

冲击弹性波检测技术基本原理

(V1.59)



2012-05-01 初稿

2022-05-31 第 51 次修订

2022-07-05 第 52 次修订

2023-10-05 第 53 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目 录

第 1 章 前言	4
1.1 无损检测技术概要	4
1.2 冲击弹性波无损检测技术的发展历程	4
第 2 章 弹性波的基本原理	5
2.1 冲击弹性波的基本概念	5
2.1.1 振动和波的概念	5
2.1.2 弹性波的分类	5
2.1.3 振动与波动的基本要素	6
2.2 冲击弹性波的产生	6
2.2.1 打击产生冲击弹性波	6
2.2.2 激振信号强弱对测试的影响	6
2.3 冲击弹性波的传播	6
2.3.1 弹性波的传播速度	7
2.3.2 波的衰减	7
2.4 冲击弹性波的反射特性	7
2.4.1 在两种媒介垂直入射的情况	7
2.4.2 中间有不同夹层的情况	8
2.4.3 其它传播性质	8
2.5 弹性波和超声波的比较	8
2.5.1 超声波和冲击弹性波的异同	8
第 3 章 冲击弹性波信号的测试和分析基础	9
3.1 信号测试（传感器与放大器的基础）	9
3.1.1 测试对象	9
3.1.2 振动信号的拾取	9
3.1.3 传感器的选型	10
3.1.4 传感器的固定方法	11
3.1.5 传感器共振的修正	11
3.1.6 传感器电缆的固定	11
3.2 信号测试（AD 转换的基础）	11
3.2.1 AD 转换的基本概念	11
3.2.2 采样及采样精度	11
3.2.3 采集频率（采样间隔）	11
3.2.4 触发	12
3.3 噪声及降噪	12
3.3.1 噪声的种类	12
3.3.2 硬件降噪技术	12
3.3.3 软件降噪技术（一）移动平滑滤波	12
3.3.4 软件降噪技术（二）带通滤波	12
3.3.5 软件降噪技术（三）经验模态分解法（EMD）	13
3.3.6 软件降噪技术（四）小波降噪	13
3.3.7 软件降噪方法的效果比较	13
3.4 频谱分析技术	14

冲击弹性波检测技术基本原理

3.4.1 FFT 解析（高速傅立叶变换）	14
3.4.2 MEM（最大熵法）频谱分析方法	14
3.5 数据分析及判断	14
3.5.1 基本统计方法	14
3.5.2 异常数据识别方法	14
3.6 非接触式振动测试	15
3.6.1 激光多普勒测振原理	15
第 4 章 代表的无损检测技术简介	15
4.1 冲击回波法（IE）	15
4.1.1 冲击回波法的理论基础	15
4.1.2 冲击回波法的测试	16
4.1.3 冲击回波法的检测能力	16
4.1.4 冲击回波法检测时的注意事项	16
4.1.5 冲击回波法成像技术	16
4.2 计算机断层扫描（CT）	17
4.2.1 弹性波 CT 的解析方法	17
4.2.2 弹性波 CT 解析方法的改进	18
4.2.3 其它形状测试领域的弹性波 CT	18
4.2.4 弹性波 CT 对软弱区和空洞的分辨力差异及改良	18
4.2.5 真三维弹性波 CT 反演及 720° 全方位显示	18
4.2.6 像元划分对弹性波 CT 反演精度的影响及验证	19
4.2.7 弹性波 CT 的其它注意事项及精度提高	19
第 5 章 冲击弹性波无损检测技术的设备及应用	19
5.1 应用领域	19
5.2 检测精度验证及评价	20
5.2.1 检测精度验证及评价	20
技术支持	20

第 1 章 前言

1.1 无损检测技术概要

无损检测技术，又称非破坏检查技术，就是在不破坏待测物质原来的状态、化学性质等前提下，利用物质中因有缺陷或组织结构上的差异存在而会使其某些物理性质的物理量发生变化的现象，以不使被检查物使用性能和形态受到损伤为前提，通过一定的检测手段来测试、显示和评估这些变化，从而了解和评价材料、产品、设备构件等被测物的性质、状态或内部结构等所采用的检查方法。随着现代工业的迅速发展，对产品质量、结构安全性和使用可靠性提出了更高的要求，由于无损检测技术具有不破坏试件，检测快捷简便、精度高等优点，所以其应用日益广泛。

在各类土木工程中，无损检测技术的应用是十分广泛的。无论是公路、铁路的路基填筑、路面铺装，还是桥梁、隧道以及其它重要结构物的施工和维护，处处可以看到无损检测技术的身影。下表列出了面向混凝土结构的常见的无损检测技术。

表 1-1 各种检测方法的领域和特征

类型		代表方法	测试对象	主要特征
冲击/弹性波	冲击	回弹仪	混凝土强度	操作方便
	弹性波 (机械波)	声波仪、超声波仪、基桩测试仪	混凝土材质(刚性、强度)、尺寸、缺陷(裂缝、内部空洞等)	测试种类多, 范围广
	诱导振动	打声法、谐振法	混凝土材质及缺陷	操作较为方便
电磁波/电磁诱导	电磁波	混凝土雷达	内部钢筋、缺陷	形象直观
	电磁诱导	钢筋仪	钢筋	操作方便
红外线		红外线成像仪	剥离、脱落、漏水等	测试面积大、并可远距离测试
放射线	X 射线	X 光成像仪	结构内部钢筋、空洞	分辨率高、形象直观
	伽马射线	RI (核子密度水分仪)	混凝土材质	对密度、水分敏感

1.2 冲击弹性波无损检测技术的发展历程

早在 1960 年代，弹性波 (Elastic wave) 的概念即被提出，并在物探等领域得到了广泛的应用。1980 年代开始，包括“Impact Echo”法在内的弹性波无损检测方法，在 ASTM 的多个规程中得到了体现 (C597、C1383、D2845 等)

2000 年，日本土木学会设立了“弹性波法の非破壊検査研究小委員会”，提出了冲

击弹性波“Impact Elastic Wave”的概念。

2009年，日本无损检测协会（日本非破壊検査協会、JSNDI）颁布了基于弹性波的技术标准（NDIS 2426, コンクリート構造物の弾性波による試験方法, Non-destructive testing of concrete-elastic wave method），并将超声波、打声法等均归为弹性波的范畴。

本公司开发的各类检测和监测设备，均以振动和冲击弹性波为检测媒介，并已形成相应的技术体系。经谭建荣院士牵头的专家组鉴定，相关成果被评为国际领先/国际先进。

第2章 弹性波的基本原理

2.1 冲击弹性波的基本概念

2.1.1 振动和波的概念

首先，要分清楚两个容易混淆而又相互关联的概念，即振动和波。振动表示局部粒子的运动，其粒子在平衡位置做往复运动。而波动则是全体粒子的运动的合成。在振源开始发振产生的扰动，以波动的形式向远方向传播，而在波动范围内的各粒子都会产生振动。换句话说，在微观看主要体现为振动，而在宏观来看则容易体现为波动。

在土木、交通工程中所用的无损检测技术里，也会用到各种波动和振动作为测试媒介。常用的有光波、电磁波、弹性波（包括冲击弹性波、超声波、声波）等。其中，冲击弹性波用锤或其他激振装置冲击产生，能够直接反映材料的力学特性，具有激振能量大、操作简单、便于频谱分析等特点，是一种非常适合无损检测的媒介，基桩完整性小应变检测技术就是其最广泛的应用领域之一。

2.1.2 弹性波的分类

在混凝土、岩土、金属等固体物质中，通过力或应变发振产生的扰动波叫弹性波。根据波动的传播方向与粒子的振动方向的关系分类如下：P波（纵波、又叫疏密波）；S波（又叫横波）；P波和S波存在于物体的内部，因此也叫体波。另一方面，在边界面附近，由于边界条件的约束则产生表面波（Rayleigh波、Love、Lame波等）。

无论是瑞利波还是板波，其介质质点均产生相应的纵向和横向振动。两种振动的合成，

使质点作椭圆轨迹的振动并传播。

2.1.3 振动与波动的基本要素

- 1) 粒子振动的基本要素：振幅 A 、周期 T / 圆频率 ω / 频率 f 、相位 θ
- 2) 波动的基本要素：波的传播速度： V 、波长： λ 、波数： N 、相位： θ

需要指出的是，冲击弹性波往往不是单的频率，一般包括各种频率成分的波混在一起。用冲击弹性波进行无损检测时，有以下特点。

- (1) 能量较高、振幅较大，S/N（信噪比）较高，相对容易测试；
- (2) 频率较高信号一般对缺陷更加敏感，测试精度较高，但是能量衰减大，测试范围小；
- (3) 测试的信号经过真实信号（粒子的运动）→电缆→放大器→A/D转换卡等。各阶段都会引入噪声使信号失真。因此如何防止噪声混入，抑制信号失真是非常重要的。

2.2 冲击弹性波的产生

冲击弹性波的产生一般有两种方法，即外力击打产生和由物体内部破损产生。

2.2.1 打击产生冲击弹性波

冲击锤打击或刚球落下是最一般的激振方式。改变打击锤，可以产生不同频率特性的冲击弹性波。一般来讲，小的硬质锤可产生高频的弹性波。相反大的硬质锤可产生低频的弹性波，即与锤和打击对象的接触时间有明显的关系。

2.2.2 激振信号强弱对测试的影响

冲击弹性波检测与电磁波、声波检测等方法有个很大的不同，即其激振力度无法精确地控制。不仅采用人工激振其激振力度难以控制，即使是采用电磁振源、超磁振源等自动方式激振，其激振信号的强弱仍然有所不同。其原因在于，激振信号的强弱不仅取决于激振力度的大小，而且与激振点材料的硬软有直接关系。由于在土木工程检测中，检测对象（如混凝土、岩土材料等）的不均匀性，使得激振信号的强弱无法做到一致。

2.3 冲击弹性波的传播

在这里讲述冲击弹性波的传播特性（主要是速度和衰减特性）。

2.3.1 弹性波的传播速度

如前所述，弹性波中有各种成分波，其传播速度也各有不同。

- 1) P波：弹性波的各种波中，P波速度最快，因此叫 Primary wave。然而，P波的波速不是一个定值，与传播物体的尺寸、形状以及P波波长有关。
- 2) S波：与P波不同，S波的波速与传播物体的形状、大小以及波长等均没有关系。
- 3) R波：R波的速度 V_R 表示换算成材料的弹性模量。
- 4) Lamé波：对于检测对象为双侧自由的板式结构，且其厚度小于激振弹性波的波长时，会产生与上述R波所不同的朗姆（Lamé）波。由于其产生在板形结构中，因此也被称为“板波”。

2.3.2 波的衰减

从振源发振的弹性波，伴随传播而衰减。主要衰减如下：

- 1) 几何衰减（又叫扩散衰减）

激发的弹性波伴随传播距离的增加，前锋波面增大，单位面积的能量减小。体波（P波以及S波）的传播是圆球状扩散，由于球面积是与半径（传播距离）的平方成正比，所以能量密度即与传播距离的平方成反比。

- 2) 透过衰减

当弹性波在传播过程中遇到不同材料的场合，有反射或重复反射产生，从而使得传播的能量减少。

- 3) 粘滞性衰减

当材料不是完全弹性体时，由于粘滞性的存在也会引起能量的衰减。

2.4 冲击弹性波的反射特性

弹性波在异种媒介的界面会引起反射，而这正是各种检测所需的。

2.4.1 在两种媒介垂直入射的情况

为了便于分析，在此仅考虑一维反射的情况。当弹性波遇到截面变化或者材质变化

时，其反映在机械阻抗（一般用 z 来表示材料的机械阻抗， $z = \rho CA$ ，这里的 A 是截面面积）的变化。在机械阻抗发生变化的界面上，传播的弹性波会产生波的反射和透过。

2.4.2 中间有不同夹层的情况

当一种材料中夹有另一种材料，例如有裂缝的场合，在媒介1（ $z_1 = \rho_1 C_1 A_1$ ）和媒介2（ $z_2 = \rho_2 C_2 A_2$ ）的两个交界处均会产生透射和反射。

2.4.3 其它传播性质

弹性波在传播过程中，还会遇到折射、叠加、干涉以及衍射等现象。

1) 折射

当弹性波以一个角度斜射入媒质2时，也会发生反射和透过。由于媒质1和2的机械阻抗不同，反射和透过波的方向都会发生改变，其中的透过波就称为折射波。

2) 波的叠加与干涉

在一个介质中传播的几个波，如果同时达到某一质点，那么，对该质点振动的共同影响就是各个波在该点处所引起振动的合成。在任一时刻各质点的位移是各个声波在这一质点上引起的位移的矢量和，这就是波的叠加原理。叠加之后，每一个波仍保持自己原有的特性（频率、波长、振动方向等），仍按自己传播的方向继续前进，好像在各自的途中没有遇到其他波一样，因此波的传播是独立进行的。

3) 波的衍射和惠更斯原理

当波在弹性介质中传播时，如果遇到障碍物或其他不连续的情况，而使波阵面发生畸变的现象，称为波的衍射。

2.5 弹性波和超声波的比较

超声波是一个耳熟能详的名词，在无损检测中也经常用到。这里就弹性波和超声波的异同进行较为详细的阐述。

2.5.1 超声波和冲击弹性波的异同

我们知道，冲击弹性波是由激振装置在固体表面击打产生的。同样，如果使用超声

波探头在固体表面诱发振动，也能够从固体内部激发冲击弹性波。因此，在固体中传播的超声波可以理解为能量比较弱，频率高的冲击弹性波，其与锤击等方式诱发的冲击弹性波并没有本质上的区别。

但是，由于激振以及受信结构上存在差异，超声波和与这里所说冲击弹性波之间还是有一定的不同，主要体现在：

- (1) 能量：冲击弹性波的能量远远大于超声波；
- (2) 发振信号的频率特性和波长：超声波波长短，一般是几厘米，而用锤击激振产生的冲击弹性波波长几十厘米甚至更长。因此，超声波的分辨率高，对细微的缺陷比较敏感，但衰减快，测试范围受到限制；
- (3) 受信信号的频率特性：超声波的探头在保持高灵敏度的同时，其频率响应特性一般较差（典型的频率相应特性如图 1-2-14，测试频域内几乎没有平坦部分。也就是说，超声波测试仪器对频率分析和振幅分析都比较困难。而冲击弹性波测试一般采用加速度传感器，传感器在各种固定方式下，其频响曲线都有较长平坦部分，有利于频谱分析和能量分析。

第 3 章 冲击弹性波信号的测试和分析基础

一个标准的冲击弹性波采集系统包括：传感器、放大器、AD 转换装置及存储分析设备等。

3.1 信号测试（传感器与放大器的基础）

3.1.1 测试对象

在弹性波的测试中，实际测试的是某一点的振动信号，而振动信号又可分为位移、速度和加速度信号。一方面，针对不同的信号，需要采用不同类型的传感器，如位移传感器、速度传感器和加速度传感器，另一方面，测试得到的信号也可以通过积分或者微分的方法相互转换。

3.1.2 振动信号的拾取

振动信号的拾取可以采用接触或非接触方式加以拾取，其中非接触方式（如激光多普勒）可测试绝对振动信号，而接触方式拾取的均为相对振动信号。目前，接触式最常用，可等效为一个振动体系（质量 M 、阻尼 c 、弹簧系数 K ）。

3.1.3 传感器的选型

在波动及振动测试中，根据测试对象，选取适当的传感器也是十分必要的。

其中，加速度传感器结构简单、可靠性好，是冲击弹性波检测中的首选。

加速度传感器又有很多种类，常见的有压电式、压阻式、电容式和伺服式。一般而言，压阻式和电容式结构简单、成本低，现在通常采用 MEMS 工艺制作。伺服式的灵敏度高、动态范围大，但成本高、体积大。压电式传感器的综合性能介于中间，是冲击弹性波检测最为理想的手段之一。

加速度传感器的主要指标有质量、灵敏度、频响范围、固有频率、横向灵敏度比、温度范围以及抗冲击性等指标。对于冲击弹性波测试而言，需要关心的有：

- (1) 传感器的质量：如果加速度计的动态质量接近被测结构物的动态质量，则会使振动产生明显的衰减和频率的下降；
- (2) 灵敏度：对于测试信号而言，当然是灵敏度越高越好。但灵敏度高的传感器一般质量大、频响范围窄；
- (3) 频响范围：即加速度传感器可测定的振动频率范围，一般指频响特性曲线中平坦的部分，对于频率在该范围中的振动信号，传感器的输入值与振动幅值的比例一定；
- (4) 耐冲击性：是对于物理冲击的界限值；
- (5) 最大横轴灵敏度(串音，交调失真)：一般在压电型加速度传感器有一个灵敏度最大的轴，它叫作主轴灵敏度。其它轴的灵敏度本应为零，但传感器制作上的少许误差，使得其他的轴也产生输出，叫作串音，用最大横轴灵敏度时主轴灵敏度的百分率表示；
- (6) 绝缘阻抗：通常指加速度传感器(非内藏前置放大器)的输出端子间和绝缘型加速度传感器的外壳与浮筒间的绝缘阻抗；
- (7) 灵敏度随温度变化：压电型加速度传感器一般随温度上升，电荷灵敏度和静电电容增加而电压灵敏度降低；
- (8) 底座应变灵敏度：在加速度传感外壳上外加应力或安装面上存在弯曲型应变时，位移会传达到压电元件安装面，从而产生电荷噪声。

3.1.4 传感器的固定方法

传感器的固定在冲击弹性波的测试中十分重要，既要考虑作业性和作业效率，又需要考虑固定方法对频响曲线的影响。传感器的固定方法有多种，大致可分为：压着式、紧固式、粘结式，传感器的固定方法与有很大的关系。

3.1.5 传感器共振的修正

如上所述，当测试对象的频率接近于传感器的固有频率时，会导致共振而使得测试信号异常放大。但是，当测试系统的固有频率、阻尼比已知且稳定时，可通过软件处理的方式进行修正。

3.1.6 传感器电缆的固定

信号电缆处于受力状态或信号线自身的振动都会产生一定的噪声，最差时信号线会断线或接线端子破损。

3.2 信号测试（AD 转换的基础）

温度、压力以及振动等自然界的信号都是以模拟量的形式存在，而计算机只能处理数字信号。为此，需要将模拟信号转换为数字信号，即为 AD 转换。

3.2.1 AD 转换的基本概念

将外部模拟信号输入到计算机时，受到计算机容量等的限制，需要将模拟量进行一定的四舍五入。在一定范围内用其代表值来表示，即所谓的“量子化”。

3.2.2 采样及采样精度

可以看出，量子化越纤细，对模拟量的近似度也就越高，即采样精度也就越高。当然，采样精度越高，不仅成本会随之增加，通常采样频率也容易下降。因此，根据精度要求选用最适的采样精度是必要的。

3.2.3 采集频率（采样间隔）

在时间轴上对信号进行量子化的频率（时间间隔）即称为采集频率或采样间隔。常用 Ksps 和 Msps 来表示每秒采样千/百万次（kilo/Million Samples per Second）。当

然，采集频率越高（采样间隔越短），对模拟信号的再现性越好。

3.2.4 触发

控制采集的开始和终止称为触发。在弹性波测试中，由于需要把握初始时刻，因此开始触发显得尤为重要。

开始触发的方法通常有：软件触发、外部控制信号触发、电平触发，在弹性波测试中，许多时候需要预触发机能。所谓的预触发，即在触发水平之前的信号也需要采样。

3.3 噪声及降噪

3.3.1 噪声的种类

在现场测试中存在各种各样的噪声，大致可以分为两类：外部噪声、内部噪声，模拟输入回路的接点处产生的噪声、接地电压差造成的零点漂移以及配线材料产生的混信、辐射噪声等。

在测试和分析时，控制噪声水平，保证信噪比（S/N）是非常必要的。主要的降噪方法可以分为两大类，即硬件降噪法和软件降噪法。

3.3.2 硬件降噪技术

在硬件层面降低噪声是最有效的，其方法也多种多样，在我们的测试系统中主要采用的有：对信号进行前端振幅、改良配线方式和输入方式、导入滤波装置、增加地线、导入软件除噪技术等。

3.3.3 软件降噪技术（一）移动平滑滤波

移动平滑滤波是采用相邻数据取加权平均的方法对测试信号高频噪声的一种削减技术。该技术方法简单，因而应用非常广泛。

3.3.4 软件降噪技术（二）带通滤波

带通滤波包括低通滤波 LPF、带通滤波 BPF、高通滤波 HPF，是非常常用的降噪方法。顾名思义，带通滤波就是使一定频率范围的信号通过（保留），而切除其他频率信号的方法。

3.3.5 软件降噪技术（三）经验模态分解法（EMD）

当测试信号是非线性、非平稳信号（如立柱、锚杆测试信号等有反射信号但又非常微弱时），采用带通滤波的方法则有很大的局限性。此时，经验模态分解法（EMD）是近年来得到广泛关注的方法。

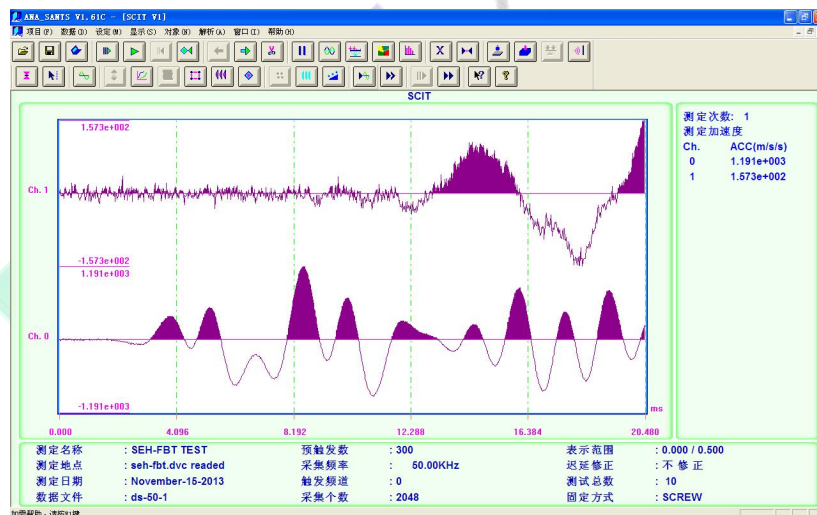
- 1) 本质模态函数（IMF）
- 2) 经验模态分解（EMD）
- 3) 基于 EMD 的降噪方法

3.3.6 软件降噪技术（四）小波降噪

小波降噪在提取激振信号，以及周围噪声频域较广时有较大的优势。

3.3.7 软件降噪方法的效果比较

在此，利用测试得到的信号（下图），对不同滤波方法的降噪效果进行了比较。可以看出，原始信号中频道-1 得到的信号较弱，噪声成分多。



原始信号

平滑滤波、带通滤波、EMD 降噪、小波降噪，可以得出，小波对于消除高频噪声是非常有效的，而且计算时间不长。但是，不同的阈值对原波形有不同的畸变，且光滑性变差，需要注意。

3.4 频谱分析技术

频谱 (Spectrum) 的一般概念是对复杂组分分解为单纯成分。波的频谱分析是对合成波的分解为一个个具有单独频率和初始相位的单纯波。频谱分析的方法有很多, 最为人知的是傅立叶变换 (Fourier Transform) 和高速傅立叶变换 (Fast Fourier Transform, 简称 FFT)。近年来, 最大熵法 (Maximum Entropy Method, 简称 MEM)、小波变换 (Wavelet Transform) 也得到了飞速的发展。

在本技术体系中, 采取了 FFT 和 MEM 并行处理的方法以提高分析精度和能力。

3.4.1 FFT 解析 (高速傅立叶变换)

傅立叶变换的基本概念是把波分解为 Sin 波或 Cos 波。分解出的各种 Sin (Cos) 波的频率、振幅和相位即为原始 (合成) 波的频谱。

3.4.2 MEM (最大熵法) 频谱分析方法

MEM (最大熵法, Maximum Entropy Method) 分析法, 在 1967 年被 John Parker Burg 提出, 最早用于地震波的解析。此方法与前述 FFT 等相比, 具有频谱分辨力高、适用于短数列等特点, 一经提出就引起了世界的广泛关注。

3.5 数据分析及判断

在测试过程中, 通常需要抽出异常 (可疑) 数据。其中, 采用统计和排序的方法是一般的。

3.5.1 基本统计方法

平均值 (m_x) 与标准差 (s_x) 是最常用的统计参数。

3.5.2 异常数据识别方法

从测试结果中识别异常数据对缺陷检测等有重要的意义。异常数据识别的方法有很多, 在此我们采用 CECS21: 2000: “超声法检测混凝土缺陷技术规程” 中介绍的方法:

将各测点的值 (振幅、波速、卓越频率等) 由大到小排序, 排在后面的 (小值) 可能为异常数据。通过对相邻测点异常的判断, 有助于剔除由于测试误差造成的异常。

此外，若构件整体质量较差，平均值较低时，采用该方法容易造成漏判。此时，可利用其它正常构件的相关参数。

3.6 非接触式振动测试

在前述的测试过程中，均采用接触式测量。在被测物体上安装加速度传感器，利用加速度传感器的电荷输出信号实现振动信号的相关测量。如果测量质量较小物体的振动，附加的加速度传感器的质量往往会影响到被测物体的振动，从而产生测量误差。同时，由于传感器系统本身的共振特性，以及接触状态的不良，都有可能造成测试信号的误差。

在这种情况下，非接触式、高精度、实时性的测振技术一直是工程科学和技术领域中的重要课题和任务。其中，激光全息时间平均法、电子散斑干涉（ESPI）方法、激光多普勒测振方法等，都在科学研究及工程实践中得到了应用。

3.6.1 激光多普勒测振原理

当波源向着接收器移动时，波源和接收器之间传递的波将发生变化，波长缩短，频率升高；反之，当波源背着接收器移动时，波源和接收器之间传递的波的波长将变长，频率会降低；这一现象是奥地利的物理学家 J. C. Doppler 于 1842 年首先发现的，称为多普勒效应。利用激光多普勒效应，即可测量固体的振动速度。

第 4 章 代表的无损检测技术简介

经过研究者们长期的研究和开发，逐步形成了具有代表性的无损检测技术，如 IE（冲击回波法），CT（计算机断层扫描）等技术。这些技术在工程检测中正得到越来越广泛的关注和应用。

4.1 冲击回波法（IE）

冲击回波法（Impact Echo，简称 IE）是上世纪 80 年代末发展起来的，针对结构内部缺陷的一种非常有效的检测手段。

4.1.1 冲击回波法的理论基础

IE 法是建立在冲击弹性波的传播和反射基础上的，一种能够测试混凝土内部缺陷、脱空以及尺寸的无损检测方法。

1) 冲击弹性波的传播

如前所述,当在结构表面某一点激发弹性波时,在结构中主要有三种形态的波,即:

- (1) P波:与正应力传播相关
- (2) S波:与剪应力传播相关
- (3) R波:与正应力和剪应力的合成相关

4.1.2 冲击回波法的测试

IE法的成功之一在于其可以用机械或人工的方式激振出较大的能量。最早的IE法可以追溯到岩土工程中的混凝土基桩完整性检测(Steinbach and Vey, 1975),也被称为声波回波法 *sonic-echo* 或地震回波法 *seismicecho* (ACI 228.2R)。

但是,由于基桩长度较长,激发信号与回波信号之间有较长的时间间隔,因此容易分离。另一方面,针对混凝土板等结构,其厚度较薄,激发信号与回波信号往往交织在一起,无法在时域上进行分离。为此,利用FFT等频谱分析手段对回波信号进行分离则是IE法的精髓所在。

在结构表面激发的冲击弹性波以P波和S波的形式传播到结构内部,而R波则沿结构的表面向外传播。其中,P波和S波在遇到内部缺陷时会产生反射,而当传感器与激发点位置较近时,P波占据了回波的主要成分(Sansalone and Carino, 1986)。

4.1.3 冲击回波法的检测能力

关于IE法的检测能力,亦即能够检出的最小缺陷尺寸,与下面的因素相关:缺陷的类型和方向、缺陷的深度、冲击时的接触时间。

4.1.4 冲击回波法检测时的注意事项

IE法在实际应用过程中,存在一个大的问题,即在测试信号中存在多种成分的频谱:

- 1) 打击的冲击信号以及敲击引起的部分自由振动
- 2) 壁的振动(板振动或弯曲振动)
- 3) 壁底部或缺陷处的反射信号(又叫纵波共振)

4.1.5 冲击回波法成像技术

将IE法测试得到的信息进行图形处理后,可以更直观地得到结构内部信息。本系统中,支持多种图形图像处理办法

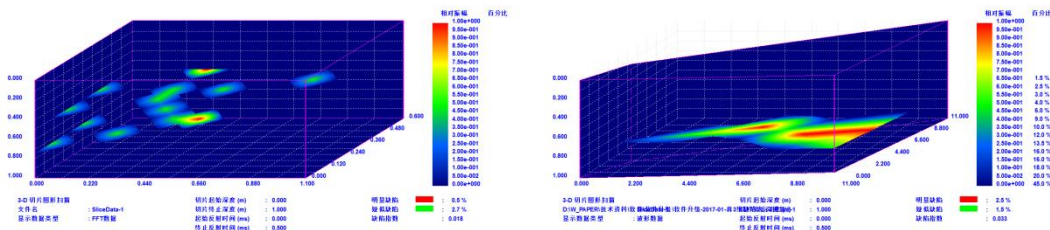
- 1) 2维成像

2) 3 维切片成像及合成

3) 3 维成像技术

对于内部缺陷，还可以采用三维成像的方法，更为直观地加以表现。我们的系统中支持两类三维成像方法，即

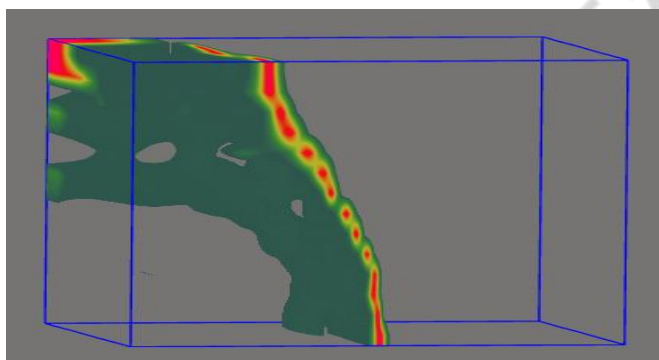
(1) 简易 3 维成像



内部缺陷的简易三维云图表示

(2) 真 3 维成像

通过与 U3D 的结合，可透视观察结构的内部状态，实现真三维成像。



结构厚度的真三维云图表示

4.2 计算机断层扫描 (CT)

计算机断层扫描 (Computer Tomography, 简称 CT, 也称为计算机层析扫描) 是上世纪 70 年代发展起来的, 针对医疗领域的一种非常有效的检测手段。起初是利用 X 射线, 后来发展利用超声波、弹性波等各种具有直进特性的媒质, 其应用领域也从单纯的医疗领域拓展到工业、土木检测等行业。

4.2.1 弹性波 CT 的解析方法

在测试领域中存在软弱区域或者缺陷时, 该当区域中传播的弹性波波速会降低。因此, 利用计算机层析技术反算测试领域的波速, 即可检测结构内部缺陷。

4.2.2 弹性波 CT 解析方法的改进

由于 CT 本质上是一种反演解析。由于测线密度的不足，以及走时读取的误差等原因，使得 CT 往往存在一定的误差。为了提高 CT 的反演稳定性，学者们提出了很多方法。其中，射线追踪法（Ray tracing）比较有名。为此，我们开发了有约束的同时迭代重构法：Restricted Simultaneous Iterative Reconstruction technique，简称 RSIR 法。

4.2.3 其它形状测试领域的弹性波 CT

在本系统中，弹性波 CT 还可适用于任意四边形、以及圆形的测试领域。

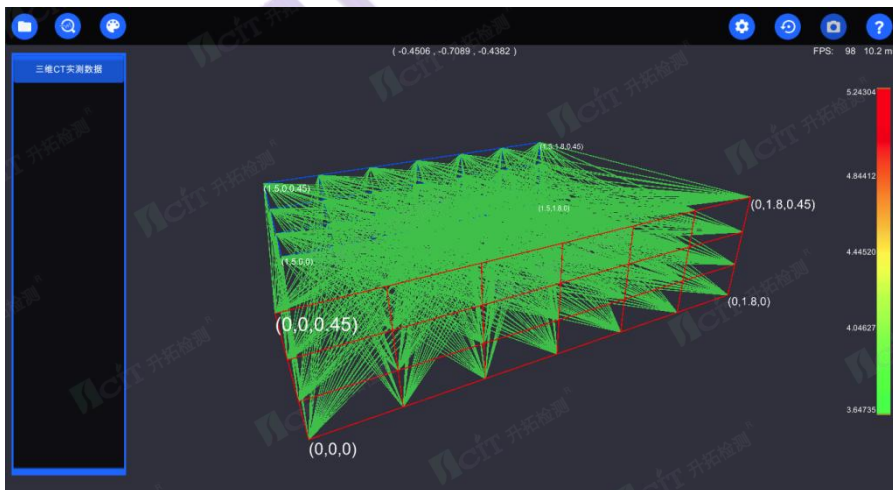
4.2.4 弹性波 CT 对软弱区和空洞的分辨力差异及改良

在弹性波 CT 测试中，对于空洞和软弱区的测试结果是有所不同的。其关键在于 CT 反演是建立在波的直进前提。

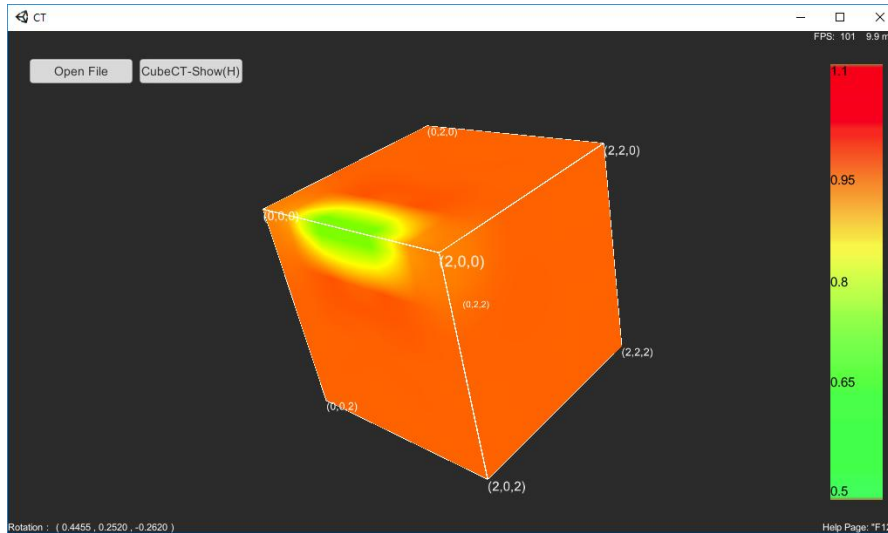
当测区中存在软弱区时，有两类波线，即穿过软弱区的直进波线和绕过软弱区的曲折波线。根据软弱区的大小、形状、位置、波速以及测线的不同，接收信号也有所不同。

4.2.5 真三维弹性波 CT 反演及 720° 全方位显示

本系统不仅支持各断层扫描，而且支持真三维 CT 反演及成像，从而更加准确、直观地反映结构的内部情形。



三维 CT 测线



反演结果（边上有缺陷）

4.2.6 像元划分对弹性波 CT 反演精度的影响及验证

像元的大小对成像质量也有很大的关系。一般来说，

- (1) 每个像元中，应该通过 2~3 条以上的测线；
- (2) 像元越大，分辨率越低。反之，在分辨率提高的同时，会产生虚假异常（波速过大或过小）。

4.2.7 弹性波 CT 的其它注意事项及精度提高

结合学者们的研究^[10]，对弹性波 CT 的其它几个重要问题进行简述。根据弹性波 CT 的理论基础（Randon 变换），当同时满足以下条件时，对缺陷的分辨率没有限制：测线环绕 360° 布置；测线足够密集；弹性波严格按直线传播；传播时间测定无误差。

第 5 章 冲击弹性波无损检测技术的设备及应用

5.1 应用领域

利用前述的冲击弹性波的发生、传播、反射以及振动特性，可以检测材料以及结构的各种力学特性和结构物的健全性。

5.2 检测精度验证及评价

5.2.1 检测精度验证及评价

对于无损检测设备，其检测、测试精度是非常重要的指标。为了评价检测设备的测试/检测精度，根据不同的测试对象或参数，可以采用不同的评价指标。

技术支持

- ✓ 本资料为公开资料，单位和个人均可自由下载，阅读。但在转载、分享、发表时请注明出处；
- ✓ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
 - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
 - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：
http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html
- ✓ 升拓相关官网与平台：

升拓检测媒体矩阵 | 扫码识别即可进入

升拓检测官网



升拓官方公众号



抖音平台官网号



哔哩哔哩官网号



*抖音和淘宝请分别使用对应软件扫码