

GAOSU TIELU QIAOLIANG ANQUAN
YUJING LILUN JIQI YINGYONG

高速铁路桥梁 安全预警理论及其应用

丁幼亮 王高新 岳青 吴来义◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

- 国家 973 计划青年科学家专题项目 (2015CB06000)
- 国家科技支撑计划项目 (2014BAG07B01)
- 国家自然科学基金项目 (51178100)

高速铁路桥梁安全预警 理论及其应用

丁幼亮 王高新 岳 青 吴来义 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

高速铁路桥梁安全预警理论及其应用 / 丁幼亮等著. —北京: 知识产权出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5130-3758-7

I. ①高… II. ①丁… III. ①高速铁路—铁路桥—桥梁结构—安全监测—研究 IV. ①U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 206474 号

内容提要

本书基于国家 973 计划和 863 计划等相关专题项目成果, 以京沪高铁南京大胜关长江大桥的温度场环境作用数据以及位移、应变、振动等结构响应数据为主要研究对象, 详细阐述了高速铁路桥梁安全性能监控与预警的相关理论与方法。全书主要包括高速铁路桥梁温度场监测与评估、高速铁路桥梁支座纵向位移监测与评估、高速铁路桥梁主梁静应变监测与评估、高速铁路桥梁钢桥面板动应变监测与评估、高速铁路桥梁结构振动监测与评估等。

本书可供从事桥梁工程专业的研究、设计和管理的科技人员参考, 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、航天等相关专业人员参考。

责任编辑: 祝元志

责任校对: 孙婷婷

封面设计: 刘伟

责任出版: 刘译文

高速铁路桥梁安全预警理论及其应用

丁幼亮 王高新 岳青 吴来义 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

社址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

责编电话: 010-82000860 转 8513

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印刷: 北京科信印刷有限公司

开本: 720mm×960mm 1/16

版次: 2015 年 9 月第 1 版

字数: 170 千字

网 址: <http://www.ipph.cn>

天猫旗舰店: <http://zscqbs.tmall.com>

责任编辑: 13381270293@163.com

发行传真: 010-82005070/82000893

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 13

印 次: 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

ISBN 978-7-5130-3758-7

出版版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

高速铁路桥梁结构在长期服役过程中受到自然环境、使用环境、动静力荷载以及材料内部因素的作用，不可避免地发生材料性能劣化、结构损伤累积，最终造成结构承载力下降、可靠性降低、使用寿命缩短。因此，建立高速铁路桥梁结构健康监测系统，实时识别结构受力状态及其安全性能的长期变化规律，全面掌握高速铁路桥梁的服役安全动态，是现代化高速铁路运输系统中不可缺少的重要技术保障。目前，国内外桥梁健康监测主要针对大跨公路桥梁，而针对高速铁路桥梁的健康监测研究尚处于起步阶段。高速铁路桥梁自身的结构特性以及高速行车的安全性与舒适性要求都给健康监测提出了更高的要求。本书紧密围绕高速铁路桥梁安全性能监控与预警这个主题，以京沪高铁南京大胜关长江大桥的温度场环境作用数据，以及位移、应变、振动等结构响应数据为主要对象，详细阐述了高速铁路桥梁安全性能监控与预警的相关理论与方法，对于揭示服役期内高速铁路桥梁的环境作用、结构响应及其累积损伤效应的变化规律，服务高速铁路桥梁的养护和运营管理，反馈和改进高速铁路桥梁结构设计方法等方面具有重要意义和实用价值。

本书包括以下内容。第1章为绪论。第2章采用极值分析方法和统计分析方法详细考察了大胜关长江大桥钢拱桁梁的温度和温差的空间分布特征及概率统计特征，在此基础上计算了温差标准值以及最不利温差模式。第3章通过大胜关长江大桥支座纵向位移与结构温度场的相关性分析，研究了支座使用性能退化时纵向位移的变化规律，并建立了支座使用性能退化预警和定位方法。第4章通过大胜关长江大桥主梁静应变与结构温度场的相关性分析，建立了主梁静应变与结构温度场之间的相关性数学模型，在此基础上建立了基于静应变监测的主梁承载能力退化监控方法和主梁极限承载能力评估方法。第5章通

过大胜关长江大桥动应变数据的长期监测和分析，建立了等效应力幅和应力循环次数的概率统计分布模型，在此基础上开展了考虑应力集中效应和环境腐蚀因素影响的钢桥面板疲劳寿命评估研究。第6章以大胜关大桥主梁和吊杆的振动监测数据为对象，开展了高速列车通过时大胜关大桥主梁和吊杆的振动加速度、振动位移和振动频率分析，在此基础上建立基于振动监测的主梁和吊杆振动性能退化监控方法。

本书的研究工作先后获得了国家重点基础研究发展计划（973计划）青年科学家专题项目（2015CB060000）、国家科技支撑计划项目（2014BAG07B01）和国家自然科学基金项目（51178100）等科研项目的资助，同时也得到了京沪高速铁路股份有限公司、上海铁路局南京桥工段等建设管理部门和有关合作单位的大力支持。宋永生讲师参加了本书第5章部分内容的撰写工作。对此，作者表示衷心感谢！

本书的出版获得了“江苏省高校优势学科建设工程资助项目”资助。

本书总结了作者关于高速铁路桥梁安全性能监控与预警研究的阶段性成果，其中的一些论点仅代表作者当前对这些问题的认识，有待进一步补充、完善、发展和提高。因而，对本书存在的不足乃至错误之处，敬请读者批评、指正。

目 录

前言

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研究与应用现状	5
1.3 高速铁路桥梁健康监测的研究与应用现状	12
1.4 本书的研究背景	16
1.5 本书的目的和主要内容	19
参考文献	20
第 2 章 高速铁路桥梁温度场监测与分析	24
2.1 高速铁路桥梁温度场监测概述	24
2.2 大胜关大桥温度场长期监测结果	27
2.3 大胜关大桥温差概率统计分析	33
2.4 大胜关大桥温差标准值及温差模式	41
2.5 本章小结	48
参考文献	49
第 3 章 高速铁路桥梁支座纵向位移监测与评估	51
3.1 高速铁路桥梁支座纵向位移监测概述	51
3.2 大胜关大桥支座纵向位移长期监测结果	52
3.3 支座纵向位移的数学模型建立方法	63
3.4 基于纵向位移监测的支座使用性能退化监控方法	68
3.5 本章小结	79
参考文献	80
第 4 章 高速铁路桥梁主梁静应变监测与评估	82
4.1 高速铁路桥梁主梁静应变监测概述	82
4.2 大胜关大桥主梁静应变长期监测结果与分析	85
4.3 大胜关大桥主梁静应变的数学建模方法	92
4.4 基于静应变监测的主梁承载能力退化监控方法	100
4.5 基于静应变监测的主梁极限承载能力评估方法	103

4.6 本章小结	111
参考文献	112
第 5 章 高速铁路桥梁钢桥面板动应变监测与评估	113
5.1 高速铁路桥梁钢桥面板的动应变监测概述	113
5.2 大胜关大桥钢桥面板动应变的长期监测结果分析	115
5.3 基于动应变监测的钢桥面板疲劳性能评估	132
5.4 本章小结	156
参考文献	157
第 6 章 高速铁路桥梁结构振动监测与评估	159
6.1 高速铁路桥梁结构振动监测概述	159
6.2 大胜关大桥主梁振动加速度监测与评估	162
6.3 大胜关大桥吊杆振动位移监测与评估	177
6.4 大胜关大桥主梁和吊杆振动频率监测与评估	184
6.5 本章小结	197
参考文献	198

第 1 章 绪 论

1.1 桥梁结构健康监测的意义

交通是一个国家的经济命脉，而公路和铁路则是使交通能够畅通无阻的重要载体，“经济要发展，交通必先行”已成为全社会的基本共识。自从 20 世纪 80 年代起，我国已持续进行了大规模的交通基础设施建设，完成了数万亿的投资。2013 年发布的《国家公路网规划（2013 年—2030 年）》提出未来我国公路里程总规模约 580 万千米，其中国家公路约 40 万千米，国家高速公路网总里程 11.8 万千米。截至 2013 年年底，我国已建成的公路总里程数已达到 434.6 万千米，其中高速公路 9.6 万千米，已经超越了美国的 9.2 万千米，居世界第一；铁路运营里程总数达到 10.3 万千米，其中高速铁路 1.0 万千米，居世界第一位。可以看到，我国公路和铁路的建设规模和运营里程已经名列世界前茅。随着国民经济到 2020 年再“翻两番”目标的实现，城镇人口必将大规模增加，交通客货运输量将会显著增长，可以预计我国交通基础设施的建设必将持续保持强劲增长的趋势。

作为公路和铁路大动脉连接的关键节点，桥梁更是取得了举世瞩目的成就。在过去 1/4 世纪里，我国完成了世界同一时期大跨桥梁建设总数的 30%~50%。截至 2013 年年底，我国公路桥梁已达 73.1 万

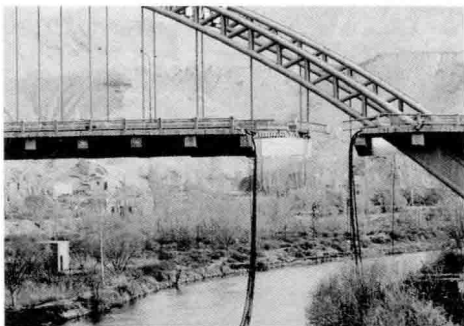
座，铁路桥梁已超过 6.5 万座，均为世界第一。我国公路桥梁的跨径分别在 1985 年突破 200m、1991 年突破 400m、1993 年突破 600m、1997 年突破 800m、1999 年突破 1000m、2009 年突破 1600m；我国铁路桥梁的跨径分别在 1997 年突破 200m、2003 年突破 300m、2008 年突破 500m。目前世界前十大悬索桥中，我国有 5 座；世界前十大斜拉桥中，我国有 6 座；世界前十大拱式桥中，我国有 7 座；世界前十大梁式桥中，我国有 5 座。因此，无论是从整体桥梁建设规模方面，还是从单体桥梁建设跨径方面，我国均已成为名副其实的桥梁大国。虽然我国桥梁工程实践已取得了辉煌的成就，但是桥梁设计、管理水平和安全评定方法等相关基础理论的研究与世界发达国家相比还存在一定的差距。跨越式发展也暴露出了诸多问题，如设计过于超前、施工技术及新材料运用不够成熟，重建设、轻基础理论研究，使一大批桥梁存在先天的结构性缺陷。可以说，总体数量众多、服役状况不容乐观，是我国目前大跨桥梁的主要特点。

图 1.1.1 列出了 2010 年以来中国典型桥梁倒塌事故。图 1.1.1 (a)宝成铁路德阳至广汉间石亭江铁路大桥被洪水冲断，一列从西安开往昆明的 K165 次火车第 15、16 车厢掉进石亭江；图 1.1.1 (b)的拱桥坍塌主要是由于主跨第二根吊杆断裂，经现场勘查吊杆断裂的主要原因是由于承重钢缆的环境腐蚀所造成的；图 1.1.1 (c)的拱桥坍塌的原因经初步查勘认定为车辆的长期超载导致吊杆的钢丝过早发生疲劳断裂（全桥 24 根吊杆断裂 14 根），从而导致全桥发生灾难性的垮塌；图 1.1.1 (d)中哈尔滨阳明滩大桥引桥发生坍塌主要原因也是过桥车辆的严重超载。资料显示，图中 4 座大桥除石亭江铁路大桥以外均建成于 20 世纪 90 年代以后，目前它们的使用时间均不超过 20 年，哈尔滨阳明滩大桥投入运营甚至不超过 2 年。

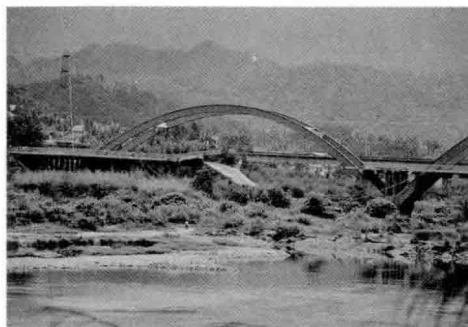
一方面，以上桥梁的灾难性事故不仅造成了重大的经济损失，常



(a) 2010年8月19日
宝成铁路石亭江铁路大桥垮塌



(b) 2011年4月12日
新疆库尔勒市孔雀河大桥垮塌



(c) 2011年7月14日
福建南平市武夷山公馆桥垮塌



(d) 2012年8月24日
哈尔滨阳明滩大桥引桥发生坍塌

图 1.1.1 2010 年至今中国典型桥梁垮塌事故

常也造成了严重的人员伤亡，造成了极为恶劣的社会影响。另一方面，从这些桥梁灾难性事故也可以认识到，经济水平的飞速发展对交通运输业提出了越来越高的要求，从而导致桥梁时常需要承受远大于其设计标准的荷载作用，在超负荷车辆荷载与环境腐蚀的共同作用下，桥梁构件的损伤速度可能要远远超过设计预期，从而导致桥梁使用时间远未到其设计基准期时就发生灾难性的破坏。因此，采取必要的手段和措施来保障大跨桥梁结构的安全性、完整性、适用性和耐久性，已迫在眉睫。

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,确保运营的安全和提高桥梁的管理水平^[1-3],桥梁健康监测的研究与监测系统的开发应运而生^[4,5]。桥梁结构健康监测系统最主要的功能是,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。桥梁结构设计常以很多假定条件为前提,因此,通过桥梁结构健康监测所获得的结构静动力行为来检验大桥的理论模型和计算假定具有重要的意义^[6-8]。桥梁健康监测信息反馈于结构设计的更深远的意义在于,结构设计方法与相应的规范标准等可能得以改进,并且对环境荷载的合理建模以及对桥梁在各种交通条件和自然环境下的真实行为的揭示是将来实现桥梁“虚拟设计”的基础。同时,桥梁结构的健康监测还可以并应该成为桥梁研究的“现场试验室”^[9,10]。桥梁健康监测为桥梁工程中的未知问题和超大跨度桥梁的研究提供了新的契机,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实验研究的补充,而且可以提供有关结构行为与环境规律的最真实的信息。

1.2 桥梁结构健康监测的研究与应用现状

根据 Housner 的定义^[24], 结构健康监测是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。一个完整的结构健康监测系统应由在线测试、实时分析、损伤诊断、状态评估以及维护决策五个部分组成。结构健康监测能够利用监测数据对工程结构的工作状态做出实时评估, 也能够在地震、台风等突发性灾害事件发生后对结构的整体性做出迅速的判断。因此, 结构健康监测系统可为工程结构的设计验证、施工控制、安全运营和维修决策提供有力的技术保障, 对评估工程结构的安全性、适用性和耐久性具有极其重要的意义^[11,12]。

早在 20 世纪 50 年代, 桥梁的健康运营与监测管理已经受到重视, 但限于当时的仪器设备和计算机技术水平, 一体化的智能桥梁健康监测系统并未成为现实; 随着科学技术水平的发展, 监测仪器及系统的逐渐成熟, 桥梁结构的大空间大跨度使得业内对桥梁健康监测的研究日趋火热。国外桥梁结构健康监测系统的实施应用可以追溯到 20 世纪 80 年代, 英国对北爱尔兰的总长 522m 的连续刚构 Foyle 桥安装了长期监测仪器和自动数据采集系统, 是最早的较为完整的健康监测系统, 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^[13]。美国在威斯康辛一座已有 65 年历史的提升式桥 Michigan Street 桥上, 安装了世界上第一套全桥远程监测系统, 用于监测将达

到设计寿命的该桥梁裂缝扩展情况,在佛罗里达州的 Sunshine Skyway 桥上安装了 500 多个传感器^[14]。瑞士在 Siggenthal 混凝土桥的建设过程中安装了健康监测系统,该系统由 58 个光纤应变传感器、2 个倾角仪和 8 个温度传感器组成,目的是监测施工过程中和以后长期的变形、屈曲和位移^[15]。丹麦在 20 世纪 90 年代曾对总长 1726m 的 Faroe 跨海斜拉桥进行施工阶段及通车首年的监测,旨在检查关键的设计参数,监测施工危险阶段以及获取开发监控维护系统所必需的监测数据,另外他们在主跨 1624m 的 Great Belt East 悬索桥上安装健康系统,并尝试把极端记录与正常记录分开处理,以期缩小数据存量^[16]。挪威在主跨 530m 的 Skarnsnde 斜拉桥上所安装的全自动数据采集系统能对风、加速度、倾斜度、应变、温度、位移进行自动监测^[17]。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。如日本在主跨 1991m 的明石海峡(Akashi-Kaikyo)大桥,墨西哥在总长 1543m 的 Tampico 斜拉桥,丹麦 1624m 的 Great Belt East 悬索桥等安装了健康监测系统,服务于大桥的养护和运营管理,验证桥梁设计时假定的有关参数值并反馈和改进桥梁桥梁结构设计。

我国桥梁结构健康监测系统研究与应用起步相对较晚,依托我国 20 世纪 90 年代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较广泛的应用。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 1.2.1 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。

表 1.2.1 国内外部分安装结构健康监测系统的桥梁

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+1280+343	美国
Ironton - Russell 桥	悬臂桥	117+241+117	美国
明石桥	悬索桥	960+1991+960	日本
南备赞瀬户桥	悬索桥	274+1100+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+1006+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
Saohae 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

续表

桥梁名称	结构类型	跨度/m	国家或地区
Portage Creek 桥	梁桥	45+50+30	加拿大
Great Belt 桥	悬索桥	535+1624+535	丹麦
Rama IX 桥	斜拉桥	166+450+166	泰国
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+1375+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	1018	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	1385	中国
润扬大桥南汉桥	悬索桥	1490	中国
润扬大桥北汉桥	斜拉桥	176+406+176	中国
苏通长江大桥	斜拉桥	主跨 1088	中国
虎门大桥	悬索桥	888	中国
南京长江大桥	钢桁桥	$3 \times (3 \times 160) + 128$	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
大佛寺长江大桥	斜拉桥	主跨 450	中国
重庆渝澳轻轨桥	连续钢构	主跨 160	中国
杭州湾跨海大桥	斜拉桥	70+160+448+160+70	中国
珠江黄埔大桥北汉桥	斜拉桥	主跨 383	中国
珠江黄埔大桥南汉桥	悬索桥	主跨 1108	中国
杭州之江大桥	斜拉桥	116+246+116	中国



(a) 香港汀九桥



(b) 润扬大桥南汊桥



(c) 润扬大桥北汊桥



(d) 苏通长江大桥



(e) 珠江黄埔大桥



(f) 杭州之江大桥

图 1.2.1 安装健康监测系统的大跨度桥梁

• 加拿大 Confederation 桥^[18]，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。此桥主跨 $45 \times 250\text{m}$ ，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。

- 中国香港汲水门 (Kap Shui Mun) 桥和汀九 (Ting Kau) 桥^[19—21]。其中, 汲水门桥为中跨 430m 的斜拉桥, 汀九桥为 3 塔单索面斜拉桥, 两个中跨分别为 448m 和 475m, 于 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。

- 中国上海徐浦大桥^[22], 1997 年建成。此桥中跨 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、中跨主梁的标高、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。整个监测系统共有各类传感器 74 个。

- 中国江苏润扬大桥^[23—26], 其中悬索桥为单跨双铰简支钢箱梁桥, 主跨 1490m, 为中国第一、世界第三; 斜拉桥 (176m+406m+176m) 为双塔双索面型钢箱梁桥, 2005 年建成通车。作为我国建桥史上规模空前的特大型桥梁, 对其建设和营运期间的健康监测、诊断以及各种灾害影响下的损伤预测和损伤评估具有重要的现实意义。该系统的监测项目包括缆索系统(包括斜拉索、主缆和吊杆)的振动响应、钢箱梁温度场及响应(包括应变、振动)、交通荷载状况、桥址风环境