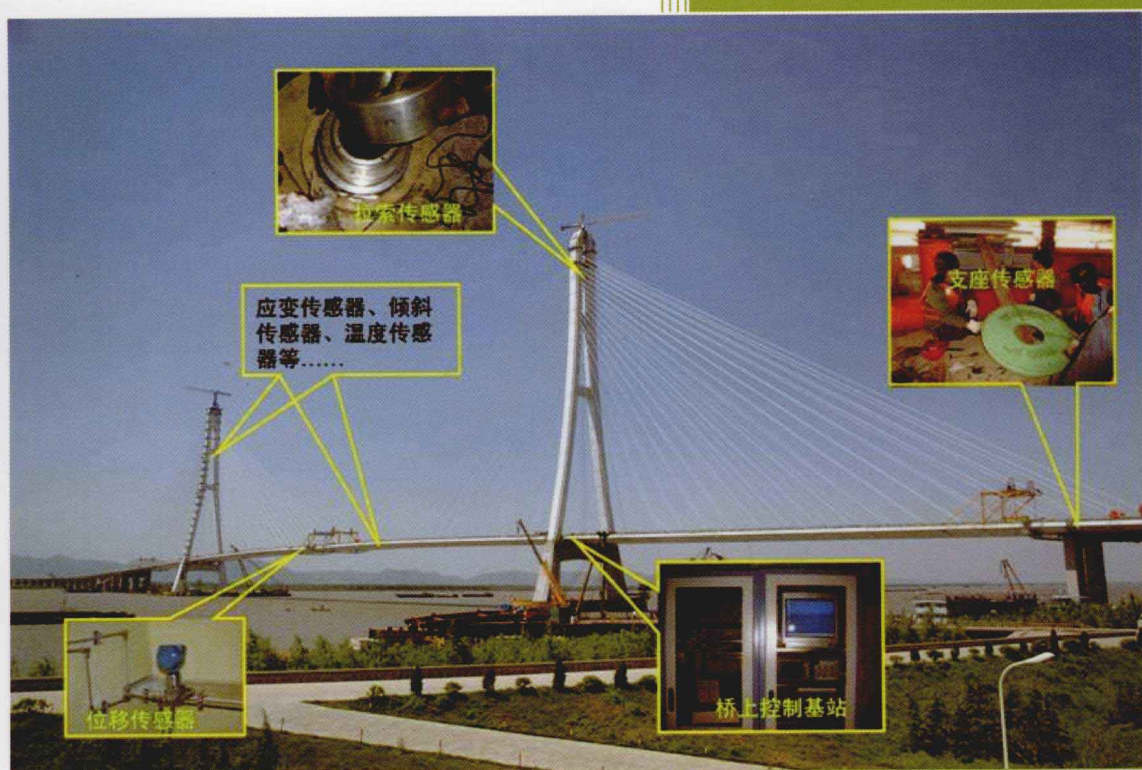


Smart Bridge Health
Monitoring and
Damage Diagnosis

智能桥梁健康监测 与损伤评估



单德山 李乔 著
付春雨 严鹏



人民交通出版社
China Communications Press

Smart Bridge Health Monitoring and Damage Diagnosis

智能桥梁健康监测与损伤评估

单德山 李 乔 著
付春雨 严 鹏

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统论述了西南交通大学智能化桥梁团队在桥梁结构智能化方面所取得的阶段性成果,内容包括:智能桥梁健康监测系统、结构损伤识别、状态评估及软件系统。

本书可供从事智能桥梁监测的设计、实施和研究人员参考,亦可作为高等院校桥梁工程专业研究生以及高年级本科生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能桥梁健康监测与损伤评估/单德山等著. —北京:
人民交通出版社,2010. 1

ISBN 978-7-114-08214-6

I. 智… II. 单… III. ①人工智能—应用—桥梁结构—
监测②人工智能—应用—桥梁结构—评估 IV. U443-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 011851 号

书 名:智能桥梁健康监测与损伤评估

著 者:单德山 李 乔 付春雨 严 鹏

责任编辑:曲 乐 王文华

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.cpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

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:北京密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16.

印 张:13.5

字 数:328 千

版 次:2010年1月 第1版

印 次:2010年1月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08214-6

定 价:28.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

随着社会生产力水平的不断发展,人类对结构物的要求也日益复杂化和多样化。现代大型结构物,如高层建筑、大跨桥梁、大型水坝、地下建筑等,都要求其能提供更高的强度,更好的可靠性、耐久性及安全性。另外,由于这类大型结构物对整个国民经济是至关重要的,现代社会还要求它们应具有更强的防灾能力。

桥梁作为客观存在的物质,有它特有的生命周期过程,它的“生老病死”如同人类一样,是客观自然规律。如果能在事故发生之前进行预测,对桥梁的损伤进行监测,从而对桥梁的健康状况给出评估,将会大大减少事故的发生几率,智能化桥梁结构的概念应运而生。

为了保障桥梁结构的安全性、完整性和耐久性,防患于未然,防微杜渐,需要对既有桥梁结构采用有效的手段来监测和评估其健康状态,即应用现代化的传感技术、测控技术、计算机技术、现代网络通信技术对桥梁的工作环境、结构状态、在各类外荷载因素作用下的响应进行实时监测,及时掌握桥梁结构的工作状态,全面了解其运营条件及退化状况,实时地评估桥梁结构的健康状况,为桥梁的运营管理、养护维修、可靠性评估以及科学研究提供依据,使得桥梁更好地为我国经济建设服务。

本书系统论述了西南交通大学智能化桥梁团队,在桥梁结构智能化方面所取得的阶段性成果,以期为相关研究和工程实践提供参考。全书共分6章。第1章绪论,系统介绍了智能桥梁结构健康监测的定义、组成、特点及其研究的最终目的,解释了目视巡检、荷载试验及智能桥梁结构健康监测系统间的相辅相成关系,给出了当今智能桥梁结构系统实例,并从项目支持的角度回顾并综述了智能桥梁结构的研究现状。第2章~第6章为西南交通大学智能化桥梁团队的相关工作和认识的总结。其中,第2章从监测系统硬件需求的角度,介绍了智能桥梁健康监测系统,包括传感器系统、现场总线、分布式数据采集系统、远程数据传输与控制系统,并给出了本团队完成的智能桥梁健康监测系统实例。第3章在分析了智能桥梁损伤识别难度的基础上,从有反演的优化识别方法和无反演的现代模式识别的角度,系统论述了本团队在智能桥梁结构损伤识别方面所进行的相关工作:从静力到动力、从频域到时域、从优化识别到统计模式识别,研究范围几乎涵盖了结构损伤识别的所有内容,且大部分研究成果已经通过试验室验证。本书认为统计模式识别方法是结构损伤识别的一种重要发展方向。根据桥梁管理的不同需求,第4章分别从路网层级和项目层级对桥梁进行评估。路网层级是针对管段内所有的桥梁,而项目层级则是针对某一具体的桥梁,应针对不同的需求选择不同的评估方法,最后针对桥梁评估的实际情况,给出了评估建议。第5章简述了当前桥梁管理系统的软件架构和编程方法,总结了常用软件架构和方法的思路和特点,分析了B/S架构和智能客户端架构的软件特点,分别建立了基于这两种架构的软件结构,综合运用现代软件编制思想及其强有力的编程工具,实现了智能化桥梁的软件系统。通过模型试验,验证了本软件系统的正确性和合理性及可行性。第6章为本书作者对未来研究的展望,描述智能桥梁未来需重点解决的问题。

感谢西南交通大学智能化桥梁团队所有成员,由于团队的共同努力,攻克了一个又一个难

题,完成了很多“不可能完成的任务”;作为团队中的成员,作者仅仅是将团队的工作和成绩总结成文而已。感谢所有参考文献的作者,是你们的努力让我们省去了很多“盲人摸象”的过程。虽然文中对许多文献均有所引用,但难免挂一漏万,未能一一列尽,请见谅!对有关著者的贡献,作者深表谢意!

历时10个月,本书稿方才得以完成。因作者水平有限,书中难免有疏漏和谬误之处,恳请读者批评斧正,你们的建议和帮助是作者提高和完善的源泉。

作者
2009年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 智能化桥梁结构	2
1.2 智能化桥梁结构健康监测	4
1.3 智能桥梁结构研究回顾	10
1.4 本书主要目的和内容	18
本章参考文献	19
2 智能桥梁健康监测系统	25
2.1 智能桥梁健康监测需求分析	25
2.2 监测系统概述	25
2.3 传感器系统	26
2.4 现场总线	30
2.5 分布式数据采集系统	32
2.6 远程数据传输与控制系统	37
2.7 智能桥梁健康监测系统实例	40
2.8 本章小结	48
本章参考文献	49
3 智能桥梁结构损伤识别	51
3.1 概述	51
3.2 损伤识别方法	52
3.3 静力损伤识别研究	72
3.4 频域损伤识别研究	78
3.5 时域损伤识别研究	101
3.6 分布式光纤裂缝识别	112
3.7 本章小结	122
本章参考文献	123
4 智能桥梁状态评估	126
4.1 桥梁评估概述	126
4.2 路网级评估	127
4.3 项目级桥梁状况评估	140

4.4	智能桥梁状态评定系统	157
4.5	桥梁评估流程与指南	157
4.6	本章小结	159
	本章参考文献.....	160
5	智能桥梁软件系统	162
5.1	桥梁管理系统	162
5.2	软件系统架构方法	163
5.3	基于 B/S 架构的数据控制系统.....	166
5.4	B/S 架构桥梁管理系统	171
5.5	智能客户端子系统	187
5.6	结论与展望	201
	本章参考文献.....	201
6	智能桥梁研究展望	203
6.1	存在的问题	203
6.2	研究展望	204
	本章参考文献.....	205

1 绪 论

随着社会生产力的不断发展,人类对结构物的要求也日益复杂化和多样化。现代大型结构物,如高层建筑、大跨桥梁、大型水坝、地下建筑等,都要求其能提供更高的强度,更好的可靠性、耐久性及安全性。另外,由于这类大型结构物对整个国民经济是至关重要的,现代社会还要求它们应具有更强的防灾能力。

传统结构大多通过提高材料的力学性能、采用合理的结构形式、加强施工管理以及定期评估与维护等传统手段来满足这些要求。然而,这些传统的手段均属于消极被动的方式:一旦将结构物建成并投入使用,便失去了对结构的全面控制,结构失效、结构灾害的发生便不以其设计者、建造者、使用者和管理者的意志为转移,对其行为的预测及防范工作都将是十分困难的。

考察众多结构物灾害实例,发现在整个结构设计寿命期内,结构物都有可能发生结构失效。其原因在于:

- (1)结构抗力的衰减、损伤积累等导致结构强度及可靠性降低;
- (2)材料老化、腐蚀及力学性能的劣化(如徐变等)等导致结构耐久性失效;
- (3)施工质量低劣或使用不当给结构带来隐患以及损害;
- (4)结构长期遭受动荷载作用而造成疲劳失效;
- (5)偶然超载(如地震荷载、爆炸冲击荷载等)造成的结构损伤。

以上这些原因都对结构强度及安全性提出了传统设计方法无法满足的要求。因而,对建筑结构进行实时监测,并由结构自身做出智能反应就显得十分必要了。

现代材料技术的发展使人类社会进入了信息时代,信息材料的生产已实现设计制造的一体化。各种具有信息采集及传输功能的材料及元器件正逐渐进入土木工程师的视野。人们开始尝试将传感器、作动器紧密地融合于结构中,同时将各种控制电路、逻辑电路、信号放大器、功率放大器以及现代计算机集成于结构大系统中。通过力、热、光、化学、电磁等激励和控制,使结构不仅有承受建筑荷载的能力,还具有自感知、自分析计算、自推理及自控制的能力。具体来说,结构将能进行参数(如应变、损伤、温度、力、声音、化学反应)的监测及监测数据的传输,具有一定的数据实时计算处理能力:包括人工智能诊断推理,以及初步改变结构应力分布、强度、刚度、形状位置等能力。简言之,即使结构具有自诊断、自学习、自适应、自修复的能力。这就是智能土木结构概念的形成过程。

智能土木结构概念是为解决评估结构强度、完整性、安全性及耐久性问题而提出的。对土木建筑结构的性能进行监测及预报,不仅会大大减少维修费用,而且能增强预测的能力。在结构内部埋入传感器,组成阵列传感网络,即可实时监测结构的性能,这即为智能土木结构自内而外的预报方式。智能土木结构在这些方面有很好的应用前景,目前主要应用于高层建筑、桥梁、大坝等工程领域。

根据智能材料和智能结构的定义,结合桥梁结构的实际状况,将智能桥梁结构^[1]定义为:将智能材料嵌入桥梁结构中,能使桥梁结构感知和处理信息,并执行处理结果,使桥梁结构具

有自监测、自诊断、自适应和自修复等仿生功能,确保桥梁结构在外部环境和车辆荷载的作用下安全可靠。即智能桥梁结构是以桥梁结构为平台,通过结构监测、环境监测、交通监控、设备监控、综合报警、信息网络及数据分析处理诸系统以及它们之间的最优化组合,向管理者提供一套对桥梁结构长期实时使用状态综合监控的信息,以期提高大桥的整体管理技术水平,确保桥梁安全运营,诊断桥梁病害并延长桥梁使用寿命^[2]。

1.1 智能化桥梁结构

1.1.1 智能化桥梁结构的定义

桥梁作为客观存在的物质,有它特有的生命周期过程,它的“生老病死”如同人类一样,是客观的自然规律。如果能在灾难来临之前进行预测,对桥梁的损伤进行监测,从而对桥梁的健康状况给出评估,那将会大大减少事故发生的几率,智能化桥梁结构的概念应运而生。

目前,学术界比较统一的关于“智能化桥梁结构”的概念及其定义为:桥梁结构中因存在部分智能材料子结构或智能材料,而具有自监测、自诊断、自适应或自修复等仿生功能,从而能极大地满足人们对其安全性及维护方便性等要求,这种桥梁结构就称为智能桥梁结构。即使得桥梁结构具有某种程度的“智能”,能够随时掌握桥梁结构的内力状态及损伤等“健康”情况,在桥梁结构危险萌芽阶段发出预警,从而保障桥梁安全运营,显著降低桥梁总体运营成本。

1.1.2 智能化桥梁结构的组成

传统的土木结构是一种被动结构,一旦设计、施工完成后,其性能及使用状态将很大程度地存在着不可预知性和不可控制性,这给结构使用和维护带来不便。为了解决这一问题,发展了在线监测结构,它赋予传统土木结构在线监测功能,从而为掌握结构内部性能打下了基础,使人们可以方便地了解结构内部物理、力学场的演变情况,这即为结构智能化的第一层次。在此基础上,进一步增加了监测数据的智能处理机制,使得结构具有自感知、自诊断、自推理的能力,从而使结构实现了第二层次的智能化。进一步在结构中引入自适应及自动控制机制,即根据自诊断、自推理的能力,由在结构中耦合的作动系统作出必要的反应,从而实现智能控制结构,这就是第三层次的智能化。如,对结构开裂、变形行为,对钢筋锈蚀、结构老化和损伤行为,对结构动力行为,做出抑制性控制,在更高层次上对结构起到保护和维修作用。

从系统工程的观点来看,要想对桥梁结构作出正确的健康状态评估,首先要确定监测目标,可以通过分析结构所面临的危险、各项危险发生的概率以及危险所导致后果的严重程度(危险性分析或易损性分析),针对不同的危险采用不同的监测策略和手段,在降低系统造价的同时达到预期监测效果。确定了监测目标后,根据健康监测系统的功能需求进行总体设计。总体设计完成后,就形成智能化桥梁结构的总体框架结构,如图 1.1 所示。

由图 1.1 可以看出,一个完整的智能化桥梁结构至少应该包括三个部分:监测子系统、诊断子系统、评估子系统。其中监测子系统由传感器、数据采集与传输、数据处理与控制等模块组成,完成对桥梁结构状态参数(如应变、结构温度场、索力、变形、支座反力等)以及环境参数(如温度、湿度、气象条件等)的采集、调理、预处理、传输等工作,并向后续子系统提供有效的监测数据。随着现代科技的发展,监测子系统已经具有自动采集、实时监测等智能化功能。诊断子系统由数值模型、系统识别和模型修正、结构状态与损伤识别等模块组成,它根据监测数据

对结构状态进行识别,应用损伤诊断理论,得到结构损伤信息。评估子系统包括可靠度分析、状态评估、养护管理对策等模块,对桥梁结构损伤诊断结果进行评估与评价,从而获得桥梁结构健康状态水平,对危险状态进行预警,并提出解决方案。

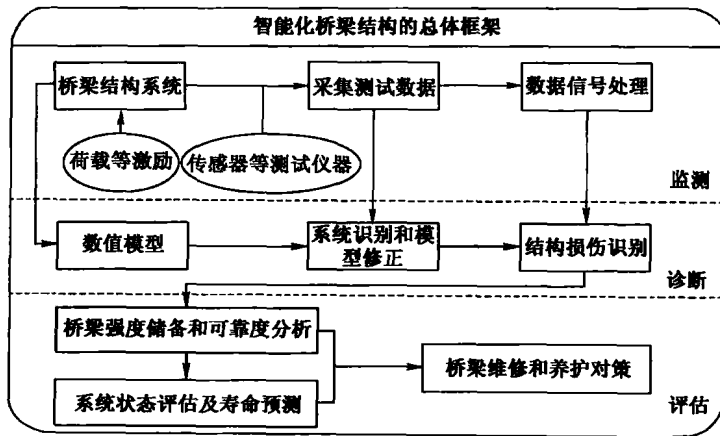


图 1.1 智能化桥梁结构的总体框架图

1.1.3 智能化桥梁结构的特点

智能化桥梁结构不仅仅是数据的自动采集,也不与目前桥梁常用的判定桥梁运营及安全状态的人工巡检、荷载试验等方法相冲突,而是与之有机地结合,相互补充。表 1.1 列出了目前桥梁常用的评估结构状态的主要方法与步骤,同时表 1.1 中还给出了各自的优点和缺点。

桥梁常用的评估结构状态方法

表 1.1

工作内容	当前方法与步骤	期望的结果	优点	缺点
评估桥梁运营状态	1. 人工巡检	桥梁状态的大致估计	可重复,费用低	离结构较远(有些关键部位不能到达);干扰交通;主观评估
桥梁结构行为随时间的退化	2. 现场荷载试验	桥梁状态更为准确地估计	无损、可重复	干扰交通
	3. 试验室芯样试验		结构性能退化的精确评价	干扰交通;破坏结构;试件数量限制了数据量
	4. 描述退化的数值模型		结构/力学行为信息	试验样本数不可能多,即无法准确地描述结构退化行为
预算限制	5. 养护选项 6. 维修单价 7. 数值模拟	选择维修的正确类型、实践及资金的分配		计算的可靠性受前续工作内在不确定性影响;不恰当的养护维修方案可能导致成本增加

智能化桥梁结构,在结构安全或功能的临界区域及损伤可能发生的部位,安装传感器,量测结构关键参数,经常(或连续)地对结构进行监测与控制,获得足够多的评判结构功能的样本数,可更为准确地描述结构工作状态,确保结构运营状态安全可靠,为设计、养护等规范的制订与修改提供理论基础,同时指导实际桥梁的建设,提高桥梁的安全性、耐久性和舒适性,使得桥梁更好地为我国经济建设服务。

一个理想的智能化桥梁结构系统,应能协助桥梁运营管理部门进行决策,并回答图 1.2 中的所有问题,并确保未来结构管理中采用优化方案,如合理安排巡检、养护和维修。由图 1.2

可知,智能化桥梁结构并不排斥既有桥梁常用的结构状态评估方法,而是有机的结合,弥补它们的不足。此外,智能化桥梁结构具有如下优势:

- (1)可以按桥梁技术与管理部门的需要进行足够次数的采样,确保准确地评估桥梁结构的运营状态;
- (2)根据测试结果,对桥梁结构的损伤进行定位,并结合无损探伤技术确定损伤程度,从而对结构可能出现的损伤进行预防;
- (3)确定维修养护策略的基础;
- (4)经常性地反馈维修效果;
- (5)评价未来所需的巡检或额外的现场荷载试验或试验室试验;
- (6)降低专门巡检或荷载试验所需的总体费用,减少干扰交通的限制。

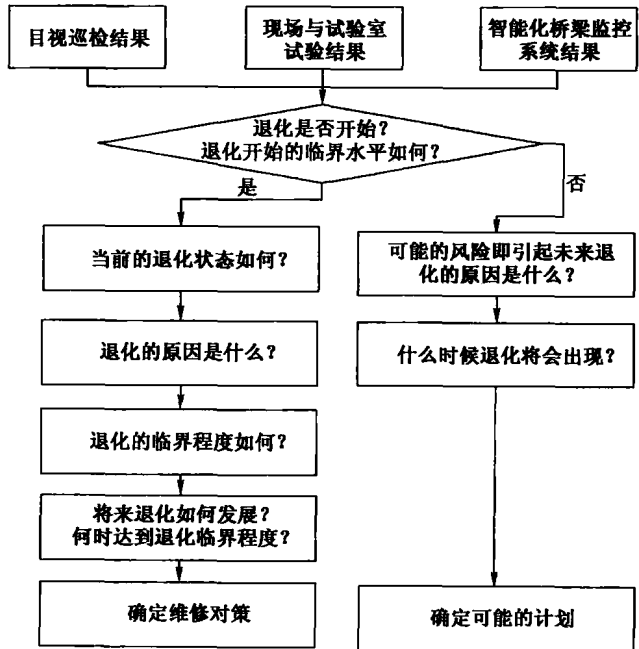


图 1.2 智能桥梁决策流程

1.1.4 研究的最终目的

为了保障桥梁结构的安全性、完整性和耐久性,防患于未然,防微杜渐,需对既有桥梁结构采用有效的手段来监测和评估其健康状态,即应用现代化的传感技术、测控技术、计算机技术、现代网络通信技术对桥梁的工作环境、结构状态、在各类外荷载因素作用下的响应进行实时监测,及时掌握桥梁结构的工作状态,全面了解其运营条件及老化状况,实时地评估结构的健康状况,为桥梁的运营管理、养护维修、可靠性评估以及科学研究提供依据,使得桥梁更好地为我国经济建设服务。

1.2 智能化桥梁结构健康监测

作为一个新的领域,近年来土木工程结构的监测获得了极大的关注。监测的主要目的是准确有效地检测结构长期行为或极端事件(如地震,爆炸等)引起的损伤,确保桥梁结构的使用

及安全。监测应能够及时发现任何可能引起桥梁退化的条件和行为,并采取恰当的处理措施,裁定结构是否安全或可能失效。在施工过程中,监测系统能够验证设计和施工过程的假设;在桥梁建设和修复中,监测还可对所使用的新材料和技术进行性能评价。随着传感、通信等技术的发展,桥梁结构远程监控已经成为现实。

1.2.1 智能桥梁示例或试验平台

为研究智能结构所具有的专门属性,在综合结构健康监测技术信息的前提下,2003年威斯康星州运输部 WDOT 与联邦公路管理局 FHWA 在项目 0092-04-14 中资助了威斯康星州公路研究计划。该计划由 Iowa State University 交通研究和教育中心桥梁工程中心承担,经过全面的信息收集和研究,对所确定的结构健康监测技术(包括目前正在使用的和即将出现的)进行了认真的回顾和总结^[3-4]。

为提高桥梁巡检和维修技术,并更好地理解桥梁行为,作为联邦公路管理局提高目前桥梁监测技术计划的一部分,Delaware 州立大学与 Delaware 运输部,于 2003 年联合开发了 Delaware 州第一座智能桥梁^[5](图 1.3),在桥梁上安装了不同类型的主流传感器,采用了创新的传感技术。研究指出:高度仪表化的智能桥梁可为未来的、具体的智能桥梁提供一种模式,并希望该桥能作为未来美国智能桥梁的模板;工程师们可以使用 Delaware 州在智能桥梁上的研究,以确定哪些传感器和数据采集系统是最合适的。

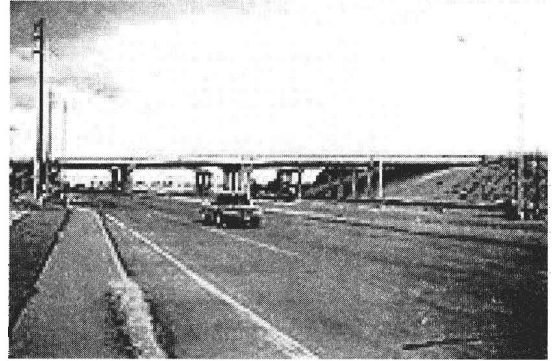


图 1.3 Delaware 州第一座智能桥梁 Las Cruces I-10 桥

2006 年,John T. De Wolf 等人^[6]讨论了在美国 Connecticut 州桥梁网络中,监测系统的计划、设计和安装问题。在当前的监测技术水平下,为解决不同桥梁长期监测系统的设计问题,研发了一套通用指南。采用应变、温度、倾斜和振动传感器,针对每一座桥使用该指南进行各自的监测系统设计。以正常交通为激励,进行连续检测。给出了四座桥梁运营监测的设计情况。其研究的目的是:使用长期监测数据了解桥梁长期行为,并从监测系统获得的数据建立长期结构健康监测的基础。

2006 年,在 Florida 州 Hillsboro 县 Gibsonton 跨越 Bullfrog Creek 的 East Bay 桥上建立了佛罗里达州的第一座智能桥梁结构^[7](图 1.4 所示)。在该桥施工过程中,将光纤 Fabry-Perot 智能传感器贴在混凝土面上和绑在桥面钢筋上。采用 SU-4 载货汽车对桥梁进行了静动力试

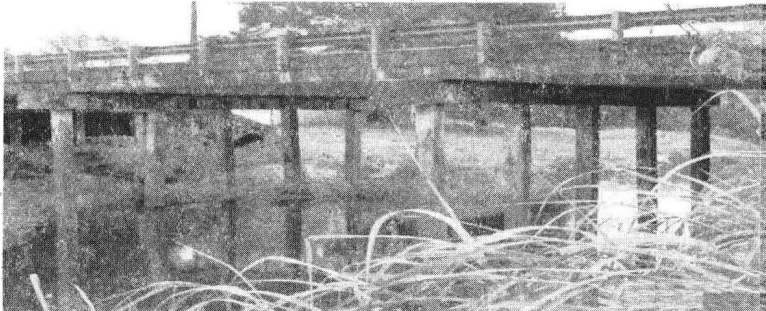


图 1.4 East Bay 桥

验。建立了桥梁三维有限元分析模型,并将其计算结果与试验结果相比较。该研究验证了重车作用下,传感器能准确估计桥梁行为,并将传感器连接到位于现场的永久数据采集系统。通过 DSL 线,该采集系统实现了远程通信。这使得评估桥梁在活载作用下的行为成为现实。目前,活载作用下的结构数据正连续不断地传输到县维修办公室。

作为 Structural Powell Laboratory 研究中的一个组成部分,2006 年,加州大学 San Diego 分校(UCSD)结构工程系在跨越 USCD 校园的 Voigt Drive/I-5 桥(图 1.5)上,建立了智能桥梁试验平台^[8]。该试验平台为传感器网络及其相关的决策支持技术提供了一个协作环境,平台上部署了一个现成的价值 5 万美元的模块化、可扩展的连续监测系统。该系统可支持超过 250 个通道的传感器和 3 个摄像头。特别令人感兴趣的是,系统能将图像和传感器采集到的数据集成到一台计算机上,从而在传感器和照相机间实现了硬件同步。目前,该系统正连续记录时间同步视频和加速度测试数据。通过高速无线网络,所有的系统均在线运行,实现了实时控制和数据传输。该试验平台向全球的合作者提供了验证新的传感器技术、数据采集/传输算法、数据挖掘策略以及最重要的决策支持平台。



图 1.5 Voigt Drive/I-5 桥

Minneapolis 的 I-35 大桥坍塌一年半后,2008 年,美国 Michigan 大学开始了一个旨在建立最终基础设施监测系统的五年计划项目^[9],研发用于发展“智能桥梁”的各种传感系统。如图 1.6 所示,其所构想的监测系统由几种不同类型的表贴式和埋入式传感器对裂缝、腐蚀及其他微弱信号进行监测,并可量测重型载货汽车对桥梁的影响。项目资金 1 900 万美元,由国家

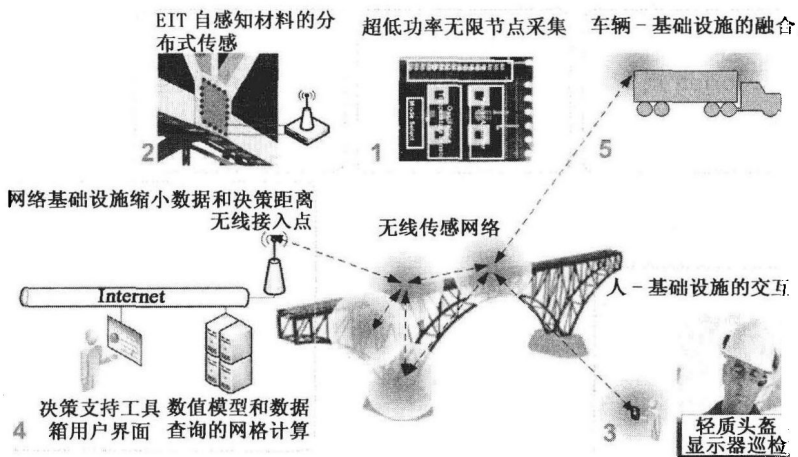


图 1.6 Michigan 大学研发的监测系统组成

标准技术研究所(NIST)的技术创新计划(TIP)提供近 900 万美元资金,其余的资金由项目参加单位和 Michigan 州运输部 MDOT 共同承担。这个新的五年计划,还包括在几个试点桥梁上安装先进的监测系统。系统包括电动导电混凝土、用以监测异常振动的无线节点、纳米碳管为基础的裂缝监测和腐蚀状况“感应皮肤”以及测量车辆进入桥梁的传感器。

在 2007 年 8 月 1 日倒塌的 Minneapolis I-35 桁架桥的原址上,新建的跨越 Mississippi 河的新 I-35W 桥——Saint Anthony Falls 桥,为双幅 4 跨预应力智能混凝土箱形梁桥(图 1.7),为 10 车道州际桥梁^[10],于 2008 年 9 月 18 日建成通车。该桥被认为是采用了最先进技术的“智能桥梁”。为了从施工过程开始监控桥梁行为,在结构混凝土中嵌入了 323 个传感器。施工过程中,为确保对混凝土进行高品质养生,智能桥梁系统对混凝土温度进行了监测。在整个桥梁使用寿命范围内,结合改进的桥梁巡检方法,由传感器所收集的结构信息,将在结构性能数据、保持高效安全的交通流等方面协助 Minnesota 运输部 MnDOT 进行运营管理,并提供基础设施的安全性评价。温度、湿度和风速测量也会触发该桥的自动除冰系统。传感器收集到的信息将由 Minnesota 运输部、联邦公路管理局 FHWA 和美国 Minnesota 大学土木工程系共同管理。该系统收集的数据将为桥梁交通模式、基础设施维修和安全以及未来可持续性桥梁设计提供极具价值的反馈信息。



图 1.7 Saint Anthony Falls 桥

1.2.2 健康监测系统

20 世纪桥梁工程领域的成就不仅体现在预应力技术的发展和超大跨度缆索支承桥梁的建造以及对超大跨度桥梁的探索方面,而且反映了人们对桥梁结构实施智能控制和智能监测的设想与努力。近 20 年来桥梁抗风、抗震领域的研究成果以及新材料新工艺的开发推动了大跨度桥梁的发展;同时,随着人们对大型重要桥梁安全性、耐久性与正常使用功能的日渐关注,桥梁健康监测的研究与监测系统的开发应运而生。为此许多国家都在一些已建和在建的大跨度桥梁上安装了用以确定桥梁结构工作状态的健康监测系统。表 1.2 给出了国外部分桥梁健康监测系统,表 1.3 示出了部分国内桥梁健康监测系统的情况。

国外部分桥梁健康监测系统

表 1.2

编号	桥名	结构形式	最大跨度 (m)	传感器数量	安装时间	桥址
1	Westend 桥	8 跨预应力混凝土连续梁桥	36.3	36	1994 年 1 月	德国,柏林
2	Versoix 桥	6 跨连续梁桥	56	120	1996 年 1 月	瑞士,韦尔苏瓦
3	Tuas 第二连接桥	双薄壁墩连续刚构桥	92	75	1997 年 3 月	新加坡,新加坡
4	Comodore Barry 桥	3 跨钢桁架桥	501	251	1998 年 1 月	美国,切斯特

续上表

编号	桥名	结构形式	最大跨度 (m)	传感器 数量	安装时间	桥址
5	Europa-Brücke 桥	6 跨连续梁桥	198	24	1998 年 5 月	奥地利, Innsbruck
6	Huntingdon 铁路桥	6 跨连续梁桥	64.3	36	1998 年 7 月	英国, Huntingdon
7	Z24 桥	3 跨预应力混凝土连续梁桥	30	20	1998 年 9 月	瑞士, Koppingen
8	St. Marx 桥	混凝土桥	29.3	5	1998.11	奥地利, 维也纳
9	ESK551 桥	连续梁桥	66.4	21	1999.1	德国, Bad Bevensen
10	Warth 桥	连续梁桥	67	16	1999.4	奥地利, 维也纳
11	Skovdiget 桥	连续梁桥	20.2	110	2000.1	丹麦, Copenhagen
12	Saint-Jean 桥	连续梁桥	77	26	2000.6	法国, 波尔多
13	Oeresund 桥	双塔斜拉桥	490	55	2000.7	丹麦—瑞典, Oeresund
14	Pioneer 桥	简支梁桥	18	24	2000.10	新加坡, 新加坡
15	Herrenbrücke Bridge Lübeck	简支梁桥	19.4	34	2000.10	德国, Braunschweig
16	Zittau 高架桥	铁路拱桥	23	12	2000.11	德国, 柏林
17	Källösund 桥	连续刚构桥	107	72	2000.12	瑞典, 哥德堡
18	Talübergang Haag 桥	简支梁桥	40	46	2001.4	奥地利, Haag
19	RAMA IX 桥	斜拉桥	450	27	2001.6	泰国, 曼谷
20	Melk bridge M6 桥	连续梁桥	79	40	2001.7	梅尔克, 奥地利
21	Putlitz	连续钢箱梁桥	34.7	21	2001.9	德国, 柏林
22	I40 桥	连续梁桥	49.7	26	2001.9	美国, 新墨西哥州
23	Roberval 桥	简支梁桥	33	33	2001.9	法国, Senlis
24	莱特火车站	连续梁桥	29	128	2002.5	德国, 柏林
25	BE109/21 桥	简支梁桥	31.1	21	2002.8	瑞士, Bützberg
26	PORR 桥	简支梁桥	44	36	2002.10	奥地利, 维也纳
27	NewArsta 桥	连续梁桥	78	86	2003.1	瑞典, 斯德哥尔摩
28	BW91 公路桥	简支梁桥	56.26	15	2003.1	德国, Braunschweig
29	Pasir Panjang Semi 高速公路	连续梁桥	38	66	2003.1	新加坡, 新加坡
30	Bolshoj Moskvoretsky 桥	拱桥	92	22	2003.6	前苏联, 莫斯科
31	New Svinesund 桥	拱桥	247	68	2003.6	瑞典—挪威, Svinesund
32	Titulcia 钢桥	钢桁梁桥	147.45	16	2003.7	西班牙, 马德里
33	Szechenyi 桥	连续梁桥	90	8	2003.10	匈牙利, 杰尔
34	Heugasse 铁路桥	简支梁桥	8	5	2003.10	奥地利, 维也纳
35	明石海峡桥	悬索桥	1990	35	1998	日本, 神户
36	南备赞濑户桥	悬索桥	1100	37	—	日本, 本州
37	柜石岛桥	斜拉桥	700	33	—	日本, 本州
38	HAM42-0992	连续梁	24	37	—	美国

续上表

编号	桥名	结构形式	最大跨度(m)	传感器数量	安装时间	桥址
39	Skarnsundet 斜拉桥	斜拉桥	530	37	—	挪威,北特伦德拉格
40	Sunshine Skyway 桥	斜拉桥	365.7	—	—	美国,坦帕湾
41	Great Belt East 桥	悬索桥	1 624	1 000	—	丹麦
42	Flintshire	独塔斜拉桥	194	—	—	英国,威尔士
43	Foyle 桥	连续钢箱梁桥	234	—	—	英国,北爱尔兰
44	Confederation 桥	—	190	—	—	加拿大,新伯伦瑞克省

国内部分桥梁健康监测系统

表 1.3

编号	桥名	结构形式	最大跨度(m)	传感器数量	安装时间	桥址
1	汀九大桥	三塔斜拉桥	475	236	1998.1	香港
2	青马大桥	悬索桥	1377	1000	2003.1	香港
3	台中桥	单塔斜拉桥	89.5	15	2003.11	台湾
4	湛江海湾大桥	双塔斜拉桥	480	59	2006.6	湛江
5	荷麻溪特大桥	部分斜拉桥	230	189	2007.5	广东
6	珠江黄埔大桥北汉桥	单塔斜拉桥	383	113	2008.10	广州
7	珠江黄埔大桥南汉桥	悬索桥	1 108	120	2008.10	广州
8	东海大桥	主航道为斜拉桥	420	561	2005.12	上海
9	茅草街大桥	钢管混凝土拱桥	368	249	2006.12	南县
10	润扬大桥斜拉桥	双塔双索面斜拉桥	406	141	2005.4	镇江、扬州
11	润扬大桥悬索桥	单孔双铰悬索桥	1 490	183	2005.4	镇江、扬州
12	苏通长江大桥	双塔双索面斜拉桥	1 088	788	2007.6	苏州、南通
13	大佛寺长江大桥	双塔双索面斜拉桥	450	124	2001.12	重庆
14	南京长江三桥	双塔钢箱梁斜拉桥	648	1 191	2005.8	南京
15	泸州泰安长江大桥	单塔混凝土斜拉桥	270	169	2008.9	泸州
16	江阴长江大桥	悬索桥	1 385	127	2005.9	江阴
17	南京长江大桥	公铁两用钢桁梁桥	160	39	2001.10	南京
18	郑州黄河大桥	上承式钢板梁桥	40	111	2004.12	郑州
19	重庆渝澳轻轨桥	连续刚构	160	119	2006.12	重庆
20	芜湖长江大桥	钢桁梁斜拉桥	312	219	2005.3	芜湖
21	汲水门大桥	双塔双索面斜拉桥	430	270	1998	香港
22	徐浦大桥	双塔双索面斜拉桥	590	76	1998	上海
23	昂船洲大桥	双塔双索面斜拉桥	1 018	—	—	香港
24	济南黄河大桥	双塔双索面斜拉桥	220	65	2006.12	济南

结合上述实际桥梁上安装的健康监测系统,各国学者对智能化桥梁健康监测进行了深入的研究,研究涉及智能桥梁各个子系统^[11-14],包括智能传感器子系统、数据采集与处理及传输子系统、损伤识别与模型修正和安全评定子系统、数据管理子系统。由表 1.2 和表 1.3 可知,

目前针对智能桥梁结构的研究大多数集中在监控系统的建立上,即对智能传感器、数据采集与处理及传输研究较多,且促进了传感器、数据采集及传输技术方面的发展,而在损伤识别与模型修正和安全评定方面的研究可谓是百花齐放、百家争鸣,各国学者做了大量的研究工作,见文献[15-20]。

1.3 智能桥梁结构研究回顾

从 20 世纪 90 年代开始,智能结构的研究已近 20 年。大量学者致力于新技术研究,研究内容涵盖了传感、测试仪器、损伤识别和损伤定位方法等方面。大多数研究项目都与结构控制和智能材料相关。无论是在航空还是在土木工程领域,均进行了实际工程应用及其他领域的有效性研究。

由于该类研究具有跨学科性质,在应用方面涉及许多非常基本的与结构有关的问题,因而该类项目的研究由包含多个技术领域的学科小组组成。在这样的合作研究过程中,学术研究人员、咨询人员、系统供应公司和最终用户在一起协同工作,创新地提出解决方法,并应用于实际工程中。

在欧洲,与智能化结构相关的研究不仅是国家级的合作研究,而且是通过欧共体研究计划框架,包括欧盟国家间的合作研究。而在美国和亚洲,主要是在高校间以及高校与企业间进行的健康监测相关研究。

1.3.1 欧盟合作研究计划

欧洲大部分健康监测方面的研究合作均是国家级的。但是,欧盟研究的一个重要特点是:通过跨国研究项目,在特定领域内组织欧洲级的研究。欧盟合作项目有两种:EC 框架研究计划项目和 EUREKA 计划。

1) EC 框架研究计划

该计划(FWP)为 4 年一期的科技计划,欧盟框架计划分为几个部分,大多数与健康监测有关的研究工作属于该计划的工业技术部门,4 期计划称为“Brite/Euram 计划”,5 期计划称为“有竞争力的、可持续发展的 GROWTH 计划”。表 1.4 和表 1.5 列出了 Brite/Euram 计划关于健康监测的主要研究项目^[21-22]。

EU-Brite/Euram 项目(传感器与控制)

表 1.4

项目名称	项目缩写	主持单位	起止时间(年)	应用领域	主要研究成果
结构监测的光纤传感系统	OSMOS	Bertin	1992~1995	航空航天、 土木	准分布式极化传感系统;微波 遥感系统;冲击传感器
损伤分析和振动控制的磁性伸缩作动器	MADAVIC	Napoli 大学	1996~1998	航空航天	基于振动损伤诊断和主动控 制用的磁性伸缩作动器
高温下光纤应变监测	FOSMET	BICC 公司	1996~1999	电厂	单链光纤传感器多点测量;工 程应用及其鲁棒性研究
在线监测集成技术的运营可靠性	MONITOR	BAE 公司	1996~1999	航天金属和 复合材料	在飞行试验平台上,对多传感 器技术、光纤、声发射进行评价 及集成