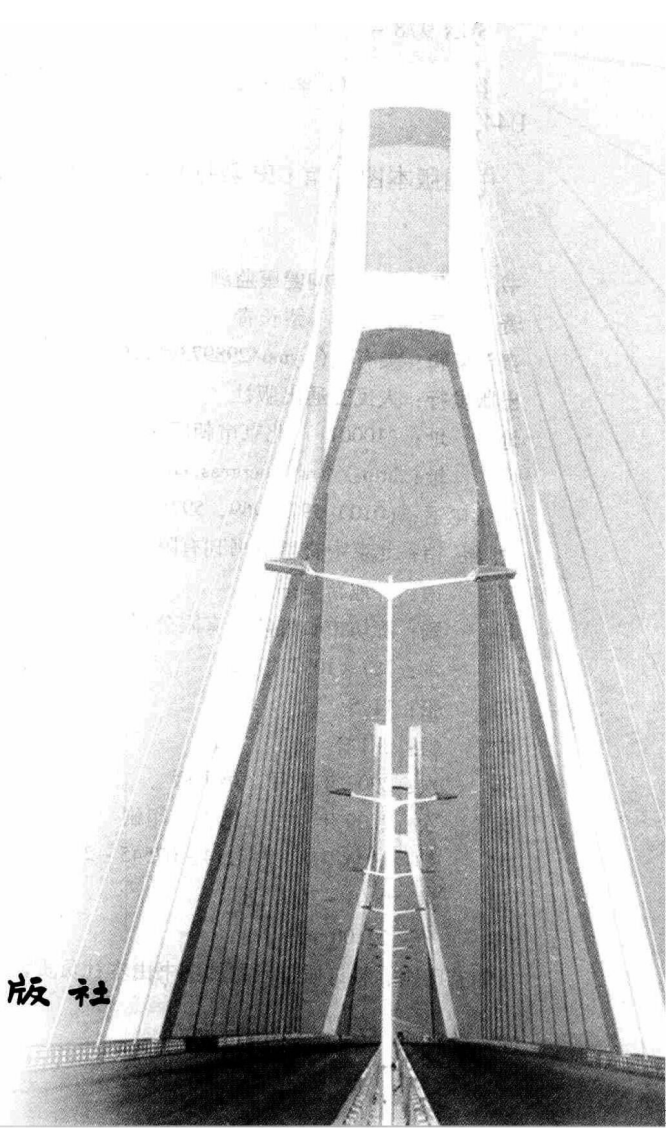


人民交通出版社
China Communications Press

桥梁结构健康监测

李爱群 缪长青 编著

人民交通出版社



内 容 提 要

本书较系统地介绍了桥梁结构健康监测与安全评估的若干基础理论及其应用,主要包括:桥梁结构的传感测试技术,桥梁结构损伤预警与辨识,桥梁结构可靠度评估与疲劳寿命评估,桥梁结构健康监测系统的设计与实施等。

本书可供从事桥梁工程专业研究、设计和管理的广大科技人员参考,可作为土木工程和工程力学专业研究生和高年级本科生的学习参考书,还可供铁道、水利、机械、航空、航天等相关专业参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构健康检测 / 李爱群, 缪长青编著. —北京: 人民交通出版社, 2009. 1
ISBN 978 - 7 - 114 - 07545 - 2

I. 桥… II. ①李… ②缪… III. 桥梁结构—检测 IV. U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 004653 号

书 名: 桥梁结构健康监测

著 者: 李爱群 缪长青

责任编辑: 吴有铭 (wym64298973@126.com)

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, 85285656

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 11.5

字 数: 281 千

版 次: 2009 年 1 月 第 1 版

印 次: 2009 年 1 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07545 - 2

印 数: 0001 ~ 3000 册

定 价: 22.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

大型桥梁结构是交通运输系统中的枢纽工程,对于保障“生命线”工程的畅通和保持国民经济的持续、稳定发展起着重要作用。大跨桥梁的相继建成投入使用,可以大大改善中心城市或主干道路的交通状况,在国民经济中起着十分重要的作用。随着桥梁结构分析理论、建筑材料和施工技术的迅速发展,桥梁跨度越来越大。就我国而言,目前斜拉桥跨度已达 1 088m(苏通长江大桥),悬索桥跨度已达 1 650m(浙江舟山西堠门大桥),大跨度桥梁结构越来越轻柔,这不仅要求有更为精确严密的桥梁设计理论和更为先进的施工技术的支持,同时对桥梁建成后的安全维护也提出了更高的要求。

桥梁在长期的使用过程中难免会发生各种结构损伤,损伤的原因可能是使用维护不当、车祸事故等人为因素,也可能是地震、风暴和环境侵蚀等自然因素。随着桥梁服役时间的增长、环境等自然因素的长期作用和交通量及重车数量的不断增加,桥梁结构的安全性和使用功能也必然发生退化。自 1940 年美国 Tacoma 悬索桥发生风毁事故以后,桥梁结构安全监测的重要性就引起了人们的注意。20 世纪 80 年代中后期,欧美一些国家明确提出了桥梁结构健康监测的新理念,并先后在许多重要的大跨度或结构体系新颖的桥梁上建立了桥梁结构健康监测系统。

我国桥梁结构健康监测系统的研究与应用始于 20 世纪 90 年代,依托我国大规模基础设施建设的背景,桥梁结构健康监测系统在我国得到了一定的应用。新建的大型桥梁结构总结以往的经验 and 成果,也在工程建设的同时增设长期的健康监测系统。这对于保证大跨桥梁的结构安全、及时掌握结构运营状况、发现桥梁早期的病害及查明不可接受的响应原因、实施经济合理的维修计划、实现安全经济的运行具有重要意义和实用价值。

本书从桥梁结构的传感测试技术、基准有限元模拟、结构损伤预警与辨识、结构可靠度评估与疲劳寿命评估、结构健康监测系统的设计与实施等多方面,对桥梁结构健康监测与安全评估的相关问题进行了较为系统的介绍。本书的内容主要是作者及其所在的东南大学结构健康监测研究所近些年来对桥梁结构健康监测理论研究与工程应用的总结。

本书的研究工作先后获得了国家杰出青年科学基金项目(50725828)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA04Z416)、国家自然科学基金重点项目(50538020)、高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(704024)等科研项目的资助,同时也得到了润扬大桥建设指挥部、苏通大桥建设指挥部、江苏省长江公路大桥建设指挥部等建设管理部门和有关合作单位的大力支持,对此,作者表示衷心的感谢!

参加本书编写工作的还有东南大学丁幼亮博士、郭彤博士、杨杰博士,东南大学结构健康监测研究所李兆霞教授、韩晓林教授、郭力副教授、费庆国副教授、靳慧副教授、王浩博士等老师和研究生也参与了相关内容的研究工作,作者对于他们为本书编写和相关内容研究所作出的贡献表示衷心的感谢。

在本书出版之际,作者真诚地希望读者和有关专家对书中存在的不足、不到和错误之处给予赐教和指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 桥梁结构健康监测的意义	1
1.2 桥梁结构健康监测的发展过程	4
1.3 桥梁结构健康监测的应用	5
第2章 桥梁结构的传感测试技术	10
2.1 桥梁结构检测的内容	10
2.2 常规桥梁结构检测方法	11
2.3 大跨桥梁结构日常周期检测内容及检测方法	14
2.4 光纤传感器技术的基本原理与应用	17
2.5 GPS技术在桥梁健康监测中的应用	23
第3章 桥梁结构的基准有限元模拟	31
3.1 引言	31
3.2 大跨斜拉桥的基准有限元模拟	31
3.3 润扬大桥斜拉桥的基准有限元模型	39
第4章 桥梁结构损伤预警	44
4.1 引言	44
4.2 基于小波包能量谱的结构损伤预警方法	44
4.3 润扬大桥斜拉桥健康监测数据的损伤预警分析	49
第5章 桥梁结构损伤辨识	72
5.1 基于物理模型的损伤辨识方法	72
5.2 基于机器学习的非物理模型损伤辨识方法	88
第6章 桥梁结构可靠度评估	105
6.1 结构可靠度的基本概念	105
6.2 公路桥梁可靠度分析中的参数模型	106
6.3 基于随机有限元法的可靠度评估方法	111
6.4 蒙特卡罗与响应面的联合算法	119
6.5 联合算法在大跨悬索桥可靠度计算中的应用	121
第7章 桥梁结构疲劳寿命评估	140
7.1 钢箱梁疲劳分析模型	140
7.2 应变时程实测数据处理	142
7.3 疲劳损伤评估和服役寿命预测	147
7.4 疲劳有效应力幅的估计	149
7.5 疲劳寿命可靠性评估方法	152

第 8 章 润扬长江大桥结构健康监测系统设计及实施	157
8.1 系统一般构成与设计原则	157
8.2 大跨桥梁结构健康监测系统的功能	158
8.3 大跨桥梁结构健康监测策略	158
8.4 数据采集与传输	161
8.5 数据处理与控制	165
8.6 润扬大桥结构健康监测评估软件	168
参考文献	174

第1章 绪 论

1.1 桥梁结构健康监测的意义

重大工程结构,诸如跨江跨海的大跨度桥梁[图 1.1.1a)],用于大型体育赛事的大跨空间结构[图 1.1.1b)],代表现代城市象征的超高层建筑[图 1.1.1c)],开发江河能源的大型水利工程[图 1.1.1d)],用于海洋油气资源开发的大型海洋平台结构[图 1.1.1e)]以及核电站建筑[图 1.1.1f)]等,它们的使用期长达几十年、甚至上百,在环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效

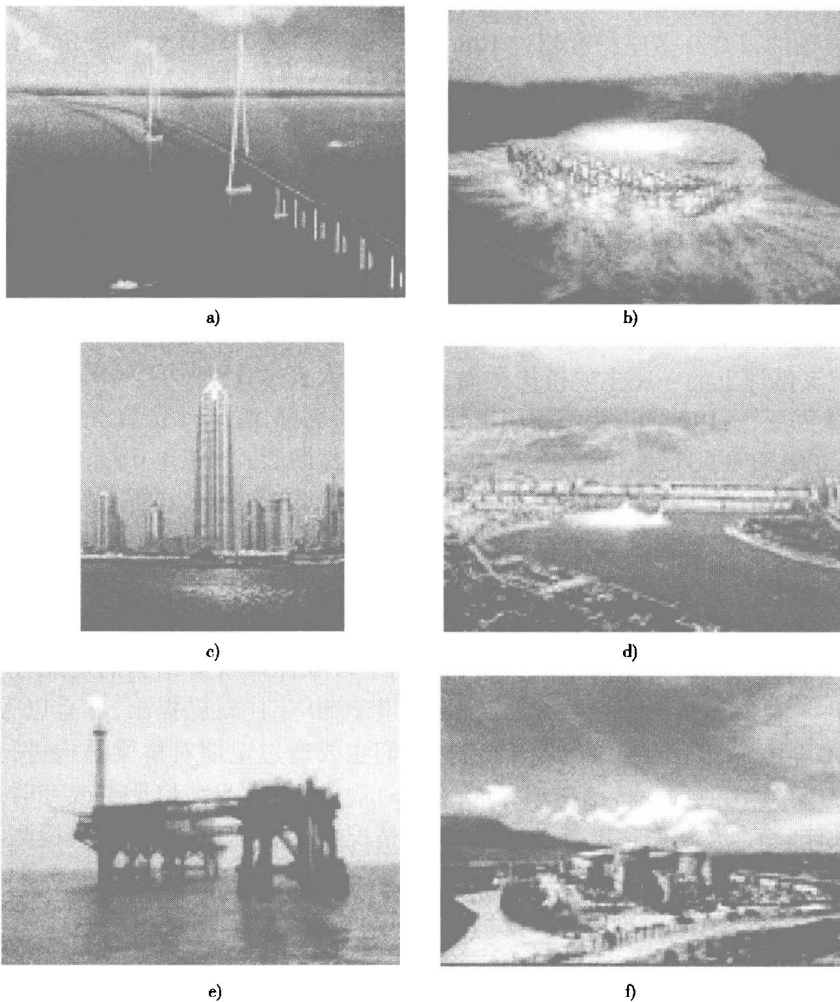


图 1.1.1 重大工程结构

a) 大跨径桥梁 ;b) 大跨空间结构;c) 超高层建筑;d) 大坝;e) 海洋平台结构;f) 核电站

应、疲劳效应和突变效应等灾害因素的共同作用下将不可避免地导致结构系统的损伤累积和抗力衰减,从而导致抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力下降,而且有的构件损伤可能扩展很快,极端情况下易引发灾难性的突发事件。为了保障结构的安全性、完整性、适用性与耐久性,已建的重大工程结构和基础设施急需采用有效的技术手段监测和评定其安全状况,并及时修复和控制结构损伤;新建的大型结构和基础设施总结以往的经验教训,可在工程建设的同时安装长期的结构健康监测系统,以监测和评价结构的服役安全状况,同时为研究结构服役期间的损伤演化规律提供有效和直接的试验验证平台。因此,重大工程结构的健康监测既具有重要的理论意义和学术价值,同时又具有现实意义和广阔的应用前景。

在各种重大工程结构中,桥梁结构具有数量众多、投资巨大和意义重大等特点,因此,桥梁结构健康监测得到了国内外的广泛关注。对于桥梁结构而言,随着桥龄的增长、气候和环境等自然因素的作用以及日益增加的交通量及重型车辆数量的不断增加,导致桥梁结构或构件发生不同程度的自然累积损伤和意外损伤,从而使得桥梁结构的安全性和耐久性发生退化。在美国,至少每两年要对约 57.5 万座桥梁进行检测,根据 FHA(Federal Highway Administration)的统计结果,约 40% 的桥梁功能陈旧或存在结构缺陷,修复这些结构缺陷需要投资约 700 亿美元;在哥伦比亚,由于疏于养护和恶劣的气候条件,2 000 多座跨度超过 10m 的公路桥梁,其中约有 60% 的桥梁存在中等程度的损伤;英国运输部曾在 1990 年抽样调查过 200 座混凝土公路桥,调查结果表明约 30% 的桥梁运营条件不良;在印度,大约 10% 的公路桥梁需要替换,另有 10% 的桥梁有损伤迹象;在前南斯拉夫,大约有 19% 的桥梁运营状况不良;我国的桥梁健康状况也不容乐观。随着国民经济的迅速发展以及交通运输能力要求的不断提高,许多桥梁到达或即将达到设计服务期,桥梁的老化和功能退化呈现加速的趋势。

桥梁结构损伤如果不能得到及时维护和维修,不仅会影响行车的安全,缩短桥梁的使用寿命,甚至会发生桥梁的突然破坏或倒塌等惨痛事故。例如,1962 年,美国 Kings 钢桥因疲劳而倒塌;1967 年,美国俄亥俄河上的一座主要桥梁倒塌,造成 46 人丧生;1994 年,韩国圣水(Sungsu)大桥中孔崩塌,造成 32 人死亡;1999 年,我国重庆市綦江彩虹桥突然倒塌,死伤数十人;2000 年 8 月,台湾高屏大桥倒塌;2001 年 11 月,四川宜宾南门大桥桥面突然断裂;2004 年 6 月,我国辽宁盘锦市境内辽河大桥中孔突然倒塌;2004 年 9 月,京杭大运河苏州段横塘亭子桥(人行桥)被货船撞塌;2007 年 8 月 1 日,美国 Minnesota 州横跨 Mississippi 河的 I-35W 桥(全长 581m、三个主跨、拱式钢桁架桥)在使用 40 年后突然倒塌。典型的桥梁倒塌事故如图 1.1.2 所示。

这些灾难性事故不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且引起了公众舆论的严重关注,产生了极坏的社会影响,因此,采用科学的监测和评估手段来保障桥梁结构的可靠性、安全性和耐久性显得极为重要。已有桥梁的损伤检测问题在 20 世纪 50 年代就已提出,并且以人工检测为特征的桥梁检测标准在美国等一些国家已开始施行,人们主要通过定期对桥梁结构进行例检以维持长期的监测。1971 年美国的国家桥梁检测标准(NBIS)规定:成桥或结构形态改变时进行验收检测;每两年要对桥梁的物理及功能状态进行例检;特殊情况要进行损伤检测、深入检测和临时检测等。从 1985 年起,我国交通部亦相继颁布《公路旧桥承载能力鉴定方法》和《公路养护技术规范》(JTJ 073—96)等技术标准。这些标准对采用人工方法进行桥梁损伤鉴定和状态评估作了详细规定。桥梁的状态检测方法总体上可分为局部检测方法和整体检测方法两大类。局部检测的目的是通过对桥梁重点部位的详细调查,掌握桥梁结构局部的物理、力学状态的实际情况。除了目视检测,许多无损检测(nondestructive damage detection,简称 NDD)方法作为辅助的手段在结构局部检测中得到了广泛使用,例如,涡流仪、磁试验、透入试验、X 射线试验和超声试验等。

虽然传统的以人工为主的桥梁检测是较经济可行的方法,但对于大跨度桥梁而言,这类方法存在明显的不足之处:①人工检测主观性强,往往需要凭检测人员的经验来判断;②整体性差,一般只能作局部检查,设备不宜到达处的结构损伤不能被外观检查所发现;③实时性差,不能及时损伤预警;④影响正常交通,并且缺乏科学历史数据积累。在美国的 Rhode Island 大桥上,一个工程师推测该桥的主要裂缝在被发现以前已经发展了 3 天;中国铁岭的青洋河大桥主梁翼板的断裂;1994 年韩国汉城(现改为首尔)的圣水大桥突然倒塌;2000 年 8 月台湾省的高屏大桥突然发生断裂等。这些事件都说明进一步发展桥梁结构整体健康监测及状态评估的技术及对重要的大跨桥梁结构建立长期自动监测系统是非常必要的。

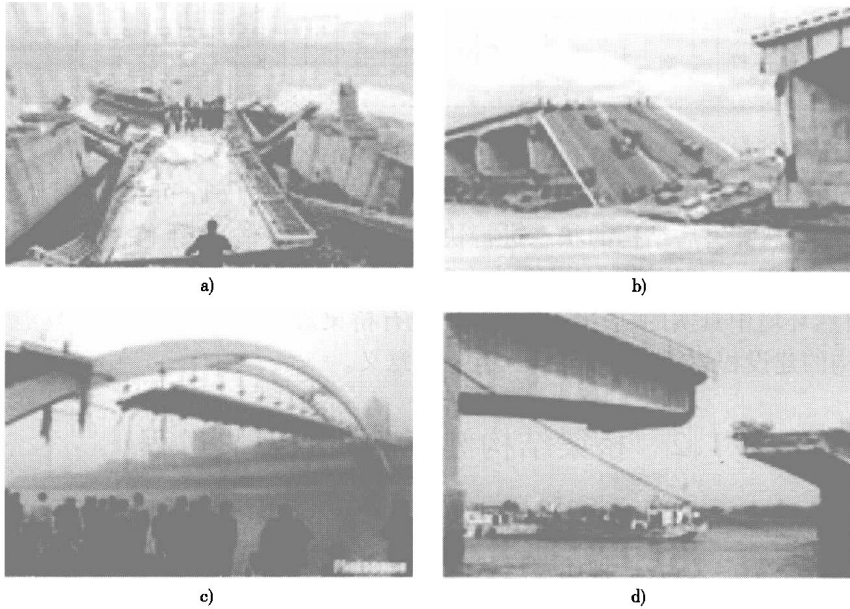


图 1.1.2 典型桥梁倒塌事故

a) 重庆市綦江彩虹桥; b) 台湾高屏大桥; c) 宜宾南门大桥; d) 盘锦辽河大桥

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、数学理论和结构分析理论等多个学科领域的桥梁结构健康监测系统,可极大地延拓桥梁检测内容,并可连续地、实时地、在线地对结构“健康”状态进行监测和评估,确保运营安全和提高桥梁的管理水平。桥梁结构安全监测系统的最主要功能是,通过各种传感器实时采集运营状态下的各种数据和信号,根据采集的数据和信号反演出桥梁的工作状态和健康状况,识别出可能的结构损伤部位及其损伤程度,并在此基础上进行桥梁的安全可靠性评估。从结构的重要性和目前建立监测系统较高的代价考虑,桥梁结构健康监测及状态评估的技术应主要面向大跨度桥梁,确保其设计使用安全性和耐久性达到预期的标准,并为桥梁维护、维修和管理决策提供依据和指导。

研究与发展桥梁结构健康监测系统,除了可以实现实时或准实时的损伤监测或状态评估外,结构健康监测系统对于桥梁设计验证和研究与发展亦具有重要的意义,如图 1.1.3 所示。桥梁结构设计常以很多假定条件为前提,因此,可利用桥梁结构健康监测系统所获得的结构静动力响应来检验理论模型和计算假定;同时,桥梁健康监测信息可进一步验证和完善结构设计方法与相应的规范标准,进一步加深对桥梁在各种交通条件和自然环境下真实行为的理解,进一步完善环境荷载的合理建模,从而实现桥梁的“虚拟设计”。我们相信,设有健康监测系统的桥梁结构将起到“现场试验室”的作用,桥梁结构健康监测将为桥梁工程中的未知问题和超大跨度桥梁的研究提供新的契机,

由运营中的桥梁结构及其环境所获得的信息不仅是理论研究和试验室调查的补充,而且可以提供有关结构行为与环境规律的最真实的信息。

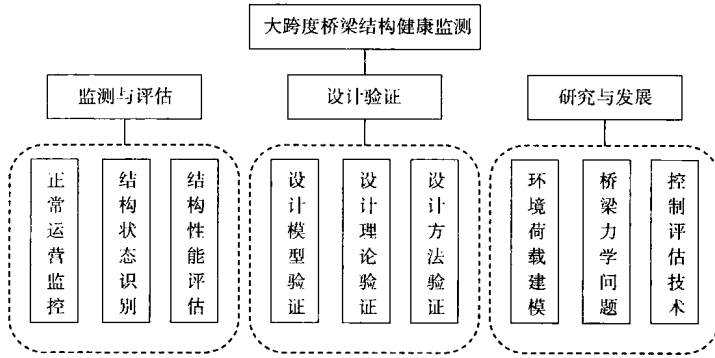


图 1.1.3 大跨度桥梁结构健康监测的研究意义

综上所述,桥梁结构健康监测系统的研究与应用在保障结构安全可靠(实时监测结构响应,对地震、强风等强烈自然灾害后结构的状态进行快速和有效的评估,为维修决策提供依据)、延长结构使用寿命(提早发现不定时的损伤累积,为有效遏制事态严重化提供科学保障)和科学研究探索(揭示结构在自然环境中真实的结构响应以验证现有桥梁理论,为进一步发展现有理论和未来超大跨度桥梁结构的建设积累认识)等方面具有重大意义。

1.2 桥梁结构健康监测的发展过程

结构健康监测是集结构监测、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: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(如可靠性、耐久性等)的有效方法。它结合了无损检测(NDD)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要造成的后果。

根据上述定义,桥梁结构健康监测系统可以划分为在线测试、实时分析、损伤诊断、状态评估以及维护决策五个部分,如图 1.2.1 所示。首先,通过在线测试模块,依靠传感、测试以及网络通信技术对桥梁的工作环境、桥梁在车载等各类外部荷载因素作用下的响应进行在线测试,并将上述信息转入实时分析模块,然后依靠修正后的有限元模拟计算,得到桥梁在当前时刻的结构状态。在此基础上,由损伤诊断模块为桥梁在特殊气候、交通条件及营运状况异常时进行损伤预警及损伤定位。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价。最后在维护决策模块中,为桥梁的运营管理、养护维修以及科学决策提供建议。可以看出,桥梁结构健康监测系统涉及的研究领域众多,包括现代测试与传感技术、网络通信技术、信号分析与处理技术、数学理论和结构分析理论、损伤诊断与状态评估技术等。

桥梁结构健康监测系统的研究已有 20 余年的历史。20 世纪 80 年代后期,随着材料技术和大规模集成电路技术的发展,美国军方首先提出了“智能材料与智能结构系统”的概念,并开展了大规模的研究。所谓“智能材料与智能结构系统”是指以智能材料为主、具有仿生命的感觉和自我调节功能的结构系统。20 世纪 90 年代中期,美国科学基金会 Directorate for Engineering 推动了传感器技术(sensors technology program)的研究计划,并提出将智能传感器安装和/或埋设于土木工程结构中,构成具有自感知特性的智能土木工程结构(intelligent infrastructure)。显然,具有自感知特性

的智能土木工程结构实际是结构健康监测系统的一种形式,两者具有密不可分的联系。

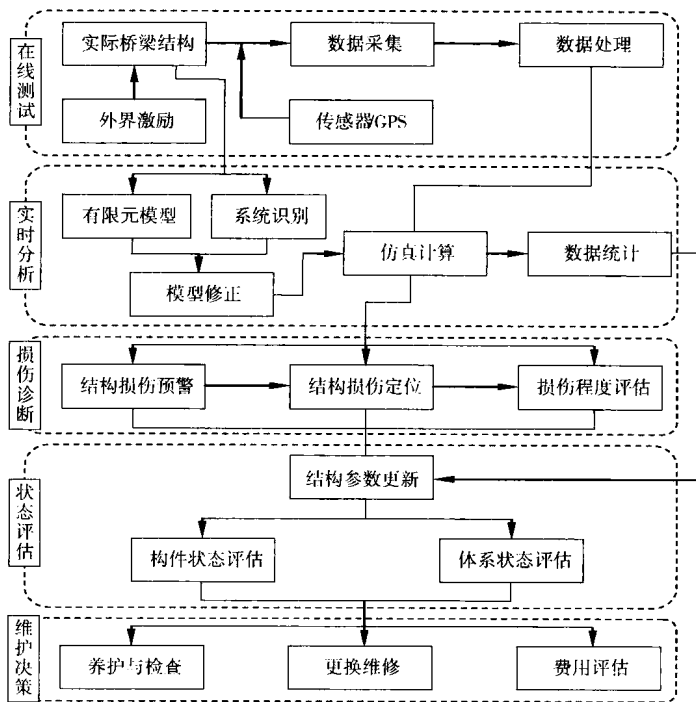


图 1.2.1 桥梁结构健康监测系统的功能模块框图

在美国科学基金会的带动下,结构健康监测系统的研究引起了世界各国政府的高度重视,欧洲科学基金会设立了“智能复合材料结构损伤诊断(damage assessment in smart composite structures)”的研究计划,日本建设省设立了“智能结构系统(smart structure systems)”的研究计划,我国国家自然科学基金委员会和科技部已设立科研计划资助结构健康监测领域的研究。与此同时,中美、美日、美韩、美国—欧洲在结构健康监测及智能结构领域开展了国际合作研究。

近年来,有关结构健康监测的国际学术组织以及学术期刊发展十分迅速。从1997年开始,在美国Stanford召开了每两年一届的国际结构健康监测会议;2002年开始,欧洲也每两年召开一次欧洲结构健康监测会议;2002年在意大利,International Association for Structural Control更名为International Association for Structural Control and Health Monitoring;2003年在日本东京成立了International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure;美国土木工程师协会(ASCE)也成立了结构健康监测与控制分委会。2003年第一届国际智能结构健康监测学术会议在日本东京召开;2005年于中国深圳召开了第二届国际智能结构健康监测学术会议;国际光学协会每年举办的年会也设立了智能结构健康监测与无损检测分会场。

1.3 桥梁结构健康监测的应用

国外桥梁结构健康监测系统的应用可以追溯到20世纪80年代,当时英国对北爱尔兰的新Foyle桥安装了长期监测仪器和自动数据采集系统,以校验大桥的设计并测量和研究车辆、风和温度荷载对大桥动力响应的影响。此后,随着现代传感技术、计算机与通信技术、信号分析与处理技术及结构分析理论的迅速发展,许多国家都开始在一些新建和既有大型桥梁中建立结构健康监测

系统。我国桥梁结构健康监测系统的研究与应用始于 20 世纪 90 年代,依托我国大规模基础设施建设的背景,桥梁结构健康监测系统在我国得到了一定的应用。与世界其他国家相比,我国桥梁结构健康监测系统具有数量多、桥梁规模大的特点。表 1.3.1 列出了国内外已安装(或正在实施)结构健康监测系统的主要桥梁。下面简要介绍其中一些大型桥梁上已经安装的桥梁健康监测系统的概况。关于润扬长江大桥结构健康监测系统将在本书第 8 章中详细介绍。

国内外安装结构健康监测系统的桥梁

表 1.3.1

桥梁名称	结构类型	跨度(m)	国家或地区
Sunshine Skyway 桥	斜拉桥	164.7 + 366 + 164.7	美国
New Benicial Martinez 桥	梁桥	180.9 + 3 × 200.8	美国
North Halawa Valley 桥	梁桥	120 + 113 + 2 × 106 + 80	美国
Bayview 桥	斜拉桥	134 + 274 + 134	美国
Red River 桥	梁桥	123	美国
Commodore Barry 桥	悬臂桥	274 + 548 + 274	美国
Fred Hartman 桥	斜拉桥	160.6 + 416.6 + 160.6	美国
Golden Gate 桥	悬索桥	343 + 1 280 + 343	美国
Ironton - Russell 桥	悬臂桥	117 + 241 + 117	美国
明石桥	悬索桥	960 + 1 991 + 960	日本
南备赞濑户桥	悬索桥	274 + 1 100 + 274	日本
柜石岛桥	斜拉桥	185 + 420 + 185	日本
多多罗桥	斜拉桥	270 + 890 + 270	日本
白鸟大桥	悬索桥	330 + 720 + 330	日本
大鸣门桥	悬索桥	330 + 876 + 330	日本
Flintshire 桥	斜拉桥	194 + 100	英国
Foyle 桥	梁桥	144.3 + 233.6 + 144.3	英国
Forth 公路桥	悬索桥	408 + 1 006 + 408	英国
Tamar 桥	悬索桥	114 + 335 + 114	英国
Namhae 桥	悬索桥	128 + 404 + 128	韩国
Jindo 桥	斜拉桥	70 + 344 + 70	韩国
Seohae 桥	斜拉桥	60 + 200 + 470 + 200 + 60	韩国
Yeongjing 桥	悬索桥	125 + 300 + 125	韩国
Banghwa 桥	系杆拱桥	540	韩国
Gwangan 桥	悬索桥	200 + 500 + 200	韩国
New Haeng Ju 桥	斜拉桥	160 + 120 + 100	韩国
Samcheonpo 桥	斜拉桥	103 + 230 + 103	韩国
Confederation 桥	梁桥	45 × 250	加拿大
Taylor 桥	梁桥	5 × 33.0	加拿大
Portage Creek 桥	梁桥	45 + 50 + 30	加拿大
Great Belt 桥	悬索桥	535 + 1 624 + 535	丹麦
Rama IX 桥	斜拉桥	166 + 450 + 166	泰国

续上表

桥梁名称	结构类型	跨度(m)	国家或地区
Pereria - Dos Quebradas 桥	斜拉桥	114.6 + 210.9 + 114.6	哥伦比亚
Normandie 桥	斜拉桥	856	法国
Skarsundet 桥	斜拉桥	240 + 530 + 240	挪威
青马桥	悬索桥	455 + 1 377 + 300	中国香港
汀九桥	斜拉桥	127 + 448 + 475 + 127	中国香港
汲水门桥	斜拉桥	160 + 430 + 160	中国香港
昂船洲桥	斜拉桥	1 018	中国香港
西部通道	斜拉桥	74.5 + 74.5 + 99 + 210	中国香港
徐浦大桥	斜拉桥	590	中国
卢浦大桥	拱桥	550	中国
江阴大桥	悬索桥	1 385	中国
润扬大桥南汉桥	悬索桥	1 490	中国
润扬大桥北汉桥	斜拉桥	176 + 406 + 176	中国
苏通大桥	斜拉桥	主跨 1 088	中国
虎门大桥	悬索桥	888	中国
南京长江大桥	钢桁桥	3 × (3 × 160) + 128	中国
南京长江二桥	斜拉桥	主跨 628	中国
南京长江三桥	斜拉桥	主跨 648	中国
芜湖长江大桥	斜拉桥	180 + 312 + 180	中国
重庆大佛寺大桥	斜拉桥	198 + 450 + 198	中国
钱塘江四桥	系杆拱桥	主跨 580	中国
松花江大桥	斜拉桥	主跨 365	中国
滨州黄河公路桥	斜拉桥	主跨 300	中国

(1) 加拿大 Confederation 桥, 1997 年建成。全长 12.9km, 是世界上最长的建于海水中的预应力混凝土箱梁桥。主跨 $45 \times 250\text{m}$, 设计寿命为 100 年。因为当时世界上还没有一种规范或标准能涵盖该桥的设计标准, 于是在该桥上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侵蚀进行研究。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。

(2) 日本明石海峡 (Akashi-Kaikyo) 大桥, 如图 1.3.1a) 所示, 1998 年建成。主跨 1 991m, 是目前世界上最长的悬索桥。为了证实**在强风和地震时的设计假定和有关参数的取值**, 另外为确定桥梁在温度变化和受其他条件影响的变形特性, 在该桥上安装了包括地震仪、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、测量调频质量阻尼器 (TMD) 的位移计及温度计等传感器的监测系统。

(3) 韩国 Seohae 桥和 Yeongjong 桥。Seohae 桥为主跨 400m 的双塔斜拉桥; Yeongjong 桥为自锚式悬索桥, 跨度布置为 $125\text{m} + 300\text{m} + 125\text{m}$, 2000 年建成。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, Yeongjong 桥安装了各种类型传感器 380 个。

(4) 哥伦比亚 Pereira - Dos Quebradas 桥。主桥为跨度 $31.3\text{m} + 83.25\text{m} + 210.9\text{m} + 83.25\text{m} + 31.3\text{m}$ 的斜拉桥, 桥宽 26.15m , 1998 年建成。建成后政府花费约 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。

(5) 香港青马 (Tsing Ma) 桥、汲水门 (Kap Shui Mun) 桥和汀九 (Ting Kau) 桥, 如图 1.3.1b) ~ d) 所示。其中, 青马桥是中跨 1377m 的悬索桥, 汲水门桥为中跨 430m 的斜拉桥, 汀九桥为三塔单索面斜拉桥, 两个中跨分别为 448m 和 475m , 1997 年建成。由于索支承桥对风比较敏感, 香港路政署在这些桥上安装了保证桥梁运营阶段安全的监测系统, 称之为“风和结构健康监测系统 (WASHMS)”。该系统的监测项目包括作用于桥梁上的外部作用 (包括环境因素及车辆荷载等) 与桥梁的响应, 共安装了 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。

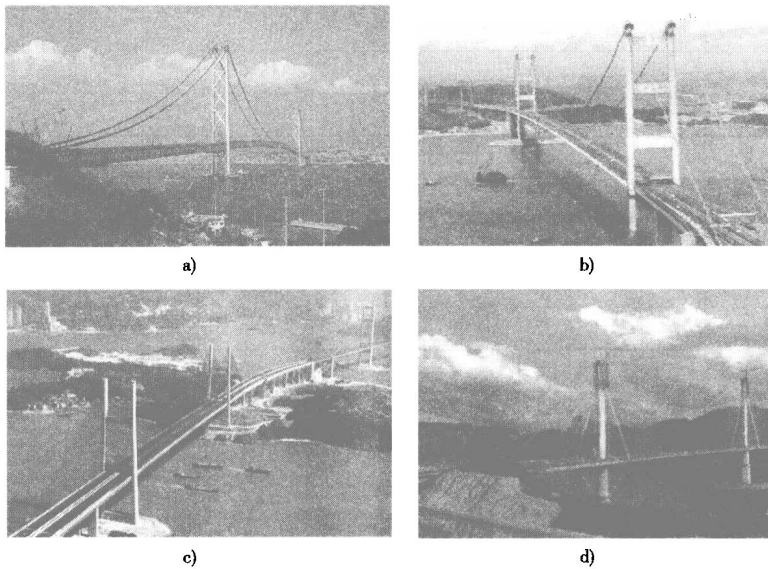


图 1.3.1 安装健康监测系统的大跨度桥梁

a) 明石海峡大桥; b) 青马大桥; c) 汲水门桥; d) 汀九桥

(6) 上海徐浦大桥, 1997 年建成。中跨 590m , 中跨主梁采用钢梁和钢筋混凝土桥面板组成的组合梁, 边跨为预应力混凝土连续梁。为了探索大跨度桥梁健康监测的经验, 在该桥上安装了一个带研究性质的结构健康监测系统。该监测系统包括如下监测内容: 车辆荷载、中跨主梁的高程、中跨主梁跨中断面的温度及应变、中跨主梁的自振特性以及斜拉索的索力及斜拉索的振动水平。整个监测系统共用各类传感器 74 个。

(7) 南京长江大桥, 1968 年建成。该桥为我国自行设计建造的首座公铁两用特大桥, 正桥跨径布置为 $3 \times (160\text{m} + 160\text{m} + 160\text{m}) + 128\text{m}$ 。为了确保大桥的安全运营和评估大桥的健康状态, 该桥于 2006 年建成了结构健康监测系统, 该系统包括应变计、温度计、加速度计、拾振器、风速仪、轨道衡、地震仪等各类传感器 150 多个。

从上述国内外主要桥梁结构健康监测系统的监测目标、系统功能及系统运营等方面来看, 目前国内外桥梁结构健康监测系统的研究与应用已取得了一定的成果与进展, 主要反映如下。①监测信息全面。通过测量结构各种响应的传感装置, 能够获取反映结构行为的各种记录, 并在桥梁通车运营后连续或间断地监测结构状态, 力求获取桥梁结构连续、完整的信息。有的新建桥梁监测系统

从施工监控开始,力求连续、完整的记录结构信息。②监测内容全面。除了监测结构本身的状态和行为(应力、位移、倾角、加速度、动力特性等)以外,还强调对环境条件(风、地震、温度、车辆荷载等)的监测和记录分析,同时试图通过桥梁在正常车辆与风荷载下的动力效应来建立结构的总体监测样本,并借此开发实时的结构整体性与安全性评估技术。③监测仪器多样、先进,监测功能不断完善。一些监测系统具有快速大容量的信息采集、通信与处理能力,并实现网络共享。另外,一些重要辅助设施的工作状态也纳入长期监测的范围,例如斜拉索振动控制装置等。④桥梁结构损伤诊断理论与方法的研究取得了一定的进展。开发了各种基于频率、振型、振型曲率、应变振型等改变量的损伤检测和定位技术,在处理方法上探寻了 MAC(模态保证标准)法、COMAC(坐标模态保证标准)法、柔度矩阵法、矩阵振动修正法、非线性迭代法等。这些方法各具特色,在局部的范围内取得了积极的效果。近年来,更多的研究者致力于采用智能算法和先进信号分析来发展结构损伤诊断方法,例如神经网络方法、模糊数学方法、小波变换方法、Hilbert - Huang 变换方法和信息融合技术等。⑤发展了包括可靠度理论、层次分析法、模糊理论、神经网络、遗传算法以及专家系统等多种桥梁结构状态评估方法,并且初步应用于桥梁结构健康监测系统中。

需要指出,上述这些研究进展在桥梁结构健康监测领域尚属于基础性的探索,距离系统的完美目标尚有较大的差距。这主要是由于:①桥梁结构的不确定性因素和复杂的工作环境对结构响应的灵敏性造成了不利的影响,导致了目前桥梁整体状态监测的许多困难;②对桥梁在使用年限内工作特性的变化缺乏全面深入的研究,难以建立客观统一的桥梁状态评估标准。所以整个结构健康监测技术的成功开发乃至系统目标的最终实现仍有赖于今后更好地结合桥梁的自身特性及其工作环境展开更为深入的研究。

第 2 章 桥梁结构的传感测试技术

桥梁结构健康监测系统在桥梁结构上布置的监测元件,既有局部检测元件,亦有整体监测元件,如用于结构整体性态监测的位移、速度和加速度等传感器和用于结构局部性态监测的应力、应变、裂纹等传感器。桥梁健康监测系统中涉及的传感器种类较多,在传感器的选型方面,针对不同的测试项目,其技术难度也不相同。有些测试项目属于常规测试范围之内,诸如温度、风向风速、交通荷载等,除常见的技术参数外,主要选择传感器的输出方式(模拟/数字)和是否具有“智能传感器”的特征,而结构变形、索力、应变、振动等检测项目的传感器选择必须针对桥梁的结构特点和监测目标需求确定。

2.1 桥梁结构检测的内容

根据检测的周期,桥梁检查分为经常性检查、定期检测和特殊检查三种。经常性检查由路段检查人或桥梁养护人员进行巡视检查。定期检查是依靠富有经验专职桥梁检查工程师,以目视观察为主,辅以必要的工具、常规测量仪器、照相机和其他器材等手段,实地判断病害原因,提出特殊检查或下次检查的要求。特殊检查是因各种特殊原因由专家们依据一定的物理、化学无损检验手段对桥梁进行的全面察看、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。

根据桥梁结构检测目标,桥梁结构检测可分为局部检测和整体检测两大类。整体的方法是通过表征结构整体特性的量,如结构的变形、振动频率、振型等参数的测量,对结构的整体状况进行评价;局部的方法以无损检测技术为手段,对结构局部部位集中检测。整体监测技术可连续或间隔地检查结构的安全状态,并可用来指导对损伤可疑部位的评估,提高检测的效率;局部的无损检测技术可较精确地对结构缺陷部位进行定位、探查,甚至定量分析。

桥梁几何检测是对桥梁结构上设置的观测点在不同工作状态下所进行的几何位置测量,根据这些观测点坐标的变化分析桥梁结构几何形变的空间分布及其随时间变化的规律。桥梁几何检测是桥梁结构整体特性检测的一项重要内容。

桥梁几何检测主要采用测量学的精密测量方法,按照测量学变形观测的基本理论,建立相应的观测网点和测量路线,利用全站仪、精密水准仪、测距仪、GPS 全球定位系统等测量仪器设备,在独立假定的坐标系中,通过测量桥梁结构上观测点在不同工作状况下的空间位置,并对观测数据进行分析处理,取得桥梁结构在各种工作状况下的发展趋势,为桥梁的运营管理以及桥梁的加固和改造提供第一手技术资料。

基于振动的结构损伤检测方法在本质上属于结构整体检测方法,相比于传统的局部无损检测技术具有信号易于提取、可以实现对于结构长期实时监测等特点。国内外学者和专家在这方面做了许多的研究工作,初步形成了动力指纹类方法、模型修正方法以及利用统计方法和专家系统的识别方法。整体检测则试图对整个结构进行结构反应信息的有效采集以及分析系统的处理来获得对整个结构状况的了解,其中包括结构的刚度、质量分布情况、结构的动力特性等。

局部检测主要检测桥梁主要构件的局部损伤状态,通过对结构的局部部位进行集中检测,实现对结构缺损状况的了解,检测手段主要依赖经验目测以及成熟的无损检测技术。早期的无损检测技术主要包括:涡流仪、磁试验、透入试验、X射线试验和超声试验。近年来,无损检测技术有了很大发展,出现了无线电成像、光纤、超声检测、全息摄影、红外检测、声发射、自然电位检测、冲击回波检测、磁试验、 γ 或X射线检测、光干涉、中子射线照相和散射、脉冲雷达等技术。其中有些技术已经在桥梁检测过程中得到广泛应用,如利用相干激光雷达测试桥梁下部结构的挠度,利用全息干涉仪和激光斑纹测量桥体表面的变形状态,利用双波长远红外成像检测桥梁混凝土层的损伤,利用磁漏摄动检测钢索、钢梁和混凝土内部的钢筋等。

随着桥梁建设的规模越来越大,造价越来越高,大型桥梁在国民经济和社会生活中的作用越来越重要,人们对大型桥梁的安全性、耐久性与正常使用功能日益关注。作为结构安全性分析的重要手段,桥梁检测技术的发展受到越来越多的关注。如美国联邦公路管理局(FHWA)开展了一系列结构无损检测技术的应用研究,包括:含有双带远红外热成像技术的桥面板检测系统,具有无线电发送等技术的桥梁测试和健康监测系统,先进的疲劳裂纹探测和评估系统,先进的锈蚀探测和评估技术等。

2.2 常规桥梁结构检测方法

2.2.1 常规桥梁结构检测对仪器设备的主要要求

桥梁结构检测对仪器的要求包括:

- (1)仪器的自重轻、尺寸小;
- (2)仪器的灵敏度、准确度、量程等合适且性能稳定、可靠;
- (3)仪器结构简单,使用方便,性价比高,不易损坏;
- (4)仪器应尽可能适合多种用途;
- (5)仪器应具有良好的使用安全性。

每种仪器不可能同时满足上述要求,而且有些要求往往又是互相矛盾、互相制约的,所以在做试验设计时应该根据具体情况进行合理选择。

2.2.2 桥梁结构的位移检测

位移计是桥梁工程检测中最基本的机械式测量仪表。常用的机械式位移计有接触式和张线式两种。

2.2.2.1 接触式位移计

百分表、千分表和挠度计都是接触式位移计。三者的外形相似,构造及工作原理相同,但检测的精度及量程不一样。百分表、千分表的量程较小,前者刻度值为0.01mm,后者的刻度值0.001mm。挠度计的量程较大,刻度值常为0.05mm。百分表与千分表是桥梁工程检测中最常用的机械式仪表,常用于桥梁结构挠度与位移的测量,还可以与其他传感器组合进行应变、转角、曲率、扭角等的测量。

将百分表或千分表配以适当的夹具即构成接触式位移计,可以用于量测结构各部位较小的位移。这类仪器的优点是构造简单,使用方便。在桥梁结构试验中,此类仪器适合量测结构构件位移(如梁的挠度)、支座下沉和构件间的相对位移等。