

林维正 主编

# CIVIL ENGINEERING

## 土木工程

### 质量无损检测技术



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 土木工程

## 质量无损检测技术

林维正 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

土木工程质量无损检测技术具有简单、快速、易行等特点，是工程质量检测的有效方法，是提高土木工程质量的保证，也是构建节约型社会和建设和谐社会的重要环节。因此其在土木工程中的应用，一贯受到国家和我国科研工作者的重视。在此情况，我们把土木工程质量无损检测技术的现状和发展全面系统总结，编撰此书，希望为广大工程建设人员提供参考。

本书可供工程设计、施工、监理、检测、管理人员参考使用，也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程质量无损检测技术/林维正主编. —北京: 中国电力出版社, 2008  
ISBN 978 - 7 - 5083 - 6273 - 1

I. 土… II. 林… III. 土木工程 - 工程质量 - 无损检验 IV. TU712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 157559 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划编辑: 张鹤凌 责任编辑: 高璇 责任印制: 陈焊彬 责任校对: 崔燕

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2008 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 33.75 印张 · 840 千字

定价: 58.00 元

#### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话 (010 - 88386685)

# 编 委 会

## 主编

林维正 同济大学声学研究所 教授

## 副主编

吴庆曾 中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所  
教授级高级工程师

## 编委会委员

(姓氏以汉字笔画顺序排列)

- 王运生 郑州大学环境与水利学院 高级工程师  
刘云祯 北京水电物探研究所 教授级高级工程师  
刘建军 中铁西南科学研究院 高级工程师  
李为杜 同济大学材料科学与工程学院 教授  
罗骐先 南京水利科学研究所 教授级高级工程师  
胡文祥 同济大学声学研究所 教授  
施天民 上海材料研究所 高级工程师  
聂运钧 长江科学院 教授级高级工程师  
章关永 同济大学桥梁工程系 副研究员  
童寿兴 同济大学材料科学与工程学院 副教授  
濮存亭 北京康科瑞责任有限公司 教授级高级工程师

# 前 言

人所共知，无损检测技术应用的广泛程度可以反映出一个国家的技术水平。无损检测具有简单、快速、易行等特点，是检测工程质量的有效方法。我国无损检测技术在土木工程中的应用一直受到国家和我国科技研究工作者的重视，从而为编（撰）写本书奠定了基础。在当前工程质量存在各种质量问题的情况下，我们把土木工程无损检测技术现状、发展尽量系统总结，殷切希望本书能够为我国的土木工程质量检测与管理作出贡献，让它的应用能够使工程质量隐患消灭于萌芽阶段。由此可见，土木工程无损检测技术，不仅是提高土木工程质量的保证，也是建设节约型社会的需要，更是建设和谐社会的重要环节之一。

实践证实无损检测技术在工程质量中所起的作用是不可替代的，已被人们所认同。但是，由于技术和专业的不同，目前还有一些设计、施工、监理、检测、管理人员对无损检测工作的了解和理解尚觉不足，没有能够充分发挥无损检测技术的作用，这是我们编写本书的又一动力。

本书编（撰）写的初衷有以下几项。

1. 为从事工程设计、施工、监理、检测、管理人员提供一本了解土木工程无损检测，并有效运用无损检测的参考书。

2. 为从事该领域的无损检测的专业人员更深入理解和提高无损检测的理论、技术方法的水平。

3. 为高等院校师生、研究生提供一本较全面、较深入的参考书。

本书由同济大学声学研究所林维正教授主编、原中国地质调查局技术方法研究所声波检测研究室主任吴庆曾教授级高级工程师副主编，并邀请国内无损检测专家、教授组成的编写组，编（撰）写而成。本书内容包括无损检测的基本理论和方法，如超声检测技术、超声检测仪器和换能器、冲击回波技术、声波 CT 技术、声发射技术、表面波技术、声波测井技术、红外线成像技术、雷达技术、电磁技术和信号处理技术等；在技术应用方面包括建筑钢结构超声检测、混凝土强度检测、混凝土内部缺陷超声检测、桩基完整性无损检测、岩体声波检测、道路工程检测、桥梁工程检测、隧道工程检测、水利水电工程检测、木材检测和混凝土中钢筋检测等。

参加本书编写的人员有：第 1 章 检测声学的理论基础（林维正 同济大学）、第 2 章 超声和声波检测仪器（吴庆曾 中国地质调查局技术方法研究所）、第 3 章 检测换能器（林维正 同济大学）、第 4 章 建筑钢结构超声检测技术（施天民 上海材料研究所）、第 5 章 结构混凝土强度的非破损检测（李为杜 同济大学）、第 6 章 混凝土内部缺陷超声检测技术（童寿兴 同济大学）、第 7 章 桩基无损检测技术（吴庆曾 中国地质调查局技术方法研究所）、第 8 章 冲击回波法检测混凝土内部缺陷及厚度（罗骥先 南京水利科学研究院）、第 9 章 岩体声波检测技术（吴庆曾 中国地质调查局技术方法研究所）、第 10 章 混凝土检测中信号处理技术（林维正 同济大学）、第 11 章 弹性波 CT 技术（王运生 郑州大学环境与水利学院）、第 12 章 声发射检测技术（林维正 同济大学）、第 13 章 面波检测技术（刘云祯 北京水利水电研究所）、第 14 章 声波测井技术（胡文祥 同济大学）、第 15 章 公路工程的无损检测技术（林维正 同济大学）、第 16 章 桥梁无损检测（章关永 同济大学）、第 17 章 隧道工程无损检测技术（刘建军、王石春、高红兵、杨燕 中铁西南科学研究院）、第 18 章 弹性波无损检

测在水利水电工程中的应用（聂运钧、肖国强 长江科学院）、第 19 章 木材无损检测技术（林维正 同济大学）、第 20 章 红外成像无损检测技术（李为杜 同济大学）、第 21 章 工程雷达检测技术（濮存亭 北京康科瑞责任有限公司、吴庆曾 中国地质调查局技术方法研究所）、第 22 章 混凝土中钢筋检测技术（濮存亭 北京康科瑞责任有限公司）等。

本书的很多内容是我们编写者几十年来从事这一领域科研成果的结晶，也是我们从事大量工程检测实践的系统总结；当然，也参考了国内外一批优秀刊物、论文、标准和规程，经过较系统地归纳和总结编撰而成。在编写过程中还得到许多单位和同仁的热情支持和帮助，提供了许多宝贵资料，在此，谨向他们表示衷心的感谢。书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

# 目 录

前言

第1章 检测声学的理论基础	1
1.1 概述	1
1.2 机械振动	1
1.2.1 质点的机械振动	1
1.2.2 简单机械振动系统	2
1.3 超声波在流体中的传播规律	4
1.3.1 超声波与超声场的基本物理量	4
1.4 超声波在固体均匀介质中的传播规律	5
1.4.1 应力与应变、广义胡克定律	5
1.4.2 弹性介质的运动方程和波动方程	9
1.4.3 超声波在界面上的反射和折射	12
1.4.4 瑞利表面波	17
1.4.5 有界固体中导波	19
第2章 超声和声波检测仪器	30
2.1 概述	30
2.2 非金属超声波、声波(透射法和折射法)检测仪器	30
2.2.1 非金属超声波和声波透射法检测仪器的的发展概述	30
2.2.2 超声波(声波)检测仪器的功能和配用的换能器	31
2.2.3 模拟型超声波检测仪工作原理概述	32
2.2.4 数字化超声波检测仪器的发展与现状	33
2.3 声波反射法基桩完整性检测仪	42
2.3.1 声波反射法检测仪的功能与基本组成	42
2.3.2 声波反射法基桩完整性检测仪工作原理	42
2.3.3 声波反射法检测桩身完整性的技巧与关键	43
2.3.4 反射法基桩完整性检测仪的技术指标	46
2.3.5 基桩完整性检测仪信号处理	47
2.3.6 基桩完整性检测仪的机外处理软件功能	47
2.3.7 国内外主要基桩完整性检测仪概况	48
2.4 大功率振源及其应用	48
2.4.1 锤击振源	48
2.4.2 电火花振源	49
2.5 超声波钻孔孔径、孔斜检测仪简介	49
2.6 金属超声波探伤仪	50
2.6.1 金属超声探伤仪的基本组成	50

2.6.2	金属超声探伤仪的发射电路	51
2.6.3	金属超声探伤仪的接收方式	52
2.6.4	超声金属探伤仪的数据采集、存储与显示	53
2.6.5	数字化金属超声探伤仪的功能及技术指标	53
<b>第3章</b>	<b>检测换能器</b>	<b>55</b>
3.1	概述	55
3.2	压电超声换能器	55
3.2.1	压电材料和压电效应	55
3.2.2	压电方程和压电参数	57
3.2.3	压电陶瓷振子的振动模式	58
3.3	检测用超声换能器	59
3.3.1	超声换能器的主要性能指标	59
3.3.2	对超声换能器的性能控制	60
3.3.3	金属探伤用超声换能器	62
3.3.4	岩石、混凝土检测用超声换能器	65
3.3.5	岩石、混凝土检测用宽带换能器	68
3.3.6	压电复合换能器	70
3.3.7	检测用横波换能器	72
3.3.8	超磁致伸缩换能器	74
<b>第4章</b>	<b>建筑钢结构超声检测技术</b>	<b>77</b>
4.1	概述	77
4.2	钢板的超声检测	77
4.2.1	钢板中常见的缺陷类型	77
4.2.2	钢板探伤方法	77
4.3	钢管的超声检测	81
4.3.1	管材中常见的缺陷	81
4.3.2	小口径管的探伤方法	82
4.3.3	厚壁钢管的探伤方法	84
4.3.4	大口径焊接管的探伤方法	84
4.4	锻件的超声检测方法	85
4.4.1	锻件的制造工艺	85
4.4.2	锻钢件中的常见缺陷	85
4.4.3	轴类锻件的探伤方法	86
4.4.4	锻件探伤的缺陷定量	88
4.5	铸件的超声检测	90
4.5.1	铸件中常见的缺陷	90
4.5.2	铸件的探伤方法	90
4.5.3	铸钢件的缺陷评判	91
4.6	焊缝的超声检测	93
4.6.1	焊接工艺特点	93
4.6.2	焊接缺陷的种类	93



4.6.3	平板对接焊缝的超声波探伤方法	94
4.6.4	缺陷的评判	100
4.6.5	其他结构焊缝的超声波探伤方法	101
4.6.6	焊缝超声波探伤定位	102
<b>第5章</b>	<b>结构混凝土强度的非破损检测</b>	<b>110</b>
5.1	回弹法检测结构混凝土的抗压强度	110
5.1.1	概述	110
5.1.2	回弹法的基本原理	110
5.1.3	回弹仪的类型	111
5.1.4	回弹值的测量	114
5.1.5	影响 $f-R$ 关系的主要因素	115
5.1.6	结构或构件混凝土强度的推定	118
5.2	超声法检测混凝土强度	119
5.2.1	概述	119
5.2.2	超声法检测混凝土强度的主要影响因素	121
5.2.3	声速换算法	128
5.2.4	超声法检测与推定结构混凝土强度	130
5.3	超声回弹综合法检测混凝土强度	131
5.3.1	综合法和综合指标的选择	131
5.3.2	超声—回弹综合法的基本依据	132
5.3.3	影响 $f-V-R$ 关系的主要因素	132
5.3.4	超声回弹综合法检测	134
5.3.5	结构或构件混凝土抗压强度的推定	134
5.4	建立回弹法、超声法、超声回弹综合法检测混凝土强度的曲线	136
5.4.1	综述	136
5.4.2	试件回弹值、超声声速值的测试步骤	136
<b>第6章</b>	<b>混凝土内部缺陷超声检测技术</b>	<b>139</b>
6.1	概述	139
6.1.1	混凝土缺陷超声波检测技术的规程	139
6.1.2	超声法检测混凝土缺陷的概念	139
6.1.3	超声法检测混凝土缺陷的原理	140
6.1.4	混凝土缺陷检测的意义	140
6.1.5	超声法检测混凝土缺陷的基本方法	140
6.1.6	超声法检测混凝土缺陷的主要影响因素	141
6.2	混凝土裂缝深度检测	142
6.2.1	单面平测法	142
6.2.2	双面斜测法	145
6.2.3	钻孔对测法	145
6.2.4	检测实例	148
6.3	不密实区和空洞检测	149
6.3.1	概念及适应范围	149

6.3.2	测试方法 .....	149
6.3.3	数据处理及判断 .....	151
6.3.4	检测计算实例 .....	153
6.3.5	混凝土内部空洞尺寸估算 .....	154
6.4	混凝土结合面质量检测 .....	157
6.4.1	定义及检测前的准备 .....	157
6.4.2	测试方法 .....	158
6.4.3	数据处理及判断 .....	158
6.5	混凝土损伤层检测 .....	159
6.5.1	概念和基本原理 .....	159
6.5.2	测试方法 .....	160
6.5.3	数据处理及判断 .....	160
6.6	混凝土均质性检测 .....	161
6.6.1	概念 .....	161
6.6.2	测试方法 .....	162
6.6.3	计算和分析 .....	162
6.7	钢管混凝土质量检测 .....	163
6.7.1	概述 .....	163
6.7.2	缺陷判断 .....	164
6.7.3	适用方法 .....	165
<b>第7章</b>	<b>桩基无损检测技术</b> .....	<b>172</b>
7.1	概述 .....	172
7.1.1	工程桩分类及桩的施工概述 .....	172
7.1.2	工程桩可能出现的缺陷及其类型 .....	172
7.1.3	工程桩桩身完整性检测的声学检测方法 .....	172
7.2	声波透射法检测桩身完整性 .....	173
7.2.1	声波透射法的声学检测原理 .....	173
7.2.2	检测仪器与设备概述 .....	175
7.2.3	现场检测方法与技术 .....	177
7.2.4	声波透射法判断桩身缺陷的方法与原则 .....	178
7.2.5	我国现行检测规范、规程对声波透射法检测的要求 .....	180
7.2.6	声波透射法的优势与不足 .....	181
7.2.7	桩身缺陷的分析与推断必须掌握桩制造过程的相关资料 .....	183
7.2.8	工程实例 .....	184
7.2.9	声波透射法的优点与不足 .....	186
7.3	反射波法检测工程桩完整性 .....	187
7.3.1	桩身内声波的传播理论 .....	187
7.3.2	反射波法的基本原理 .....	188
7.3.3	桩土体系内声波的传播规律 .....	190
7.3.4	检测仪器与设备 .....	194
7.3.5	反射波法的现场检测技术要点 .....	194

7.3.6	反射波的信号处理 .....	196
7.3.7	反射波法的频域解释 .....	197
7.3.8	桩身缺陷的分析与推断必须掌握桩制作过程的相关资料 .....	198
7.3.9	反射法检测基桩完整性存在的不足之处 .....	199
7.4	基桩倾斜度检测技术概述 .....	199
<b>第8章</b>	<b>冲击回波法检测混凝土内部缺陷及厚度</b> .....	<b>201</b>
8.1	概述 .....	201
8.2	测试原理 .....	202
8.3	试验装置及试验流程 .....	203
8.3.1	产生冲击 .....	203
8.3.2	冲击点与接收器间的距离 .....	204
8.3.3	被测体的声速值 .....	204
8.3.4	接收信号 .....	205
8.3.5	采集波形 .....	205
8.3.6	频谱分析及计算 .....	205
8.3.7	绘图打印 .....	205
8.4	波形采集及采样参数 .....	205
8.4.1	波形采集及分析 .....	205
8.4.2	采样参数 .....	206
8.5	试验及应用 .....	207
8.5.1	南京水利科学研究院的研究及应用 .....	207
8.5.2	国外一些试验研究情况 .....	208
8.6	测试技术的最新发展——扫描式冲击回波测试系统 .....	215
8.6.1	扫描式冲击回波系统简介 .....	215
8.6.2	工程应用 .....	218
8.7	结语 .....	219
<b>第9章</b>	<b>岩体声波检测技术</b> .....	<b>221</b>
9.1	概述 .....	221
9.1.1	岩体声波检测技术的进展概述 .....	221
9.1.2	岩体声波检测使用的频率 .....	221
9.2	声波在岩体中的传播规律 .....	222
9.2.1	岩体的声速 .....	222
9.2.2	岩体中声波的反射、折射及波型转换 .....	223
9.2.3	岩体中声波的传播与岩体结构关系 .....	224
9.2.4	岩体中声波的绕射及散射 .....	225
9.2.5	岩体中声波的波幅衰减规律 .....	225
9.2.6	岩体中声波发射的频率与接收信号的频率 .....	226
9.2.7	声发射现象与凯萨效应 .....	226
9.3	岩体性状与声波传播速度间的相关性 .....	227
9.3.1	声速与弹性力学参数 .....	227
9.3.2	用 $V_p/V_s$ 评价岩体质量 .....	227

9.3.3	声速与岩体完整性指数 .....	228
9.3.4	声速与岩性 .....	228
9.3.5	声速与岩体风化 .....	228
9.3.6	声速与岩体的裂隙 .....	229
9.3.7	声速与岩体结构的关系 .....	229
9.3.8	声速与地应力 .....	229
9.4	岩体声波检测的发射与接收设备概述 .....	230
9.4.1	声波的发射 .....	231
9.4.2	声波的接收 .....	231
9.4.3	放大及数据采集 .....	231
9.4.4	被动式声波检测 .....	231
9.5	岩体声波的检测方法 .....	231
9.5.1	现场检测 .....	231
9.6	岩体声波检测的信号处理 .....	239
9.7	几个重大特殊工程声波检测实例 .....	239
9.7.1	长江三峡链子崖隐伏裂缝的声波检测 .....	239
9.7.2	深圳声波岩体软弱层及破碎带声波探测 .....	240
9.7.3	广和大桥跨孔声波成像岩溶探测 .....	240
9.7.4	三峡库区迁建城镇岩崩堆积体灌浆补强效果声波检测 .....	241
9.7.5	危岩锚固钻孔内裂缝及裂缝密集带声波检测 .....	242
<b>第10章</b>	<b>混凝土检测中信号处理技术 .....</b>	<b>244</b>
10.1	概述 .....	244
10.2	混沌优化神经网络模型在混凝土强度无损检测中的应用 .....	244
10.2.1	混沌优化神经网络 .....	244
10.2.2	网络模型构造 .....	245
10.2.3	实例计算 .....	246
10.3	用信号分析技术检测材料的声速和衰减 .....	247
10.3.1	脉冲回波信号分析技术 .....	247
10.3.2	材料超声波衰减品质因素 $Q$ 的测量原理 .....	248
10.3.3	试验与结果分析 .....	249
10.4	利用模糊神经网络识别墙体材料的种类 .....	251
10.4.1	墙体材料与声学参数的关系 .....	251
10.4.2	模糊分析方法简介 .....	252
10.4.3	人工神经网络简介 .....	252
10.4.4	模糊方法和神经网络的结合 .....	253
10.4.5	数据处理 .....	254
10.4.6	试验结果 .....	255
10.5	小波变换及其在混凝土厚度检测中应用 .....	255
10.5.1	连续小波变换 .....	255
10.5.2	离散小波变换 .....	256
10.5.3	混凝土厚度的超声反射信号的小波分析 .....	258

10.6	混凝土厚度的超声反射信号的分离谱处理方法	260
10.6.1	原理	260
10.6.2	混凝土路面厚度检测中模型分析	261
10.6.3	试验结果	264
<b>第11章</b>	<b>弹性波CT技术</b>	<b>266</b>
11.1	CT技术概述	266
11.2	CT成像基本原理	266
11.2.1	射线CT数学原理	267
11.2.2	变换重建法	267
11.2.3	级数展开法	267
11.2.4	衍射及散射CT简介	268
11.3	弹性波CT方法技术	269
11.3.1	射线追踪技术	269
11.3.2	射线波速CT	271
11.3.3	衰减系数CT	272
11.4	软件设计与应用实例	273
11.4.1	软件设计与系统结构	273
11.4.2	观测系统与成像精度	274
11.4.3	应用实例	274
<b>第12章</b>	<b>声发射检测技术</b>	<b>276</b>
12.1	概述	276
12.1.1	声发射检测特点	276
12.1.2	声发射应用范围	276
12.2	声发射检测原理	277
12.2.1	声发射源	277
12.2.2	凯塞效应和费利西蒂效应	277
12.3	声发射检测仪器	277
12.3.1	声发射检测仪器的类型	277
12.3.2	单通道声发射仪	279
12.3.3	多通道声发射系统	279
12.3.4	声发射传感器	279
12.3.5	传感器灵敏度校准方法	282
12.4	声发射检测方法	283
12.4.1	声发射信号的基本特征	283
12.4.2	声发射信号的表征参数	284
12.4.3	声发射信号的检测与处理	284
12.4.4	声发射源定位技术	287
12.5	声发射技术在混凝土工程检测中应用	289
12.5.1	混凝土声发射技术研究综述	289
12.5.2	声发射技术在混凝土损伤检测中应用	291

<b>第 13 章 面波检测技术</b> .....	294
13.1 概述 .....	294
13.2 面波检测技术原理与概念 .....	296
13.2.1 面波测深原理要点 .....	296
13.2.2 时间距离域中的面波 .....	297
13.2.3 频率波数域中的面波 .....	300
13.2.4 面波频散特征和地层结构 .....	304
13.2.5 面波震源和数据采集设备 .....	310
13.3 多道瞬态面波检测技术 .....	312
13.3.1 仪器设备 .....	312
13.3.2 现场工作方法 .....	313
13.3.3 数据处理系统 .....	319
13.4 多道瞬态面波勘察与检测技术的工程应用 .....	323
13.4.1 覆盖层层序勘察 .....	323
13.4.2 基岩风化分带勘察 .....	326
13.4.3 地下空洞与埋置物调查 .....	327
13.4.4 滑坡与边坡勘察 .....	328
13.4.5 回填地基勘察 .....	331
13.4.6 地基加固效果的检查 .....	332
13.4.7 隧道勘察 .....	334
<b>第 14 章 声波测井技术</b> .....	335
14.1 概述 .....	335
14.2 单极子源激发的井孔声场 .....	336
14.2.1 弹性地层井中点声源激发的声场 .....	336
14.2.2 阵列声测井信号处理及应用 .....	343
14.3 多极子声源声测井 .....	345
14.3.1 多极子源激发的井孔声场 .....	345
14.3.2 信号处理及应用 .....	347
14.4 井周超声扫描成像测井 .....	349
14.4.1 井周超声扫描成像测井仪器及探头 .....	349
14.4.2 回波成像基本方法与类型 .....	350
14.4.3 径向分层介质层间缺陷检测 .....	350
<b>第 15 章 公路工程的无损检测技术</b> .....	353
15.1 概述 .....	353
15.2 超声波检测混凝土路面厚度 .....	353
15.2.1 超声测厚原理 .....	354
15.2.2 超声测厚仪 .....	355
15.2.3 换能器设计 .....	355
15.2.4 模拟实验和现场实际检测应用 .....	356
15.3 混凝土路面抗弯强度检测 .....	357
15.3.1 检测原理 .....	357

15.3.2	检测方法	357
15.3.3	应用实例	359
15.4	混凝土路面弹性参数的超声检测	360
15.4.1	检测原理	360
15.4.2	工程应用	361
15.5	冲击回波法检测路面混凝土缺陷与厚度	362
15.5.1	冲击回波方法原理	362
15.5.2	实验模型与仪器	362
15.5.3	实验与现场应用	363
15.6	瞬态瑞利波法在公路工程中应用	364
15.6.1	概述	364
15.6.2	瞬态瑞利波法的原理	365
15.6.3	实际工程应用	367
<b>第16章</b>	<b>桥梁无损检测</b>	<b>369</b>
16.1	概述	369
16.2	桥梁上部结构无损检测	371
16.2.1	钢桥	371
16.2.2	索结构	372
16.2.3	预应力混凝土梁、钢筋混凝土梁和钢管混凝土	376
16.2.4	混凝土桥面板	382
16.2.5	桥梁上部结构承载能力评估	384
16.3	桥梁下部结构无损检测	385
16.3.1	平行地震 PS (Paralle Seismic) 法	385
16.3.2	超声地震 US (UltraSeismic) 法	386
<b>第17章</b>	<b>隧道工程无损检测技术</b>	<b>388</b>
17.1	概述	388
17.2	隧道围岩特性的声波检测	388
17.2.1	隧道围岩无损检测概况	388
17.2.2	围岩松弛带的声波检测	388
17.2.3	围岩分级指标的声波检测	391
17.3	隧道支护施工质量的无损检测	392
17.3.1	检测内容及检测目的	392
17.3.2	围岩注浆加固效果的声波检测	393
17.3.3	锚杆长度和饱满度的检测	395
17.3.4	锚杆长度和饱满度检测的应用实例	396
17.3.5	数据分析	397
17.4	隧道衬砌施工质量的无损检测	398
17.4.1	检测内容	398
17.4.2	衬砌混凝土厚度及背后空洞的雷达检测	398
17.4.3	衬砌混凝土强度的超声回弹综合法无损检测	405

<b>第 18 章 弹性波无损检测在水利水电工程中的应用</b> .....	408
18.1 概述 .....	408
18.2 岩体动力弹性参数的测试、动静对比 .....	409
18.2.1 岩体动力弹性参数的测试及计算 .....	409
18.2.2 动静弹模对比及其若干研究成果 .....	410
18.2.3 动静对比研究应遵循的基本条件 .....	412
18.3 水利水电工程岩石质量分级及国标《工程岩体分级标准》 .....	412
18.3.1 用波速及其组合参数的岩体分类 .....	412
18.3.2 国标《工程岩体分级标准》 .....	415
18.3.3 国标《工程岩体分级标准》的工程应用实例 .....	417
18.4 大坝建基岩体质量检测, 坝基验收标准 .....	422
18.4.1 大坝建基岩体质量的弹性波检测 .....	422
18.4.2 三峡工程大坝建基岩面选择验收标准的研究 .....	423
18.5 水工洞室围岩松弛圈的测定 .....	425
18.6 长江三峡高边坡开挖施工期松弛范围的声波监测 .....	425
18.6.1 监测布置 .....	425
18.6.2 松弛厚度划分依据 .....	426
18.6.3 边坡岩体开挖松弛厚度实时监测结果 .....	426
18.6.4 岩体卸荷松弛范围的声波长期观测结果 .....	427
18.7 弹性波 CT 层析成像及其反演技术 .....	428
18.8 爆破影响范围的声波检测 .....	430
18.8.1 预裂爆破效果的声波检测 .....	430
18.8.2 爆破对基岩影响范围的声波检测 .....	431
18.9 岩石锚杆质量声波无损检测 .....	432
18.9.1 锚杆质量检测评价参数 .....	432
18.9.2 锚杆质量声波无损检测方法 .....	432
18.9.3 锚杆质量声波无损检测数据处理 .....	433
18.9.4 应用实例 <sup>[19]</sup> .....	434
<b>第 19 章 木材无损检测技术</b> .....	437
19.1 概述 .....	437
19.2 X 射线技术在木材无损检测中应用 .....	437
19.2.1 X 射线检测原理和方法 .....	438
19.2.2 X 射线强度直接计数法检测木材生长轮密度 .....	438
19.2.3 X 射线计算机层析成像 (CT) 技术 .....	440
19.3 超声检测技术在木材中应用 .....	442
19.3.1 概况 .....	442
19.3.2 超声检测木材缺陷的依据 .....	442
19.3.3 超声波检测木材力学性能 .....	443
19.3.4 声发射技术在木材中应用 .....	444
19.4 应力波法检测木材力学性能 .....	446
19.4.1 概况 .....	446



19.4.2	木材动态弹性模量检测原理	447
19.4.3	应用实例	448
19.5	近红外光谱分析技术在木材工业中的应用	450
19.5.1	检测原理	450
19.5.2	在制浆造纸中的应用	450
19.5.3	在木材性质预测中应用	451
19.5.4	在木材加工利用及木质复合材料中应用	451
<b>第20章</b>	<b>红外成像无损检测技术</b>	<b>453</b>
20.1	概述	453
20.2	红外检测技术基本原理	453
20.2.1	红外线及检测依据	453
20.2.2	红外线辐射特性	455
20.3	红外成像仪	462
20.3.1	红外成像仪工作原理	462
20.3.2	红外成像仪组成系统与特性分析	462
20.3.3	热像仪选用	467
20.4	适用范围	469
20.4.1	建筑节能中的应用	469
20.4.2	建筑物外墙剥离层的检测	470
20.4.3	饰面砖粘贴质量大面积安全扫测	470
20.4.4	玻璃幕墙、门窗保温隔热性、防渗漏的检测	471
20.4.5	墙面、屋面渗漏的检查	471
20.4.6	结构混凝土火灾受损、冻融冻坏的红外检测技术	472
20.4.7	其他方面	472
20.5	红外成像影响因素与摄像条件选择	472
20.5.1	红外成像影响因素	472
20.5.2	摄像条件选择	473
20.5.3	拍摄热像方法	474
20.5.4	热像图二次处理	475
20.6	建筑工程红外成像诊断的步骤	476
20.6.1	调查建筑物的情况	477
20.6.2	根据墙面的朝向选择最佳的拍摄时间	477
20.6.3	辅以敲击法作局部复核	477
20.6.4	大墙面分区拍摄和合并等处理	477
20.6.5	进行红外诊断的流程图	477
<b>第21章</b>	<b>工程雷达检测技术</b>	<b>479</b>
21.1	概述	479
21.1.1	工程雷达的基本原理	479
21.1.2	工程雷达检测的特点	479
21.1.3	工程雷达检测技术在土木工程中的应用	479
21.2	工程雷达检测原理	480