

# 桥梁结构健康监测 分析与评价

Health Monitoring  
Analysis and Evaluation  
for Bridge Structures

孙宗光 陈一飞 著

中国建筑工业出版社

Health Monitoring Analysis and Evaluation for Bridge Structures

# 桥梁结构健康监测分析与评价

孙宗光 陈一飞 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁结构健康监测分析与评价/孙宗光, 陈一飞  
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 7  
ISBN 978-7-112-20863-0

I. ①桥… II. ①孙… ②陈… III. ①桥梁结构-监  
测-研究 IV. ①U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 138046 号

本书面向桥梁健康监测数据的分析应用, 结合实际工程, 对以下内容进行了阐述和介绍:

1. 结构长期监测的基本概念、系统构成和发展概况, 相关信号处理分析方法;
2. 车辆荷载、温度荷载、风荷载和腐蚀作用的监测技术和分析方法;
3. 运营条件下桥梁结构动态特性与响应 (应变/应力、索力等) 的变异特性、变化规律; 基于监测系统的桥梁运营状态响应的分析方法和基于统计分析的评价模型与检验方法;
4. 基于实际监测的车辆和温度荷载统计模型, 面向大型桥梁健康监测与评价的车桥耦合动力分析和温度随机响应分析的数值模拟方法;
5. 通过数值模拟和整桥模型试验等手段, 进行大型桥梁结构的损伤识别与诊断的方法。

供从事结构健康监测与评价的科研人员、工程技术人员和相关专业的高校师生参考。

责任编辑: 赵梦梅 刘婷婷

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 王雪竹

## 桥梁结构健康监测分析与评价

孙宗光 陈一飞 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)  
各地新华书店、建筑书店经销  
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版  
北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18½ 字数: 460 千字  
2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-20863-0  
(30469)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

桥梁结构的使用期限通常长达几十年乃至上百年。在其使用过程中,由于超常荷载、材料老化、构件缺陷等因素的作用,结构将逐渐产生损伤累积,从而使结构的承载能力降低,抵抗自然灾害的能力下降。如遇地震、台风等灾难性荷载作用时,就可能遭受极为严重的破坏,给国家和人民的生命、财产带来巨大损失。因此,通过技术手段及时了解和掌握结构的运营环境和健康状态,从而对结构的安全性和耐久性做出评价是一项重要工作,并日益受到重视。结构健康监测系统(SHM)是一种持久性安装在结构上的传感和数据采集、传输、管理、分析等软硬件系统。它综合利用了传感、通讯、信息、信号处理、数据管理和系统识别等领域的技术。它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,以及时地掌握和评价结构的健康状态为目标。为认识结构的运营环境和工作机理,识别结构的健康状态,评估结构的性能,指导结构的维护与管理提供了丰富的资料和技术手段。

结构健康监测问题简单地可划分为两大部分:数据获取和数据的分析应用。(1)数据获取的核心是监测技术,包括传感器研发、监测系统设计与实施、数据的管理与呈现,目标是拿到高质量数据;(2)数据的分析应用是结构健康监测的目的和意义所在。通过对运营响应的分析了解和掌握结构的运行状态和规律,检验结构设计的合理性,评价结构工作状态和健康状况。

本书的侧重点在于对监测数据的分析应用,将广泛采用实际监测数据、整桥模型试验和数值模拟手段,对桥梁结构健康监测的数据分析与评价方法做初步探讨和介绍。

全书共分12章,第1章简要介绍了结构健康监测系统的基本概念、系统构成、发展概况和工程实例;第2章介绍了与结构监测相关的信号处理方法,特别介绍了非平稳信号的分析理论与方法,包括小波变换和 Hilbert-Huang 变换的基本内容。第3-5章主要介绍了桥梁结构的常见荷载的监测及其数据分析方法,结合实际监测数据分别对车辆荷载、温度荷载和风荷载的有关数据分析内容与方法做了介绍;第6章针对混凝土结构耐久性监测的有关技术和工程应用作了介绍,此外还介绍了有关阳极梯系统的试验研究;第7章分析了大型桥梁结构运营条件下的动态特性及其变异性;第8-9章对桥梁结构的监测响应进行了分析,分别对运行条件下索力和应变的变化特征、受温度的影响规律进行了较为详细的分析;探讨了基于关联度方法的整体索力评价和基于统计模型的单索索力分析与评价方法;第10章面向监测与评价进行了桥梁结构的动态响应数值模拟方法的研究。基于车桥耦合理论,探讨了拱桥吊杆系统在车辆荷载下动态响应特性和耐久性问题;探讨了斜拉桥结构与车流荷载的动力学耦合分析方法和在年温度影响下的随机索力模拟分析方法;第11章简要介绍了结构损伤识别方法,包括模型修正法、动力指纹法、神经网络法等;第12章为悬索桥损伤识别模型试验研究,介绍了面向健康监测与损伤识别的悬索桥试验模型的模型设计与制作,损伤状态下结构动态响应特性分析和基于神经网络的损伤识别试验研究成果。

本人的研究生广泛参与了书中的大部分数据处理工作和试验工作。其中，第 10 章有关拱桥的分析部分为在本人指导下由邵元完成；第 6 章的试验部分是在范颖芳教授与本人共同指导下由郭亚唯完成；第 12 章的试验部分是在本人指导下由石健和栗燕娜完成；在本人指导下，杜江、崔展铭、李丹分别参与了第 3、4、5 章的数据处理工作。书中大部分实桥监测数据来自胶州湾大桥监测系统，得到相关部门的大力支持。在此，表示最诚挚的谢意。

桥梁结构的健康监测内容宽泛，涉及很多基础理论和应用技术问题，由于我们理论知识有限，实践经验不多，一定存在不少问题与错漏，真诚地欢迎各位专家、学者、工程师们提出宝贵意见。

孙宗光

2017 年 3 月

# 目 录

<b>第 1 章 结构健康监测概述</b> .....	1
<b>1.1 结构健康监测系统及其发展</b> .....	1
<b>1.2 健康监测系统的功能与目的</b> .....	4
<b>1.3 结构健康监测的内容</b> .....	5
<b>1.4 监测系统的组成与结构</b> .....	7
1.4.1 系统结构 .....	7
1.4.2 传感器系统 .....	7
1.4.3 数据采集与传输系统 .....	8
1.4.4 数据处理与控制系统 .....	9
1.4.5 结构健康诊断评价系统 .....	9
<b>1.5 监测系统设计原则与方法</b> .....	10
1.5.1 系统设计原则 .....	10
1.5.2 系统设计方法 .....	11
<b>1.6 监测系统实例：胶州湾大桥</b> .....	12
1.6.1 传感器布置 .....	12
1.6.2 系统总体功能框架 .....	17
参考文献 .....	18
<b>第 2 章 结构监测信号分析</b> .....	20
<b>2.1 信号采样与滤波</b> .....	20
2.1.1 信号采样 .....	20
2.1.2 信噪比与滤波 .....	21
<b>2.2 信号的平稳性和各态历经性</b> .....	22
2.2.1 信号的平稳性 .....	22
2.2.2 信号的各态历经性 .....	23
<b>2.3 傅里叶变换</b> .....	24
2.3.1 连续傅里叶变换 .....	24
2.3.2 离散傅里叶变换 .....	25
<b>2.4 信号的功率谱估计</b> .....	26
2.4.1 功率谱的概念 .....	26
2.4.2 离散信号功率谱的计算 .....	27
<b>2.5 非平稳信号</b> .....	29

2.6	小波变换	31
2.6.1	小波变换的定义	31
2.6.2	常用的小波函数	32
2.7	Hilbert-Huang 变换	35
2.7.1	固有模态与瞬时频率	35
2.7.2	经验模态分解法与 HHT 变换	36
	参考文献	40
<b>第3章 车辆荷载的监测分析</b>		41
3.1	车辆荷载的监测	41
3.1.1	路面动态称重系统	41
3.1.2	桥梁动态称重系统 (B-WIM)	44
3.2	汽车荷载与车型分类	47
3.3	基于 WIM 监测的车辆统计分析	49
3.3.1	车重的统计分析	49
3.3.2	车间距的统计分析	52
3.3.3	车重车速联合分布	52
	参考文献	54
<b>第4章 温度荷载的监测分析</b>		57
4.1	温度作用与监测	57
4.1.1	温度作用	57
4.1.2	温度监测	58
4.2	基于监测的年温度分析	59
4.2.1	基本气温	59
4.2.2	气温分布与极值	60
4.2.3	斜拉桥结构年温度与极值	63
4.3	基于监测的日照温度分析	65
4.3.1	日照温度场	65
4.3.2	钢箱梁日照温度	67
4.4	基于监测的钢箱梁截面温差分析	69
4.4.1	温差的时空特征	69
4.4.2	温差的分布与极值	70
4.4.3	骤然降温	72
	参考文献	73
<b>第5章 风荷载的监测分析</b>		74
5.1	风的作用与监测	74
5.1.1	风对桥梁的作用	74

5.1.2 风的监测	76
<b>5.2 风速风向分析</b>	77
5.2.1 平均风与脉动风	77
5.2.2 风速风向分布	79
<b>5.3 基于监测的台风脉动特性分析</b>	81
5.3.1 湍流度	81
5.3.2 阵风系数	82
5.3.3 湍流积分尺度	84
5.3.4 功率谱密度	87
参考文献	91
<b>第6章 混凝土结构耐久性监测</b>	93
<b>6.1 腐蚀原理</b>	93
<b>6.2 耐久性监测技术</b>	94
6.2.1 半电池电位法	94
6.2.2 线性极化法	97
6.2.3 腐蚀评价准则	98
<b>6.3 耐久性监测应用概况与实例</b>	100
6.3.1 应用概况	100
6.3.2 跨海桥梁应用实例	100
<b>6.4 梯形阳极系统的试验研究</b>	104
6.4.1 试验研究概况与目的	104
6.4.2 试验方案设计	105
6.4.3 试验结果与分析	107
参考文献	111
<b>第7章 动态特性及其变异性分析</b>	112
<b>7.1 概述</b>	112
<b>7.2 运营条件下动态特性的变异性</b>	114
7.2.1 温度的影响	114
7.2.2 风与车辆的影响	118
<b>7.3 斜拉桥的模态特征分析</b>	120
7.3.1 斜拉桥模态的基本特征	120
7.3.2 斜拉索的局部振动与影响	124
7.3.3 梁/塔与斜拉索的耦合作用	126
<b>7.4 悬索桥的模态特征</b>	128
参考文献	130



<b>第 8 章 索力的监测分析与评价</b> .....	131
<b>8.1 索力的监测</b> .....	131
8.1.1 振动法 .....	131
8.1.2 磁通量法 .....	132
8.1.3 压力法 .....	134
<b>8.2 运营索力的影响因素分析</b> .....	136
8.2.1 运营索力的基本特征 .....	136
8.2.2 运营索力的随机干扰特性 .....	139
<b>8.3 基于监测的索力与温度关系分析</b> .....	142
8.3.1 全年索力与温度的关系 .....	142
8.3.2 单日索力与温度的关系 .....	144
<b>8.4 整体索力评价方法概述</b> .....	145
8.4.1 灰色关联分析 .....	145
8.4.2 变权综合原理 .....	147
8.4.3 灰色关联与变权综合法的应用 .....	148
8.4.4 其他方法 .....	149
8.4.5 索力评价分析实例 .....	150
<b>8.5 基于统计分析的索力评价</b> .....	153
8.5.1 索力分布特性 .....	153
8.5.2 标准索力及其分布特性 .....	154
8.5.3 标准索力个别值抽样检验 .....	155
8.5.4 标准索力分布检验与评价 .....	157
参考文献 .....	160
<b>第 9 章 应变与变形的监测分析与评价</b> .....	162
<b>9.1 应变与变形监测</b> .....	162
9.1.1 应变监测 .....	162
9.1.2 变形监测 .....	163
<b>9.2 基于监测的应变与温度关系分析</b> .....	168
9.2.1 监测应变的基本特征 .....	168
9.2.2 全年应变与温度的关系 .....	170
9.2.3 日照温度对监测应变的影响 .....	171
9.2.4 标准应变及其分布特性 .....	173
<b>9.3 基于应变监测的荷载识别</b> .....	174
9.3.1 结构概况与模型 .....	174
9.3.2 基于应变的模型修正 .....	175
9.3.3 施工阶段的荷载识别 .....	177
<b>9.4 应变/应力监测在疲劳评估中的应用</b> .....	179

参考文献	180
<b>第 10 章 面向监测与评价的桥梁动态响应模拟</b>	<b>183</b>
<b>10.1 概述</b>	183
<b>10.2 动力分析的数值方法简介</b>	184
10.2.1 动力学数值方法概述	184
10.2.2 几种常用的直接积分法	184
<b>10.3 车桥耦合分析方法</b>	189
10.3.1 车辆模型	189
10.3.2 桥面不平度	190
10.3.3 车桥耦合方程及求解方法	191
<b>10.4 拱桥吊杆体系的车桥耦合响应分析</b>	193
10.4.1 吊杆体系的破坏特征	193
10.4.2 车桥耦合振动模型及校正	194
10.4.3 吊杆的冲击效应分析	195
10.4.4 吊杆的弯曲效应分析	197
10.4.5 匀变速车辆下吊杆动态应力	199
10.4.6 等刚度设计下动态响应分析	200
<b>10.5 斜拉桥的车桥耦合响应分析</b>	203
10.5.1 车桥模型与分析方法	203
10.5.2 基于车辆监测的车队模型	206
10.5.3 车队作用下的动态响应	208
<b>10.6 年温度影响下的随机索力分析</b>	210
10.6.1 模拟方法	210
10.6.2 结构的年温度模型	211
10.6.3 年温度影响下的索力模拟	213
参考文献	217
<b>第 11 章 结构识别方法</b>	<b>219</b>
<b>11.1 概述</b>	219
<b>11.2 模型修正法</b>	220
11.2.1 模型修正的基本原理	220
11.2.2 模型修正方法	221
11.2.3 实例: 基于实测频率的斜拉桥模型修正	222
<b>11.3 动力指纹法</b>	227
11.3.1 基于固有频率的方法	227
11.3.2 模态曲率法	231
11.3.3 模态柔度法	232
<b>11.4 神经网络法</b>	234

11.4.1	神经网络的基本概念	234
11.4.2	异常状态预警	236
11.4.3	损伤工况识别	238
11.4.4	损伤构件与程度识别	239
11.4.5	基于神经网络的模型修正	240
<b>11.5</b>	<b>数值模拟：斜拉桥的损伤识别</b>	<b>240</b>
11.5.1	分析模型与损伤工况	241
11.5.2	基于频率的损伤预警	242
11.5.3	基于模态曲率的损伤识别	244
11.5.4	基于模态柔度的损伤识别	246
11.5.5	基于索力的损伤识别	252
11.5.6	三个指标的比较	254
11.5.7	基于神经网络的损伤工况识别	257
11.5.8	基于神经网络的损伤构件识别	261
	参考文献	265
<b>第 12 章</b>	<b>面向健康诊断的模型试验研究</b>	<b>267</b>
<b>12.1</b>	<b>模型设计与制作</b>	<b>267</b>
12.1.1	模型的设计	267
12.1.2	模型的制作	269
<b>12.2</b>	<b>有限元模型误差分析</b>	<b>271</b>
12.2.1	面向健康诊断的有限元模型	271
12.2.2	有限元模型的建立	272
12.2.3	有限元模型误差分析	274
<b>12.3</b>	<b>损伤状态下静动态响应特性分析</b>	<b>277</b>
12.3.1	损伤工况	277
12.3.2	加劲梁损伤	278
12.3.3	主缆损伤	279
12.3.4	吊索损伤	280
<b>12.4</b>	<b>基于神经网络的损伤识别</b>	<b>281</b>
12.4.1	数值模拟：训练样本的生成	281
12.4.2	试验模拟：测试样本的生成	282
12.4.3	损伤识别结果	283
	参考文献	284

# 第 1 章 结构健康监测概述

## 1.1 结构健康监测系统及其发展

桥梁结构的使用期限通常长达几十年乃至上百年。在其使用过程中,由于超常荷载、材料老化、构件缺陷等因素的作用,结构将逐渐产生损伤累积,从而使结构的承载能力降低,抵抗自然灾害的能力下降。如遇地震、台风等灾难性荷载作用时,就可能遭受极为严重的破坏,给国家和人民的生命、财产带来巨大损失。因此,通过技术手段及时了解 and 掌握结构的运营环境和健康状态,从而对结构的安全性和耐久性做出评价是一项重要工作,并日益受到重视。早期的技术手段主要是基于传统的无损检测技术和人工巡检,然后根据经验对结构的状态和发展趋势做出判断和决策。然而,对于大型复杂结构,为了能够不失时机地获得结构的健康状况的信息,靠偶尔进行的试验检测是无法满足要求的。如能对结构的运行状况进行在线实时监测,并基于此对结构的工作状态和健康状况做出诊断、识别和预测,将对及时发现结构损伤,预测可能出现的灾害,进而对结构的安全性、可靠性、耐久性和适用性做出评估,具有重要的意义。因此,自 20 世纪后期开始,国际上出现了针对重要的工程结构的长期健康监测系统。

结构健康监测系统(SHM)是一种持久性安装在结构上的传感和数据采集、传输、管理、分析等软硬件系统。它综合利用了传感、通讯、信息、信号处理、数据管理和系统识别等领域的技术。它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,以及时地掌握和评价结构的健康状态为目标。为认识结构的运营环境和工作机理,识别结构的健康状态,评估结构的性能,指导结构的维护与管理提供了丰富的资料和技术手段。长期健康监测系统的出现,大大推动了结构识别与诊断技术的发展。

国际上结构健康监测的研究,大约开始于 20 世纪 50 年代的航空航天和机械领域。70 年代末,开始土木工程领域的相关研究。早期的结构在线监测技术是基于一台计算机而完成数据采集、信号处理和分析的系统。随着监测对象的大型化和对监测系统功能要求的提高,发展成采用多台计算机通过通讯协作,而形成一個基于计算机网络的监测系统。目前,相关领域的新技术在健康监测系统中都得到广泛应用。这些技术主要包括:全球定位系统(GPS),光纤光栅传感技术,互联网技术,无线传输技术等。这些技术的应用,使结构健康监测技术得到空前发展。进一步提升了系统的性能,拓宽了系统的应用领域,实现了系统的远程访问和数据共享,为不同用户的需求提供更便捷的服务。

自 20 世纪 90 年代以来,结构健康监测已经广泛地应用于大型桥梁。开创性的大规模应用案例包括:丹麦大贝尔特桥(Great Belt Bridge),该桥为主跨 1624m 的悬索桥,安装了多种传感器组成的监测系统,监测内容包括(1)主缆、吊杆和索夹的应变;(2)箱梁的应变和加速度;(3)下部结构的腐蚀情况、桥墩的倾角、桥塔混凝土应变;(4)风、

温度等气候要素。加拿大的 Confederation Bridge (联盟大桥, 1997 年建成) 有跨径为 250m 的主跨 45 跨, 大桥安装了较为完善的监测系统。监测内容和传感器包括 (1) 桥墩冰荷载监测: 采用倾角仪、加速度计、应变计的监测结果换算评价冰荷载, 并用激光、声呐和摄像仪进行冰块尺度的监测; (2) 基础沉降、桥面变形监测: 高精度水准仪和反射棱镜; (3) 温度监测: 热电偶元件、振弦式温度计、日照仪 (Pyranometer); (4) 车辆荷载和响应监测: 摄像仪、称重系统和应变计; (5) 动力特性: 加速度计和动位移计; (6) 风荷载监测: 风速仪; (7) 浪溅区混凝土腐蚀监测: 腐蚀计。数据采集系统拥有 1000 多个通道, 以不同的采样速率工作。在突发情况下 (如超载、冰块撞击、地震等), 如果结构响应超过一定阈值, 数据采集系统将以更高的频率采样。美国的 New Benicia Martinez 桥在三个 200m 主跨安装了长期健康监测系统<sup>[1]</sup>, 监测内容包括: 桥面位移、混凝土应变、桥墩倾角、温度湿度、预应力、腐蚀、地震、模态特性等。

日本的本州-四国连接线上共有 17 座大跨度桥梁, 包括桁架桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥。其中很多桥上都安装了一定规模的健康监测系统<sup>[2]</sup>。以明石海峡大桥 (Akashi Kaikyo Bridge, 主跨 1991m, 如图 1.1) 为例<sup>[3]</sup>, 监测内容包括: 地震动、风特性、结构振动响应、结构线型等。其中结构线型监测应用了 GPS 系统<sup>[4]</sup>。20 世纪 90 年代以来, 韩国对桥梁健康监测投入了大量研究。1973 年完工的 Namhae 桥是韩国建设的第一座悬索桥, 经过 20 多年超负荷运行出现了一些结构损伤和腐蚀现象。为监测大桥结构性能, 安装了健康监测系统<sup>[5]</sup>。其中传感器系统包括: 机械式风速仪、倾角仪、加速度计、应变计等。2000 年完工的韩国 Seohae 斜拉桥, 跨径布置为 200m+470m+200m, 监测系统传感器部分包括: 风速仪、倾角仪、加速度计、应变计、激光位移计、地震仪等。

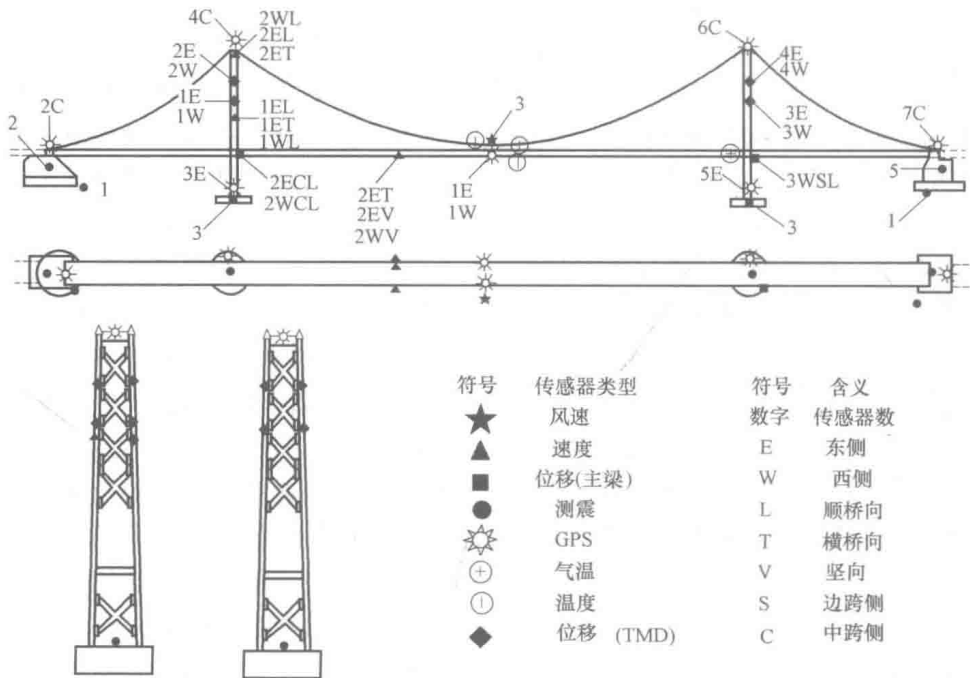


图 1.1 日本明石海峡大桥监测系统传感器布置

我国香港的青马、汲水门和汀九大桥于 1997 年建成, 为监测大桥的运行状况和结构

的健康状态，在三座大桥上永久性地安装了“风与结构健康监测系统”（Wind and structural health monitoring system, WASHMS）<sup>[6]</sup>。该系统主要由四部分构成：（1）传感器系统；（2）信息采集系统；（3）信息处理和分析系统；（4）系统运行与控制系统。其中传感器子系统由 800 多个传感器组成，包括加速度计、应变计、温度计、位移计、水准仪、GPS 系统、风速仪、车速车重仪等，其中青马大桥的部分传感器（不含 GPS）布置如图 1.2 所示。

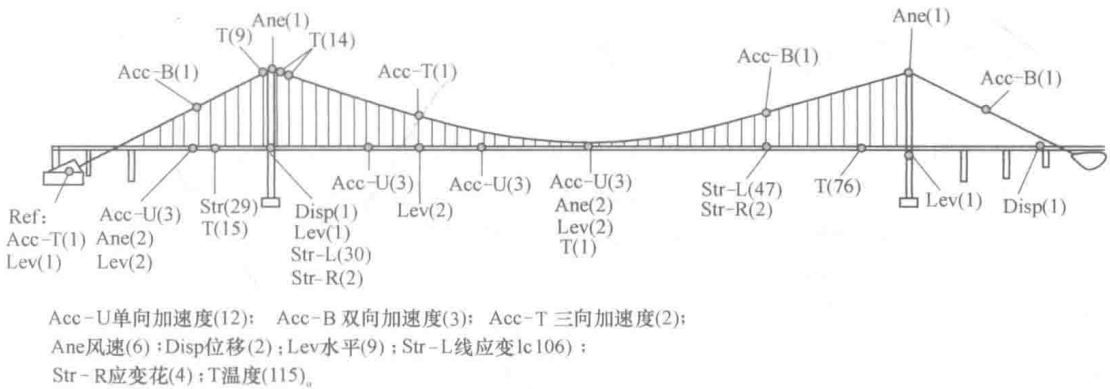


图 1.2 青马大桥监测系统传感器布置示意图

监测与评估内容包括：

- （1）桥梁工作环境的监测：桥址处风速和风向、桥址处环境温度和结构上温度分布状况、交通荷载及其分布状况、地震荷载、铁路荷载；
- （2）桥梁整体性能的监测：大桥结构的动力特性、大桥主梁各控制部位的应力和位移状况、大桥钢索的索力；
- （3）结构评估：评估大桥即时的结构可靠度。

我国内地自 20 世纪 90 年代末以来，新建成了一大批大规模桥梁。与此同时，桥梁健康监测系统也随之迅速应用和不断发展<sup>[7]</sup>。如东海大桥<sup>[8]</sup>，苏通大桥<sup>[9]</sup>，上海长江大桥<sup>[10]</sup>，胶州湾大桥<sup>[11]</sup>，西堠门大桥<sup>[12]</sup>，黄埔大桥<sup>[13]</sup>，瀛洲大桥<sup>[14]</sup>，港珠澳大桥等，其健康监测系统无论在系统规模，还是在技术水平上都有了空前的发展。

与此同时，结构健康监测的应用也于 20 世纪 80 年代前后开始了在大跨度空间结构、高层建筑结构领域的尝试<sup>[15, 16]</sup>。T. Kijewski 等<sup>[17]</sup>于 1998~2006 年间对高层建筑的监测做了大量的工作。期间主持了 Chicago Full-Scale Monitoring Project 计划，先后在芝加哥、波士顿、首尔进行了大量的高层建筑监测，得到一系列有价值的研究结论。在监测技术方面，将 GPS、网络技术等应用于高层建筑的监测和数据监控、存储、下载与处理。建筑结构的健康监测在国内起步较晚，监测系统和数据分析处理的理念都较大程度地源于桥梁结构的监测。初期主要集中在结构的动力监测和风致响应的短期监测。进入 21 世纪以来，我国在高层建筑结构监测领域得到快速发展和应用，陆续在众多高层和超高层建筑结构上实施应用了短期或长期健康监测技术。结合这些实践应用，我国学者对高层建筑和超高层建筑结构的监测理论和技术都进行了较为全面而深入的研究，取得一系列成果。而

于 2009 年由香港理工大学研发实施的广州电视塔长期健康监测系统，是超高层建筑长期结构健康监测技术大规模应用的开创性案例<sup>[18]</sup>。广州新电视塔具有结构超高、形体奇特、结构复杂的特点，在超高层建筑发展史上具有里程碑的意义。这个包括 700 多个各种类型传感器的长期健康监测系统，将施工监控与运营期间健康监测进行了无缝连接。该系统技术先进、特色鲜明，取得多项创新成果，技术水平高居国际领先地位。以此为依托的“大型结构诊断与预测系统：全寿命结构健康监测”获得第三十七届日内瓦国际发明展金奖及特别大奖（2009 年）。

## 1.2 健康监测系统的功能与目的

结构健康监测系统的基本功能和目的，可以归纳为如下几个方面：

1. 验证设计理论与方法，为改进设计规范和提供资料；
2. 为新技术、新材料的应用提供验证和评价资料；
3. 为掌握结构性能的演化规律，为结构可靠性、耐久性以及剩余寿命评估提供长期跟踪资料；
4. 及时获取荷载和结构响应的异常信息，尽早对结构的损伤或性能退化做出识别和预警，保证结构的安全运营；
5. 捕捉地震、台风、爆炸、火灾等偶发事件的发生过程，为结构的灾后评估提供技术支持；
6. 为结构的维修、加固、改建提供参考资料和技术支持。

在验证设计、积累资料、捕捉偶发事件等方面，监测系统可以得到相对直接的应用。通过实际运营状态的监测，可对比分析评价结构设计中采用的假设和设计参数是否准确，并对结构设计提出建议。一些将施工期监测与运营期监测相结合的监测系统，通过对结构“诞生”过程的跟踪监测，可以更好地掌握结构的基本特性和运行规律，建立结构的健康档案和评价基准。

健康监测的重要作用之一在于对一些偶然性灾害过程的捕捉，这是非在线的试验检测所不能实现的，为结构的灾后评价提供了不可复制的珍贵资料。广州新电视塔施工期间发生了汶川地震，正在实施的监测系统中部分传感器已开始工作，三个不同高度上的应变传感器明确记录了结构的地震响应。汶川地震发生于 14:28，应变记录显示地震波从汶川到达广州塔传递时间大约 7 分钟，由此计算的从汶川到广州地震波传播的平均速度约 3155m/s。图 1.3 为某斜拉桥健康监测系统的应变和倾斜传感器对大约 165km 外的 4.6 级地震的响应。发震时间 0:5:24，地震到达时间约为 0:6:15，地震波平均传播速度约 3235m/s。假如地震发生在距离被监测结构较近处，或者震级较大，那么，这些监测资料对结构的震后评价和维修决策就将发挥不可替代的作用。

在损伤识别、性能评价方面，属于健康监测的深层应用。结构和人类不同，通常它们没有统一的健康评价指标。对每个结构运营状态的全程监测有助于建立各自的健康指标和评价基准。基于此，通过实际运营环境下结构响应的监测结果的分析，结合结构损伤识别技术的应用，实现对结构在长期运营后或灾后可能处于的各种非健康状态的识别诊断。

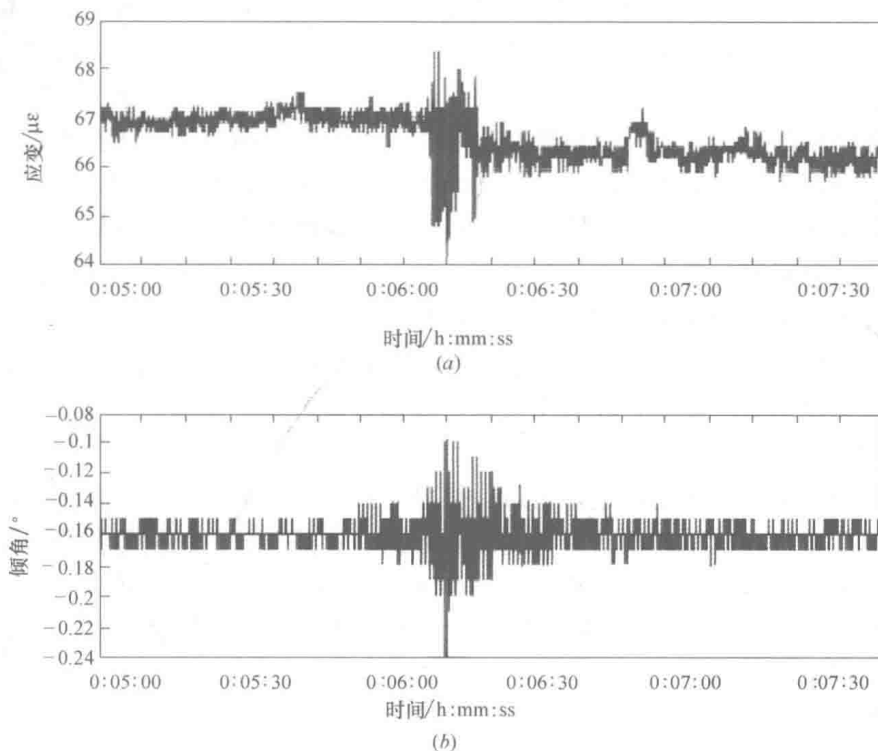


图 1.3 斜拉桥结构的地震响应  
(a) 箱梁跨中应变；(b) 箱梁端部倾斜

## 1.3 结构健康监测的内容

大跨度桥梁结构体系一般采用拱结构、斜拉体系、悬索结构等，因此在竖向和侧向荷载作用下，其内力与变形都很复杂。受力和变形也易于受温度与日照等环境因素的影响，特别在风与地震这样的随机动荷载作用下，结构响应常常会超出设计的预期。而且大跨度桥梁结构的服役年限长，对安全性和耐久性都有更高的要求。因此，为了保证结构在使用期间的安全，对其进行健康监测是十分必要的。

### 1. 环境荷载监测

#### (1) 风荷载

大跨度桥梁结构对风荷载较为敏感，风速矢量是重要的监测参数。对于桥塔部分一般监测水平风速，可采用二维风速仪。对于主梁部分一般应该采用三维风速仪监测三向风速，以便分析竖向风荷载对桥面结构的作用。基于对风速的长期监测，可获得桥址的平均风特性、强风的脉动特性和强风下桥梁结构的动态响应等。

#### (2) 温度荷载

大跨度桥梁结构对温度荷载的反应十分显著，温度在结构中还会形成明显的温度梯度，因此，在桥梁监测系统中温度监测测点数量常常是大量的。对主要结构部分都应该布置温度测点，通常包括桥塔不同高度截面、拉索、吊杆、主缆、主梁截面等，尤其是钢箱梁截面，在日照作用下顶底板温差十分显著，应该进行重点监测。通过温度监测，可获得



桥址的常年气温变化规律，可对桥梁结构的年温差、日照温差、骤然降温等温度作用特性和结构响应进行分析，对桥梁结构运营状态分析与评价具有重要的作用。

### (3) 腐蚀作用

大型桥梁结构的服役年限，一般要几十年甚至上百年，耐久性是十分重要的。混凝土劣化、钢结构锈蚀等直接影响着结构的使用寿命。钢筋腐蚀检测方法很多，电化学检测方法是目前最为常用的方法。电化学检测方法通过测量混凝土保护层不同深度的线性极化电阻、断路电压、电阻率、氯离子浓度和混凝土的温度等来推算腐蚀深度和腐蚀速率。通过耐久性监测技术，可以及时掌握材料的老化退化的程度和发展趋势，从而对结构的安全性和使用寿命做出评估。混凝土耐久性的演变是一个较为缓慢的过程，因此，对耐久性的监测一般并不要求动态实时监测，而采用人工定期读数就能满足要求。

## 2. 车辆荷载的监测

车辆荷载是桥梁结构主要的运营荷载，也是导致结构疲劳损伤的重要因素。车辆荷载的监测参数包括车速、车重、轴重、车间距等数据。这些参数的长期监测为车辆荷载的统计分析提供了丰富的数据样本，可获得有关车辆荷载的基本特征和属性，对于公路和桥梁的设计分析与运营管理将发挥着重要作用。车辆荷载的监测系统主要是动态称重系统WIM (Weight In Motion)。

## 3. 动态特性的监测

结构的动态特性是反映结构本身健康状态的重要指标。结构的损伤或老化，会不同程度地引起结构参数如结构质量、刚度和阻尼的变化，进而引起结构自振频率、振型等动力特性的改变。通过对结构动力特性的监测，应用结构参数和损伤识别技术，有助于对结构的健康状态做出定性和定量的评价。所以结构的动力特性监测是结构健康监测一项主要内容。结构加速度响应是常被用来分析和识别结构模态参数的基本数据。

## 4. 结构响应监测

### (1) 变形监测

许多桥梁结构在出现危险之前都常常发生较大的变形。变形监测目的是为了实时了解结构的变形情况与变形的性质，以掌握结构性态的变化，分析结构变形规律、变形速率与变化趋势，可以预警结构的隐患，以确保结构的变形在设计容许范围内。

沉降与倾斜监测一般属于静态变形监测，监测方法包括常规地面测量方法、近景摄影测量以及特定条件下采取一些特殊的测量方法。

对于沉降观测，从分析变形过程出发，变形速度值比变形绝对值具有更重要的意义。地基允许变形值包括沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜等。

倾斜观测主要是为了保证桥墩、桥塔轴线的位置所进行的竖向监测，即垂直度监测，它反映了施工质量、地基沉降和结构状态的综合因素。

对于大跨度桥梁结构，在温度、风、车辆等荷载作用下，主梁会发生较大的竖向和侧向位移，桥塔也会产生较大的水平位移。过大的位移容易引起结构损坏或失稳，从而影响结构的可靠性和安全性，因此对结构的位移监测与控制是桥梁结构健康监测的重要内容。

### (2) 应力/应变监测

大型桥梁结构常包含有桥塔、桥墩、主梁等重要的关键构件和一些结构重要节点和关键部位。这些构件、节点和部位的强度降低或损伤，容易引起结构局部或者整体的不稳定