



山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

支挡结构损伤识别与预警

陈建功 许 明 吴曙光 著

中国建筑工程出版社

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

支挡结构损伤识别与预警

陈建功 许 明 吴曙光 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

支挡结构损伤识别与预警/陈建功等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 6
(山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列)
ISBN 978-7-112-20592-9

I. ①支… II. ①陈… III. ①支挡结构-损伤 (力学)-识别-研究②支挡结构-损伤 (力学)-预测-研究
IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 060395 号

本书介绍了支挡结构损伤识别与预警的理论和方法。全书共分为 13 章, 主要包括: 绪论, 模态分析基本理论, 支挡结构模态测试技术, 支挡结构动态信号后处理技术, 支挡结构模态参数识别技术, 支挡结构数值模态分析技术, 基于模态参数的支挡结构损伤识别, 支挡结构动测信号的时频分析, 支挡结构动力响应的能量谱分析, 支挡结构系统损伤预警方法, 环境激励下的支挡结构损伤预警方法, 支挡结构健康诊断仪的硬件设计和软件开发。

本书适合从事岩土工程、结构工程、水利工程、交通工程等方面的检测与监测技术人员参考, 也可作为高等院校相关专业师生参考用书。

责任编辑: 张伯熙 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 张 颖

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

支挡结构损伤识别与预警

陈建功 许 明 吴曙光 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21½ 字数: 411 千字

2017 年 9 月第一版 2017 年 9 月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-20592-9

(30243)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)



山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

编委会名单

主 任：周绪红

副主任：张四平 毛志兵 文安邦 王清勤 刘汉龙

委 员：（按姓氏笔画排序）

卢 峰 申立银 任 宏 刘贵文 杜春兰

李正良 李百战 李英民 李和平 吴艳宏

何 强 陈宁生 单彩杰 胡学斌 高文生

黄世敏 蒋立红

总 序

中国是一个多山国家，山地面积约为 666 万 km^2 ，占陆地国土面积的 69%，山地县级行政机构数量约占全国的 2/3，蓄积的人口与耕地分别占全国的 1/3 和 2/5。山地区域是自然、文化资源的巨大宝库，蕴含着丰富的水力、矿产、森林、生物、旅游等自然资源，也因多民族数千年的聚居繁衍而积淀了灿烂多姿的历史遗迹与文化遗产。

然而，受制于山地地形复杂、灾害频发、生态脆弱的地理环境特点，山地城镇建设挑战多、难度大、成本高，导致山地区域城镇化水平低，经济社会发展滞后，存在资源低效开发、人口流失严重、生态环境恶化、文化遗产衰落等众多经济社会问题。截至 2014 年，我国云南、贵州、西藏、甘肃、新疆等山地省区城镇化率不足 40%，距离《国家新型城镇化规划（2014～2020）》提出的常住人口城镇化率达到 60% 的发展目标仍有很大差距。因此，采用“开发与保护”并重的方式推进山地城镇建设，促进山地城镇可持续发展，对于推动我国经济结构顺利转型、促进经济社会和谐发展、支撑国家“一带一路”发展战略具有不可替代的重要意义。

为解决山地区域城镇化建设的重大需求，2012 年 3 月重庆大学联合中国建筑股份有限公司、中国建筑科学研究院、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所共同成立了“山地城镇建设协同创新中心”，针对山地城镇建设面临的安全与防灾关键问题开展人才培养、科技研发、学科建设等创新工作。经过三年的建设，中心围绕“规划—设计—建造—管理”的建筑产业链，大力整合政府、企业、高校、科研院所的优势资源，在山地城镇建设安全与防灾领域汇聚了一流科研团队，建设了高水平综合性示范基地，取得了有重大影响的科研理论与技术成果。迄今为止，中心已在山地城镇生态规划、山地城镇防灾减灾、山地城镇环境安全、山地城镇绿色建造、山地城镇建设管理等五大方向取得了一系列重大科研成果，培养和造就了一批高素质建设人才，有力地支撑了山地城镇的重大工程建设，并着力营造出城镇建设主动依靠科技创新、科技创新更加贴近城镇发展需求的良好氛围。

《山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列》集中展示了山地城镇建设协同创新中心在山地城镇生态规划与文化遗产保护、山地灾害形成理论与减灾关键技术、山地环境安全理论与可再生能源利用、山地城镇建设管理与可持续发展等领域的最新科研成果，是山地城镇建设领域科技工作者智慧与汗水的结晶。本套

丛书的出版，力图服务于山地城镇建设领域科学交流与技术转化，促进该领域高层次的学术传播、科技交流、技术推广与人才培养，努力营造出政产学研高效整合的协同创新氛围，为山地城镇的全面、协调与可持续发展做出新的重大贡献。

中国工程院院士
重庆大学校长

周绪红

前 言

随着我国国民经济水平的提高与基础设施建设的不断发展,支挡结构技术水平的提高和减少环境破坏、节约用地观念的加强,支挡结构在岩土工程中的使用越来越广泛,特别是在铁路、公路路基及建筑基础工程中所占的比重也越来越大。可以说支挡结构是城市基础建设中确保山体稳定性和工程建筑物运营安全、造福于人类的重要工程措施。然而由于材料性能、施工质量、后期养护、土质条件、土体受力条件变化、排水、腐蚀效应、地震等一系列人为和自然灾害等因素的影响,加之支挡结构经长期服役后,材料性能老化,自然损伤的不断积累,会出现滑动、倾覆、不均匀沉降、开裂、剥落、腐蚀、伸缩缝位置错缝、锚固失效等各种病害和事故。一旦这些支挡结构失效或者破坏,人民群众的生命财产及国家的巨额基础设施将蒙受巨大的损失。由于支挡结构损伤的出现往往都是局部的和渐变式发展的,在加强施工管理和施工监理基础上,必须要定期的对支挡结构“健康”状况进行监测,及早发现损伤位置和损伤程度并进行有效的维护或者维修是保证支挡结构健康运营的关键。因此,如何对支挡结构进行检测和评估,以确定支挡结构是否存在损伤,进而判别损伤位置和损伤程度以及结构目前的健康状况、使用功能和结构损伤的变化趋势,成为岩土工程结构健康监测与安全评估系统研究的最主要问题。研究开发一种简单、方便、快速、无损、有效的健康诊断方法及仪器,弥补以至取代传统的检测方法,以适应大规模工程施工及运行管理的需要,这对支挡结构的质量管理和健康状况的监控是非常必要和有意义的,具有重要的社会意义和经济价值。

本书包括1~13章,较系统地阐述了用于支挡结构损伤识别和预警的基本理论、方法以及相应仪器的硬软件系统的开发和应用。第1章绪论部分全面综述了与本书相关研究的进展和发展趋势。

2~11章详细论述了支挡结构损伤识别和预警的基本理论和方法,第2章介绍了模态分析基本理论,对结构系统的实模态分析、复模态分析、拉氏变化方法包括频响函数、脉冲响应函数进行了详细论述。第3章从试验模态分析的全过程阐述了适用于支挡结构系统试验模态分析的简便、经济和有效的方法。第4章介绍了支挡结构动测信号的后处理技术,包括采样和量化、加窗、FFT、平均、数字滤波、细化等。第5章详细论述了对动测信号提取模态参数的各种方法和技术。第6章介绍了采用动力有限元法对支挡结构系统的动力响应模拟及模态分析技术。第7章详细介绍了基于模态参数的损伤识别方法及损伤识别指标,论述了

改进多种群遗传算法的支挡结构系统的整体损伤识别方法和分区损伤识别方法。第 8 章利用时频分析手段对支挡结构系统的动测信号进行分析,包括短时傅里叶变换和小波变换。第 9 章介绍了基于小波变换的结构动力系统的多尺度分解原理,利用结构动力系统的多尺度分解特性,对支挡结构动力响应信号的能量谱进行分析讨论。第 10 章详细论述了基于小波包能量谱的结构损伤预警方法,包括结构损伤预警的小波包能量谱计算方法以及结构损伤特征向量与损伤预警指标的计算方法等,从而建立基于小波包能量谱进行支挡结构损伤预警的方法体系。第 11 章将环境荷载激励技术与小波包分析技术相结合,论述了适合于环境激励下支挡动力响应的小波包能量谱及其损伤预警指标计算方法,并考察这种预警方法的可行性与有效性。

12~13 章对支挡结构健康诊断仪的各部分组成进行了介绍,其基本原理是采用环境激励的方式获得时域信号,通过 GPRS/3G 通信手段传输给计算机,再经软件分析,包括频率分析,小波包频带能量谱分析,对支挡结构进行健康诊断和损伤预警。第 12 章介绍了支挡结构健康诊断仪硬件系统组成,包括上位机、下位机、无线加速度传感器节点。第 13 章介绍了软件集成开发环境和 Z-Stack 源代码的分析,并开发了整个系统的应用软件。

本书的研究工作获得了国家自然科学基金科学仪器基础研究专款基金项目(51027004)“岩土支挡结构健康诊断仪的研制”的资助。该项目负责人、作者的恩师张永兴教授,因工作积劳成疾,在项目研究期间不幸离世,本书的出版是对他最好的怀念。

本书总结了作者关于支挡结构损伤识别和预警的阶段性成果。其中的论点和方法还有待进一步补充、完善和提高,因而对本书存在的不足甚至错误之处,谨请读者批评指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 支挡结构健康监测的意义	1
1.2 结构损伤诊断的研究与应用	3
1.2.1 结构损伤诊断概述	3
1.2.2 基于频率的损伤识别技术	5
1.2.3 基于振型的损伤识别技术	6
1.2.4 基于遗传算法的损伤识别技术	7
1.2.5 基于小波分析的结构损伤识别技术	8
1.3 远程监控系统研究现状	11
2 模态分析基本理论	13
2.1 振动结构的物理参数模型	13
2.2 振动结构系统的实模态分析	14
2.2.1 无阻尼系统的模态分析	14
2.2.2 比例阻尼系统	16
2.3 一般阻尼系统的复模态分析	17
2.3.1 单自由度系统	17
2.3.2 多自由度系统	18
2.4 模态分析的拉氏变换方法	20
2.4.1 传递函数与频响函数	20
2.4.2 频响函数的物理意义	20
2.4.3 系统频响函数与模态参数的关系	21
2.4.4 脉冲响应函数	22
2.4.5 频响函数的模态展式	22
3 支挡结构模态测试技术	24
3.1 概述	24
3.2 激励方式与装置	25
3.2.1 激励方式	25

3.2.2	激励装置	26
3.2.3	激励信号	27
3.3	时间历程测试技术	28
3.3.1	振动信号测量	28
3.3.2	数据采集系统	31
3.3.3	传感器布置原则	32
3.3.4	混频现象的控制	33
3.4	冲击试验	33
3.4.1	单次冲击激励力谱	33
3.4.2	随机冲击激励力谱	35
3.4.3	DFC-2 高弹性聚能力锤性能及控制技术	36
3.4.4	冲击试验中应注意的问题	39
3.5	支挡结构实验模态预实验分析	40
3.5.1	传感器的优化配置	40
3.5.2	实验激励点和响应点的选取步骤及结果	42
3.6	支挡结构模态试验	42
3.6.1	悬臂板式挡墙模态试验	44
3.6.2	现场支挡结构模态试验	47
4	支挡结构动态信号后处理技术	52
4.1	引言	52
4.1.1	模拟信号的离散化	52
4.1.2	混频效应、时域和频域采样定理	53
4.1.3	泄漏和窗函数	55
4.2	动测信号的预处理方法	58
4.2.1	消除多项式趋势项	58
4.2.2	采样数据的平滑处理	59
4.3	动测信号的频域处理方法	61
4.3.1	傅里叶变换	62
4.3.2	选带分析技术	66
4.3.3	随机振动信号的频谱处理技术	67
4.3.4	平均技术	71
4.4	动测信号的时域处理方法	73
4.4.1	数字滤波	73
4.4.2	振动信号的积分和微分变换	74

4.4.3	随机振动信号时域处理方法	75
5	支挡结构模态参数识别技术	79
5.1	模态参数识别的概念	79
5.2	模态参数识别方法分类	80
5.2.1	按处理各阶模态耦合所采用的方法分类	80
5.2.2	按模态参数识别手段分类	80
5.2.3	按输入输出数目分类	81
5.2.4	按识别域分类	82
5.2.5	按工作状态分类	87
5.3	EMA（试验模态参数）频率识别方法	89
5.3.1	传递函数分析	89
5.3.2	变时基频响函数分析	90
5.3.3	导纳圆拟合法	92
5.3.4	最小二乘迭代法	96
5.3.5	加权最小二乘迭代法	98
5.3.6	有理分式多项式方法	99
5.3.7	正交多项式方法	104
5.3.8	频域模态参数识别方法比较	110
5.4	EMA 时域识别方法	111
5.4.1	ITD 方法	111
5.4.2	STD 方法	114
5.4.3	复指数法	115
5.4.4	ARMA 模型时间序列分析法	119
5.4.5	时域模态参数识别方法比较	121
5.5	整体识别方法	123
5.5.1	整体正交多项式法	123
5.5.2	特征系统实现法	124
5.5.3	悬臂板式挡墙模态实验分析结果	128
5.5.4	现场悬臂式挡土墙模态试验分析成果	132
6	支挡结构数值模态分析技术	134
6.1	支挡结构系统低应变动力响应数值模拟	134
6.1.1	支挡结构系统低应变动力响应的有限元分析方法	134
6.1.2	支挡结构系统低应变动力响应的三维有限元模拟	137

6.2 支挡结构系统简化动测数值模型	143
6.2.1 模型基本假定	143
6.2.2 土体附加参数理论分析	144
6.3 参数识别的有限元优化设计	145
6.3.1 优化设计的数学模型	145
6.3.2 优化设计的基本概念	146
6.3.3 有限元优化技术	148
6.3.4 收敛准则	149
6.3.5 土体附加参数识别步骤	149
6.4 土体附加参数识别结果分析	152
6.4.1 结果对比分析	152
6.4.2 阻尼影响分析	154
7 基于模态参数的支挡结构损伤识别	156
7.1 支挡结构损伤识别指标	156
7.1.1 模态平均曲率差 MMCD	158
7.1.2 柔度差平均曲率 FDMC	159
7.1.3 损伤程度识别	161
7.1.4 算例分析	162
7.2 支挡结构系统损伤识别的改进多种群遗传算法	172
7.2.1 改进多种群遗传算法	172
7.2.2 整体损伤识别方法	177
7.2.3 分区损伤识别方法	185
8 支挡结构动测信号的时频分析	191
8.1 支挡结构动测信号的一般时频分析	191
8.1.1 支挡结构系统动测信号的短时傅里叶变换	192
8.1.2 支挡结构系统动测信号的 Wigner-Ville 分布	194
8.2 支挡结构系统动测信号的小波分析	196
8.2.1 小波变换的基本原理	196
8.2.2 多分辨率分析与 Mallat 算法	199
8.2.3 小波包分析	205
9 支挡结构动力响应的能量谱分析	212
9.1 支挡结构系统的多尺度损伤分析原理	212

9.1.1	结构动力系统描述	212
9.1.2	信号的多尺度表示及 FOWPT 算法	214
9.1.3	结构动力系统的多尺度描述	216
9.1.4	结构动力系统的多尺度损伤分析	218
9.1.5	结构动力系统多尺度分解的噪声鲁棒性分析	219
9.2	基于能量谱的支挡结构多尺度损伤分析	221
9.2.1	基于分解系数的能量谱小波包子带能量谱	221
9.2.2	基于分解系数的小波包时频能量谱	222
9.2.3	基于节点能量的小波包子带能量谱	227
9.2.4	基于节点能量的小波包时频能量谱	228
10	支挡结构系统损伤预警方法	234
10.1	支挡结构动力响应的小波包能量谱的计算方法	234
10.1.1	小波函数的选择	234
10.1.2	小波包分解层次的选择	241
10.2	基于小波包能量谱的支挡结构损伤预警方法	242
10.2.1	结构特征向量和特征频带（时频带）的构建	242
10.2.2	基于损伤特征向量的支挡结构损伤特征指标	246
10.2.3	支挡结构损伤预警指标的选择	248
10.2.4	基于时频特征向量的损伤预警指标的预警效果	253
11	环境激励下的支挡结构损伤预警方法	256
11.1	NExT 自然激励响应法	256
11.2	虚拟脉冲响应函数法	266
12	支挡结构健康诊断仪的硬件设计	274
12.1	支挡结构健康诊断仪硬件系统组成	274
12.1.1	无线加速度传感器节点	274
12.1.2	下位机	275
12.1.3	上位机	275
12.2	ZigBee 技术及其协议标准	276
12.2.1	ZigBee 技术发展概况	276
12.2.2	ZigBee 技术特点	276
12.2.3	ZigBee 与其他短距离无线通信技术的比较	277
12.2.4	ZigBee 数据采集系统采集数据的原理	278

12.3 无线加速度传感器节点硬件设计	279
12.3.1 无线加速度传感器的工作原理	279
12.3.2 加速度传感器的选择	280
12.3.3 无线 ZigBee 模块	283
12.3.4 ZigBee 射频模块	286
12.3.5 电源模块	287
12.3.6 其他外围电路	288
12.3.7 外接 941B 型振动传感器	288
12.4 下位机、上位机硬件设计	289
12.4.1 下位机	289
12.4.2 上位机	291
12.5 太阳能充电控制系统	292
13 支挡结构健康诊断仪软件开发	293
13.1 IAR 软件开发环境	293
13.2 ZigBee 协议栈实现	293
13.2.1 Z-Stack 协议栈源程序	294
13.2.2 ZigBee 星型网的组网设计与实现	296
13.3 数据采集系统的软件设计	300
13.3.1 终端节点数据采集的软件程序	300
13.3.2 协调器软件	301
13.3.3 工控机软件	301
13.4 建立下位机与上位机的联系	303
13.4.1 下位机工控机的设置	303
13.4.2 MR-900E (3G 路由器) 设置	305
13.4.3 上位机设置	305
13.4.4 数据共享	306
13.5 上位机的软件	306
13.5.1 动测信号传统分析	306
13.5.2 支挡结构损伤预警系统软件	313
参考文献	318

1 绪 论

1.1 支挡结构健康监测的意义

支挡结构包括挡土墙、抗滑桩、预应力锚索等支撑和锚固结构，主要是用来支撑、加固填土或山坡土体，防止其坍塌以保持稳定的一种构筑物。在铁路工程、公路工程和地下工程中，支挡结构被广泛应用于稳定路堤、路堑、隧道洞口以及桥梁两端的路基边坡等，主要用于承受土体的侧向土压力。在水利、矿山、房屋建筑等工程中支挡结构主要用于加固山坡、基坑边坡和河流岸壁。当以上工程或其他岩土工程遇到滑坡、崩塌、岩堆体、落石、泥石流等不良地质灾害时，支挡结构主要用于加固或拦挡不良地质体，因此，支挡结构是岩土工程中的一个重要组成部分，具有极其重要的地位。同时，随着我国国民经济水平的提高与基础设施建设的不断发展，以及支挡结构技术水平的提高和减少环境破坏、节约用地观念的加强，支挡结构在岩土工程中的使用越来越广泛，特别是在铁路、公路路基及建筑基础工程中所占的比重也越来越大。可以说支挡结构是城市基础建设中确保山体稳定性和工程建筑物运营安全、造福于人类的重要工程措施。然而由于材料性能、施工质量、后期养护、土质条件、土体受力条件变化、排水、腐蚀效应、地震等一系列人为和自然灾害等因素的影响，加之支挡结构经长期服役后，材料性能老化，自然损伤的不断积累，会出现滑动、倾覆、不均匀沉降、开裂、剥落、腐蚀、伸缩缝位置错缝、锚固失效等各种病害和事故。一旦这些支挡结构失效或者破坏，人民群众的生命财产及国家的巨额基础设施将蒙受巨大的损失。

近年来建筑行业突发事件屡见不鲜，尤其是边坡的垮塌事故不断涌现（图 1.1）。



图 1.1 边坡的垮塌事故

Fig 1.1 Collapse accident of slope

2001 年“5.1”重庆武隆滑坡使一幢 9 层楼房被摧毁掩埋，造成 79 人死亡、7 人受伤的重大灾害（图 1.2）。

这些事故均表明实际支挡结构内部存在着许多损伤，存在严重的健康问题。如果支挡结构的损伤不能被及时发现和得到有效的处理，不仅会影响支挡结构的正常运营，缩短支挡结构的使用寿命，严重的情况下甚至会发生支挡结构失效或者坍塌的灾难性事故。由于支挡结构损伤的出现往往都是局部的和渐变式发展的，因此，在加强施工管理和施工监理基础上，必须要定期地对支挡结构“健康”状况进行监测，及早发现损伤位置和损伤程度并进行有效的维护或者维修是保证支挡结构健康运营的关键。但是，目前支挡结构的健康监测通常采用开孔或开槽取样验证等传统方法，这些传统方法存在工作效率低、不全面、破坏了结构本身的整体性、无量化的指标，且检测面小，仅限于个别抽查，难以适应大面积普查的需要等缺点，属于破坏性试验和局部损伤识别技术。正是由于支挡结构健康状况监测水平的落后，增加了对其病害进行评估和及时采取有力措施进行控制和补救的难度。因此，迫切需要一种简单、方便、快速、无损、有效的健康诊断方法及仪器，弥补以至取代传统的检测方法，以适应大规模工程施工及运行管理的需要，这对支挡结构的质量管理和健康状况的监控是非常必要和有意义的，具有重要的社会意义和经济价值。因此，如何对支挡结构进行检测和评估，以确定支挡结构是否存在损伤，进而判别损伤位置和损伤程度以及结构目前的健康状况、使用功能和结构损伤的变化趋势，成为岩土工程结构健康监测与安全评估系统研究的最主要问题。

结构健康监测系统是集结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。Housner 等人将结构健康监测系统定义为^[1]：一种从营运状态的结构中获取并处理数据，评估结构的主要性能指标（如可靠性、耐久性等）的有效方法。它结合了无损检测和结构特性分析（包括结构响应），目的是为了诊断结构中是否有损伤发生，判断损伤的位置，估计损伤的程度以及损伤对结构将要造成的后果。

近年来，结构诊断理论与方法的研究取得了一定的进展，开发了各种基于频率、振型、振型曲率、应变振型等改变量的损伤检测和定位技术，在处理方法上探寻了 MAC（模态保证标准）法、COMAC（坐标模态保证标准）法、柔度矩阵法、矩阵振动修正法、非线性迭代法等。目前，更多的研究者致力于采用智能



图 1.2 重庆武隆滑坡
Fig 1.2 Landslide in Chongqing Wulong

算法和先进信号分析来发展结构损伤诊断方法,例如神经网络方法、模糊数学方法、小波变换方法、Hilbert-Huang 变换方法和信息融合技术等。发展了包括可靠度理论、层次分析法、模糊理论、神经网络、遗传算法以及专家系统等结构状态评估方法,并且初步应用于结构健康监测系统中。

根据上述分析,支挡结构健康监测系统可以划分为在线测试、实时分析、损伤诊断、状态评估以及维护决策等五个部分(图 1.3),它具有如下功能^[2,3]:
①由传感器监测外荷载激励下支挡结构的动力响应信号;②能实现数据的同步采集、通过无线传输到测控中心,并对数据进行有效管理;③能对实测数据进行分析,从而实现系统识别、有限元模型修正以及识别支挡结构的损伤位置和评估损伤程度等功能;④能对支挡结构的整体稳定性进行评价和预警等。可以看出,支挡结构健康监测系统涉及的研究领域众多,包括现代测试与传感技术、网络通信技术、信号分析与处理技术、数学理论和结构分析理论、损伤诊断与状态评估技术等。

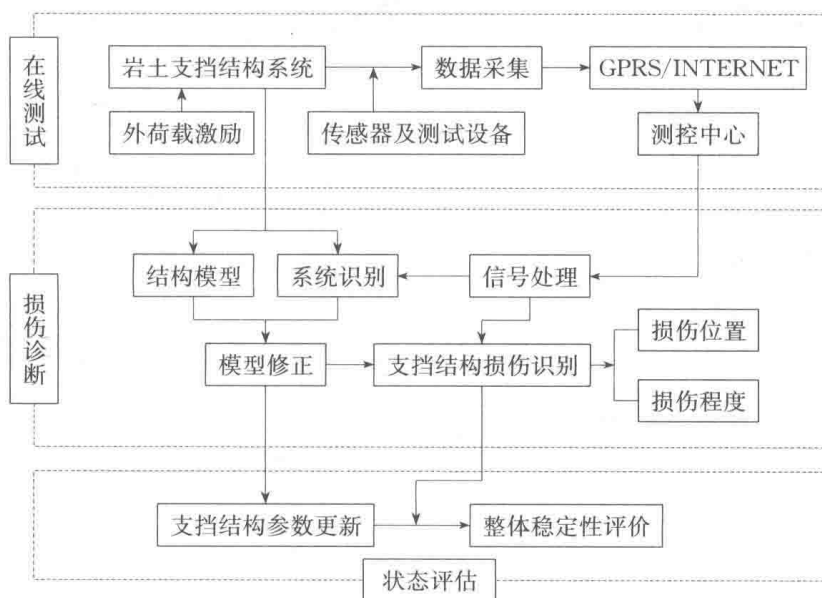


图 1.3 岩土支挡结构健康诊断系统

Fig 1.3 The health diagnosis system of geotechnical retaining structure

1.2 结构损伤诊断的研究与应用

1.2.1 结构损伤诊断概述

结构损伤诊断是结构健康监测领域具有挑战性的研究课题。结构损伤诊断这一概念的提出和发展,首先来自机械设备的故障诊断,它是在 20 世纪 60 年代初