

结构健康监测 先进技术及理论

■ 吴智深 张建 著

Advanced Structural Health
Monitoring Technology and Theory



科学出版社

结构健康监测先进技术及理论

吴智深 张 建 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从结构健康监测的起源和发展历程、健康监测系统的构成等基本知识讲起,在全面论述结构健康监测理论与工程应用的同时,重点从以下方面介绍了结构健康监测领域的最新进展和成果。一是率先提出了结构区域分布传感理念,即采用长标距传感单元与网络覆盖损伤可能发生的结构关键位置和影响范围,然后进行高精度、动静态、宏微观监测与多层次分析发现结构早期损伤与隐患;二是针对结构区域分布传感的需求,发明了一专多能,充分反映结构动静态、宏微观特性的长标距传感单元构建方法,进一步开发了基于光纤光栅、光纤布里渊散射、碳纤维等区域分布传感器技术,并通过长标距设计、纤维增强封装、抗滑移防脆断锚固、温度自补偿与应变增敏等技术保证其高性能长寿命特征;三是系统论述了仅利用区域分布传感器技术进行结构参数、损伤与荷载全面识别,以及进行结构异常分析预警、性能评价和预测三层次结构健康直接评估的综合成套技术和理论;四是针对工程应用中结构健康监测系统错综复杂难以构建和管理这一难题,针对各类结构特点开发了包含数据采集、传输与存储、数据处理等子系统,实现结构区域分布传感—全面识别—直接评估的全自动化健康监测系统,并从单体结构扩展到不同类型结构群的健康监测系统构建。全面论述了结构健康监测领域的基本知识,并以结构区域分布传感为主线,贯穿于全书系统阐述了结构健康监测领域的先进理念、方法、理论与技术。

本书可供大专院校高年级学生和研究生学习健康监测领域基本知识,还可供土建、交通、水利等相关领域科研与工程技术人员追踪结构健康监测领域最新热点和先进技术,并在工程实际中切实推广应用。

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测先进技术及理论/吴智深,张建著. —北京:科学出版社,2015
ISBN 978-7-03-042989-6

I. ①结… II. ①吴… ②张… III. ①建筑结构—安全监测 IV. ①TU317

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第309300号

责任编辑:杨琪 程心珂/责任校对:李影

责任印制:赵博/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

北京盛源印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:593 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

发达国家正面临着工程结构维护管理成本高度膨胀、资金短缺等瓶颈。我国基础设施体量更大，加上结构短命等问题，安全保障及维护管理费用的压力将愈发严重。为此，利用结构健康监测（structural health monitoring, SHM）手段尽早发现结构损伤和隐患，实现结构“治小病防大病”，保障工程结构安全并实现全寿命周期成本（life cycle cost, LCC）最小化或效益/成本比最大化的预防/预知性维护管理被国内外寄予厚望。通过近 30 年的探索、开拓和实践，基础设施领域的 SHM 也得到了迅猛发展，国内外研究开发的各类先进 SHM 技术在应对突发事件等的基础设施安全管理方面发挥了积极作用。同时，国内外研发应用热情不断高涨，基础设施的 SHM 与智能化已成为土建交通工程相关国内外学术会议、学协会年会的主要主题之一。作者等 2003 年组织发起的 SHM 及基础设施智能化大型国际会议（ISHMII）已在五大洲成功召开 7 次，经过激烈角逐，美国联合团队获得 2019 年承办权。

尽管如此，国内外推动发展的大量 SHM 技术还被普遍认为无法有效实现对结构健康状态监测评估。通过各类传感器获得的海量数据还很难有效的发现结构损伤，评价结构健康状态和性能指标。结构健康监测的内涵是实现安全运营和健康长寿命管理手段。国内外已基本解决了病状明显的病症或已处于晚期的疑难病症结构安全监测问题，但早期病状不明显，中期晚期发展迅猛的疑难病症安全监测及健康长寿命管理监测是公认的难题。同时，一个 SHM 系统通常包含种类繁多的传感器去监测结构各类动静态响应及特性，从而产生系统复杂、成本昂贵问题。再者，应用于土木工程结构，传感监测体系的长期稳定性不足问题也是影响 SHM 应用效果的重要因素。对此，我们致力于从源头上解决上述诸问题的研究工作。首先是针对以应变传感（包括光纤分布传感）为代表的局部传感技术太局部，捕捉损伤犹如大海捞针，而以加速度传感为代表的整体传感技术又太宏观，捕捉损伤犹如通过人体脉相发现疑难病症，我们提出了结构区域分布传感理念，其基本思想类似于对人体关键部位（心脏、肺部等）的健康诊断。通过结构非线性、脆弱性及可靠性分析，我们可以找到结构的关键区域。开发具有损伤覆盖能力的长标距传感单元（几厘米到几米长度或几平方厘米到几平方米面积）进行串联覆盖一个结构关键区域（几米到几十米长度或几平方米到几十平方米面积），各区域再连结成网形成整个结构的关键区域分布传感。这样的区域分布传感即可实现类似于人体对自己关键部位的自感知功能。然而，人体的自感知远不能达到发现早期病变目的，还需要到医院接受 CT、核磁共振等多层次检查。工程结构不能去“医院”接受集中检查，所以需要“医生”携带检查装置去现场。为此，上述的结构区域分布传感如能获得类似于人体多层次检查的数据（要求区域分布传达到一专多能、充分反映结构微宏观、静态特性），我们便可以通过获得传感数据进行结构损伤、变形转角等结构响应以及动力特性分析，进而达到实现结构损伤识别及健康评估目标。10 多年来，基于上述的结构区域分布传感监测理念，我们发明开发了满足上述结构区域分布

传感的系列传感技术,建立了基于结构区域分布传感的动力分析理论以及实现结构参数、损伤与荷载全面识别的成套理论。同时,我们也开发了基于结构区域分布传感的建筑、桥梁、隧道等结构单体和结构群的监测评估系统构建方法,以及进行结构异常分析预警、性能评价和预测等三层次结构健康直接评估方法及标准化体系。

本书较全面地介绍了上述的结构区域分布传感监测体系。同时,为了更好地反映结构健康监测的全貌,我们对结构健康监测学科的发展状况以及结构监测中的各类传感技术进行了总结。另外,为了对工程结构维护管理中的结构检测手段与健康监测手段进行适当的比较,我们也对结构无损检测技术的新动态进行了一定的总结。期待此书能对相关专业的大专院校高年级学生和研究生、从事工程结构安全与维护管理工作的科研和技术人员以及不同领域的相关人员有所帮助。

本书内容是作者及指导的学生包括黄璜、李素贞、杨才干、洪万、唐永圣、沈圣、张浩、张青青、N.H.M. Kamrujjaman Serker、Adekunle Philips Adewuyi 以及团队成员孙安、万春风博士等知识积累和学术成果的总结。黄璜博士、方达工程师、洪万博士,以及许德旺、周立明、朱学武、夏琪、程玉瑶等在读博士生和硕士生为本书的文献整理、校对等具体工作付出了辛勤劳动,在此向他们表示诚挚的感谢。

本书虽经长达近三年时间的编写、修改与校对,但不足之处仍很多,恳请读者与专家同仁不吝赐教、批评指正。

吴智深

2015年春于南京

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 结构健康监测学科的兴起	1
1.1.1 工程结构的维护管理系统	1
1.1.2 结构检测技术与管养检查手段	11
1.1.3 结构健康监测概念	16
1.2 结构健康监测系统的构成	19
1.3 结构健康监测的应用效果	21
1.3.1 结构长寿命周期安全与成本最优	21
1.3.2 大型复杂结构的安全保障与新型设计方法验证	23
1.3.3 结构管养的自动化和智能化	23
1.3.4 受灾结构的信息收集与快速评估	25
1.4 结构健康监测研究现状及面临挑战	26
第 2 章 土木工程结构检测及监测传感技术	34
2.1 工程结构维护管理中的无损检测技术	34
2.1.1 混凝土结构中检测方法	34
2.1.2 钢结构中的检测方法	41
2.1.3 隧道中的检测	42
2.1.4 高速公路中的检测	43
2.2 工程结构监测传感技术	44
2.2.1 应变传感技术	45
2.2.2 加速度传感技术	67
2.2.3 位移传感技术	72
2.2.4 温度传感技术	76
2.2.5 动态图像解析监测技术	77
2.2.6 混凝土劣化监测技术	79
2.2.7 其他传感技术	80
第 3 章 结构区域分布传感理念与长标距传感技术	84
3.1 结构区域分布传感理念	84
3.1.1 结构区域分布传感理念	84
3.1.2 结构区域分布传感网络构建	87
3.1.3 钢筋混凝土梁的区域传感示例	91
3.1.4 苏通大桥辅助航道桥区域传感示例	93

3.1.5	城市结构群的区域分布传感概念	94
3.2	长标距光纤传感技术	97
3.2.1	长标距光纤传感概况	97
3.2.2	长标距光纤传感器的设计与安装方法	101
3.2.3	长标距光纤传感器的增敏技术	107
3.2.4	长标距光纤传感器的耐久性	111
3.3	长标距碳纤维应变传感技术	119
3.3.1	碳纤维应变传感器的横向效应	119
3.3.2	长标距碳纤维应变传感器	121
3.3.3	静态测试性能	125
3.3.4	动态测试性能	127
3.3.5	长期性能	128
3.4	自传感 FRP 构件	129
3.4.1	自传感 FRP 构件的制备	130
3.4.2	应变传感性能	131
3.4.3	力学性能	133
3.4.4	自传感筋的应用方法	136
第 4 章	基于监测数据的结构状态参数与损伤识别	144
4.1	挠度和转角识别	144
4.1.1	加速度积分法	144
4.1.2	应变积分法	145
4.1.3	共轭梁法	146
4.1.4	复杂应力状态下结构挠度反演	155
4.2	应变模态分析理论	158
4.2.1	点式应变模态理论	158
4.2.2	长标距应变(宏应变)模态理论	160
4.2.3	位移模态与长标距应变模态相互转换	167
4.3	结构性能退化识别	170
4.3.1	结构裂缝监测和宽度识别	171
4.3.2	基于应变比值的结构损伤识别方法	177
4.3.3	基于加速度模态的损伤识别方法	179
4.3.4	基于长标距应变模态的损伤识别方法	184
4.3.5	基于长标距应变模态向量的损伤指纹	186
4.3.6	结构中和轴高度变化识别	193
4.3.7	结构支座变化识别	196
4.3.8	移动荷载下结构损伤识别	198
4.3.9	基于区域分布传感的二阶段损伤识别	201

4.4	荷载识别	206
4.5	结构模型修正	217
4.5.1	有限元模型修正的一般过程	217
4.5.2	基于区域分布传感的结构模型修正	219
4.6	基于纤维模型有限元分析的结构状态参数及损伤识别	228
4.6.1	分析原理	228
4.6.2	单元的结构状态参数识别	229
4.6.3	针对损伤状态的结构分析	236
4.7	美国某钢-混凝土组合梁桥应用实例	240
4.7.1	长标距光纤传感布设	243
4.7.2	现场测试与结构识别	244
4.8	日本某预应力箱梁桥的应用实例	249
4.8.1	长标距光纤应变监测方案	251
4.8.2	定期车载试验的结果	253
4.8.3	桥体损伤的结果	259
第5章	结构性能评估方法	264
5.1	结构性能评估概述及国内外研究现状	264
5.1.1	性能评估方法概述	264
5.1.2	中国桥梁性能评估相关规范研究现状	265
5.1.3	美国桥梁性能评估相关规范研究现状	270
5.1.4	日本桥梁性能评估相关规范研究现状	276
5.1.5	其他国家桥梁性能评估相关规范研究现状	281
5.1.6	中国隧道性能评估相关规范研究现状	282
5.1.7	性能评估发展趋势	284
5.1.8	结构健康监测的规范化进程	287
5.1.9	结构区域分布传感方法与理论在规范方法中的应用	288
5.2	基于区域分布传感的三层次结构性能评估方法	289
5.2.1	方法概述	289
5.2.2	第一层次——结构异常分析与功能预警	291
5.2.3	第二层次——结构深层次性能评估方法	295
5.2.4	第三层次——结构性能寿命预测	299
5.3	中小桥梁快速测试与评估	306
5.3.1	基于长标距传感器和区域分布传感技术的桥梁快速评估	306
5.3.2	基于冲击振动的结构快速评估	310
第6章	基于结构(群)区域分布传感的结构健康监测系统	315
6.1	结构健康监测系统概述	315
6.1.1	系统的组成架构	315

6.1.2	系统监测对象和监测内容	317
6.1.3	结构健康监测系统分类	321
6.1.4	系统的一般构建流程	322
6.1.5	基于物联网技术的结构群健康监测系统	326
6.2	数据子系统的设计和实施	332
6.2.1	数据子系统的构成	332
6.2.2	数据的采集	333
6.2.3	数据的预处理	339
6.2.4	数据的传输(通信)	341
6.2.5	数据存储管理	349
6.2.6	数据子系统的实施	351
6.3	结构分析子系统的设计与实施	352
6.3.1	结构分析子系统的软件设计	352
6.3.2	结构分析软件工作机制(子模块设计实施)	356
6.4	隧道健康监测系统设计及实施	360
6.4.1	监测系统总体设计思路	360
6.4.2	某盾构隧道监测系统示例	363
6.4.3	隧道运营初期监测数据及分析	366
6.5	苏通大桥监测实例	369
6.5.1	传感子系统	369
6.5.2	数据采集、传输、存储子系统	371
6.5.3	数据预处理子系统	372
6.5.4	结构(数据)分析子系统	375
6.5.5	结构评估子系统	377
6.5.6	结构管养决策子系统(结果发布)	378
6.6	结构群健康监测物联网监测实例	379
	参考文献	386

第 1 章 概 述

1.1 结构健康监测学科的兴起

1.1.1 工程结构的维护管理系统

我国正处于新型城镇化和工业化快速发展时期，基本建设投资以占国民生产总值约 15%~20%的比例稳步上升，大批重大基础设施如跨江跨海的大跨桥梁结构、作为城市地标的高层建筑结构、举办大型体育赛事的大跨空间结构、开发江河能源的大坝结构、开采海洋油气资源的海洋平台结构、使用核能发电的核电站结构等已完成或正在建设。在桥梁方面，截至 2014 年底，我国公路桥梁总数已达 75.71 万座，仅黄河上已建和在建的大桥已达 228 座，长江上达到 162 座。我国建成的悬索桥、斜拉桥、拱桥和梁桥这四类桥梁的跨径均已居世界同类桥梁跨径的前列。在建筑结构方面，我国每年大约 20 亿平方米的建筑总量，接近全球年建筑总量的一半，世界排名前 24 的摩天大厦有三分之二在中国（含港台地区）；在铁路方面，我国铁路营业里程达到 10.31 万千米，高铁运营里程达到 1.3 万千米，居世界第一，其中京沪客运专线从北京至上海全长约 1318 千米，行驶时间仅需 5 个小时。在其他方面，公路、港口、隧道、水电、能源工程等建设蓬勃发展，国家的治山、治水、沿海、治砂工程也在大规模兴建。这些大型土木交通水利工程结构的设计寿命长达数十年、上百年。在它们的漫长服役周期内，由于环境侵蚀、日常服役荷载甚至超载原因导致结构的性能逐渐发生退化并且随时可能遭受地震、台风等极端自然灾害的侵袭。因此，土木工程结构的安全、耐久与健康对保障其寿命与安全服役至关重要。

土木工程结构的安全问题（structural safety）依然严峻，仍然是学术界与工程界普遍关注的重点。据不完全统计，在我国公路网中，各类危桥数量达 7.96 万座，约占桥梁总数的 10.5%。这些病桥危桥承载能力低下，直接影响我国公路网的安全运行，并严重威胁行人与车辆的安全。例如，重庆綦江彩虹桥 1996 年 2 月 16 日竣工，1999 年 1 月 4 日垮塌；2000 年，台湾省连接高雄和屏东的高屏大桥突然一个桥墩、二孔桥面约一百米断裂坍塌，造成约 30 人受伤；2001 年，宜宾南门大桥突然坍塌；2010 年 7 月河南省栗川县的伊河汤营大桥因遭遇特大暴雨整体垮塌；2011 年 7 月 15 日，杭州钱江三桥南端桥面部分塌落。在国外，结构灾难事故同样频繁见诸各类报道中。20 世纪 80 年代英国 Man 河上某预应力混凝土桥因预应力筋严重锈蚀导致整座桥梁倒塌；2007 年 8 月，美国明尼苏达州一座跨越密西西比河的钢筋混凝土大桥由于构件疲劳破坏导致整桥坍塌。这些灾难性的事故不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失，而且引起了公众舆论的广泛关注，产生了极其恶劣的社会影响。桥梁破坏的主要原因粗略来说可以分成两种主要类型，即主观失察原因和客观触发原因。主观失察原因具体是指在设计、构造、施工、养护及材料中的人为失误，而客观触发原因具体来源于外部干扰，例如，超载、撞击、洪水、强风、爆炸、火灾、滑坡和恐怖袭击，等等。如何保证城市基础设施（公路、桥梁、隧道、建筑等）在服役过

程中乃至在灾害条件下的结构安全已经成为一项迫切需要解决的科学问题。

土木工程结构的耐久性 (structural durability) 提升刻不容缓。我国《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008) 对结构耐久性的定义为: 在设计确定的环境作用和维修、使用条件下, 结构构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力。结构的耐久性按照《建筑结构可靠度设计统一标准》的定义是指结构在规定的 work 环境中, 预定的时期内, 其材料性能的恶化不致导致结构出现不可接受的失效概率, 在正常维护条件下, 结构能够正常使用到规定的设计使用年限。发达国家为混凝土结构耐久性投入了大量科研经费并积极采取应对措施。加拿大安大略省的公路桥梁为对付除冰盐侵蚀及冻融损害, 钢筋的混凝土保护层最小厚度从 20 世纪 50 年代的 2.5cm 逐渐增加到 4cm、6cm 直到 80 年代后的 7cm, 而混凝土强度的最低等级也从 50 年代的 C25 增到后来的 C40, 桥面板混凝土从不要外引气剂、不设防水层到必须引气以及需要设置高级防水胶膜并引入环氧涂膜钢筋。再以日本为例, 在 1970 年之前, 日本的道路桥梁使用寿命为 30~40 年; 在 1971 年, 日本对桥面板设计标准进行了更新, 1973 年又对道路标准进行了更新, 随后在 1984 年对盐蚀标准进行了更新, 1989 年对碱性骨料相关条款进行了更新, 2001 年对疲劳设计标准进行了更新, 同时制定了有关耐久性 & 寿命提升技术的各类规范与指南。这些措施逐渐提高了桥梁的使用寿命, 使其基本能够达到 100 年, 极大促进了结构长寿命化技术的发展。以上叙述的日本土木工程结构的耐久性状况如图 1.1 所示。我国在结构耐久性方面进行了较多研究, 但实际工程中结构短命现象严重。建设部 20 世纪 80 年代的一项调查表明, 国内大多数工业建筑物在使用 25~30 年后即需大修, 处于严酷环境下的建筑物使用寿命仅 15~20 年。民用建筑和公共建筑的使用环境相对较好, 一般可维持 50 年以上, 但室外的阳台、雨罩等露天构件的使用寿命通常仅有 30~40 年。桥梁、港工等基础设施工程的耐久性问题更为严重, 由于钢筋的混凝土保护层过薄且密实性差, 许多工程建成后几年就出现钢筋锈蚀、混凝土开裂。海港码头一般使用十年左右就因混凝土顺筋开裂和剥落, 需要大修。影响混凝土结构耐久性的主要因素包括混凝土的碳化、混凝土碱集料反应、混凝土的冻融破坏、侵蚀性介质 (硫酸盐、海水等) 的腐蚀、机械磨损、钢筋锈蚀等。

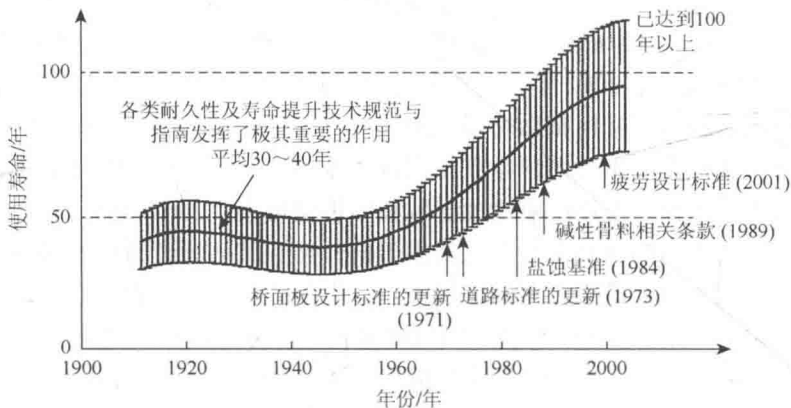


图 1.1 日本道路桥使用寿命与设计标准的变迁^[1]

土木工程结构的健康 (structural health) 是社会发展的必要需求。工程结构的安全、耐久与健康三个概念密不可分互相关联。结构健康首先要保证安全和耐久,与此同时,工程结构的众多微小病症会对结构的健康构成威胁并具有不同程度的结构损伤破坏的潜在风险。以桥梁为例,实际工程中桥梁结构的健康问题主要表现为以下几类:①混凝土主梁开裂问题。对于大跨度钢筋混凝土桥,经常存在包括设计、构造、材料和施工中的主观失察因素引起的裂缝以及由包括超载、温度荷载、混凝土收缩和徐变等客观触发因素引起的裂缝。例如,于1982年建成的济南黄河大桥,顶板裂缝1386处、底板裂缝11处、腹板裂缝52处、隔板裂缝1794处;于1988年建成的重庆石门长江大桥,顶板裂缝233处、腹板裂缝84处、隔板裂缝78处。^[2]②桥梁主跨的过度下挠问题。对于大跨度预应力混凝土梁桥,最大的耐久性问题就是主跨的过度下挠,而造成这一变形问题的原因与混凝土梁体开裂有关。结构下挠会导致箱梁底板产生更多的开裂,进而降低结构刚度,最终产生更大的下挠,形成恶性循环。例如,建于1970年的跨径143m的英国Kingston大桥,1998年测得的下挠为300mm;建于1992年的跨径1140m的三门峡大桥,2002年测得的下挠为220mm。③钢桥疲劳裂缝问题。在我国大跨度悬索桥和斜拉桥使用较多的正交异性钢桥面,如果构造不良和焊接工艺不当,在使用过程中因为车辆反复经过引起局部集中应力,易于造成纵肋与面板焊缝以及纵肋与横肋交叉处的疲劳裂缝。例如,建于1997年的虎门大桥,2007年起正交异性钢桥面逐渐暴露出面板和纵肋焊接处的疲劳裂缝问题,对该桥的正常通行产生了严重的影响,也引起了中国桥梁界极大的关注。其他因素如钢结构的腐蚀等也会不同程度地影响结构的健康。及时发现和解决结构的健康问题是实现结构安全服役及长寿命的必要手段。

在结构的安全、耐久和健康存在诸多问题的同时,国内外特别是各发达国家基础设施的养护管理费用庞大。发达国家大规模工程结构已进入老龄化时代。图1.2和图1.3所示为美国和日本两国新建桥梁数目随年份的推移历程,可以看出美国和日本分别在20世纪80年代、21世纪第二个十年进入了大量桥梁的老龄化阶段。这些基础设施服役过程中所需的庞大维护费用导致预算不足。图1.4为日本政府对公共设施的投资预算,可以看出,2010年以后投资预算的总额基本不变,但基础设施的更新费逐年大幅度增加,预计到2037年基础设施的维护管理等费用需求将超过投资预算总额,从而导致财政赤字。德国政府委任的委员会经调查研究后指出,德国在今后的15年里,每年须要斥资72亿欧元来逐步翻新基础设施,比现有的预算要多出70%。欧洲桥梁管理(BRIME)项目的统计表明,目前欧洲各国每年用于桥梁维护的费用占有桥梁重建费用的0.5%~1.0%;而就美国纽约州交通局所辖桥梁而言,这个比例高达8.5%。据美国联邦高速公路管理局(FHWA)数据,在美国的总共约590000座桥梁中,有大约152136座有损伤或功能问题。在美国所有的桥梁中,超过50年桥龄的桥梁超过23万座。这导致美国每年在修复桥梁上实际需要170亿美元,但其预算仅为105亿美元,这些信息反映在搜集各类资料绘制的图1.5中。我国的大规模土建交通基础设施的兴建相对较晚,但维护管理费用庞大且逐渐迅速攀升导致其压力同样存在。交通部数据显示,我国在“十五”“十一五”和“十二五”期间基础设施的维护管理费用分别为87亿、189亿和300亿元。

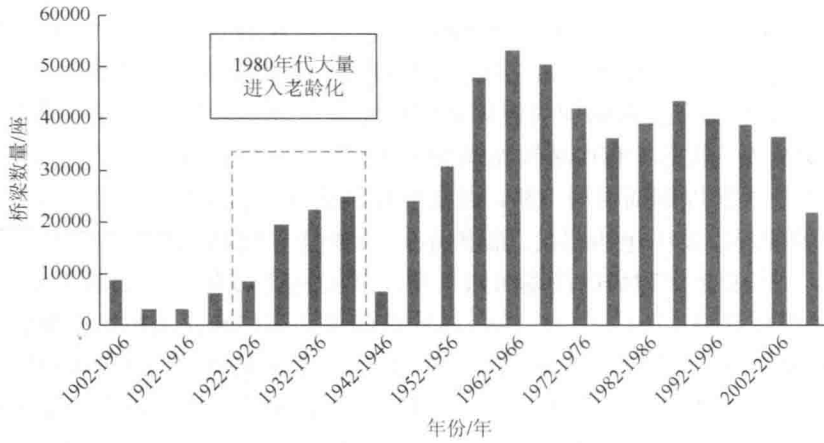


图 1.2 美国桥梁新建数目推移^[3]

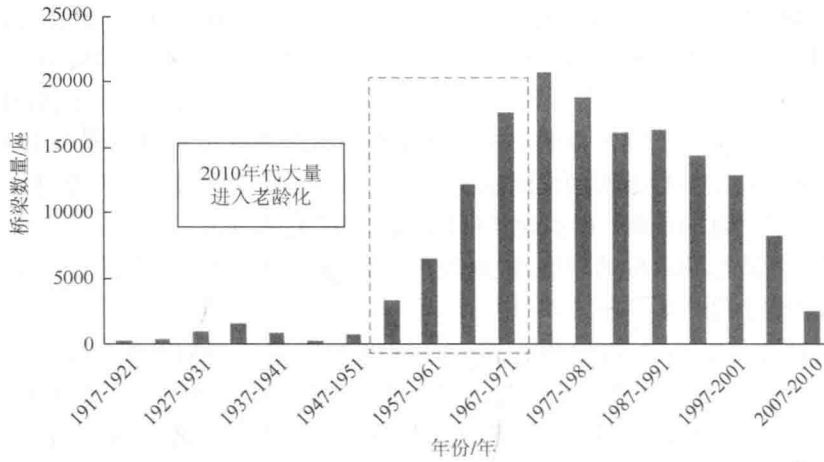


图 1.3 日本桥梁新建数目推移^[3]

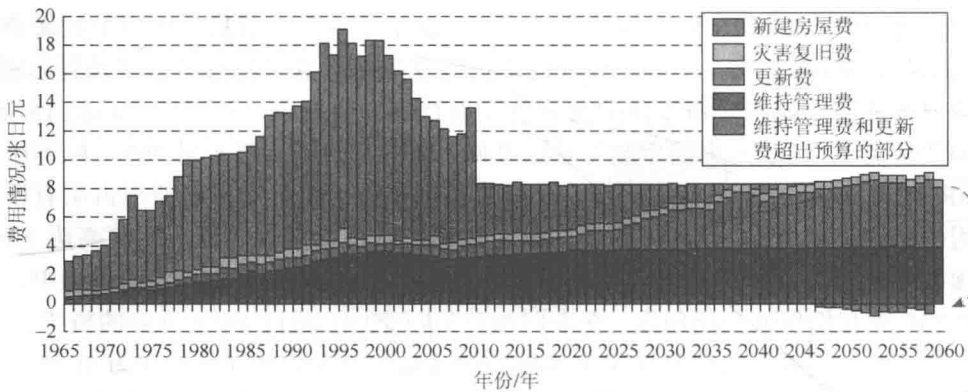


图 1.4 日本基础设施投资预算与维护费用情况^[4]

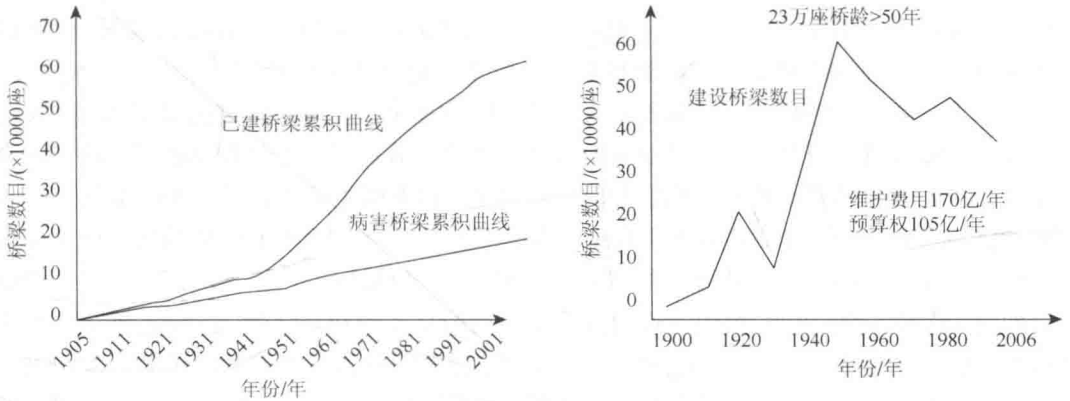


图 1.5 美国桥梁维护费用与预算情况

综上所述,一方面基础设施的安全、健康与耐久问题严重,迫切需要维护,另一方面国内外特别是发达国家的维护费用预算严重不足。为解决这一对互相矛盾的难题,需开发和采用先进的技术与管理系统来进行基础设施的有效维护和管理,在保证结构长寿命周期内安全服役的同时,最优控制结构服役周期内的维护成本。这里首先就结构维护管理领域内众多概念,包括资产管理、结构全寿命周期成本最小化、各类型维护管理理念创新、结构长期性能评价与预测等进行介绍。

1) 资产管理

基础设施资产管理 (asset management) 是指,将基础设施作为资产运营,客观精确地把握和评估其健全状况,预测其中长期资产状况,在预算制约的前提下实现优化管理。在基础设施资产管理中,决定进行劣化预测和维持加固的实施时期的最基本的要素,是对结构物变化状态的现状评估。资产管理概念起源于经济学,现在已被引入进行土木工程结构的综合管理。在这一领域,各个国家相关工程与科研人员对此进行了大量的研究,使其逐渐成为土木工程领域一个新的研究热点。资产管理的概念在美国、澳大利亚等国兴起较早,随后日本、欧洲各国都逐步重视起来,我国已经具备了将基础设施管理上升到资产管理的理论基础,但是基础设施资产管理技术的综合研究尚处于起步阶段。下面简述“资产管理”概念的发展历程。

美国联邦高速公路管理局 (FHWA)^[5]和美国国有公路运输管理员协会^[6]首先引入公路基础设施资产的系统化管理方法,陆续发布了资产管理初级读本和资产管理指南,系统阐述了相关的概念、原理和组成内容,明确了资产管理的任务并制定了体系框架。它们开创了交通设施资产管理的先河,并广泛开展国际范围内的充分合作,为基础设施资产管理的发展提供了可靠依据,从此其他国家和机构对于基础设施资产管理的研究也都陆续展开。

澳大利亚和新西兰拥有着最广泛被认可的资产管理以及公路管理条例,应用综合信息对公路桥梁系统进行管理、优化以及预测的范围在不断地扩大。从20世纪80年代末起,他们就开始对基础设施资产进行经济估值,1997年以后,所有公路部门都需要在年度经济报表中明确公路资产。通过十多年的合作,两国在不断地推进资产管理项目。1997年,澳大利亚公路部门发布《增强资产管理战略实践手册》,其中列举了38个重点研发项目,包括开发路况测量、路况恶化模型,进行长期性能测试的标准等。在该手册的指导下,许

多相关机构均已经制定了资产管理手册以及详细的实施流程,但由于各方标准不一,所以澳大利亚公路部门需要建立统一的管理接口,以便于更好地实施计划^[6]。

在日本,由于经济衰退,日本政府为了减少财政赤字,降低基础设施投资和成本,对基础设施产业进行市场化改革,以分拆民营化为主要形式,制定了财政投融资和特定财源制度等一系列的与基础设施建设相配套的财政措施。日本国土交通省发布《1998年度日本运输经济报告》指出要建立高效的综合运输基础设施资产管理系统,这是基础设施建设部门和交通运输部门实现共同决策、协调发展、科学管理的起点。

同时,欧洲各国也纷纷意识到基础设施资产化的重要性和必要性。欧洲发展工作小组发布的《资产管理系统工程描述(1999)》将资产管理的概念引入到基础设施管理中来,强调“不同于现有的传统的单设施的管理方法,明智的做法是关注整个路网实现有限资源的综合管理”。

资产管理的内涵是指将建筑、桥梁、隧道、道路、高铁、煤气水管网等各类型基础设施作为一种资产进行考虑和管理。作为一种资产,基础设施的价值由其当前性能、剩余寿命等因素决定,因此需要有效的结构性能评价方法对其当前状态进行客观评价,对其中长期的性能状况与发展趋势具有预测手段。只有这样,在一定管养维护预算的条件下,才有可能在结构全寿命周期内进行优化管理。因应资产管理这一概念,各国基础设施管理部门建立了各类型数据库与管理系统,以对其进行系统的维护管理。有关桥梁管理系统(BMS)将在后面具体介绍。总的来说,资产管理概念与各类型管理系统尝试对规模庞大的基础设施进行时间与空间方位的最优化管理,下面叙述的全寿命周期成本最小和结构长期性能评估等具体措施都可囊括在资产管理这一基本概念和框架下。

2) 结构全寿命周期成本最小化

近年来欧美日等发达国家和地区为了降低基础设施在维修管理方面所花费的巨大费用,开始推行全寿命周期成本概念(life cycle cost, LCC)^[7],包括工程建设、管养、使用、拆除等经济成本以及环境成本、社会成本等成本最小化设计理念。全周期寿命成本最早由美国军方于20世纪60年代提出,应用于军用器材采办,并迅速推广到民用企业。从20世纪80年代开始,LCC方法逐渐应用到道路交通行业,人们开始研究建设项目的全寿命成本优化问题,从成本的角度提出全寿命管理的观念,综合考虑建设成本,选择全寿命成本最优的方案。全寿命周期分析的本质是要求在设计施工阶段,不论是事先采取防护措施还是以后“坏了再修”,都要做出经济预算和比较,承建者要对工程的“全寿命”负责到底,这样可避免“短期行为”给后人带来的麻烦与巨大经济损失。采用全寿命周期分析对桥梁工程评估的目的与标准是在保证工程寿命期的前提下,使综合花费成本最少,实现技术可靠、经济合理。

1998年9月,美国联邦高速公路管理局(FHWA)颁布的《面向21世纪的交通运输公平法案》定义全寿命周期(life cycle)为:全寿命周期分析是对一个项目整个生命周期进行分析(包括项目初始成本和折现的未来成本,如维修、用户、重建、复原、恢复和重铺费用)的过程,以评估项目的经济总价值。2003年美国交通研究委员会负责的NCHRP12-43项目——桥梁工程的全寿命周期成本分析(life-cycle cost analysis, LCA),采用三成本(机构成本、用户成本和易损性成本)模型对桥梁全寿命周期过程进行分析,

运用随机过程和蒙特卡洛模拟理论分析桥梁全寿命周期成本的不确定性,并应用于桥梁管理系统中,同时开发了桥梁全寿命周期成本分析的程序,应用于新建桥梁评估、维护决策时机选择、成本不确定性评估、新结构材料评估等方面,可以自动生成折现率报告、维护事件时间报告、维护事件成本报告、成本概率分布报告和成本比较分析报告。

20世纪90年代以来,桥梁全寿命周期成本的研究已经取得令人瞩目的成就,很多研究者提出了桥梁设计、养护和更新的寿命周期成本分析和寿命周期成本评估方法。在桥梁寿命周期成本的概念模型、基于已建桥梁结构的退化的寿命周期成本研究、基于最小期望寿命周期成本准则的桥梁养护计划优化实例等领域均有颇多建树。而在国内,研究人员们着力于基于效益-成本分析的桥梁设计目标可靠度所确定的分析方法、桥梁寿命周期成本的构成及其计算公式、加固桥梁与新建桥梁的寿命周期成本横向对比分析、引入价值工程概念、建立混合寿命周期成本优化模型等方面的研究。而结构的全寿命周期成本最小化与下面叙述的结构预防与预知型维护有着类似的思路。

3) 预防与预知性维护

根据结构服役过程中对结构进行维护的不同时期,可以将结构维护分为不同的类型(图1.6)。在传统方法中,都是在结构出现重大病害后,如局部失效或破坏后,才会对结构进行维护,这种维护一般称之为事后性维护(breakdown maintenance)。而桥梁发生重大病害后,其性能已经大大降低,基本无法完成基本服役,耗费巨资的修复也是于事无补或维护费用巨大。国内外学者逐渐认识到,对结构进行预防性维护是最优化结构全寿命周期成本的必经之路。预防性维护(preventive maintenance)最初起源于机械工程领域,它的意义是指在设备(如汽车、航空器、机械设备等)的整个寿命周期内,设法减低设备本身价值和维修等有关设备使用的一切维护费用,以及由于设备劣化而带来的损失等全部费用,用以提高企业的生产效能。如图1.7所示,土木工程结构在整个服役周期内随着时间的延长,其性能状况会逐步降低,若在发生结构破坏之后进行事后性维护,所需成本将急剧提高;形成鲜明对比的是,在结构性能降低到极限状态之前,若能够对结构进行预防性维护,提前发现微小病害并将其修复,可以非常有效地延长结构的服役时间,在预防结构“短命”的同时达到“增寿”的目的。

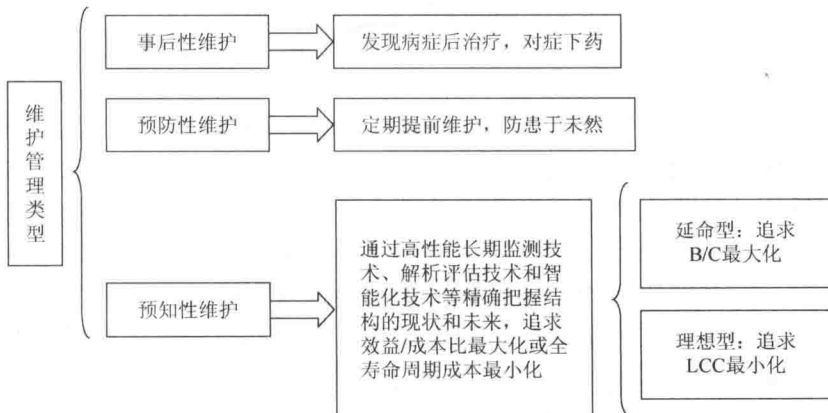


图 1.6 结构维护管理的分类

上述的结构预防性维护,其实质包括了预防和预知两种含义。为避免这一混淆,更清晰地表明结构维护的各层次,作者提出将结构的维护管理的类型细分为三类:事后性维护、预防性维护和预知性维护(图 1.6)。其中的事后性维护(breakdown maintenance)和前面介绍的意义一致;这里的预防性维护(preventive maintenance)是指在结构进入使用极限状态前定期地采取提前性措施对结构进行维护和管养。这里的预知性维护(predictive maintenance)是指对基础设施进行检测和监测,通过实测数据依靠结构识别和性能评估等手段来推演和预测结构性能未来状况,从而根据结构未来性能的预测状况来制定计划进行更有针对性和更为有效的基础设施维护和管理。在结构的预知性维护中,更加强调结构健康监测与性能评估在结构长期性能预测与基础设施全寿命周期管理中的重要角色。这里的预防性和预知性维护都是在结构未出现破坏时即进行结构维护,它们的不同是前者为单纯的定期的提前性维护,而后者为在基于结构监测等手段预测结构未来长期性能状况的基础上进行的针对性的提前性维护。如图 1.7 所示,结构预知性维护的基准在预防性和事后性维护的基准中间,根据预知性维护的分类不同,预知性维护的基准可在一定范围内波动。结构的预知性维护可以细分为两类(图 1.6),一是延命型,旨在追求功能和成本比值的最大化,例如在日本等发达国家因为管养费用不足,针对某些老旧结构不投入资金进行维护,而是在通过监测等手段保证结构安全的前提下继续使用,达到收益和成本比值(benefit/cost, B/C)的最大化;二是理想型,即通过监测手段预知结构全寿命周期内性能状况,进而制定维护方案实现结构全寿命周期成本的最小化。

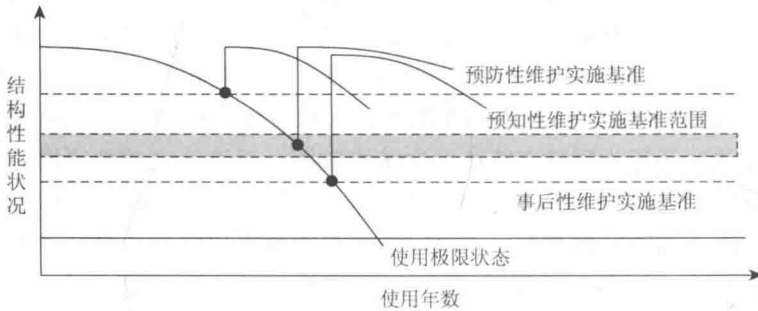


图 1.7 结构维护实施基准的不同

结构的全寿命周期成本如图 1.8 所示,简单地说它包括结构的初期建造成本和各阶段的维护管理成本。为实现结构的长寿命,一般采取图 1.8 所示的三种具体手段。一是在新建结构时采用长寿命化技术,其根本思想是通过增加初期成本来避免后期的大量成本投资,从而在实现长寿命的基础上降低全寿命成本;二是结构预防性维护,它是在新建结构完成后,通过定期地进行结构维护以避免结构损害发生后才进行的事后维护;三是结构的预知性维护,如上所述它又可分为延命型和理想型,延命型预知性维护通过监测数据推演结构未来状况来保证结构尽可能延长安全服役期从而实现追求 B/C 最大化,它适用于管养费用缺乏的情况,能够最大程度地实现结构功能和费用比值的最大化。理想型预知性维护通过监测数据推演结构未来状况并据此进行提前性的维护来实现结构全寿命周期内成本的最小化。以上三种具体手段