

Perception, Fusion and Prediction of
Safety Status for Buildings Across the River
& Water-Retaining Structures

跨拦河建筑物

安全状态感知、融合与预测

方卫华 李世平
董万钧 史召锋

◎ 编著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

Perception, Fusion and Prediction of
Safety Status for Buildings Across the River
& Water-Retaining Structures

跨拦河建筑物

安全状态感知、融合与预测

方卫华 李世平 董万钧 史召锋 编著

 河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

跨拦河建筑物安全状态感知、融合与预测 / 方卫华
著. — 南京 : 河海大学出版社, 2018. 12 (2019. 6 重印)
ISBN 978-7-5630-5813-6
I. ①跨… II. ①方… III. ①水工建筑物—研究
IV. ①TV6
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292358 号

书 名	跨拦河建筑物安全状态感知、融合与预测
书 号	ISBN 978-7-5630-5813-6
责任编辑	卢蓓蓓
封面设计	徐娟娟
出版发行	河海大学出版社
地 址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)
经 销	江苏省新华发行集团有限公司
排 版	南京布克文化发展有限公司
印 刷	虎彩印艺股份有限公司
开 本	880 毫米×1230 毫米 1/32
印 张	10.5
字 数	323 千字
版 次	2018 年 12 月第 1 版
印 次	2019 年 6 月第 2 次印刷
定 价	68.00 元

前言

PREFACE

人们研究水工建筑物时,常常将拦河坝和水闸放在一起研究,但跨河桥梁作为交通工程,很少见到将其与拦河坝、水闸放在一起进行对比研究的文献。实际上,跨河桥梁与水闸在工程安全风险方面存在很多相似点。其次,在大型水利水电工程建设中,桥梁设计施工往往作为拦河坝、水闸等工程前期配套“三通一平”的主要工程,其工程质量和进度直接影响到主题工程的建设。这不仅与施工期存在一定的关联性,而且在运行期,作为邻近工程的桥梁安全状态也关系到大坝、水闸等拦河工程的防汛救灾和应急管理。为此,将拦河坝、水闸和桥梁放在一起研究安全风险的共性和个性,将其安全状态感知、融合和预测纳入统一框架之下,不仅有利用提升安全监测、安全检测与安全评价的理论水平,而且有利于激发学科之间的碰撞,促进个体向一般、工程问题向科学问题的转换。

桥梁作为一种跨河建筑物,结构形式多样、风险源众多,其安全状态感知的难点包括变形基准点的选择、低频振动的高精度测量、风雨作用,而信息融合和预测的难点包括动静耦合、刚柔耦合、随机过程与随机点过程相互作用、诱导震动与共振、时空及物理多尺度和频率混叠等问题。

水闸作为河床薄壁建筑物,其状态感知、融合与预测的关键问题包括力-机-电敏感信息确定、大刚度闸身与软基的相互作用、流固热耦合响应、刚度-强度干涉问题等。

拦河坝安全状态感知主要体现在高水头作用、大体积结构及

其与基础之间的变形协调问题,与桥梁水闸类似,其安全状态感知、融合和预测依然面临流固热耦合响应、静动力耦合、应力路径依赖等问题。

本书的目的是通过分析桥梁、水闸和拦河坝安全监测、安全检测和安全评价的现状,在此基础上,基于控制论和系统论思想,将桥梁、水闸和拦河坝安全状态感知、融合和预测纳入基于风险分析、状态空间和深度学习的统一框架。

相信本书的出版将促进工程力学、水工结构和交通工程之间的相互融合,推动工程结构安全学科的发展。

本书由水利部南京水利水文自动化研究所方卫华提出并统校,其中1~2章和3~4章分别由长江勘测设计研究院有限公司李世平和史召锋编写。我的研究生夏童童、孙一清和赵毅恒及出版社代江滨、卢蓓蓓老师也付出了辛勤劳动,在此一并致谢!

由于本书跨度大,涉及理论和方法多,加之编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请各位读者批评指正!

方卫华

2018年8月8日

目录

CONTENTS

第一章 跨河桥梁安全状态感知、融合与预测	1
1.1 结构特点及风险特征	1
1.1.1 结构分类及特点	1
1.1.2 失事模式及分析方法	4
1.2 安全状态感知	9
1.2.1 健康监测	9
1.2.2 结构检测	16
1.2.3 状态感知关键问题	26
1.3 安全状态融合	28
1.3.1 状态融合现状	28
1.3.2 安全评估方法	31
1.4 安全状态预测	40
1.4.1 状态预测现状	40
1.4.2 状态融合关键问题	54
参考文献	57
第二章 水闸安全状态感知、融合与预测	64
2.1 结构特点及风险特征	64

2.1.1	水闸分类、结构及安全风险	64
2.1.2	水闸特点	67
2.1.3	几点认识	68
2.2	风险因素及状态反应	69
2.2.1	荷载及环境因素	69
2.2.2	地基和渗透变形	69
2.2.3	结构和材料老化	69
2.2.4	冲刷与振动	69
2.2.5	机电设(备)施可靠性	70
2.3	水闸安全状态感知	70
2.3.1	安全监测现状	70
2.3.2	结构检测现状	71
2.3.3	状态感知关键问题	71
2.4	水闸安全状态数值分析	76
2.4.1	结构动力分析	76
2.4.2	流固耦合分析	81
2.5	基于多源信息融合的状态估计	88
2.5.1	基于规范的方法	88
2.5.2	基于可靠性评价的方法	88
2.5.3	其他评估方法	90
2.5.4	安全评价关键问题	96
2.6	安全状态预测	97
2.6.1	洪水漫顶	97
2.6.2	抗滑失稳	99
2.6.3	变形不协调及开裂	104
2.6.4	闸坝地基液化	106

2.6.5 混凝土碳化深度的随机模型	109
参考文献	110
第三章 拦河坝安全状态感知、融合与预测	115
3.1 结构特点及风险特征	115
3.1.1 拦河坝分类及堰塞坝	115
3.1.2 失事实例及风险特征	116
3.2 输出、输入与状态感知项目	118
3.2.1 变形监测	118
3.2.2 渗流监测	138
3.2.3 压力(应力)监测	149
3.2.4 水力学观测	159
3.2.5 环境量监测	167
3.2.6 强震输入及效应	172
3.2.7 结构状态检测	174
3.2.8 状态感知关键问题	175
3.3 信息融合与安全评价	175
3.3.1 信息融合	175
3.3.2 安全评价	179
3.4 安全状态预测	181
3.4.1 状态预测现状分析	181
3.4.2 状态预测关键问题	183
参考文献	184
第四章 多尺度感知及自组织网络	186
4.1 多尺度感知	186

4.1.1	面感知	186
4.1.2	线感知	187
4.1.3	点感知	188
4.1.4	网络化感知	189
4.1.5	体感知	190
4.1.6	移动感知	191
4.2	非常规风险感知	192
4.3	自组织网络技术	194
4.3.1	总线与通讯技术	194
4.3.2	传统数据采集网络	194
4.3.3	智慧感知网络	194
4.4	云技术	196
4.4.1	开发语言	196
4.4.2	硬软件配置	197
4.4.3	支撑平台功能模块化	197
4.5	监测-检测融合感知体系	198
4.5.1	概述	199
4.5.2	现行监测体系分析	199
4.5.3	安全风险感知的要求	201
4.5.4	检测及其对风险感知的意义	203
4.5.5	安全风险动态感知框架	204
4.5.6	结语	210
	参考文献	211
第五章	融合策略与融合方法	215
5.1	逐级融合策略	215

5.1.1	测点级融合	215
5.1.2	项目级融合	215
5.1.3	系统级融合	216
5.1.4	全源信息融合	216
5.1.5	睿智决策支持	216
5.2	多尺度融合策略	216
5.2.1	几何多尺度	216
5.2.2	时间多尺度	217
5.2.3	结构多尺度	217
5.2.4	物理多尺度	217
5.2.5	数据多尺度	217
5.2.6	约束多尺度	217
5.3	协同融合策略	218
5.3.1	损伤敏感协同	218
5.3.2	结构敏感协同	218
5.3.3	整体敏感协同	219
5.3.4	风险敏感协同	219
5.4	信息融合方法	219
5.4.1	DHGF 综合评价法	219
5.4.2	正态云模型方法	220
5.4.3	状态空间模型方法	221
	参考文献	262
第六章	预测框架与深度学习	268
6.1	风险分析的方法	268
6.1.1	基于实测数据的风险分析	268

6.1.2	径流洪水风险分析	269
6.1.3	跨拦河建筑物多失效模式风险分析	272
6.2	基于深度学习的预测理论和方法	274
6.2.1	人工智能典型事件	274
6.2.2	机器学习基本模型	275
6.2.3	深度学习建模工具及梯度下降算法	281
6.2.4	卷积神经网络	289
6.2.5	循环神经网络	296
6.2.6	深度强化学习	299
6.2.7	对抗性生成网络	306
6.2.8	迁移学习	309
6.2.9	Deep Learning 模型及算法	312
	参考文献	316

第一章

跨河桥梁安全状态感知、融合与预测

跨河桥梁一旦失事,轻则造成交通阻断,重则造成河道行洪受阻、船舶相撞甚至堤防决口。历史上典型的桥梁垮塌事件包括:1967年美国西弗吉尼亚州的银桥垮塌、1994年6月韩国圣水大桥坍塌、2001年11月我国的四川宜宾小南门桥短吊杆断裂、2002年5月美国明尼苏达州一座跨越密西西比河的桥梁垮塌等。从2007年到2011年5月,我国至少有12座大型桥梁垮塌,导致270人死亡、111人受伤、23人失踪,垮塌桥梁中包括连霍高速河南新安段上跨天桥、浙江杭州钱江三桥辅桥、湖南凤凰县堤溪沱江大桥等^[1]。截至2015年底,我国危桥数量高达7.6万座,桥梁安全形势十分严峻。

跨河桥梁所处环境恶劣、荷载复杂。随着桥梁超载、桥龄增长、材料老化、结构腐蚀、系统疲劳等情况的积累,跨河桥梁安全风险正日益增加。

1.1 结构特点及风险特征

1.1.1 结构分类及特点

桥梁一般由上部结构、下部结构、支座以及附属设施等组成^[2]。桥梁的上部结构包括主要承重结构和桥面两个部分。桥梁的下部结构主要由桥墩、桥台和基础组成,它是桥梁整体结构中很重要的组成部分,直接影响着桥梁的安全性。

桥梁上部结构主要承受风雨作用、温湿作用、车辆作用以及由

下部传递而来的地震作用等。下部结构主要承受由上部传递的车辆等竖向荷载、船舶撞击、水流冲击、波浪砰击、泥沙淤积/冲刷以及地震等作用。

桥梁的基本附属设施包括桥面系、伸缩缝、导流工程、护岸、锥形护坡以及桥梁与路堤连接处的桥头塔板等。它的主要风险源包括水流冲刷、崩岸、路堤坍塌等。

根据桥梁的受力特点,可将其划分为梁式桥、拱式桥以及组合体系桥,其中组合体系桥主要有拱梁组合体系桥、桁梁组合体系桥、索梁组合体系桥等^[3]。

1.1.1.1 梁式桥

梁式桥是一种以受弯为主的主梁作为承载结构的桥梁。梁式桥的主梁分为实腹梁和桁梁两种,实腹梁从横截面形式上又可以分为 T 型、I 字型和箱型三种。

连续梁桥在荷载作用下,主梁既可能产生正弯矩又可能产生负弯矩,而连续梁桥墩的不均匀沉陷,将使桥跨结构内部产生额外的内力。

悬臂梁桥的梁跨越桥墩之后在桥跨中间断开形成悬臂,类似于连续梁桥,悬臂根部产生的负弯矩减小了跨中的正弯矩^[4]。

在众多的梁式桥中,预应力混凝土连续梁桥因为具有跨度大、成本相对较低、结构受力明确等优点被广泛地应用于梁式桥的建造^[5]。连续刚构桥是预应力混凝土连续梁桥的一种,连续刚构保持了 T 形刚构和连续梁的优点,在大跨径预应力混凝土桥的设计中使用较多^[6]。

1.1.1.2 拱式桥

根据拱桥的承力形式可将其分为上承式、中承式以及下承式三种形式的桥型。由于近些年中承式、下承式拱桥发生多起因吊杆破损而引发的事故,人们开始对短吊杆拱桥的设计、建造关注起来^[7]。

1.1.1.3 悬索桥

悬索桥的主要结构包括桥塔、主缆、加劲梁、吊索等多个部分。按照主缆的锚固形式可以将悬索桥分为地锚式悬索桥和自锚式悬索桥两种。

地锚式悬索桥其锚固支架被置于桥梁外部,主缆的拉力由桥梁两端的锚碇传到地基。因地锚式悬索桥锚碇的放置特点,锚固体要求是承载能力较高的地基。

自锚式悬索桥主缆锚碇固定在加劲梁上,加劲梁承担主缆拉力。因加劲梁负担过大,且为符合经济性、美观性原则,加劲梁截面不宜建造得过分庞大,因此自锚式悬索桥比较适合跨径较小的桥梁设计。另外,自锚式悬索桥无需桥外锚固体,对地基要求比较低,适合软土等地基条件。

1.1.1.4 刚构桥

刚构桥(钢架桥)是由梁与腿或墩台构成的组合体系桥,根据其结构形式,刚构桥可以分为门式刚构桥、斜腿刚构桥、T形刚构桥和连续刚构桥四种桥型。当河流条件不允许设置大型桥墩或桥建筑高度受到限制时,门式刚构桥是很好的选择^[8]。

斜腿刚构桥依靠其桥腿倾斜一定角度来支撑桥梁。斜腿刚构桥具有拱的一些特点,两腿之间具有较大的梁内轴向压力,可以降低结构的弯曲刚度^[9]。与上承式拱桥相比,它不需要拱上建筑,结构更加简洁。斜腿刚构桥因具有大跨径的优势,一般用于峡谷桥等跨线桥或是对美观程度要求比较高的宽流域跨河桥的建造。

T型刚构桥是在简支预应力桥和大跨钢筋混凝土箱梁桥的基础上发展而来,其结构由固定在桥墩上且向两边延伸的悬臂梁构成。T型刚构桥可无支架跨越深水急流,避免了在此环境中桥梁下部施工困难的这一问题。

连续刚构桥从结构上来说属于连续梁桥,其桥墩与主梁固定为一个整体形成刚架作为上部结构荷载的承载结构^[10]。

1.1.1.5 斜拉桥

斜拉桥又称为斜张桥、斜拉吊桥,是一种由梁、塔和斜索构成主要承重构件的组合体系桥。其上部结构由主梁、桥塔和斜拉索组成,利用斜拉索构成一个整体,其它主要结构还包括桥墩和基础等。斜拉桥的受力传递途径十分清晰,自重荷载和外部荷载通过锚固主梁与索塔的斜拉索传递到索塔,索塔再将荷载力传递给地基^[11]。斜拉桥塔桥一般需要考虑建桥地形、风速、跨径和桥塔结构,选择合适的桥塔型塔可以更好地保持桥塔稳定性。

随着现代桥梁的发展以及对于跨河、跨江的现实需求,斜拉桥的使用比其他几种桥型更加广泛,但其主梁的巨大轴向力成为超大跨径斜拉桥设计的挑战。传统的正交异性钢板系统虽可以减少主梁的自重,但易产生疲劳,为此有研究^[12]提出一种与超高性能混凝土(UHPC)结合的带有交叉斜拉索的部分地锚式斜拉桥系统,试验验证该桥系统具有更小的主梁轴向力、更大的纵向刚度以及更好的经济优势,可应用于实际。

1.1.2 失事模式及分析方法

1.1.2.1 风雨激励失稳

跨河桥梁长期工作在露天环境,特别是山区河谷,其遭受风雨作用的问题更加突出,斜拉桥尤其是大跨径斜拉桥因其拉索质量轻、阻尼低、柔性大,很容易在风雨荷载作用下产生大幅度振动。对于桥梁风雨激振主要包括静风发散、颤振、驰振、抖振和涡振等失事模式。风雨激励研究主要有现场测试、风洞试验、数值模拟以及理论分析四种方法。

现场测试是在风雨振动现场对斜拉桥拉索观察、测量,并记录下测量的相关参数。此方法可以得到斜拉桥拉索在风雨激励下最为实际的特征参数。

风洞试验是通过人工降雨试验在风洞模拟降雨,对斜拉桥进行风雨激励试验;然后通过人工水线试验模拟实际风雨激励下产

生的水线,进行测压、测力以及测振。其中颤振导数等重要参数都是借助风洞试验予以确定的。

当前,斜拉桥风雨激励数值模拟主要有:基于刚性人工水线模型,将人工水线固定在斜拉索表面,分析研究风雨激励下斜拉索气动特性和表面压力;半耦合模型,简化多相流体动力学 Navier-Stokes 方程以得到水线位置高度演化方程,从而揭示斜拉索风雨激励作用机理;耦合模型,主要以流体体积分法推算水线时空演化方法为主。

理论分析是在现场测试和风洞试验的基础上完成的。斜拉索风雨激励的理论有三个:拉索与水线耦合多自由度理论,同时考虑斜拉索振动方程和由现场测试或风洞试验得到的气动力和水线动力模型以得到风雨激励的动力效应;单自由度驰振理论,假设水线振动为简单的谐波振动;零自由度分析理论,忽略水线振动,只考虑水线对风场结构的影响。

1.1.2.2 桥墩与基础变形失稳

桥墩与基础是整个桥梁荷载传输的关键路径,是桥梁稳定的基础。受冲刷、撞击、地震和基础失稳等因素作用,桥梁基础也面临错位、开裂、老化、失稳等问题。桥墩与基础变形、失稳的研究方法包括现场监测/检测、模型试验、数值模拟等研究手段和方法。由于涉及多场耦合、主应力轴旋转、泥沙淤积、混凝土与土体相互作用等问题,模型相似率的确定和数值模型的建立都比较困难。

1.1.2.3 地震及撞击作用变形失稳

1. 地震作用

跨河桥梁的结构以及支撑形式决定了地震荷载是影响桥梁安全的主要风险源。针对桥梁结构,地震诱导作用不仅包括横波作用,还包括纵波和表面波作用。其中横波导致水平剪切破坏,而纵波将导致竖直剪切破坏。地震作用下的桥梁作用涉及地基、墩柱、水力等耦合作用,特别是柔性桥梁的大变形,这些都涉及动边界、

几何非线性和行波效应等科学问题,这使得桥梁结构的地震分析难点较多。根据桥梁本身结构、材料和几何特征,同时考虑选用的本构模型、数值离散方法和近似程度,可以选择直接积分法、缩聚法、振型叠加法和时程分析法。

2. 漂流物和船舶撞击破坏

漂流物和船舶撞击也是桥梁失效的原因之一。目前对漂流物和船舶撞击的研究方法主要有:直接测量碰撞中产生的碰撞力,绘制桥梁变形与碰撞参数的变化曲线图;依据大量的试验数据建立碰撞系统、撞击力和运动响应之间的关系;基于极限理论和通过碰撞事故或试验归纳的假设之上的简化解析方法;从二维状态的碰撞运动发展到三维碰撞的数值模拟法,建立碰撞系统数学模型。

对漂流物进行跟踪、流量计算等的基础是对其自动监测,河流漂流物的自动监测算法必须克服环境中光线变化、波浪扰动等影响^[13,14]。对于漂流物的监测,采用传统的浮标法存在缺陷。为此,有学者提出结合视频监控技术对漂流物体进行实时监视,对其监控模式进行改进^[15-17];江杰、李刚^[18]结合基于混合高斯模型的背景差分法和帧差法,提出一个自动监测算法,该算法具有稳定、可靠、实时、快速、准确等特点。

对于船舶撞击力的计算现已存在多种规范公式,我国《铁路桥涵设计基本规范》(TB10002—2017)^[19]采用静力法计算撞击力

$$P = \gamma \cdot V \cdot (\sin\alpha) \cdot \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (1-1)$$

式中, V 为撞击速度; W 为撞击物的重量; C_1 为撞击物的弹性变形系数; C_2 为桥梁墩台圯工的弹性变形系数,无法获取时 $C_1 + C_2 = 0.5$; α 为撞击物漂流方向与撞击点切线夹角,无法获取时 $\alpha = 20^\circ$ 。

现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)将撞击作为偶然荷载,当缺乏实际调查资料时规定如表 1-1 所示。