

冲击弹性波检测技术基本原理

(V1.30)

2012-05-01 初稿
2015-06-29 第 25 次修订
2015-08-12 第 26 次修订
2015-09-08 第 27 次修订

四川升拓检测技术有限责任公司

宁波升拓检测技术有限公司

www.scentralit.com

本报告对应设备

- 1、 本公司生产的各类检测设备
- 2、 本公司生产的预应力混凝土桥梁远程监测系统

参考资料

- 1、 《土木工程检测与测试》，高等教育出版社，2015 年 2 月。

目 录

简略语	5
术语.....	5
符号说明	6
第 1 章 前言	7
1.1 无损检测技术概要	7
1.2 冲击弹性波无损检测技术的发展历程	8
第 2 章 弹性波的基本原理	9
2.1 冲击弹性波的基本概念	9
2.1.1 振动和波的概念	9
2.1.2 弹性波的分类	9
2.1.3 弹性波的基本方程	12
2.1.4 体波与面波	15
2.1.5 振动与波动的基本要素	16
2.2 冲击弹性波的产生	17
2.2.1 打击产生冲击弹性波	18
2.2.2 损伤以及冲击弹性波的发生 (AE)	20
2.2.3 激振信号强弱对测试的影响	20
2.3 冲击弹性波的传播	23
2.3.1 弹性波的传播速度	23
2.3.2 波的衰减	26
2.4 冲击弹性波的反射特性	28
2.4.1 在两种媒介垂直入射的情况	28
2.4.2 中间有不同夹层的情况	30
2.4.3 其它传播性质	31
2.5 弹性波和超声波的比较	33
2.5.1 超声波的基本概念	33
2.5.2 超声波和冲击弹性波的异同	34
2.5.3 对金属弹性模量的测试	35
第 3 章 冲击弹性波信号的测试和分析基础	36
3.1 信号测试 (传感器与放大器的基础)	36
3.1.1 测试对象	36
3.1.2 振动信号的拾取	37
3.1.3 传感器的选型	38
3.1.4 传感器的固定方法	40
3.1.5 传感器共振的修正	42
3.1.6 传感器电缆的固定	43
3.2 信号测试 (AD 转换的基础)	44
3.2.1 AD 转换的基本概念	44
3.2.2 采样及采样精度	45
3.2.3 采集频率 (采样间隔)	46
3.2.4 触发	47
3.3 噪声及降噪	48

3.3.1	噪声的种类.....	48
3.3.2	硬件降噪技术	49
3.3.3	软件降噪技术（一）移动平滑滤波	49
3.3.4	软件降噪技术（二）带通滤波	51
3.3.5	软件降噪技术（三）经验模态分解法（EMD）	51
3.3.6	软件降噪方法的效果比较.....	55
3.4	频谱分析技术.....	57
3.4.1	FFT 解析（高速傅立叶变换）	57
3.4.2	MEM（最大熵法）频谱分析方法	58
3.4.3	FFT 与 MEM 的对比.....	60
3.4.4	相关分析	63
3.5	数据分析及判断	64
3.5.1	基本统计方法	64
3.5.2	异常数据识别方法	65
第 4 章	代表的无损检测技术简介	67
4.1	冲击回波法（IE）	67
4.1.1	冲击回波法的发展历程.....	67
4.1.2	冲击回波法的理论基础.....	68
4.1.3	冲击回波法的测试	68
4.1.4	冲击回波法的检测能力.....	69
4.1.5	冲击回波法检测时的注意事项	70
4.2	计算机层析扫描（CT）	71
4.2.1	CT 的发展历程	71
4.2.2	CT 的理论基础	72
4.2.3	弹性波 CT 的解析方法.....	74
4.2.4	提高弹性波 CT 分辨力的方法	76
第 5 章	特色及专有技术简介	78
5.1	自由振动抑制技术	78
5.1.1	残留振动抑制的原理	78
5.1.2	自动激振系统	82
5.1.3	自动激振系统的效果	85
5.2	反射信号抽取技术	85
5.2.1	信号适应匹配技术	85
5.3	其他关键技术.....	88
5.3.1	半波移动技术	89
第 6 章	冲击弹性波无损检测技术的设备及应用	90
6.1	应用领域.....	90
6.2	冲击弹性波测试仪	91
6.3	系列技术方案.....	91
【参考文献】	93
版本修订说明	94
技术支持	96

简略语

AD: 也称“AD 转换”, 模数转换

AE: Acoustic Emission, 声发射

ASTM: American Society for Testing and Materials (美国材料试验标准协会), 是国际标准化组织, 它是制定、发布自愿共识的有关材料、产品、系统和服务的技术标准。组织的总部设在美国宾夕法尼亚州的西康舍霍肯

BPF: Band Pass Filter, 带通滤波器

CT: Computer Tomography, 计算机层析成像

EMD: Empirical Mode Decomposition, 经验模态分解法

FFT: Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换

HPF: High Pass Filter, 高通滤波器

IE: Impact Echo method, 冲击回波法

LPF: Low Pass Filter, 低通滤波器

NDIS: Non-Destructive Inspection Standard, (日本) 无损检测标准

NDT: Nondestructive testing, 无损检测

MEM: Maximum Entropy Method, 最大熵法

RSIR: 有约束的同时迭代重构法, Restricted Simultaneous Iterative Reconstruction technique, 用于 CT 反演

P 波: Primary wave, 疏密波、纵波;

S 波: Secondary wave, 剪切波、横波;

R 波: Raleigh Wave, 瑞利波;

L 波: lame Wave, 板波;

术语

弹性波: 是在固体材料中传播的物质粒子的微小振动传播形成的波, 也曾被称为“机械波”、“应力波”、“地震波”等。由于变形微小, 物体处于弹性状态, 因此被称为弹性波;

冲击弹性波: 通过人工锤击、电磁激振等物理方式激发的弹性波;

冲击弹性波检测技术基本原理

超声波：原定义是“在空气中传播的，频率超过 20KHz 的人耳不能听见的声波”，通常由压电材料产生，在空气中为疏密波，即 P 波。由于波长短、指向性较好，被广泛用于各个领域；

声波：与超声波对应，“在空气中传播的，频率在 20~20KHz 的人耳能够听见的声波”。在用于固体材料检测时，本质与弹性波相同。

机械阻抗：为材料的密度、其间弹性波波速及断面截面积之积，一般用 z 来表示。其对弹性波的反射和透过起到决定性的作用。

符号说明

f = 频率；

λ = 波长；

c = 相位速度；

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。至今，无损检测技术在国内许多行业和部门，例如机械、粉末冶金、建筑、公路、铁道、隧道、桥梁、石油天然气、石化、化工、航空航天、船舶、电力、核工业、兵器、煤炭、有色金属、医疗机构、核工业、海关等，都得到广泛应用。

无损检测技术是第二次世界大战后迅速发展起来的一门新兴的工程科学，它最突出的特点是“无损伤”。其发展过程经历了三个阶段：无损探伤阶段、无损检测阶段和无损评价阶段。首先，无损探伤阶段主要是探测和发现缺陷；其次，无损检测阶段不仅仅是探测缺陷，还包括探测试件的一些其他信息，例如、材质、结构、性质、状态等，并试图通过测试，掌握更多的信息；再次，无损评价阶段不仅要求发现缺陷，探测试件的材质、结构、性质、状态，还要求获取更全面，更准确的综合的信息，例如缺陷（裂缝、剥离、内部空洞、蜂窝等）、几何尺寸（厚度、埋深）、位置、取向、内含物、残余应力等，结合成像技术、自动化技术、计算机数据分析和处理等技术，材料力学、断裂力学等知识综合应用，对试件或产品的质量和性能给出全面、准确的评价。无损检测技术常用的媒介有冲击弹性波（包含超声波和声波）、射线（伽玛射线和 X 射线）、磁粉、渗透、涡流、声发射等方法。进入 21 世纪以后，为满足生产的需求，并伴随着现代科学技术的发展，特别是计算机技术、数字化与图像识别技术、人工神经网络技术和机电一体化技术的快速发展，无损检测的方法和种类日益繁多，除了上面提到的几种方法外，射线、激光、红外、微波、液晶、等技术都被应用于无损检测。

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。

其中，冲击弹性波和振动是有着密切关系的一个物体的两个方面。例如，对混凝土

表面敲击后，敲击部位及其附近产生振动。同时，该振动又会以弹性波的形式向四周扩散，即形成冲击弹性波。由于振动和冲击弹性波可以直接反映混凝土结构和材料的力学特性、几何条件和边界条件，具有作为土木工程无损检测的得天独厚的条件，从而得到了广泛的瞩目和飞速的发展。而超声波则可以作为冲击弹性波的一个特例，但其应用领域等受到很大的限制。

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。标准的第 1、2、3 部分分别为超声波、冲击弹性波（Impact elastic wave method）和打声法。

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，并正逐步形成相应的技术体系。

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。

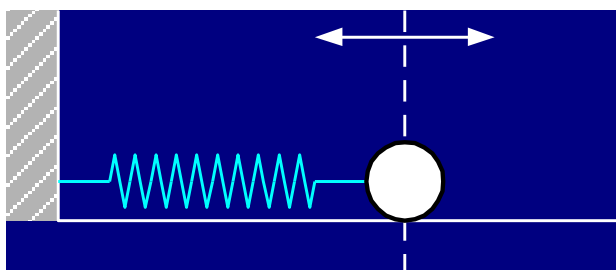


图 2-1-1 振动概念

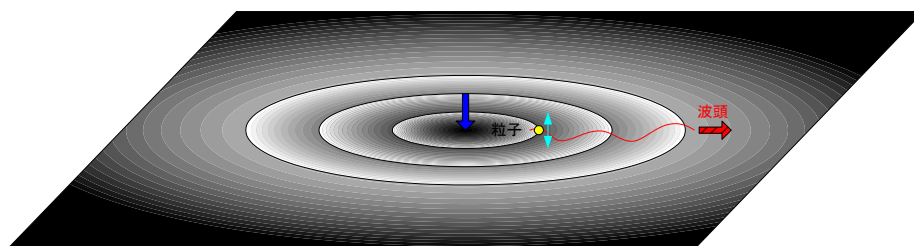


图 2-1-2 弹性波的概念

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。

冲击弹性波检测技术基本原理

- 1) P 波（纵波、又叫疏密波）：波的传播方向与粒子运动方向平行；
- 2) S 波（又叫横波）：波的传播方向与粒子运动方向垂直（粒子的运动方向与结构物表面平行的 S 波也称为 SH 波，与表面垂直的 S 波为 SV 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）：

- 1) R 波（Rayleigh 波、瑞利波、雷利波）：由 P 波和 SV 波合成。R 波的大部分能量集中在约 1 个波长深度范围内，是代表性的表面波。由于它的衰减比其他的体波少，在结构物表面激振和传播的信号主要是 R 波。
- 2) Love（洛夫）波：当下层材料坚硬，上层结构松软时，由 SH 波合成产生。
- 3) Lamé 波：又叫板波。在板厚度较薄的板状体，由上下两面反射的波合成。

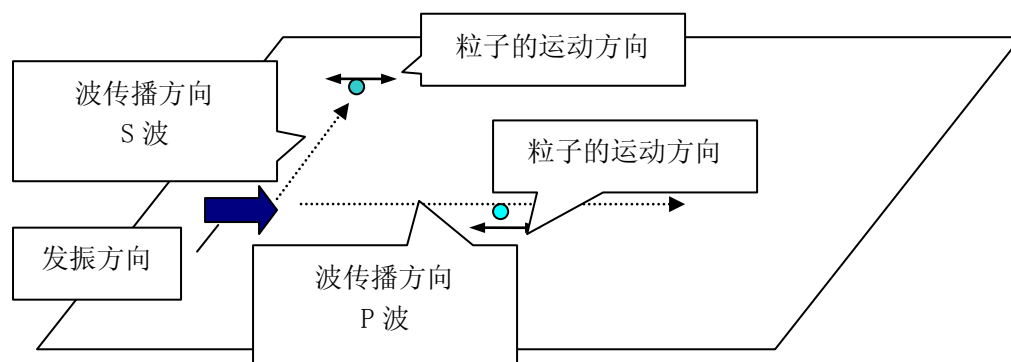


图 2-1-3A P 波和 S 波

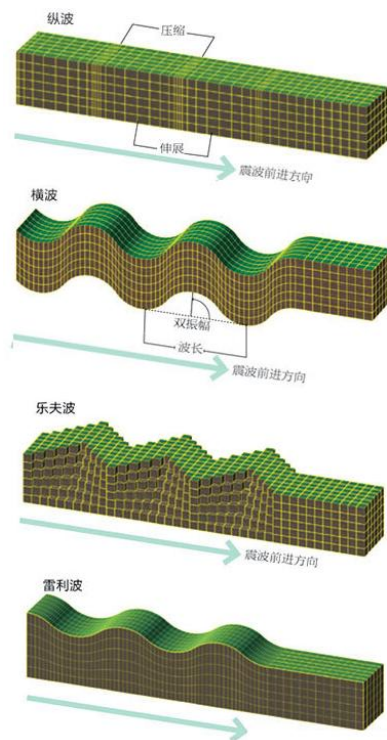


图 2-1-3B 弹性波的样子

相对以激振弹性波的波长而言，在波长范围内只有一个自由面时，会形成表面波（通常是瑞利波）。而在波长范围内有两个平行表面时，则会形成板波（也称 Lamé 波）。

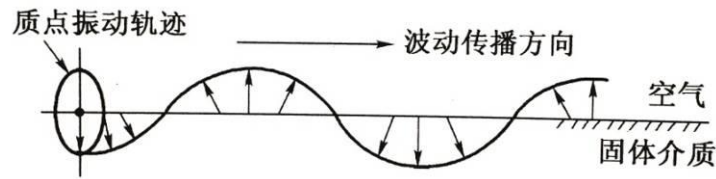


图 2-1-3C 表面波（瑞利波）

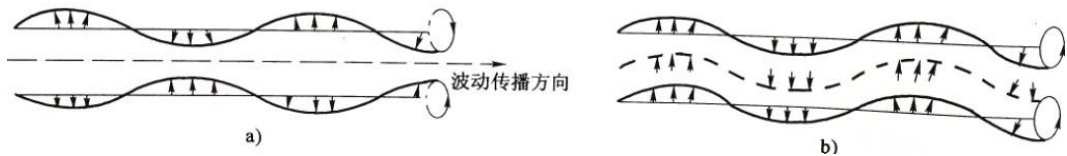


图 0-1-3D 板波（Lamé 波）

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。而板波与表面波的不同之处主要有：

- (1) 板波的传播要受到两个界面的束缚，从而形成对称型（S 型）和非对称型（A 型）两种情况。对称型板波在传播中，质点的振动以板厚的中心面为对称，即板的上下表面上质点振动的相位相反，中心面上质点的振动方式类似于纵波。非对称型板波在传播中，上下表面质点振动的相位是相同的，板的中心面上质点振动方式类似于横波。瑞利波则仅有一个模态；
- (2) 板波具有频散特性，即板波相速度随着频率的变化而变化。而瑞利波不具有频散特性，即在均质弹性体中，不同波长的瑞利波的波速是相同的。

下图表示在垂直于结构物的方向激振，观测到的弹性波各成分。

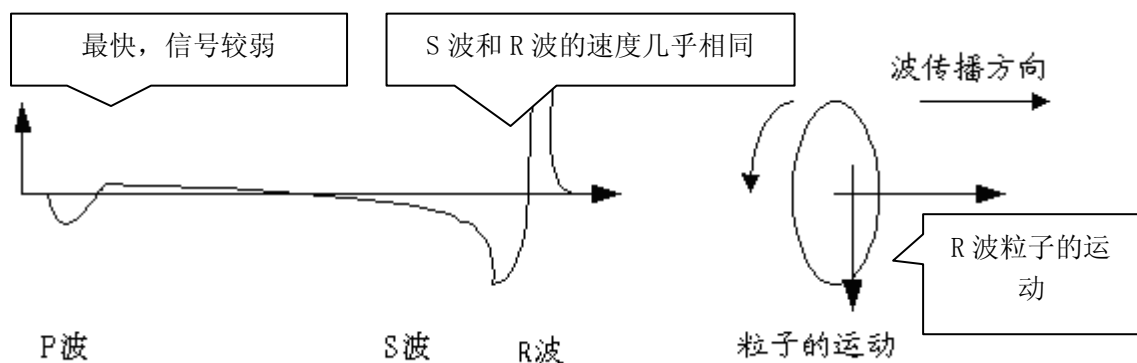


图 2-1-4 弹性波各成分的比较

下图表示了各弹性波成分的相互关系。

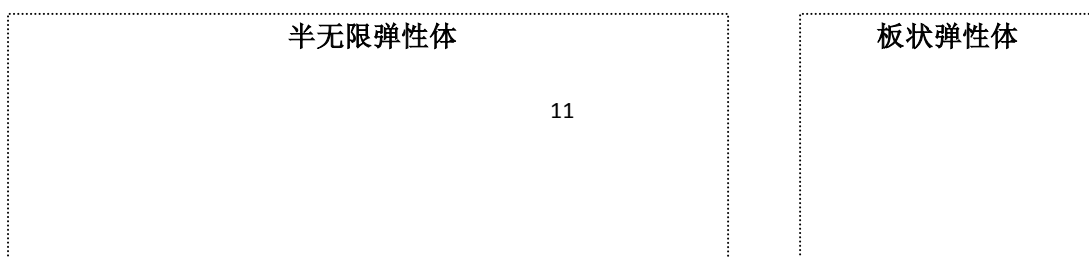




图 2-1-5 各弹性波成分的关系

2.1.3 弹性波的基本方程

1) 一维状态

对象物体满足如下条件时，可以认为其符合一维状态

$$\left. \begin{array}{l} \lambda > 2D \\ D < \frac{1}{5}L \end{array} \right\} \quad (2-3-1)$$

式中， λ ：波长；

D ：桩的直径；

L ：桩长。

取一维杆的轴线作为 X 轴，设一维杆为等截面，截面面积为 A ，弹性模量为 E ，密度为 ρ ，且材质均匀连续。在任意截面 x 处的微单元 dx 受纵向外力 p 扰动而自由振动，振动位移表示为 $u(x, t)$ 。

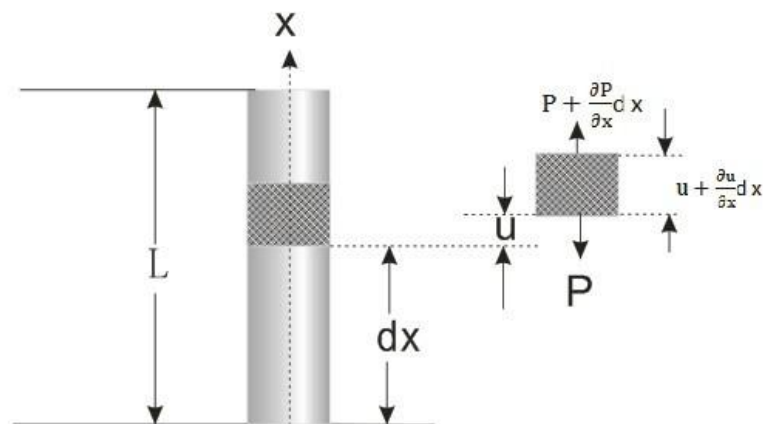


图 2-0-6 一维杆中质点纵向振动

该微元 dx 在 $x+dx$ 处，受扰动后产生的纵向张力以 $p(x)$ 表示，则

$$p(x) = AE\varepsilon \quad (2-1-2)$$

式中， $\varepsilon(x) = \frac{\partial u}{\partial x}$ ，于是上式可写为：

$$p(x) = AE \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-1-2)$$

而 $x+dx$ 截面处的总张力为：

$$p + \frac{\partial p}{\partial x} dx = AE \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) \quad (2-1-4)$$

据牛顿定律，平衡力差产生物体的加速度，即：

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2-1-5)$$

整理后，有：

$$\begin{aligned} AE dx \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2-1-6)$$

令： $C = \sqrt{E/\rho}$ ，整理后可得一维杆的质点纵向振动微分方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2-1-7)$$

可知 C 是弹性波沿一维杆轴向传播速度，也就是桩身轴向波传播速度为

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-1-8)$$

波动方程 (2-3-7) 的通解为

$$u(x,t) = f(x-Ct) + g(x+Ct) \quad (2-1-9)$$

亦即以 $x-Ct$ 和 $x+Ct$ 为参数的任意函数均可满足上式，它表明初始的扰动将保持其原始波形，并以 C 的速度传播。 $x-Ct$ 表示向下传播的，是我们在基桩、岩锚、立柱等检测时所研究的。

2) 三维状态

更一般地，在三维体中的弹性波的基本方程可以根据弹性体的运动方程导出：

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} + G \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} + G \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial z} + G \nabla^2 w \end{cases} \quad (2-1-10)$$

其中， ∇^2 为直角坐标系的拉普拉斯算子，其定义如下：

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

λ 为拉美常数， $\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$ ；

E 、 G 和 μ 分别为剪切模量和泊松比， $\bar{\varepsilon}$ 为体积膨胀率（ $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ）

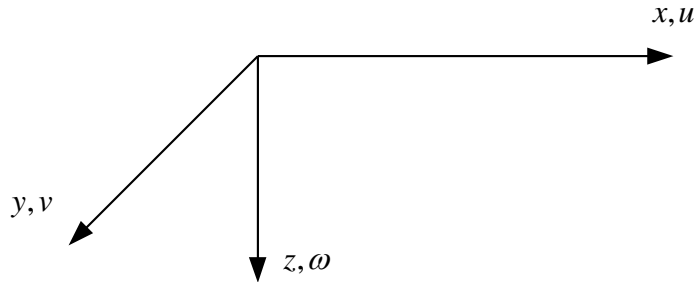


图 2-1-7 坐标和位移的定义

E 、 G 和 μ 分别为剪切模量和泊松比， $\bar{\varepsilon}$ 为体积膨胀率（ $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ）

上述弹性波基本方程，可以得到两种解。其一为 3 维膨胀的波（非旋转波），另一则为纯旋转波（等体积的波）。

将（2-1-10）中的三个方程的左右两端分别对 x ， y ， z 微分后相加，即可得到关于膨胀波的波动方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\varepsilon}}{\partial t^2} &= (\lambda + 2G) \nabla^2 \bar{\varepsilon} \\ &= v_p^2 \nabla^2 \bar{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2-1-11)$$

可以看出, $v_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$, 即为体积膨胀在 3 维弹性体中的传播速度, 也就是 P 波的波速。

同样, 将 (2-1-10) 中的 (2) 式对 z 微分, (3) 式对 y 微分后求差, 并消去 $\bar{\varepsilon}$ 后, 可得:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{G}{\rho} \nabla^2 \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2-1-12)$$

令 $\bar{\omega}_x = \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$, 即为绕 x 轴的旋转, 可得该旋转在 3 维弹性体中的传播速度,

也就是 S 波的波速: $v_s = \sqrt{G/\rho}$ 。

可以看出, 绕 y 、 z 轴旋转的波速均为 $v_s = \sqrt{G/\rho}$ 。

2.1.4 体波与面波

如前所述, 弹性波一般包括体波 (P 波、S 波) 和面波 (主要是 R 波和 Lamé 波, 也称表面波)。其中, 体波可以传播到物体的内部和深处, 而面波则主要集中在物体的表面。

瑞利波是重要的表面波的一种, 由于其独特的性质, 从而在无损检测和物理探查中得到了广泛的应用:

- 1) 瑞利波的传播深度大致相当于其波长;
- 2) 瑞利波在表面的衰减较小, 容易测试;
- 3) 瑞利波与材料的剪切刚性密切相关。

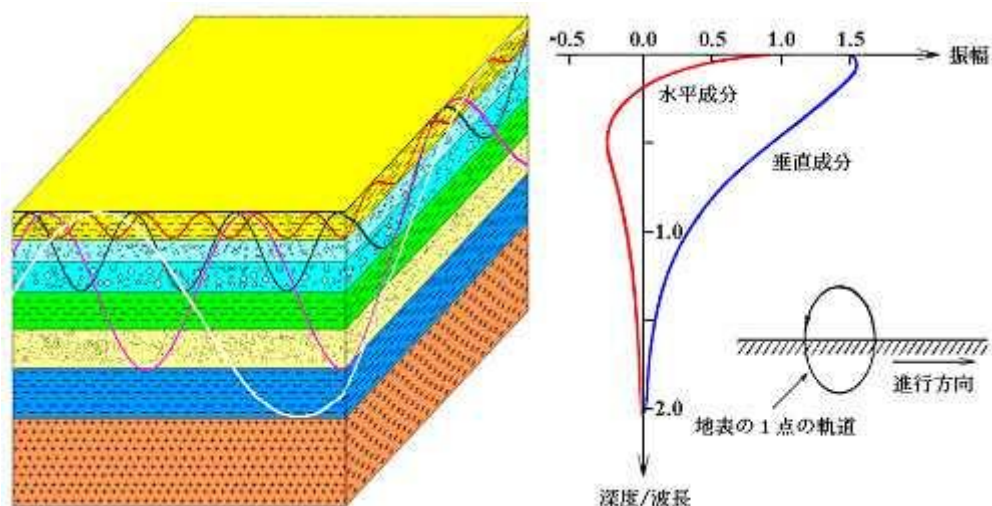


图 2-1-7 瑞利波的特性

瑞利波根据其激振方式，可以分为稳态瑞利波和瞬态瑞利波。稳态瑞利波通常采用激振器起振，容易控制波长，但装置较为复杂和笨重。瞬态表面波则一般利用锤击等方式激振，操作方便但波长不易控制，需要通过较为复杂的数学手段分离。

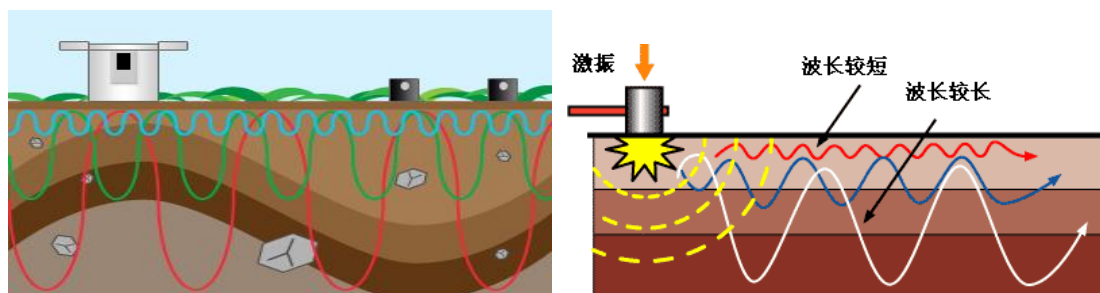


图 2-1-8 瑞利波的激振（左：稳态，右：瞬态）

2.1.5 振动与波动的基本要素

1) 粒子振动的基本要素：

- (1) 振幅 A
- (2) 周期 T / 圆频率 ω / 频率 f
- (3) 相位 θ

因此，一个粒子振动的基本方程可以写成：

(1) 位移： $x = A \sin(\omega t + \theta) = A \sin(2\pi f t + \theta)$

(2) 速度： $\dot{x} = A \omega \cos(\omega t + \theta) = 2\pi f A \cos(2\pi f t + \theta)$

(3) 加速度: $\ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \theta) = 4A\pi^2 f^2 \sin(2\pi ft + \theta)$

2) 波动的基本要素:

(1) 波的传播速度: V

(2) 波长: λ

(3) 波数: N

(4) 相位: θ

波动的基本要素的意义可以参见下图:

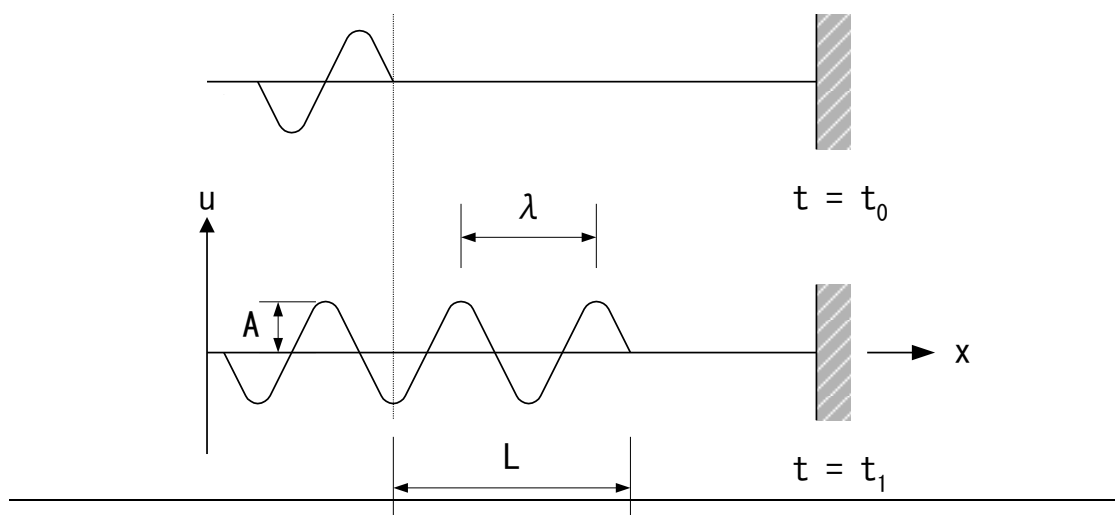


图 2-1-6 波动的基本要素

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。

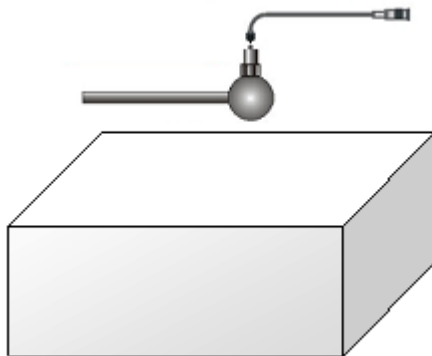


图 2-2-1 打击产生弹性波

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。钢球打击时，刚球和测试对象的接触时间 T_s （单位：s）可以表示为：

$$T_c = 4.53 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2)m_1}{\sqrt{R_1}v_0} \right]^{2/5}$$

其中， $\delta = \frac{1-\mu^2}{E\pi}$ ，材料的参数， E ：变形模量，单位：Pa（N/m²）， μ ：泊松比。

下标 1：打击球体（不锈钢材料 E_1 ：196GPa， μ_1 ：0.3），2：对象材料

m_1 ：激振球体的质量，单位：kg， $m_1 = \frac{4}{3}\rho\pi R_1^3$

R_1 ：激振球体的半径，单位：m，已知

v_0 ：激振球体与半无限体材料碰撞时的速度，单位：m/s，已知

$v_0 = \sqrt{2gH}$ ， $g = 9.80\text{m/s}^2$ ， H 为激振球体的下落高度，单位 m。

其冲击过程如图 1-2-8（a）所示，频域变换如图 1-2-8（b）。因此，激振信号和引起的自由振动频率的关系如下：

$$f_s = \frac{1.25}{T_s}$$

冲击弹性波检测技术基本原理

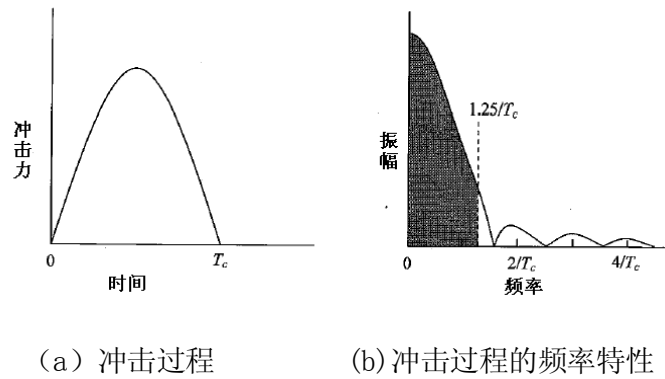


图 2-2-2 冲击信号的频率特性

通过上式可以看出，对于落下高度 H 的影响为 $H^{0.1}$ ，在通常的打击高度 0.2~1m 的范围内，其对接触时间的影响仅有 15%。

下表是不同激振锤在不同的混凝土，在 0.6m 落下相当引起的弹性波的频率。

表 2-2-1 典型条件下激振弹性波自由振动的频率 (KHz)

标号	C20	C30	C40	C50	C60
E_c (GPa)	25.5	30.0	32.5	34.5	36.0
D6	41.06	43.48	44.71	45.64	46.31
D10	24.64	26.09	26.83	27.38	27.78
D17	14.49	15.35	15.78	16.11	16.34
D30	8.21	8.70	8.94	9.13	9.26
D50	4.93	5.22	5.37	5.48	5.56

下表是不同激振锤在 C60 混凝土板激振弹性波频率的理论值，以及测试信号的卓越频率 (FFT 求取) 的比较。可以看出，其吻合得非常好。

表 2-2-1B 典型条件下弹性波的频率 (KHz)

激振锤	D17	D22	D26	D30
理论值	17.38	13.51	11.45	9.85
实测值	17.10	13.21	11.63	9.67
相对误差	1.64%	2.27%	-1.55%	1.86%

为了简化起见，取 0.6m 落下，C30 混凝土，则接触时间 T_s 可近似为^[6]：

$$T_s = 0.0043D$$

其中， T_s 是接触时间，单位 s； D 为刚球的直径，单位 m。

2.2.2 损伤以及冲击弹性波的发生（AE）

AE（Acoustic Emission 的缩写）的意思是“声的发射”，也是一种冲击弹性波。结构物的内部产生破坏现象时，萌生扩展过程中会释放一部分弹性波能量。借用习惯的说法，所以称为“声发射”。实际上，许多声发射的频率非常高，远远超过了人耳所能听到的范围（20-20KHz），需要用高频率、高灵敏度的传感器才可以检出。

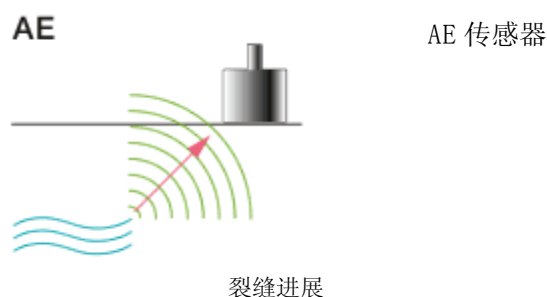


图 2-2-3 AE 信号的发生、传播和检出

AE 有以下特征：

- (1) 频率高：混凝土的场合，大多在数百 KHz 以上；
- (2) 衰减快：衰减快，传播距离一般不超过数米；
- (3) 信号弱、受周边环境的影响大。

2.2.3 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。

关于激振信号的强弱对于检测结果的影响可以分为三类：

- (1) 有直接影响：如果需要明确知道激振信号幅值的测试，如利用冲击特性的检测技术（落球检测技术等）；
- (2) 有间接影响：如利用反射振幅、能量衰减特性的检测技术。这类技术需要使用信号的相对幅值，以每次激发信号的幅值为基准；
- (3) 理论上影响很小：如采用弹性波频率、传播时间、相位的检测技术。这类技术不使用信号的幅值或相对幅值；

在此，我们首先分析激振力度对激振信号的影响，然后分析激振信号对各类检测技术的影响。

1) 激振力度对激振信号的影响

具体体现在以下方面：

- (1) 信号幅值：当然，激振力度越大，信号幅值越强，对长距离检测有利；
- (2) 信号频率：由 2.2.1 节可以得到，激振力度越大，则冲击时接触时间越短，激发的信号的固有频率越高；
- (3) 诱导振动：在冲击过程中，不仅激发冲击弹性波，还会诱发激振点乃至结构的振动。通常，激振力度越强，诱导的振动越强烈、模态更多且持续时间也 longer。

2) 激振信号对各种检测方法的影响

- (1) 振幅的影响：一般来讲，振幅越高，信噪比（S/N）也越高，有利于提高检测深度和距离，但振幅不能超过放大器的有效范围；
- (2) 频率的影响：通过激振力度的改变可以在一定程度上改变激振信号的频率，利用变频的方法可以提高部分检测技术的检测精度；
- (3) 诱导振动的影响：诱导振动既可以用于检测张力和脱空，但也会对其他检测项目造成干扰和不利影响。因此，当需要用到诱导振动时，较大的激振力度是必须的，反之则相反。

3) 如何消减激振信号变化对检测结果的影响

为了提高检测精度，有如下方法：

- (1) 根据检测项目，选用合适的激振锤和激振力度。一般而言，除了张力测试以及长距离透过法测试等检测项目以外，采用较轻的激振力度以避免诱发结构振动是有益的；
- (2) 对激振信号的振幅进行归一化：在利用测试波形、相关解析等数据进行分析并用等值线图表示时，对激振信号的最大振幅对齐是有很大作用的。

冲击弹性波检测技术基本原理

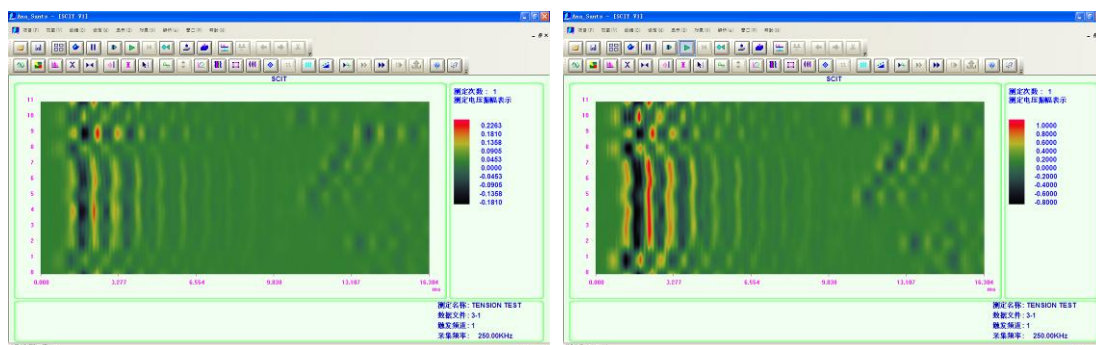


图 2-2-4 岩锚测试波形等值线图（左：振幅不对齐， 右：振幅对齐）

需要注意的是，最大振幅对齐是有条件的，即在显示范围内，有激振信号等最大振幅意义明确的数据方可。

(3) 在频谱分析时，在解析设定时对测试数据进行最大振幅归一化是必要的。

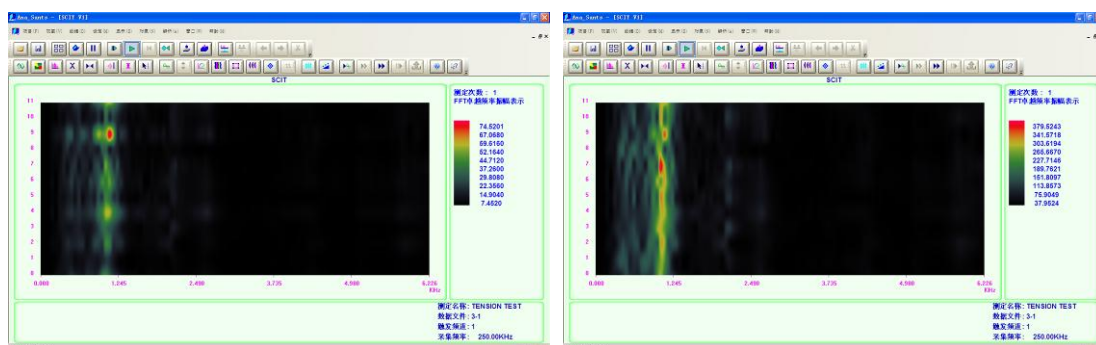


图 2-2-5 频谱等值线图（振幅不对齐，左：数据不归一化 右：数据归一化）

若对包含主频的频谱结果进行最大振幅对齐，则测试数据是否归一化的影响很小。

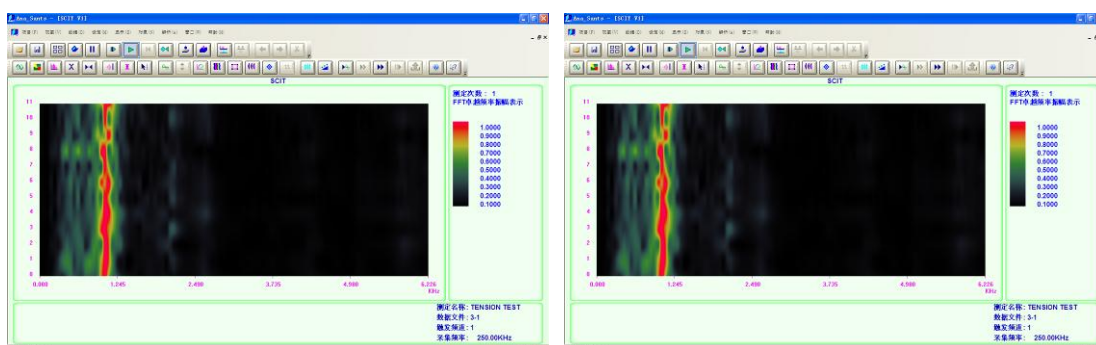


图 2-2-6 频谱等值线图（振幅对齐，左：数据不归一化 右：数据归一化）

在利用 IE 等方法进行结构内部缺陷检测时，采用振幅对齐一定要慎重。

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。当物体的 3 维尺寸大于 P 波波长时，P 波的传播速度可由下式表示。

$$L = V \cdot T / 2$$

其中， E 为材料的动弹性模量，也可以表示为 E_d 。 μ 为动泊松比， ρ 为密度。

而当传播物体为桩、立柱等细长物体而 P 波波长较长时，其 P 波波速为 1 维速度：

$$V_{p1} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

当传播物体为平板，而 P 波波长较长的场合，P 波速度为 2 维速度：

$$V_{p2} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}$$

容易得出 $V_{p1} < V_{p2} < V_{p3}$ 的关系。若泊松比取为 0.20，则有：

$$V_{p1} : V_{p2} : V_{p3} = 1 : 1.021 : 1.054$$

如前所述，P 波的传播速度不仅取决于传播物体的尺寸、形状，还取决于 P 波的波长。一般来说，波长越短的 P 波，其传播速度越接近 V_{p3} 。由于超声波发信子产生的 P 波的波长比用锤打击产生的冲击波的波长要短很多，因此在平板结构中当，因此，在板中传播的冲击弹性波的 P 波速度比超声波的 P 波速度大约慢 3% 左右。

此外，当 P 波中含有不同波长的成分，其波速又不相同时（称为“频散”），不同速度的波合成后会产生一个“群速度”，鉴于篇幅所限，其分析方法不做详述，感兴趣的

读者可以参考相关书籍。

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：

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)\rho}}$$

其中， G 为材料的剪切模量。

水或空气中不存在剪切刚性（ $G=0$ ），因此不存在 S 波。这是流体与固体材料的重要差别。

此外，根据 P 波和 S 波的速度，还可以推算材料的弹性模量 E 和动泊松比 μ 。在三维对象中，有：

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

3) R 波

R 波的速度 V_R 用下式表示：

$(V_R^2/V_S^2)^3 - 8(V_R^2/V_S^2)^2 + (24 - 16V_S^2/V_P^2) \cdot (V_R^2/V_S^2) - 16(1 - V_S^2/V_P^2) = 0$ 对于混凝土材料，可改写成：

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu}$$

下表列出了各泊松比下的不同波的速度。

表 2-3-1 各成分波的速度和泊松比的关系

μ_d	V_P/V_S	V_R/V_S	V_P/V_R
0.50	∞	0.9554	∞
0.40	$\sqrt{6}$	0.9535	2.5689
1/3	2.0	0.9325	2.1448
0.25	$\sqrt{3}$	0.9194	1.8839
0.20	1.6330	0.9110	1.7925
0.15	1.5584	0.9002	1.7312

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”。

Lamé 波的速度，不仅取决于材料的特性还与波长以及厚度相，其速度也叫相位速度，若用 c 表示，则有以下两种模态：

$$\frac{\sqrt{1-(c/v_p)^2} \sqrt{1-(c/v_s)^2}}{(1-\frac{c^2}{2v_s^2})^2} = \frac{\tanh(\frac{\zeta H}{2} \sqrt{1-(c/v_p)^2})}{\tanh(\frac{\zeta H}{2} \sqrt{1-(c/v_s)^2})} \quad (2-3-1)$$

$$\frac{\sqrt{1-(c/v_p)^2} \sqrt{1-(c/v_s)^2}}{(1-\frac{c^2}{2v_s^2})^2} = \frac{\tanh(\frac{\zeta H}{2} \sqrt{1-(c/v_s)^2})}{\tanh(\frac{\zeta H}{2} \sqrt{1-(c/v_p)^2})} \quad (2-3-2)$$

其中， $\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ ， $\zeta = \omega/c$

上两式的左边尽管相同，但右边的分子和分母互相有个调换。与 R 波不同，L 波的相位速度 c 是频率 ω 的函数，不仅具有频散性，而且有无数的分支。

在实际的检测中，有以下几种情形：

(1) $\zeta \rightarrow \infty$ (即波长 $\rightarrow 0$) 的场合

当波长很短时，弹性板引起的变形随着与板表面的距离的增加，按 \exp 的指数函数减少且板的两侧互相不影响，L 波为沿板的两面传播的 R 波

(2) $\zeta \rightarrow 0$ (即波长 $\rightarrow \infty$) 的场合

此时，有两种模态。当在表层中弹性板粒子的上下方向的振幅 w 要远小于水平方向的振幅 u 时，主变形成分 u 为 z 的偶函数，而 w 为关于中心轴的奇函数 (下图 a)，其模态也称为“伸缩型”，此时的板波的波速趋近与 P 波波速。

而在表层中弹性板粒子的上下方向的振幅 w 要远大于水平方向的振幅 u 时，其大体形状如下图 b 所示，其模态也称为“屈曲型”，此时板波的波速则趋近于 0。



图 2-3-1A 弹性板中朗姆波的模态

下图显示了在屈曲型中相位速度 c 与波长的关系。 V_R 表示表面波速度， H 表示板厚度， L 表示 Lamé 波的波长。如 $H/L > 1$ 时，Lamé 波的相位速度与瑞利波的速度相似。 $H/L < 0.5$ 的场合，Lamé 波的位相速度急剧降低。

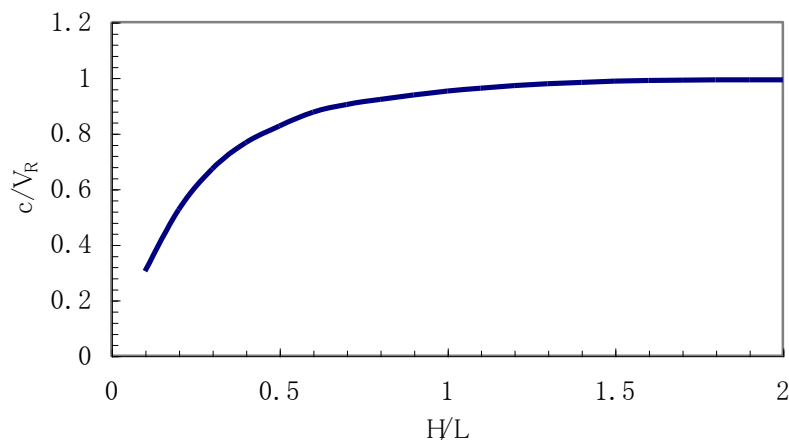


图 2-3-1B Lamé 波的理论频散曲线

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。另一方面，R 波（瑞利波）的传播是沿圆柱状（圆柱的高度大约相当于 1 倍波长）扩散，其表面积与传播距离的一次成正比波，因此其衰减要比体波慢得多。

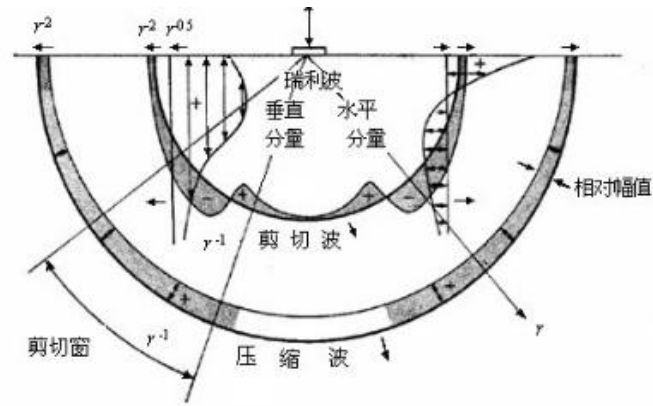


图 2-3-2 弹性波的传播及衰减

所以，在半无限结构物表面激发的弹性波在沿物体表面传播过程中，其体波成分衰减得很快，一定距离后，主要成分被 R 波所占据。

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。如果用振幅，可以表示如下：

$$A = A_0 e^{-\alpha(\omega)r}$$

其中， A_0 ：基准点的振幅

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{2QC}, \text{ 为反映粘性衰减的指数}$$

r ：与基准点的距离

ω ：圆频率

C ：波的传播速度

Q ：表示材料粘性衰减特性的常数，其值越小说明材料的衰减也越大。

可以看出，弹性波的频率越高，其粘性衰减越大，而且与频率呈指数关系。

综合以上，可以得到：

$$A = \frac{A_0 \cdot r_0 \cdot e^{-\alpha(\omega)r}}{r}$$

$$\text{即: } \alpha(\omega) = \frac{1}{r} \left(\ln A_0 + \ln \frac{r_0}{r} - \ln A \right)$$

2.4 冲击弹性波的反射特性

弹性波在异种媒介的边界面会引起反射，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。

考虑激振后向下传播的弹性波粒子的位移： $u(x, t) = f(x - Ct)$

若令 $\zeta = x - Ct$ ，则粒子的运动速度 $v(x, t)$ 为：

$$v(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial u(x, t)}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t} = -C \frac{\partial u(x, t)}{\partial \zeta}$$

同时，传播的弹性波引起的压力 $p(x, t)$ 则可以表示成：

$$p(x, t) = EA \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = EA \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} = EA \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial \zeta}$$

结合上述两式，考虑到 $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ，经整理后可得：

$$p(x, t) = -\rho CA \cdot v(x, t)$$

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 是断面截面积）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。

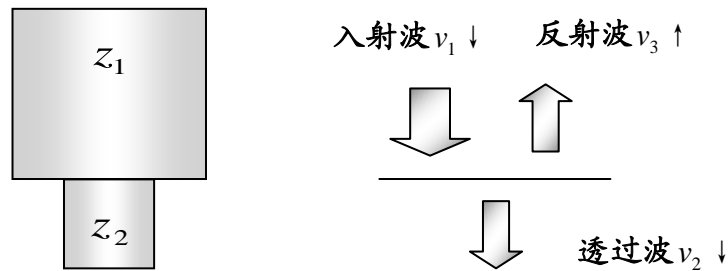


图 2-4-1 变化的机械阻抗面发生的反射和通过

这里， v_1 ， v_3 表示单元 1 的粒子的运动速度（入射和反射， $v = \partial u / \partial t$ ）， v_2 表示单元 2 的粒子的运动速度， \uparrow 、 \downarrow 表示上行和下行。在界面上，物体内部由于弹性波产生的压力和粒子速度仍然保持连续，即：

$$p_1 + p_3 = p_2$$

$$v_1 + v_3 = v_2$$

若仅考虑一维情况（ x 方向），压力 p 可以表示为：

$$p = EA\varepsilon = EA \frac{\partial u}{\partial x}$$

经过整理，可得：

$$p = -z \cdot v$$

综合可得：

$$\text{反射波: } v_3 \uparrow = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} v_1 \downarrow$$

$$\text{透过波: } v_2 \downarrow = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} v_1 \downarrow$$

此外，反射波和透过波的大小用振幅率来表示。

$$\text{振幅反射率: } R = \frac{|z_1 - z_2|}{z_1 + z_2}$$

$$\text{振幅透过率: } T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

弹性波的反射和透过具有如下性质。

- (1) 媒介的机械阻抗相同（ $z_1 = z_2$ ），那么就算材料不同，也不会产生波动；
- (2) 两种媒介的机械阻抗相差越大，反射率也越大。
- (3) 在裂缝或缺陷处，以及桩、柱、杆的端部机械阻抗减少（ $z_1 > z_2$ ）时，反射波和入射波符号相同（相位相同）。

典型材料的阻抗如下表所示：

表 2-4-1 典型材料的阻抗参数

	空气	水	土、岩石	混凝土	铁
密度(kg/m ³)	1.0	1000	1800~2500	2400	7800
波速 (m/s)	340	1450	300~5000	3000~4500	5300

阻抗 $10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$	0.00034	1.45	0.54~12.5	7.2~10.8	41.3
--	---------	------	-----------	----------	------

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 ($z_1 = \rho_1 v_1 A_1$) 和媒介 2 ($z_2 = \rho_2 v_2 A_2$) 的两个交界处均会产生透射和反射，如下式所示。

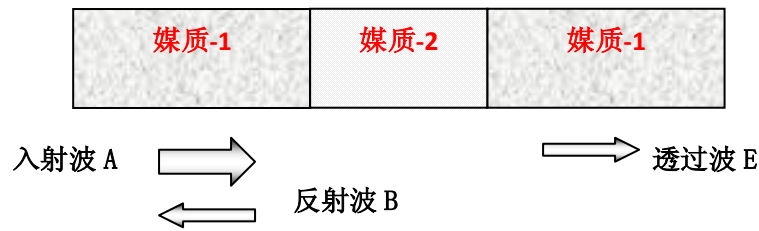


图 2-4-2 夹入不同的媒介时弹性波的反射

$$|T| = \frac{2z_1 z_2}{\sqrt{4z_1^2 z_2^2 \cos^2(k_2 L) + (z_1^2 + z_2^2)^2 \sin^2(k_2 L)}}$$

其中， T ：振幅的透过率（绝对值）

$k_2 = \omega/V_2$ ：媒介-2 中的波数

L ：媒介-2 的长度

同样，可以得到振幅反射率的绝对值 R ：

$$R = \sqrt{1 - T^2}$$

因此，在有不同媒介介入的场合下，

- (1) 反射（通过）率与频率相关，通常高频波容易反射。
- (2) 在特定的频率下，反射波消失。

现以混凝土强度为 C50，脱空层厚度分别为 0.01mm、0.1mm、1mm、10mm 为例，计算出的不同频率的入射弹性波在不同厚度脱空区域的反射率如下图所示。

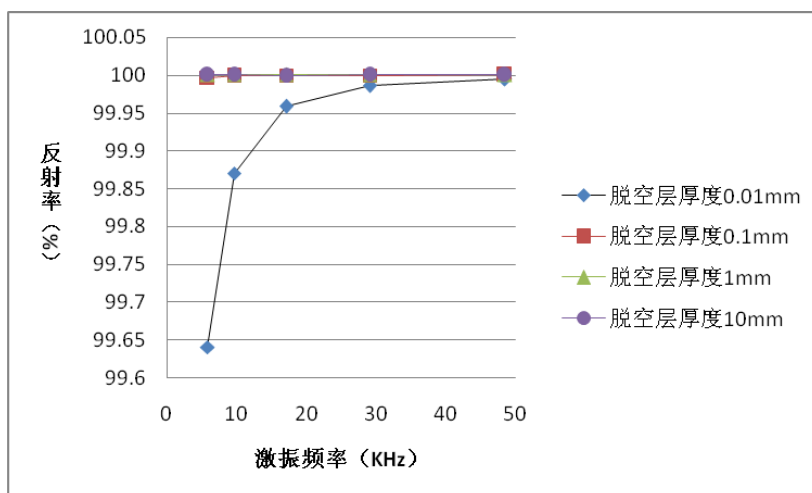


图 2-4-3 不同激振频率在不同脱空厚度下的反射率

由此可见，即使脱空层厚度低至 0.01mm、弹性波的反射率也高达 99%以上。但是，当脱空面相互有接触时，弹性波可以从接触的位置透过，其反射率则会大幅降低。

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。

其中，反射角与入射角 i 相同，而折射角 j 与入射角 i 的关系则为：

$$\frac{V_1}{\sin(i)} = \frac{V_2}{\sin(j)}$$

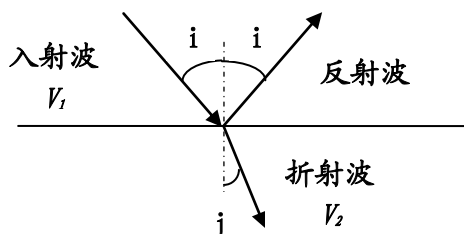


图 2-4-4 波的折射

当 j 为 90 度时，折射波沿界面传播。对于弹性波，当斜向入射时，反射波和折射波都会发生一定的变化。当 P 波入射时，反射和折射波不仅有 P 波，还有 SV 波。其波

速与入射角的关系为：

$$\frac{V_{P1}}{\sin(i)} = \frac{V_{S1}}{\sin(i_s)} = \frac{V_{P2}}{\sin(j_p)} = \frac{V_{S2}}{\sin(j_s)}$$

当 SV 波斜向入射时，反射和折射波中也包含 P 波和 SV 波成分。此外， SH 波斜向入射时，其反射和折射波中仅有 SH 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。

当两个频率相同，振动方向相同、相位相同或相位差恒定的波动在介质某些点相遇后，会使一些点处的振动始终加强，而在另一些点处的振动始终减弱或完全抵消，这种现象称为干涉现象，这两束波为相干波，它们的波源称为相干波源。

干涉现象是波动的重要特性，是造成波场呈现较为复杂分布的原因，尤其在离振源较近的近场区内，干涉给检测带来很大的困难。

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。

如下图所示，当一个任意形状的波，在传播过程中遇到一个障碍 AB 。当 AB 上有一个宽度为 a 的狭缝，且当 a 的大小与波长相当时，可以看到穿过狭缝的波是以狭缝为中心的圆形波，与原来的波阵面无关。这说明狭缝可以看作新的波源。波前上的所有点，都可以看作产生球面子波的点源。经过一段时间后，该波前的新位置将是与这些子波波前相切的包迹面。这一原理称为惠更斯原理。

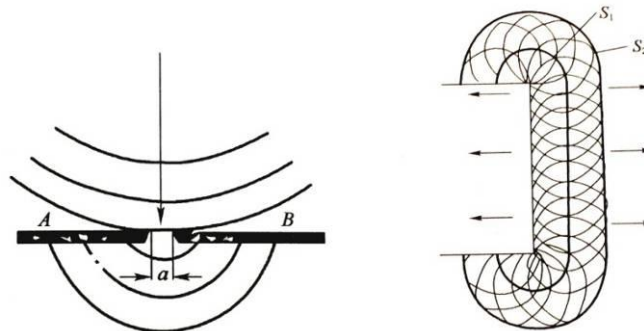


图 2-4-5 障碍物的狭缝称为新的波源 图 2-4-6 按惠更斯原理画出新的波前

惠更斯原理不仅适用于机械波，而且适用于电磁波。它用几何方法比较广泛的解决了波的传播问题。

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 超声波的基本概念

超声波是指在空气中传播时，人耳听不见高频声波，其频率大于 20KHz。由于空气中不存在剪切刚性，因此声波（包含超声波）是一种疏密波。同时，由于空气粒子的运动方向平行于声波的传播方向，声波也是 P 波。另一方面，在混凝土、金属结构中，由于材料存在剪切刚性，因此弹性波不仅包含 P 波，还包括 S 波（SH 波和 SV 波）以及所合成的表面波。

超声波的产生以钛酸钡，水晶，PZT 等压电材料为主。超声波的产生如下图所示，在探头的两面镀银的为电极加上电压，使探头在厚度方向产生伸缩进而激发超声波。这种机械振动也叫做超声波振动。相反，探头在机械振动传播下，其两电极间能产生与振动强度成比例的高频电压。因此，探头是机械振动与电气振动的交换器，不仅能够作为信号源，也可以拾取信号。

超声波一般具有如下特性：

- (1) 频率高，一般在数百 KHz 以上；
- (2) 通常以 P 波为主。近年来，也出现了针对固体检测用得 S 波超声波。

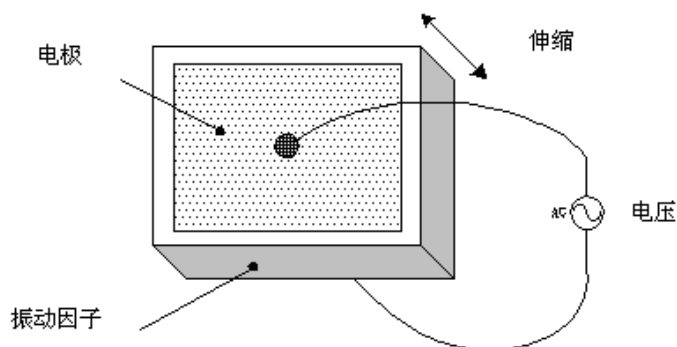


图 2-5-1 超声波的发生

在混凝土表面用超声波发振和用锤打击发振产生的弹性波基本上是相同的。但超声波是通过振动子伸缩是电压变化，在短的时间内完成，产生短的脉冲。

超声波受信和加速度传感器受信的机械基本相同。但加速度传感器受信的频带宽，而超声波是利用卓越频率的共振，可高感度受信。

2.5.2 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。

下表表示了超声波和冲击弹性波的主要异同。

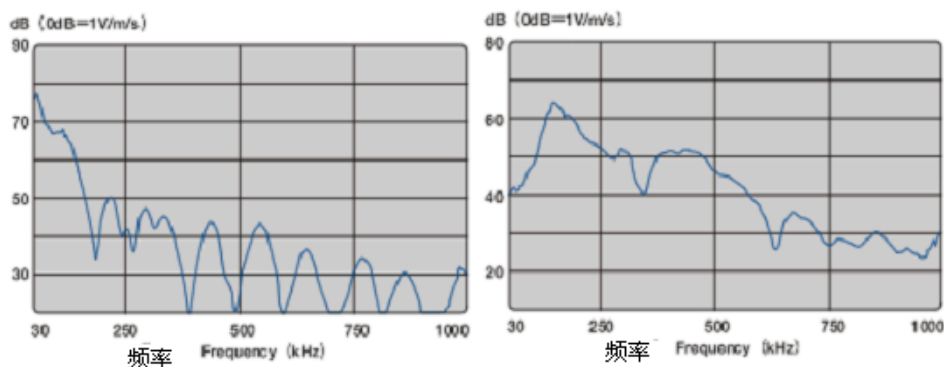


图 2-5-2 频响特性中没有平坦部分

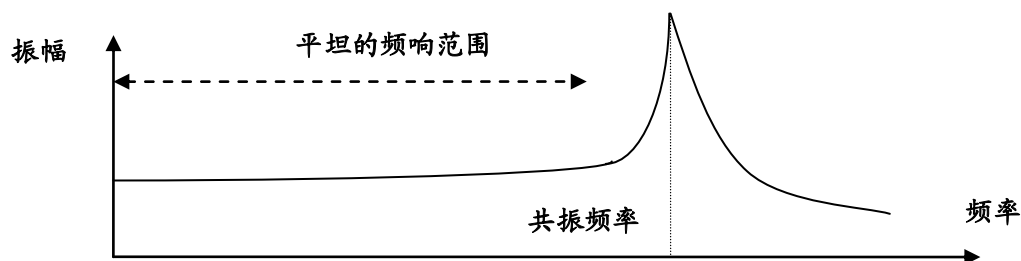


图 2-5-3 频响特性中有平坦部分

表 2-5-1 超声波和冲击弹性波的主要异同

项 目		超声波	冲击弹性波	
发振	方法	电气振动	打击等	
	能量	小	大	
	频率	短（频率高）	长（频率低）	
受信	传感器类型	探头	AE 传感器	加速度传感器
	受信灵敏度	高	高	低
	频谱特性	差	差	好

2.5.3 对金属弹性模量的测试

金属(钢铁)的性质是比较均匀的。例如,钢筋所用的低碳钢的弹性模量一般在 200~210GPa。根据一维波动理论,在其间传播的弹性波 P 波的波速为 5.06~5.19km/s。用冲击弹性波测试得到的波速为 5.18km/s (±0.5%), 而用超声波得到的波速则在 5.3~5.8km/s 左右, 根据不同形状的对象, 最大可达 6.0km/s, 其误差为 2.3~15.8%。

至于超声波测量钢筋波速偏大的问题, 学者们给出了不同的解释, 但在实际使用中存在的问题却一直难以解决:

- 1) 测试的结果与超声波的频率有关;
- 2) 测试的结果与超声波探头的特性有关: 也就是说, 不同厂商的超声波设备测试得到的波速值有可能差别很大;

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。

例如，测试信号为速度信号 $\dot{y}(t)$ 。若令：

$$\dot{y}(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t$$

其中， A ：离开基准位置的最大位移，即振幅；

φ ：初始相位角；

ω ：角频率，有 $\omega = 2\pi f$ 。

则加速度信号 $\ddot{y}(t)$ 可以通过对速度信号的微分求得

$$\ddot{y}(t) = A_1 \omega_1 \cos \omega_1 t + A_2 \omega_2 \cos \omega_2 t$$

可以看出，相比速度信号，加速度信号有一个 ω 倍的增幅。因此，相对于低频信号，高频信号的经微分后显得更加卓越。所以，针对高频信号（如混凝土无损检测中的弹性波的频率往往达到数 KHz），采用加速度信号有助于提高灵敏度。

同理，针对速度信号进行积分，则可以得到位移信号：

$$y(t) = -\frac{A_1}{\omega_1} \cos \omega_1 t + \frac{A_2}{\omega_2} \sin \omega_2 t$$

其特征则与加速度相反，低频信号得到了增强。

可以看出，简谐振动的位移、速度、加速度的振动形式基本上是相似的，其周期完全相同，差别只是相位角和幅值不同。它们的相位角的关系是：速度超前位移 $\pi/2$ （即

90°) 的相位角; 加速度超前位移 π (即 180°) 的相位角, 也就是与位移振动方向相反。幅值方面, 加速度、速度的幅值分别为位移幅值的 ω^2 和 ω 倍。

对于仅单一频率的信号, 无论位移、速度还是加速度, 其频率均相同。但对于含有不同频率成分的信号, 加速度信号可以放大其中的高频成分而位移信号则相反。所以, 对于高频信号, 采用加速度有利于信号的检出。另一方面, 对于低频信号 (特别是 $\omega < 1$) 则相反, 采用位移作为测试对象更为适合。

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), 其振动方程如下:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = \ddot{y}(t)$$

其中, y 为被测体的位移, 为所需测试的信号;

x 为传感器内部可动质量相对外壳 (被测体) 的位移, 为传感器感应的信号。

若被测体为简谐振动, $y(t) = A_m \sin(\omega t)$, 则有:

$$x(t) = e^{-h\omega_n t} (C_1 \cos(\omega_n t) + C_2 \sin(\omega_n t)) + A_n \sin(\omega_n t - \varphi)$$

其中, $h = \frac{c}{2\sqrt{KM}}$, 为阻尼比;

$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$, 为传感器体系的固有频率。

上式右边前一项为冲击产生的自由振动部分, 由于阻尼而会被逐渐衰减。右边第二项为强制振动项, 有:

$$\frac{A_n}{A_m} = \sqrt{\frac{1 + 4h^2 \omega^2 / \omega_n^2}{(1 - (\omega^2 / \omega_n^2))^2 + 4h^2 \omega^2 / \omega_n^2}}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2h(\omega / \omega_n)^3}{1 - (\omega / \omega_n)^2 + 4h^2 \omega^2 / \omega_n^2} \right)$$

由此可以看出, 传感器体系的固有频率 ω_n 越高, 增幅率 A_n / A_m 越小。

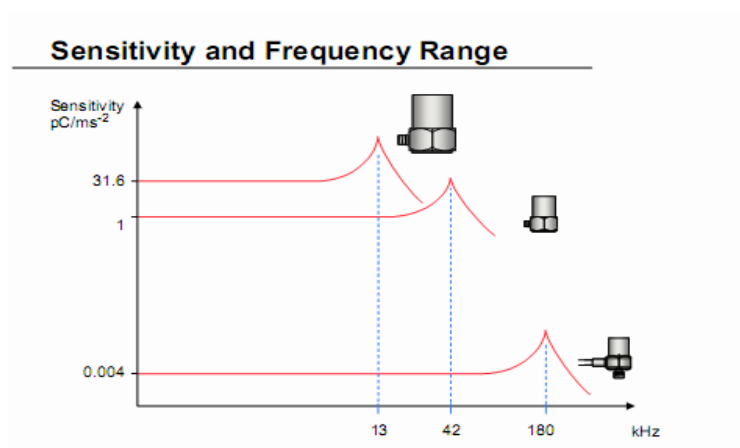


图 3-1-1 振动传感器灵敏度~固有频率的关系

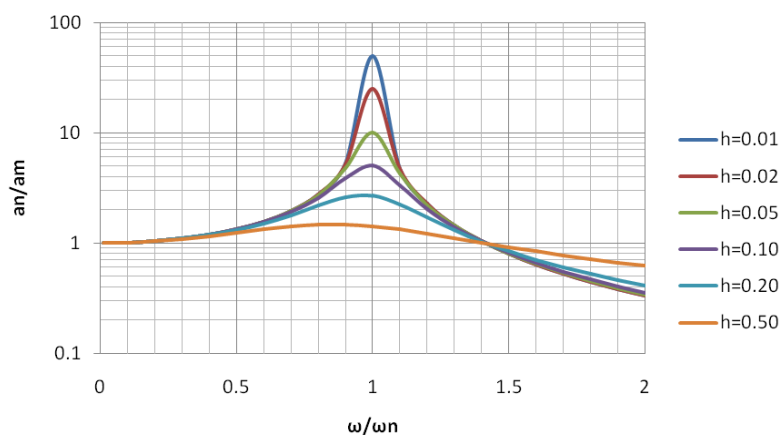


图 3-1-2 阻尼比对频响曲线的影响

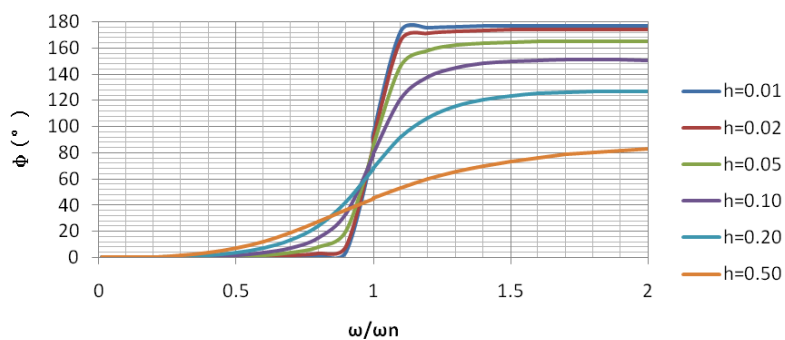


图 3-1-3 阻尼比对相位差的影响

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。但是，加速度传感器的质量与灵敏度往往成正比，因此，在满足灵敏度的条件下，应尽量选用质量小的传感器；
- (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。对于压电式传感器，体现在电荷灵敏度 ($\text{pC}/\text{m}/\text{s}^2$)。由于电荷灵敏度不受容性负荷影响，它不会随电缆长度而变化。而对于放大器内藏型加速度传感器的灵敏度指电压灵敏度 ($\text{mV}/\text{m}/\text{s}^2$)，传感器内藏放大器时其信号输出不是电荷而是电压，其受到电缆电容的影响，灵敏度随电缆长度降低：

$$V = \frac{Q}{Cd + Cc}$$

其中， V ：电压灵敏度， Q ：电荷灵敏度， Cd ：传感器静电电容， Cc ：电缆静电电容

- (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（图 2-5-3），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。一般来说，共振频率越高的传感器，频响范围越宽，但灵敏度也越低；
- (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。如绝缘阻抗因湿气而降低，就可能造成噪声的增大；
- (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：

- (1) 压着式：采用人工或机械的方式将传感器压在测试对象的表面上（磁性卡座、探针也属于该类），该方法的测试效率最高；
- (2) 紧固式：采用螺栓或者热熔胶将传感器与测试对象联成一体，该方法结合最紧密，但作业性、测试效率最差；
- (3) 粘结式：采用双面胶纸或者耦合剂（硅油、凡士林等）将传感器粘接在测试对象上，其作业性、测试效率介于压着式和紧固式之间。

传感器的固定方法与有很大的关系。下表和下图表示了几种固定方法（螺栓、磁性卡座、双面胶和探针）对频响曲线的影响。

其中，固定加速度传感器最重要的事项在于将传感器底面与测试对象表面密切接触，亦即面接触。要切实防止点接触或者线接触。

表 3-1-1 不同固定方法对测试的影响

螺栓固定	磁性卡座
在测试表面上涂上硅油，用螺栓固定传感器是最理想的固定方式。 如果不用硅油，或者测试表面粗糙，则传感系统的共振频率有低下的倾向。	在测试面涂油，表面状态较好的条件下，效果与螺栓固定相近。
粘接	探针
用热熔胶、502 胶水、漂白蜡等进行固定时，如果表面状态良好，有固定效果与螺栓固定接近。	在用 100mm 的不锈钢制探针时，其有效测试范围在 1kHz 以下，适用于低频信号测试。
两面胶带	压着
适用于测试对象频率较低的场合。在粘接较好时，可测到 10~20kHz。	采用人工或机械方式将传感器压在测试对象表面。当测试面状态好，压力适中时，效果介于磁性卡座和两面胶带之间。但用力过大或者传感器与测试面接触不良时，传感系统的共振频率有低下的倾向。

冲击弹性波检测技术基本原理

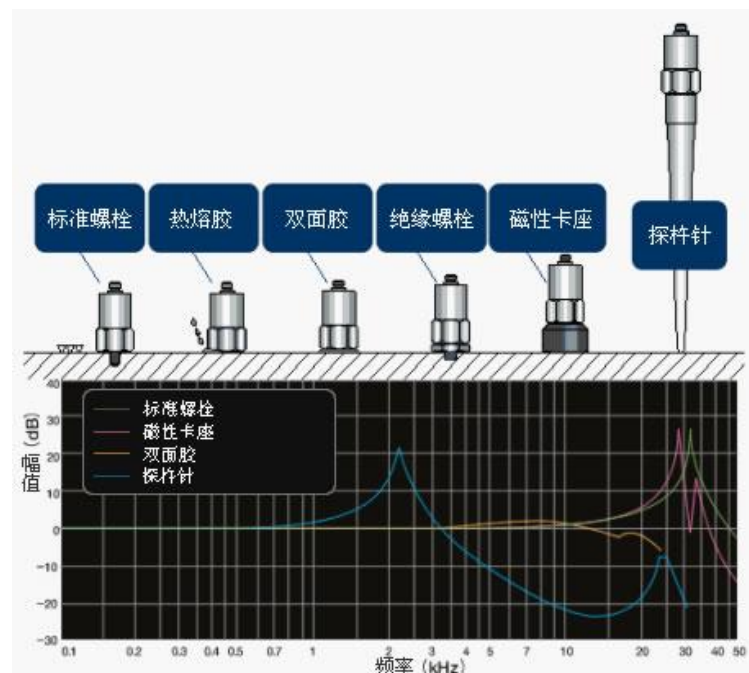


图 3-1-4 不同固定方法对频响曲线的影响

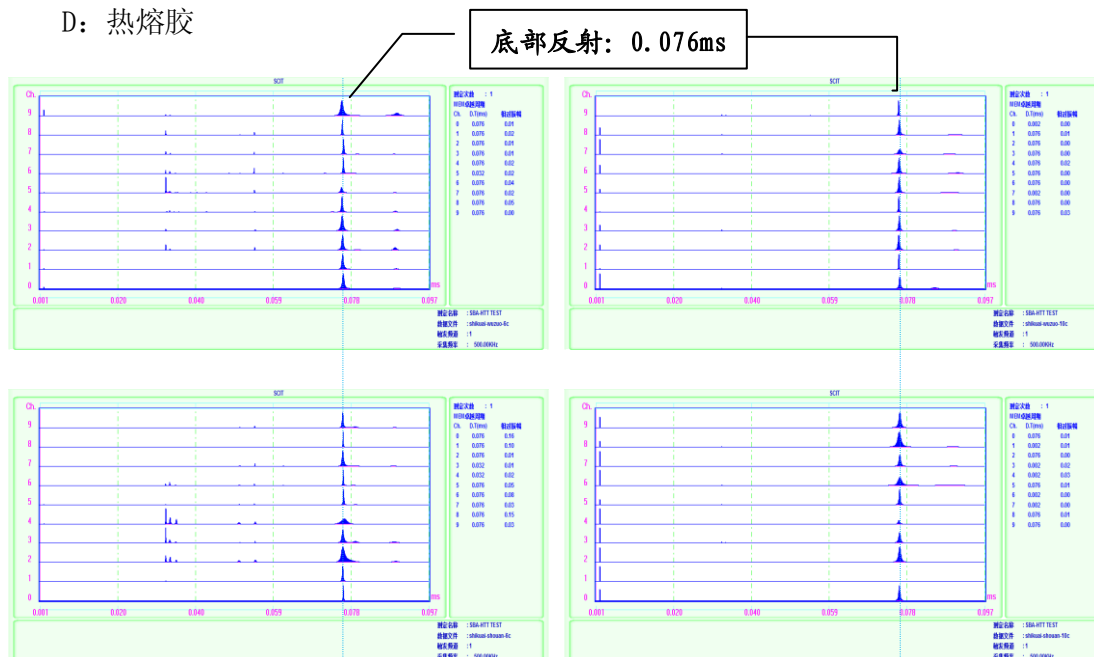
其中，压着式的测试效率最为优越。但是，不同的压着方式对测试结果也有一定的影响，为此，我们利用一标准试块，对如下几种压着式的测试结果进行了比较，由上至下分别是 A~D：

A：本公司开发的专用支座套（ST-S31SC-1）

B：手按（力度小）

C：手按（力度大）

D：热熔胶



冲击弹性波检测技术基本原理

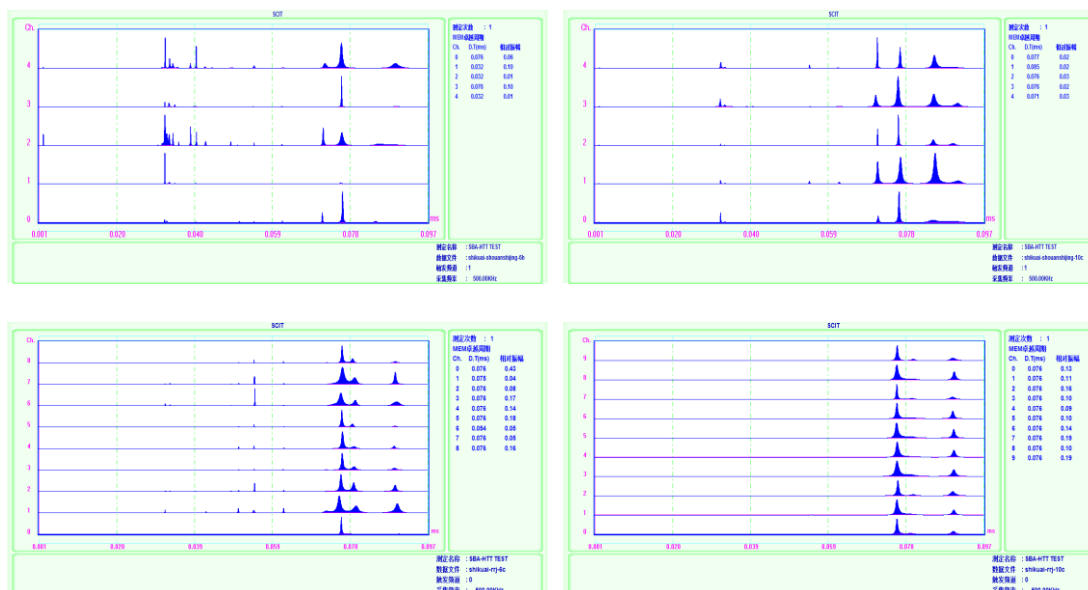


图 3-1-5 测试结果（MEM 标准模式，左：D6 锤，右：D10 锤）

测试结果表明：

- (1) 手按力度较小时对测试信号影响较小，也可得到满意的测试效果；
- (2) 手按按压力度过大时频阶杂乱，说明手按力度对测试信号的影响较大；
- (3) 热熔胶固定有附加模态，测试结果与热熔胶的厚度、温度等有关。
- (4) 专用支座套（ST-S31SC-1）能提供稳定可靠地耦合力度和阻尼，使得测试信号更为稳定；

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。

下图是本公司开发的修正软件中所采用的修正系数。

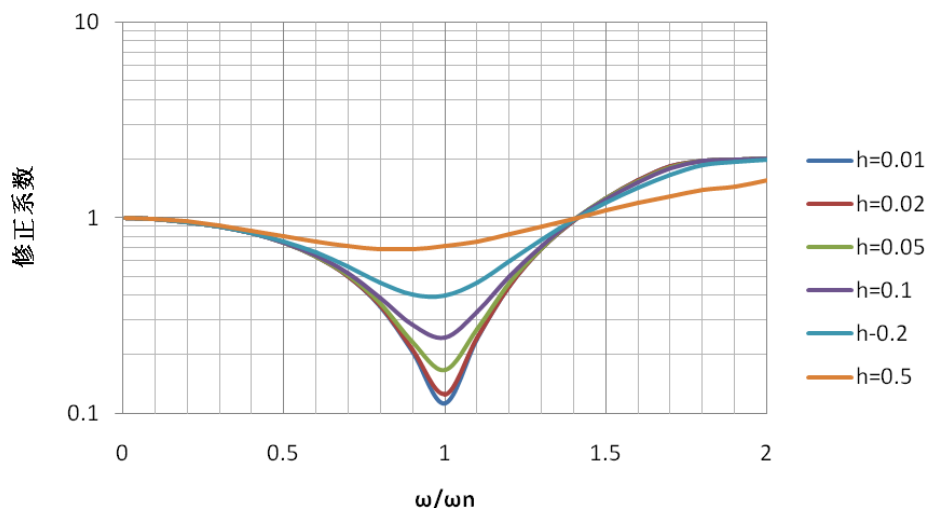


图 3-1-7 不同频率下传感器响应的修正系数

针对专用支座套(ST-S31SC-1),其阻尼比可取 0.01 左右。下图是用 D6 的锤对 40cm 厚度的板的测试信号的 MEM 分析结果。可以看出,修正的效果是很明显的。

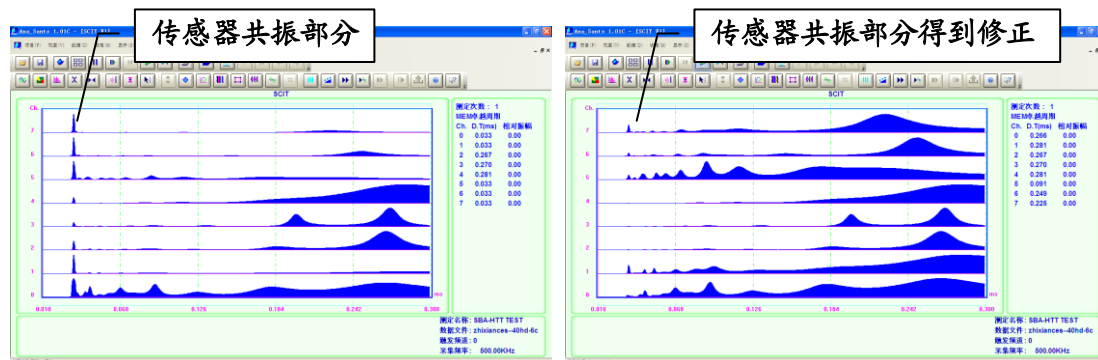


图 3-1-7 不同频率下传感器响应的修正系数

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。因此,在固定信号线时,切忌加不合理的外力。

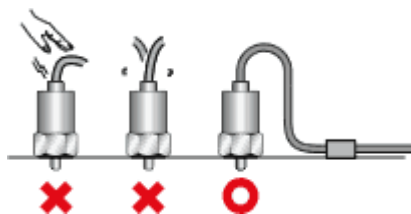


图 3-1-8 不同频率下传感器响应的修正系数

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

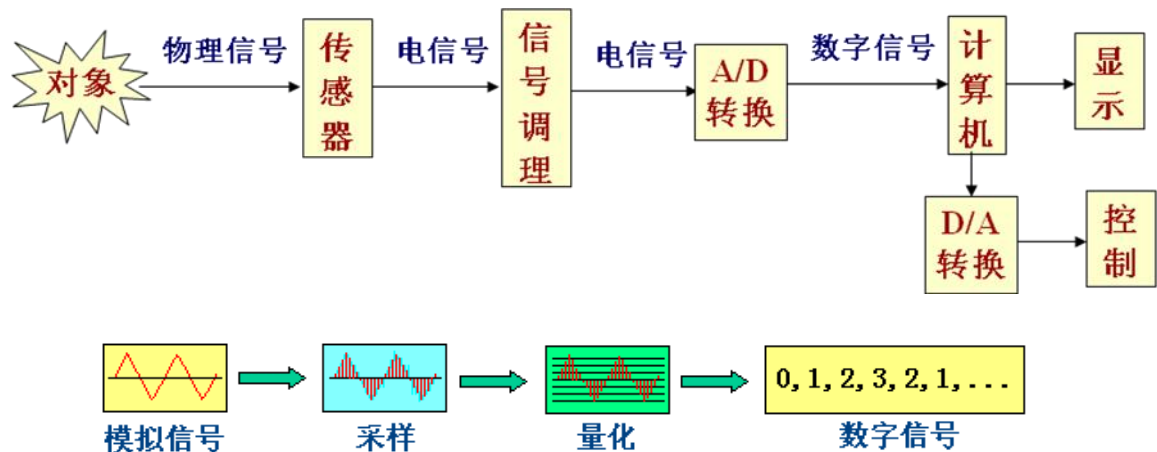


图 3-2-1 AD/DA 的概念

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”。

在下图中，实线表示的是模拟量，而折线则是量子化后的信号。

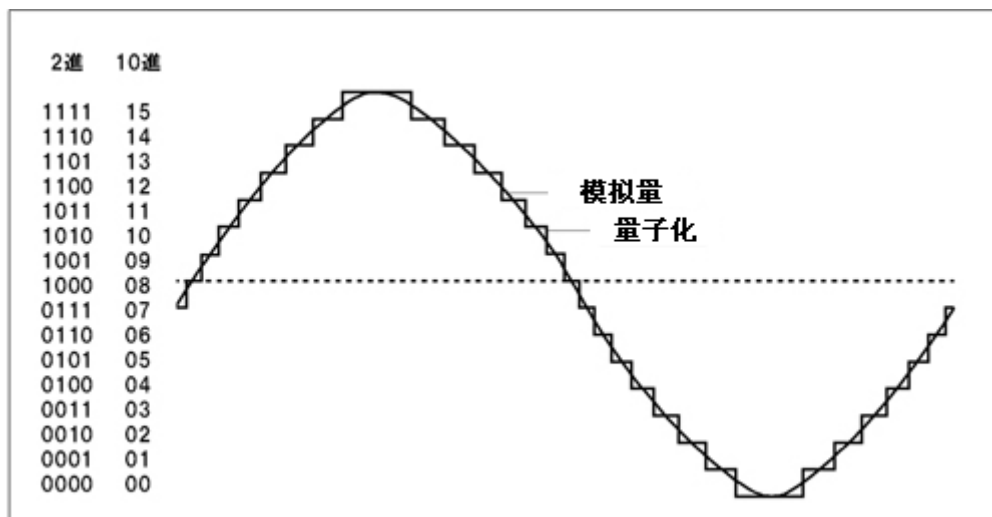


图 3-2-2 量子化的概念

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。

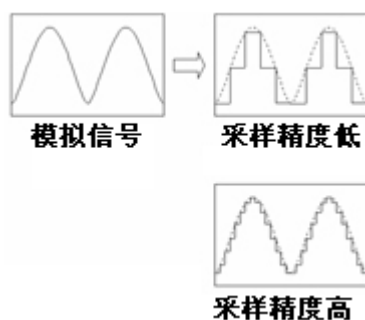


图 3-2-3 采样精度的概念

采样精度通常用 Bit（比特）数来表示。1 个 Bit 可以将采样区间分解为 $1/2$ ，N 个 Bit 则可将采样区间分解为 $1/2^N$ 。

采样精度通常可以用 LSB（Least Significant Bit）来表示。例如，用 12Bit 的 A/D 装置去采集 $\pm 10\text{V}$ 的电流信号，采集的最小分辨率为 $20/4,096 \approx 4.88\text{mV}$ (1LSB)。

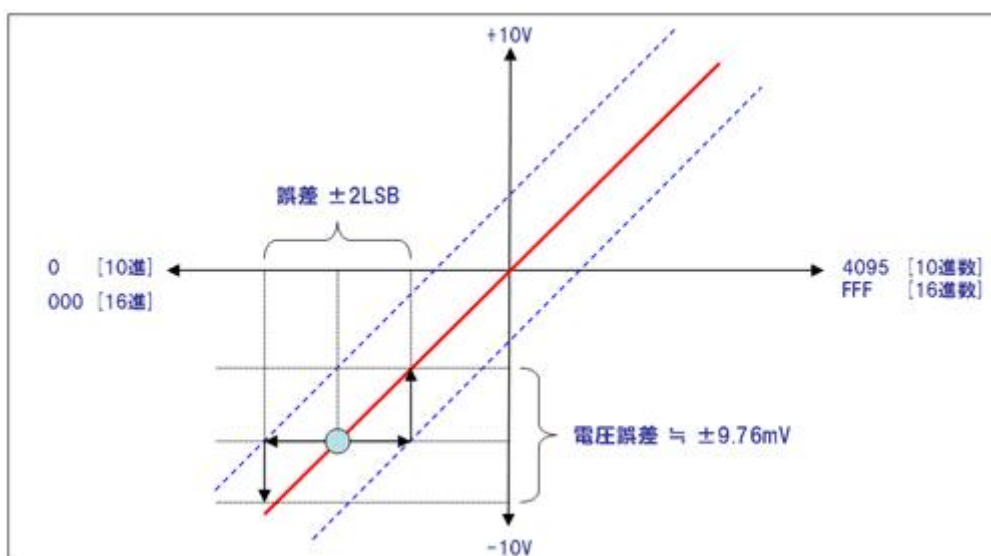


图 3-2-4 LSB 的概念

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。

例如，在测试水温（ $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ ）时，

- 1) 要求精度单位为 1°C ：采用 8Bit ($1/256$)，采样单位为 $100/2^8 = 0.39^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 要求精度单位为 0.1°C ：采用 12Bit ($1/4,096$)，采样单位为 $100/2^{12} = 0.0244^{\circ}\text{C}$ 。

3) 要求精度单位为 0.01°C : 采用 16Bit ($1/65,536$), 采样单位为 $100/2^{16}=0.0015^{\circ}\text{C}$

此外, 采样样条插值的方法, 可以有效地平滑量子误差, 从而起到提高采样精度的作用。其原理如下:

对于绝大多数对象信号, 其信号是渐变的。因此, 在采样点之间采用直线连接 (通常方式, 下图左), 则不可避免地在测试点上产生导数的不连续。而采用样条 (浮点) 插值 (下图右), 则不仅能够平滑测试曲线, 而且可以提高分辨率。

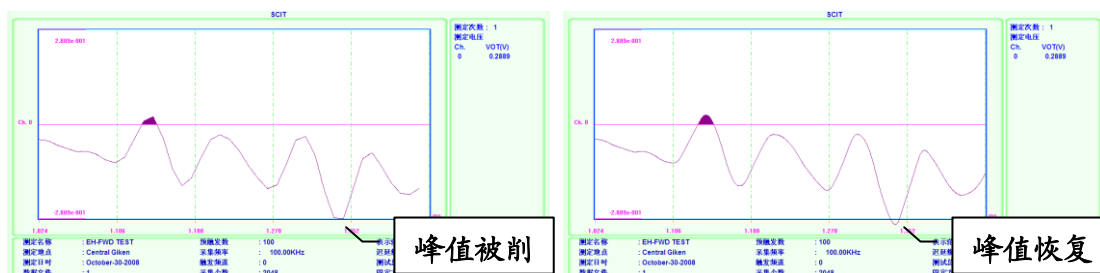


图 3-2-4A 样条 (浮点) 插值补偿的比较

关于样条插值补偿对提高分辨率的程度, 可以按下面的方法进行估算: 对一个 SIN 信号的大半个单调上升部分, 采用多项式拟合 (对应于曲线连接) 相比直线拟合 (对应于直线连接), 其精度的提高如下图所示, 平均可达 406 倍 (相当于提高了 8Bit)。

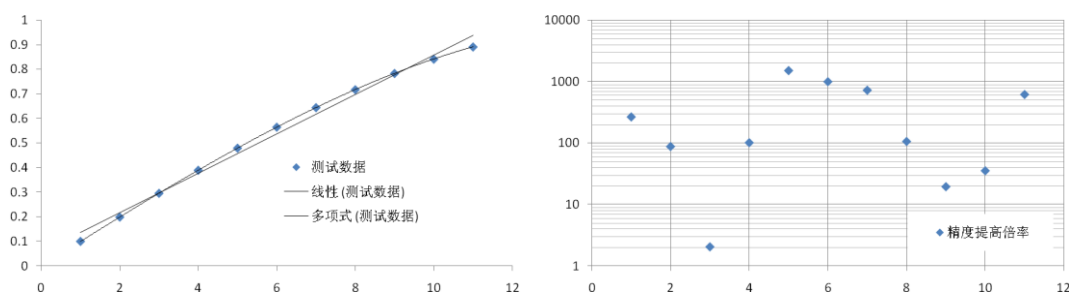


图 3-2-4B 样条 (浮点) 插值补偿的效果

需要注意的是, 样条 (浮点) 插值补偿的效果与采样精度的本身也有很大的关系。从经验上看, 采用该方法可以提高约 50% 的 Bit 数, 亦即 16Bit 可补偿至 24Bit。

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。

此外, 要注意与转换速率 (Conversion Rate) 的区别。转换速率是指完成一次从模

拟转换到数字的 AD 转换所需的时间的倒数。为了保证转换的正确完成，采样速率 (Sample Rate) 必须小于或等于转换速率。

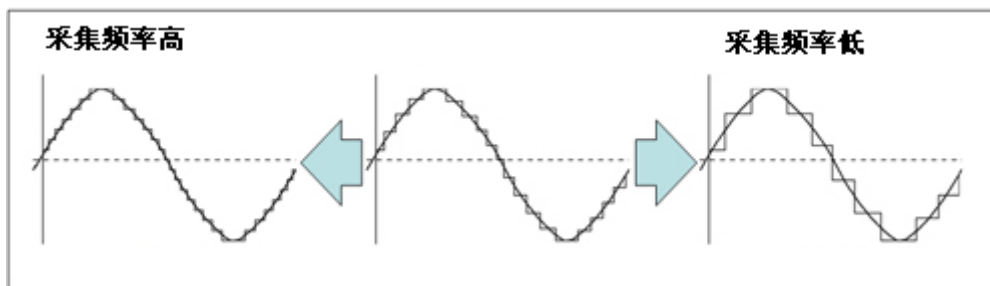


图 3-2-5 采样频率的概念

需要指出的是，采集频率至少需要为对象信号频率的 2 倍以上。通常，5 倍以上的采集频率是更为理想的。

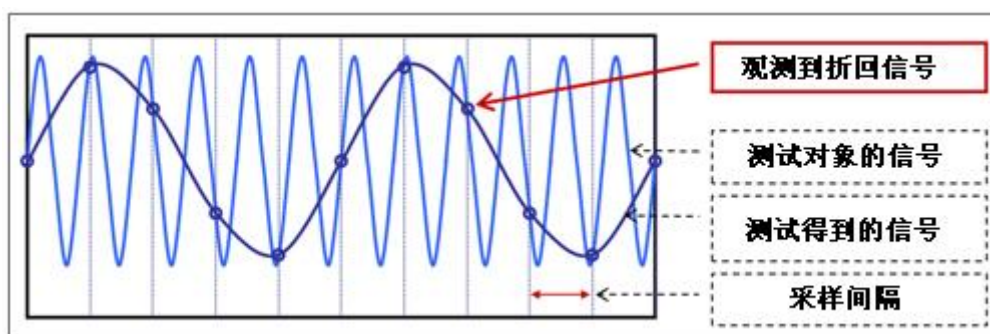


图 3-2-6 采样频率与再现信号的示意

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：

1) 软件触发

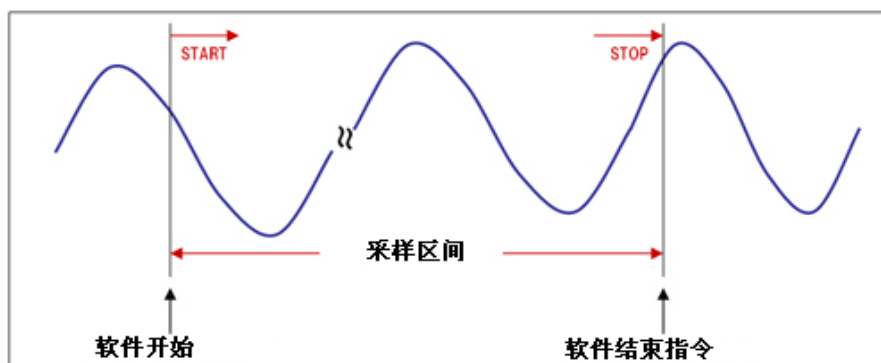


图 3-2-7 软件触发

2) 外部控制信号触发

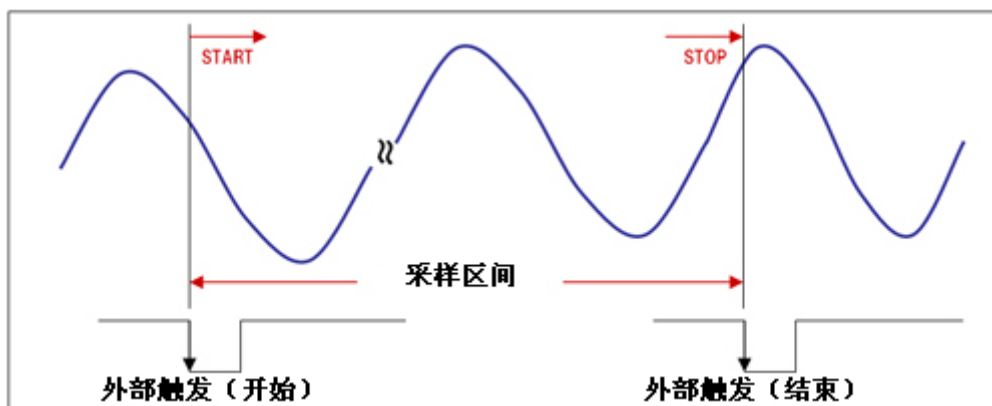


图 3-2-8 外部控制触发

3) 电平触发

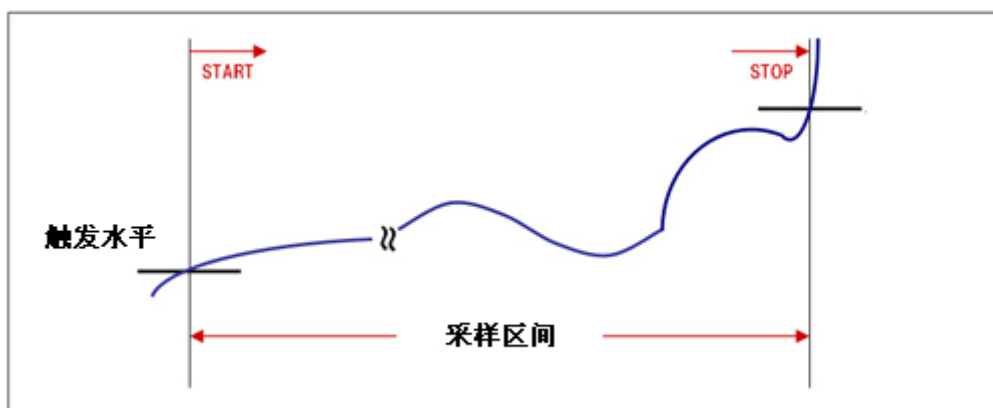


图 3-2-9 电平触发

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：

1) 外部噪声

指从空中传播到信号导线中的噪声。例如，在信号传输线的附近有马达的配线、变压器、高压线等强电设备时，电磁噪声很容易混入。

2) 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：

- 1) 对信号进行前端振幅；
- 2) 改良配线方式和输入方式；
- 3) 导入滤波装置；
- 4) 增加地线；
- 5) 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。

如下图所示，以某测试值为中心，在相邻一定时间范围 B 内的各测试值取平均，用该均值取代原测试值的方法。

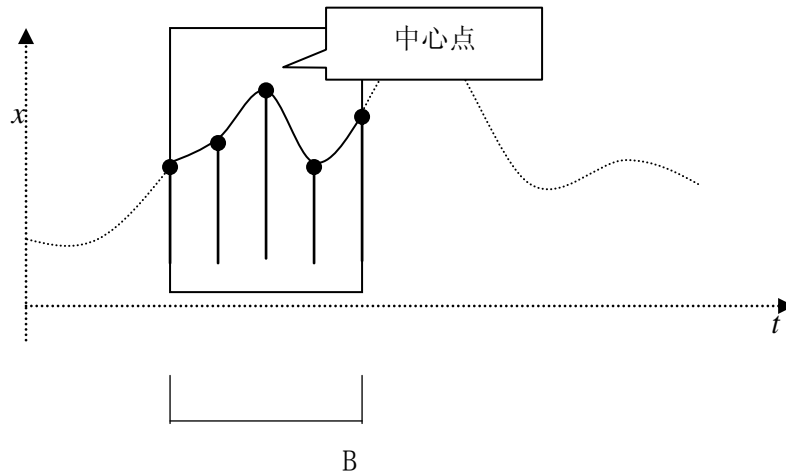


图 3-3-1 数据窗及移动平滑法的概念

该方法基本上相当于低通滤波器 (LPF, Low Pass Filter), 具有信号耦合的效果。
处理过程的数学表达为:

$$y(i) = \frac{1}{W} \sum_{j=-m}^m w(j) \cdot x(i+j)$$

其中, $y(i)$ 为第 i 个平滑后的数据;

$x(i)$ 为第 i 个测试原始数据;

$w(j)$ 为权重, 有 $j = -m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m$

W 为归一化参数, 有: $W = \sum_{j=-m}^m w(j)$

在本系统中采用的权重函数如下所示。

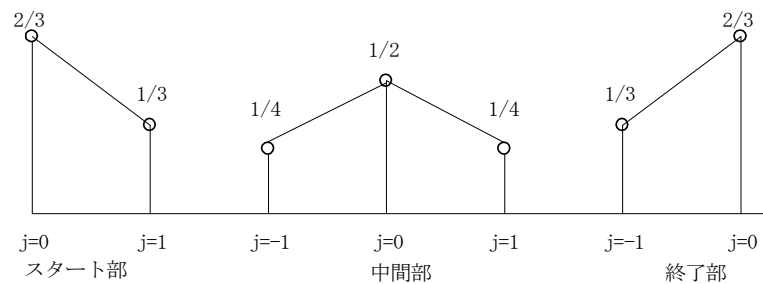


图 3-3-2 移动平滑法的权重函数

移动平滑法的去噪效果取决于以下因素:

- (1) 噪声的特性: 如果噪声是完全的白色噪声, 相互之间没有相关关系, 此时的去噪效果最好。反之, 如果噪声是完全相关信号, 此时, 移动平滑法完全失效;

(2) 移动平滑法具有信号耦合的作用,即相邻信号会互相影响,影响信号的锐度;

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。具体的做法是:

- (1) 用 FFT 对测试信号进行频谱分析,得到频率函数 $X(\omega)$;
- (2) 对于频率函数 $X(\omega)$ 进行滤波处理,即将不需要的频率对应的幅值清零;
- (3) 对处理好的频率函数 $X(\omega) \cdot W(\omega)$ 进行傅里叶逆变换,即可得到滤波后的信号。

对于带通滤波法,有以下几点需要注意:

- (1) 噪声的频率范围应已知,且与测试对象信号的频率范围不重合;
- (2) 对象信号若是非线性、非平稳信号,带通滤波的效果不理想;
- (3) 在截断频率时,容易引起“Gibbs”现象,即在滤波后的信号中出现“尖角”信号。为解决该方法,一方面可以增加采样时长,另一方面在截断频率时设置缓冲区 Df (下图);

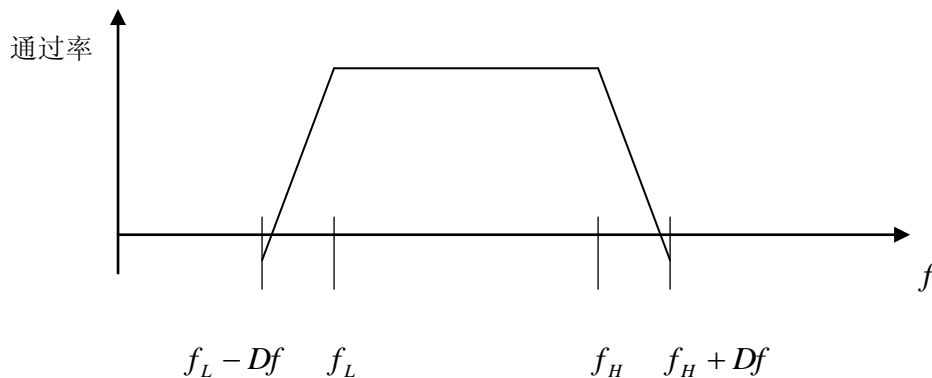


图 3-3-3 BPF 截断频率的设定

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。

EMD 方法 (Empirical Mode Decomposition, 经验模态分解法) 是由美国 NASA 的黄鹄博士 (N. E. Huang) 等人于 1998 年提出的一种适合于非线性、非平稳信号的频谱分析和滤波方法。

Huang 指出, 可将信号分解为本质模态函数 (intrinsic mode functions, IMF), 该分解流程即称为经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)。IMF 即为希尔伯特变换 (Hilbert Transform), 通过对 IMF 的处理和重组, 也可实现对信号的滤波。与其他数学转换运算 (如傅立叶变换) 不同, 希尔伯特-黄变换是一种应用在数据资料上的算法, 而非理论工具。

1) 本质模态函数 (IMF)

任何信号, 满足下列两个条件即可称作本质模态函数。

- (1) 局部极大值 (local maxima) 以及局部极小值 (local minima) 的数目之和必须与零交越点 (zero crossing) 的数目相等或是最多只能差 1, 也就是说一个极值后面必需马上接一个零交越点。
- (2) 在任何时间点, 局部最大值所定义的上包络线 (upper envelope) 与局部极小值所定义的下包络线, 取平均要接近为零。

不幸的是大部分的信号并不是 IMF, 而是由许多弦波所合成的一个组合。如此一来, 我们便无法准确的分析资料。为了解决非线性 (non-linear) 与非稳态 (non-stationary) 信号在分解成 IMF 时所遇到的困难, 便发展出 EMD (经验模态分解)。

2) 经验模态分解 (EMD)

经验模态分解是将讯号分解成 IMF 的组合, 即借着不断重复的筛选程序来逐步找出 IMF。

以信号 $s(t)$ 为例, 筛选程序的流程概述如下:

步骤 1: 找出 $s(t)$ 中的所有局部极大值以及局部极小值, 接着利用三次样条 (cubic spline), 分别将局部极大值串连成上包络线与局部极小值串连成下包络线。

步骤 2: 求出上下包络线之平均, 得到均值包络线 $m_1(t)$ 。

步骤 3: 原始信号 $s(t)$ 与均值包络线 $m_1(t)$ 相减, 得到第一个分量 $h_1(t)$ 。

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t)$$

步骤 4: 检查 $h_1(t)$ 是否符合 IMF 的条件, 即:

- (1) 过零点数和极值点数之差不大于 1;

(2) 局部极大值构成的包络线和局部极小值构成的包络线之和为 0。

如果不符合，则回到步骤 1 并且将 $h_1(t)$ 当作原始信号，进行第二次的筛选。亦即

$$h_2(t) = h_1(t) - m_2(t)$$

重复筛选 k 次，

$$h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_k(t)$$

直到 $h_k(t)$ 符合 IMF 的条件，即得到第一个 IMF 分量 $c_1(t)$ ，亦即：

$$c_1(t) = h_k(t)$$

步骤 5：从原始信号 $s(t)$ 减去 $c_1(t)$ 可得到剩余量 $r_1(t)$ ，表示如下

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t)$$

步骤 6：将 $r_1(t)$ 当作新的对象，重新执行步骤 1 至步骤 5，得到新的剩余量 $r_2(t)$ 。如此重复 n 次：

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t)$$

当第 n 个剩余量 $r_n(t)$ 已成为单调函数(monotonic function)，将无法再分解 IMF 时，整个 EMD 的分解过程完成。此时，原始信号 $s(t)$ 可以表示成 n 个 IMF 分量与一个平均趋势(mean trend)分量 $r_n(t)$ 的组合，亦即：

$$s(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + r_n(t)$$

如此，原始信号便分解成 n 个 IMF $c_k(t)$ 和一个趋势函数。

下图为某一合成信号 $X = \sin(5t) + \sin(15t)$ 的 EMD 分解的各 IMF 的成分 $c_k(t)$ 。可以看出，低阶的 IMF 对应于高频成分，而高阶的 IMF 则对应于的低频成分。

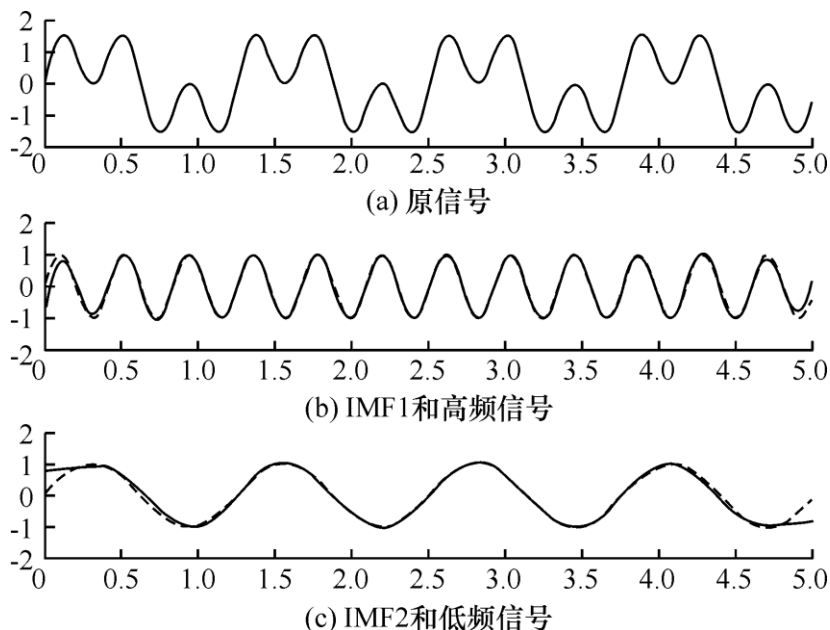


图 3-3-4 原始信号及不同的 IMF 成分

3) 基于 EMD 的降噪方法

EMD 降噪的基本原理是从分解的 IMF 分量中去除噪声引起的 IMF 分量后，将剩余的 IMF 和趋势分量重新重构信号，即达到降噪的目的。由于 EMD 分解的 IMF 分量高到低，去掉低阶 IMF 的 EMD 降噪相当于低通滤波 LPF，相反，去掉高阶 IMF 则相当于高通滤波 HPF。

噪声通常频率较高，因此去除低阶（1~ m 阶）IMF 后的重构信号 $\tilde{s}_m(t)$ 可以表示为：

$$\tilde{s}_m(t) = \sum_{k=m}^n c_k(t) + r_n(t)$$

其中， m 可由经验确定，也可以按照噪声与真实信号分界处的能量最小的原则，即

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [c_m(t_i)]^2$$

$$E_{\min} = \min[E_m], \quad 1 \leq m \leq n-1$$

来确定。其中， N 为信号数据的数目， m 是重构的起始 IMF，从该本征模态函数开始，以后的都为信号的主要成分。此外，EMD 降噪还具有如下特点：

- (1) 数学简单，但缺乏严谨的物理意义；
- (2) 可分析频率随时间变化的信号以及信号的趋势；
- (3) 在信号的端点附近容易产生奇异，需要专门处理。

3.3.6 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。

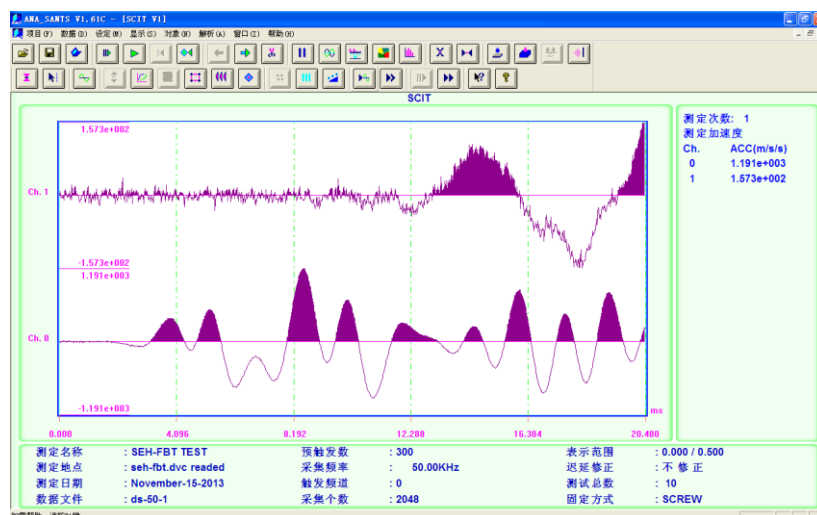


图 3-3-5 原始信号

1) 平滑滤波

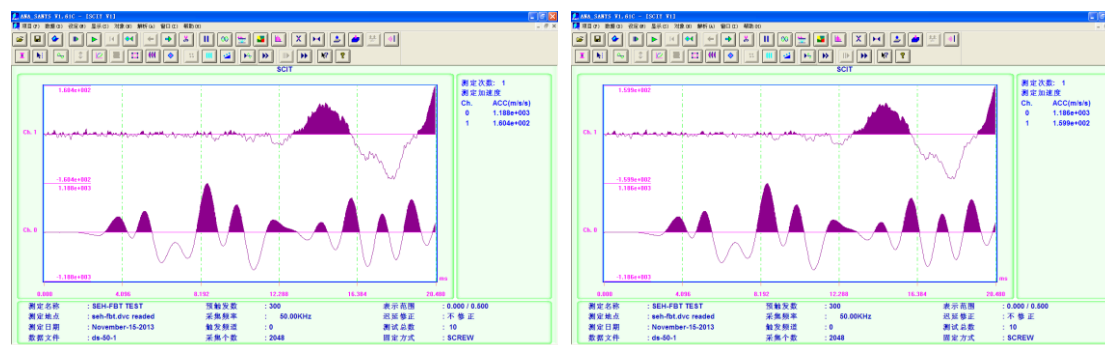


图 3-3-6 平滑滤波处理结果（左：平滑 3 次，右：平滑 5 次）

可以看出，平滑滤波的效果还是比较明显的。

需要注意的是，随着平滑次数的增加，有效信号的起点位置会逐步模糊。

2) 带通滤波

冲击弹性波检测技术基本原理

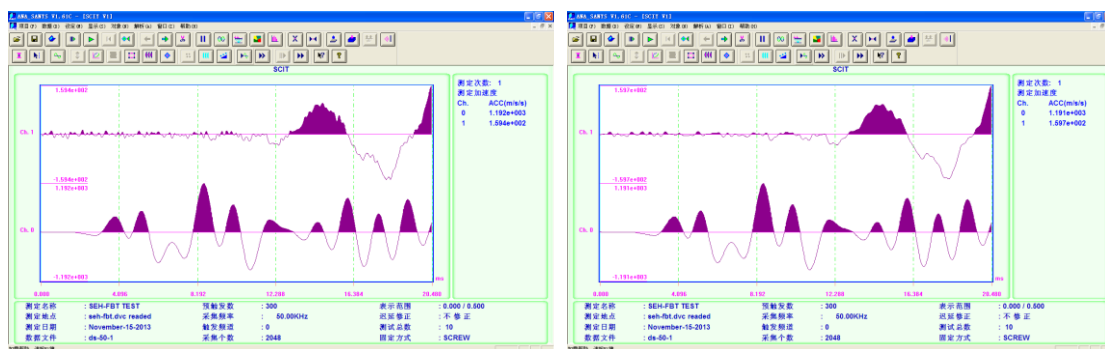


图 3-3-7 BPF 滤波处理结果（左：0~5KHz，右：0~3KHz，DF：0.1KHz）

可以看出，当参数选取适当时，BPF 滤波的效果是十分显著的。

需要注意的是，若参数选择不当，BPF 的效果会大打折扣或者对波形严重扭曲。

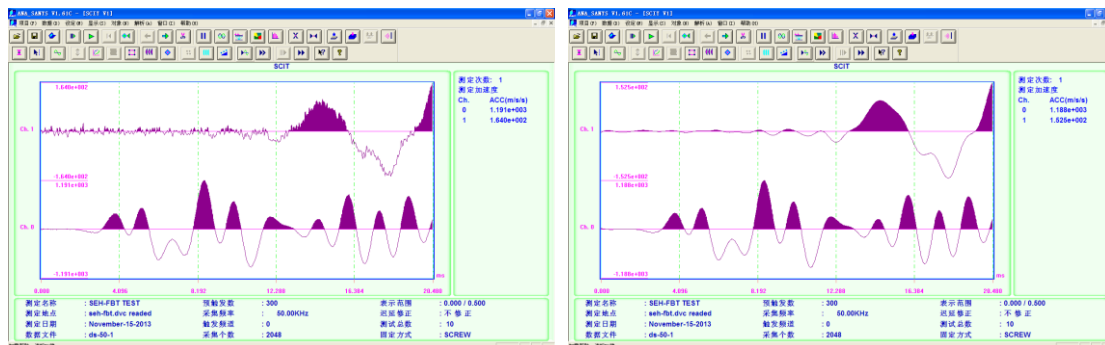


图 3-3-8 BPF 滤波处理结果（左：0~10KHz，右：0~1KHz，DF：0.1KHz）

3) EMD 降噪

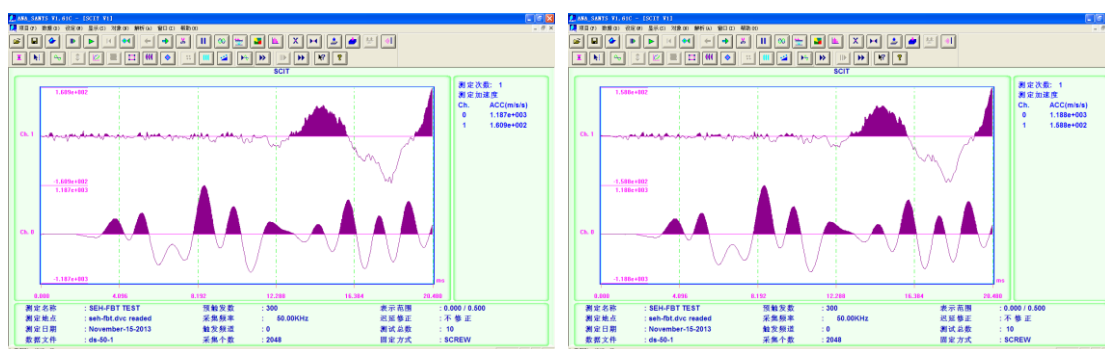


图 3-3-9 EMD 降噪处理结果（左：IMF=3，右：IMF=6）

可以看出，EMD 对于消除高频噪声是非常有效的，而且对原波形的畸变小，这一点较 BPF、移动平滑等有明显的优势。

需要注意的是，EMD 计算所需时间要比 BPF、移动平滑更多。此外，当 IMF 阶数较高时，有可能产生收敛性差的问题。

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, 最广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。

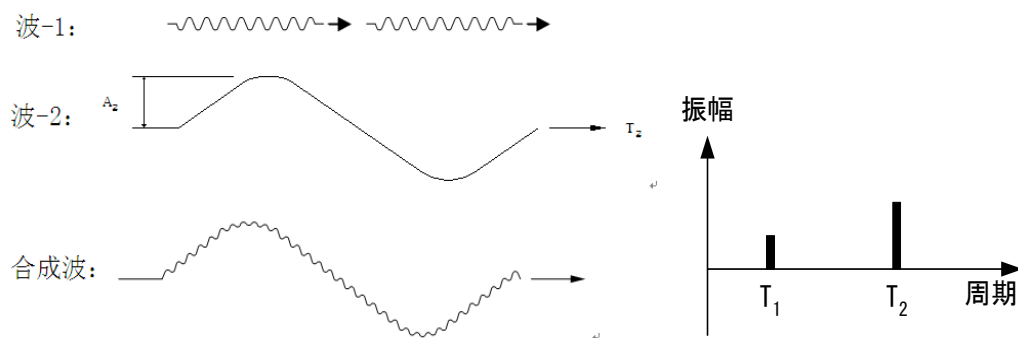


图 3-3-1 信号合成及 FFT 频谱

如果信号 (测试的波动信号) 的时间轴的时间间隔为 Δt , 数据个数为 N , 持续时间为 T 时,

$$T = N \cdot \Delta t$$

同时, 各标本点的值 x_m , m 表示各标本点的序号。则第 m 点的信号可以表示为:

$$x_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi km}{N} + B_k \sin \frac{2\pi km}{N} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(N/2)m}{N}$$

傅立叶变换的作用, 既是求出上式中的各个系数 (A_k 与 B_k , 称为有限傅立叶系数)。

上式右边的第 1 项 $\frac{A_0}{2}$, 为全部标本值的平均, 即为信号的直流成分。如果定义 f_k :

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t}$$

可得

$$\tilde{x}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} [A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t$$

f_k 表示 k 次频率, 当然, k 越大, 频率越高。最大频率 $f_{N/2}$ 即是采样频率的 $1/2$:

$$f_{N/2} = \frac{1}{2\Delta t}$$

因此, 用傅立叶变换能分解的最高的频率分量为采样频率的一半。在测试的信号中, 如果采样频率一半以上的频率, 就不能分辨。整理上述各式, 可得

$$\tilde{x}(t) = \frac{X_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) + \frac{X_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t$$

其中

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (\text{振幅})$$

$$\phi_k = \arctan(-B_k/A_k) \quad (-\pi < \phi_k < \pi, \text{ 相位角})$$

因此, 通过图形描画 $f_k \sim X_k$, $f_k \sim \phi_k$, 即成为傅立叶振幅谱和相位谱。

由于傅立叶变换的时间很长, 在实用中, 更多是采用高速傅立叶变化 (FFT)。FFT 中要求对象数据的个数为 2 的乘方数 (如 512、1024、2048 等)。在本技术体系中, 已进行了相应的省缺设置。并对非 2 乘进行数据分析时, 自动的在数据队列的末尾加上 0 变为 2 的乘方数。

值得说明的是, 对于 FFT, 其频谱分辨率, 即 $\Delta f = f_{k+1} - f_k = \frac{1}{N\Delta t}$, 由采样间隔和采样数所决定。当然, 采样间隔越小, 分辨率越高。但采样个数越多, 其分辨率反而降低, 这是 FFT 的一大缺点。

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 J. P. Burg 提出, 从此在各种领域取得了划时代的成果。

所谓熵 (Entropy), 是在热力学与统计物理学应用的概念, 表示无序的程度。一般来说, 信号谱具有自相关关系。MEM 分析的含义就是, 在不增加熵的条件下推定信号的自相关系数, 从而推算其频谱的方法。

测试信号 $x(N)$ 的功率谱的实际计算公式为:

$$S_{pre}(f) = \frac{P_n}{|A(e^{j2\pi f k \Delta t})|^2} = \frac{P_{\min}^{(M)} \Delta t}{\left| 1 + \sum_{k=1}^M a_k^{(M)} e^{-j2\pi f k \Delta t} \right|^2}$$

其中, f 为频率, 应不大于奈奎斯特频率 (满足采样定理的最小采样频率, 通常为离散信号系统采样频率的一半)。

$P_{\min}^{(M)}$ 为最小预测误差功率;

$a_k^{(M)}$ 为 M 阶的自回归系数或线性预测系数;

理论上, 根据信号的自相关函数 R_x , 有:

$$\begin{bmatrix} R_x(0) & R_x(1) & R_x(2) & \cdots & R_x(M) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(1) & \cdots & R_x(M-1) \\ R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & \cdots & R_x(M-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_x(M) & R_x(M-1) & R_x(M-2) & \cdots & R_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1^{(M)} \\ a_2^{(M)} \\ \vdots \\ a_M^{(M)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\min}^{(M)} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

与 FFT 分析法相比, MEM 具有以下几方面的特征。

- (1) 频谱分辨率非常高;
- (2) 适用于非 sin/cos 类信号;
- (3) 最大熵谱估计的分辨率与序列长度 N^2 成反比, 序列长度越长, 分辨率越高。相比之下, 传统谱 (FFT) 估计的分辨率与观察时间 (序列长度 N) 成反比;
- (4) 解决了旁瓣泄漏问题。

但是, MEM 分析法也有不少缺点, 如果使用不当, 会得出错误的结果。因此, 使用 MEM 法分析数据时, 需要注意以下几点:

- (1) 自回归模型的次数 M 不易确定, 对分析结果有较大影响。一般来说, 次数越高, 分辨率越好但出现伪频谱的危险性也越大;
- (2) MEM 是非线性分析方法。也就是说, 两套数据迭加起来进行 MEM 分析的结果, 与分别进行 MEM 分析后的结果叠加不一样的。此外, 对测试数据进行 BPF/HPF/LPF (带宽滤波、高通滤波、低通滤波) 后, 产生伪频谱的危险性会大大增加;
- (3) MEM 分析中, 对频谱的位置的分辨率很高, 但对其振幅 (高度) 的分辨精度则无法保证。特别是当测试点数较少时, 这种误差更加明显;

冲击弹性波检测技术基本原理

- (4) 对信噪比非常敏感。在低信噪比情况下，分辨率较差。因此，进行必要的预处理是有意义的。而这又提高了产生伪频的危险。

3.4.3 FFT 与 MEM 的对比

1) 对脉冲信号的分辨

从上述的 FFT 分析中，可以看出 FFT 是将信号分解成一系列 \sin/\cos 波的组合。当对象信号接近 \sin/\cos 波时，FFT 的分解能力和精度都较理想。但对于下图 A 这样的单纯脉冲信号，尽管其为单一周期，但 FFT 分解后的结果 (B) 则产生了很大的畸变 (即产生较大的“旁瓣泄漏”或“频谱能量泄漏”)。

表 3-3-1 单纯脉冲信号的特性

脉冲波特性			全体信号特性		
固有周期	振幅	持续时间	往复周期	频谱	往复次数
4	1	4	12.8	0.076	16

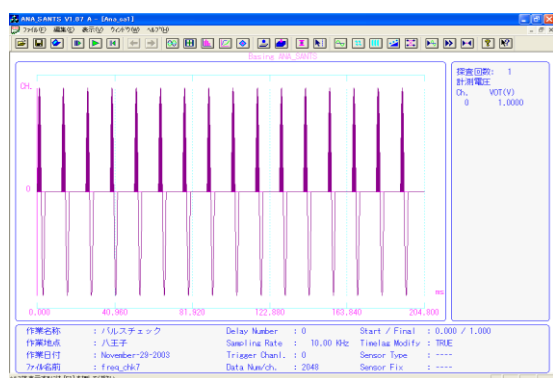


图 3-3-3A 脉冲信号

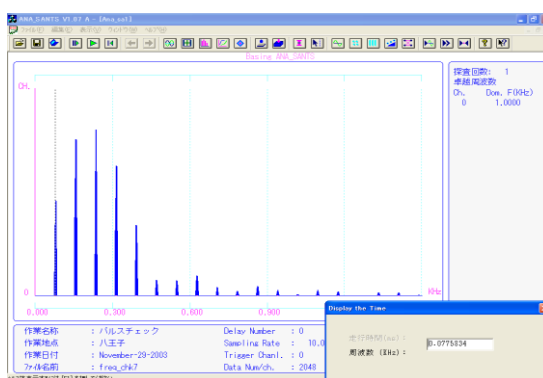


图 3-3-3B FFT 频谱

下图即为对上述单纯脉冲信号的 MEM 分析结果，可以看出其比 FFT 有了很大的提高。但仍然在半周期的位置上出现了伪频谱，即也存在倍频关系。

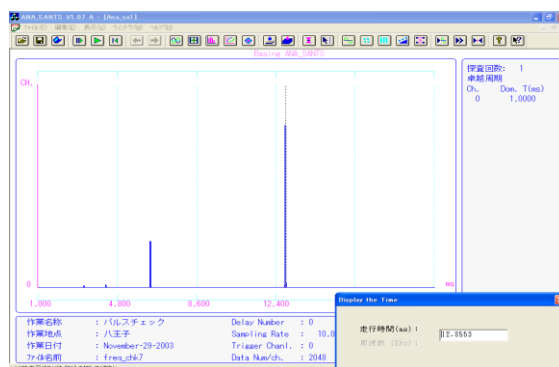


图 3-3-4 MEM 频谱

2) 对衰减、微小信号的分辨

对一个由 3 种频率、不同振幅并衰减的信号进行了对比分析。

(1) 对象信号 (test-1.dat)

对象信号由以下成分组成

$$y(t) = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^{256} A_m \sin(2\pi f_m t_i + \phi_m) e^{-\zeta_m t_i}$$

各参数如下：

表 3-3-2 衰减信号的特性

M	A_m	f_m	T_m	ϕ_m	ζ_m
1	1	0.1	10	0.1	0.002
2	5	0.04	25	0.4	0.002
3	0.1	0.11	9.1	0.6	0.002

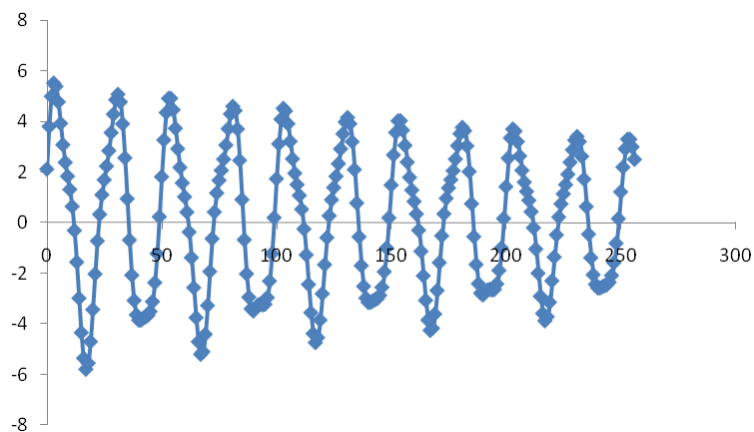


图 3-4-5 对象信号

(2) FFT 分析

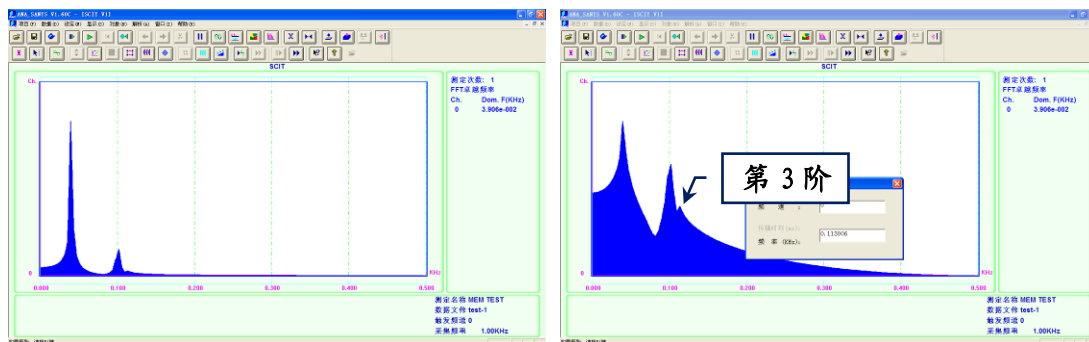


图 3-4-6 FFT (左: 标准分辨模式、右: 增强分辨模式)

表 3-4-3 FFT 分析结果:

M		1	2	3	备考
原信号 f_m/A_m		0.1/1	0.04/5	0.11/0.1	第 3 阶分辨 极其微弱
FFT	标准模式	0.101	0.039	无法分辨	
	增强模式	0.101	0.039	0.113	

(3) MEM 分析

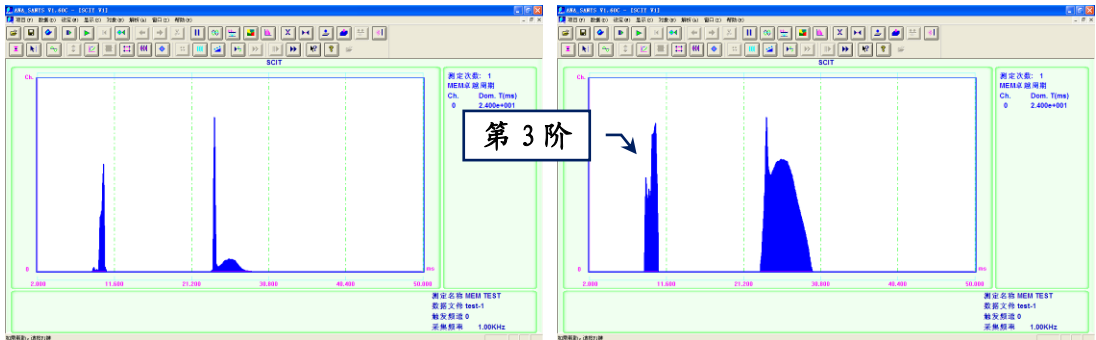


图 3-4-7 MEM 自动最优化 (左: 标准分辨模式、右: 增强分辨模式)

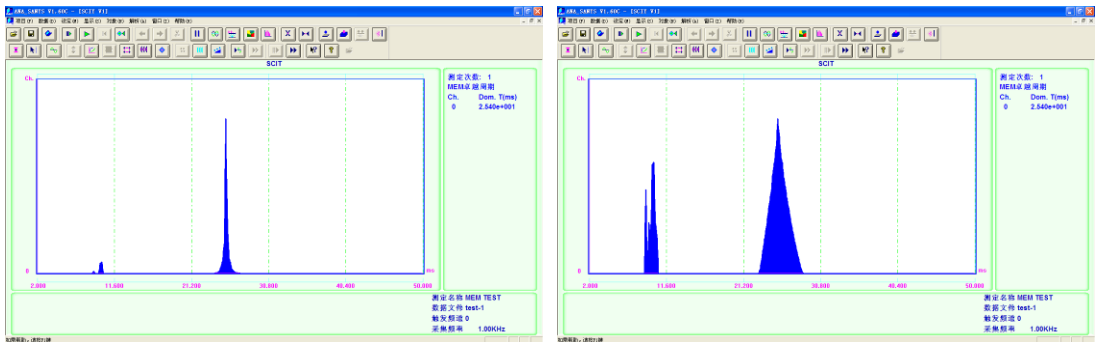


图 3-4-8 MEM 增加稳定性 (左: 标准分辨模式、右: 增强分辨模式)

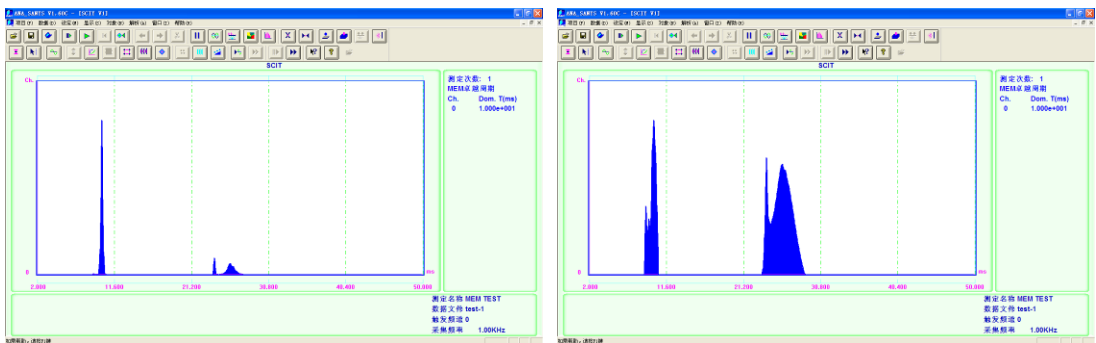


图 3-4-9 MEM 增加分辨力 (左: 标准分辨模式、右: 增强分辨模式)

MEM 分析结果如下:

M		1	2	3	备考
原信号 T_m / A_m		10/1	25/5	9.1/0.1	
MEM 标准模式	自动最优化	10.2	24.0	9.03*	3 阶微弱
	增加稳定性	9.97	25.4	9.03*	
	增加分辨力	10.0	24.0	9.03*	
MEM 增强模式	自动最优化	10.2	24.0	9.02	有伪峰
	增加稳定性	10.0	25.4	8.98*	
	增加分辨力	9.97	24.0	8.98	有伪峰

3.4.4 相关分析

1) 相关系数

相关关系是一种非确定性的关系，相关系数是研究变量之间线性相关程度的量。由于研究对象的不同，相关系数有如下几种定义方式。

- (1) 简单相关系数：又叫相关系数或线性相关系数，一般用字母 R 表示，用来度量两个变量间的线性关系。若考虑 N 对数据 (x_i, y_i) ，其相关系数 R_{xy} 为：

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}$$

可知 $-1 \leq R_{xy} \leq 1$ ，也即当数据点分布愈接近于一条直线， R_{xy} 的绝对值愈趋近于 1，则 X 和 Y 的线性相关程度越好，而 R_{xy} 的正负号则代表了两变量间数值变化的方向性，当 $R_{xy} \rightarrow 0$ ，则可认为 X 和 Y 之间完全无关，但仍可能存在某种非线性的相关关系，甚至是函数关系。

- (2) 复相关系数：又叫多重相关系数。复相关是指因变量与多个自变量之间的相关关系。例如，某种商品的季节性需求量与其价格水平、职工收入水平等现象之间呈现复相关关系。

2) 自相关函数

在动态测试中要了解与时间有关的信号在不同时刻的取值有无内在关联性，就需要引入相关函数的概念，信号的相关性就是反映信号波形相互联系紧密性的一种函数。

信号在一个时刻的瞬时值与另一时刻的瞬时值之间的依赖关系可用自相关函数来描述。假设 $X(t)$ 是某一各态历经平稳随机过程的一个样本记录，估计 $X(t)$ 在 t_1 时刻和 $t_1 + \tau$ 时刻上的自相关性时，可用自相关系数 $R_x(\tau)$ 来表示可以在观察时间 T 上对这两个

值的乘积作平均运算，然后取其极限可得 $X(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 为：

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)X(t+\tau)dt$$

为了从数量上明显地表示信号 $X(t)$ 在 t_l 时刻与 $t_l + \tau$ 时刻数值之间的相关程度，避免信号本身幅值对其相关程度量度的影响，通常将自相关函数作归一化处理，引入无量纲的系数表示相关程度，得自相关系数 $\rho_x(\tau)$ 为：

$$\rho_x(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - \mu_x][X(t+\tau) - \mu_x]dt}{\sigma_x^2} = \frac{R_x(\tau) - \mu_x^2}{\sigma_x^2}$$

式中， μ_x 为 $X(t)$ 的均值； σ_x^2 为 $X(t)$ 的方差。

由上式可知 $\rho_x(\tau)$ 与 $R_x(\tau)$ 均随 τ 而变化，且两者成线性关系，故可用 $\rho_x(\tau)$ 来反映信号的自相关性。

当 $\tau=0$ 时， $R_x(\tau)$ 取得最大值，此时 $\rho_x(\tau)=1$ ，即同一时刻的值是完全相关的。当 $\tau \rightarrow \infty$ 时， $R_x(\tau) \rightarrow \mu_x^2$ ， $\rho_x(\tau) \rightarrow 0$ ，即 $X(t)$ 与 $X(t+\tau)$ 完全无关。

3) 互相关函数

当然，当有两个随机信号时，他们之间的相关性可用互相关函数来描述。有 $X(t)$ 和 $Y(t)$ ，对于 $X(t)$ 在 t_l 时刻的值与 $Y(t)$ 在 $t_l + \tau$ 时刻的值之间的相关性，可在观察时间上对这两个值的乘积作平均运算，并取其极限，得互相关函数：

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t+\tau) dt$$

互相关函数 $R_{XY}(\tau)$ 也可做类似的归一化处理得到互相关系数 $\rho_{XY}(\tau)$ 。

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。如有 N 个测试值，则有

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3-4-1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \cdot m_x^2}{N-1}} \quad (3-4-2)$$

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：

- 1) 将各测点的值（振幅、波速、卓越频率等）由大到小排序，即

$$x_1 \geq x_2 \geq \cdots \geq x_n \geq x_{n+1} \geq \cdots$$

排在后面的（小值）可能为异常数据。

- 2) 假设 x_n 为异常数据，取其前面的数列 x_1, x_2, \cdots, x_n 进行统计 (3-4-1)、(3-4-2)，

得到该数列的平均值 (m_{xn}) 与标准差 (s_{xn})；

- 3) 计算异常数据判断值 X_n

$$X_n = m_{xn} - \lambda_1 \cdot s_{xn} \quad (3-4-3)$$

其中， λ_1 见表 3-4-1。

- 4) 比较 X_n 与 x_n 。若 $x_n \leq X_n$ ，表示 x_n, x_{n+1}, \cdots 等均为异常值，且 x_{n-1}, x_{n-2}, \cdots 等也有可能为异常值。因此，假设 x_{n-1} 为异常值，重复 2)~3) 的过程，直至 $x_k > X_k$ ；

- 5) $x_n > X_n$ ，表明 x_n 为正常值，则假设 x_{n+1} 为异常值，重复 2)~3) 的过程，直至 $x_k < X_k$ ；

在实际判断过程中，如大值为异常，则 (3-4-3) 改为加号，其余部分相似。

- 6) 当测区中出现异常点后，可根据异常点的分布情况，可按下式进一步判别其相邻测点是否异常；

$$\text{网格状测点时：} X_{n2} = m_{xn} - \lambda_2 \cdot s_{xn} \quad (3-4-4)$$

$$\text{单排状测点时: } X_{n3} = m_{xn} - \lambda_3 \cdot s_{xn} \quad (3-4-5)$$

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。

表 3-4-1 统计测点个数 n 与 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的关系

n	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
λ_1	1.65	1.83	1.96	2.05	2.13	2.19	2.24	2.29	2.32	2.40
λ_2	1.25	1.34	1.41	1.46	1.50	1.54	1.58	1.61	1.64	1.68
λ_3	1.05	1.14	1.20	1.27	1.31	1.36	1.39	1.43	1.46	1.51

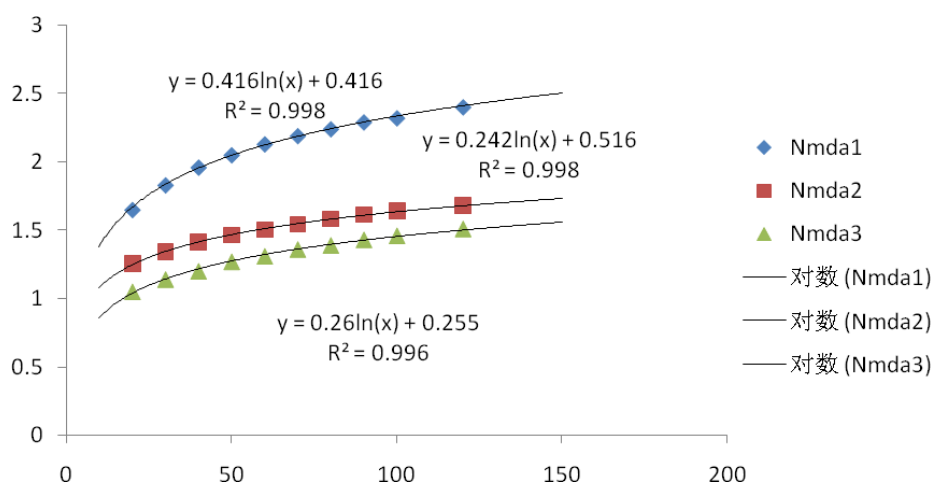


图 3-4-1 统计测点个数 n 与 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的关系

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（计算机层析扫描）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 冲击回波法的发展历程

早在上世纪 60 年代，美国国家标准和技术研究所（The National Institute of Standards and Technology，NIST，也被称为美国国家标准局，National Bureau of Standards，NBS）就针对结构的无损检测技术（NDT）进行了研究，并在传统的工业无损检测技术（如 X 射线、超声波、磁粉等）的基础上提出了相应的标准。

在 70 年代末期发生的两起严重的结构垮塌事件显示，现场混凝土的状况起到了重要的作用。但是，在 NBS（Carino et al., 1983; Lew, 1980）的调查过程中发现，既存的检测手段存在严重的缺陷。为此，NBS 开始了一个长期的，针对现场混凝土检测、评价的项目。

自 1983 年起，NBS 将研究重点放在了混凝土结构中的缺陷检测。当初，超声波脉冲回波法（*ultrasonic pulse-echo*，UP-E）被寄予厚望。但是，由于混凝土均有不均匀性，骨料与胶结物的界面、气泡、钢筋的存在都使得反射变得非常复杂，UP-E 法在应用到混凝土内部缺陷检测时却遇到了无法逾越的障碍（Carino and Sansalone, 1984）。

通过对各类技术手段的对比，基于应力波（后来被称作弹性波）的检测技术由于波长较长，且能够反映力学特性而被作为了技术基础（Carino and Sansalone 1984），其研究成果则由于“冲击回波法” *impact-echo method*（Sansalone and Carino, 1986）而广为人知。

后来，研究中心转移到了康奈尔大学（Cornell University）。在 Mary Sansalone 教授的指导下，IE 法取得了长足的进步。1997 年，Sansalone 和 Streett 发表的著作中全面阐述了 IE 法的理论、室内和现场试验结果。在此基础上，90 年代末期，NIST 和康奈尔大学共同发布了 IE 法的标准草案，并于 1998 年成为 ASTM 标准 [ASTM C 1383]。

此后，IE 法不仅在缺陷检测，还在混凝土早期强度测试、厚度测试等方面发挥了重要的作用。

4.1.2 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

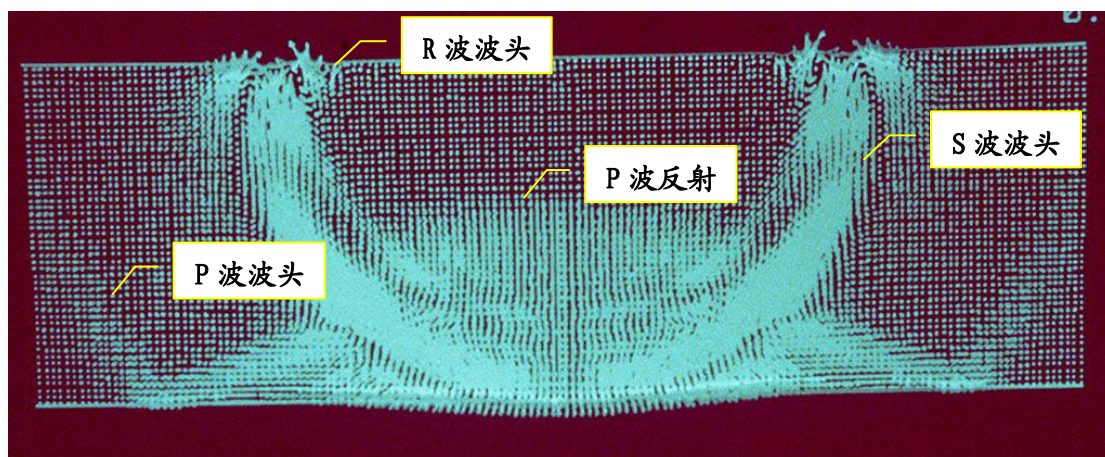


图 4-1-1 冲击弹性波的传播（FEM 模拟）

关于各成分波的传播波速，请参考 2.3.1。

2) 冲击弹性波的反射

关于冲击弹性波的反射理论，请参考 2.4。

4.1.3 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。

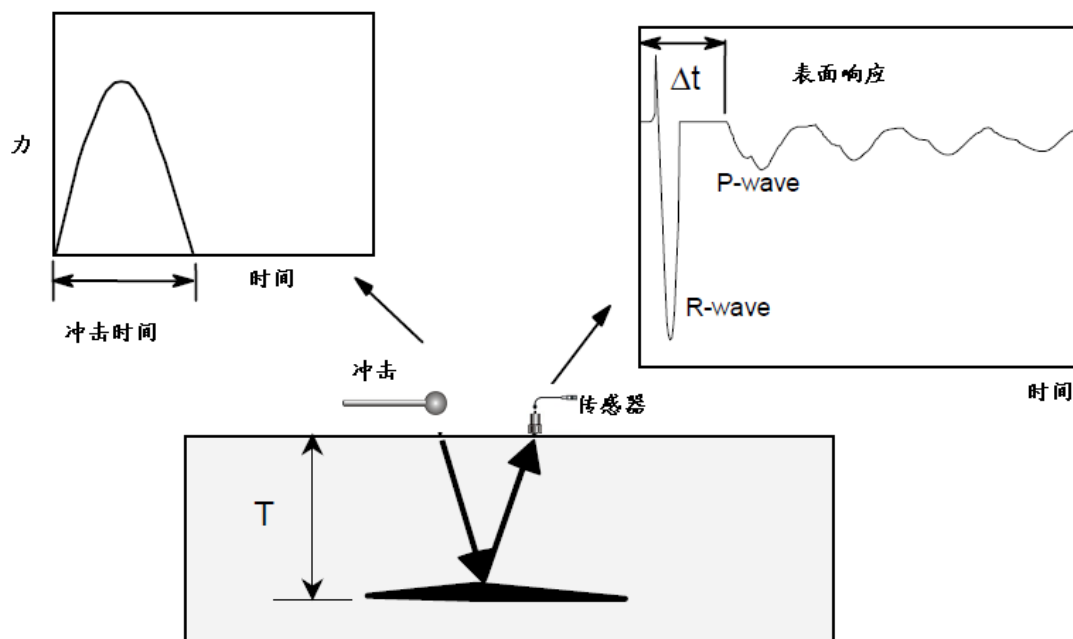


图 4-1-2 IE 法的基本概念

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）。

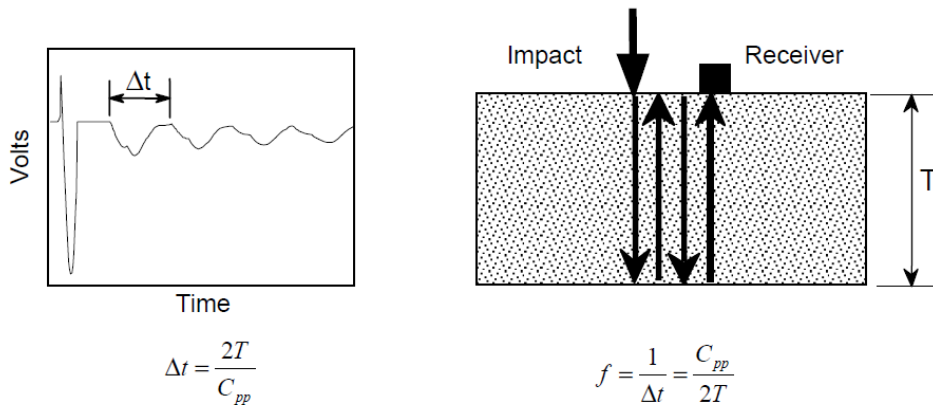


图 4-1-3 IE 法中回波传播时间的计算方法

因此，可按照上图的方法进行回波时间的计算。其中， C_{pp} 为结构中沿厚度方向传播的 P 波的波速。根据 Lin 和 Sansalone（1997）的研究成果， $C_{pp} = 0.96 V_{p3}$ 。

4.1.4 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：

- 1) 缺陷的类型和方向

最容易检测的是平行于激振面的空洞和连续性缺陷（如脱空）。至于蜂窝等不连续缺陷，尽管也可以检测，但检测精度有所降低。

2) 缺陷的深度

根据 Sansalone and Streett (1997) 的研究成果，缺陷的尺寸 d 和深度 T 有：

- (1) 当 $d/T < 0.3$ 时，难以检出缺陷的存在；
- (2) 当 $0.3 < d/T < 1.5$ 时，可以检出缺陷及底板；
- (3) 当 $1.5 < d/T$ 时，可以检出缺陷，但无法检出底板（相当于缺陷无限大）；

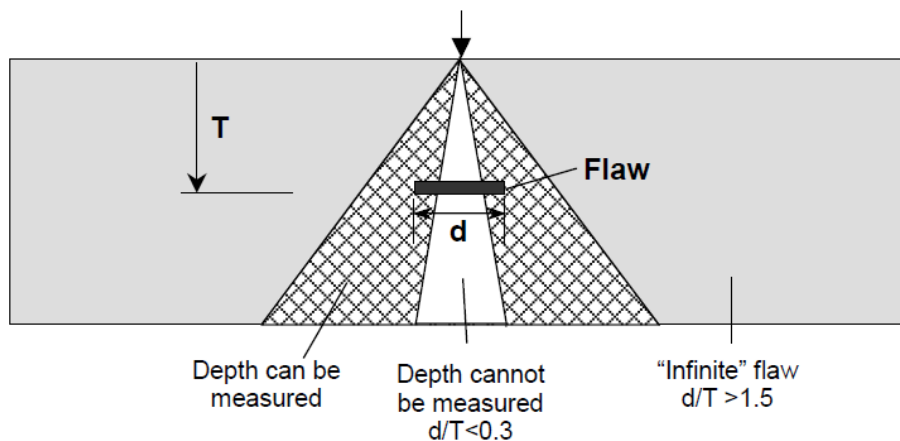


图 4-1-4 IE 法中检出能力与深度的关系

3) 冲击时的接触时间

冲击时的接触时间与激发弹性波的波长有密切的关系，接触时间越长，弹性波的波长也越长。根据 Sansalone 和 Carino [1986]、Abraham et al. [2000] 的研究成果，当采用 FFT 分析时，接触时间小于 P 波在缺陷处往复时间的 0.75 倍时，可以明确地检测。

4.1.5 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）

其中，第 3 项是有效的信号，是抽出的对象，即 IE 信号。而其它 2 项，是频谱解析误差的原因，需要除去。各种成分频谱有以下特点：

- 1) 弯曲共振在缺陷比较浅（壁厚比较薄）的地方易产生低频，而在深方向可引起

高频。此外，在处在相同深度的缺陷，缺陷尺寸越大，弯曲共振频率越低；

2) 纵波共振则相反，缺陷浅的部分（壁厚薄）的反射信号频率高，而在深缺陷的反射频率低；

3) 缺陷越浅、壁厚越薄，弯曲共振就越卓越；

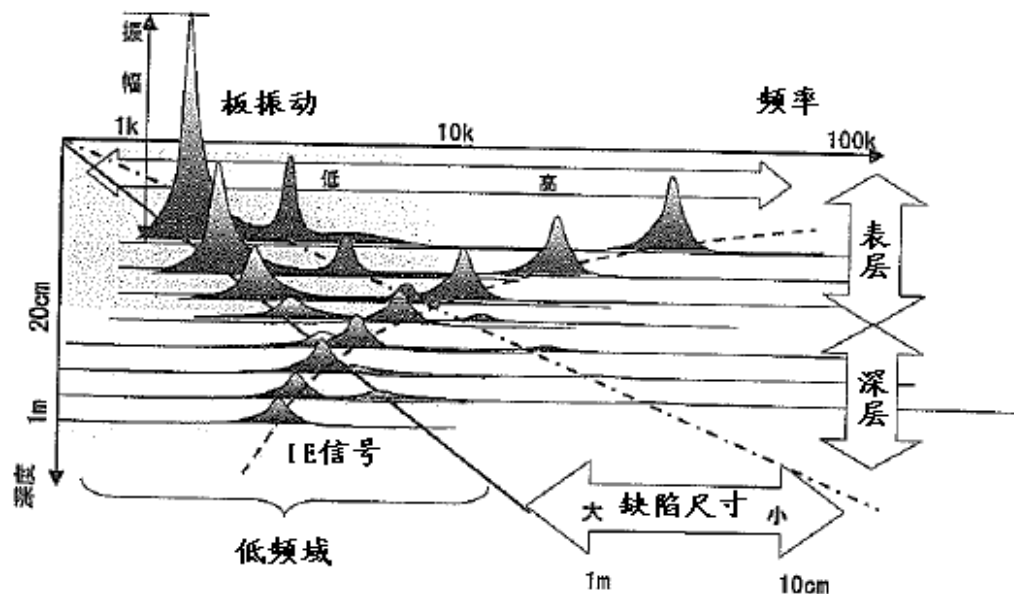


图 4-1-5 IE 法中存在的多种成分频谱

此外，激振锤对上述各成分频谱的影响也有很大的不同：

- 1) 激振锤越大，自由振动的频率越低；
- 2) 激振锤越大，板振动的频率有降低的趋势，但不如自由振动频谱明显；
- 3) 激振锤的大小与纵波共振的频谱关系不大。

因此，通过改变激振锤的大小，对减低干扰、提高检测精度是很有作用的。

4.2 计算机层析扫描（CT）

计算机层析扫描（Computer Tomography，简称 CT）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 CT 的发展历程

1967 年，英国工程师 Godfrey Newbold Hounsfield 在 Hayes 的 THORN EMI Central

Research Laboratories 开始了他的想法, 并于 1972 正式发表第一个商业化的 X 射线计算机断层成像系统。

另一头, TUFTS 大学的 Allen Mcleod Cormack 在 Cape Town 大学的 Groote Schuur 医院独立研发了类似的处理程序, 他们于 1979 年一起获得诺贝尔医学生物学奖。

X 射线计算机断层成像 (简称 X-CT) 是一种利用数位几何处理后重建的三维放射线医学影像。该技术主要通过单一轴面的 X 射线旋转照射人体, 由于不同的组织对 X 射线的吸收能力 (或称阻射率) 不同, 可以用电脑的三维技术反演并重建出断层影像。将断层影像层层堆栈, 即可形成立体影像。

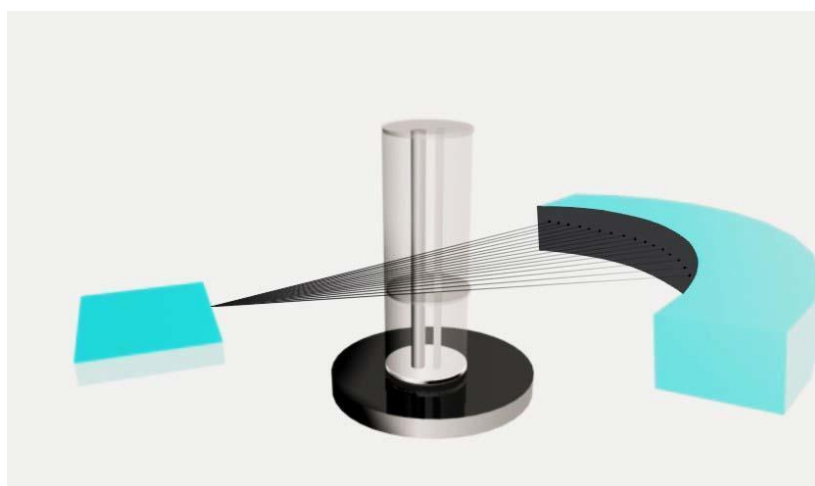


图 4-2-0 层析成像的概念

在工业、结构领域中, 除了 X 射线以外, 超声波、弹性波也可被用作检测媒介。与 X 射线相比, 超声波或者弹性波的直进性差, 信号接收的稳定性也更差。因此, 在超声波、弹性波 CT 中, 虽然也可以用其衰减特性 (与 X 射线类似), 但更多地采用其波速特性, 这是与 X-CT 的最大的区别。

4.2.2 CT 的理论基础

CT 的理论基础在于投影定理, 下图为目的函数 $f(x, y)$ 及其投影波形 $g(s, \theta)$ 的概念图。目的函数可认为是 x - y 平面上某一物理量的分布, 如 X-CT 可认为是组织对 X 射线的吸收 (阻射率), 弹性波波速 CT 可认为是某一区域的波速 (或者其倒数波慢)

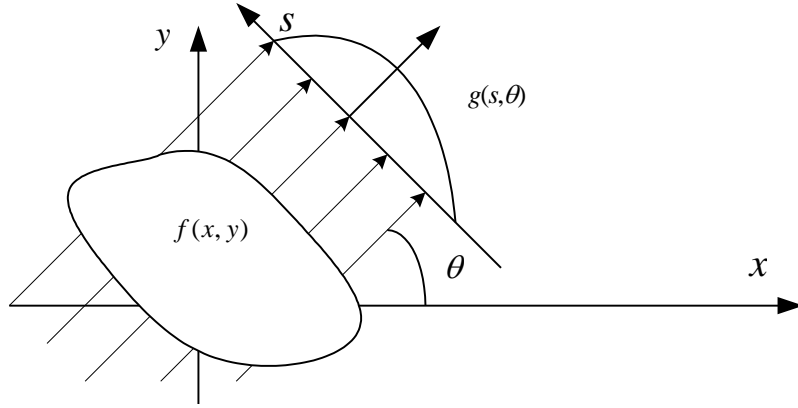


图 4-2-1 层析成像的投影法

投影波形 $g(s, \theta)$ 可以表示为:

$$g(s, \theta) = \int_L f(x, y) dL$$

考虑到 $L = x \cos \theta + y \sin \theta$, 以及对象外侧并不影响 $g(s, \theta)$ 的值, 因此可以将积分范围扩张到 $-\infty \sim +\infty$, 因而有:

$$g(s, \theta) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy$$

其中 δ 为德尔塔函数, 表示仅在 $L = s$ 时有非零值。

对 $g(s, \theta)$ 进行傅里叶变换, 有:

$$G_\theta(k_s) = \int_{-\infty}^{\infty} g(s, \theta) e^{-ik_s s} ds$$

其中, k_s 表示 s 方向的波线, 考虑到 $\delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s)$ 的傅里叶变换为 $e^{-ik_s(x \cos \theta + y \sin \theta)}$, 有

$$G_\theta(k_s) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-ik_s(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy$$

k_s 在 x 和 y 轴的投影为 $k_x = k_s \cos \theta$ 和 $k_y = k_s \sin \theta$

因此, 上式又可以改写为:

$$G_\theta(k_s) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

另一方面, 目的函数 $f(x, y)$ 的空间傅里叶变换 $F(k_x, k_y)$ 则可以表示为:

$$F(k_x, k_y) = \iint_{-\infty \rightarrow +\infty} f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

亦即：

$$F(k_x, k_y) = G_\theta(s)$$

因此，将所有的 (s, θ) 的 $g(s, \theta)$ 采集后，按照波线 s 进行傅里叶变换后，即可求出 $F(k_x, k_y)$ ，再利用 2 维傅里叶逆变换，即可求出目的函数 $f(x, y)$ 。

由此可以看出，CT 的特点是：

- 1) 媒质信号应具有直进性；
- 2) 观测需要 360 度全断面观测；
- 3) 沿波线进行傅里叶变换（分解）。

4.2.3 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。但若按照 4.2.2 所述的采用傅里叶变换的方式反算各波线的波速，其计算量十分庞大，因此采用近似方法求 $f(x, y)$ 是普遍的做法，其中，最常用的方法是拟投影法（Back Projection Technique，简称 BPT 法）。

在此，令波线的数目为 N ，单元的数目为 M 。如下图所示，将测试对象的分成若干小块（网格），目的是要求出每个网格内的波速。

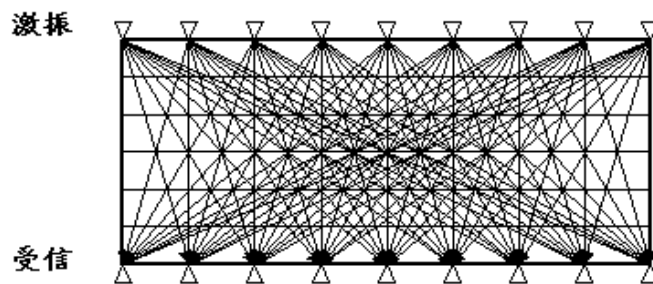


图 4-2-2 BPT 法的概念

BPT 法的目的就是将各波线的平均速度分配到各个网格中。通常，还需要进行残差处理（如同时迭代重构法：Simultaneous Iterative Reconstruction Technique，简称 SIRT，或最小二乘迭代法：Iterative Least Square Technique，简称 ILST）。

下面是一弹性波 CT 的验证例：

冲击弹性波检测技术基本原理

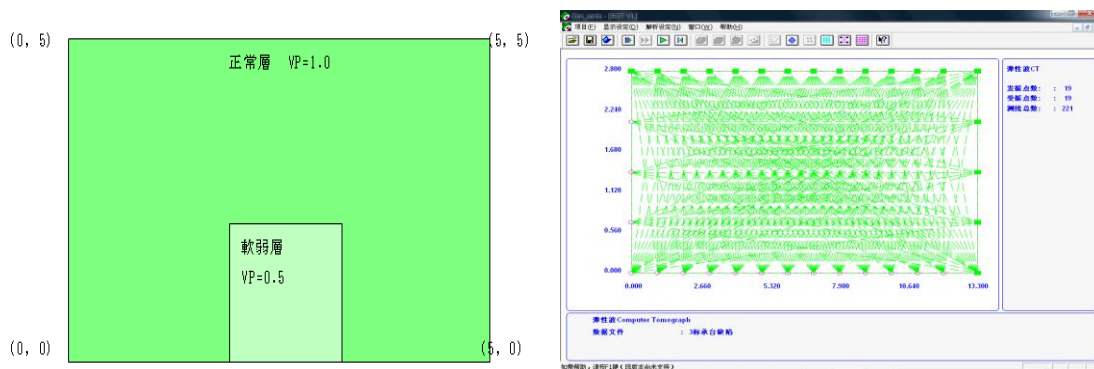


图 4-2-9 验证用模型及测线网格（中间为一软弱层）

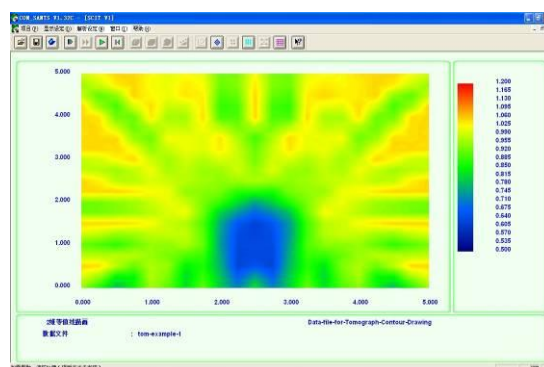


图 4-2-10 CT 结果（波速）

此外，弹性波波速 CT 检测时有些需要注意：

- 1) 尽管能够找出内部缺陷，但其数值往往较实际值有偏大的倾向；
- 2) 如果由于测试条件所限，不能 360 度全断面观测（如图），则对平行于测线的缺陷的分辨力会大幅降低；
- 3) 当激振方向与接收方向夹角过大时，测试得到的弹性波 P 波波速有减小的倾向。因此，该夹角最好不超过 45° 。

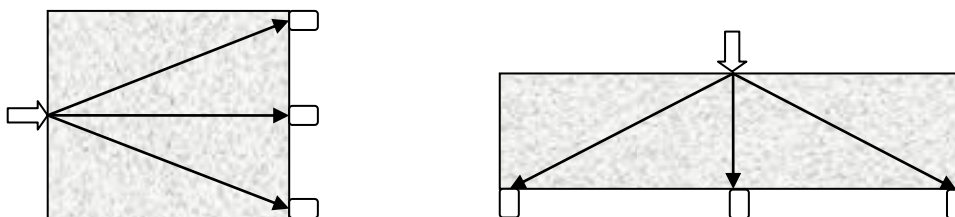


图 4-2-11 CT 测线的方向（左：OK， 右：NG）

- 4) 此外，对于板型结构，在其表面激振和接收时，P 波成分很少，而板波又会受到多种因素的影响，在使用 CT 时要特别注意。

4.2.4 提高弹性波 CT 分辨力的方法

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。对于图 4-2-9 的验证例，在采用 SIRT 法进行无约束的迭代反演后的解析结果如下图所示：

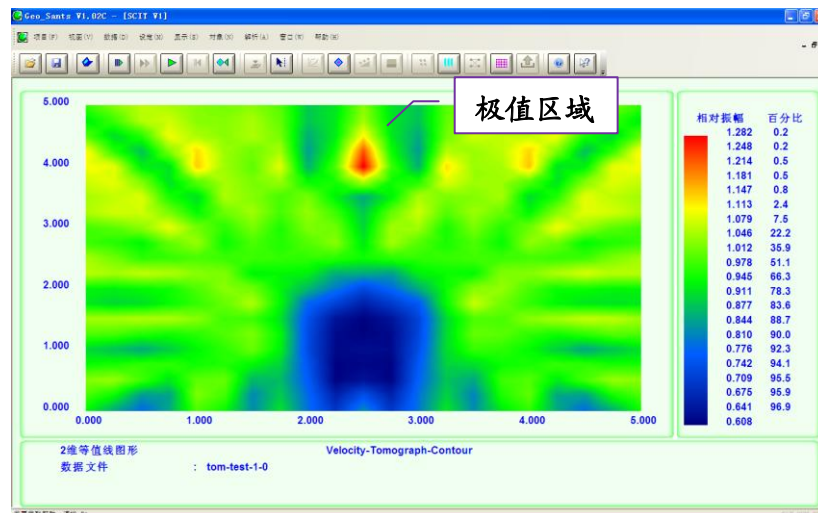


图 4-2-12 CT 结果（SIRT，无约束）

可看出，该计算结果的离散较大，特别在局部区域出现了 1.28 的明显偏大速度区。另一方面，软弱区的计算值也偏大（实际为 0.5，计算值在 0.61 以上）。

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，其基本原理如下图所示。

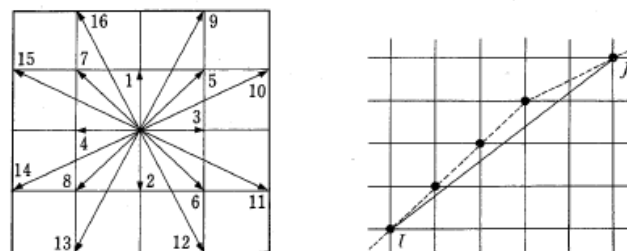


图 4-2-13 射线追踪法的基本原理

然而，射线追踪法也存在以下缺点：

- 1) 计算的收敛性差；
- 2) 由于采用所谓的最速波线，使得容易产生“低速盲区”；

另一方面，在实际的 CT 检测中，主要目的是为了寻找结构内部的缺陷，同时，健全部位的波速往往在一定的范围之内。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。

冲击弹性波检测技术基本原理

下表即针对示例，对最大速度进行约束后的迭代结果（其中，最小值的设定均为 0）。

表 4-2-1 RSIR 法计算实例

设定	解析				
最大值	最大值	最小值		平均值	
		数值	误差率	数值	误差率
100	1.2816	0.6076	21.5%	0.9586	-0.1%
1.20	1.20	0.6063	21.3%	0.9583	-0.2%
1.10	1.10	0.5955	19.1%	0.9573	-0.3%
1.01	1.01	0.5298	6.0%	0.9525	-0.8%
1.00	1.00	0.5229	4.6%	0.9508	-1.0%
模型值	1.00	0.50		0.96	

可见，采用 RSIR 法，不仅避免了最大极值的异常，而且对软弱区域的分辨力也有了较大的提高。尽管平均值误差略微增大，但影响轻微。

下图为将最大值设为 1.0 后的反演图形，与图 4-2-12 相比，可以看出其改善是非常明显的。

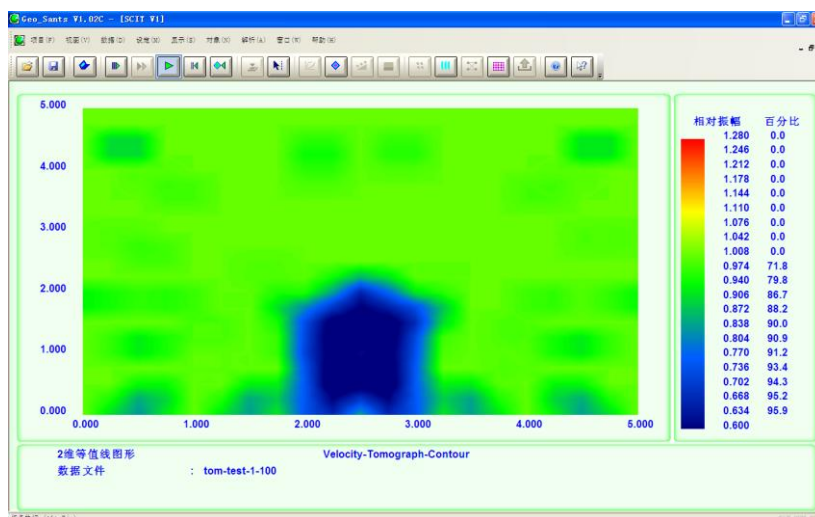


图 4-2-14 RSIR 的效果

第5章 特色及专有技术简介

长期以来，我们开发了一系列特色及专有技术，大大拓展了冲击弹性波的应用范围和测试精度。

5.1 自由振动抑制技术

当采用锤击等方式激振时，被击打部位会产生一定时间的振动。该振动又作为新的振动源，使得激发的信号的持续时间远远长于击打的时间（激振过程）。

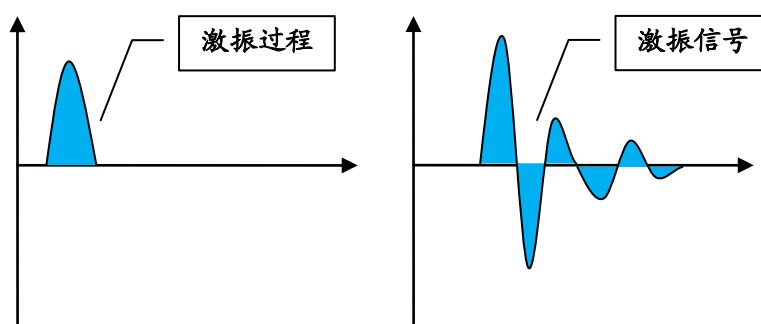


图 4-1-0 激振信号的持续时间

在采用反射法测试结构的厚度、长度时（如立柱、锚杆、基桩、墙壁等），为了提高底部反射信号的识别能力，削减激振信号的残余振动时间是非常有效的。为此，我们开发了自动激振技术和相应的设备。

5.1.1 残留振动抑制的原理

弹性波激发时，有两种主要因素会造成残留振动的持续，即：

- (1) 被击打的部位的残留振动；
- (2) 击打时发出的碰撞声与立柱内部空腔产生的共鸣；

对于第（2）个因素，可以通过在击打部位放置橡胶垫等方法加以解决。而对于第（1）个因素的解决，则需要更加深入地研究。

1) 残留振动的特性和影响因素

将柱顶有关的振动部分简化成一个振动系统后，其力学模型如下图所示。在柱顶作用一个冲击力 F 后，系统将产生自由衰减振动（即残留振动）。

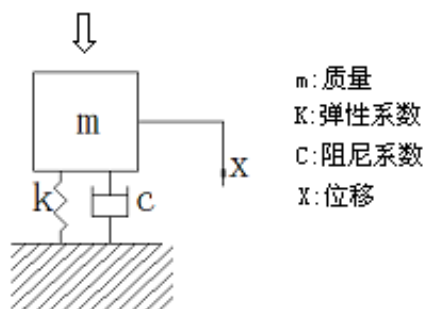


图 4-1-1 振动分析模型

当冲击时间较短时，可以把冲击力简化为一脉冲信号，其冲击力随时间的积分可以表示为：

$$\hat{F}(\zeta) = \int_0^{\infty} F(t) \delta(t - \zeta) dt \quad (5-1-1)$$

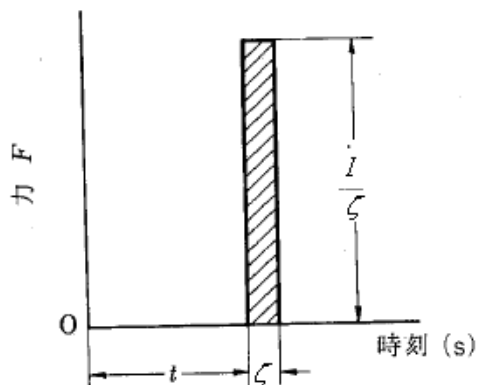


图 4-1-2 脉冲信号简化图

其中， $\delta(t - \zeta)$ 为德尔塔函数，具有以下性质：

$$\begin{cases} \delta(t - \zeta) = 1: & t = \zeta \\ \delta(t - \zeta) = 0: & t \neq \zeta \end{cases} \quad (5-1-2)$$

在该脉冲信号的冲击下，振动系统的响应（即为自由振动或残留振动）可以表示为：

$$y(t) = \frac{\hat{F}}{\sqrt{(1-h^2)KM}} e^{-\omega h t} \cdot \sin(\sqrt{1-h^2} \omega t) \quad (5-1-3)$$

其中： ω 为角频率， $\omega = \sqrt{K/M}$ ；

K 为反映系统刚性的弹簧系数；

h 为衰减比， $h = \frac{c}{2\sqrt{KM}}$ ；

c 为阻尼系数；

如果把单位冲击力时的响应表示为 $g(t)$ 时, 式 7-1-3 又可以表示为:

$$y(t) = \hat{F}(t) \cdot g(t) \quad (5-1-4)$$

$$\text{其中, } g(t) = \frac{1}{\sqrt{KM(1-h^2)}} e^{-\omega h t} \cdot \sin(\sqrt{1-h^2} \omega t) \quad (5-1-5)$$

下图即为 $g(t)$ 的一个例子。可以看出, 在角频率 ω 不变而衰减比 h 较小时, 残留振动的衰减项 $e^{-\omega t}$ 衰减较慢而持续时间较长, 给反射信号的提取带来了很大的困难。

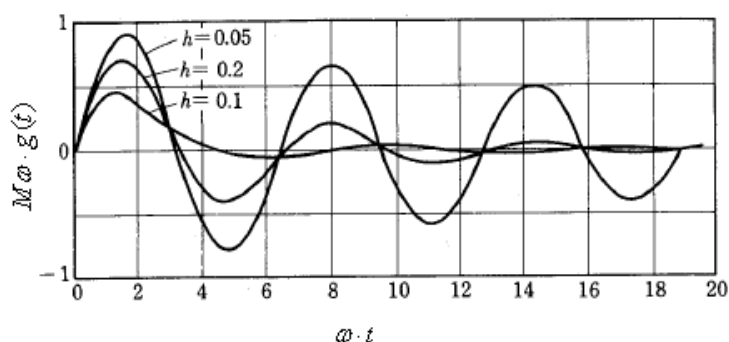


图 4-1-3 $g(t)$ 函数

2) 抑制残留振动的常用方法与不足

从上式可以看出, 采用以下两种方法可以有效地衰减残留振动:

(1) 提高激振信号的角频率 ω

该方法不仅可以抑制残留振动, 而且有利于提高分辨率。然而, 频率过高会增大衰减, 特别是周围土体材料坚硬时信号的衰减大, 因此, 过高的频率不利于反射波法的检测。另一方面, 为了消除空腔共鸣而增加的橡胶垫则不利于激发高频信号。

(2) 提高衰减比 h (阻尼);

采用提高衰减比 h (阻尼) 的方法是比较有效的。因此, 在针对固体材料探伤的超声波探头中, 有的厂商即采用高阻尼的构造。但是, 衰减比 h 是对象材料及结构的固有特性, 难以通过外界方法加以改变。因此, 在弹性波反射波法的检测中, 提高衰减比 h 的方法难以实行。

所以, 采用通常的抑制残留振动的方法如提高激振信号的角频率 ω 或提高阻尼的方法都难以取得明显的效果。

3) 抑制残留振动的具体原理

在本系统中，提出采用在护栏立柱顶部通过硬件的方式增加持续荷载的方式来抑制自由振动，该方法已经获得国家发明专利（专利号：ZL200810240908.4）。

通常的激振方法是让锤体冲击立柱从而产生冲击弹性波。冲击过后，锤体离开被测物体，因此，其对被测体的冲击力如下图所示，为一脉冲过程。当锤体离开被测物体后，外力变为 0，被测物体成为自由振动状态。

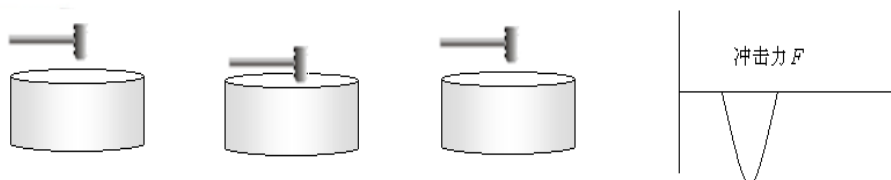


图 4-1-4 立柱冲击力示意图

在本系统中，抑制自由振动是通过增加附加质量和附加静荷重的方法，在激振过程中，保持打击锤体不离开测试体表面，并始终保持一定的静荷重。

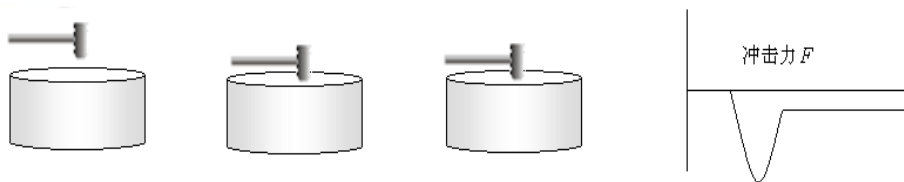


图 4-1-5 抑制自由振动方法示意

对于上图中的荷载信号，可以表示为两部分：

$$F(t) = F_p(t) \quad , \quad t < t_0 \quad (5-1-6)$$

$$F(t) = F_0 U(t) \quad , \quad t \geq t_0 \quad (5-1-7)$$

其中， $F_p(t)$ 与通常的锤击产生的脉冲荷载过程相同，而 F_0 为持续的静荷载。其中

的 $U(t)$ 为单位跃阶函数，即
$$\begin{cases} U(t) = 0; & t < t_0 \\ U(t) = 1; & t \geq t_0 \end{cases}$$

在任意荷载下，系统的响应可以表示为

$$y(t) = \int F(\zeta) \cdot g(t - \zeta) d\zeta \quad (5-1-8)$$

在 F_0 的作用下，位移响应为：

$$y(t) = \frac{F_0}{K} \left\{ 1 - \frac{e^{-\omega h(t-t_0)}}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \cos[\sqrt{1-h^2} \omega(t-t_0) - \phi] \right\} \quad (5-1-9)$$

其相位角 $\phi = \tan^{-1} \frac{h}{\sqrt{1-h^2}}$ 。因此，对于如图 2-3-7 的脉冲+静载， $t \geq t_0$ 时的位移

响应可以表示成两种响应的叠加：

$$y(t) = \frac{F_0}{K} + \frac{\hat{F}}{\sqrt{KM(1-h^2)}} e^{-\omega h t} \cdot \sin(\sqrt{1-h^2} \omega t) - \frac{F_0 e^{-\omega h(t-t_0)}}{K \sqrt{1-h^2}} \cdot \cos[\sqrt{1-h^2} \omega(t-t_0) - \phi]$$

(4-1-10)

上式中的 $\frac{F_0}{K}$ 表示在持续静荷载下产生的位移，为一常数项。由于在冲击弹性波测试中，通常采用测试加速度的方法，因此， $\frac{F_0}{K}$ 的微分为 0。

分析上式的后两项，可以看出，通过适当选取相关参数（如 F_0 、 \hat{F} 、 t_0 等），可以有效地削弱 $y(t)$ 的振幅。一般来说，通过增加 $\frac{F_0}{\hat{F}}$ ，可以更好地抑制残留振动。

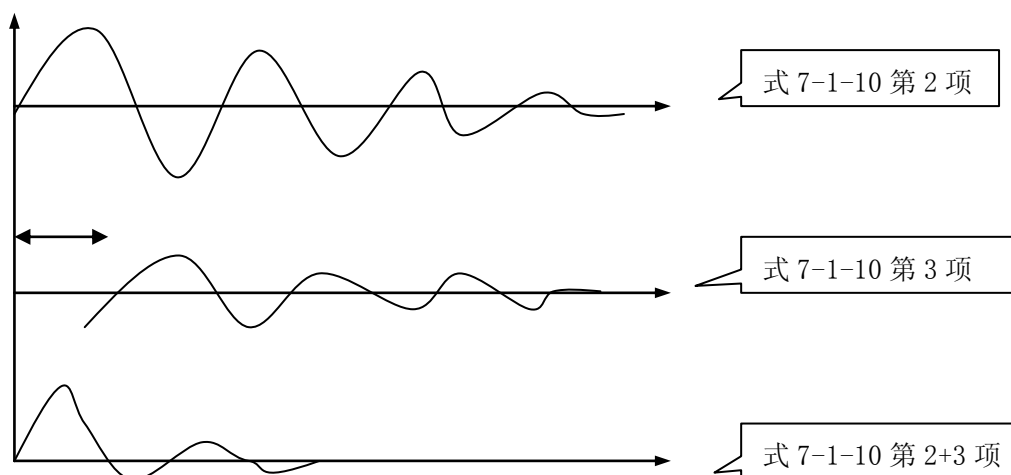


图 4-1-5 抑制自由振动后的波形分解示意图

简而言之，就是在击打桩顶截面后，持续保持一个静荷载和附加质量，即可有效地抑制残留振动。在日常生活中，其实我们可以看到类似的例子。例如在敲锣打鼓时，为了使发声（振动）中途停止，常常用锤子顶在锣、鼓上或用手摁住，其力学原理既为上述的理论。

5.1.2 自动激振系统

为了实现上述残留振动的抑制，并最优化各项参数，我们开发了自动激振系统。

由上述分析可以看出，为了有效地衰减残留振动，不仅需要增加持续静荷载 F_0 ，

而且需要各个参数匹配适当。如 \hat{F} 过大而 F_0 过小时，就起不到明显的作用。为此，我们开发了激振控制装置以便于调节各项参数，同时开发了相应的激振头和固定装置以实现所需的激振过程。

1) 激振控制器

控制器由电池、开关电路、单片机控制回路等构成。当开关接通时，控制器会产生一个预先设定时间长度的直流电压脉冲，输入冲击激励装置产生电磁驱动力 F_D 并驱动冲击激励装置冲击部的电磁铁运动。电磁驱动力 F_D 与驱动电流成正比。

2) 激振头：

激振头由电磁铁和冲击棒、复位弹簧组成。

其中，冲击力积 \hat{F} 与冲击时的冲击棒的速度 V_0 成正比，即：

$$\hat{F} \propto M_0 V_0 \quad (5-1-11)$$

M_0 为冲击体的质量。 V_0 则可以表示为：

$$V_0 = \int_0^{\tau} a(x) dt \quad (5-1-12)$$

其中， τ 为冲击体开始运动到冲击对象体的时间， $a(x)$ 为冲程 x （即冲击棒从静止位置开始的距离）时的加速度，

$$a(x) = \frac{F_D - kx}{M_0} \quad (5-1-13)$$

其中， k 为复位弹簧的弹簧系数，一般为定值。因此，2-3-11 又可以表示为：

$$\hat{F} \propto \int_0^{\tau} (F_D - kx) dt \quad (5-1-14)$$

从上式可以看出，当电磁力大于回复力（ $F_D > kx$ ）时（在一般的参数条件下，该条件容易满足），冲击力积 \hat{F} 则是随着冲程 x 的增加而增大。

另一方面，冲击体对被测体的静载 F_0 即为：

$$F_0 = F_D - kx \quad (5-1-15)$$

对于静载 F_0 ，当冲程 x 为 0 时 F_0 为最大值，随着冲程 x 的增加而略有减少。

由此可以看出，为了得到高质量的信号，需要调节冲击体对被测物体的静载 F_0 ，调节方式包括：

- (1) 电磁驱动力 F_D 一定（即激振电流不变），通过固定装置调节冲击棒冲程 x ；
- (2) 固定装置冲程不变，通过激振控制器调节电磁驱动力 F_D （即激振电流）。

$\frac{F_0}{\hat{F}}$ 主要由冲击棒的冲程 x 与电磁驱动力 F_D 决定。冲程越小或 F_D 越大， $\frac{F_0}{\hat{F}}$ 越大，

对残留振动的抑制效果也就越明显。另一方面，当冲程过小或 F_D 越小时，冲击力积 \hat{F} 过小使得信号能量过弱，给信号的采样等带来困难。因此，采取适当的冲程与激振电压是非常重要的。

- (1) 冲程及电磁驱动力 F_D 调节：

从上文可以看出，采取适当的冲程及电磁驱动力 F_D 对于测试精度的提高起着非常重要的作用。为此，我们在固定装置上嵌入了冲程调节及在激振控制器电流调节的功能。当本装置用于测试立柱等结构时，可以实现激振冲程及电磁驱动力 F_D 的细微调节。

- (2) 冲击时间及激振方式的选择

为了抑制自由振动并使静载在被测对象上保持一定的时间，在激振控制器面板上增加了冲击时间及激振方式的调节。同时，我们采用的缓冲垫片不仅可以防止在激振过程中产生声响，还可以降低冲击力积 \hat{F} ，从而调整 \hat{F} / F_0 。此外，我们设计开发了安装支架来固定激励装置。该装置的使用可以使激励后的过程中，始终保持一定的静荷重。

该系统是通过激振控制器与激振装置组成。实现对激振力度、激振过程的控制，从而达到对测试信号波长、信号残留振动等参数的调节。大大的提高了得到高质量测试数据的可能性，从而提高了测试结果的稳定性及测试精度。

表 5-1-1 自动激振装置

名称	功能
激振控制器	(1) 通过对输出电流的控制，达到对激振力度的控制； (2) 通过对激振时间的控制，实现增加不同的激振荷载达到抑制自由振动的目的。

激振装置	通过磁石的吸附力实现对激振机构的固定, 通过特殊的设计, 能够对应目前所有设计尺寸的立柱。
------	---

与小锤激振相比, 自动激振系统具有以下特点:

- (1) 激振过程中人为因素影响小;
- (2) 能够保证了每次激振力度的均一性;
- (3) 提供了多种调节方式, 适应范围更广。

5.1.3 自动激振系统的效果

下图表示了采用自动激振系统激发的, 残留振动被抑制后的测试信号, 可以看出其效果是非常明显的。

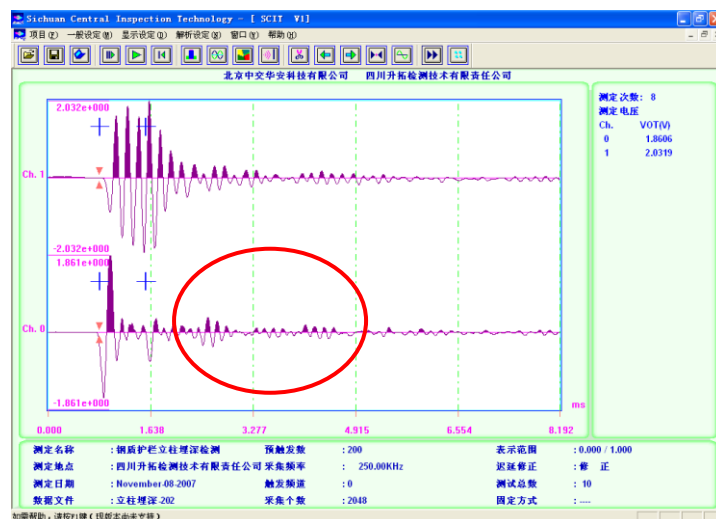


图 5-1-6 测试信号 (自由振动被抑制)

5.2 反射信号抽取技术

锚杆、立柱、基桩的埋设深度的测试精度很大程度取决于对柱底反射信号的抽取精度。为了提高抽取能力和精度, 在 EDMA 中植入了对测试信号进行分析的频谱分析技术 (FFT、MEM) 与信号匹配 (Matching) 分析技术来对信号进行处理。

5.2.1 信号适应匹配技术

为了从弹性波激励残留信号中识别提取柱底的反射信号, 我们研究开发了适应匹配技术 (Signal Matching)。

如前所述, 在柱顶施加一个初始冲击力后, 则系统会产生自由衰减振动, 其运动微

分方程式可以表示为式-1：

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n\frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = 0 \quad (5-2-7)$$

式中： ω_n 为系统固有圆频率； n 为衰减系数。

激振（ $t > t_0$ ）后其自由振动的响应可以表示为：

$$x = A_0 e^{-nt} \sin(\sqrt{\omega_n^2 - n^2} t + \varphi) \quad (5-2-8)$$

式中： A_0 为初始振幅， φ 为相位角。

$$\text{令 } T_d = \frac{1}{\omega_d} = \frac{1}{\sqrt{\omega_n^2 - n^2}}, \text{ 表示冲击弹性波激励残留信号振动的周期。}$$

根据上式可以知道，残留信号的振幅按几何级数衰减。

根据 $t = t_1$ 时刻的振幅 A_1 ， $t = t_2$ 时刻的振幅 A_2 ，以及振动周期 T_d 即可推算出式中的 A_0 和阻尼系数 n 。即：

$$n = \frac{\ln(A_1 / A_2)}{T_d} = \frac{\ln(A_1 / A_2)}{T_2 - T_1} \quad (5-2-9)$$

$$A_0 = A_1 \cdot e^{n(t_1 - t_0)} \quad (5-2-10)$$

至此，即可回归出衰减信号的参数。

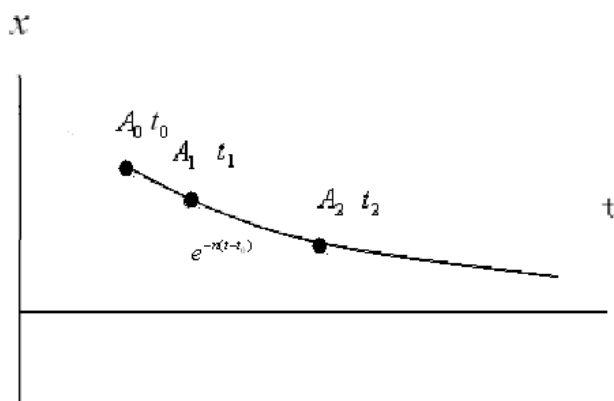


图 5-2-1 自由衰减包络线

值得说明的是，在激振后的自由振动，其周期特性及衰减特性均只与系统本身的特性有关，为一固定值。因此，对于测试的信号 $x(t)$ ，在激振后（ $t > t_0$ ）减去回归出的衰减信号，从理论上即可消除残留振动的影响。

$$\hat{x}(t) = x(t) - y(t) \quad (4-2-11)$$

但是，由于实际的残留振动的特性十分复杂，上述回归的信号 $y(t)$ 与实际的自由振动信号 $x(t)$ 之间有一定的差异。使得处理后的信号 $\hat{x}(t)$ 中会出现像下图中的尖角信号，给反射信号的抽出带来新的误差要因。该类尖角信号往往具有较高的频率和离散性，其性质类似于噪声。

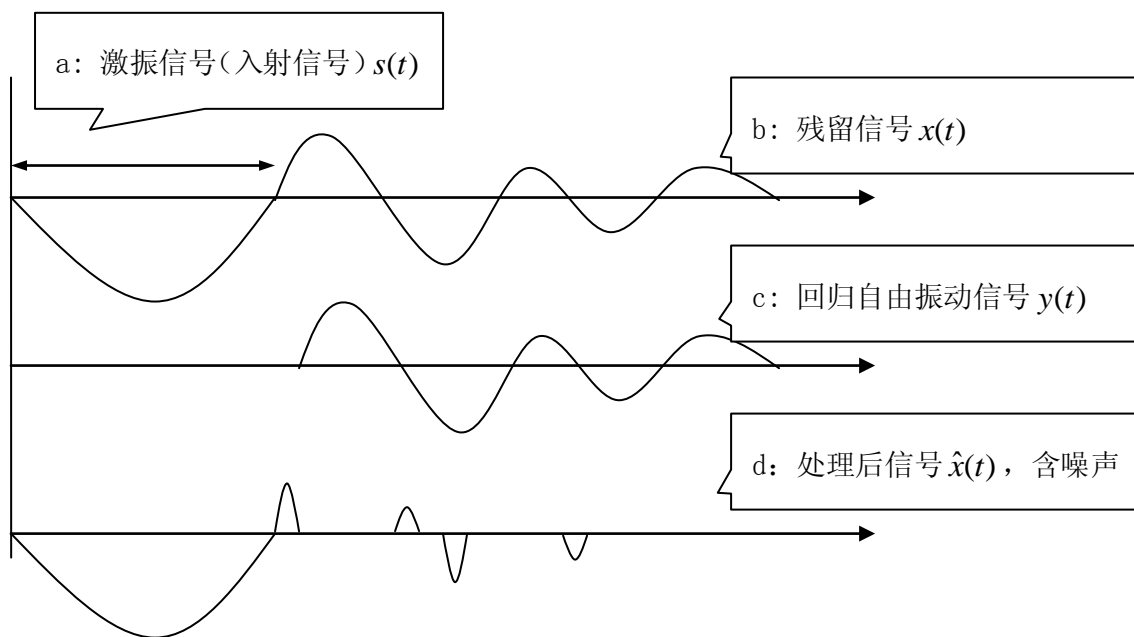


图 5-2-2 残留自由振动的削减

为此，我们提出了相关处理的方法，来削减附图 2-3-15 中的尖角信号的影响。由于反射信号与入射信号间存在相似性，我们将通信工程中的“适应匹配”（Fitting Matching）技术引入到本系统中，通过分析入射信号（发振信号）之间的相关性，从而自动地抽出反射信号并可自动确定反射信号的初始时刻。

适应匹配的基本原理基于相关分析。在测试或处理波形 $f(t)$ 中，含有强度为 a 的对象信号 $s(t)$ ，以及噪声信号 $n(t)$ ：

$$f(t) = a \cdot s(t) + n(t)$$

$f(t)$ 与 $s(t)$ 相互相关则可以表示为：

$$\begin{aligned} R_{fs}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) s(t + \tau) dt \\ &= a \cdot R_{ss}(\tau) + R_{ns}(\tau) \end{aligned}$$

其中, $R_{ss}(\tau)$ 为对象信号波形的自相关, $R_{ns}(\tau)$ 为对象信号与噪声信号的相互相关。

如果对象信号与噪声信号完全无关,

$$R_{ns}(\tau) \rightarrow 0$$

则有:

$$R_{fs}(\tau) = a \cdot R_{ss}(\tau)$$

因此, 通过 $f(t)$ 与对象信号 $s(t)$ 得相关处理, 即可大大消除掉噪声信号 $n(t)$ 的影响。

当 $\hat{x}(t)$ 中有反射信号 $\bar{s}(t)$ 时,

$$\hat{x}(t) = s(t) + \bar{s}(t) + n(t)$$

其与激振脉冲信号 $s(t)$ 的相互相关处理可以表示为:

$$R_{xs}(\tau) = R_{ss}(\tau) + R_{s\bar{s}}(\tau)$$

由于反射信号 $\bar{s}(t)$ 与激振脉冲信号 $s(t)$ 之间具有极高的相似性, 因此, 其相关系数 $R_{s\bar{s}}(\tau)$ 数值大, 从而突出了反射信号。

值得说明的是, 下图中两个峰值的时刻分别对应于激振的时刻和反射信号的到达时刻, 据此即可推算出反射信号的传播时间。

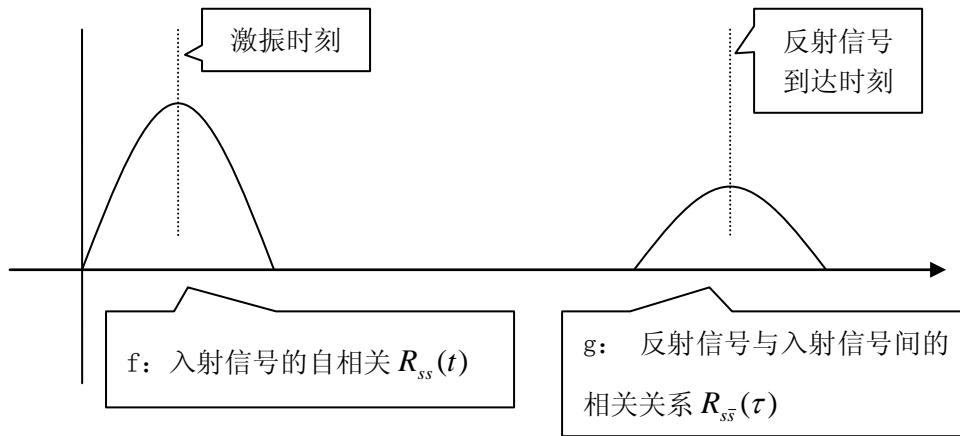


图 5-2-3 信号匹配处理后的结果

5.3 其他关键技术

为了进一步提高信噪比 (S/N) 和测试精度, 我们还开发了半波移动技术和智能分析机能。

5.3.1 半波移动技术

如下图所示，以反射波形为基准，移动激振位置。移动的距离（时间轴）如果正好为激振卓越周期的1/2时，这两个波形叠加后激振信号的自由振动部分能够被大大消除。

实际上，反射时刻是未知的。因此，其移动距离可通过下式确定。

$$\Delta H = \frac{T_v \cdot V_p}{4} \quad (5-3-1)$$

其中， T_v 为激振信号自由振动的卓越频率， V_p 为 P 波弹性波速。

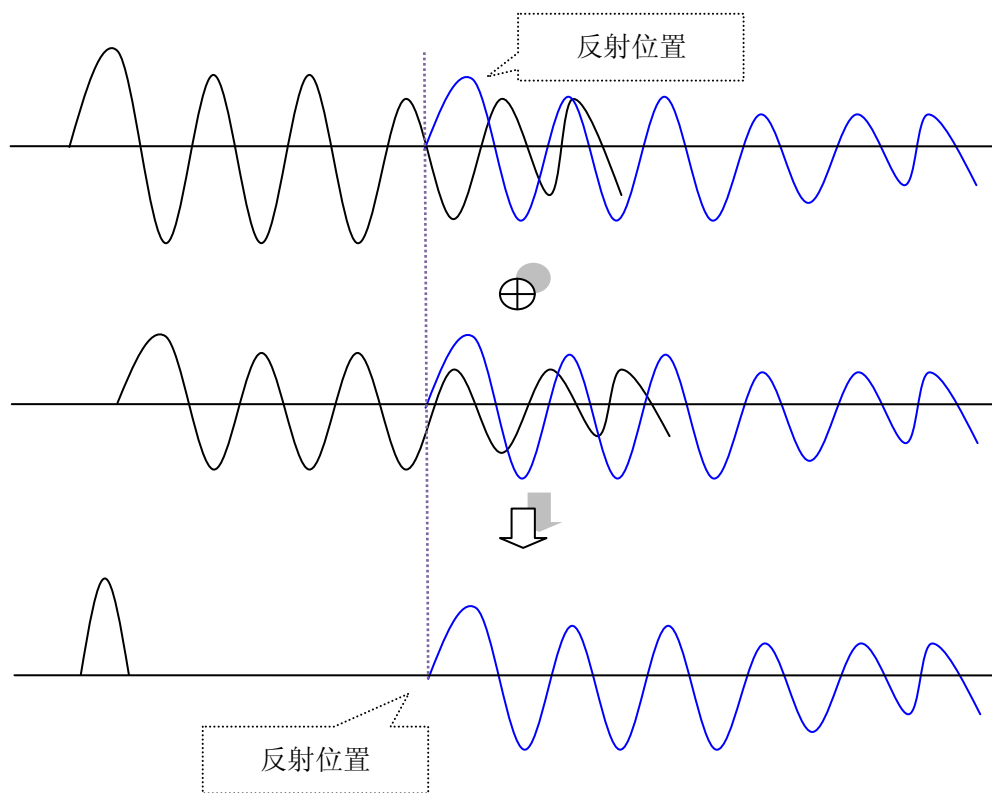


图 5-3-1 半波移动法的概念

第6章 冲击弹性波无损检测技术的设备及应用

6.1 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。

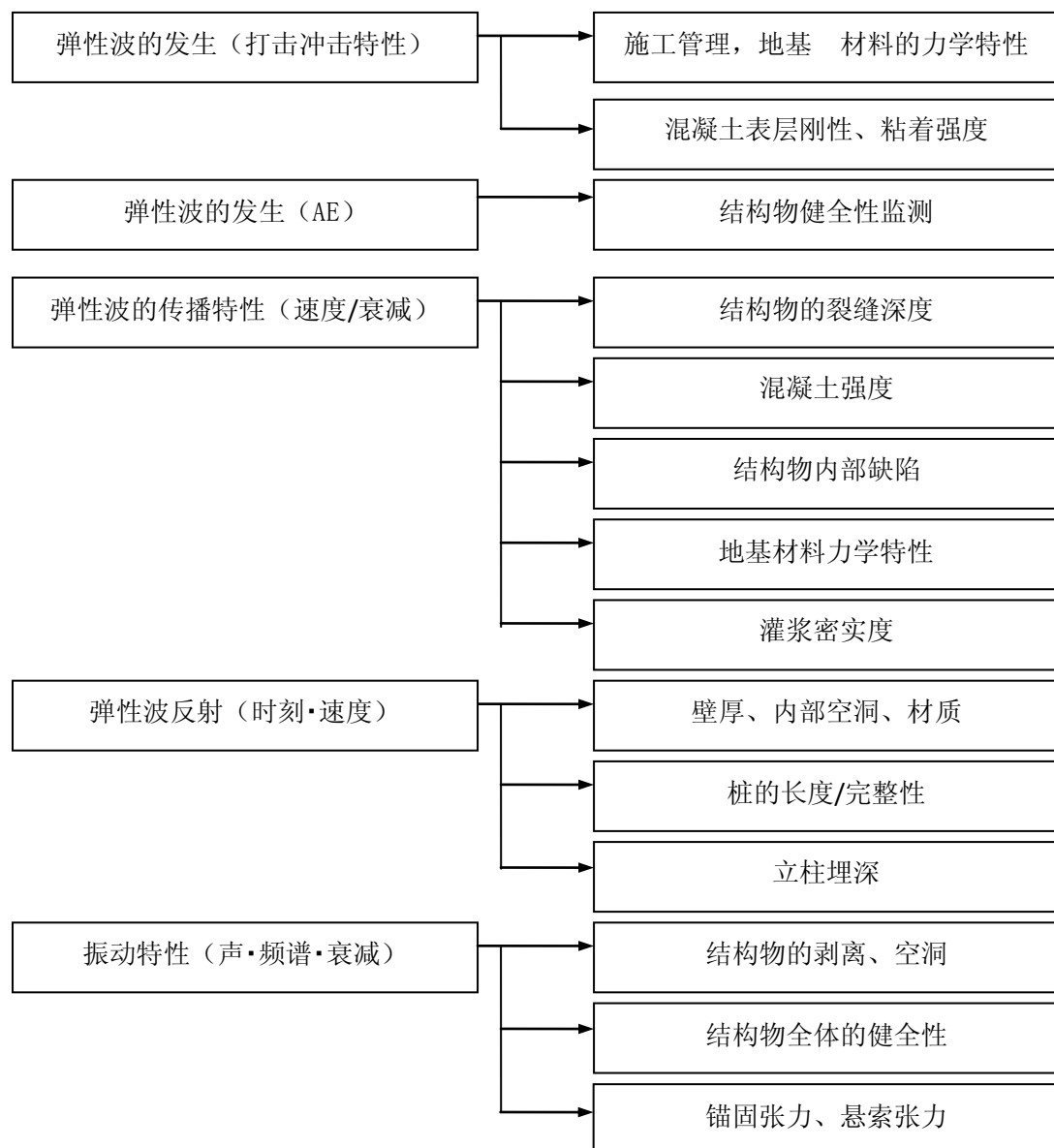


图 6-1 冲击弹性波检测技术

6.2 冲击弹性波测试仪

下图是我公司开发的冲击弹性波测试仪的代表产品。



钢质护栏立柱埋深冲击弹性波检测仪

预应力混凝土梁多功能检测仪

图 6-2 冲击弹性波检测设备

与超声波（包括非金属超声波）设备相比，本公司的检测设备具有如下特点：

- 1) 测试便捷，不需耦合剂；
- 2) 测试范围广，可测试从数 cm 到上百米的对象范围；
- 3) 频率响应范围好，可以用各种频域分析；
- 4) 波长较长，在测试土木工程中混凝土、岩土对象时精度高；
- 5) 测试内容丰富。

6.3 系列技术方案

在本公司开发的检测设备中，包含以下技术体系：

TEC-01：预应力梁灌浆密实度检测技术体系

TEC-02：混凝土质量综合检测技术体系

TEC-02A：结构脱空检测技术体系

TEC-03：岩土材料力学特性综合检测技术体系

TEC-04：钢质护栏立柱埋深冲击弹性波检测技术体系

TEC-05：岩锚质量综合检测技术体系

TEC-06: 预应力混凝土桥梁远程监测技术体系

TEC-07: 高炉衬砌厚度及缺陷检测技术体系

TEC-08: 有效预应力检测技术体系

TEC-10: 基桩质量综合检测技术体系

【参考文献】

- [1] Abdel Ouahab Boudraa, Jean-Christophe Cexus. EMD-Based Signal Filtering. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2007, 56(6):P2196-2202.
- [2] 佐々宏一等, 建設、防災技術者のための物理探査[M]、森北出版社、2003.
- [3] 吴佳晔等编著, 土木工程检测与测试[M], 高等教育出版社, 2015年2月。
- [4] ASTM C597 - 09, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM., 2009
- [5] ASTM D2845 - 08: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock
- [6] ASTM C1383 - 04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method
- [7] NDIS 2426-1: コンクリート構造物の弾性波による試験方法-第1部: 超音波法、2009.
- [8] NDIS 2426-2: コンクリート構造物の非破壊試験-弾性波-第2部: 衝撃弾性波法、2014.
- [9] NDIS 2426-3: コンクリート構造物の弾性波による試験方法-第3部: 打音法、2009.

版本修订说明

- V1.01: 增加了冲击弹性波测试设备说明
- V1.02: 增加了技术方案说明
- V1.03: 增加了第 7 章“特色及专有技术”
- V1.05: 增加了弹性波测试的基础
- V1.06: 调整了章节顺序并增加了信号频谱分析内容
- V1.07: 丰富了弹性波的性质、传播和衰减的内容
- V1.08: 增加了 3.4（数据处理及判断）
- V1.09: 修订了 MEM 分析部分并增加了与 FFT 的计算对比例（3.3.3）
- V1.10: 增加了第四章（代表的无损检测技术简介）和术语、略语、符号说明
- V1.11: 增加了 4.2.5（IE 法测试时的注意事项）和附录中的技术支持
- V1.12: 丰富了 3.2（噪声与降噪）的相关内容；
增加了 4.2（CT）相关的内容
- V1.13: 增加了 3.2.6（软件降噪方法的效果比较）；
- V1.15: 增加了 CT 的示意图以及测试信号性质（3.1.5）；
- V1.16: 修订了冲击弹性波的波长与激振方式的关系（2.2.1）；
- V1.17: 修订了弹性波的反射，并增加了空气层的反射率的理论计算值（2.4）
- V1.18: 增加了“激振信号强弱对测试的影响”（2.2.3）
- V1.19: 增加了“其它传播性质”（2.4.3）
- V1.20: 增加了“相关分析”（3.3.4），修正了 CT 的影响因素（4.2.3）
- V1.21: 增加了“传感器与放大器的基础”（3.1），修订了 2.5.2
- V1.22: 增加了“振动信号的拾取”（3.1.2）
- V1.23: 修订了传感器的选型（3.1.3），增加了传感器的固定方法（3.1.4）
- V1.25: 增加了传感器共振的修正（3.1.5）
- V1.26: 修订了 3.1.2；
- V1.27: 修订了 3.2.2，增加了样条（浮点）插值补偿的相关内容；

冲击弹性波检测技术基本原理

V1.28: 修订了第 1 章、2.3.1、3.1.3, 增加了 3.1.6 (传感器电缆的固定);

V1.29: 增加了 4.2.4 (提高弹性波 CT 分辨力的方法);

V1.30: 增加了激振弹性波频率的理论值与实测值的对比 (2.2.1);

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：

✕ 四川升拓检测技术有限责任公司 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