



检测技术及仪器在 桥梁健康 监测系统中的应用

刘文峰 编著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

检测技术及仪器在桥梁健康 监测系统中的应用

刘文峰 编著



 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以桥梁损伤识别与安全评估为中心,以监测/检测技术及设备功能和性能介绍为重点,以桥梁动态参数识别、桥梁健康检测技术及应用、索桥状态检测、桥梁健康监测系统集成和监测预警系统优化、监测系统的稳定性与健康等级划分以及桥梁检测系统应用实例等为内容,系统介绍监测/检测技术及仪器,以及桥梁健康检测相关技术的研究和应用。

本书可作为桥梁设计、施工和运行维护,以及相关研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术及仪器在桥梁健康监测系统中的应用/刘文峰
编著. —天津:天津大学出版社,2013. 6

ISBN 978-7-5618-4717-6

I. ①检… II. ①刘… III. ①桥梁结构—安全监测
IV. ①U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 137817 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 169mm × 239mm
印 张 11.5
字 数 238 千
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次
定 价 29.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

桥梁是交通运输系统中的枢纽,对于保障正常通行和国民经济发展起着越来越重要的作用。各类桥梁结构的建设,大大改善了中心城市和主干道路的交通状况。随着桥梁结构设计理论、建筑材料和施工技术不断更新,桥梁建设正朝着结构复杂、跨度增大的趋势发展。由此也就对桥梁建成后的安全维护提出了更高要求。

桥梁在长期服役过程中难免会发生各种结构损伤,其原因可能是使用维护不当、车祸事故等人为因素,也可能是自然灾害等自然因素。长期人为因素和自然因素造成的结构累计损伤和结构材料本身随时间的性能退化等,必然造成桥梁结构的安全性和使用功能逐渐退化。自1940年美国Tacoma桥发生风毁事故后,桥梁结构安全监测的重要性引起了人们的关注。20世纪80年代中后期,欧美等国家明确提出了桥梁结构健康监测新理念,并先后在许多重要桥梁或复杂结构上建立了结构健康监测系统。

我国桥梁结构健康监测系统的研究和应用始于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。部分新建桥梁结构在总结以往经验和成果的基础上,在工程建设中引入施工质量监测和服役过程中的长期健康监测系统。这对于保证桥梁结构的安全性和运营维护的针对性等方面具有重要意义,并对桥梁的安全保障能力和运行经济性起到积极作用。

为此,以基于物联网的结构状态与安全检测技术研究的北京中测瑞仪物联科学研究院,选择了监测和检测技术及设备功能和性能介绍、桥梁结构的动态参数识别、索结构桥梁的状态检测、桥梁健康监测系统和监测预警系统的优化、监测系统的稳定性与健康等级划分以及多个桥梁检测系统应用实例介绍等内容,系统介绍检测/检测技术及仪器、桥梁健康检测相关技术研究和应用,为桥梁设计、施工和运行维护人员以及相关研究人员提供参考。

在本书编写过程中,得到北京天丰磊科技有限公司、江西飞尚科技有限公司、江苏飞高安全监测咨询有限公司等单位的大力支持以及相关应用实例业主的合作。参加本书编写的有北京科技大学兰成明博士、天津工业大学邢静忠教授、华东交通大学唐国华博士等。全书由江西飞尚科技有限公司总经理刘文峰博士统稿。由于编者认识局限和时间仓促等原因,书中可能有错漏之处,欢迎读者提出宝贵意见和建议。

编著者

2012年10月

目 录

第 1 章 桥梁损伤识别与安全评估	(1)
1.1 桥梁安全状况调查	(1)
1.2 桥梁检测及安全评定	(3)
1.3 监测/检测技术与安全评定发展现状	(6)
1.4 桥梁检测评估及相关研究	(8)
1.5 基于固有频率的结构损伤识别	(9)
1.6 基于结构位移模态参数的结构损伤识别	(11)
1.7 基于结构应变模态/曲率模态的结构损伤识别	(12)
1.8 基于其他参数的结构损伤识别	(13)
第 2 章 桥梁健康监测技术及应用	(14)
2.1 结构安全检测概述	(14)
2.2 桥梁结构健康监测研究	(15)
2.3 国外桥梁结构健康监测研究与应用	(17)
2.4 国内桥梁结构健康监测研究与应用	(17)
2.5 铁路桥梁的结构监测	(18)
2.6 铁路软基处理工程施工监测及检测	(23)
2.7 铁路桥梁施工监控	(25)
2.8 铁路桥梁荷载试验	(28)
2.9 铁路桥梁健康监测	(30)
第 3 章 监测/检测仪器及相关设备	(34)
3.1 环境监测仪器	(34)
3.2 变形测试	(36)
3.3 应力和应变测试	(41)
3.4 振动测试	(47)
3.5 受力测试	(49)
3.6 地下水位水压和土压力	(56)
3.7 基于云计算的结构综合管理系统	(60)
第 4 章 桥梁结构的动力参数识别	(64)
4.1 概述	(64)
4.2 位移模态的识别	(67)
4.3 应变模态的识别	(69)

4.4	通过声音响应进行模态识别	(70)
4.5	模态识别的注意事项	(75)
4.6	梁结构中位移模态与应变模态的关系	(77)
第5章	索结构桥梁的状态监测	(83)
5.1	概述	(83)
5.2	采用振动法进行索力识别的基本研究	(84)
5.3	考虑弯曲刚度的悬索振动的理论分析	(86)
5.4	考虑弯曲刚度及边界条件的求解	(87)
5.5	实测数据分析	(89)
第6章	桥梁健康监测系统集成	(92)
6.1	桥梁健康监测的目的	(92)
6.2	大桥健康监测系统的需求分析	(93)
6.3	大桥类型划分	(97)
6.4	监测系统项目分析	(98)
6.5	测试方法的研究	(98)
6.6	振动法的研究	(102)
6.7	声发射方法的研究	(102)
6.8	系统集成框架	(103)
第7章	桥梁健康监测预警系统的优化	(107)
7.1	研究背景	(107)
7.2	测点优化研究	(107)
7.3	采集数据优化	(115)
7.4	定阈值采样中的两个关键工作	(116)
第8章	桥梁健康监测系统的稳定性	(118)
8.1	监控系统鲁棒性问题	(118)
8.2	系统时间一致性问题	(121)
8.3	系统数据库管理的问题	(122)
第9章	桥梁健康等级的划分及指标体系	(123)
9.1	桥梁重要性等级划分	(123)
9.2	桥梁损伤识别指标研究	(124)
9.3	桥梁损伤等级的划分	(126)
9.4	索结构损伤识别方法	(130)
9.5	固有频率灵敏度分析	(132)
9.6	健康监测系统参数的评估流程	(134)
第10章	桥梁检测实例及相关问题	(136)
10.1	概述	(136)

10.2	试验设备及方案分析	(136)
10.3	铁路桥梁的振动特性研究	(137)
10.4	铁路桥梁的参数识别	(138)
10.5	铁路桥梁行车振动分析	(141)
10.6	梁式立交桥的参数识别	(145)
10.7	斜拉桥的参数识别	(149)
10.8	钢筋混凝土桥梁模型的损伤识别	(154)
第 11 章	大桥健康与安全监控预警系统实例	(158)
11.1	下沙大桥概况	(158)
11.2	下沙大桥的桥梁健康监测系统	(159)
11.3	系统设计方案	(161)
11.4	系统集成	(163)
11.5	软件系统总体设计	(166)
参考文献	(169)

第 1 章 桥梁损伤识别与安全评估

1.1 桥梁安全状况调查

交通是社会的经济命脉,桥梁则是交通工程的枢纽,我国有大量的现役桥梁。此外,近年来随着我国经济的发展,高速公路也快速发展,目前有大量大型桥梁在建或者即将建设^[1]。截至 2004 年,在我国桥梁中,跨越长江的桥梁共 78 座,其中,拱桥 17 座,梁桥 21 座,斜拉桥 24 座,悬索桥 16 座;跨越黄河的桥梁 88 座,其中,拱桥 9 座,梁桥 61 座,斜拉桥 3 座,悬索桥 15 座;跨海桥梁 22 座,其中,梁桥 11 座,斜拉桥 7 座,悬索桥 4 座。如果这些桥梁出现问题,将给国民经济造成极大损失,而且会带来极其恶劣的社会影响。

1940 年 11 月 7 日,美国华盛顿州塔科马桥(Tacoma Narrows)因风振致毁。1967 年 12 月,横跨美国俄亥俄河上的银桥突然倒塌,造成 46 人死于非命;1985 年,英国威尔士发生了一起后张灌浆预应力桥梁破坏的事故,为此,英国运输部 1992 年 9 月发布新建桥梁不再使用后张有黏结预应力梁的决定。

1994 年 10 月,韩国汉城横跨汉江的圣水大桥中央断塌 50 米,死亡 32 人,事故原因是长期超负荷运营,下部钢桁架螺栓及杆件疲劳破坏所致。1996 年 9 月 26 日,位于距菲律宾以东大约 2 500 公里的岛国帕劳共和国的 Koror-Babeldaob 桥倒塌,当时正在桥上通行的车辆掉入海中,造成 2 人死亡,4 人受伤。事故现场见图 1-1、1-2。



图 1-1 Koror-Babeldaob 桥倒塌前



图 1-2 Koror-Babeldaob 桥倒塌后

1999 年,重庆綦江“彩虹桥”由于工程质量问题,整体突然倒塌,造成了 40 人死亡的灾难。事故现场情况参见图 1-3。2001 年 11 月,四川宜宾的南门大桥由于承重钢缆生锈,使吊杆突然断裂,导致桥体两端先后发生断塌,造成重大损失。事故现场

情况参见图 1-4。

2000 年,南京长江大桥钢梁支座上的连接板螺栓因长期处于疲劳状态而被剪断,支座上的滚轴错位,经过紧急处理,幸好没有酿成大祸。

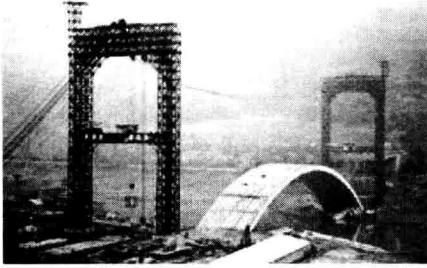


图 1-3 重庆綦江彩虹桥

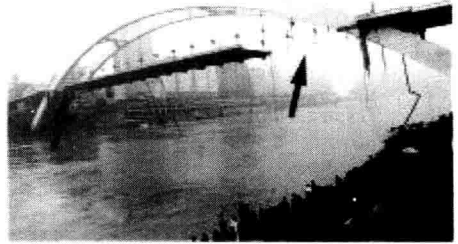


图 1-4 四川宜宾南门大桥

2004 年 6 月,位于辽宁省盘锦市境内 305 国道的辽河大桥北起第 14 孔和 15 孔之间,发生悬臂梁端突然断裂,造成桥板脱落,酿成意外事故,一货车、一轿车和一辆四轮农用车一同落入河中。事故现场见图 1-5。

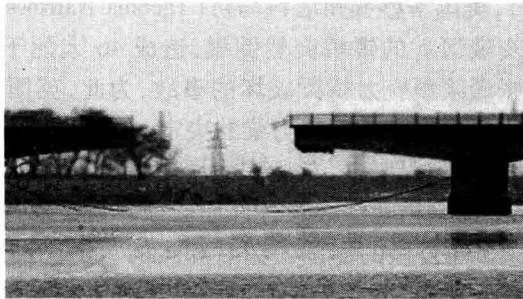


图 1-5 辽宁省盘锦辽河大桥

哈尔滨阳明滩大桥是我国长江以北最长的超长的超大型跨江桥。该桥宽 41.5 米,双向 8 车道。主塔高 80.5 米,主桥跨度 427 米,其跨度为全国同类桥梁之首。2012 年 8 月 24 日凌晨,阳明滩大桥引桥在通车不足一年后,约 130 m 引桥整体塌落,4 辆大货车坠桥,造成 3 人遇难 5 人受伤。

近年来,我国公路交通建设事业成绩显著,桥梁建设规模和数量快速增长,截至 2003 年年底,在我国通车公路中,各式各样的桥梁共 310 773 座、12 466 143 延米。其中特大桥 2 155 座、1 962 614 延米,大桥 17 417 座、3 061 688 延米,中桥 63 511 座、3 466 413 延米,小桥 227 690 座、3 975 428 延米,中小跨径桥梁约占桥梁总数的 93.70% (座数百分比)或 59.70% (延米数百分比),它们中间的大部分分布在技术标准低、通行能力差的公路上。这些桥梁的荷载标准大多为汽-13、拖-60 或汽-15、挂-80,还有相当一部分桥梁的荷载标准仅为汽-10、履带-50,甚至低于汽车-10



图 1-5 哈尔滨阳明滩大桥引桥坍塌现场

级。至 2010 年底,我国公路桥早已超过 65 万座,桥梁数量居世界第一。至 2020 年,还将新建 15 万座新桥,使总数达到近 80 万座。另外,由于早期技术标准规定双车道桥梁行车道宽度只有 7~9 m,桥面宽度过窄、不符合现行技术标准的情况相当普遍,比承载能力不足的问题更为突出。桥面宽度狭窄,形成公路交通运输的“瓶颈”,不但严重影响整条线路畅通,而且还成为交通事故的多发地点。

根据 2010 年全国公路普查资料,我国 65 万座公路桥梁中危桥约占 16%,达到近 10 万座。另根据 2000 年 11 月 29 日广州《羊城晚报》报道,广东省交通厅对广东省内现有、在建桥技术状况进行普查,结果发现 1.87 万余座桥梁中,属于三、四类不良状况或承载力不足的桥有 4 244 座,占总数的 22.7%,这些有问题的桥梁总长达 109 616 m。

1.2 桥梁检测及安全评定

从 20 世纪 70 年代起,我国在危旧桥检测、试验评定、维修与加固方面进行了不断的探索与研究。近年来,随着危桥数量的增长,各地对危桥越来越重视,对每一座危桥个案研究颇深,但从整体上开展危桥预警系统和理论的研究还不够。同时,由于我国公路桥梁桥型多、结构复杂多样,因此,一直没有建立起一套完整、系统的桥梁检测与安全预警方法。随着这些年来我国在桥梁检评方面积累的经验越来越多,以及桥梁检测、评定新技术的出现,开展了系统研究,形成桥梁检测、评定的成套技术方案,并在行业内大力推广。这对规范公路桥梁检测、提升桥梁安全水平、保障人们安全和社会安定是十分必要的。

从 1990 年开始,我国公路上的危桥数量一直居高不下,见表 1-1。截至 2003 年年底,全国普查出危桥 10 443 座,达 378 439 延米。其中国道上共有危桥 654 座、39 597 延米,国道主干线上有危桥 13 座、411 延米,省道上共有危桥 1 288 座、70 486 延米,县道上共有危桥 3 241 座、126 382 延米,乡道上共有危桥 4 467 座、124 071 延米。

危桥的存在,已严重影响到路网和干线的畅通,甚至出现了“断路”现象。

随着我国公路交通事业的快速发展,各级公路上的交通流量均在不断增加,运输车辆的吨位有大幅度的增长。这对我国路网中的桥梁通行能力和承载能力均提出了更高、更新的要求。尽管,通过一定的技术措施,对技术标准低、通行能力和技术状况差的桥梁进行加固补强与加宽改造,但桥梁的损坏甚至桥垮路断的现象时有发生,严重影响路网和干线运输的畅通。建立桥梁安全预警系统,提高桥梁的养管水平,使在用桥梁全部受控,防止桥梁受损倒塌事件的发生,是保障运输安全的一个十分迫切的课题。

从2001年起,“十五”期间,交通部计划每年拿出几亿元资金用于国省道主干线危桥的改造,以保障桥梁的运营安全。“十一五”期间,投入危桥的改造资金达189.5亿元。应用桥梁安全预警技术可以很好地对桥梁状况进行评估,从而有针对性地了解桥梁安全情况,科学地进行桥梁养护维修,利用有限的经费保证国省道、县乡道主干线桥梁运营的安全。

表 1-1 1990—2003 年我国公路桥梁数量与危桥状况

年份	桥梁总数		永久性桥梁		危桥	
	座	延米	座	延米	座	延米
1990	168 543	5 055 613	162 524	4 950 198	4 046	114 770
1991	173 083	5 225 699	167 260	5 123 065	4 196	135 162
1992	177 239	5 380 565	171 582	5 281 087	4 025	129 423
1993	184 215	5 617 821	178 698	5 521 795	4 007	132 403
1994	189 596	5 889 474	184 061	5 794 346	4 140	139 623
1995	196 416	6 278 895	190 961	6 184 861	4 189	142 467
1996	202 371	6 590 390	197 951	6 525 443	4 022	139 325
1997	210 822	6 951 948	205 707	6 862 487	4 109	143 358
1998	220 001	7 453 532	215 005	7 366 484	3 797	134 582
1999	230 778	8 005 661	225 499	7 910 698	4 451	160 491
2000	278 809	10 311 794	275 339	1 023 3860	5 176	186 632
2001	284 117	10 649 704	280 644	1 057 1723	10 131	357 909
2002	299 397	11 612 187	295 867	1 153 2908	10 804	391 043
2003	310 773	12 466 143	307 268	1 238 7019	10 443	378 439

在一些发达国家,如美国、日本、欧洲等国这一问题也相当严重。美国在1978年至1981年间用4年时间对全国公路作了调查,当时美国共有56.6万座公路桥梁,其中有40%以上均有不同程度的损伤;原联邦德国于1978年至1979年2年内,对某州

的 1 500 多座钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土公路桥做了全面检查,发现桥龄在 50 ~ 60 年的钢筋混凝土桥中,有 27% 的桥梁上部结构有严重损伤,64% 的桥梁有重要损伤,77% 有中等损伤。在 20 ~ 30 年桥龄的钢筋混凝土桥中,有 8% 的桥梁上部结构有严重损伤,24% 有重要损伤,46% 有中等程度损伤,而预应力混凝土桥的损伤情况比钢筋混凝土桥的损伤情况更为严重,20 ~ 30 年桥龄的预应力混凝土桥,有 50% 的桥梁上部结构有重要损伤^[2]。

桥梁长期使用,再加上地震等自然灾害以及交通事故等突发事件等都会对桥梁造成损伤。美国 SEAOC (加州结构工程师协会, V-1996) 定义了五个桥梁震害等级^[3-4],如表 1-2 所示。

表 1-2 桥梁结构震害等级

等级	震害等级	损伤描述	修复程度	社会经济性描述
I	无损	几乎没有可见裂缝	无需修复	完全正常运营
II	轻微破坏	产生细小裂缝	小修	可维持运营
III	中等破坏	有张开的裂缝、保护层碎落	中修	能够保证生命安全
IV	严重破坏	产生穿越保护层的宽裂缝	大修	接近倒塌
V	倒塌	明显的永久变形,钢筋折断	不可修	倒塌

桥梁震害等级的定性和定量化描述如表 1-3 所示。

表 1-3 震害等级的定性和定量化描述

等级	震害等级	震害的定性化描述	震害的定量化描述
I	开裂	产生细微裂缝	几乎看不见裂缝
II	屈服	纵向钢筋首次屈服	裂缝宽度 < 1 mm
III	产生局部塑性铰	产生塑性变形、保护层碎落、出现斜裂缝	裂缝宽度达到 1 ~ 2 mm, 破碎区长度 > 1/10 横截面的深度
IV	局部塑性铰进一步发展	产生穿越保护层的宽裂缝、局部塑性铰区混凝土大量碎落	裂纹宽度 > 2 mm, 斜裂纹长超过 2/3 横截面的深度, 破碎区长度 > 1/2 横截面的深度
V	强度退化	主筋弯曲、横向钢筋断裂、核心混凝土破碎	核心混凝土裂纹宽度 > 2 mm, 体积膨胀 > 5% 原构件尺寸

1.3 监测/检测技术与安全评定发展现状

自从 20 世纪 50 年代以来,人们就意识到桥梁安全监测的重要性,但由于早期的监测手段比较落后,所以在应用上一直受到限制。近年来随着大跨桥梁设计的轻柔化以及形式与功能的日趋复杂化,安全问题日益突出,因此桥梁健康监测/检测技术成为了国内外学术界、工程界的研究热点。

事实上这种桥梁健康监测/检测技术的成功开发将起到确保桥梁安全运营、延长桥梁使用寿命的作用。同时,通过早期发现桥梁病害能大大节约桥梁的维修费用,也可以避免大修关闭交通所引起的重大损失。

公路旧桥承载能力不足、宽度不够,不能满足不断发展的交通事业的需求,是世界各国普遍面临的问题,并且越是交通事业发达的国家,面临的问题越严重。联合国经济合作与发展组织(OECD)1980年、1982年先后在巴黎、布鲁塞尔和华盛顿召开了旧桥维修加固会议,很多国家就桥梁的安全性评价、检测与维修加固等方面提出了许多有价值的论文报告。桥梁的原设计标准低、结构构件老化、各种材料强度降低早已引起世界各国的普遍关注,也促使世界各国日益重视对旧桥检测评定与加固技术的研究。美国、英国、日本、德国、原苏联和印度等国都对公路桥梁的检测评定、加固维修技术做了很多研究工作。

美国、加拿大、丹麦等西方发达国家先后建立了完善的桥梁养护管理计算机系统,并通过系统研究形成了一套完整的旧桥检测、鉴定评价与加固改造技术体系。在旧桥承载能力评定方面,日本、加拿大采用荷载效应的修正方法进行分析计算,目前正向专家系统评估方向发展。英、美等国则根据计算分析结合无损的荷载试验来评定。前苏联在桥梁营运评价和寿命评估方面做过不少研究工作,并提出了一些评定标准。目前英国正在从事桥梁结构寿命评估的研究工作。最近美国针对中小跨径桥梁提出了一种“半静力”荷载试验与简化有限元模拟分析相结合的评定方法。

总体看来,我国公路桥梁检测、评定技术落后于西方发达国家,主要体现在以下方面:一是在桥梁检测手段和仪器设备开发研究方面;二是在桥梁检测、评定与加固技术的系统性和标准化方面。

目前,我国已经开展了一些针对桥梁损伤监测/检测的工作,已经在部分大桥上布设了实时监测系统,且对部分重要的桥梁进行定期检测,不过由于没有相应的桥梁检测标准以及桥梁健康与安全评定标准,难以对检测结果做一个明确、可信的结论,更难以对桥梁的健康安全状况作一个客观正确的评定。针对桥梁的现状,我国有必要尽早制定出桥梁的健康与安全评定标准,以保证交通的安全与畅通。

目前我国交通运输部发布的《公路桥梁承载能力检测评定规程》已经通过审核,这部规程为我国交通部门的桥梁检测评定工作提供了一个依据,也为桥梁健康与安全标准的研究奠定了一个良好的基础。国内外许多科研工作者在桥梁结构损伤及健

康检测与评估方面做了许多工作,其中不少成果已应用于实际工程中,并取得了较好的效果。我国目前在一些大型桥梁上已经安装了桥梁在线健康与安全监测系统,而且对不少桥梁进行了较为全面的检测工作。这些监测系统的使用以及桥梁的检测数据为桥梁健康监测预警系统的实施提供了许多宝贵的资料与经验。

目前,世界发达国家和地区开始在大跨度桥梁上安装监测系统,以监测桥梁施工和服役运营期间的状况,对桥梁的状况进行评定。该系统在危及桥梁安全的损伤出现时能及时发出警报。根据监测结果,相关部门可以制定维修决策,以保证大跨度桥梁在建造和服役期间全寿命的安全性。如美国在20世纪80年代中后期开始在多座桥梁上布设监测传感器,用以验证设计假定、监视施工质量和服役状态,佛罗里达州的 Sunshine Skyway Bridge 桥上安装了500多个传感器;美国 Los Alamos 国家实验室对位于新墨西哥州 Rio Grande 河上的40座桥和 Alamos 峡谷桥采用整体损伤识别方法,以对其损伤进行监测与评定,并发展了许多损伤识别方法;美国 Hopkins 大学对两座大型斜拉桥索在风和风雨作用下的振动进行了长期的监测;美国在 Bear Mountain 和 Bronx Whitestone 等多座悬索桥上安装了声发射监测系统,以监测主缆和吊索以及锚锭的疲劳断丝和裂纹萌生与发展。英国在20世纪80年代后期开始研制和安装大型桥梁的监测仪器和设备,并调查和比较了多种长期监测系统的方案;我国香港为监测青马大桥在施工和服役期间的安全性,在桥梁上安装了500个加速度传感器,桥梁建成后,又安装了一套GPS系统,目前,每30天采集一次数据,并对数据进行分析处理,之后在香港公路署存档,根据该监测系统的监测结果,可以及时在台风到来时对桥梁的运营做出合理和安全的部署。除此之外,香港 Lantau Fixed Crossing 大桥也安装了监测系统;我国内陆的虎门桥也布设了应变片和GPS系统,以对桥的应力和振动进行监测;芜湖长江大桥在施工阶段就布设了光纤传感器,用以监测桥梁施工和服役阶段的安全性;上海徐浦和卢浦两座大桥也均安装了监测系统。近年来,我国建设的特大跨度桥梁上均已经或正在安装健康监测系统,如杭州下沙大桥、山东滨州黄河公路大桥、山东东营黄河公路大桥、南京长江第三大桥和苏通大桥等。桥梁结构运营健康监测系统正逐渐与施工监控、成桥试验和桥梁养护管理系统一样,成为大型桥梁建设的重要组成部分。

传统的结构局部检测技术可以对桥梁的外观以及某些结构特性进行检测,检测的结果一般也能部分地反映结构的当前状态,但局部检测技术的应用效果却受到以下几个方面的限制。

(1) 结构被检测区域必须是检测人员能够触及的。对于大型的桥梁,有些腾空于宽阔的水面,有些跨越高深的大峡谷,桥梁结构待检区域往往是人所不能及的,或者即使能够到达,检测人员的作业环境也是极其恶劣和危险的。

(2) 局部无损探伤结果难以全面反映结构整体健康状况,尤其是难以对桥梁的安全储备以及退化的途径作出系统的评估。

(3) 局部损伤检测结果严重依赖于检测人员的经验和判断。另外,采用局部检

测技术对大型复杂桥梁结构进行检测效率低,检测一次周期长,这样由于关闭交通造成的损失和检测的仪器与人工费用巨大。因此,桥梁运营健康监测预警系统成为大型、特大型桥梁的选择。

结构整体检测技术在很大程度上克服了结构局部检测技术的局限性。它能够对结构整体工作性能给出评价,回答桥梁业主最关心的桥梁结构承载力问题;它可以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态;特别是基于结构动力试验的检测和监测技术,它可以在不妨碍交通的情况下进行,因而具有巨大的优越性,是桥梁结构检测不可或缺的重要技术手段。

随着我国公路交通网和西部开发计划的进一步实施,我国在未来几十年将建设一大批大中型桥梁,同时大量既有桥梁进入服役中后期,为保障桥梁结构在建设和使用过程中的安全,发展先进高效、稳定的桥梁结构健康与安全评估预警技术具有十分重大的意义。

1.4 桥梁检测评估及相关研究

设计基准与设计使用年限。

各国桥梁的使用年限不太一样,其中美国以 80 年为标准,英国以 120 年为标准,日本以 100 年为标准,我国的标准也为 100 年。设计使用年限不同隐含着很多因素,如活载、容许应力、疲劳损伤积累、防锈钢材的最小厚度、混凝土保护层、裂纹限制尺寸等。

一般情况下,我国桥梁评估的主要内容包括承载力评估、耐久性评估和实用性评估等。

1. 评估的内容

(1) 承载力评估:桥梁各组成部分在强度、刚度等方面是否满足现有运输荷载的要求。有时还要对其能否适应运输荷载进一步发展作出评估。

(2) 耐久性评估:耐久性包括建桥材料的耐久性和结构抗疲劳损伤的性能,即迄今为止的疲劳损伤度及剩余寿命。这里说的耐久性一般指后者。

(3) 实用性评估:主要指车辆通过桥梁时的走行性,即走行的安全性和乘客的舒适度等。

2. 评估的依据

评估的依据包括以下几方面。

(1) 委托方和被委托方的有效合同、协议及其附件。

(2) 被检测评估桥梁所在地政府、政府主管部门及质检部门对该桥有关的指令、意见和要求等。

(3) 委托方向被委托方提供的该桥的原设计文件、施工文件及竣工验收文件等。

(4) 国家部、委颁布的有关技术规范、标准等。在采用有关规范、标准时应注意

以下三点。

①有关技术规范、标准,几年内会进行修订,会颁布新的版本,故应采用新版本。

②我国桥梁工程设计规范、施工规范及其他有关的规范、标准,基本上由交通部和铁道部(现为交通运输部)颁布,采用时一般应遵守如下原则:公路桥和公铁两用桥的公路桥部分应采用公路桥的有关规范;铁路桥和公铁两用桥的铁路桥部分应采用铁路桥的有关规范。如果遇到公路桥有关规范的某些条文不够详细或其他特殊的原因,公路桥可以引用铁路桥规范的有关条文,但不能反之。这是由于铁路桥的活载荷大,冲击及疲劳影响大等原因,铁路桥的要求是更严格的。

③引用规范、规程和标准等,只有我国各部委颁布的才具有法律效力,国外的和其他的有关规范、规程和标准只能参考,不具备法律效力。

3. 相关评估成果

针对有关的评估内容,经过几十年的研究,很多研究者在桥梁检测及损伤识别方面取得了一定的成果。

一般诸如超声波、X射线等无损检测手段对于损伤识别的效果较好,不仅可以较为精确地定出损伤的位置,还可以确定损伤的程度^[5]。但是对于大型的结构(如大型桥梁)直接采用此方法所花费的人力、物力太大,因此必须先寻找某一有效的方法进行损伤定位和大概的损伤程度估算。

目前我国现行的检测手段一般为静力测试与动力测试相结合,动力测试的结果一般多为位移量(速度或者加速度),模态识别的结果尤为如此。然而在大多数情况下局部的损伤难以在此类数据中反映出来。针对位移模态对局部损伤不敏感的特点,一些学者提出并发展了应变模态/曲率模态,而且将其应用于结构的损伤识别^[6-8]。

目前对于损伤检测的研究已经有几十年了,取得了许多相关的成就。马宏伟、W. Doebeling、Hans Rainer等人曾发表文章,对这些方法进行了总结^[9-11]。文章中总结了近20年来众多学者的研究成果,但是文章中也指出,大多数方法的问题在于实际测试的可操作性。

目前桥梁损伤识别的方法比较多,而无损检测方法基本都是基于振动的方法。动力破损评估法是近几十年来国内外研究非常活跃的方向,产生了大量的成果,这些方法大多基于参数识别。

1.5 基于固有频率的结构损伤识别

仅通过频率的改变来识别损伤,一般在结构损伤较小时效果不明显,但是在损伤较大时,此方法是可行的。O. S. Salawu曾对损伤识别频率法进行了综合评述,他将1997年以前基于频率识别损伤的方法进行了系统深入的总结^[12]。Hearn G.等也基于不同的途径进行了具体的分析^[13-15]。

频率法识别的优点在于测试简单,分析方法成熟,精度高。如果测试的时间足够长,其分析精度可以达到万分之一甚至更高,可以很好地将损伤带来的频率变化反映出来。频率法只需要测试一个或少数几个点就可以很方便地得到所需的数据。当有些结构形状较为复杂,有些位置不适合布置测试点时,基于模态识别的方法就很难使用,此时频率法就可以发挥较为显著的作用。

1979年 P. Cawley 和 R. D. Adams 提出了通过结构固有频率改变率的数据进行损伤识别^[13],认为结构损伤后频率的改变仅取决于损伤的位置函数和刚度的损伤程度,得到两阶模态频率改变率的比值只是损伤位置的函数,即

$$\frac{\delta\omega_i}{\delta\omega_j} = \frac{g_i(r)}{g_j(r)} = h(r) \quad (1-1)$$

式中: r 为结构的坐标参数, $\delta\omega_i$ 、 $\delta\omega_j$ 为第*i*、*j*阶模态频率的改变率, $g_i(r)$ 和 $g_j(r)$ 为相应损伤的位置函数, $h(r)$ 为频率改变率比值与损伤位置相关的函数。

然后通过数值方法进行分析。通过大量的测试及数值结果数据进行分析,可以得到损伤的情况。

1991年 Hearn G. 和 Testa R. B. 指出结构损伤各阶频率变化归一化后,两阶频率变化的比值是结构位置的函数^[14]。

$$\frac{\delta\omega_i^2}{\delta\omega_j^2} = \frac{\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_N^T(\boldsymbol{\phi}_i) \mathbf{K}_N \boldsymbol{\varepsilon}_N(\boldsymbol{\phi}_i)}{\boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_i}}{\frac{\boldsymbol{\varepsilon}_N^T(\boldsymbol{\phi}_j) \mathbf{K}_N \boldsymbol{\varepsilon}_N(\boldsymbol{\phi}_j)}{\boldsymbol{\phi}_j^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_j}} \quad (1-2)$$

式中: $\boldsymbol{\phi}_i$ 、 $\boldsymbol{\phi}_j$ 为模态振型函数, \mathbf{K}_N 为刚度矩阵, \mathbf{M} 为质量矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}_N(\boldsymbol{\phi}_i)$ 为结构的变形,作者提出的方法是将各种损伤情况下对应的频率变化均计算出来,以便进行损伤的预测。

胡宁等人提出了利用静态响应并结合频率测试数据进行结构损伤识别^[15]:

$$\Delta\omega_j^2 = \frac{\boldsymbol{\phi}_j^T \Delta\mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_j}{\boldsymbol{\phi}_j^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_j} \quad (1-3)$$

式中: $\Delta\mathbf{K}$ 为刚度矩阵改变量, \mathbf{M} 为质量矩阵, $\boldsymbol{\phi}_j$ 为振型函数, $\Delta\omega_j$ 为频率改变值。

再利用损伤识别特征量匹配(Damage Signature Matching)对损伤位置进行判断,即通过建立数值(有限元)模型对所有可能的损伤情况计算出一系列与响应有关的特征量与实测所得进行比较,利用静力响应与固有频率信息,按如下的特征向量 $\{\mathbf{DS}\}$ 判断损伤可能性:

$$\{\mathbf{DS}\} = \frac{\{\Delta u\}}{\Delta\omega_j^2} \quad (1-4)$$

式中: $\{\Delta u\}$ 为结构损伤前后位移变化向量。