

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

重大工程的动力灾变学术著作丛书

结构健康监测 数据科学与工程

李惠 鲍跃全 李顺龙 赖马树金 陈文礼 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
重大工程的动力灾变学术著作丛书

结构健康监测数据科学与工程

李 惠 鲍跃全 李顺龙 赖马树金 陈文礼 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了结构健康监测数据科学与工程的理论、方法和应用的主要研究成果。第1~3章是数字信号处理分析的基础理论和数据压缩采集及无线传输算法;第4、5章是结构模态分析与识别方法;第6、7章是结构损伤识别和模型修正方法;第8、9章是车辆荷载识别与建模方法;第10章是基于监测数据的主梁安全评定方法;第11章是基于监测数据的拉索安全评定方法;第12、13章是风工程监测数据分析方法和地震损伤识别算法;第14章是结构健康监测的 Benchmark 模型。

本书可供从事土木工程、水利工程、海洋工程、机械工程、航空航天工程、力学等专业领域研究、设计与管理的广大科技人员参考,也可作为上述专业的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

结构健康监测数据科学与工程/李惠等著. —北京:科学出版社,2016. 11
(重大工程的动力灾变学术著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-049101-5

I. ①结… II. ①李… III. ①桥梁结构-安全监测 IV. ①U447

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143721 号

责任编辑:刘宝莉 张晓娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:38

字数:767 000

定价:200.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

结构健康监测可实时感知、监测、识别、评定和预警结构荷载与环境作用、结构响应、结构性能、结构状态与安全水平,是保障结构全寿命服役安全的有效方法和技术,是实现智能土木工程的必经之路,其作为现场试验技术,与理论分析、模型试验和数值计算共同构成了土木工程学科发展的四个驱动之轮。

结构健康监测的研究和应用已有二十余年的历史,其研究和应用大体上分为传感技术、数据科学、系统集成技术三个分支。结构健康监测是物理、化学、应用数学、信息科学与技术、计算机科学与技术、通信科学与技术、人工智能等诸多学科与土木工程学科的交叉融合,是极具挑战性的科学研究领域,蕴涵着无限的创新空间。

目前世界上已有几百座桥梁、隧道、公路、轨道交通、建筑等工程结构安装了结构健康监测系统,这些监测系统的运行积累了海量监测数据。分析和挖掘监测数据中蕴涵的结构荷载与环境作用、结构响应、结构性能、结构状态的模式、规律、相关性、模型等,对认识和揭示真实结构的真实荷载与环境作用、真实响应和行为机制、真实性能演化规律以及推动土木工程学科的发展具有重要意义,也是实现结构状态和安全水平自动预警等智能功能的理论基础和技术支撑。

作者在长期从事结构健康监测研究中,提出了“结构健康监测数据科学与工程”新分支,主要包括结构健康监测数据采集、数据传输、数据管理、数据分析与挖掘、结构损伤识别与模型修正、结构状态与安全评定及预警,以及结构维修决策等理论、方法及其应用。本书系统地总结和阐述了二十余年来国内外结构健康监测数据科学与工程的主要研究成果,以及作者及其合作者的相关研究成果。全书包括绪论和 1~14 章。绪论较全面地介绍结构健康监测数据科学与工程研究与应用的主要进展和发展趋势。第 1 章数字信号的基础知识,介绍数字信号处理分析的傅里叶变换、采样定理、拉普拉斯变换、信号滤波与去噪方法。第 2 章数据压缩采样,介绍数据压缩采样的数学原理及其在结构健康监测数据采集中的应用。第 3 章无线传输数据丢失恢复算法,介绍结构健康监测无线传感丢失数据恢复数学原理与算法。第 4 章结构模态分析理论基础,介绍经典模态分析方法的理论基础,包括单自由度结构和多自由度结构的频率响应函数及其特性、结构实模态分析方法与模态参数、结构复模态分析方法与模态参数等基础理论知识。第 5 章环境激励下结构模态参数识别方法,介绍频域分解法、NE_xT 与 ERA 法和随机子空间方法等几种常用的基于环境激励的结构模态参数识别方法,以及时变环境下桥梁结构

模态参数识别的非线性独立主成分方法。第4章和第5章是基于振动的结构损伤识别、模型修正和状态评估的理论基础。第6章结构损伤识别方法,介绍基于频率和基于振型的经典损伤识别方法,以及基于信息融合理论的结构损伤识别方法。第7章结构模型修正,介绍基于模态参数灵敏度分析的结构模型修正方法和结构模型修正 Bayesian 概率方法。第8章车辆荷载极值模型与疲劳荷载谱,介绍基于监测数据的车辆荷载极值模型建模方法及其极值概率分布,车辆荷载疲劳荷载谱建模方法及车辆荷载疲劳荷载谱。第9章车辆荷载时空分布识别与建模,介绍融合动态称重系统和监控视频信息的车辆荷载时空分布的计算机视觉识别方法,以及基于马尔科夫随机场(无向图模型)的车辆荷载空间分布模型。第10章基于监测数据的主梁安全评定方法,介绍基于应变监测数据的桥梁结构主梁承载力极限状态评估和钢构件疲劳累积损伤评估方法。第11章基于监测数据的拉索安全评定方法,介绍监测拉索索力时变特征、基于振动监测的斜拉索时变索力识别的扩展卡尔曼滤波器算法、未腐蚀和腐蚀拉索承载力极限状态评估方法,以及疲劳累积损伤评估方法和疲劳寿命预测方法。第12章大跨度桥梁风和风效应监测数据分析,介绍缆索承重大跨度桥梁风、风荷载与风效应监测系统的设计方法和监测数据的分析方法。第13章结构地震反应监测数据分析与损伤识别,介绍结构健康监测地震反应数据的常规分析方法、基于数据驱动的结构地震损伤快速定位方法、基于非完备集的结构非线性模型参数识别方法,以及基于完备集和非完备集的结构非线性模型及其参数识别方法。第14章结构健康监测的 Benchmark 模型,介绍一座实际大跨度桥梁监测数据和两个 Benchmark 问题,监测数据涵盖了该桥梁健康状况至严重损伤状态。

结构健康监测数据科学与工程涉及数学、信息科学、计算机科学、通信科学等多科学的交叉融合。土木工程安全、寿命和功能(智能)等问题促进了土木工程学科的发展以及健康监测数据科学这一新兴学科分支的诞生,还将对土木工程其他领域多科学交叉融合的发展和人才培养产生深远影响。本书的撰写虽然主要以土木工程结构为对象和背景展开,但是其中大部分的理论和方法也适用于其他学科领域的数据问题。

虽然国内外学者早在20世纪50~60年代就开展了结构模态分析与识别、结构损伤识别与模型修正的研究,提出了许多卓有成效的方法,但结构健康监测数据科学与工程的整体研究还处于刚刚起步阶段,尚未形成系统的理论,希望本书的出版对本新兴学科的发展发挥一定的推动作用。

参与本书撰写的还有陶冬旺、陈智成、徐金龙、房坤等,部分成果是作者及其合作者和博士研究生合作完成的,作者有幸与他们合作共事,在这一富有挑战性和创新性的学科领域进行合作研究。作者还特别高兴地看到我们多年合作的研究成果与合作授课积累的部分素材能够与国内外丰富的研究成果一起融汇于本书中,作

者对他们的合作表示由衷的感谢!

国家自然科学基金委员会、科技部、交通运输部等对本领域的研究给予了大力支持。作者及其合作者近 10 年来在本领域的研究先后得到国家杰出青年科学基金(编号:50525823)、国家自然科学基金重大研究计划重点项目(编号:90815022)和集成项目(编号:91215302)、国家自然科学基金重大国际合作项目(编号:51161120359)、国家自然科学基金面上项目(编号:51378154、51478149)和青年基金(编号:51008095、51008096)、国家 973 计划(编号:2013CB036305)、国家 863 计划(编号:2007AA04Z435、2014AA110401)、国家国际科技合作专项项目(编号:2015DFG82080)、国家科技支撑计划(编号:2006BAJ03B05、2011BAK02B02)、高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(编号:20112302110050)、中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题(编号:2013G004-A-1)的大力资助,在此表示衷心的感谢!

本书的研究是在实际结构健康监测系统采集的数据上开展的,我国大规模基础设施建设与养维护管理的需求促使我国结构健康监测应用技术在世界上处于领先地位。作者与中交公路规划设计院有限公司以及诸多大跨度桥梁健康监测系统的管理人员保持着长期而良好的合作,他们为作者的相关研究提供了高质量的健康监测数据,对本领域基础科学研究大力支持,并提出有益的建议和分享深刻的认识,作者和参与本书内容研究的合作者对他们表示衷心的感谢!

欧进萍院士是我国结构健康监测的开拓者与引领者,其对我国该领域的发展及跻身国际领先地位发挥了重要作用。作者有幸在欧进萍院士指导下开展这一极富挑战的前沿学术方向研究,欧老师对结构健康监测科学问题深刻独到的认识与把握以及对作者在该方向研究提出的极其宝贵的建议,使作者受益终生,在此向欧老师致以最崇高的敬意和由衷的感谢!本书作者李惠自 2004 年先后多次在加州理工学院与 Wilfred D Bill Iwan 教授和 James L Beck 教授合作研究,加州理工学院浓厚的科学研究氛围和顶尖级的科学研究水平,堪称科学研究的殿堂,对作者学术生涯产生了极为重要的影响,作者对两位学术大师表示由衷的感谢并致以崇高的敬意!作者感谢长期合作的伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 Billie F Spencer 教授、莱斯大学 Satish Nagarajaiah 教授、南加州大学 Sami Masri 教授、伊利诺伊大学芝加哥分校 Farhad Ansari 教授、普林斯顿大学 Branko Glisic 教授、密歇根大学 Jerome P Lynch 教授、日本东京大学的 Yozo Fujino 教授、意大利帕维亚大学 Lucia Faravelli 和 Fabio Casciti 教授等,能与学术造诣极高的诸多学者们共事并建立起深厚友谊,是作者一生的财富!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大专家和读者批评指正。

主要符号

$\mathcal{F}$	傅里叶变换算子
$\mathcal{L}$	拉普拉斯变换算子
$\mathbf{H}(s), \mathbf{H}(\omega), \mathbf{H}(\omega)$	结构动力系统的传递函数、频率响应函数和频率响应函数矩阵
$h(t)$	脉冲响应函数
m, c, k	质量、阻尼和刚度
$\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$	质量、阻尼和刚度系数矩阵
Φ, ϕ	振型矩阵、振型向量
ω	圆频率
ζ	阻尼比
g	结构损耗因子
Θ	压缩采样测量矩阵
δ_s	约束等距性常数
$\mathbf{G}_{ff}(\cdot), \mathbf{G}_{xx}(\cdot)$	结构输入、响应的功率谱密度函数矩阵
$\mathbf{R}_{xx}(\cdot)$	结构响应相关函数矩阵
$M(\cdot), \text{Bel}(\cdot), \text{Pl}(\cdot)$	基本概率函数、信任函数和似然函数
$\mathbf{S}$	结构特征参数灵敏度系数矩阵
$\varepsilon, \varepsilon_{cs}$	应变和混凝土收缩应变
m_f, C_f	S-N 曲线材料参数
MAC	模态置信因子
COMAC	坐标模态置信度指标
R	结构构件抗力
S_G, S_L, S_T, S_W	恒荷载、车辆荷载、温度荷载和风荷载效应
$\Delta S, R_A, S_m$	应力幅、应力比和平均应力
I_u, I_v, I_w	顺风向、横风向和竖向脉动风湍流积分尺度
L_u, L_v, L_w	顺风向、横风向和竖向脉动风湍流强度
g_u, g_v, g_w	顺风向、横风向和竖向阵风因子
θ	风向角
C_p	表面风压系数
St	斯特劳哈尔数

U_r	折减风速
Re	雷诺数
C_l, C_d, C_m	升力系数、阻力系数和扭矩系数
PGA、PGV、PGD	地震动记录峰值加速度、峰值速度和峰值位移
$S_{pv}(T, \zeta)$	阻尼比为 ζ 的单质点体系的相对伪速度反应谱
$\langle f \rangle_t$	平均瞬时频率

目 录

前言

主要符号

第 0 章 绪论	1
0.1 结构健康监测的研究与应用概况	1
0.1.1 传感技术	3
0.1.2 数据科学与工程	12
0.2 结构损伤识别与模型修正	23
0.2.1 模态参数识别	23
0.2.2 结构损伤识别	28
0.2.3 结构模型修正	40
0.3 结构健康监测数据分析建模与安全评定	44
0.3.1 监测数据分析	44
0.3.2 监测数据建模与安全评定	49
0.4 结构灾害监测数据分析与评估	57
0.4.1 结构风效应监测数据分析	57
0.4.2 结构地震非线性模型识别与评估	61
0.5 结构健康监测的 Benchmark 模型	66
0.6 结构健康监测系统的应用	69
0.6.1 桥梁结构	69
0.6.2 国家游泳中心	79
0.6.3 某高层建筑	81
0.6.4 结构健康监测管理软件系统平台	82
第 1 章 数字信号的基础知识	86
1.1 傅里叶变换	86
1.2 离散信号的傅里叶变换与快速傅里叶变换	87
1.2.1 离散傅里叶变换	87
1.2.2 快速傅里叶变换	88
1.2.3 栅栏效应	88
1.2.4 频率分辨率	89
1.2.5 能量泄漏与加窗	90

1.3	采样定理	93
1.4	拉普拉斯变换	96
1.4.1	拉普拉斯变换的定义	96
1.4.2	拉普拉斯变换的函数微分性质	98
1.5	信号滤波与去噪	98
1.5.1	滤波	99
1.5.2	小波去噪	102
第2章	数据压缩采样	104
2.1	数据压缩采样的数学原理	104
2.1.1	压缩感知问题描述	104
2.1.2	稀疏性	105
2.1.3	测量矩阵	106
2.1.4	优化求解算法	106
2.2	应用实例	108
2.2.1	桥梁监测加速度压缩采样	108
2.2.2	大跨空间结构监测加速度压缩采样	117
第3章	无线传输数据丢失恢复算法	121
3.1	无线传输数据丢失概述	121
3.2	无线传输数据丢失恢复算法	126
3.2.1	无测量噪声的数据丢失恢复算法	126
3.2.2	有测量噪声的数据丢失恢复算法	127
3.3	应用实例	128
3.3.1	桥梁监测数据丢失恢复	128
3.3.2	大跨空间结构监测数据丢失恢复	140
第4章	结构模态分析理论基础	144
4.1	单自由度结构的频响函数和脉冲响应函数	144
4.1.1	线性黏滞阻尼动力系统	144
4.1.2	线性结构阻尼动力系统	148
4.1.3	频响函数曲线性质	150
4.1.4	不同荷载作用下结构频响函数和脉冲响应函数	155
4.2	多自由度结构频响函数	159
4.3	多自由度结构实模态频响函数和脉冲响应函数	163
4.3.1	多自由度结构模态参数	163
4.3.2	多自由度结构实模态频响函数与单位脉冲响应函数	166
4.3.3	算例分析	168

4.4 多自由度结构复模态频响函数	174
4.4.1 线性黏滞阻尼动力系统	174
4.4.2 线性结构阻尼动力系统	179
4.4.3 复模态性质	180
4.4.4 复模态频响函数及脉冲响应函数	181
4.4.5 算例分析	184
第5章 环境激励下结构模态参数识别方法	188
5.1 频域分解法	188
5.2 NExT法与ERA法	192
5.2.1 NExT法	192
5.2.2 ERA法	195
5.3 随机子空间方法	202
5.4 时变环境结构模态参数分析	208
5.4.1 主成分分析方法	208
5.4.2 神经网络建模方法	212
5.5 应用实例	214
5.5.1 结构健康监测系统概况	214
5.5.2 结构模态参数识别结果	215
5.5.3 环境因素与模态参数关系模型	222
第6章 结构损伤识别方法	233
6.1 基于模态参数的结构损伤识别方法	233
6.1.1 基于频率的结构损伤识别方法	233
6.1.2 基于振型的结构损伤识别方法	235
6.2 结构损伤识别信息融合方法	238
6.2.1 D-S证据理论	238
6.2.2 Bayesian推理	241
6.2.3 D-S证据理论与Bayesian推理的比较	242
6.2.4 基于信息融合的结构损伤识别方法	246
6.3 算例分析	249
6.3.1 桥梁有限元模型	249
6.3.2 结构损伤识别结果	250
第7章 结构模型修正	255
7.1 模态参数灵敏度方法	255
7.1.1 结构模态参数灵敏度	255
7.1.2 结构参数估计方法	257

7.2	Bayesian 概率方法	261
7.3	应用实例	264
7.3.1	斜拉桥子结构特征	264
7.3.2	待修正结构参数	268
7.3.3	修正结构参数	270
第 8 章	车辆荷载极值模型与疲劳荷载谱	273
8.1	车辆荷载监测数据特征	273
8.2	随机过程概率模型与极值概率模型	277
8.2.1	滤过 Poisson 过程与极值概率模型	277
8.2.2	滤过 Weibull 过程与极值概率模型	279
8.2.3	平稳二项随机过程与极值概率模型	279
8.2.4	更新过程与极值概率模型	281
8.3	基于监测数据的车辆荷载极值建模与概率模型	284
8.3.1	截口分布概率模型	284
8.3.2	到达时间概率模型	287
8.3.3	极值概率模型数值计算方法	288
8.3.4	应用实例	291
8.4	基于监测数据的车辆疲劳荷载谱建模与模型	298
8.4.1	中国车辆分类	298
8.4.2	车辆疲劳荷载谱	300
8.4.3	车流量预测 Logistic 方法	302
8.4.4	应用实例	303
第 9 章	车辆荷载时空分布识别与建模	307
9.1	车辆荷载时空分布识别方法	307
9.1.1	二值图像形态学方法	308
9.1.2	车辆图像识别	310
9.1.3	车辆定位	318
9.2	车辆荷载随机场建模	320
9.2.1	马尔科夫随机场理论基础	321
9.2.2	联合树算法	323
9.2.3	车辆荷载随机场模型	326
9.3	应用实例	328
9.3.1	车辆荷载识别	328
9.3.2	车辆荷载建模	330

第 10 章 基于监测数据的主梁安全评定方法	334
10.1 应变监测数据特征	334
10.1.1 钢筋混凝土桥梁	334
10.1.2 钢桥	337
10.2 应变监测数据的解耦	340
10.2.1 趋势项应变解耦方法	340
10.2.2 混凝土收缩与徐变应变解耦方法	343
10.3 基于监测应变的结构承载力极限状态安全评定	348
10.3.1 关键构件荷载效应概率模型	349
10.3.2 关键构件抗力衰减模型	358
10.3.3 结构承载力极限状态可靠度评估方法	359
10.3.4 应用实例	361
10.4 基于监测应变的钢箱梁疲劳累积损伤评估方法	365
10.4.1 钢材疲劳累积损伤基础理论	365
10.4.2 钢箱梁构造细节疲劳寿命曲线	368
10.4.3 钢箱梁疲劳荷载效应谱计算方法	370
10.4.4 应用实例	371
第 11 章 基于监测数据的拉索安全评定方法	373
11.1 拉索时变索力识别方法	374
11.1.1 索力监测数据特征	374
11.1.2 时不变索力识别方法	379
11.1.3 时变索力识别方法	381
11.1.4 算例分析	386
11.2 承载力极限状态评估方法	396
11.2.1 拉索时变抗力模型	396
11.2.2 荷载效应极值模型	402
11.2.3 时变承载力极限状态安全评定	404
11.2.4 应用实例	406
11.3 基于 S-N 曲线的拉索疲劳累积损伤评估与寿命预测方法	416
11.3.1 高强钢丝疲劳寿命预测模型	416
11.3.2 拉索疲劳寿命预测模型	418
11.3.3 拉索疲劳荷载效应谱计算方法	419
11.3.4 应用实例	420
11.4 拉索疲劳累积损伤与寿命预测的断裂力学方法	432
11.4.1 高强钢丝断裂力学基本理论	432

11.4.2	高强钢丝腐蚀疲劳退化模型	434
11.4.3	拉索疲劳寿命评估方法	437
第 12 章	大跨度桥梁风和风效应监测数据分析	439
12.1	风与风效应监测系统设计方法	439
12.2	风场监测数据分析方法	442
12.2.1	平均风速	442
12.2.2	风速剖面	443
12.2.3	脉动风湍流强度与湍流积分尺度	444
12.2.4	脉动风速功率谱	446
12.2.5	阵风因子	448
12.2.6	脉动风的空间相关性	449
12.2.7	风场展向不均匀性	449
12.3	风压场与绕流场监测数据分析方法	449
12.3.1	风压场	449
12.3.2	绕流场	451
12.4	主梁涡激振动监测数据分析方法	455
12.4.1	涡激振动判别条件	456
12.4.2	涡激振动特征	456
12.5	主梁抖振响应监测数据分析方法	458
12.6	斜拉索涡激振动监测数据分析方法	459
12.6.1	平均风速的空间变换关系	459
12.6.2	斜拉索涡激振动起振风况分析	459
12.6.3	斜拉索涡激振动参与模态的估计方法	461
12.7	应用实例 1	462
12.7.1	某大跨度悬索桥风与风效应监测系统	462
12.7.2	风场监测数据与分析	466
12.7.3	风压场与绕流场监测数据与分析	472
12.7.4	主梁涡激振动监测数据与分析	477
12.7.5	主梁抖振监测数据分析	480
12.8	应用实例 2	484
12.8.1	某大跨度斜拉桥及斜拉索涡激振动监测系统概况	484
12.8.2	斜拉索涡激振动监测数据分析	485
第 13 章	结构地震反应监测数据分析与损伤识别	489
13.1	地震地面运动和结构地震反应监测数据分析	489
13.1.1	地震地面运动工程特性分析	490

13.1.2 结构地震损伤快速分析方法	501
13.2 基于数据驱动的结构非线性损伤定位方法	508
13.2.1 识别方法	508
13.2.2 算例分析	511
13.3 结构非线性模型参数识别方法	520
13.3.1 识别方法	520
13.3.2 算例分析	522
13.4 基于完备集的结构非线性模型及其参数识别方法	530
13.4.1 识别方法	530
13.4.2 算例分析	533
13.5 基于非完备集的结构非线性模型及其参数识别方法	535
13.5.1 识别方法	535
13.5.2 算例分析	539
第 14 章 结构健康监测的 Benchmark 模型	543
14.1 健康监测系统概况	543
14.1.1 工程概况	543
14.1.2 结构健康监测系统	544
14.2 结构修正有限元模型	547
14.2.1 初始有限元模型	548
14.2.2 修正有限元模型	551
14.3 拉索状态评估 Benchmark 问题	551
14.3.1 拉索索力监测数据	551
14.3.2 退役高强钢丝和斜拉索疲劳特性	552
14.3.3 拉索状态评估 Benchmark 问题	554
14.4 主梁损伤识别 Benchmark 问题	554
14.4.1 监测数据	555
14.4.2 检测数据	558
14.4.3 损伤识别 Benchmark 问题	558
参考文献	560

Contents

Preface

Main Symbols

Introduction

Chapter 1 Basic knowledge of signal processing	86
1.1 Fourier transform	86
1.2 Discrete Fourier transform and fast Fourier transform of signal	87
1.2.1 Discrete Fourier transform	87
1.2.2 Fast Fourier transform	88
1.2.3 Picket fence effect	88
1.2.4 Frequency resolution	89
1.2.5 Energy leakage and window-added	90
1.3 Sampling theory	93
1.4 Laplace transform	96
1.4.1 Definition of Lappace transform	96
1.4.2 Function differential property of Lappace transform	98
1.5 Filtering and denosing of signal	98
1.5.1 Filtering	99
1.5.2 Denosing	102
Chapter 2 Compressive sampling	104
2.1 Principle of compressive sampling	104
2.1.1 Problem of compressive sampling	104
2.1.2 Sparsity	105
2.1.3 Measurement matrix	106
2.1.4 Optimizaiton algorithm	106
2.2 Case study	108
2.2.1 Compressive sampling of accleration data of bridge	108
2.2.2 Compressive sampling of accleration data of large span spatial structure	117
Chapter 3 Lost data recovery for wireless data transmission	121
3.1 Data loss reasons for wireless data transmission	121
3.2 Algorithm for lost data recovery	126

3.2.1	Lost data recovery without noise	126
3.2.2	Lost data recovery with noise	127
3.3	Case study	128
3.3.1	Data lost recovery for monitored data of bridge	128
3.3.2	Data lost recovery for monitored data of large span spatial structure	140
Chapter 4	Structural modal analysis	144
4.1	Frequency response function and impulse response function of single degree-of-freedom structure	144
4.1.1	Linear viscous damping dynamic system	144
4.1.2	Linear structure damping dynamic system	148
4.1.3	Characteries of frequency response function curve	150
4.1.4	Frequency response function and impulse response function under different loads	155
4.2	Frequency response function of multiple degree-of-freedom structure	159
4.3	Frequency response function and impulse response function of multiple degree-of-freedom structure	163
4.3.1	Modal parameters of multiple degree-of-freedom structure	163
4.3.2	Frequency response function and impulse response function of multiple degree-of-freedom structure	166
4.3.3	Example	168
4.4	Complex modal frequency response function of multiple degree- of-freedom structure	174
4.4.1	Linear structure damping dynamic system	174
4.4.2	Linear viscous damping dynamic system	179
4.4.3	Complex modal properties	180
4.4.4	Frequency response function and impulse response function of complex modal	181
4.4.5	Example	184
Chapter 5	Modal identification from ambient vibration of structure	188
5.1	Frequency domain decomposition	188
5.2	NExT and ERA	192
5.2.1	NExT	192
5.2.2	ERA	195