

大型桥梁 健康监测系统 及损伤识别理论

郭 健 著

Major Bridge
Health Monitoring System and
Damage Identification Theory



人民交通出版社
China Communications Press

大型桥梁健康监测系统及损伤识别理论

郭 健 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书根据 21 世纪大型跨海越江桥梁发展的趋势,首先系统分析了在大型桥梁中进行健康监测和结构损伤识别的重要性和发展历程,并以跨海大桥工程为背景,介绍了大型桥梁健康监测系统的研发和构建。本书针对大型桥梁结构健康监测系统的实时性和复杂性特点,从多尺度理论和模式识别的思想出发,提出了多尺度损伤信息分析和多传感器信息融合的损伤识别方法,并结合数值模拟和模型实验对基于小波分析的结构损伤识别的四个步骤,即损伤预警→损伤确认→损伤定位→损伤定量,进行了系统完整的研究。

本书可供从事桥梁和结构工程领域的科学研究、设计及咨询、检测及实验、监测及养护管理的专业人员参考,并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。

图书在版编目(CIP)数据

大型桥梁健康监测系统及损伤识别理论/郭健著.

—北京:人民交通出版社,2013.11

ISBN 978-7-114-10952-2

I. ①大… II. ①郭… III. ①桥梁结构—安全监测—研究 ②桥梁结构—损伤(力学)—识别—研究 IV. ①U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 249882 号

书 名:大型桥梁健康监测系统及损伤识别理论

著 者:郭 健

责任编辑:张征宇 崔 建

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787 × 1092 1/16

印 张:8

字 数:180 千

版 次:2013 年 11 月 第 1 版

印 次:2013 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10952-2

定 价:28.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

Preface

20世纪末以来,中国的大型桥梁建设从江河时代开始走向海洋时代,当代的桥梁建设者开始不断地冲击和挑战世界级的桥梁工程技术难题。21世纪的前十年,随着东海大桥、杭州湾大桥、苏通大桥、上海长江大桥、舟山大陆连岛工程的陆续建成,我国大型桥梁的建设水平已跃居世界前列。这几年,又陆续建成和正在建设的世界级大型桥梁还有青岛海湾大桥、象山港大桥、南京四桥、港珠澳大桥等。回顾这10多年的成就,中国的桥梁人建成了世界跨径最大的斜拉桥——苏通大桥(主跨1088m),建成了世界跨径最大的钢箱梁悬索桥——西堠门大桥(主跨1650m,且为世界上跨径第二大的桥梁),同时世界最长跨海大桥的纪录也在中国不断被刷新。

随着大型跨海越江桥梁的建设规模不断增大,其结构体系和建造的复杂程度也不断提高。从系统论的观点来看,系统构成越复杂,则系统出现故障的概率越高,且识别和判断系统故障的精确度也会降低。同时,大型桥梁一般在建设过程中就要面临诸多的技术挑战,需要解决许多在常规桥梁建设中不会遇到的设计和施工难题,所采用的很多技术参数已经突破了现有行业规范的考虑范围,一些关键技术工艺也都在不断地创新,这也使得大型桥梁服役期的结构安全风险有所增加。因此对于大型桥梁而言,如何在其全寿命周期内确保结构的安全运营和及时养护维修至关重要。这也将成为我国桥梁界在今后很长一段时间内需要重点关注和着力解决的一个重大的科学和技术问题。而对大型桥梁进行全面的健康监测,并应用有效的损伤识别技术来分析监测数据,以实现桥梁状态评估,及时发现结构损伤是其中的一个关键环节。

在多年从事桥梁工程领域的专业研究和建设实践工作中,我一直非常关注国内外发生的桥梁垮塌事故,也一直在思考如何在结构出现灾变之前能精确地实现结构的损伤识别。我结合几个大型桥梁健康监测的系统研发,过去对结构损伤识别方法开展深入的研究工作中,阅读了大量国外和国内的相关文献,包括从航天航空、机械等领域到土木工程领域的研究成果。经过综合分析后认为:如果把桥梁结构当作一个系统来进行损伤识别,那么最关键的是对系统测试数据中所包含系统参数信息的深度挖掘和认识。因此,本书选取了小波分析作为工

具,结合系统辨识、模式识别和人工智能等学科理论,提出了基于多尺度分析和信息融合的思想来实现损伤识别,并完成了一个完整的理论和试验研究。在研究过程中,作为“数学显微镜”的小波分析以其深炯的哲学意义吸引了我,即:通过多个不同尺度的相互结合来观察和分析事物的全貌和细节,能使我们更容易更清晰地观察事物发展的规律,获得更为完整的认识。正如数学界所言“世界无处不小波”,小波分析在桥梁健康监测和损伤识别领域的应用还有很大的空间。

近年来,我先后参加了多个大型桥梁的技术研发和建设管理,特别是在参建舟山大陆连岛工程跨海大桥的建设中,与设计、监理、施工、施工监控、成桥荷载试验、健康监测等单位共同工作和探讨技术问题,还依托工程承担了国家科技项目。在这个过程中,我更加深切地认识到大型桥梁健康监测系统的重要性,它对于验证设计理念、校核施工监控和荷载试验、跟踪监测工程所采用的创新工艺、发现结构潜在损伤风险都十分必要,也同时深深地感觉到在这个物联网和大数据的时代,找到一种优秀的结构损伤识别方法等于给大型桥梁健康监测系统插上了翅膀。从大型监测系统发展的趋势来看,单一的损伤识别算法已经不能满足不同复杂构件的损伤识别需求,未来的一个发展方向是需要构建针对子结构的损伤识别算法群来完成大型桥梁结构体系的高精度损伤诊断,同时与多源信息融合技术相结合。

仅仅在过去的一年中,国内外就传来了多座桥梁出现垮塌的重大事故,在行业内外造成了很大的负面影响,作为桥梁建设者,我们更加感到确保桥梁安全长久运营的重任在肩、责任重大。本书从桥梁健康监测和结构损伤识别技术,基于小波分析的结构健康监测策略、结构动力系统的多尺度分析,实时监测中的结构损伤预警、损伤特征提取及模式分类方法,基于信息融合的损伤确认,基于信息融合的损伤定位及定量等几个方面对大型桥梁健康监测系统和损伤识别方法进行了研究和分析,并在其中介绍了舟山大陆连岛工程中的大型结构健康监测系统。本书的主要内容也是国内最早开展该领域损伤识别方法研究的成果之一。在本书出版之际,真诚地希望专家和读者们对书中的不足给予批评和指正,来共同推进我国桥梁行业的技术进步。

本书内容所开展的相关研究工作曾得到了国家自然科学基金(50808160、51178429)、国家科技支撑计划(2008BAG07B05)、中国博士后基金(2005037821)等多个国家科技计划的支持;还得到了欧进萍院士、孙炳楠教授的指导和支持;得到了国内多位交通行业的专家领导的指导和关心;得到了国家科技支撑计划团队成员的帮助。对此表示衷心地感谢!

郭 健

2013年8月

目 录

Contents

第 1 章 桥梁健康监测和结构损伤识别技术	1
1.1 土木工程结构进行健康监测的重要性	1
1.2 结构健康监测和损伤识别的发展	4
1.3 国内外对结构健康监测的研究现状	5
1.4 大型桥梁结构健康监测系统介绍	7
1.5 结构健康监测中的损伤识别方法	15
第 2 章 基于小波分析的结构健康监测策略	30
2.1 结构健康监测中的关键性问题	30
2.2 多尺度分析理论	32
2.3 小波分析理论	34
2.4 面向实时在线监测的结构健康监测策略	45
第 3 章 结构动力系统的多尺度分析	48
3.1 损伤识别的动力系统模型分析	48
3.2 单自由度模型的结构动力系统多尺度分析	49
3.3 多自由度模型的结构动力系统多尺度分析	51
3.4 结构损伤的时变系统分析及其状态空间模型	55
3.5 结构损伤多尺度分析的数值仿真研究	57
第 4 章 实时监测中的结构损伤预警	64
4.1 结构损伤预警的目的及重要性	64
4.2 多尺度损伤预警的理论基础和小波基的选取	65
4.3 应用小波分析对测试信号进行去噪的方法	67
4.4 基于小波变换的损伤预警研究	68
第 5 章 损伤特征提取及模式分类方法	80
5.1 结构损伤的模式识别问题	80
5.2 损伤信息的小波包特征提取方法	82
5.3 基于神经网络的损伤模式分类	88

第 6 章 基于信息融合的损伤确认、定位及定量	96
6.1 结构损伤识别中的多传感器信息融合	96
6.2 损伤识别的耦合神经网络融合算法	98
6.3 结构损伤识别的模型实验	98
6.4 损伤特征的提取和数据层融合	103
6.5 结构损伤的确认、定位及定量	109
第 7 章 未来的技术展望	113
参考文献	115

第 1 章 桥梁健康监测和结构损伤识别技术

1.1 土木工程结构进行健康监测的重要性

在过去的一个多世纪中,土木工程领域取得了令人瞩目的成就,各种大型复杂的结构不断出现。当今的土木工程结构正在向超大化、复杂化方向发展,如大跨桥梁,超高层建筑,规模巨大的体育馆和剧院,大型水坝、核电站及近海结构等。这其中超高层建筑的高度、大跨度桥梁的跨径、大空间场馆结构的规模不断刷新纪录,不仅体现了科学与技术的长足进步,而且反映了人们对建造这类大型复杂结构的需求和探索。然而这类重大工程结构的使用期长达几十年,甚至上百年,在环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应及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积累和抗力衰减,极端情况下可能引发灾难性的突发事故。

虽然,很早以来人们就意识到对桥梁进行安全监测的重要性,但由于早期的监测手段比较落后,所以在应用上一直受到相当的限制,以致在过去发生了一些惨痛的工程事故。例如:1992 年比利时一座后张预应力混凝土桥倒塌;1994 年韩国汉城的圣水大桥断塌;2001 年巴西 P-36 海洋平台爆炸倒塌;1995 年中国广东海印大桥(斜拉桥)的拉索锈断;1999 年中国重庆綦江彩虹桥突然倒塌;2000 年中国台湾高屏大桥事故;2001 年中国四川宜宾南门大桥桥面断裂坍塌;1980 年德国西柏林议会大厅预应力混凝土壳体屋顶由于结构的初始缺陷而部分塌毁;1994 年美国加利福尼亚洲 Northridge 大地震时,一些建筑物在遭受主震后虽未倒塌,但结构已经存在损伤而未及时发现,在后来的一次较大的余震作用下倒塌了^[1-3]。

近十多年来,人们对桥梁安全监测的认识已经有了很大提高,但是由于桥梁在建设期可能存在的初始结构缺陷,以及在运营管理中由于监测和养护管理的不足,在超载或其他灾害性突发荷载作用下,仅这几年就不断有一些大型桥梁和中小桥梁陆续发生了严重的倒塌和破坏事故,造成了重大的生命和财产损失,也在社会上造成了极大的社会负面影响。例如:2011 年 7 月,钱江三桥引桥桥面发生塌陷事故,一辆重型挂车坠毁桥下;2012 年 8 月,哈尔滨阳明滩大桥一上行匝道垮塌,桥上 4 辆货车侧翻至桥下,致使 3 人死亡;2013 年 8 月川藏公路 318 国道通麦大桥发生垮塌事故,一辆货车连同 4 人坠入江中;2007 年 6 月广东九江大桥被一偏离主航道的运沙船撞击非通航孔,导致桥面发生坍塌约 200m,4 辆汽车坠江,9 人失踪;2008 年 3 月在建的浙江金塘大桥被偏离形势航线误入非通航区域的货船撞击,导致刚刚架设的两片 60m 跨预制箱梁坍塌;2013 年 2 月连霍高速河南段的义昌大桥上一辆装载烟花爆竹的货车突然发生爆炸导致大桥南半幅被全部炸毁坍塌,北半幅桥板松动,多辆大货车掉入桥下,造成 26 人死亡;2013 年 7 月受强降雨袭击,四川多地接连发生桥梁垮塌冲毁事故,其中江油市盘江大桥垮塌后,有 6 辆汽车直接坠入河中。



图 1-1 中是近年来的几个桥梁垮塌的工程事故。这些事故不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且产生了极坏的社会影响,发人深省。因此,为了保障桥梁结构的安全性、完整性和耐久性,已建成使用的大型桥梁和建筑结构亟须采用有效的手段来监测和评估其损伤程度及安全状态。

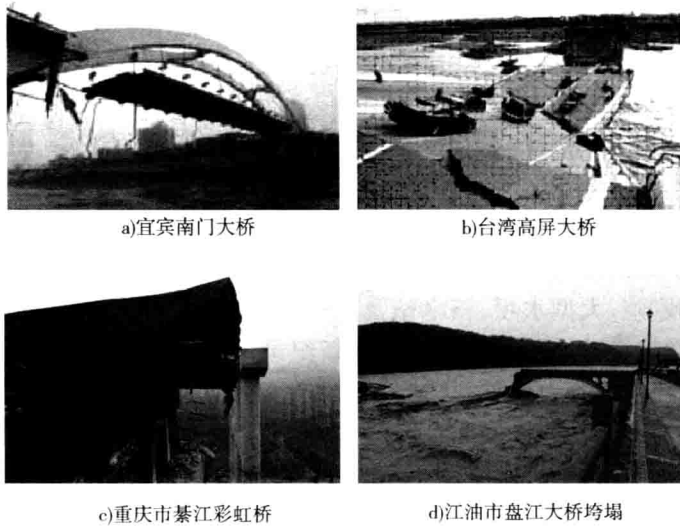


图 1-1 发生事故的桥梁

土木工程结构出现损伤和破坏主要有以下三方面的因素:

第一,结构先天不足。在设计和施工中结构本身具有缺陷,在后期的运营和使用中,结构受力不合理而出现损伤和破坏^[3]。由于我国早期所修建的工程结构设计周期和施工工期短,材料市场不成熟,同时在设计和施工中缺乏严格的监理手段和监测措施,使得一些已建成的结构存在一定工程质量问题。

第二,结构设计荷载标准较低,使得在后期使用中,实际荷载大于设计荷载,并超龄服役导致结构发生损伤和破坏。一个工程结构的安全性水平不仅取决于工程设计、施工技术和管理人员的水平与素质,而且取决于工程法规、规范所规定的安全设置水准^[4]。

结构的安全保证率或安全储备是由设计规范所确定的安全系数限制的。例如:我国建筑规范规定活荷载的荷载安全系数为 1.4,而英国为 1.6,美国为 1.7;我国设计规范规定恒载(自重)的荷载安全系数(或分项系数)只有 1.2,美、英两国为 1.4。计算构件承载能力时,我国规定的材料强度安全系数比英美的低 10% ~ 15%。另外,在承载力计算公式上有的偏于不安全,如混凝土轴心受压柱设计不考虑偶然偏心,可能过高估计混凝土梁的抗剪能力。

公路桥梁结构安全设置水准以最常用车辆(我国过去采用汽一超 20 系列)作用于 30m 跨度的简支桥梁需承受的活荷载效应(标准值)为例,美国和英国规范分别比我国规范大 12% 和 29%。对于活荷载安全系数,我国为 1.40,而美国为 1.75,英国为 1.73;对于桥梁需承受活荷载效应设计值,美国和英国规范分别比我国规范大 40% 和 59%;对于材料设计强度我国规范规定较高;对于车辆活荷载,我国桥梁的设计承载能力分别为美国、英国

的68%和60%。此外,还有计算方法不同对安全设置水准的影响,如美国规范对没有冗余度的简支梁桥,需额外提高安全系数,在预应力混凝土梁抗剪能力上,我国规范公式偏于不安全。

可以看出,我国建筑结构设计规范和公路桥梁设计规范在安全设置水准上的低要求非常突出。日本、德国的设计规范总体上比英美更保守,多数发展中国家一般参照发达国家规范。我国台湾省和香港特别行政区分别参考或依据美国和英国规范。由于规范的低要求使得我国的工程结构在使用耐久性和极限承载能力方面有所欠缺。随着经济的发展和交通量的增加,建筑和桥梁结构上的实际承受荷载都有很大提高,使得结构安全可靠大大降低,结构局部构件出现损伤和破坏的概率增加。

第三,结构受到超出设计预料的突加荷载作用,使结构在短时间内承受的荷载超过了设计所考虑的最大承载能力,从而使结构发生损伤或破坏。在突加荷载中,地震荷载及风荷载是主要的破坏性荷载。以我国为例,20世纪大约平均每三年发生两次七级以上地震,而两次地震中几乎就有一次酿成重灾^[5]。风荷载也是工程结构长期以来需要面对的破坏性荷载。在桥梁和建筑结构使用过程中,遇到超出设计考虑的较大风荷载突然作用时,结构将经受一次破坏性荷载的考验,使得结构可能出现局部或整体的损伤或破坏,美国的Tacoma大桥、德国的Nassau桥、英国的Union桥等都是由于风振发生破坏^[6]。

最新的美国联邦公路管理局(FHWA)的统计数字表明:美国已有桥梁超过60万座,美国近1/3桥梁的使用时间已超过50年,而今1/4的桥梁出现功能性过时,11%的桥梁功能不足。美国土木工程师协会2013年基础设施评估报告说,华盛顿州所有7840座桥梁中,超过1/4存在结构缺陷或功能不足。在2007年就有报道显示美国约有25.4%的桥梁功能陈旧或有结构缺陷,需要修复;据报道,在英国也有1/3的桥梁需要修复;在加拿大,为修复桥梁损坏的全部基础设施工程估计需耗费5000亿美元。近十多年来,我国公路桥梁建设取得了举世瞩目的成就,已进入世界桥梁大国行列。截至2012年年底,我国公路桥梁共有71.3万座,总长3663万延米。但从建设年代看,仅国省县道公路桥梁中就有12%是20世纪80年代之前建成的。受当时经济、技术条件限制,这些桥梁设计标准和承重荷载能力较低,大都不能适应和满足当前交通发展需要,有的已经成为病桥、危桥。根据发达国家的经验和教训,随着我国经济的快速发展和大批桥梁使用寿命的即将到期,我国桥梁正处于风险相对高发期。特别是政府还贷一、二级公路收费逐步取消后,普通干线公路和农村公路上的重载车辆不断增多,今后一个时期,我国公路桥梁安全形势将十分严峻。交通量与日俱增,车辆载重不断提升,缺乏例行维修,已有不少桥梁处于带病超负荷工作状态,尽管新桥不断建成投入使用,但同时更多的旧桥梁到达或即将到达其设计服役期。可见桥梁工程结构的损伤和破坏并不是个别现象,即使一个设计和施工都非常完美的结构,随着服役时间的延长和荷载的增加,结构出现损伤和破坏的概率将不断增加。^[4,8,9]

大跨桥梁结构的安全性对国民经济、社会稳定和人民的生命财产具有直接的重大影响。随着对工程结构的安全性、耐久性 & 正常使用功能的日益关注,人们希望能够在结构的服役期,即使出现一些如地震、台风、海啸、爆炸等灾害性事件后,能充分了解结构的健康状况,以决定是否需要对结构进行维修和养护,以及何时进行维修和养护。



1.2 结构健康监测和损伤识别的发展

结构中的损伤可定义为“结构在服务期内其承载能力的下降”。承载能力的下降通常是由结构构件内部或构件之间连接出现损伤而引起的^[10]。对于处于自然环境中的实际工程结构,由于受使用荷载的作用和各种突发性因素(如台风、地震、严重超载、火灾、爆炸等)的影响,从服役开始就面临着一个损伤积累的问题。严格地讲,结构的健康状态是不断发生变化的。没有探测到的损伤将降低结构的刚度和强度,从而引发更大的结构损伤积累,损伤积累到一定程度将导致结构的突发性失效。

为了保证结构的安全,人们很早就意识到应在结构服役期充分了解结构的损伤状态及承载能力的变化,使损伤积累尚未达到威胁结构安全的程度之前就能够被检测出来。而准确地识别出结构的损伤及对结构工作状态的正确评估,不仅关系到桥梁使用的安全,而且对于决定是否对桥梁进行维修、何时维修具有重要的意义。出于这个目的,土木工程结构探伤工作的开展主要围绕着结构损伤检测(Damage Detection)、结构损伤识别(Damage Identification)、结构健康监测(Structural Health Monitoring)来进行研究。

结构探伤最早被应用于机械、航空领域。对于由连杆、轴承、齿轮等一系列零件组成的大型机械,人们很早就开始对它们进行结构故障诊断(Fault Diagnosis)。20世纪60年代初期,由于航空、军工的需要,结构的损伤检测技术开始出现,并发展了一系列的无损检测(Nondestructive Detection)技术^[11]。20世纪80年代以后,随着计算机技术、信息技术和人工智能等学科的知识不断被应用到结构损伤检测中,人们不仅应用各种检测手段和检测工具在现场对结构进行测试,还应用各种理论方法在计算机上结合有限元计算对结构的损伤状态进行分析,来识别在现场无法察觉的结构损伤,后来发展出了一门专门的技术——损伤识别。

土木工程结构中的损伤检测发展历程,从国外来看,早期的工业与民用建筑出现损伤的概率较小,危害程度远没有机械结构那样高,而且一定程度的带伤工作是完全允许的,故而土木结构的损伤检测技术发展较慢,且多数工作属于结构可靠性评估。20世纪40~50年代,土木结构的损伤检测主要是对结构缺陷原因的分析 and 修补方法的研究,检测工作大多采用以目测为主的传统方法。20世纪60~70年代,开始注重对结构检测技术和评估方法的研究,多种现代检测技术被应用到土木结构中^[11]。20世纪80年代以来,土木结构的损伤检测技术进入了逐步完善的阶段,在结构检测方面制定了一系列的规范和标准,结构损伤检测技术与基于有限元分析和智能评估的损伤识别理论相结合,得以迅速发展。我国的土木工程结构损伤检测技术发展较晚,主要的研究也是在20世纪70年代以后,随着结构抗震、抗风研究的发展,才逐步开始结合可靠性评估和安全维修鉴定进行结构损伤检测的研究。近几年,随着我国重大土木工程的兴建和近年来工程事故的增多,结构损伤检测和结构健康监测得到了极大的重视,越来越多的人在从事这方面的研究。

一般来讲,结构损伤检测是在某一时刻对结构性能进行的检测与评估,而健康监测是对结构进行长期的在线监测,以实时了解结构的动态性能,对结构的安全性作出即时评估。对

于复杂结构,为了能够及时地获得结构的健康状态信息,靠对结构偶尔进行的测量是无法满足要求的。因此,近年来国际上出现了针对重要工程结构的长期健康监测系统。长期健康监测系统是由永久性安装在结构上的传感器和数据采集输出等软硬件设备组成的系统,它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,为及时地评价结构的健康状态提供了丰富的资料,可实时地通过现场安装的损伤检测仪器和计算机辅助完成的损伤识别技术对结构的健康状态作出评价。长期在线结构健康监测系统对硬件和软件都提出了更高的要求,大大推动了损伤检测和损伤识别技术的发展。

1.3 国内外对结构健康监测的研究现状

随着测试手段和分析技术的提高,许多国家都开始在一些已建和在建的大跨桥梁和复杂结构中设置结构健康监测系统,在健康监测和损伤识别方面进行了卓有成效的研究。近年来,国内的一些重要工程结构也开始安装健康监测系统,并开展了这方面的研究。

1.3.1 结构健康监测系统的发展

美国在 20 世纪 80 年代中后期开始在多座桥梁上布设传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态,用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态。例如,佛罗里达州的 Sunshine Skyway Bridge 上安装了 500 多个传感器,可以通过近距离及远距离两种方式,采集桥梁各阶段的位移、应变、温度信息,并通过这些信息分析结构及材料随时间变化的规律^[7]。

丹麦对总长 1726m 的 Great Belt 跨海斜拉桥进行了施工阶段及通车首年的监测,目的是通过监测数据来分析关键的设计参数,掌握施工阶段结构最不利的受力状态以及获取运营后对结构进行维修所需的桥梁健康记录^[12]。

挪威在主跨 530m 的 Skarnsundet 斜拉桥上安装了全自动的数据采集系统,该系统能对风速以及结构的加速度、倾角、应变、温度场、位移等进行自动监测,以实现在全桥结构状态实时了解的目的,并能检验设计和施工是否完善^[13]。

泰国曼谷的 RamaIX 斜拉桥与韩国的 Namhae 悬索桥分别于 1994 年和 1996 年安装了结构整体性安全在线警报系统(On-line Alerting of Structural Integrity and Safety System),该系统能对结构进行远程监测^[14]。

中国香港的几座大跨桥梁以及内地的虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥^[15]、钱江四桥^[16]、东海大桥、苏通大桥、舟山大陆连岛工程等在施工阶段也安装了传感设备,在运营期间对结构进行实时监测。其中上世纪末建成的香港青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥上安装了当时世界上规模最大的实时安全监测系统,即“风与结构健康监测系统”(Wind and Structural Health Monitoring System),三座桥上的监测系统包括传感器系统、信息收集系统、信息处理和分析系统。传感器系统由约 900 个各类传感器及有关附件组成。信息收集系统为桥内的 9 个电脑控制的信息采集站。信息处理和分析系统为桥监室中的 2 台电脑工作站,负责分析由光纤网络传至的信息^[19,20,21]。



另外,渤海石油平台也实现了结构实时监测与安全评定的远程网络系统,一些国内外的高层建筑和场馆结构也开始安装结构安全监测系统^[1]。总的来讲,越来越多的重大工程中开始采用一定的实时监测手段和损伤识别技术来诊断和评估结构的服役状态。

我国在土木工程防灾减灾领域的研究、结构的健康监测与损伤识别的研究还相对落后。大型结构的迅速发展和人们防灾减灾意识的提高,对结构健康监测和损伤识别的研究提出了客观上的要求,提供了坚实的工程背景和广阔的应用空间。可以肯定,在未来的一段时间里,结构健康监测和损伤识别的研究在我国将得到迅速发展。

1.3.2 结构健康监测系统的构成

结构健康监测系统是集结构监测、系统识别及结构评估于一体的综合监测系统,其内容包括荷载监测,即桥梁承受的各类荷载如风荷载、交通荷载、温度与地震荷载等;几何变位监测,如悬索桥索塔和高层建筑的水平变位与倾斜度,桥面和大跨屋面的变形,结构支撑部位及伸缩缝的相对位移等;结构响应监测,即结构各部位在环境振动和强震下的动力响应时程,结构构件的局部内力变化等。从系统构成来看,结构健康监测系统一般可划分为:

(1)数据采集子系统。主要包括各类信号采集、存储和传送的硬件系统。信号采集的主要硬件是传感器,根据不同的监测内容主要有应变片、倾角仪、位移计、速度计、加速度传感器、风速仪、温度计、动态地秤、强震仪和摄像机等。信号传输的方式分直接电缆连接和无线传输两种^[22]。

(2)数据信号处理子系统。主要包括各类数字信号的处理,如A/D转换及数字滤波去噪等,以便为系统识别和损伤识别准备充分的数据信息。这个过程一般在计算机的工作站上随着数据采集同步完成。

(3)系统识别子系统。通过计算机模拟仿真计算,结合有限元模型分析,识别出结构系统的静、动力特性参数,即系统特征识别。

(4)损伤识别子系统。即通过一定的分析技术,对已获得的数据进行处理,与结构系统特征联合,应用各种有效的手段识别结构损伤,完成损伤预警、损伤定位、损伤定量工作。

(5)结构状态评估子系统。把损伤识别的结果与专家经验相结合,对结构的健康状态作出评价,分析结构的强度储备,预测结构服役时间,评价结构的可靠度,计算分析结构投资—寿命关系,提出结构健康维护策略。

(6)数据管理子系统。完成大量的现场采集数据和后续分析数据的存储,并实现结构相关信息的可视化和决策数据库的智能化,以完成结构健康状态的实时跟踪,为决策管理人员提供信息支持。

整个结构健康监测系统就像一个医生,对结构健康状态进行诊断。首先,对结构系统输入荷载能量,激励结构体系产生反应,并通过各种测试仪器对结构反应进行监测;其次,得到测试数据后,先完成数据处理,再结合数值模型的先验知识对结构进行诊断,分析结构可能发生的损伤;最后,对结构的健康状态进行评估,确定维修、养护对策。

一个完善的结构健康监测系统如图1-2所示^[23]。

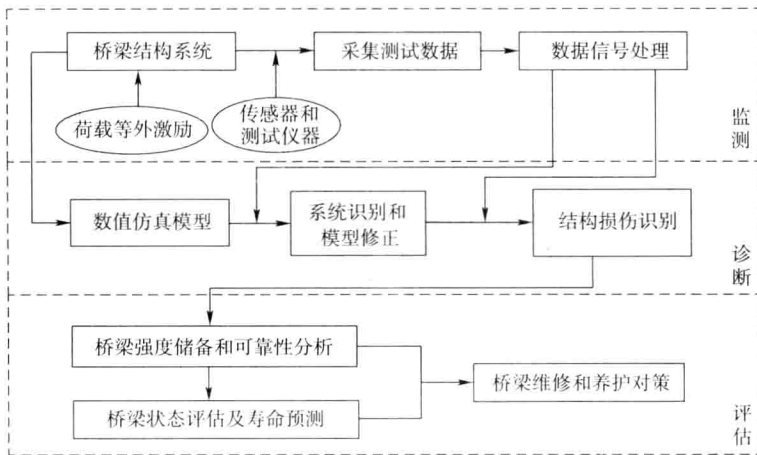


图 1-2 结构健康监测系统集成

1.4 大型桥梁结构健康监测系统介绍

1.4.1 工程概况

20 世纪末以来,我国的大型桥梁建设从江河时代开始走向海洋时代。21 世纪的前十年,随着东海大桥、杭州湾大桥、舟山大陆连岛工程跨海大桥以及青岛海湾大桥等跨海大桥的陆续建成,我国的跨海大桥建设水平已跃居世界前列。这里以舟山大陆连岛工程跨海大桥为例介绍大型桥梁健康监测系统。舟山大陆连岛工程连接舟山、宁波两市,全长 49.96 km,总投资约 130 亿元,如图 1-3 所示。工程包括 5 座跨海大桥,分别为岑港大桥、响礁门大桥、桃夭门大桥、西堠门大桥、金塘大桥。其中:西堠门大桥(见图 1-4)采用主跨为 1650 m + 578m 的两跨连续钢箱梁悬索桥,跨径为世界第二,仅次于日本的明石海峡大桥(钢桁梁悬索桥);金塘大桥(见图 1-5)全长 26.54km,跨海 18.27km,包括三个通航孔区域,其中的主通航孔为主跨 620m 的双塔双索面钢箱梁斜拉桥,是我国当时在外海条件下建成的跨度最大的斜拉桥,金塘大桥的东通航孔桥和西通航孔桥分别为主跨 216m 的连续刚构桥和主跨 156m 的连续梁桥。



图 1-3 舟山大陆连岛工程 5 座跨海大桥布置图



图 1-4 西堍门大桥



图 1-5 金塘大桥

1.4.2 跨海大桥的发展需要长期的结构监测系统

跨海大型桥梁处于陆海相交的海域环境中,这样的区域,一般地质情况复杂,且海上风、浪等自然气候条件恶劣。如舟山大陆连岛工程桥址区的气候同时受到西风带、副热带和热带辐合带天气系统的影响,天气复杂多变,灾害性天气类型多,发生频繁,主要有暴雨、龙卷风、连阴雷暴、飚线、寒潮和雾等,其中尤以龙卷风、飚线、雷暴最为严重,对工程施工和运营安全有很大影响。且环境湿度和盐度高的海洋气候对钢结构的侵蚀风险大。舟山群岛地区是我国受台风影响较为频繁的地区,平均每年有 2.56 个,台风最早出现在 5 月份,最迟出现在 11 月份,且季风盛行、风力大。舟山连岛工程中的西堍门大桥处,10 m 高处 100 年重现期的最大风速达 41.12 m/s。西堍门水道潮流一般以不正规半日潮流为主,潮流运动形式大多为往复流,且流速大、有强烈漩涡,实测最大涨落潮漂流流速达 2.66~3.65 m/s,实测最大波高可达 2.1 m,该水道通航繁忙。整个桥址区域地质条件较复杂,地震基本烈度为Ⅶ度,为浙江最高地区。

环境条件对跨海大桥的设计、施工及后期养护都提出了更高的技术要求,其建设过程中面临着诸多的技术挑战,这些凝聚在设计 and 施工中的关键技术也需要在运营期通过健康监测系统的实测数据来进一步分析和研究。主要有:

(1) 跨海大桥常常面临恶劣的风环境。高风速条件下,大跨径桥梁在结构选型和构造设计中必须考虑风致破坏问题,针对桥梁结构颤振和涡激共振必须采取有效的措施。例如,著名的美国塔科玛大桥就曾遭受风致破坏。而跨海大桥常常会采用跨越能力强的大跨径悬索桥和斜拉桥,抗风问题显得更为突出,所以确保跨海大桥的抗风性能和抗风安全是一个十分关键的技术问题,对其在实测风环境和结构在风荷载下的反应进行监测十分必要。

(2) 跨海大桥位于恶劣的海洋环境中,在这种环境下混凝土结构的腐蚀状况要比其他环境下的严重得多。导致海水中混凝土腐蚀的因素主要包括钢筋锈蚀、冻害、化学腐蚀、结晶压力以及海洋微生物作用、流水波浪的磨损与冲刷、应力腐蚀等。因此,监测和预防由于钢筋锈蚀产生的构件损伤,延长结构使用寿命,确保跨海大桥的安全性和耐久性是一个十分突出的问题,也是需要长期给予监测和关注的。

(3) 20 世纪末以来的二十余年中,全球发生了许多次大地震,在这几次地震灾害中都有

一个共同特点,即由于桥梁工程遭到严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,导致了巨大的经济损失。因此重大交通工程除了要进行地震安全性评价,确定抗震设防措施以外,还需要在地震过程中进行有效的结构监测,及时发现结构出现的损伤。另外,处于通航海域附近的跨海大桥,极易遭受船舶撞击,因此,及时通过结构监测系统来提高结构的安全性也是一个十分重要的问题。类似地震和船舶撞击等突发灾害的灾后结构评估都需要系统的监测数据作为支撑。

(4)跨海大桥多位于港口及船舶出入频繁区域,海域航道繁忙,为满足通航要求及地形条件的限制,避开深水基础等因素,跨海大桥朝特大跨径方向发展是一个趋势。特大跨径桥梁的全部作用效应中以自重效应占很大成分,因此跨度的增加依赖于材料科学的进步,研发高强轻质材料是跨海大桥发展的一个重要技术难题,如悬索桥钢箱梁所用钢板和缆索系统所用钢丝等都直接支撑桥梁向更大跨度发展,这些新材料和新工艺的耐久性和安全状态也需要进行长期监测。

(5)由于大型跨海大桥(尤其是斜拉桥、悬索桥)的力学行为和结构特点相对复杂,桥梁结构受多重荷载和环境效应作用,在大桥设计阶段就完全精确地掌握和预测结构成桥后的受力状态是非常困难的。结构理论分析常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,试验研究的模拟也可能与实际结构的受力状态不完全相符。因此,通过桥梁健康监测所获得的实际结构的动静力反应来验证大型跨海大桥的各项设计指标、监测结构安全状态成为一个十分重要的研究方向,可为跨海大桥建设提供更多的技术信息,可为进一步提高设计和施工水平提供参数指标依据。

在跨海大桥建成后,就需要一个完善的结构监测系统来测试结构在运营过程中的各种反应信息,并通过有效的损伤识别方法来了解和分析大桥结构的受力状态和服役能力,来校核和验证设计和施工的合理性和正确性。由于跨海大桥在建设技术上的超前性和结构体系上的复杂性,其对健康监测系统的构建及损伤识别算法的性能也提出了更高的要求。

1.4.3 舟山大陆连岛工程结构监测系统

为确保在大桥运营期对结构进行全方位的结构状态监测,2009年建成通车的舟山连岛工程中安装了目前世界上最大规模的结构健康监测系统,覆盖金塘和西堍门两座大桥。这个监测系统在西堍门大桥中安装了350多个传感器,在金塘大桥全桥安装了600多个传感器,这些传感器包括风速仪、温湿仪、温度计、加速度传感器、GPS、倾斜仪、压力变送器、位移传感器、电阻应变片、索力传感器、支座反力计等。同时,系统中集成了传感测试、信号分析、智能控制、人工智能等目前最新的技术和设备。采用工业以太网和分布式信息融合技术为大桥管养提供智能支持,实现了全方位的结构监测。

以西堍门大桥为例,大型桥梁的监测系统布置如图1-6所示。西堍门大桥结构监测系统的监测内容主要有荷载和结构响应。荷载主要包括风、温湿度、车辆和地震。结构响应主要包括大桥空间变位(主缆、索塔和钢箱梁)、应变和加速度。该结构监测系统的功能是实时监测西堍门大桥的受力状态,并对该桥的安全状况进行综合评估。

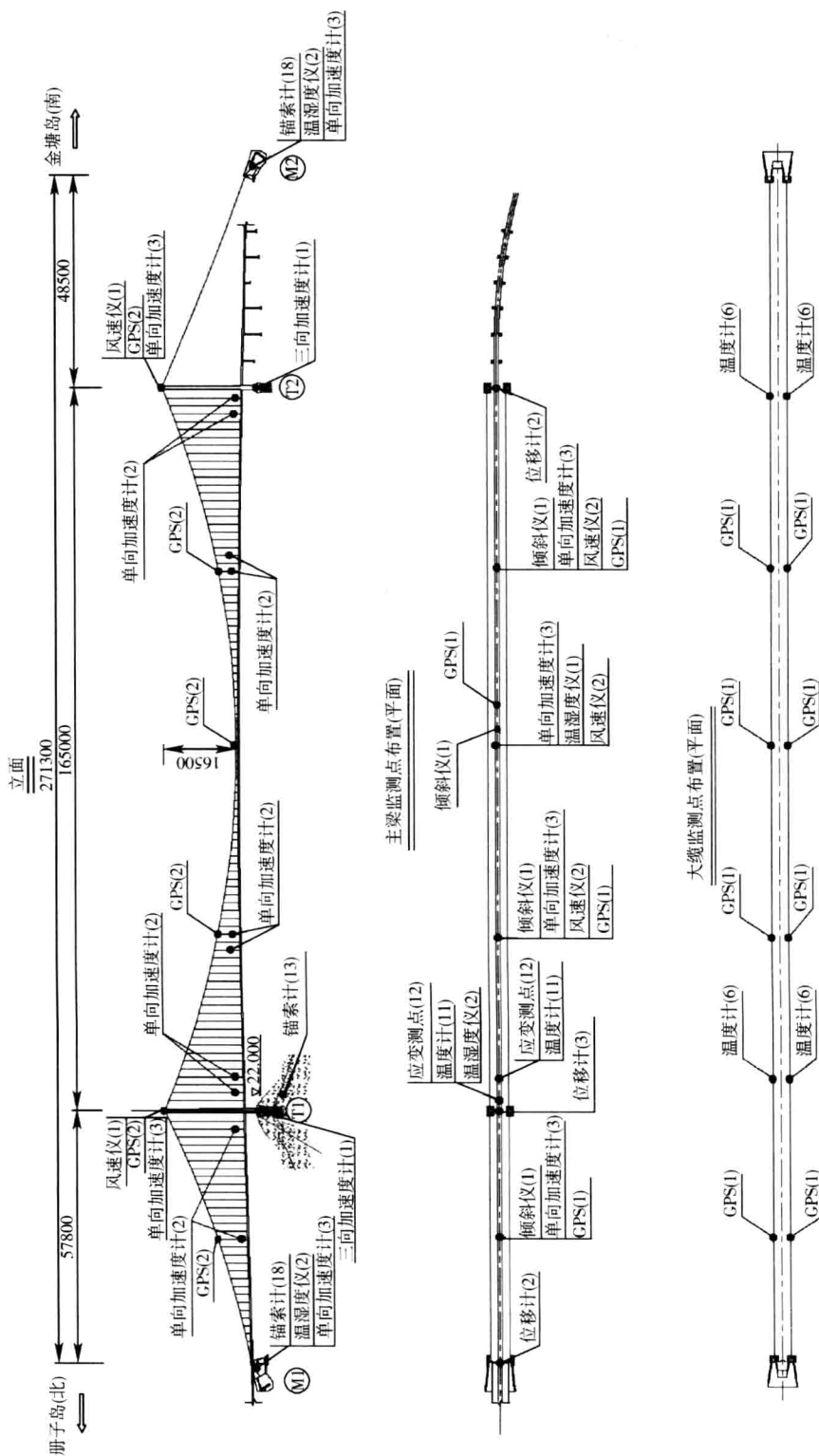


图 1-6 西峡门大桥传感器布设(尺寸单位:mm)