

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧

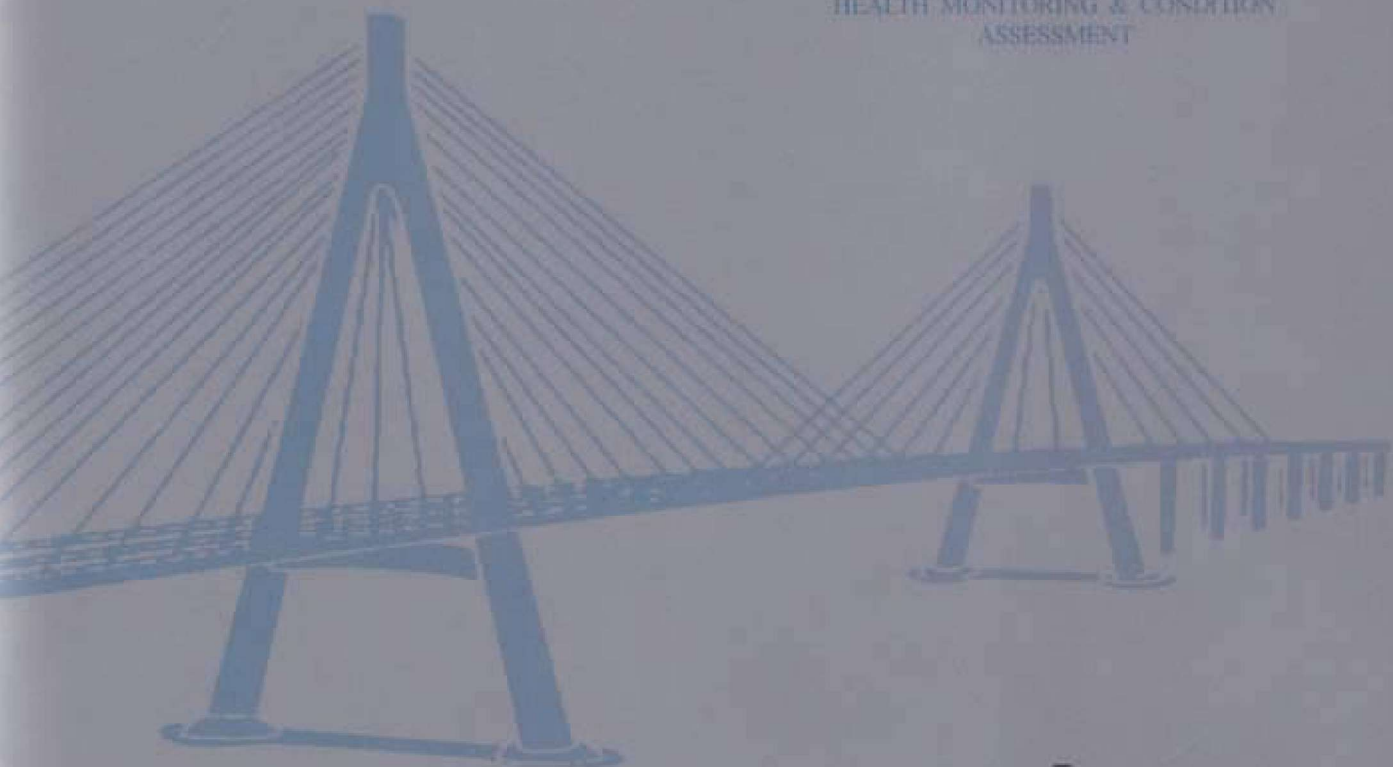


长大桥梁建养关键技术丛书

健康监测与状态评估  
桥梁结构

张宇峰 李贤琪  
编著

BRIDGE STRUCTURE  
HEALTH MONITORING & CONDITION  
ASSESSMENT



上海科学技术出版社

重大工程建设关键技术研究

总主编 孙 钧



长大桥梁建养关键技术

丛书

# 桥梁结构健康监测与状态评估



上海科学技术出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

桥梁结构健康监测与状态评估 / 张宇峰, 李贤琪编  
著. —上海: 上海科学技术出版社, 2018.1  
(长大桥梁建养关键技术丛书)  
ISBN 978-7-5478-3784-9

I. ①桥… II. ①张… ②李… III. ①桥梁结构—监  
测—研究 IV. ①U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 270834 号

**桥梁结构健康监测与状态评估**

张宇峰 李贤琪 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海中华商务联合印刷有限公司印刷  
开本 787×1092 1/16 印张 20 插页 4  
字数 470 千字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷  
ISBN 978-7-5478-3784-9/U·50  
定价: 150.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

## 内容提要

本书较全面、深入地介绍了桥梁结构健康监测与状态评估领域的理论、方法与应用。

全书共分7章。第1章介绍了桥梁结构健康监测的发展历史及设计、实施与维护的一般要求；第2~5章分别从传感、数据采集与传输、数据存储与处理、损伤识别与状态评估四个方面介绍了桥梁结构健康监测的主要技术，并给出了大量的具体案例；第6章介绍了桥梁结构健康监测系统运营与维护的组织原则、一般要求及常见故障的判断与修复方式；第7章则介绍了六个典型工程应用案例。

本书是著者科研团队多年来研究成果和工程应用的集成，特色是大量实际工程案例，主要面向从事桥梁结构健康监测系统设计、实施、维护与数据分析的工程技术人员，也可作为桥梁健康监测领域广大科技工作者和高等院校相关专业师生的学习参考书。

# 重大工程建设关键技术研究

## 总主编

孙 钧 同济大学教授,中国科学院院士

## 学术顾问

钱七虎 解放军理工大学教授,中国工程院院士

郑皆连 广西大学教授,中国工程院院士

陈政清 湖南大学教授,中国工程院院士

吴志强 同济大学教授,中国工程院院士

王 平 西南交通大学教授

刘斯宏 河海大学教授

杨东援 同济大学教授

长大桥梁建养关键技术丛书

## 编委会

主任

郑皆连

副主任

陈政清

委员(以姓氏笔画为序)

王用中 华旭刚 刘旭锴 孙利民 李永乐

李贤琪 张宇峰 张喜刚 陈宣言 邵旭东

胡建华 徐恭义 高宗余 韩振勇

本书

## 编审委员会

主任

符冠华

副主任

王军华 梁新政 杨 扬

执行副主任

张宇峰 李贤琪

审定人员

徐 剑 徐 嵩 施栋豪 刘冠国 王 卫

承 宇

## 重大工程建设关键技术研究

# 总序

近年来,我国各项基础设施建设的发展如火如荼,“一带一路”建设持续推进,许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建,诸如三峡工程、青藏铁路、南水北调、三纵四横高铁网、港珠澳大桥、上海中心,以及由我国援建的雅万高铁、中老铁路、中泰铁路、瓜达尔港、比雷埃夫斯港,等等,不一而足。毋庸置疑,我国已成为世界上建设重大工程最多的国家之一。这些重大工程项目就其建设规模、技术难度和资金投入等而言,不仅在国内,即使在全球范围也都位居前茅,甚至名列世界第一。在这些工程的建设过程中涌现的一系列重大关键性技术难题,通过分析探索创新,很多都得到了很好的优化和解决,有的甚至在原来的理论、技术基础上创造出了新的技术手段和方法,申请了大量的技术专利。例如,632 米的上海中心大厦,在这座世界最高的绿色建筑的建设中,在超高层设计、绿色施工、施工监理、BIM 技术等多方面取得了多项科研成果,申请到 8 项发明专利、授权 12 项实用新型技术。仅在结构工程方面,近年来就应用到了超深基坑支护技术、超高泵送混凝土技术、复杂钢结构安装技术以及结构裂缝控制技术等诸多创新性的技术革新成果,有的达到了世界新水平。这些优化、突破和创新,对我国工程技术人员将是非常宝贵的参考和借鉴。

在 2016 年 3 月初召开的全国人大全体会议期间,很多代表们谈到,极大量的技术创新与发展是“十三五”时期我国宏观经济实现战略性调整的一项关键性驱动因素,是实现国家总体布局下全面发展的根本支撑和关键动力。

同时,在新一轮科技革命的机遇面前,也只有的关键核心技术上一个个地进行创新突破,才能实现社会生产力的全面跃升;使我国的科研成果和工程技术掌控两者的水平和能力尽早、尽快地全面进入发达国家行列,从而在国际上不断提升技术竞争力而国力将更加强大!当前,许多工程技术创新得到了广泛的认可,但在创新成果的推广应用中还存在不少问题。在重大工程建设领域,关键工程技术难题在实践中得到突破和解决后,需要把新的理论或方法进一步推广应用,再一次地广泛应用于生产实践,反过



来又将再次推动技术的更进一步的创新和发展,是为技术的可持续发展之巨大推动力。将创新成果进行系统总结,出版一套有分量的技术专著是最有成效的一个主要方面。这也是出版本“重大工程建设关键技术研究”丛书的意义之所在。以推广学术上的创新为主要目标,“重大工程建设关键技术研究”丛书主要具有以下几方面的特色:

1. 聚焦重大工程和关键项目。目前,我国基础设施建设在各个领域蓬勃开展,各类工程项目不断上马,从项目体量和技术难度的角度,我们选择了若干重大工程和关键项目,以此为基础,总结其中的专业理论和专业技术使之搜集成书。由于各类工程涉及领域和专业门类多,专业学科之间又有相互交叉和融合,难以单用某个专业来设定系列丛书,所以仍然以工程大类为基本主线,初步拟定了隧道与地下工程、桥梁工程、铁道工程、公路工程、超高层与大型公共建筑、水利工程、港口工程、城市规划与建筑共八个领域撰写成系列丛书,基本涵盖了我国工程建设的主要领域,以期为未来的重大工程建设提供专业技术参考指导。由于涉及领域和专业多,技术相互之间既有相通之处,也存在各自间的不同,在交叉技术领域又根据具体情况做了处理,以避免内容上的重复和脱节。

2. 突出共性技术和创新成果,侧重应用技术理论化。系列丛书围绕近年来重大工程中出现的一系列关键技术难题,以项目取得的创新成果和技术突破为基础,有针对性地梳理各个系列中的共性、关键或有重大推广价值的技术经验和科研成果,从技术方法和工程实践经验的角度进行深入、系统而又详尽的分析和阐述,为同类难题的解决和技术的提高提供切实的理论依据和应用参考。在“复杂地质与环境条件下的隧道施工创新技术丛书”(钱七虎院士任编委会主编)中,对当前隧道与地下工程施工建设中出现的关键问题进行了系统阐述并形成相应的专业技术理论体系,包括深长隧道重大突涌水灾害预测预警与风险控制、盾构工程遇地层软弱不均与极软地层的处理、类矩形盾构法、水下盾构隧道、地面出入式盾构法隧道、特长公路隧道、隧道地质三维探测、盾构隧道病害快速检测、隧道及地下工程数字化、软岩大变形隧道新型锚固材料等,使得关键

问题在研究中得到了不同程度的解决和在后续工程中的有效实施。

3. 注重工程实用价值。书中涉及的技术成果要求在国内已多次采用,实践证明是可靠的、有效的,有的还获得了技术专利。丛书强调以理论为引领,以应用为重点,以案例为说明,所有技术成果均要求以工程项目为背景,以生产实践为依托,使丛书既富学术内涵,又具有重要的工程应用价值。“长大桥梁建养关键技术丛书”(郑皆连院士任编委会主任、陈政清院士任副主任),围绕特大跨度悬索桥、跨海长大桥梁、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥等重大桥梁工程,聚焦长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的技术突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等,主要内容:包括大型钢管混凝土结构真空辅助灌注技术、大比例变宽度空间索面悬索桥体系、新型电涡流阻尼减振技术、长大桥梁的缆索吊装和斜拉扣挂施工、超大型深水基础超高组合桥塔、变形智能监测、基于 BIM 的建养一体化,等等。这些技术的提出以重大工程建设项目为依托,包括合江长江一桥、合江长江二桥、巫山长江大桥、桂广铁路南盘江大桥、张家界大峡谷桥、西堍门大桥、嘉绍大桥、港珠澳大桥、虎门二桥等,书中对涉及具体工程案例的相关内容进行了详尽分析,具有很好的应用参考价值。

4. 聚焦热点,关注风险分析、防灾减灾、健康检测、工程数字化等近年来学科中出现的新兴分支学科。在绿色、可持续发展的原则指导下,近年来基础建设领域的技术创新在节能减排、低碳环保、绿色土木、风险分析、防灾减灾、健康检测(远程无线视频监控)、工程使用全寿命周期内的安全与经济、可靠性和耐久性、施工技术组织与管理、数字化等方面均有较多成果和实例说明,系列丛书在这些方面也都有一定体现,以求尽可能地发挥丛书对推动重大工程建设的长期、绿色、可持续发展的作用。

5. 开放式框架。同时,由于上述的一些特性,使各个系列丛书的进展快慢不一,所以采用了开放式框架,并在后续系列丛书及系列丛书各分册的设定上,采用灵活的分

阶段付梓出版的方式。

6. 主编作者一流的学术水平,为丛书内容的学术质量打下了坚实的基础。各个系列丛书的主编均是该领域的学术权威,在该领域具有重要的学术地位和影响力。如陈政清教授,中国工程院院士,“985”工程首席科学家,桥梁结构与风工程专家;郑皆连教授,中国工程院院士,桥梁设计施工专家;钱七虎教授,中国工程院院士,防护与地下工程专家;吴志强教授,中国工程院院士,城市规划与建设专家;等等。而参与写作的主要作者和参编人员则都是活跃在我国基础设施建设科研、教育和工程的一线人员,许多人都承担过重大工程建设项目或国家级重大科研项目,他们主要来自中铁隧道集团公司、中交隧道局、中铁集团公司、中交公路规划设计院、南部战区陆军第二工程科研设计所、青岛地铁集团、上海城建集团、招商局重庆隧道设计院、天津城建集团、浙江省交通规划设计研究院、同济大学、河海大学、西南交通大学、湖南大学、山东大学,等等,不一而足。各位专家在承担繁重的工程建设和科研教学任务之余,奉献了自己的智慧、学识和汗水,为我国的工程技术进步做出了贡献,在此谨代表丛书总编委对各位的辛劳表示衷心的感谢和敬意。

当前,不仅国内的各项基础建设事业方兴未艾,在“一带一路”倡议下,我国在海外的重大工程项目建设也正蓬勃发展,对高水平工程科技的需求日益迫切和需要。相信本丛书的出版能为我国重大工程建设的开展和创新科技的进步将提供一定的助力。



2017年12月,于上海

孙钧先生,同济大学一级荣誉教授,中国科学院资深院士,岩土力学与工程国内外知名专家。本“重大工程建设关键技术研究”系列丛书总主编。

## 长大桥梁建养关键技术丛书

# 序

随着高速公路、高速铁路建设的快速发展,我国桥梁建设不断向大跨、重载、新材方向发展,高铁桥梁、大跨公路桥梁、跨海大桥不断刷新着世界纪录。截至 2016 年底,我国有公路桥梁 80 余万座、铁路桥梁 20 余万座,桥梁数量已位居世界第一。目前已建成的苏通大桥、江阴大桥、杭州湾大桥、西堠门大桥、万县长江大桥等一大批桥梁,在跨径、技术难度和建设质量方面均处于世界同类桥梁前列。同时主持或参与建设的一批国际知名桥梁工程,如马来西亚槟城二桥、巴拿马运河三桥、塞尔维亚泽蒙-博尔察大桥、新奥克兰海湾桥等,也荣获了多项著名国际大奖。

长大桥梁建设技术是体现一个国家桥梁建设水平的重要标志。在自主建设的基础上,我国桥梁技术在勘察设计、施工技术、建设管理、安全保障和新材料新装备应用等方面都取得了一批自主创新成果,各种大跨径梁式桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等大型桥梁建设技术得到了快速发展。为了更好地促进重大工程建设关键技术的推广和应用,编委会遴选了近年在重大工程特大跨度悬索桥、跨海长大桥、多塔斜拉桥、特大跨径钢管混凝土拱桥、大跨度人行桥、大比例变宽度空间索面悬索桥、新型城市桥梁等领域取得的创新成果和技术,围绕长大桥梁的设计创新理论、施工创新技术、建设难点的突破、桥梁结构健康监测与状态评估、运营期维修养护等方面,以学术专著的形式介绍这些技术难度较高的长大桥梁在设计、施工、监测与养护,以及结构与振动控制理论、风险评估等方面的创新成果和核心技术。

丛书中涉及和介绍的一些创新成果在国内均属于首创,有的已形成具有自主知识产权的核心技术。例如,由广西大学郑皆连院士研发并首先应用和推广的缆索吊装斜拉扣挂施工技术,是现代大跨径钢管混凝土拱桥的主流施工方法,也极大地推动了拱桥的建设。在此基础上,针对 500 米级钢管混凝土拱桥建造面临的挑战,郑皆连院士又创新性地提出了大型钢管混凝土结构真空辅助灌注管内混凝土技术、500 米级钢管混凝土拱桥的制造安装成套技术,研发了全隔离和全防腐的吊杆拉索,形成了 500 米级钢管混凝土拱桥设计、制造、施工核心技术。湖南大学针对大跨度人行桥的抗风及人致振动等动力问题,提出的大比例变宽度空间索面悬索桥体系以及开发的新型电涡流阻尼减振

技术,在多个超大跨度人行桥中进行了应用,取得了较好的效果。中交公路规划设计院结合嘉绍大桥、港珠澳大桥的建设经验,在多塔斜拉桥适宜结构体系及关键装置、超大型深水基础、超高组合桥塔技术等方面均取得了较大的成果。中铁大桥勘测设计院以全国工程设计大师徐恭义为首的桥梁设计团队,通过武汉杨泗港长江大桥、连镇铁路五峰山长江大桥、泰州长江大桥、镇江长江大桥和鹦鹉洲长江大桥等悬索桥工程的建设,在特大跨度悬索桥设计、施工中取得了重大突破和创新成果。江苏交通科学研究院在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室的研究团队多年来在桥梁结构健康监测与状态评估领域进行了持续的研究,其成果被应用于7座长江大桥在内的国内30余座大桥的健康监测系统的设计与实施中。天津城建院在城市桥梁结构体系及细部构造等方面的创新,以及新技术、新材料等的应用,也得到了业内的广泛认可。

桥梁建设虽然在诸多方面取得了很大的成就,但与发达国家相比,在创新设计理念、耐久性、高性能材料、标准规范、专业化人才队伍等方面还存在不足,一些基础理论研究和共性关键技术尚需突破。这套书作为长大桥梁建设关键技术的代表,期望起到以点带面的作用,在促进关键技术推广应用的同时,为先进技术的发展和提高起到积极的促进作用。在新一轮科技革命和产业变革加速演进,重大颠覆性创新不断涌现的今天,更需要专家和学者重视创新技术的总结、推广和应用。丛书在研讨策划、组织、编写和审稿的过程中得到了相关大型企业、高校、研究机构和学会协会的大力支持,许多专家在百忙之中给丛书提供了很多好的建议和想法。尤其是亲自参与书稿编写工作的专家学者,他们在繁忙的工作之余牺牲了自己的休息时间,为技术成果的总结出版奉献了自己的智慧和汗水,在此一并表示感谢。

陈政清

2017年11月

陈政清先生,湖南大学资深教授,中国工程院院士,桥梁工程专家。“长大桥梁建养关键技术丛书”主编。

# 前 言

本书作为“长大桥梁建养关键技术丛书”之一，旨在为广大桥梁健康监测的技术人员提供一本可指导实际设计、实施、维护与数据分析的技术性工具书。

一桥飞架南北，天堑变通途，作为路网中的关键性节点工程，桥梁跨越江河、湖泊及峡谷的阻隔，对地方、区域、国家的社会、经济发展起到了重要的连通、纽带、促进和提升作用。改革开放以来，随着国民经济的快速发展，我国桥梁建设突飞猛进，取得了举世瞩目的成绩，已超越美国成为世界第一桥梁大国，并建成了一批创造世界记录的特大桥梁。

但是大桥建成通车只是发挥其生命价值的起点，只有保证健康与安全才能充分发挥其应有的作用。桥梁在其服役期内，由于载荷疲劳效应、环境腐蚀和材料老化等因素的耦合作用，将不可避免地导致桥梁结构损伤累积和抗力衰减，从而降低抵抗灾变的能力。这些损伤如不能得到及时的发现和修复，轻则影响行车安全和缩短桥梁使用寿命，重则导致桥梁突然破坏和倒塌。传统上我们主要通过人工检查来实现对桥梁状态的评定，但由于其存在主观性强、实时性差等问题，已越来越难以满足现代桥梁管养的需求。在这种情况下，从 20 世纪 80 年代起，结构健康监测技术开始逐步从航空、航天和机械领域向土木工程尤其是桥梁领域拓展。从本质上看，结构健康监测技术类似于人体的神经感知系统，通过桥上主要部位布设的传感器采集信息，通过有线或无线网络传回后方计算机，再由分析软件辅助专业人员做出技术判断。利用结构健康监测系统，有助于提高突发性损伤和异常事件的发现速度，使累积性损伤的发展趋势推演成为可能，可实现对隐蔽部位的观察，并有助于验证设计和指导今后类似桥梁的设计。

著者多年来一直致力于桥梁结构健康监测与状态评估领域的研究与工程应用，主持了多项国家、省部级科技攻关项目，率领团队承担了包括 9 座长江大桥在内的 50 余座大型桥梁健康监测系统的设计与实施，并在 2010 年组建了江苏省长大桥梁健康监测

数据中心,目前负责着这一世界规模最大的桥梁监测群的系统维护与数据分析。

本书是著者所带领的研究团队多年来理论成果和工程应用的总结,主要面向具有一定工程经验的技术人员,注重理论与实践并重,力求图文并茂,并给出了大量的实际工程案例,以方便读者理解和掌握。

全书共7章,涵盖了桥梁结构健康监测系统设计、实施、维护与数据分析等方面的内容。其中,第1章绪论介绍了桥梁结构健康监测的一般概念、发展简史、研究与应用现状,以及桥梁结构健康监测系统设计、实施与维护的一般要求;第2章传感技术介绍了桥梁用传感器的选型原则、监测内容、优化布设方法,并从监测的必要性、设备选型、一般布设要求、施工与质量验收要求等方面对各类环境荷载与结构响应监测传感设备的设计与施工要点进行了介绍;第3章数据采集与传输介绍了数据采集与传输中的常用技术及设计与施工要点;第4章数据存储与处理介绍了桥梁结构健康监测中数据处理面临的主要问题、数据存储与处理子系统的构成,并着重介绍了桥梁结构健康监测系统数据预处理和二次预处理的主要方法和内容;第5章损伤识别与状态评估结合大量案例介绍了适用性评估、构件安全性评估、疲劳性能评估、时效风险概率评估、相关性分析评估、五度指标评估和标准场评估等常用评估方法;第6章系统运营与维护介绍了桥梁结构健康监测系统运营与维护的组织原则、一般要求及常见故障的判断与修复方式;第7章工程应用案例则通过六个典型案例介绍了健康监测系统设计及实施中需要注意的事项,以及可在管养中实际发挥的作用。

全书由张宇峰设计大纲并主持编写。第1章的参编作者有张宇峰、欧阳歆泓、孙震、杨金花、杨迪、邢丹丹等;第2章的参编作者有李贤琪、黄月华、郭俊、赵亮、滕力森等;第3章的参编作者有李贤琪、黄月华、赵玉成、李翔宇、王路、赵亮等;第4章的参编作者有张宇峰、彭家意、徐一超、杨超等;第5章的参编作者有张宇峰、徐一超、彭家意、朱晓文、张立涛、周子裔、杨超等;第6章的参编作者有李贤琪、张宇峰、杨超等;第7章

的参编人员有张宇峰、李贤琪、孙震、赵亮、彭家意、徐一超、朱晓文等；附录的参编人员有张宇峰、李贤琪、欧阳歆泓等；研究生沈鹏宁、马安阳参与了资料搜集与图表制作。

本书部分成果来自著者所主持的科研项目，其是著者与其合作者共同完成的，著者有幸与他们共事，在桥梁健康监测与状态评估这一富有挑战性和创新性的学科领域进行合作研究，著者对他们的帮助表示由衷的感谢！

本书大部分实际案例数据来自江苏交通控股有限公司管理下的大桥，江苏交通控股有限公司和这些大桥健康监测系统的管理人员为著者的相关研究提供了大力支持，并提出了很多有益的建议和深刻的认识，著者对参与本书内容研究的合作者表示衷心的感谢！

桥梁结构健康监测与状态评估技术在我国仍处在积累和高速发展的阶段，且是典型的交叉学科。由于时间仓促和著者认识上的局限性，本书疏漏和不当之处在所难免，恳请广大读者不吝赐教，以便再版时修正提高。

著 者

2017年11月



# 目 录

## 第 1 章 1

### 绪论

1.1 桥梁结构健康监测概念的提出 .....	1
1.2 桥梁结构健康监测研究与应用现状 .....	7
1.3 健康监测系统的设计与施工 .....	9
1.3.1 健康监测系统设计 .....	9
1.3.2 健康监测系统施工 .....	12

## 第 2 章 13

### 结构健康监测中的传感技术

2.1 传感技术概述 .....	13
2.1.1 传感器的基本概念 .....	13
2.1.2 常用传感器简介 .....	16
2.1.3 传感器输出信号 .....	20
2.2 桥梁用传感器选型、布设及优化 .....	21
2.2.1 设计思想和评估需求 .....	21
2.2.2 选型原则 .....	22
2.2.3 优化布设 .....	23
2.2.4 监测内容 .....	25
2.3 传感器子系统的设计与施工 .....	27
2.3.1 一般要求 .....	27
2.3.2 环境荷载监测 .....	28
2.3.3 桥梁结构响应监测 .....	42

## 第 3 章 55

### 结构健康监测中的数据采集与传输技术

3.1 数据采集与传输技术发展历程 .....	55
-------------------------	----