

声波透射法讲义

第一节 概述

声波检测一般是以人为激励的方式向介质（被测对象）发射声波，在一定距离上接收经介质物理特性调制的声波（反射波、透射波或散射波），通过观测和分析声波在介质中传播时声学参数和波形的变化，对被测对象的宏观缺陷、几何特征、组织结构、力学性质进行推断和表征。而声波透射法则是以穿透介质的透射声波为测试和研究对象的。

混凝土灌注桩的声波透射法检测是在结构混凝土声学检测技术基础上发展起来的。结构混凝土的声学检测始于 1949 年，经过几十年的研究、探索和实践，这项技术在仪器设备、测试方法、应用范围、数据分析、处理方法等方面得到了很大发展，在许多国家和地区得到了广泛应用，成为混凝土无损检测的重要手段。至 20 世纪 70 年代，声波透射法开始用于检测混凝土灌注桩的完整性。其基本方法是在预埋声测管之间发射并接收声波，通过实测声波在混凝土介质中传播的声时、频率和波幅衰减等声学参数的相对变化，对桩身完整性进行检测。

目前，对混凝土灌注桩的完整性检测主要有：钻芯法、高、低应变动测法和声波透射法等四种方法。低应变法检测，因目前仪器设备的灵敏度和准确度已在很多情况下不能满足实际工程基桩的要求，即对很多超长桩、嵌入硬土很深的基桩，已不可能采集到清晰的桩底反射信号；高应变法检测和钻芯法检测由于费用高、检测烦琐，甚至施工现场无法实现，往往应用上也受到限制；而声波透射法检测范围可覆盖全桩长的各个横截面，信息量丰富，结果可靠，现场操作简便，不受桩长、长径比的限制，也不受场地限制。声波透射法以其鲜明的技术特点成为目前混凝土灌注桩（尤其是大直径灌注桩）完整性检测的重要手段，在工业与民用建筑、水利电力、铁路、公路和港口等工程建设的多个领域得到了广泛应用。

第二节 基本理论

2.1 波动

在空间某处发生的扰动，以一定的速度由近及远地传播，这种传播着的扰动称为波动。

机械扰动在介质内的传播形成机械波，如水波、声波。电磁扰动在真空或介质内的传播形成电磁波，如无线电波、光波、红外线等。

波动是物质运动的一种形式，也是能量传播的一种方式。

2.2 声波

声波是在介质中传播的机械波，依据波动频率的不同，声波可分为次声波、可闻声波、超声波、特超声波。如表 2-1 示。

表 2-1 声波种类和对应的频率范围

名称	频率范围
次声波	$0 \sim 2 \times 10^1 \text{ Hz}$
可闻声波	$2 \times 10^1 \sim 2 \times 10^4 \text{ Hz}$
超声波	$2 \times 10^4 \sim 10^{10} \text{ Hz}$
特超声波	$> 10^{10} \text{ Hz}$

在本章中，我们说的“声波”具有广泛的含义，它既包含了可被人的听觉感知的“可闻声波”，也包含不能被人类听觉感知的其他频段的机械波。用于混凝土声波透射法检测的声波主频率一般为 $2 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5 \text{ Hz}$ 。

2.3 弹性固体介质中质点的振动

任何固体材料,从微观结构上看,都可以看成许多质点的集合体.这些质点之间通过一定的方式彼此联系.在弹性材料中,质点间的联系具有弹性性质.如图 1 所示,质点间的相互作用力可用弹簧的弹性力来模拟。

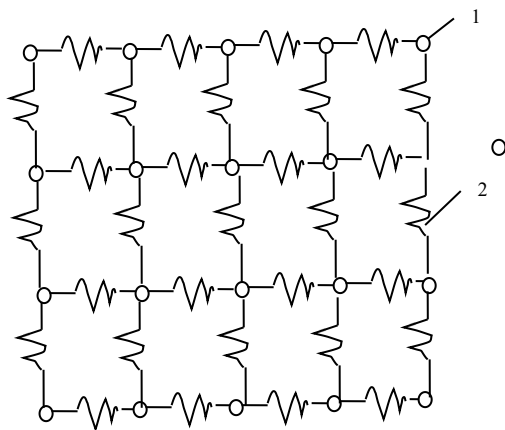


图 1 弹性介质力学模型

1—质点；2—小弹簧

质点与弹簧构成一弹簧振子，弹簧振子被扰动后的运动是简谐振动.因此,质点的简谐振动是弹性固体材料中质点振动的最基本形式。

(1) 弹簧振子的运动

质量为 m 的物体系于一端固定的轻弹簧的自由端，置于光滑水平台面上，就构成一弹簧振子，

如图 2 所示。在运动过程中，物体在水平方向只受弹性力作用。取 u 轴沿水平方向，以弹簧松弛位置作为坐标原点。

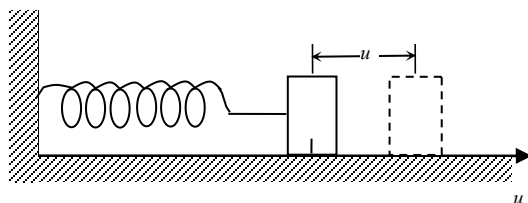


图 2 弹簧振子

物体的运动方程为

$$m\ddot{u} = -ku \text{ 或 } \ddot{u} = -\frac{k}{m}u \quad (2-1)$$

式中 k 为弹簧的弹性系数。我们可以用能量守恒定律讨论方程 (12-1) 的解，也可以从该方程直接得出其解。此方程告诉我们， u 对 t 的二次导数是此函数本身乘以一个负的常数。在实数范围内，只有余弦或正弦函数有此性质。因而我们可以直接写出其解为：

$$u = A_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2-2)$$

式中

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-3)$$

而常数 A_0 和 φ 可由初始条件 ($t=0$ 时刻的位移 u_0 和速度 V_0) 得出，由 $t=0$, $u=u_0$ 和 $\dot{u}=V_0$ ，得

$$u_0 = A_0 \cos \varphi \quad (2-4)$$

$$V_0 = -\omega A_0 \sin \varphi \quad (2-5)$$

由 (4) 和 (5) 两式即可求得

$$\begin{cases} A_0 = \sqrt{u_0^2 + \frac{V_0^2}{\omega^2}} \\ \varphi = \arctg \frac{-V_0/\omega}{u_0} \end{cases} \quad (2-6)$$

至于 φ 角所在的象限 (这不能由正切值唯一地确定)，则应再由 $\sin \varphi$ 或 $\cos \varphi$ 的符号确定。位置与时间的关系可用 (2) 式的形式表示的运动称为简谐振动 (又称简谐运动)。

(2) 简谐振动的频率、振幅、周期、相位

振动的特征之一是运动具有周期性。完成一次完整的振动所经历的时间称为周期，用 T 表示。所谓完成一次完整的振动所经历的时间，也就是从一个振动状态到另一个完全相同的振动状态所经

历的最短时间，振动状态由位置 u 和速度 V 共同确定，对简谐振动，由 (2) 式及

$$V = \dot{u} = -\omega A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-7)$$

按照周期定义，应有

$$\begin{aligned} A_0 \cos(\omega t + \varphi) &= A_0 \cos[\omega(t+T) + \varphi] \\ -\omega A_0 \sin(\omega t + \varphi) &= -\omega A_0 \sin[\omega(t+T) + \varphi] \end{aligned}$$

同时满足以上两方程的 T 的最小值应为 $2\pi/\omega$ ，所以

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2-8)$$

单位时间内完成的振动次数称为频率，用 f 表示，单位为赫兹 (Hz)。显然

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2-9)$$

而 ω 与 f 有简单关系：

$$\omega = 2\pi f \quad (2-10)$$

ω 称为圆频率或角频率，对于弹簧振子，由 (3) 式，可得以下两式

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-11)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2-12)$$

可见，弹簧振子的频率（或周期）由其固有参量 k 和 m 决定，而与初始条件无关，故称为振子的固有频率。

A_0 称为振幅，是振动位移的最大值，它确定振动的范围。

尽管决定简谐振动状态的物理量——位移 u 和速度 V 都随时间变化，但它们都由宗量 $\omega t + \varphi$ 决定。不论 t 为何值，只要它对应的 $\omega t + \varphi$ 相同，振动的状态就相同。所以 $\omega t + \varphi$ 是决定简谐振动状态的物理量，称为相位。单位是弧度 (rad)， φ 称为初相位，即 $t=0$ 时刻的相位，因而角频率 ω 也就是相位的变化速率，其单位是弧度每秒 (rad/s)。由于三角函数以 2π 为周期，所以相位比时间更直接而清晰地反映振子运动的状态。

与频率不同，振幅与初相位不是振子的固有性质，而由初始条件决定。

(3) 弹簧振子的能量

弹簧振子的机械能是守恒的（其值由初始条件决定），但其动能和势能都随时间变化，即

$$\text{动能} \quad E_k = \frac{1}{2} m \dot{u}^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \quad (2-13)$$

$$\text{和势能} \quad E_p = \frac{1}{2} k u^2 = \frac{1}{2} k A_0^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (2-14)$$

但 $\frac{k}{m} = \omega^2$ ，故势能又可写成

$$E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 u^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A_0^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (2-15)$$

于是总能量

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A_0^2 = \frac{1}{2} k A_0^2 \quad (2-16)$$

简谐振动是质点振动的最基本形式。质点的任何复杂振动形式都可以通过傅立叶变换分解成若干个（周期振动）或无数个（非周期运动）简谐振动的叠加。

在声波透射法测桩时，声波仪的接收波形就是接收换能器附近混凝土质点的振动状态，这个波形一般不是谐振动，但是经过傅立叶变换可将它分解为若干谐振动的叠加。

2.4 弹性介质中波的产生与传播

在弹性介质中，质点间由弹性力相互联系着。任何一个质点作机械振动时，由于弹性力的相互作用，必将引起与其相邻的质点产生振动。以此类推，这种连锁反应在宏观上表现为运动形式（振动）以一定的速度在介质内向某一方向（或多个方向）传播，从而形成了机械波，这种运动状态的传播速度称为波速。如果介质具有弹性性质，则称为弹性波。因此机械波就是机械振动在介质中的传播。

显然，机械波的产生必须具备两个条件：

- 作机械振动的波源
- 传播机械振动的介质

例如，在一光滑水平面上放置一弹簧，用手锤沿弹簧纵轴线方向迅速敲击弹簧的左端（如图 3(a)），受手锤作用的弹簧左端首先被压缩（如图 3(b)），随后这个压密区将以一定的速度沿弹簧轴线向右移动（如图 3(c)），从而在弹簧上形成了机械波，受手锤作用的弹簧左端可视为波源，弹簧为波的传播介质，压密区由左向右移动的速度为波速。

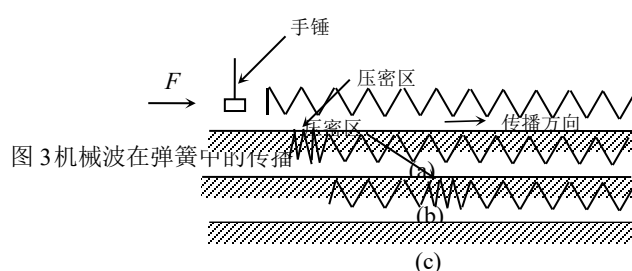


图 3 机械波在弹簧中的传播

2.5 波的类型

根据介质中质点振动方向与波的传播方向的差别可将机械波分为若干种类型。

(1) 纵波

介质质点的振动方向与波的传播方向平行，这种波称为纵波。例如在空气、水中传播的声波就是纵波，又称为 P 波。图 3 就是在弹簧中传播的纵波。

纵波的传播是依靠介质时疏时密使介质的局部容积发生变化引起压强的变化而传播的，因此和介质的体积弹性相关。任何弹性介质都具有体积弹性，所以纵波可以在任何固体、气体、液体中传播。

(2) 横波

介质质点的振动方向与波的传播方向垂直,这种波称为横波,又称为 S 波。

横波的传播是依靠使介质产生剪切变形（局部形状变化）引起的剪应力变化而传播的，它和介质的剪切弹性相关。由于液体、气体形状变化时，不能产生抗拒形变的剪应力，因此，液体和气体不能传播横波，只有固体才能传播横波。

(3) 表面波

固体介质表面受到交替变化的表面张力作用，介质表面质点发生相应的纵向振动和横向振动，结果使质点做这两种振动的合成运动，即绕其平衡位置作椭圆运动，该质点的运动又波及相邻质点，而在介质表面传播，这种波称为表面波，又称 R 波。如表 2 所示。

表面波传播时，质点振动的振幅随深度的增加迅速减少，当深度超过 2 倍的波长时，振幅已很小了。表面波也只能在固体中传播。

自然界中的机械波还有多种复杂形式，如兰姆波、扭转波等。但根据运动学的叠加原理，任何复杂的波动都可以看成是纵波和横波的叠加。因此，纵波和横波是最基本的机械波。

2.6 波的形式

声波在无限大且各向同性的介质中传播时，其形式（波形）是根据波在传播过程中某一瞬间到达各质点的几何位置所联成的面（波阵面）的形状来区分的。

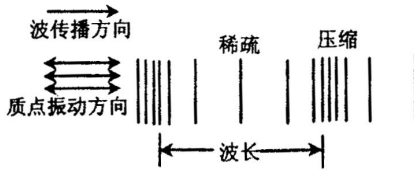
波阵面：介质中振动相位相同的点的轨迹称为波阵面，在波的传播过程中，波阵面有任意多个。

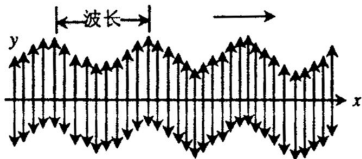
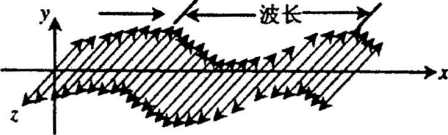
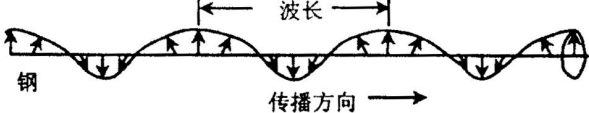
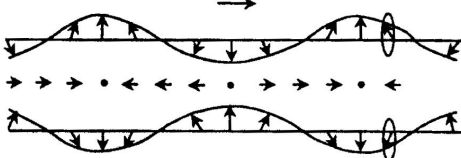
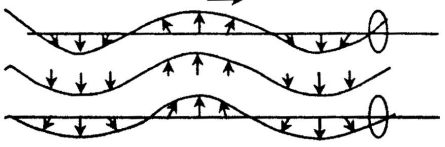
波前：最前面的波阵面称为波前，某一时刻波前只有一个。

波线：自波源出发且沿着波的传播方向所画的线称为波线。在各向同性介质中，波线与波阵面是垂直的。

- 平面波：波阵面为平面的波，如图 4(a)。
- 球面波：波阵面为球面的波，如图 4(b)。
- 柱面波：波阵面为同轴圆柱面的波，如图 4(c)。

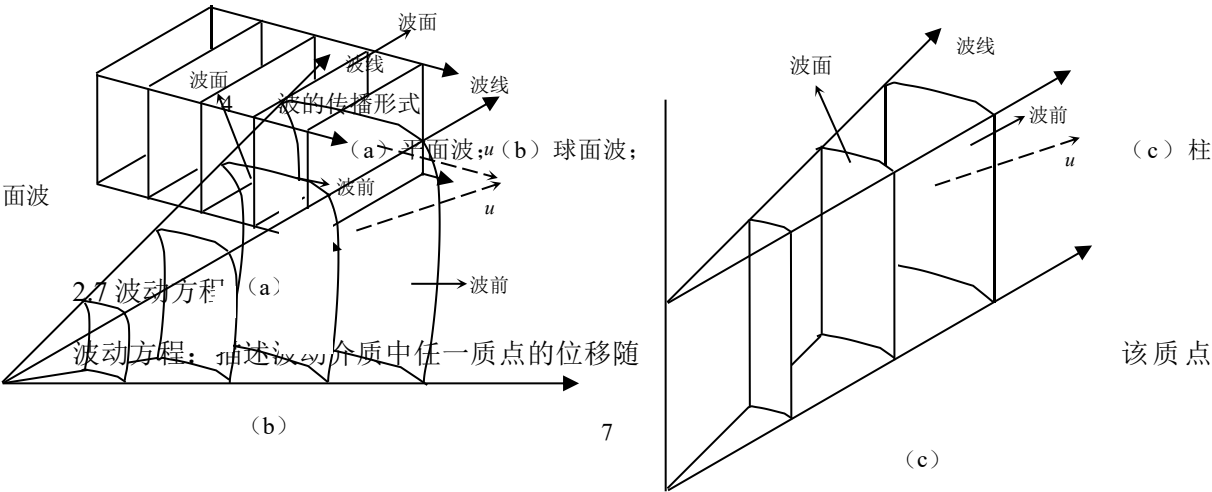
表 2 常见机械波的类型与特点

波形	质点振动与波的传播方向	传播介质
纵波（压缩波）		液体 固体 气体

横波 (剪切波)	垂直偏振 (SV 波)		固体 特别粘的薄液层
	水平偏振 (SH 波)		
瑞利波			沿自由边界传播，界面一侧为弹性力很强、厚度远大于波长的固体，另一侧可为分子间弹性力可忽略的介质
蓝姆波	对称型		厚度为几个波长的复合材料或金属板
	反对称型		

3 波的传播形式及特性

波的形式	特性
平面波	1. 无限大平面（即波长与声源尺寸相比可忽略不计）作谐振动时，在各向同性的弹性介质中传播的波。 2. 从无穷远的点状声源传来的波，其波振面可近似为平面，也可视为平面波。 3. 如不考虑介质吸收波的能量，声压不随与声源的距离而变化。
球面波	1. 声源为点状球体，波阵面是以声源为中心的球面。 2. 声强与距声源距离的平方成反比。
柱面波	1. 声源为一无限长的线状直柱，波阵面是同轴圆柱面。 2. 声强与距声源距离成反比。
活塞波	1. 声源尺寸既不能看成很大（无限大平面），也不能看成很小（点源）。 2. 所发出波的形式介于平面波与球面波之间。



的空间位置和时间变化规律的数学物理方程，称为波动方程。

(1) 平面余弦波在理想介质中的波动方程

在这里，理想介质是指无吸收的各向同性弹性介质。

假设有一平面波在介质中沿 x 方向传播，由于是平面波，所以在与 x 轴垂直的任意平面上，所有质点运动状态相同。如果在 $x = 0$ 的平面上，质点振动方程为

$$u = A_0 \cos(\omega t) \quad (2-17)$$

式中 u ——质点位移；

A_0 ——质点振幅；

ω ——圆频率；

t ——时间。

若声波的传播速度为 v ，则经时间 τ 后，声波传播距离为 $x = v\tau$ ，即在 x 处的平面上各质点的振动，比 $x = 0$ 平面上的质点振动滞后了一段时间 $\tau = x/v$ （如图 12-5 所示），因为介质是理想弹性介质，各质点振幅不变， x 处质点振动规律为：

$$u = A_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-18)$$

该方程描述了距波源为 x 的平面上各质点在任何时刻 t 的运动规律，因此，它就是平面余弦波在理想介质中的波动方程。

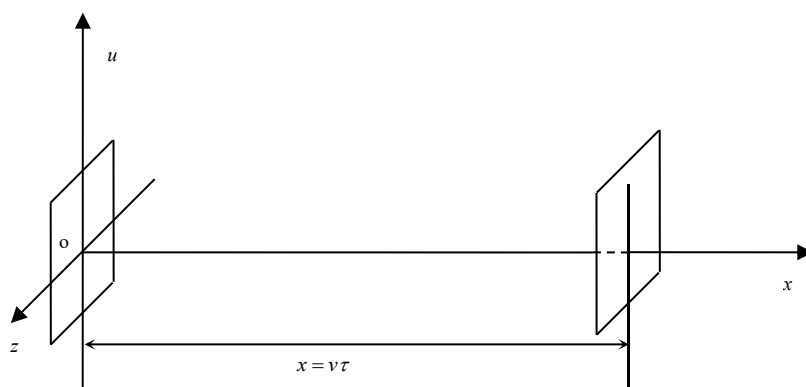


图 5 平面余弦波沿 x 轴传播

波在一个周期 T 内所传播的距离称为波长，用 λ 表示，因此

$$\lambda = vT \quad (2-19)$$

周期与频率互为倒数，所以

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2-20)$$

对于球面波和柱面波，波向空间发散传播，即使是在理想介质中（介质不吸收能量），各波阵面的能量流密度也将随着波阵面与波源距离的增大而减小，因此介质中质点的振幅将随着与波源距离的增大而减小。

下面我们以球面余弦波为例推导其波动方程：

由于介质不吸收能量，因此，余弦波通过各波阵面的平均能量流是相等的。

设距波源单位距离的波阵面上质点振幅为 A_0 ，距波源距离为 r 的波阵面上质点振幅为 $A_0(r)$ ，质点的振动能量与其振幅 A_0 的平方成正比，所以有 $4\pi \times 1^2 \times A^2 = 4\pi \times r^2 \times A^2(r)$ ，因此 $A_0(r) = \frac{A_0}{r}$ 。所以球面余弦波在理想介质中的波动方程为

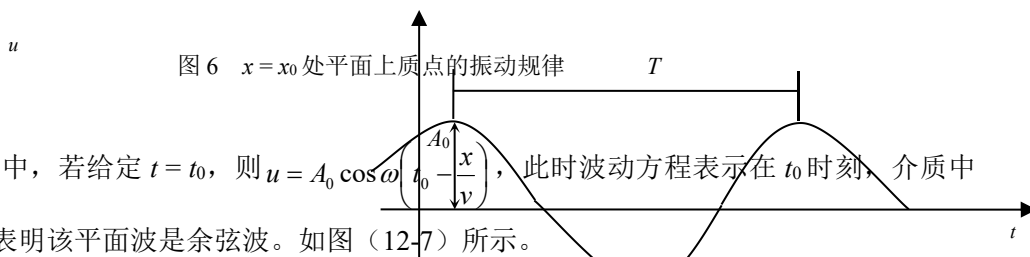
$$u = \frac{A_0}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad (2-21)$$

同理可得，柱面余弦波在理想介质中的波动方程为：

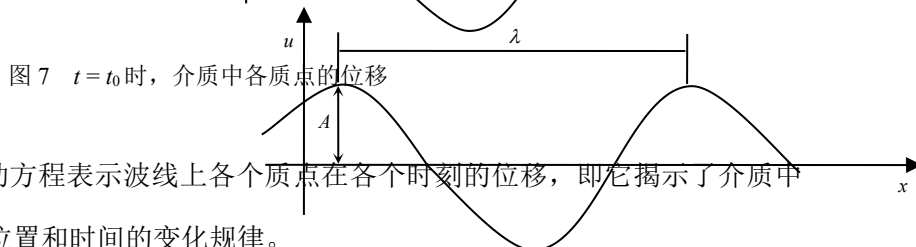
$$u = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad (2-22)$$

(2) 波动方程的物理意义

在式 (18) 中含有两个自变量 x 、 t ，如果给定 $x=x_0$ ，则 $u = A_0 \cos \omega \left(t - \frac{x_0}{v} \right)$ 表示 x_0 处平面上各质点的振动规律，即该平面上所有质点做简谐振动，如图 6 所示。



在式 (12-18) 中，若给定 $t = t_0$ ，则 $u = A_0 \cos \omega \left(t_0 - \frac{x}{v} \right)$ ，此时波动方程表示在 t_0 时刻，介质中各质点的位移，它表明该平面波是余弦波。如图 (12-7) 所示。



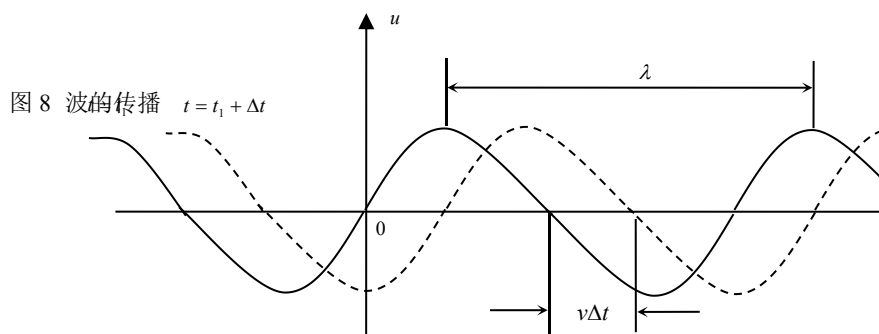
如果 t 和 x 都在变化，则波动方程表示波线上各个质点在各个时刻的位移，即它揭示了介质中任一质点的位移随该质点的空间位置和时间的时间的变化规律。

在空间坐标中，某一时刻 t_1 得到一条余弦曲线，另一时刻 $t_1 + \Delta t$ 得到另一条余弦曲线，如图 8 所示。

当 $t = t_1$ 时，各质点位移为 $u = A_0 \cos \omega \left(t_1 - \frac{x}{v} \right)$

当 $t = t_1 + \Delta t$ 时，各质点位移为 $u = A_0 \cos \omega \left(t_1 + \Delta t - \frac{x}{v} \right)$

比较上两式可知，在 $t = t_1 + \Delta t$ 时，位于 $x + v\Delta t$ 处的质点位移恰等于 $t = t_1$ 时 x 处质点位移，即整个波形在 Δt 时间内向前移动了 $v\Delta t$ ，波速 v 就是整个波形向前行进的速度。波动的频率、相位、振幅也就是波动介质中质点振动的频率、相位、振幅。



2.8 弹性固体介质中声速

(1) 弹性固体介质中声速的影响因素

固体介质中声波的波速取决于波动方程的形式和介质的弹性常数，而波动方程的形式则取决于波的类型和介质的边界条件，因此，声波在固体介质中的传播速度主要受下列三方面因素的影响：

(a) 波的类型：由于不同类型的波在固体介质中的传播机理不同，也就导致了传播速度的差异。

(b) 固体介质的性质：对于弹性介质，主要取决于它的密度、弹性模量、泊松比。这是影响波速的内在因素，介质的弹性特征愈强（ E 或 G 愈大， ρ 愈小），则波速愈高。

(c) 边界条件：实际上就是固体介质的横向尺寸（垂直于波的传播方向上的几何尺寸）与波长的比值，比值越大，传播速度越快。

假设在垂直于波的传播方向上，介质的几何尺寸为 $a \times b$ ，声波的波长为 λ ，则

- 1) $a \gg \lambda, b \gg \lambda$ ，介质可视为无限大，波速最高。
- 2) $a \ll \lambda, b > \lambda$ ，介质可视为薄板，此时波速小于无限大介质的波速。
- 3) $a \ll \lambda, b \ll \lambda$ ，介质可视为杆件，波速最小。

(2) 弹性固体介质中各类声波在不同边界条件下的波速

依据声波在介质中的波动方程和介质的边界条件可推导出各类声波在介质中的波速。

(a) 纵波波速

- 1) 在无限大固体介质中传播的纵波声速

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2-23)$$

式中 E ——介质杨氏弹性模量；

μ ——介质泊松比；

ρ ——介质密度。

2) 在薄板(板厚远小于波长)中纵波声速

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{(1-\mu^2)}} \quad (2-24)$$

3) 在细长杆(横向尺寸远小于波长)中纵波波速

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-25)$$

(b) 横波波速

在无限大固体介质中传播的横波波速:

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-26)$$

式中 G ——介质剪切弹性模量。

(c) 表面波波速

在无限大固体介质表面传播的表面波声速:

$$v_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-27)$$

对于混凝土, 取 $\mu=0.20 \sim 0.30$, 则 $v_R \approx 0.9v_s$, $v_p = (1.81 \sim 2.08)v_R$ 。所以, 在混凝土中 $v_p > v_s > v_R$ 。

(3) 基桩低应变反射法测试波速与声波透射法测试波速的比较

在基桩低应变检测和声波透射法检测中均采用纵波, 两者波的类型是相同的, 桩身材料是相同的, 不同之处主要有以下三个方面:

(a) 波长和边界条件

低应变试验, 应力波波长量级为米, 应力波沿桩纵轴线传播, 在垂直于波的传播方向上的横向尺寸为桩径(0.8~1.4m), 纵向尺寸桩长较长, 桩可视为杆件, 声速 v_1 近似杆件波速。

声波透射法试验中, 波长量级为厘米, 在垂直于波的传播方向上桩的横向尺寸为桩纵剖面, 明显大于波长, 声速 v_2 接近体波波速。因此, v_2 明显大于 v_1 。

(b) 声波频率

低应变冲击脉冲主频在几百 Hz, 声波脉冲主频高达 30~50kHz。

在相同介质中, 高频声波波速高于低频声波波速, 即存在所谓“频散”现象。

(c) 测距

低应变若以桩底反射信号和桩长反算波速，则“测距”为 2 倍桩长。

声波透射法测距比桩径略小，明显小于桩长，声波在其传播过程中有“频漂”现象，即随着传递距离的增加，主频降低，传播速度减慢，测试波速减小。因此测距的差异也加大了反射波法波速与声波透射法波速的差异。

上述三个影响因素中，波长和边界条件的影响是根本的。

2.9 波的能量

(1) 能量

扰动在介质中传播时，介质各部分发生振动，因而具有动能；同时因为各部分位移不同，介质各质点相对位形发生变化，因而具有势能。扰动由近及远地传播，能量也由近及远地传播，所以波的传播过程也是能量的传播过程。下面，我们以弹性杆中的简谐纵波为例来讨论波的能量。取截面积为 A ，长为 Δx 的体积元 $\Delta V = A\Delta x$ 作为考察对象，如图 9(a)。设介质的密度为 ρ ，此体积元在波扰动的某一瞬时的动能为

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \rho \Delta V \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \quad (2-28)$$

为了求弹性势能，先考察一段长为 l 、截面积为 A 的弹性介质发生形变时具有的弹性势能，这势能就是外力在迫使介质形变的过程中克服弹性力所作的功，在伸长 Δl 的过程中，外力 F 所作的功（即势能）为

$$E_p = \int_0^{\Delta l} F dx = \int_0^{\Delta l} EA \frac{x}{l} dx = \frac{EA}{l} \frac{(\Delta l)^2}{2} = \frac{1}{2} EA l \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2$$

其中， E 为弹性模量， $\Delta l/l$ 为相对形变，对我们所考察的体积元来说，相对形变即 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 。故所考察体积元的势能为

$$\Delta E_p = \frac{1}{2} E \Delta V \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \quad (2-29)$$

将简谐波运动方程 $u = A_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 代入，不难求得

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \rho \Delta V \omega^2 A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-30)$$

$$\Delta E_p = \frac{1}{2} E \Delta V \frac{\omega^2}{v^2} A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-31)$$

由于

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$

所以

$$\Delta E_k = \Delta E_p = \frac{1}{2} \rho \Delta V \omega^2 A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-32)$$

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \rho \Delta V \omega^2 A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-33)$$

以上两式表明，在波传播过程中，介质中任一质元的动能和势能都随时间变化，动能最大的时刻势能亦最大，动能为零时势能也为零，动能与势能的总和即机械能也随时间变化。波扰动时，介质的势能取决于所考察质元的形变。从波动曲线（图 9(b)）可以看出，在 a 处，质点已达最大位移，动能为零，但相邻质点间的相对位移最小，该处质元几乎无形变，故势能也为零。而在 b 处，质点通过平衡位置，速度最大，动能最大，而其时相邻质点间的相对位移最大（最密集），质元的形变也最大，故势能也最大， c 处与 a 处相仿， d 处与 b 处相仿（但 d 处质点最稀疏）。

这与单个谐振子的情形不同，单个谐振子的势能最大时动能最小，动能最大时势能最小，两者之和为常量，即机械能守恒。在波的传播过程中，动能与势能的变化同相位，说明介质的每个质元的机械能并不守恒。这是因为在波的传播过程中，介质的任一质元与其邻近的质元之间在不断进行能量交换，机械能不守恒表明波的传播过程也是能量的传播过程。

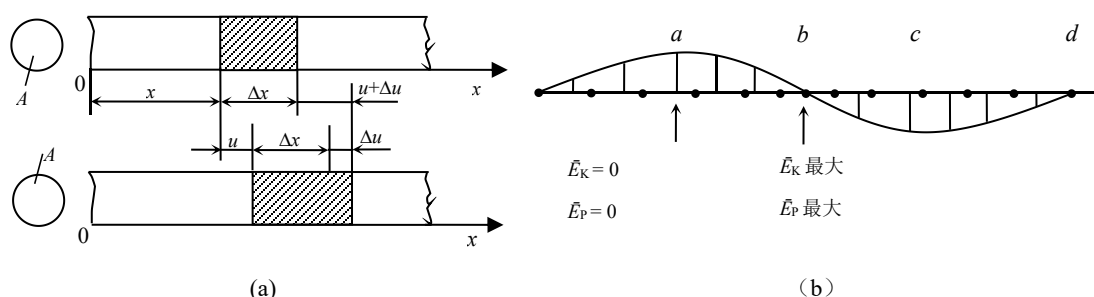


图 9 一维杆中纵波的能量及能量密度

(a) 纵波在杆中传播； (b) 波扰动到达的地方，动能与势能同相位

(2) 能量密度

波的能量与所考察介质元的体积有关。通常用单位体积的介质所具有的能量即能量密度来表示波的能量在介质中的分布情况。动能密度和势能密度为：

$$\bar{E}_k = \bar{E}_p = \frac{\Delta E_k}{\Delta V} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-34)$$

波的能量密度为

$$\bar{E} = \frac{\Delta E}{\Delta V} = \rho \omega^2 A_0^2 \sin^2 \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2-35)$$

波的能量密度是随时间而变化的，通常取其在一个周期内的平均值。

正弦的平方在一个周期内的平均值为

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{T\omega} \int_0^T \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\frac{2\pi}{\omega}(\omega)} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin^2 \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{2}(2\pi) - 0 \right] = \frac{1}{2}$$

故知：能量密度在一个周期内的平均值为

$$\frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega^2 \quad (2-36)$$

单位时间内通过介质中某面积的能量称为通过该面积的能流。在单位时间内，通过垂直于波线的介质面积 A 的能量等于体积 $A \times v$ 中的能量。这个能量是周期性变化的，通常取其平均值，单位时间内通过 A 面的平均能流为

$$\frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega^2 A \times v \quad (2-37)$$

以上对能量的讨论是针对纵波而论的，但其结论，包括（32）至（35）式，对横波也成立。对其他的波（如弦中的波、声波等），动能、势能的具体形式不同，但动能与势能同相位的结论仍成立。

2.10 声场

充盈声波的介质所占据的空间称为声场。声压、声强、声阻抗是描述声场特征的基本物理量。

（1）描述声场的特征量

下面仍以平面余弦波在弹性固体介质中传播形成的声场为例介绍声场的特征物理量。

（a）声压

声场中某一点在某一瞬间所具有的压强 P_1 与没有声场存在时同一点的静态压强 P_0 之差称为声压（单位为帕）。

若在声场中取出一体积元，如图 10 所示。该体积元的质量为 m ，长度为 dx ，与声传播方向垂直的截面积为 dA ，并假设面积元 dA 上的压强为 P ，则面积元所受的力为 $F=PdA$ ，根据动量定理

$$Fdt = mV \quad (2-38)$$

式中 V ——体积元振动速度，当体积元很小时，即为质点振动速度

$$V = \dot{u} = -A_0 \omega \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

假定介质密度为 ρ ，则 $m=\rho dx dA$ ，有

$$PdAdt = \rho dA dx \left[-A_0 \omega \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

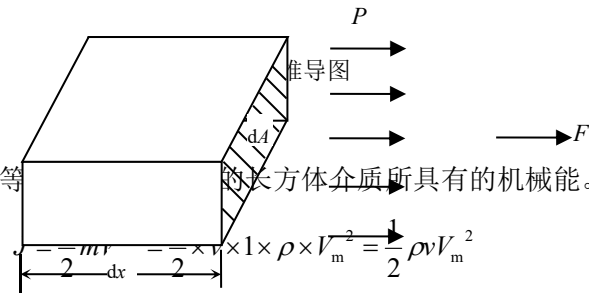
因 $dx/dt=v$ (波速)，所以

$$P=\rho v V \quad (2-39)$$

(b) 声强

将垂直于声波传播方向上单位面积、单位时间内通过的声能量（即在垂直于声传播方向单位面积上的平均能流）称为声强，通常用 J 表示。如图 11 所示。在单位时间 t 内，声波传播的距离为 $v \times 1 = v$ 。

依据声强的定义，声强应等于长方体介质所具有的机械能。因此，


$$J = \frac{1}{2} \rho v V_m^2 = \frac{1}{2} \frac{P_m^2}{P_v} = \frac{1}{2} \rho v A_0^2 \omega^2 \quad (2-40)$$

式中 m ——长方体介质的质量；
 ρ ——介质密度；
 v ——波速；
 V_m ——质点的最大速度。

所以

$$J = \frac{1}{2} \rho v V_m^2 = \frac{1}{2} \frac{P_m^2}{P_v} = \frac{1}{2} \rho v A_0^2 \omega^2 \quad (2-41)$$

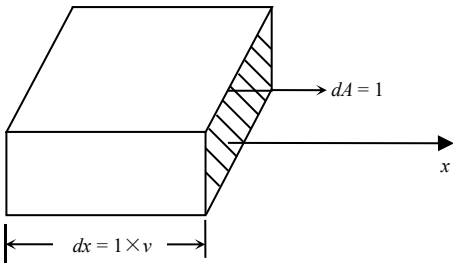


图 11 声强公式推导图

(c) 声阻抗率

声学中，把介质中某点的声压与质点振动速度的比值 P/V 称为声阻抗率，用符号 Z 表示 ($Z = \rho v$)，它仅取决于介质的特性，又称为特性阻抗。

显然，声压一定时， ρv 越大， V 越小。

ρv 越小， V 越大。

当振动速度 V 一定时， ρv 越大，质点声压越大。

表 3 给出了声波透射法检测混凝土质量时常遇见的材料的特性阻抗。

表 3 声波透射法常见材料的弹性模量、波速和特性阻抗

项目 材料	弹性模量 (10^3MPa)		泊松比 μ	密度 (t/m^3)	声速 (m/s)				特性阻抗 Z
	E	G			v_p (无限大介质)	v_p (薄板)	v_p (杆)	v_s	

									(10 ⁴ g/(cm ² ·s))
钢	210	81	0.29	7.8	5940	5420	5190	3220	470
铜	124	46	0.34	8.9	4560	3900	3670	2250	445
铝	70	26	0.31	2.7	6320	5410	5090	3100	170
玻璃	70	28	0.25	2.5	5800	5460	5300	3350	129
橡胶	0.002	0.0007	0.50	0.93	1040	53	46	27	9.7
有机玻璃	5.5	2.0	0.34	1.18	2640			1300	31
环氧树脂	3.8			1.16					
铅钛酸铅	84		0.33	7.5				3375	
陶瓷	59	24	0.23	2.4	5300	5077	4940	3100	130
混凝土*	44	18	0.20	2.4	4500	4368	4280	2756	108
石灰石	72	28	0.31	2.7	6130	5452	5180	5200	166
淡水(20℃)				0.998	1481				14.8
海水				1.026	1500				15.4
空气(20℃)				0.0012	343				0.004

*混凝土组成不同，其对应的各种声参数都有差别，表中所列数值系一般混凝土参考值。

(2) 声源辐射声场的指向性

声波在各种介质中的传播问题实际上是声场问题，声场是由声源产生的。实际使用的声源在介质中建立的声场一般都有一定的指向性，声源的指向性是指声源发射响应的幅值随方位角的变化而变化的特性。

声源的指向性产生的原因是声源各部分发射的声波在自由场远场区中干涉叠加的结果。

研究声源的指向性可通过将声源辐射面的每一点看作点声源，声源在介质中形成的声场就是这些点声源形成的声场的叠加，通过亥姆霍兹-基尔霍夫积分计算，就可以得到声源的辐射声场。点声源所产生的声波是没有指向性的球面体，所有这些点源形成的声场相互叠加，在发射空间的远场便形成了指向性。

下面我们以声波透射法检测中常用的平面换能器为例来讨论声源辐射声场的指向性。

平面换能器的辐射面为一圆盘，圆盘上每一微面积元都可以看成一点声源，把所有这些点源在介质中产生的声压叠加，就得到了平面换能器在声介质中辐射形成的声场中各点的声压。

下面的结论是基于以下两个条件得到的：(1) 声源发射的是连续余弦波。(2) 传声介质为液体。脉冲波在固体介质中的声场相当复杂，但下面这些结论是研究固体声场的基础。

(a) 圆盘声源轴线上的声压

声源轴线上距声源距离为 x 处的声压幅值 p 的变化有如下公式^[8]

$$p = 2p_0 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{D^2}{4} + x^2} - x \right) \right] \quad (2-42)$$

式中 p_0 ——距声源距离为零处的声压；

D ——圆盘声源直径；

λ ——波长。

公式 (42) 可用图 12 表示。从图中可看到，在距离 x 小于某一特定的值 N 时，声压有若干个极大值。这是由于声源上各点源辐射到轴线上一点的声波因波程差引起的相互干涉造成的，这一范围的声场叫近场。 $x > N$ 时，声压随 x 的增加而衰减，这个范围叫远场。近场区的长度 N 取决于声源的尺寸和声波波长。由 (32) 式可推导出^[8]

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} - \frac{\lambda}{4} \quad (2-43)$$

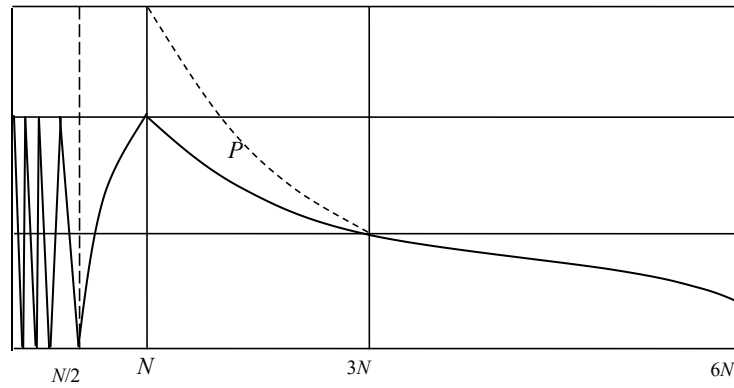


图 12 圆盘声源轴线上的声压

近场区声压变化复杂，在检测时应避开这一区域。

图 12 还给出了声源为点源情况下声压变化线（虚线）。当 $x > 3N$ 时，圆盘声源与点状声源辐射的球面波声场接近。

(b) 圆盘声源的指向性

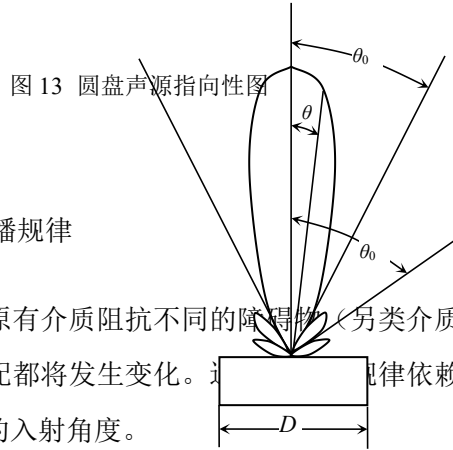
前面讨论的是圆盘声源轴线上的声场。在此方向上声压最大，而偏离轴线一定角度时声压即减小。根据圆盘上各微小声源辐射的声压叠加的方法可计算出离圆盘声源足够远处声场的变化情况。若用极坐标表示声压比（偏离轴线某一角度 θ 时的声压与轴线上的声压之比）与偏离角度 θ 的关系，可得到一形象地表征声源指向性图形——指向性图案。如图 13。从图中可以看到，随着偏离角度 θ 的增大，声压比迅速减小。到某一偏离角 θ_0 时，声压比为零。此时的偏离角 θ_0 称为半扩散角。 θ_0 的值可按下式计算^[8]

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(1.22 \frac{\lambda}{D} \right) \quad (2-44)$$

随着角度 θ 再增大，声压比减小并重复交替变化，其间出现若干零值。

从实用角度考虑，认为整个声束限定在 $2\theta_0$ 范围内，并称这个区域为声波的瓣，其余有声压分布的区域称为声波的副瓣。

在混凝土声波检测中所采用的是低频声波，半扩散角很大，指向性差，在传播一定距离后已近于球面波。



2.11 声波在两种介质界面上的传播规律

声波在介质中传播过程中，遇到与原有介质阻抗不同的障碍物（另类介质）时，在两种介质的界面上声波的传播规律、声波能量的分配都将发生变化。这规律依赖于声波波长和障碍物尺寸的比率、两种介质的特性以及声波的入射角度。

- a) 如果障碍物的尺寸远大于波长，则声波在两种介质的界面处发生反射、折射等现象。
- b) 如果障碍物的尺寸与波长相近，则将发生显著的绕射现象。
- c) 当障碍物的尺寸比波长还小时，声波的大部分能量可绕过障碍物，少部分能量向障碍物四周散射。
- d) 如果障碍物为刚性球状物（直径为 d ），且 $kd \gg 1$ （ $k=2\pi/\lambda$ ，角波数），则障碍物形成一个新波源将声波能量向四周散射，混凝土中的粗骨料就可看作是声波散射源。

混凝土是一种多种材料的聚合体，在其内部存在多种声学界面，声波在混凝土中的传播是一个非常复杂的声学现象，研究声波在异质界面上的传播规律对于混凝土质量的声波检测是有重要意义的。

(1) 声波的反射与折射

(a) 反射定律

声波从一种介质（ $Z_1=\rho_1v_1$ ）传播到另一种介质（ $Z_2=\rho_2v_2$ ）时，在界面上有一部分能量被界面反射，形成反射波，如图（14）所示。

入射波波线及反射波波线与界面法线的夹角分别为入射角和反射角，入射角 α 的正弦与反射角 α_1 的正弦之比，等于波速之比，即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1} = \frac{v_1}{v_1'} \quad (2-45)$$

当入射波和反射波的波型相同时， $v_1=v_1'$ ，所以

$$\alpha = \alpha_1 \quad (2-46)$$

(b) 折射定律

声波的部分能量将透过界面形成折射波，折射波线与界面法线的夹角为折射角。入射角 α 的正弦与折射角 β 的正弦之比，等于入射波在第一种介质中的波速 v_1 与折射波在第二

种介质中的波速 v_2 之比，即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2-47)$$

(c) 反射率

反射波声压 P' 与入射波声压 P 之比，称为反射率 γ ，

$$\gamma = \frac{P'}{P} \quad (2-48)$$

γ 的大小与入射波角度、介质声阻抗率及第二种介质的厚度有关。

当第二介质厚度很大时，

$$\gamma = \frac{Z_2 \cos \alpha - Z_1 \cos \beta}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta} \quad (2-49)$$

如果这时声波垂直入射，即 $\alpha = \beta = 0$ 时，则上式可简化为

$$\gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2-50)$$

当第二介质为薄层时，

$$\gamma = \left[\frac{\frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right)}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-51)$$

式中 ζ ——声阻抗之比，即 $\zeta = Z_1/Z_2$ ；

λ ——波长；

δ ——第二种介质的厚度。

(d) 反射系数

反射声强 J_1 与入射声强 J 之比，称为反射系数 f_R 。其计算公式为

$$f_R = \frac{J_1}{J} = \left[\frac{Z_2 \cos \alpha - Z_1 \cos \beta}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta} \right]^2 \quad (2-52)$$

若为垂直入射，即 $\alpha = \beta = 0$ ，则

$$f_R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 = \gamma^2 \quad (2-53)$$

(e) 透过率

透过声压 P_2 与入射声压 P 之比，称为透过率 R_T ，即

$$R_r = \frac{P_2}{P} \quad (54)$$

当第二介质很厚时，

$$R_r = \frac{2Z_2 \cos \alpha}{Z_2 \cos \alpha + Z_1 \cos \beta} \quad (2-55)$$

若为垂直入射，即 $\alpha=\beta=0$ ，则

$$R_r = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = 1 - \gamma \quad (2-56)$$

当第二介质为薄层时，

$$R_r = \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-57)$$

(f) 透过系数

透过声强 J_2 与入射声强 J 之比，称为透过系数 f_t ，其计算公式为：

$$f_t = \frac{J_2}{J} = \frac{4Z_1 Z_2 \cos \alpha \cos \beta}{(Z_1 \cos \beta + Z_2 \cos \alpha)^2} \quad (2-58)$$

垂直入射时，

$$f_t = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = 1 - \gamma^2 \quad (2-59)$$

(2) 声波在异质界面上的波形转换

当纵波从一固体介质射入另一个固体介质时，除了在两种介质中产生反射纵波和折射纵波外，还可能产生反射横波和折射横波（见图 12-15），在特定条件下还可能产生表面波，这些波的反射角和折射角与入射角的关系，均符合前述的反射定律和折射定律，即

$$\frac{v_{p1}}{\sin \alpha} = \frac{v_{p1}}{\sin \alpha_1} = \frac{v_{s1}}{\sin \alpha_2} = \frac{v_{p2}}{\sin \beta_1} = \frac{v_{s2}}{\sin \beta_2} \quad (2-60)$$

式中 α 、 α_1 、 β_1 ——分别为纵波的入射角、反射角和折射角；

α_2 、 β_2 ——分别为横波的反射角和折射角；

v_{p1} 、 v_{s1} ——分别为纵波和横波在第一介质中的声速；

v_{p2} 、 v_{s2} ——分别为纵波和横波在第二介质中的声速。

因为在固体介质中， $v_s < v_p$ ，所以 $\alpha_1 > \alpha_2$ ， $\beta_1 > \beta_2$ 。当 α 为一适当角度使 $\beta_1 \geq 90^\circ$ 时，在第二介质中将只存在横波，此时的入射角 α 称为第一临界角，当 α 继续增大，使 β_2 恰好等于 90° ，这时横波沿分界面

传播，即形成表面波，此时的入射角 α 称为第二临界角。这一现象可作为在试体中产生横波或表面波的方法之一。

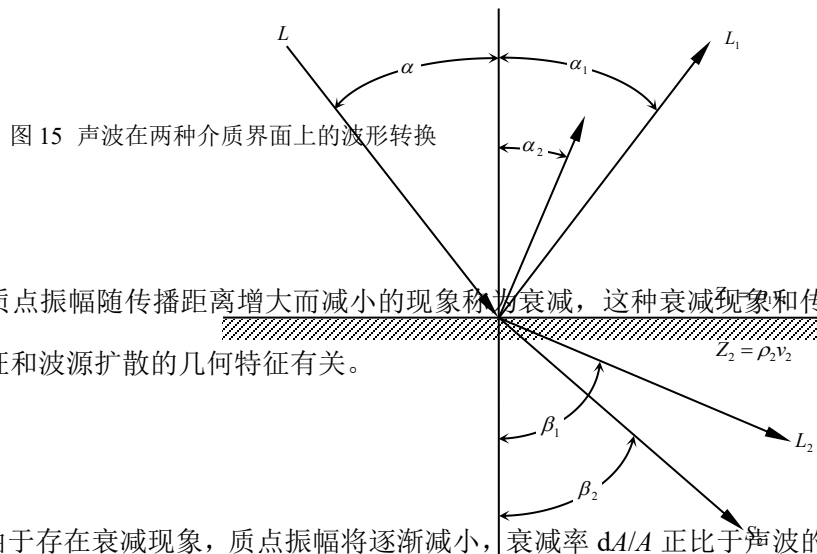


图 15 声波在两种介质界面上的波形转换

2.12 声波能量衰减

声波在介质中传播过程中质点振幅随传播距离增大而减小的现象称为衰减，这种衰减现象和传声介质的粘塑性、内部结构特征和波源扩散的几何特征有关。

(1) 声波的衰减系数

声波在某种介质中传播，由于存在衰减现象，质点振幅将逐渐减小，衰减率 dA/A 正比于声波的行进距离 dx ，以平面波为例，如图 16 所示。

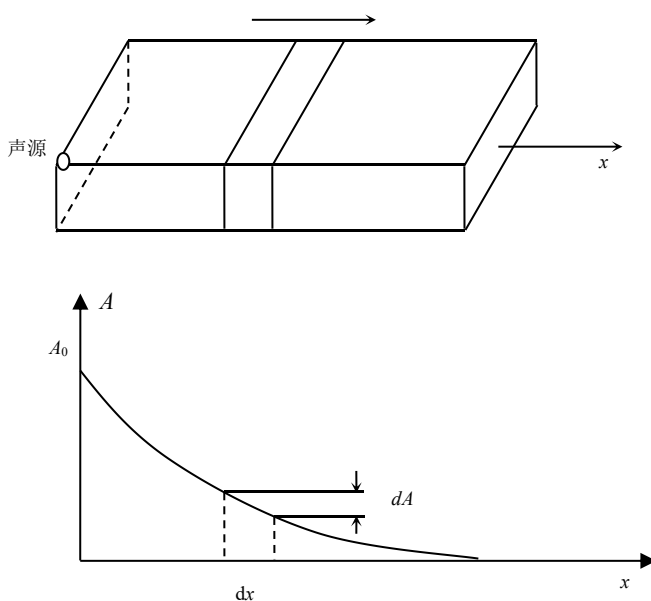


图 16 衰减系数的推导

$$dA_0(x) = -\alpha A_0(x) dx \quad (2-61)$$

由边界条件为 $A(x)|_{x=0} = A_{00}$ ，得到

$$A(x) = A_{00} e^{-\alpha x} \quad (2-62)$$

式中 A_{00} 、 $A_0(x)$ ——分别为声源振幅和 x 处振幅；

α ——衰减系数。

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \frac{A_{00}}{A} \quad (2-63)$$

式中 α 的量纲为 $[L]^{-1}$, x 的单位为 cm , $\ln A_{00}/A$ 为两个同量纲比值的自然对数, 称为奈培 (NP), α 的单位为 NP/cm 。

常用两个同量纲量的比值的常用对数来表示衰减, 称为分贝 (dB), 即

$$\text{分贝数(dB)} = 20 \lg \frac{A_{00}}{A} \quad (2-64)$$

当 $A_{00}/A=e$ 时, 分贝数为 $20 \lg e \approx 8.68 \text{dB}$, $1 \text{NP} = 8.68 \text{dB}$, 采用分贝为单位后, 衰减系数的单位为 dB/cm 。值得注意的是: 上述衰减系数是从平面波导出的, 它没有包含因波源的空间辐射性而引起的扩散衰减。

(2) 声波衰减的原因

按照引起声波衰减的不同原因, 可把声波衰减分成吸收衰减、散射衰减、扩散衰减三类, 前两类衰减取决于介质的特性, 而后一类则由声源空间特征决定。

(a) 吸收衰减

声波在介质中传播时, 部分机械能被介质转换成其他形式的能量 (如热能) 而散失, 这种衰减现象称为吸收衰减。声波被介质吸收的机理是比较复杂的, 它涉及介质的粘滞性、热传导及各种弛豫过程, 声波吸收系数可以由下式来表述:

$$\alpha_a = \frac{\omega^2}{2\rho_0 C^3} \left[\frac{4}{3} \eta' + k_c \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i''}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \right] \quad (2-65)$$

式中

- α_a — 介质吸收衰减系数
- η' — 介质的切变粘滞系数
- k_c — 导热系数
- C_v — 定容比热
- C_p — 定压比热
- η_i'' — 第 i 种弛豫过程所引起的低频容变粘滞系数
- τ_i — 第 i 种弛豫过程的弛豫时间

当声波频率不太高时, $\omega \tau_i \ll 1$, α_a 大致与 ω^2 成正比, α_a/f^2 近似为常数, 这一关系, 对单原气体和大多数液体而言是合适的。

当声波频率很高时, $\omega \tau_i \approx 1$ 或 $\omega \tau_i \gg 1$ 时, α_a/f^2 不再保持为常数, 如混合气体, 高分子液体及某些固体介质属于这种情况。

一般认为: 固体介质吸收衰减系数 α_a 与声波频率的一次方、频率的二次方成正比^[8]。

(b) 散射衰减

声波在一种介质中传播时，因碰到另一种介质组成的障碍物而向不同方向产生散射，从而导致声波减弱（即声传播的定向性减弱）的现象称为散射衰减。

散射衰减也是一个复杂的问题，它既与介质的性质、状况有关，又与障碍物的性质、形状、尺寸及数量有关。当障碍物尺寸远小于波长时，散射衰减系数 α_s 与频率的四次方成正比；当障碍物尺寸与波长相近时， α_s 与频率平方成正比。

吸收衰减与散射衰减都取决于介质本身的特性，对于固体介质，其衰减系数为吸收衰减与散射衰减之和，衰减系数与声波频率 f 的关系可表述为：

$$\alpha = af + bf^2 + cf^4 \quad (2-66)$$

式中， a 、 b 、 c 是由介质性质以及散射物特性决定的比例系数。

(c) 扩散衰减

这类衰减主要缘于声波传播过程中，因波阵面的面积扩大，导致波阵面上的能流密度减弱。显然这仅仅取决于声源辐射的波形及声束状况（即声场的几何特征），而与介质的性质无关。且在这个过程中，总的声能量并未变化，若声源辐射的是球面波，因其波阵面面积随半径 r 的平方增大，故其声强随 r^{-2} 规律减弱。

同理，对柱面波，声强随 r^{-1} 规律衰减。这种因波形形成的扩散衰减，因不符合衰减规律且与介质的特征无关，不能纳入衰减系数中，应根据具体波形分析和单独计算。

常用的声波换能器，一般发射有限宽度的声束，对其扩散衰减的估算，应按照其指向性图，特别是指向性图案的主瓣波束宽度进行分析和计算。

(3) 级与分贝

在声学中，许多声学量常用其比值的对数来表示。这一方面是因为这些量（声压、声强、声功率）的变化范围很大，往往可达十几个数量级，因此使用对数标度要比绝对标度方便；另一方面，在可闻声波频段内，人耳听觉对这些声学量的响应，并不与这些量成线形关系，而是符合对数规律。对声波在介质中衰减量的度量也用对数标度比较方便，因此，在声学测试与计量中，广泛使用对数标度。

在声学中，一个量与同类基准量之比的对数称为级。它代表该量比基准量高出多少“级”。

为具体表示级的大小，必须明确规定对数的底、基准量，并给出相应单位。声学中常用的级的单位是“分贝”，符号为 dB。在前面分析声波衰减系数时，引入的“奈培”(NP)也是一种级的单位。

下面以分贝为单位，列出几个常用声学量的级的表达式和基准量。注意：各种量都是有效值。

(a) 声强级

定义：声强级为某声强 J 与基准声强 J_0 的比值，取以 10 为底的对数再乘以 10，即

$$L_I = 10 \lg \frac{J}{J_0} (\text{dB}) \quad (2-67)$$

式中 $J_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ 为基准声强，此值相应于正常人耳对 1kHz 声音刚刚能觉察其存在的声强值亦即 1kHz 声音的可听阈声强。

(b) 声压级

定义：某声压 P 与基准声压 P_0 的比值，取以 10 为底的对数再乘以 20，即

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} (\text{dB}) \quad (2-68)$$

式中 P_0 为基准声压，它有两个取值：

空气中 $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，此值是与基准声强 J_0 相对应的声压，即 1kHz 声音的可听阈声压，水中 $P_0 = 1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

显然可听阈声压级为零分贝，人耳对音频为 1kHz 的声音的可听阈为 0dB，微风轻拂树叶的声音为 14dB，在房间高声谈话（相距 1m 处）约为 68dB~74dB，交响乐队演奏（相距 5m 处）约为 84dB，飞机发动机的声音（相距 5m 处）约 140dB，人耳对声音强弱的分辨能力约为 0.5dB^[10]。

由于声压的有效值与质点振幅成正比，所以

$$L_p = L_A = 20 \lg \frac{A_0}{A_{00}} \quad (2-69)$$

分贝数为正，表示增益（放大）；分贝数为负，表示衰减。

一般来说，采用分贝进行对数运算，数学上是简便的，它可将各参数间的乘除关系简化为加减关系。例如，某声波仪放大器，第一级放大（电压）10 倍，第二级放大 100 倍，第三级放大 100 倍，总放大倍数为： $10 \times 100 \times 100 = 10^5$ 倍。若以分贝值计算，将各级放大倍数相乘变为分贝数相加： $20\text{dB} + 40\text{dB} + 40\text{dB} = 100\text{dB}$ ，总放大量为 100dB，即 10^5 倍。

2.13 声波在混凝土中传播的特点

前面关于声学原理的论述，大多是以各向同性的均匀弹性介质为基础的，而实际的工程材料大多为非均匀介质。比如混凝土实际上近似于一种粘弹塑性材料（其力学模型如图 17 所示）。

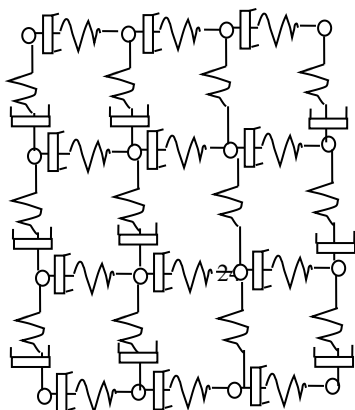


图 17 混凝土材料的力学模

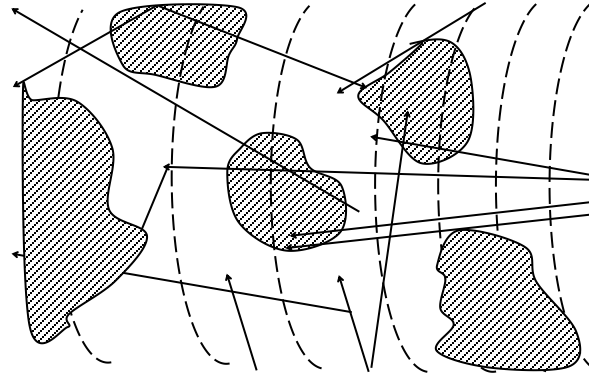


图 18 声波在混凝土中的传播状态示意图

在混凝土的声学检测中，我们的研究对象混凝土实际上是一种集结型复合材料，是多相复合体系，其内部存在着广泛分布的复杂界面，例如砂浆与骨料的界面、各种缺陷所形成的界面。因此，声波在混凝土中的传播状况要比在均匀介质中的传播复杂得多。如图 18 所示。

声波在混凝土中的传播状况有以下几个方面的特点：

(1) 声波能量衰减较大

由于混凝土中存在广泛的异质界面，因此，其散射损失是十分明显的，如果把混凝土中的骨料视为分散在水泥砂浆中的球状障碍物，这种散射功率的大小与声波频率的平方成正比。

为了使声波在混凝土中的传播距离增大，往往采用比金属材料探伤中所采用的频率低得多的声波进行检测。

(2) 指向性差

混凝土中声波指向性较差的原因主要有两个方面：

(a) 使用的声波频率较低，波长较长，扩散角 θ 较大。

(b) 混凝土内存在众多的声学界面导致出现许多反射波和折射波，虽然这些波的声强比入射波低，但由于数量众多，而且彼此相互干涉和叠加，因而造成较大的漫射声能。

(3) 声传播路径复杂

波线往往因界面反射和折射而曲折，因此，当声波在混凝土中遇到较大缺陷时，并非直线传播。

(4) 经混凝土介质特性调制后声波的构成复杂

混凝土中，在声场所及的空间内的任何一点，都存在着一次声波（即入射声波）及二次声波（即反射声波、折射声波和波形转换后的横波）。换能器的接受信号是一次声波和二次声波的叠加。所以直接穿越的一次声波所走的距离较短，首先到达接收换能器，但由于衰减作用往往波幅较低。二次波经多次反射，所走距离较长，其中横波波速较慢，它到达的时间要比一次波滞后，但由于相互的叠加，使接收信号变大，而且使波形畸变。正确地认识这一现象，对于波形分析以及声波传播时间的精确测量均是有益的^[9]。

声波在混凝土中的传播过程是非常复杂的，混凝土内部的缺陷、粗骨料与水泥砂浆构成的声学界面的数量和空间分布也是随机的、多样性的，很难找到合适的力学模型去模拟。因此，对声波在混凝土中传播机理的把握目前只停留在定性的水平上。但是，了解声波在混凝土中的传播特点，是用声波进行混凝土质量检测的基础。

2.14 混凝土声波透射法检测中使用的声波

声波在介质中传播时，声源持续发射声波，使介质中各质点均做连续不断的振动，这种波称为连续波；如果介质中各质点的振动是同频率的谐振动，则称为连续余弦波。如果声源间歇地发射一组组声波，介质中各质点作间歇的脉冲振动，这种波称为脉冲波。

(1) 脉冲声波的特点

在混凝土的无损检测中，常用的是脉冲声波（又称声脉冲），这种脉冲声波有两大特点：

（a） 每次发射的持续时间短，重复间断发射，这种重复发射的频率（每秒钟发射脉冲的次数）称为声脉冲的重复频率，一般的声波仪为 50Hz 或 100Hz。而脉冲声波本身的频率取决于压电晶体的特性，它表示声波每秒振荡的次数，称为声波频率。

虽然脉冲波与连续波不同，但单一界面的反射率和透过率公式仍适用。至于异质薄层的反射和透射率公式 只有在异质薄层相对于脉冲宽度很窄（比如裂隙），脉冲波近似于连续波时才适用。

（b） 声脉冲经频谱分析后，具有众多的频率成分，因此声脉冲是一种复频波（多种频率成分的余弦波叠加而成的声波），其主频就是声波换能器的标称频率。

(2) 脉冲声波在介质中的传播的特征

(a) 复频波在介质中的频散现象造成声脉冲的畸变。不同频率的余弦波在介质中传播时，具有不同的传播速度。一般高频快、低频慢，这种现象称为频散。

频散现象必然导致声脉冲在介质中传播时，与传播距离俱增的畸变，如图 19 所示。

(b) 声波在介质中的频漂引起声脉冲的畸变。

声脉冲在介质中传播时，由于各种频率成分的衰减量不同，频率高的成分比频率低的成分衰减大，因此脉冲频谱将发生变化，主频将向低频端漂移，造成声脉冲波形的畸变，如图 19 所示，这种现象称为“频漂”。

声脉冲主频的漂移程度，也是介质对声波衰减作用的一个表征。

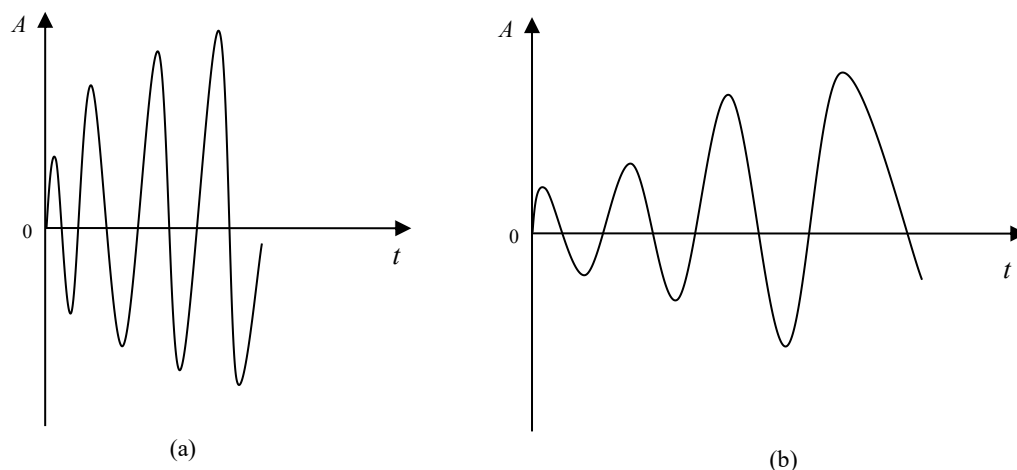


图 19 声脉冲在介质中传播时的畸变

(a) 声波发射信号； (b) 经介质传播后的畸变信号

2.15 声波信号的频域分析

声脉冲在被测介质中传播时，介质的性能和内部结构将影响到声脉冲的各种参数（声时、波幅、频率、波形），因而在接收信号中带有大量反映被测介质性能的信息。

脉冲波“频散”和“频漂”必将导致波的主频变化，因此声脉冲在介质中传播时，其主频的漂移程度是介质对声脉冲衰减作用的一个表征，而介质对声脉冲的衰减作用又反映了介质的粘塑性和内部结构状况。因此，通过对声脉冲信号的“主频漂移”分析可定性反映介质的力学性能和内部结构状况。

声脉冲信号的“主频漂移”可通过对脉冲信号的频域分析获得。

(1) 声波信号的时域分析和频域分析

测试信号的传统分析方法通常是在时间域上进行的。所谓时域分析是指对信号波形在时间域内进行分析处理；所谓频域分析是指对信号波形在频率域内进行分析处理。时域分析和频域分析是以两种不同的角度对同一物理现象进行描述和解释，如图 20 所示。一般而言，时域较为形象直观，频域分析则更为简洁、深入。时域分析往往出现大信号掩盖小信号的现象，而频域分析则可找出某些微弱而又重要的信号。因此，两种分析方法是相辅相成的，它们之间的变换可以通过傅立叶变换来进行：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-70)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2-71)$$

式中 $x(t)$ 表示信号的时域， $X(f)$ 表示信号的频域， $X(f)$ 为 $x(t)$ 的傅立叶变换， $x(t)$ 为 $X(f)$ 的傅立叶逆变换。图 20 表示了时域分析和频域分析的对应关系。

声脉冲信号若以时间为横坐标来描述，则得到时域波形图；若以频率为横坐标来描述，则得到频域里的各种振幅-频率图，即频谱图。

傅立叶变换的物理意义就是把一个时域波动看成是许多不同频率、不同振幅的余弦波（正弦波）叠加的结果。

在实际应用时，仪器设备总是按照一定的时间间隔 τ 采集反映时域波形的一个数列，因而总是运用离散傅立叶变换。

离散傅立叶变换的表达式为

$$X\left[\frac{n}{N\tau}\right] = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\tau) \cdot e^{-j2\pi nk/N} \quad (n=0,1,2,\dots,N-1) \quad (2-72)$$

快速傅立叶变换(FFT)是计算傅立叶变换的一种特殊方法，它可由相应的计算机软件完成。

在声波信号的频谱图上（幅值谱）振幅最大值对应的频率为信号的主频率（或简称“主频”）。

(2) 声波检测信号频域分析的特点

与一般工程结构的动态检测相比，声波透射法检测的频域分析有以下特点：

a) 在一般的工程结构物的动态检测中，频域分析的主要目的是获得结构物的自振频率和固有振型，研究对象是结构物的固有振动状态；在声波检测中，频谱分析的对象是发射换能器所发射的声脉冲穿越被测介质后仪器所接收的声波信号，其目的是要分析声脉冲穿越被测介质后的频谱变化，

而不是被测介质自振特性。因此，声波换能器的频率特性起着非常重要的作用。一般要求换能器有尽可能宽的频带范围，在这个范围内幅值基本不变，这样才能在发射脉冲穿过介质后明显地显现各频率成分幅值的变化（各频率成分的衰减状况）。

b) 声脉冲在穿越介质的过程中，由于介质内的各种声学界面的影响，必然产生反射、折射、绕射等现象，致使接收信号的整个波列中，越往后叠加的信号越复杂，因此频谱分析中截取不同的波列长度将得到不同的频谱图。

通常在频谱分析中，对时域波形截取长度越长，频域分辨率就越高，泄漏的信号也越小。

在声波频谱分析中，由于后续波的叠加，使问题复杂化。对同一采样结果采用不同的截取长度进行频谱分析时，主频位置随着截取长度的增大而向低频区漂移。这显然是低频后续波叠加造成的。因此，在声脉冲的频谱分析中，不仅要考虑分辨率的影响，还要考虑后续波叠加的影响。

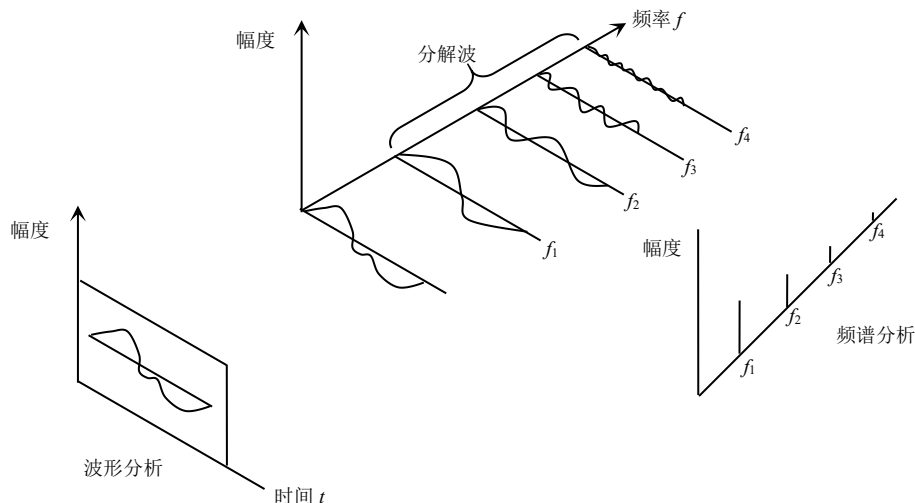


图 20 信号的时域分析和频域分析

c) 声波透射法使用的声波频率远大于一般工程结构物的自振频率，为了使采样结果能如实地反映接收波形，必须有足够的采样密度，应适当选取采样频率或采样间隔。因此，声波频谱分析对仪器有更高的要求。

为了使声波时域信号不失真，仪器的采样系统必须符合采样定理的要求，即

$$\tau < \frac{1}{2f_c} \quad (2-73)$$

式中 τ ——采样时间间隔（或步长），

f_c ——被采集波形中各频率成分的最大值，即截止频率。所以采样频率

$$f = 1/\tau > 2f_c$$

在混凝土声波透射法检测中，换能器主频值约为 20~200kHz，且带宽较宽的换能器，其上限频

率比主频值大得多。因此，声波的频谱分析对仪器采样频率的要求比一般振动分析的要求高得多。

时域采样频率，时域信号分析截取长度，频域分辨率三者之间有如下关系：

$$\Delta f = \frac{1}{\tau N} \quad (2-74)$$

式中 Δf ——频域分辨率；

τ ——采样时间间隔；

N ——截取的采样点数。

当采样频率一定时，增加采样点数 N ，使 Δf 变小，频域分辨率提高；当采样点数 N 一定时，提高采样频率，使 Δf 变大，频域分辨率降低。

因此，时域精度和频域精度存在一定的矛盾，在实际检测时，应合理选择采样频率，使信号的时域分析和频域分析都有足够的精度。

第三节 适用范围

3.1 本方法（声波透射法）适用于混凝土灌注桩桩身完整性检测，判定桩身缺陷的位置、范围和程度。对于桩径小于 0.6m 的桩，不宜采用本方法进行桩身完整性检测。

3.2 当出现下列情况之一时，不得采用本方法对整桩的桩身完整性进行判判：

1. 身测管未沿桩身通长配置；
2. 声测管堵塞导致检测数据不全；
3. 声测管埋设数量不符合本规范第 10.3.2 条的规定。

【说明】基桩声波透射法检测是利用声波的透射原理对桩身混凝土介质状况进行检测，当桩径小于 0.6m 时，声测管的声耦合会造成较大的测试误差，因此该方法适用于桩径不小于 0.6m。

由于桩内跨孔测试误差高于上部混凝土的检测，且桩身混凝土纵向各部位硬化环境不同，粗细骨料分布不均匀，因此该方法不宜用于推定桩身混凝土强度。

一. 声波透射法检测混凝土灌注桩的几种方式

按照声波换能器通道在桩体中不同的布置方式，声波透射法检测混凝土灌注桩可分为三种方式：

(A) 桩内跨孔透射法；(B) 桩内单孔透射法；(C) 桩外孔透射法。

(1) 桩内跨孔透射法

在桩内预埋两根或两根以上的声测管，把发射、接收换能器分别置于两管道中（如图 21(a) 所

示)。检测时声波由发射换能器出发穿透两管间混凝土后被接收换能器接收,实际有效检测范围为声波脉冲从发射换能器到接收换能器所扫过的面积。根据两换能器高程的变化又可分为平测、斜测、扇形扫测等方式。

当采用钻芯法检测大直径灌注桩桩身完整性时,可能有两个以上的钻芯孔。如果我们需要进一步了解两钻孔之间的桩身混凝土质量,也可以将钻芯孔作为发、收换能器通道进行跨孔透射法检测。

(2) 桩内单孔透射法

在某些特殊情况下只有一个孔道可供检测使用,例如钻孔取芯后,我们需进一步了解芯样周围混凝土质量,作为钻芯检测的补充手段,这时可采用单孔检测法(如图 21(b)所示)。此时,换能器放置于一个孔中,换能器间用隔声材料隔离(或采用专用的一发双收换能器)。声波从发射换能器出发经耦合水进入孔壁混凝土表层,并沿混凝土表层滑行一段距离后,再经耦合水分别到达两个接收换能器上,从而测出声波沿孔壁混凝土传播时的各项声学参数。

单孔透射法检测时,由于声传播路径较跨孔法复杂得多,须采用信号分析技术,当孔道中有钢质套管时,由于钢管影响声波在孔壁混凝土中的绕行,故不能采用此方法。

单孔检测时,有效检测范围一般认为是一个波长左右(8-10cm)。

(3) 桩外孔透射法

当桩的上部结构已施工或桩内没有换能器通道时,可在桩外紧贴桩边的土层中钻一孔作为检测通道,由于声波在土中衰减很快,因此桩外孔应尽量靠近桩身。检测时在桩顶面放置一发射功率较大的平面换能器,接收换能器从桩外孔中自上而下慢慢放下,声波沿桩身混凝土向下传播,并穿过桩与孔之间的土层,通过孔中耦合水进入接收换能器,逐点测出透射声波的声学参数。当遇到断桩或夹层时,该处以下各点声时明显增大,波幅急剧下降,以此为判断依据,如图 21(c)所示。这种方法受仪器发射功率的限制,可测桩长十分有限,且只能判断夹层、断桩、缩颈等缺陷,另外灌注桩桩身剖面几何形状往往不规则,给测试和分析带来困难。

上述三种方法中,桩内跨孔透射法是一种较成熟可靠的方法,是声波透射法检测灌注桩混凝土质量最主要的形式,另外两种方式在检测过程的实施、数据的分析和判断上均存在不少困难,检测方法的实用性、检测结果的可靠性均较低。

基于上述原因,《规范》中关于声波透射法的适用范围规定了适用于已预埋声测管的混凝土灌注桩桩身完整性检测,即适用于桩内声波跨孔透射法检测桩身完整性。

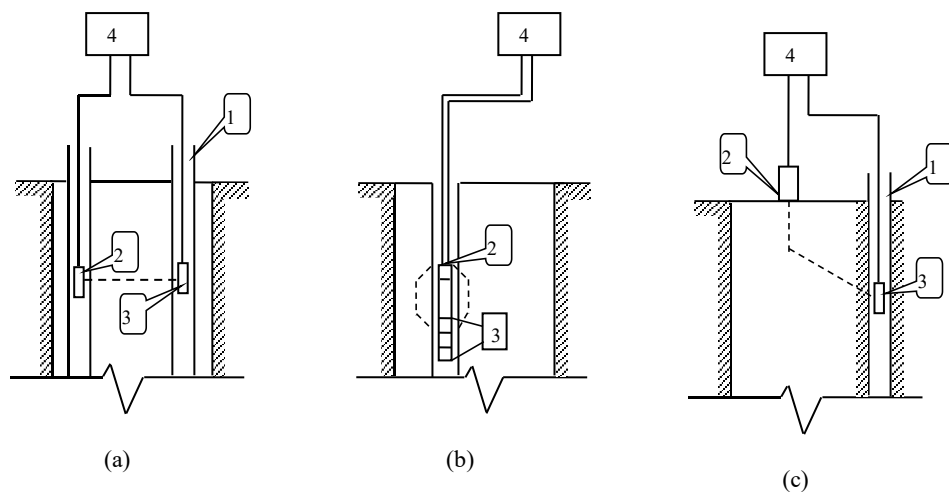


图 21 灌注桩声波透射法检测方式示意图

(a) 桩内双孔检测；(b) 桩内单孔检测；(c) 桩外孔检测

1—声测管（或钻孔）；2—发射换能器；3—接收换能器；4—声波检测仪

二. 关于用声波透射法测试声速来推定桩身混凝土强度的问题

由于混凝土声速与其强度有一定的相关性，通过建立专用“强度-声速”关系曲线来推定混凝土强度的方法广泛地应用于结构混凝土的声波检测中，但作为隐蔽工程的桩与上部结构有较大差别。

“强度—声速”关系曲线受混凝土混合比、骨料品种、硬化环境等多种因素的影响，上部结构混凝土的配合比和硬化环境我们可以较准确地模拟。而在桩中的混凝土由于重力、地下水等多种因素的影响而产生离析现象，导致桩身各个区段混凝土的实际配比产生变化，且这种变化情况无法预估，因而无法对“强度-声速”关系曲线作合理的修正。

另一方面，声测管的平行度也会对强度的推定产生很大影响，声测管在安装埋设过程中难以保证管间距离恒定不变，检测时，我们只能测量桩顶的两管间距，并用于计算各测点的声速，这就必然造成声速检测值的偏差。

而“强度—声速”关系一般是幂函数或指数函数关系，声速的较小偏差所对应的强度偏差被指数放大了。所以即使在检测前已按桩内混凝土的设计配合比制定了专用“强度—声速”曲线，以实际检测声速来推定桩身混凝土强度仍有很大误差。

因此，《规范》在声波透射法的适用范围中，回避了桩身强度推定问题，只检测灌注桩桩身完整性，确定桩身缺陷位置、程度和范围。

当桩径太小时，换能器与声测管的耦合会引起较大的相对误差，一般采用声透法时，桩径不小于 0.6m。

第四节 仪 器 设 备

混凝土声波检测设备主要包括了声波仪和换能器两大部分。用于混凝土检测的声波频率一般在 20~250kHz 范围内，属超声频段，因此，通常也可称为混凝土的超声波检测，相应的仪器也叫超声仪。

4.1 声波发射与接收换能器应符合下列要求：

圆柱状径向换能器沿径向振动无指向性；

外径小于声测管内径，有效工作段长度不得大于 150mm；

谐振频率为 30~60kHz；

水密性满足 1MPa 水压不渗水。

一. 声波换能器的功能及工作原理

（1）声波换能器的功能

运用声波检测混凝土，首先要解决的问题是如何产生声波以及接收经混凝土传播后的声波，然后进行测量。解决这类问题通常采用能量转换方法：首先将电能转化为声波能量，向被测介质（混凝土）发射声波，当声波经混凝土传播后，为了度量声波的各声学参数，又将声能量转化为最容易量测的量——电量，这种实现电能与声能相互转换的装置称为换能器。

换能器依据其能量转换方向的不同，又分为发射换能器和接收换能器：

发射换能器——实现电能向声能的转换；

接收换能器——实现声能向电能的转换。

发射换能器和接收换能器的基本构成是相同的，一般情况下，可以互换使用，但有的接收换能器为了增加测试系统的接收灵敏度而增设了前置放大器，这时，收、发换能器就不能互换使用。

（2）换能器工作原理

实现电声能量转换的方式有多种，如电磁法、静电法、磁致伸缩法及压电伸缩法等。在声波检测中，由于要求换能装置具有较高的频率，稳定一致的工作状态和不大的体积，一般都采用压电伸缩法，即压电式换能器。

对某些不显电性的电介质（某些晶体或多晶陶瓷）施加作用力，介质产生应变，引起介质内部正负电荷中心发生相对位移而极化，导致介质两端出现符号相反的束缚电荷，介质内出现电场，其电荷密度与应力成正比；当作用力反向时，电荷亦改变符号，这种现象称为正电压效应；另一方面，如将具有压电效应的介质置于电场中，由于电场作用，引起介质内部正负电荷中心发生位移，这种位移在宏观上表现为在介质内产生了应变，这种应变与电场强度成正比；如果电场反向，应变也反向。这种现象称为反压电效应（又称电压效应）。

根据反压电效应可知，若在压电体上加一突变的脉冲电压，则压电体产生相应的突然激烈变形，从而激发电体的自振而发出一组声波，这就是发射换能器的基本原理。反之，根据压电效应，若压电体与一具有声振动的物体接触，则因物体的振动而使压电体被交变地压缩或拉伸，因而压电体输出一个与声波频率相应的交变电信号，这就是接收换能器的基本原理。

（3）压电体的振动模式

当把电压加在压电体电极上时，压电体即发生振动，其振动模式视晶体切割方向、压电陶瓷极化方向、所加电场方向及压电体的尺寸不同而不同。

1) 厚度振动

压电陶瓷薄片厚度为 d ，在两相对面涂有电极，沿厚度方向进行极化，也沿厚度方向施加电场，则薄片作厚度方向振动。厚度振动片是最常用的超声换能器，常用来制作发射和接收较高频率的纵波换能器。

2) 纵向长度振动

长度为 l 的长棒，在两端面涂上电极，在长度方向极化，在长度方向加电场，棒作纵向长度振动。这种振动模式通常用于较低频率的纵波换能器。

3) 横向长度振动

长度为 l ，厚度为 d 的长薄片，在两面涂上电极，在厚度方向极化，厚度方向加电场，薄片沿长度 l 方向作侧向长度振动。这种振动模式与纵向长度振动相比，由于是在厚度方向极化与施加电场，不需很高极化电压，且施加电场时较小的电压就能建立较强电场。缺点是横向长度振动的机电耦合系数比纵向长度振动的机电耦合系数小。实际中常以多片压电片叠合成一个压电体。某些人工晶片（如酒石酸钾钠晶体）就是利用横向长度振动来制作低频声波换能器。由于该晶体有较大的机电耦合系数，所制换能器灵敏度较高，至今尚有使用。

4) 圆片径向振动

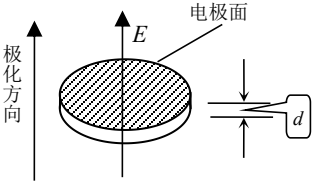
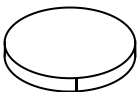
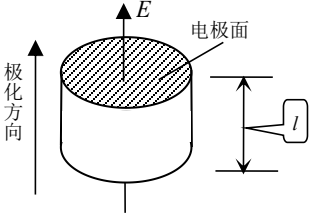
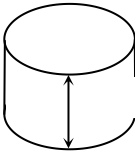
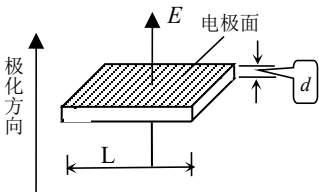
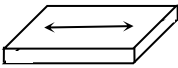
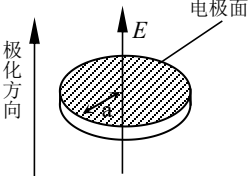
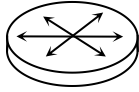
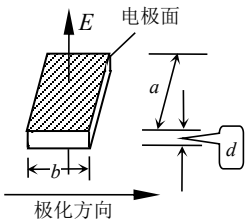
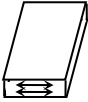
半径为 a 的厚度振动圆片，除了作厚度振动外，也作径向振动。显然，薄圆片径向振动的频率低于厚度振动的频率。实际中常以多片圆片装在薄壁圆管内，以激发圆管的径向振动，制作增压式径向换能器。

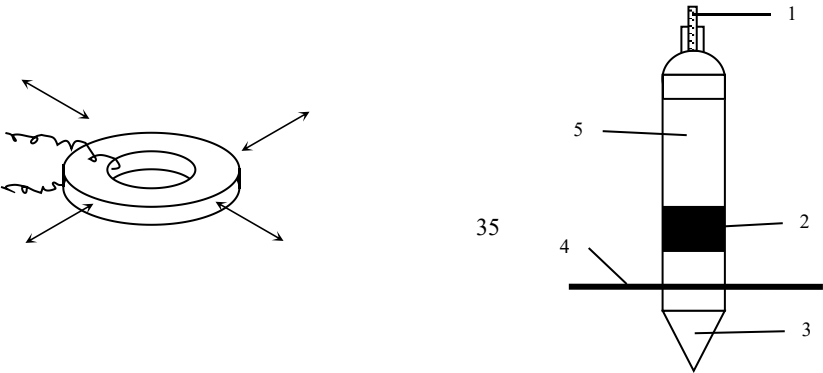
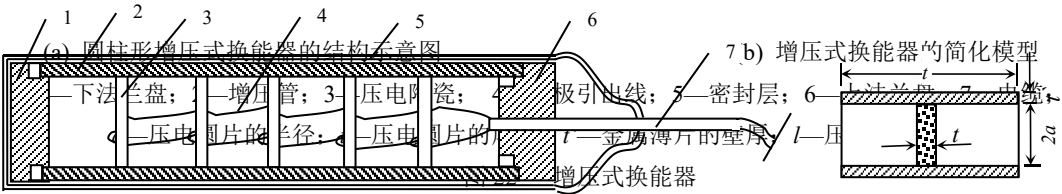
5) 厚度切变型振动

厚度为 d ，宽度为 b ，长度为 a 的陶瓷片，面积为 $a \times d$ 的两端面涂上电极进行极化，然后去掉电极，再在面积为 $a \times b$ 的两面涂上电极施加电场，即得到厚度切变振动。可用多片切变振动的压电片叠合起来制作横波换能器，以在固体中产生和接收横波。

除了上述基本振动模式外，还有其它一些振动模式，如在混凝土声波检测中有时使用的弯曲式换能器、圆环式换能器等，其压电体的振动模式分别是弯曲振动模式和圆环式的径向振动模式。

表 4 压电体的振动模式

样品形状	振动方式
	 (a)
	 (b)
	 (c)
	 (d)
	 (e)

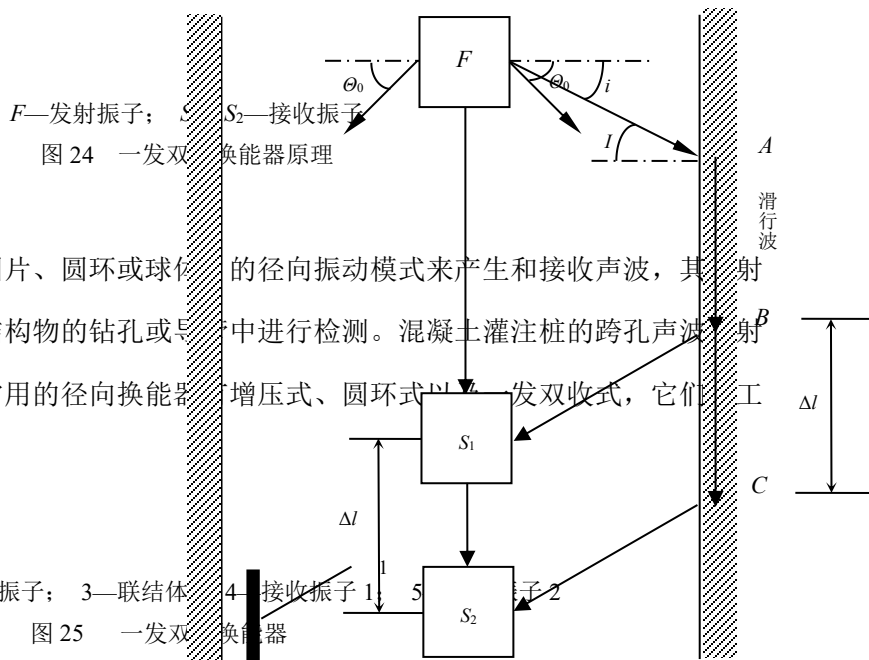


(a) 薄圆环径向振动

(b) 圆环式径向换能器构造

1—引出电缆, 2—压电圆环, 3—下锥体, 4—扶正器, 5—前置放大器

图 23 圆环式径向换能器原理及构造



径向换能器是利用压电陶瓷（圆片、圆环或球体）的径向振动模式来产生和接收声波，其辐射面是曲面。这类换能器通常被置于结构物的钻孔或导管中进行检测。混凝土灌注桩的跨孔声波反射法检测也是采用径向换能器。目前常用的径向换能器有增压式、圆环式和一发双收式，它们的工作原理见……

1—引出电缆；2—发射振子；3—联结体；4—接收振子；5—前置放大器

图 25 一发双收换能器

二. 换能器的主要技术指标

(1) 工作频率

换能器的工作频率，也就是换能器的谐振频率（压电体的自振频率），如图 26。它取决于压电体的材料特性和几何尺寸。

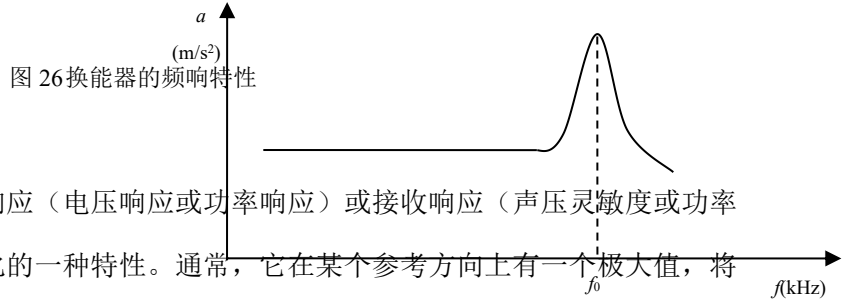
设压电体厚度为 δ (mm)，压电体声速为 c (m/s)，则压电体的自振频率 f_0 (kHz) 为

$$f_0 = \frac{c}{2\delta} \quad (4-1)$$

如果用声波仪直接接收发射换能器发射的声波信号（经其他介质调制），并对接收信号作频谱分析，则频谱图的主频值应接近发射换能器的谐振频率。

目前，用于结构混凝土检测的平面换能器的工作频率一般为 20~250kHz，用于混凝土灌注桩跨孔检测的增压式径向换能器工作频率一般为 20~50kHz，圆环式径向换能器的工作频率一般为 20~60kHz。

如果频域分析是测试的重点，则对换能器频响曲线的带宽有一定要求：换能器有尽可能宽的频带范围，在频带范围内幅值基本不变，这样才能在发射脉冲穿过混凝土后明显地呈现各频率成分幅值的衰减状况。



(2) 换能器的指向性

换能器的指向性是换能器的发射响应（电压响应或功率响应）或接收响应（声压灵敏度或功率灵敏度）的幅值随方位角的变化而变化的一种特性。通常，它在某个参考方向上有一个极大值，将这种指向性响应按其相对比值画成图，就可以得到指向性图。

发射换能器指向性形成的原因是发射换能器各部分所发射声波在自由场远场区中干涉叠加的结果，将辐射面上每一点看作点声源，点声源是没有指向性的球面波，所有这些子波相互叠加，在发射空间的远场变形成了指向性。

接收换能器指向性的形成是由于接收换能器处于声源的远场区，到达接收换能器表面上的声波产生的总声压是各子波干涉叠加结果，这一总声压随入射声线束入射角变化而变化。其开路输出电压也随入射声线束入射角变化而变化。

一般的换能器收、发构造相同，功能可以互易，可以证明在这种条件下，换能器的发射指向性图和接收指向性图是相同的。

(a) 平面换能器的指向性

平面换能器（圆盘声场）有指向性，其指向角 θ 为

$$\theta = 2\theta_0 = 2\arcsin\left(1.22\frac{\lambda}{D}\right) \quad (4-2)$$

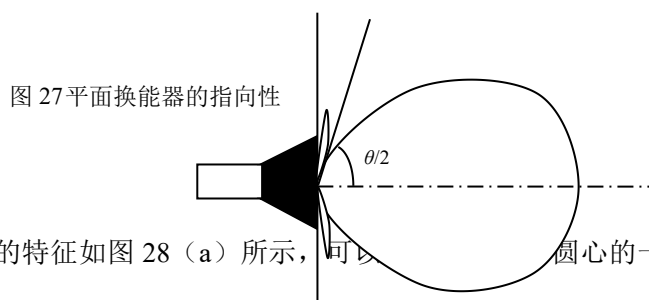
式中 θ_0 ——圆盘声场的半扩散角；

λ ——声波波长；

D ——辐射面线度，对平面换能器，就是辐射面直径。

从上式中可以看出： λ 越小， θ 越小，指向性越好； D 越大， θ 越小，指向性越好。

例如，在结构混凝土检测中，常用的平面换能器 $D=4\sim 5\text{cm}$ ， $\lambda=8\text{cm}$ ， $\theta=100^\circ$ ，指向性差，如图 27 所示。



(b) 径向换能器的指向性

径向换能器的辐射声场在水平面上的特征如图 28 (a) 所示，可以表示为以辐射面圆心的一系列同心圆来表示，同心圆上各点的声压是相等的（根据对称性由亥姆霍斯—基尔霍夫积分可得），与方位角无关。因此径向换能器在水平方向无指向性。所以在灌注桩的声波透射法检测时，采用平测法

（发、收换能器在同一水平面上）径向换能器是无指向性的。

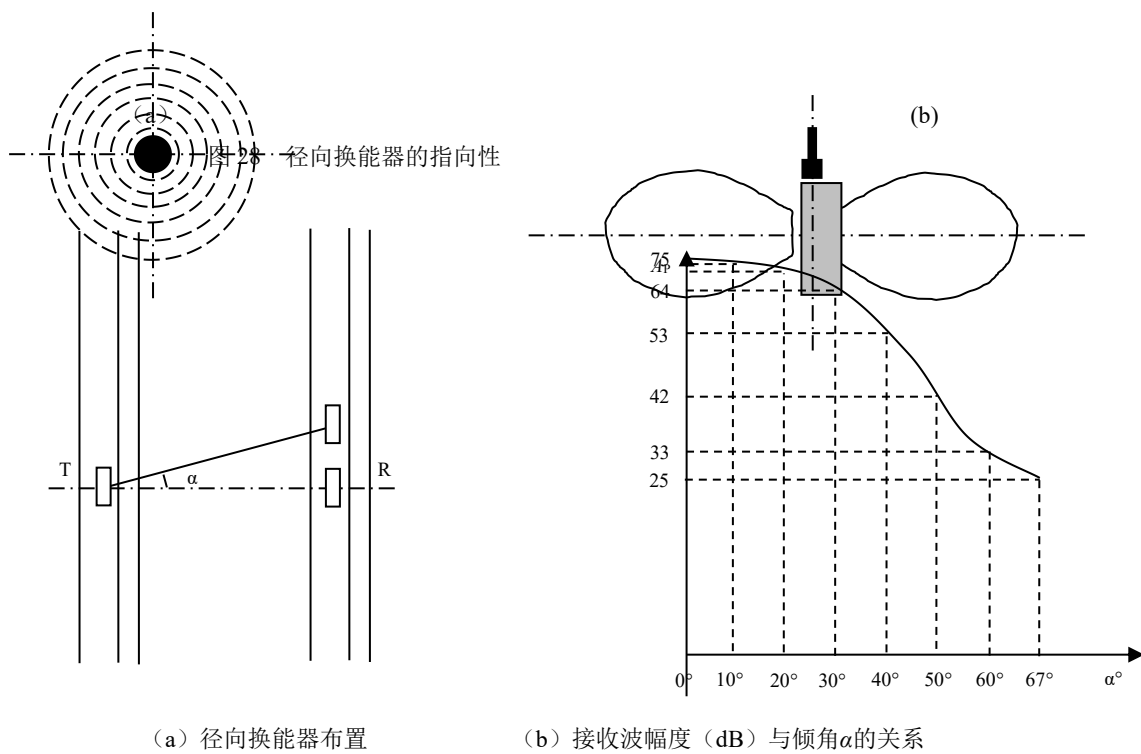


图 29 径向换能器的垂直面指向性试验

径向换能器辐射声场在铅垂面上的剖面图如图 28 (b) 所示，它的辐射声场实际上是剖面图 28 (b) 以换能器纵轴为回转轴的一个回转体，其指向角同样与辐射面线度（径向换能器有效工作长度）及声波波长有关。

在用声透法检测灌注桩完整性时，经过“平测”普查后，对声参数异常点往往进一步采用斜测法或扇形扫测法进行加密检测来确定缺陷范围，此时，收、发换能器不在同一水平面上，这就涉及径向换能器在铅垂面上的指向性问题。

在实际检测时，发、收换能器之间存在耦合水、声测管、混凝土组成的多个异质界面，其间的声波传播规律是相当复杂的，因此径向换能器在铅垂面上的指向性是一个相当复杂的问题。

关于径向换能器在铅垂面上的指向性问题，我们作过如下试验，如图 29 (a) 所示。在一混凝土灌注桩内，发、收换能器分别置于两声测管中，现固定发射换能器在桩的中部（桩顶或桩底声波传播可能受边界影响）保持高程不变，接收换能器沿声测管在竖直方向上移动，发、收换能器中心连线与水平面的夹角为 α ，声波仪接收信号的幅值 A_p 与 α 的关系如图 29 (b) 所示，从图中可以看到，径向换能器在铅垂面上存在明显的指向性：接收信号的幅度随 α 角的增大迅速减小。 $\alpha = 0$ （平测）时，接收波幅度 A_{p0} 最大，当 $\alpha = 60^\circ$ 时，接收波幅已很小。在实际检测时，为保证测试系统有足够的接收灵敏度，同时又能达到斜测的目的， α 的取值一般为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

三. 换能器的技术要求

用于混凝土灌注桩声波透射法检测的换能器应符合下列要求：

(a) 圆柱状径向振动：沿径向（水平方向）无指向性。

(b) 径向换能器的谐振频率宜采用 30~60kHz、有效工作面轴向长度不大于 150mm。当接收信号较弱时，宜选用带前置放大器的接收换能器。

应根据测距大小和被测介质（混凝土）质量的好坏来选择合适频率的换能器。低频声波衰减慢，在介质中传播距离远，但对缺陷的敏感性和分辨力低；高频声波衰减快，在介质中传播距离短，但对缺陷的敏感性和分辨力高。一般在保证具有一定接收信号幅度的前提下，尽量使用较高频率的换能器，以提高声波对小缺陷的敏感性。使用带前置放大器的接收换能器可提高测试系统的信噪比和接收灵敏度，此时可选用较高频率的换能器。

声波换能器有效工作面长度是指起到换能作用的部分的实际轴向尺寸，该尺寸过大将夸大缺陷实际尺寸并影响测试结果。

(c) 换能器的实测主频与标称频率相差应不大于 $\pm 10\%$ ，对用于水中的换能器，其水密性应在 1MPa 水压下不渗漏。

换能器的实测频率与标称频率应尽可能一致。实际频率差异过大易使信号鉴别和数据对比造成混乱。

混凝土灌注桩的检测一般用水作为换能器与介质的耦合剂。一般桩长不大于 100m，在 1MPa 压力下不渗漏，就是保证换能器在 100m 深的水下能正常工作。

四. 换能器的使用与维护

(1) 换能器的耦合

耦合的目的是一方面使尽可能多的声波能量进入被测介质中，另一方面又能使经介质传播的声波信号尽可能多地被测试系统接收。从而提高测试系统的工作效率和精度。

混凝土灌注桩的声波检测一般采用水作为换能器与混凝土的耦合剂，应保证声测管中不含悬浮物（如泥浆、砂等），悬浮液中的固体颗粒对声波有较强的散射衰减，影响声幅的测试结果。

(2) 换能器的选配

在混凝土检测中，应根据结构的尺寸及检测目的来选择换能器。由于目前主要使用纵波检测，所以只介绍纵波换能器的选配。

(a) 换能器种类选择

纵波换能器有平面换能器、径向换能器。平面换能器用于一般结构、试件的表面对测和平测，同时也是声波仪声时测试系统效验的工具，是必备的换能器。径向换能器（增压式、园环式、一发双收换能器）则用在需钻孔检测或灌注桩声测管中检测。

(b) 换能器频率选择

由于声波在混凝土中衰减较大，为了使声波有一定的传播距离，混凝土声波检测都使用低频率声波，通常在 200kHz 以下。在此频率范围内，到底采用何种频率取决于以下两个因素：

1) 结构（或试件）尺寸

结构尺寸不同，应选择不同的声波频率。这里所谓的尺寸包括穿透距离和横截面尺寸。被测体测距越大，声波衰减也越大，接收波振幅越小。为保证正常测读，必须使接收波有一定的幅度，因此，对于大的测距只能使用更低频率的声波甚至可闻声波。目前，探测十多米以上的大型结构通常使用 20kHz 或以下频率的换能器。当测距较短时，为使接收信号前沿陡峭，起点分辨精确以及对内部缺陷与裂缝有较高分辨力，则尽量使用较高的频率。

被测体的横截面尺寸主要是考虑声波传播的边界条件。通常所说的声波声速均指声波在无限大的介质中的速度。若横截面小到某种程度，声波声速将有明显的频散（几何频散），所测得的声速（表观声速）将降低。通常认为，横截面最小尺寸应大于声波波长的 2 倍以上。因此，在测试小截面尺寸的结构或试件时，应用较高频率。在试件测试中，频率也不宜太高。因为虽然较高频率波长短，满足半无限大的边界条件，但由于被测体由各种颗粒组成，若波长与颗粒尺寸相比较太小，则被测体呈明显的非均质性。不利于用声学参数来反映被测体总体的性能，因此也不宜用过高的频率。根据实际使用情况，对于一般的正常混凝土，换能器频率选择可参见表 12-5。

表 5 换能器频率选择

测距(cm)	选用换能器频率(kHz)	最小横截面积(cm)
10~20	100~200	10
20~100	50~100	20
100~300	50	20
300~500	30~50	30
>500	20	50

2) 被测混凝土对声波衰减程度

上述根据被测物体尺寸来选择声波频率指的是对一般混凝土而言。对于某些特殊场合，例如，被测混凝土质量差，强度低，当用所选用频率测试时接收信号很微弱，则须降低使用频率，以期获得足够幅度，被测混凝土是早龄期，甚至尚未完全硬化，声波衰减很大，则只能使用更低的频率甚至使用可闻声波的频率。

(3) 换能器的维护与保养

(a) 目前使用的换能器大多以压电陶瓷作为压电体，因此换能器在使用时必须保证温度低于相应压电陶瓷的使用温度。

表 6 部分压电陶瓷换能器的使用温度

压电体名称	使用温度
钛酸钡	<70℃
锆钛酸铅	<250℃
酒石酸钾钠	<40℃
石英	<550℃

(b) 换能器内压电陶瓷易碎，粘结处易脱落，切忌敲击，现场使用时应避免摔打或践踏，不用时可用套筒防护保存。

(c) 普通换能器不防水，不能在水中使用，水下径向换能器虽有防水层，但联结处常因扰动而损坏，使用中应注意联结处的水密性。

4.2 声波检测仪应符合下列要求

- 1 实时显示和记录接收信号的时程曲线以及频率测量或频谱分析；
- 2 最小采样时间间隔小于或等于 $0.5\mu\text{s}$ ，声波幅值测量相对误差小于 5%，系统频带宽度为 1kHz-200kHz，系统最大动态范围不得小于 100dB；
- 3 声波发射脉冲为阶跃或矩形脉冲，电压幅值为 200-1000V；
- 4 首波实时显示；
- 5 自动记录声波发射与接收换能器位置。

一. 声波仪的功能

混凝土声波仪的功能（基本任务），是向待测的结构混凝土发射声波脉冲，使其穿过混凝土，然后接收穿过混凝土的脉冲信号。仪器显示和记录声脉冲穿过混凝土所需时间、接收信号的波形、波幅等。根据声脉冲穿越混凝土的时间（声时）和距离（声程），可计算声波在混凝土中的传播速度；波幅可反映声脉冲在混凝土中的能量衰减状况，根据所显示的波形，经过适当处理后可对被测信号进行频谱分析。

二. 混凝土声波仪的发展概况

二十世纪是电子技术高速发展的世纪，混凝土声波仪的发展历程就是展现电子技术飞速发展的一个窗口。

(1) 早期的混凝土声波仪以二十世纪五十年代出现的电子管声波仪为代表，如美国的 UCT，波兰的 BI 均为电子管式声波仪，称为第一代混凝土声波仪。

(2) 到了二十世纪 60 年代至 70 年代，出现了晶体管集成电路声波仪，如英国的 PUNDIT，国产的 CTS-25。称为第二代混凝土声波仪。

(3) 二十世纪 80 年代，随着微机技术的发展，声波仪开始步入智能化阶段，仪器与微处理器联结，机内内置程序有一定的数据自动分析、处理功能，如 CTS-35、CTS-45，称为第三代混凝土声波仪，这一代产品与模拟式声波仪相比在技术上是一个飞跃，但受数字采集与传输速度、存储容量及计算机软件等方向的限制，无法实时动态地显示波形、无法进行大批量的信息处理工作。

(4) 进入二十世纪 90 年代，智能型数字声波仪逐渐走向成熟，可实时、动态显示波形，在现场可由计算机完成大量的自动判读及数据信息处理工作，大大提高了现场工作效率，同时也缩短了室内数据处理时间。我们称其为第四代混凝土超声检测仪。例如，北京市政院开发的 NM 系列、武汉岩海公司的 RS-UT01C，同济大学的 U-SUNIC 等都属于这一代产品。

(5) 进入 21 世纪，由于电子技术的迅猛发展，高性能 cpu 和高容量存储媒体的应用，推动了声波仪的发展，我国的声波检测仪的发展日新月异。短短十年间，智能型数字式声波检测仪的发展经历了从单发单收（双收）人工采集、单发单收全自动采集、多发多收全自动采集这三个发展阶段，极大地提高了现场信号采集的工作效率。我们称其为第五代混凝土超声检测仪。例如武汉岩海公司的 RS-ST01C、RS-ST01D(P)、RS-ST06D(T) 系列；武汉中岩科技公司的 RSM-SY5、RSM-SY(T)、RSM-SY6、RSM-SY7 系列，以及基于无线数据传输 WIFIR 技术的 SM-SY7(W)，该仪器可用无线的方式操控主机；北京智博联科技有限公司的 ZBL-U510、ZBL-U520、ZBL-U520A、ZBL-U5 系列等。

三. 混凝土声波仪的组成与特点

目前国内检测机构使用较多的是智能型声波仪，即第四代混凝土声波仪，但也有少量的模拟式声波仪仍在工程检测中使用。随着工程检测实践需求的不断提高和深入，大量的数据、信息需要在检测现场作及时处理、分析，以便充分运用波形所带来的被测构件内部的各种信息，对被测混凝土结构的质量作出更全面、更可靠的判断，使现场检测工作做到既全面、细致，又能突出重点。在电子技术和计算机技术高速发展的背景下，智能型声波仪应运而生。智能型声波仪实现了数据的高速采集和传输，大容量存储和处理，高速运算，配置了多种应用软件，大大提高了检测工作效率，在

一定程度上实现了检测过程的信息化。

(1) 数字式声波仪的基本组成

数字式声波仪一般由计算机、高压发射与控制、程控放大与衰减、A/D 转换与采集四大部分组成。高压发射电路受主机同步信号控制，产生受控高压脉冲激励发射换能器，电声转换为声波脉冲传入被测介质，接收换能器接收到穿过被测介质的声波信号后转换为电信号，经程控放大与衰减对信号作自动调整，将接收信号调节到最佳电平，输送给高速 A/D 采集板，经 A/D 转换后的数字信号以 DMA 方式送入计算机，进行各种信息处理。

(2) 数字式声波仪的特点

模拟式声波仪是将接收放大后的连续模拟信号直接送到显示系统，以示波器直接显示，数字式声波仪则是通过信号采集器采集信号，再将收集到的一系列离散信号经 A/D 转换变为数字信号加以存储、显示时，再经 D/A 转换变为模拟量在屏幕上显示。

1) 数字化信号便于存储、传输和重现。

2) 数字化信号便于进行各种数字处理，如频域分析、平滑、滤波、积分、微分。

3) 可用计算机软件自动进行声时和波幅的判读，这种方法的准确度和可操作性均明显优于模拟式声波仪的自动整形关门测读。后者易出现滞后、丢波、提前关门等现象引起测试误差，且波幅测试精度也较低。

4) 计算机可完成大量的数据、信息处理工作。可依据各种规程的要求，编制好相应的数据处理软件，根据检测目的，选用相应数据处理软件对测试数据进行分析，得出检测结果（或结论），明显提高了检测工作效率。

四. 混凝土声波仪的技术要求

中国工程建设标准化协会标准《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CS21：2000）对混凝土声波仪的技术要求作了较详细的规定：

(1) 具有清晰、显示稳定的示波装置。

示波装置显示的波形是我们测量和分析混凝土各声学参数的基础，因此波形稳定、清晰是必须具备的条件。

(2) 声时最小分度为 $0.1\mu\text{s}$

这个指标决定了声时测量精度，因而也决定了声速测量的精度。混凝土声波仪具有多种功能，即可用于检测结构混凝土强度，也可用于检测混凝土缺陷。用于检测强度时，由于混凝土“强度-声速”相关曲线多为幂函数或指数函数型，声速的较小偏差会导致推定强度的较大偏差，因此测强时，

对声时测量精度要求更高。

在《规范》中对声时测量精度放宽至 $0.5\mu\text{s}$ ，因为声波法测桩时主要是测桩身完整性，回避了桩身强度问题。

(3) 具有最小分度为 1dB 的衰减系统。

模拟式仪器采用衰减器测量波幅，其最小分辨率取决于衰减器，衰减器的最小分度为 1dB。数字式声波仪的波幅判读由计算机软件进行，精度优于 1dB。

在《规范》中对波幅测试系统的精度提出了一个总体要求：声波波幅测量相对误差小于 5%。

(4) 接收放大器的频响范围 $10\sim 500\text{kHz}$ ，总增益不小于 80dB，接收灵敏度（在信噪比为 3:1 时）不大于 $50\mu\text{V}$ ；仪器实际工作频率（信号频率）取决于换能器，在检测混凝土时，平面换能器的标算频率为 $20\sim 250\text{kHz}$ ，径向换能器为 $20\sim 60\text{kHz}$ ，换能器的频率上限远低于放大器频带上限，即使是宽带换能器也可满足测试要求。

接收灵敏度，即对微弱信号的接收分辨能力，它取决于仪器的放大能力和信噪比水平。单纯考虑接收放大器的增益是不全面的，所以用信噪比达到了 3:1 时的接收灵敏度指标更切合实际，它可以直观反映出仪器与超声波穿透距离有关的重要因素。接收灵敏度越高，可测距离越大，对微弱信号的识别能力越强。总增益不小于 80dB 相当于测试信号的幅值可相差 10^4 量级，可满足工程测试要求，《规范》要求系统带宽为 $1\sim 200\text{kHz}$ ，应与径向换能器工作频率 $20\sim 60\text{kHz}$ 相对应，系统最大动态范围为 100dB（相当于 10^5 量级）。

(5) 电源电压波动范围在标算值 $\pm 10\%$ 的情况下能正常工作；该指标体现了仪器对电源电压的适应范围，即当电源在此范围波动时，其全部技术指标仍能达到额定值。

(6) 连续正常工作时间不少于 4h。

为保证现场检测工作的连续、高效，仪器应达到此要求。

(7) 声波发射脉冲为阶跃或矩形脉冲，电压幅值为 $200\sim 1000\text{V}$ 。

目前，用于混凝土声波检测的声波仪有模拟式和数字式两大类，由于两类声波仪的工作原理和功能有所不同，因此，对两类仪器还有一些具体的规定。

(1) 模拟式声波仪的特别要求

(a) 具有手动游标和自动整形两种测读功能。

模拟式声波仪接收信号为连续模拟量，可由时域波形测读参数，对声时的测读有手动游标和自动整形两种方式：

自动整形声时读数功能一般仅适用于强信号、弱噪音；

当信噪比不高时，应采用手动游标测读，以免造成大误差和丢波现象。

(b) 数字显示稳定, 声时调节在 $20\sim 30\mu\text{s}$ 范围, 连续 1h, 数字变化不大于 $\pm 0.2\mu\text{s}$ 。

现场检测时, 连续工作时间在 4h 以上, 在工作期间, 仪器性能必须保持一定的稳定性。模拟仪器数码显示的稳定性是保证现场准确测量的基础。

(2) 数字式声波仪的特别要求

(a) 具有手动游标测读和自动测读方式。当自动测读时, 在同一测读条件下, 1h 内每隔 5min 测读一次声时的差异应不大于 ± 2 个采样点; 数字式仪器以自动判读为主, 在大测距或信噪比较低时, 需要手动游标读数。手动或自动判读声时, 在同一测试条件下, 测读数据的重复性是恒量测试系统稳定性的指标, 故应建立一定的检查声时测量重复性的方法, 在重复测试中, 判定首波起始点的样本偏差点数乘以采样间隔就是声时测读差异。

(b) 波形显示幅度分辨率应不低于 $1/256$, 并且具有可显示、存储和输出打印数字化波形的功能, 波形最大存储长度不宜小于 4kbytes。

数字化声波仪波幅读数精度取决于数字信号采样的精度 (A/D 转换位数) 以及屏幕波形幅度, 在采样精度一定的条件下, 加大屏幕幅度可提高波幅读数的精度, 直接读取波幅电压值其读数精度应达 mV 级, 并取小数点后有效位数两位。

实测波形的形态有助于对混凝土缺陷的判断, 数字式声波仪应具有显示存储和打印数字化波形的功能。波形的最大存储长度由最大探测距离决定。

(c) 自动测读条件下, 在显示的波形上应有光标指示声时、波幅的位置。这样做的目的是及时检查自动读数是否存在错误, 如果存在偏差, 则应重新测读或者改用手动游标测读。

(d) 宜具有幅度谱分析功能 (FFT 功能)

声波信号的主频漂移程度是反映声波在混凝土中衰减程度的一个指标, 也是判断混凝土质量优劣的一个指标。模拟式声波仪只能根据时域波形进行估算, 精度较低, 频域分析能较准确地反映声波信号的主频漂移程度, 是数字式声波仪的一大优势, 一般的数字式声波仪都具有幅度谱分析功能。

五. 声波仪的校验与维护

(1) 声波仪的校验

仪器的各项技术指标应在出厂前用专门仪器进行性能检测, 购买仪器后, 在使用期内应定期 (一般为一年) 送计量检定部门进行计量检定 (或校准)。即使仪器在检定周期内, 在日常检测中也应对仪器性能进行校验。

(a) 仪器声时检测系统校验

用声波仪测定的空气声速与空气标准声速进行比较的方法来对声波仪的声时检测系统进行校验，其具体步骤如下：

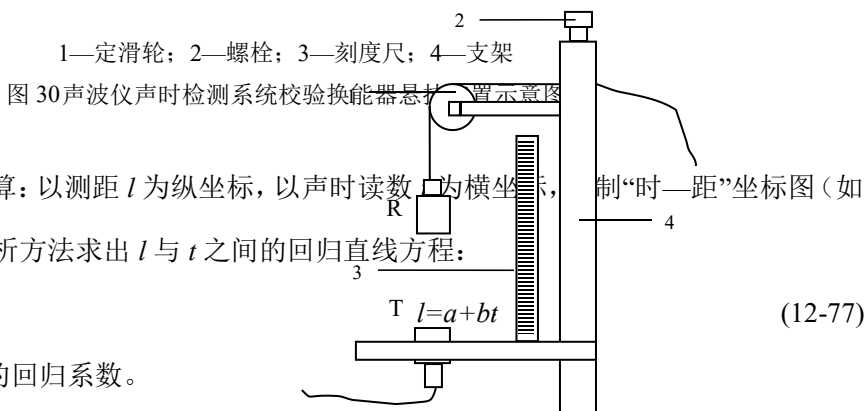
1) 取常用的厚度振动式换能器一对，接于声波仪器上，将两个换能器的辐射面相互对准，以间距为 50、100、150、200mm……，依次放置在空气中，在保持首波幅度一致的前提下，读取该间距所对应的声时值 t_1 、 t_2 、 t_3 、…… t_n 。同时测量空气的温度 T_k (读至 0.5℃)，如图 30。

测量时应注意下列事项：

(A) 两换能器间距的测量误差应不大于±0.5%。

(B) 换能器宜悬空相对放置（如图 12-30 所示）。若置于地板或桌面时，应在换能器下面垫以海绵或泡沫塑料并保持两个换能器的轴线重合及辐射面相互平行。

(C) 测数点应不少于 10 个。



坐标图中直线 AB 的斜率“ $\Delta l / \Delta t$ ”或回归直线方程的回归系数 b 即为空气声速的实测值 v^s (精确至 0.1m/s)。

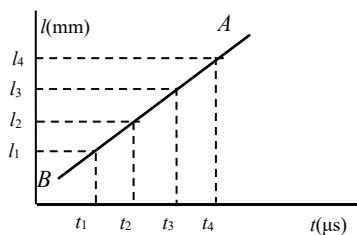


图 31 测空气声速的“时-距”图

3) 空气声速的标准值应按下式计算：

$$v^c = 331.4 \times \sqrt{1 + 0.00367 \times T_k}$$

式中 v^c ——空气声速的标准值 (m/s)；

T_k ——空气的温度 (℃)。

4) 空气声速实测值 v^s 与空气声速标准值 v^c 之间的相对误差 e_r , 应按下式计算:

$$e_r = (v^c - v^s) / v^c \times 100\%$$

通过计算的相对误差 e_r 应不大于 $\pm 0.5\%$, 否则仪器计时系统不正常。

(b) 波幅测试系统校验

仪器波幅检测准确性的校验方法较简单。

将屏幕显示的首波幅度调至一定高度, 然后把仪器衰减系统的衰减量增加或减小 6dB, 此时屏幕波幅高度应降低一半或升高一倍。如果波幅高度变化不符, 表示仪器衰减系统不正确或者波幅计量系统有误差, 但要注意, 在测试时, 波幅变化过程中不能超屏。

(2) 声波仪的维护与保养

(a) 使用前务必了解仪器设备的使用特性, 仔细阅读仪器使用说明书, 需对整个仪器的使用规定有全面的了解后再开机使用。

(b) 注意使用环境, 在潮湿、烈日、尘埃较多等不利环境中使用时应采取相应的保护措施。

(c) 仪器使用的电源要稳定, 并尽可能避开干扰源 (电焊机、电锯、电台及其他强电磁场)。

(d) 仪器发射端口有脉冲高压, 接、拔发射换能器时应将发射电压调至零伏或关机后进行。

(e) 仪器的环境温度不能太高, 以免元件变质、老化、损坏, 一般半导体元件及集成电路组装的仪器, 使用环境温度为 $-10 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

(f) 连续使用时间不宜过长。

(g) 保持仪器清洁, 以免短路, 清理时可用压缩空气或干净的毛刷。

(h) 仪器应存放在干燥、通风、阴凉的环境中保存, 若长期不用, 应定期开机驱潮。

(i) 仪器发生故障时, 应由专业技术人员维修或与生产厂家联系维修。

第五节 现场检测

5.1 声测管埋设

1 声测管内径应大于换能器外径。

2 声测管应有足够径向刚度, 声测管材料的温度系数应与混凝土接近。

3 声测管应下端封闭、上端加盖、管内无异物; 声测管连接处应平顺过渡, 管口高出混凝土顶面 100mm 以上。

4 浇灌混凝土前应将声测管有效固定。

5.2 混凝土灌注桩桩身完整性检测时, 声测管应沿钢筋笼内侧呈对称形状布置(图 31), 并可按正

北方向顺时针旋转依次编号。声测管埋设数量应符合下列要求：

- 1 D 小于或等于 800mm，不少于 2 根管；
- 2 800mm < D 小于或等于 1600mm，不少于 3 根管；
- 3 D > 1600mm，不少于 4 根管。

当桩径 D 大于 2500mm 时,宜增加预埋声测管数量。

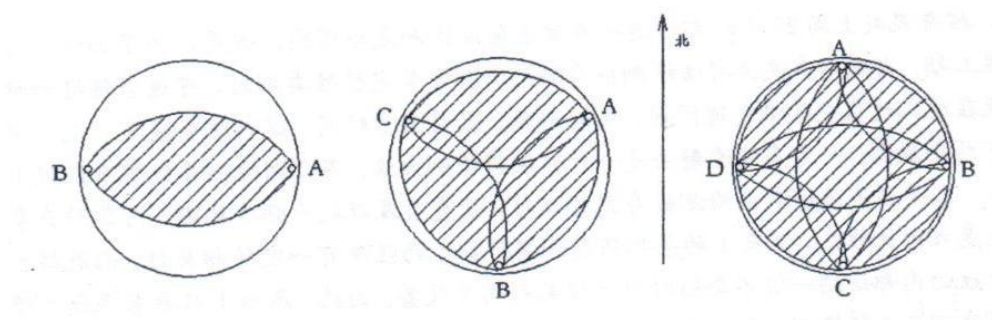


图 31 声测管布置示意图

注：检测剖面编组（检测剖面序号为 j）分别为：2 根管时，AB 剖面（j=1）；3 根管时，AB 剖面（j=1）BC 剖面 j=2），CA 剖面(j=3)；4 根管时，AB 剖面（j=1），BC 剖面（j=2），CD 剖面(j=3)，DA 剖面（j=4），AC 剖面（j=5），BD 剖面（j=6）。

一. 声测管的埋设及要求

声测管是声波透射法测桩时,径向换能器的通道,其埋设数量决定了检测剖面的个数(检测剖面数为 C_n^2 (n 为声测管数)),同时也决定了检测精度:声测管埋设数量多,则两两组合形成的检测剖面越多,声波对桩身混凝土的有效检测范围更大、更细致,但需消耗更多的人力、物力,增加成本;减小声测管数量虽然可以缩减成本,但同时也减小了声波对桩身混凝土的有效检测范围,降低了检测精度和可靠性。

声测管之间应保持平行,否则对测试结果造成很大影响,甚至导致检测方法失效:声测管两两组合形成的每一个检测剖面。沿桩长方向具有许多个测点(测点间距不大于 250mm),我们以桩顶面两声测管之间边缘距离作为该剖面所有测点的测距,在两声测管相互平行的条件下,这样处理是可行的。但两声测管不平时,在实测过程中,检测人员往往把因测距的变化导致的声学参数的变化误认为是混凝土质量差别所致,而声参数对测距的变化都很敏感。这必将给检测数据的分析、结果的判定带来严重影响。虽然在有些情况下,可对斜管测距进行修正,作为一种补救办法,但当声

测管严重弯折翘曲时，往往无法对测距进行合理的修正，导致检测方法失效。

因此声测管的埋设质量（平行度）直接影响检测结果的可靠性和检测试验的成败。

检测剖面、声测线和检测横截面的编组和编号见图 32，桩中预埋三根声测管时可构成三个检测剖面，声波的有效检测范围覆盖了绝大部分桩身横截面因此其声测管利用率是最高的，这符合检测工作既准确又经济的双重要求。因此规范把预埋三根声测管的柱径范围放宽，大多数工程桩的桩径都在这个范围内。声测管按规定的顺序编号，便于复检、验证试验，以及对桩身缺陷的加固、补强等工程处理。

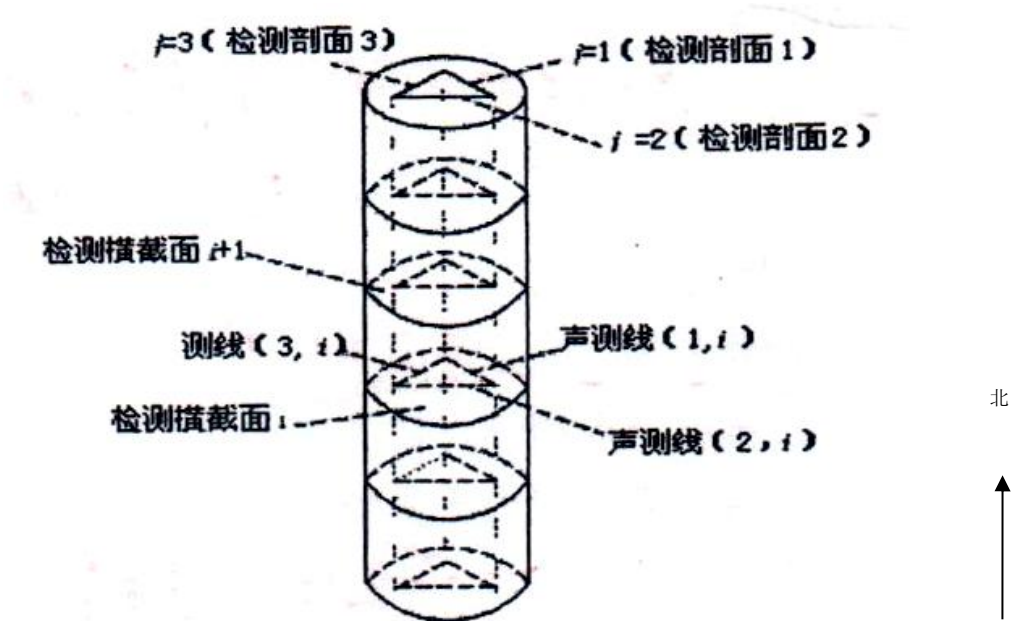


图 32 检测剖面、声测线、检测横截面编组和编号示意图

由于声波在介质中传播时，能量随传播距离的增加呈指数规律衰减，所以两声管组成的单个剖面的有效检测范围占桩横截面的比例将随桩径的增大而变小。对 $D \leq 800\text{mm}$ 的桩，由于两根声测管只能组成一个检测剖面，其有效检测范围相当有限，但测距短，声波衰减小，有效检测面积占桩横截面积有一定比率，所以 $D \leq 800\text{mm}$ 时规定预埋两根声测管。三根声测管可组成三个检测剖面，其有效检测范围覆盖钢筋笼内的绝大部分桩身横截面，其声测管的利用率是最高的。因此，《规范》把预埋三根管的桩径范围放得很宽。这样处理，符合检测工作既细致又经济的双重要求。对于桩径大于 1.6m 的桩，考虑到测距的进一步加大所导致检测精度的降低，所以增至四根声测管。

(2) 声测管管材、规格

对声测管的材料有以下几个方面的要求：

- 1) 有足够的强度和刚度，保证在混凝土灌注过程中不会变形、破损，声测管外壁与混凝土粘结

良好，不产生剥离缝，影响测试结果。

2) 有较大的透声率：一方面保证发射换能器的声波能量尽可能多地进入被测混凝土中，另一方面，又可使经混凝土传播后的声波能量尽可能多地被接收换能器接收，提高测试精度。

在发射换能器与接收换能器之间存在四个异质界面，水^①→声测管管壁^②→混凝土

—^③→声测管管壁^④→水，异质界面声能量透过系数，可按下列式计算：

$$f_{Ti} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

式中 f_{Ti} 为某异质界面的声能透过系数， Z_1 、 Z_2 为两侧介质的声阻抗率 ($Z = \rho c$)。

4 个界面声能总透过系数为

$$f_T = \prod_{i=1}^4 f_{Ti}$$

当 $Z_1 = Z_2$ 时，声能量透过系数为 1 (最大)，所以当声测管材料声阻抗介于水和混凝土之间时，声能量的总透过系数较大。

目前常用的声测管有钢管、钢质波纹管、塑料管 3 种。

钢管的优点是便于安装，可用电焊焊在钢筋骨架上，可代替部分钢筋截面，而且由于钢管刚度较大，埋置后可基本上保持其平行度和平直度，目前许多大直径灌注桩均采用钢管作为声测管，但钢管的价格较贵。

钢质波纹管也是一种较好的声测管，它具有管壁薄、钢材省和抗渗、耐压、强度高、柔性等特点，用作声测管时，可直接绑扎在钢筋骨架上，接头处可用大一号波纹管套接。由于波纹管很轻，因而操作十分方便，但安装时需注意保持其轴线的平直。

塑料管的声阻抗率较低，由于其声阻抗介于混凝土和水之间，所以用它做声测管具有较大的透声率，通常可用于较小的灌注桩。在大型灌注桩中使用时应慎重，因为大直径桩需灌注大量混凝土，水泥的水化热不易发散，鉴于塑料的热膨胀系数与混凝土的相差悬殊，混凝土凝结后塑料管因温度下降而产生径向和纵向收缩，有可能使之与混凝土局部脱开而造成空气或水的夹缝，在声路径上又增加了更多反射强烈的界面，容易造成误判。

声测管内径大，换能器移动顺畅，但管材消耗大，且换能器居中情况差；内径小，则换能器移动时可能会遇到障碍，但管材消耗小，换能器居中情况好。因此，声测管内径通常比径向换能器的直径大 10~20mm 即可。

普通的增压式换能器直径为 30mm 左右，可采用 2 英寸钢管，其外径为 60mm，内径为 53mm，

近几年出现的圆环式径向换能器尺寸比普通的增压式换能器小了很多，可采用 1.5 英寸甚至更小的声测管。

选配直径较小的径向换能器可减小声测管的直径，节约检测成本。

声测管的壁厚对透声率的影响较小，一般不作限制，但从节约成本的角度出发，管壁在保证一定刚度（承受新浇混凝土的侧压力）的前提下，尽可能薄一点。

（3）声测管的连接与埋设

用作声测管的管材一般都不长（钢管为 6m 长一根）当受检桩较长时，需把管材一段一段地联结，接口必须满足下列要求：

- a) 有足够的强度和刚度，保证声测管不致因受力而弯折、脱开；
- b) 有足够的水密性，在较高的静水压力下，不漏浆；
- c) 接口内壁保持平整通畅，不应有焊渣、毛刺等凸出物，以免妨碍接头的上、下移动。

通常有两种联结方式：螺纹联结和套筒联结（如图 33 所示）。



图 33 声测管的联结

声测管一般用焊接或绑扎的方式固定在钢筋笼内侧，在成孔后，灌注混凝土之前随钢筋笼一起放置于桩孔中，如图 34 所示，声测管应一直埋到桩底，声测管底部应密封，如果受检桩不是通长配筋，则在无钢筋笼处的声测管间应设加强箍，以保证声测管的平行度。

安装完毕后，声测管的上端应用螺纹盖或木塞封口，以免落入异物，阻塞管道。

声测管的连接和埋设质量是保证现场检测工作顺利进展的关键，也是决定检测数据的可靠性以及试验成败的关键环节，应引起高度重视。

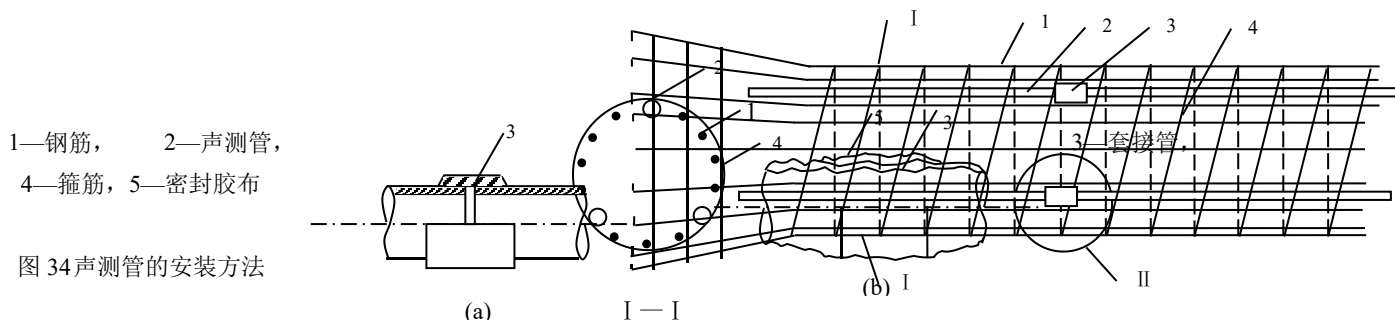


图 34 声测管的安装方法

(4) 声测管的其他用途

(a) 替代一部分主钢筋截面。

(b) 当桩身存在明显缺陷或桩底持力层软弱达不到设计要求时，声测管可以作为桩身压浆补强或桩底持力层压浆加固的工程事故处理通道。

5.2 现场检测前准备工作应符合下列规定：

- 1 采用标定法确定仪器系统延迟时间。
- 2 计算声测管及耦合水层声时修正值。
- 3 在桩顶测量相应声测管外壁间净距离。
- 4 将各声测管内注满清水，检查声测管畅通情况；换能器应能在全程范围内正常升降。

(1) 系统延时的来源

在测试时，仪器所显示的发射脉冲与接收信号之间的时间间隔，实际上是发射电路施加于压电晶片上的电信号的前缘与接收到的声波被压电晶体交换成的电信号的起点之间的时间间隔，由于从发射电脉冲变成到达试体表面的声脉冲，以及从声脉冲变成输入接收放大器的电信号，中间还有种种延迟，所以仪器所反映的声时并非声波通过试件的真正时间，这一差异来自下列几个方面：

(a) 电延迟时间：从声波仪电路原理可知，发出触发电脉冲并开始计时的瞬间到电脉冲开始作用到压电体的时刻，电路中有些触发、转换过程。这些电路转换过程有短暂延迟的响应。另外，触发电信号在线路及电缆上也需短暂的传递时间，接收换能器也类似。这些延迟统称电延迟。

(b) 电声转换时间：在电脉冲加到压电体瞬间到产生振动发出声波瞬间有电声转换的延迟。接收换能器也类似。

(c) 声延迟：换能器中压电体辐射出的声波并不是直接进入被测体，而是先通过换能器壳体或夹心式换能器的辐射体，再通过耦合介质层，然后才进入被测体。接收过程也类似。超声波在通过这些介质时需要花费一定的时间，这些时间统称为声延迟。

这三部分延迟构成了仪器测读时间 t_1 与声波在被测体中传播时间 t 的差异。这三部分中，声延

迟所占的比例最大，这种时间上的差异统称仪器零读数，常用符号 t_0 来表示。仪器零读数的定义为：当发收换能器间仅有耦合介质（发、收各一层，共两层）时仪器的测读时间，而声波在被测物体中的传播时间 $t = t_1 - t_0$ 。

要准确求得 t 应首先标定出仪器零读数 t_0 。显然，不同的声波仪，不同的换能器， t_0 值均各不相同，应分别标定。

(2) 测试系统延时 t_0 的标定方法

使用径向换能器时，系统延时 t_0 的标定方法——时距法：

径向换能器辐射面是圆柱面，应采用如下方法标定：将发、收换能器平行悬于清水中，逐次改变两换能器的间距，并测定相应声时和两换能器间距，做若干点（不少于 4 个点）的声时—间距线性回归曲线，就可求得 t_0

$$t = t_0 + bl \quad (5-1)$$

式中 b ——回归直线斜率；

l ——发、收换能器辐射面边缘间距；

t ——仪器各次测读的声时；

t_0 ——时间轴上的截距（ μs ），即测试系统的延时。

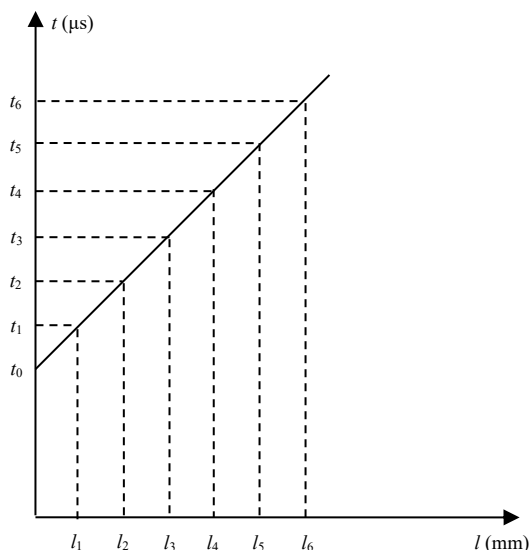


图 35 径向换能器 t_0 标定的时—距法回归直线

值得注意的是，径向换能器用上述方法标定出的零读数只是测试系统（声波仪和换能器）的延迟，没有包括声波在耦合介质（水）及声测管壁中的传播延迟时间（水层和声测管壁的延迟都产生两次）。在耦合介质（水）中的延迟传播时间

$$t_w = \frac{d_1 - d_2}{v_w} \quad (5-2)$$

式中 d_1 ——声测孔直径（钻孔中测量）或声测管内径（声测管中测出）；

d_2 ——径向换能器外径；

v_w ——耦合介质的声速，通常以水作耦合介质 $v_w = 1480\text{m/s}$ 。

声测管壁延时

$$t_p = \frac{d_3 - d_1}{v_p} \quad (5-3)$$

式中 d_3 ——声测管外径；

d_1 ——声测管内径；

v_p ——耦合介质的声速，通常以钢管做声测管 $v_p = 5940\text{m/s}$ ；对于 PVC 管， $v_p = 2350\text{m/s}$ 。

在使用径向换能器进行测量时，还应加上这些时间才是总的零读数值。使用径向换能器在孔（管）中进行测量时，总的零读数 t_0 为

$$\text{在钻孔中：} \quad t_{0a} = t_0 + t_w \quad (5-4)$$

$$\text{在声测管中：} \quad t_{0a} = t_0 + t_w + t_p \quad (5-5)$$

t_{0a} 测得后，从仪器测读声时中扣除 t_{0a} 就是声波在被测介质（混凝土）中的传播时间。

测试系统的延时与声波仪、换能器、信号线均有关系。

在更换上述设备和配件时，都应对系统延时 t_0 重新标定。

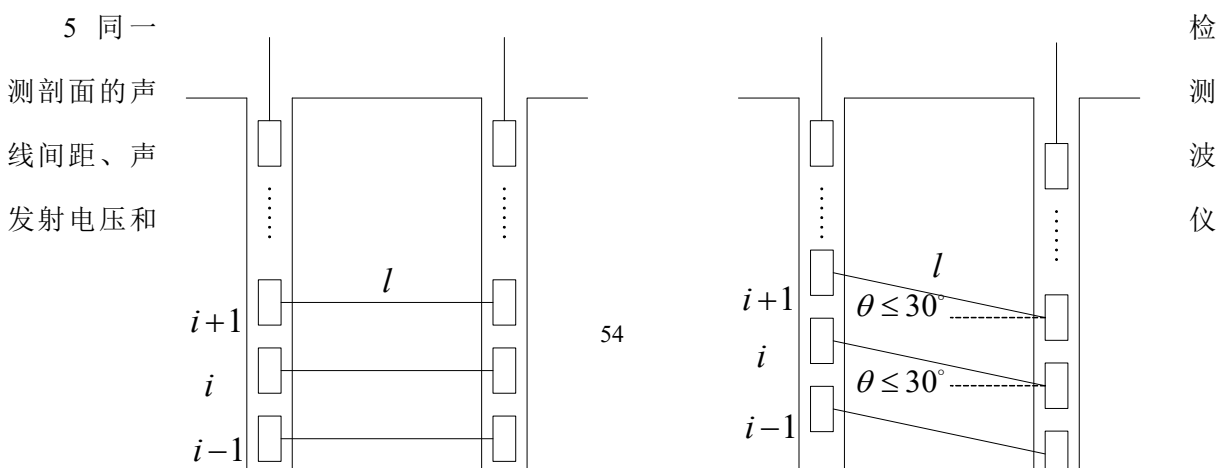
5.3 现场检测步骤应符合下列规定：

1 将发射与接收声波换能器通过深度标志分别置于两个声测管道中。

2 平测时，声波发射与接收声波换能器应始终保持相同深度(图 36a)；斜测时，发射与接收声波换能器应始终保持固定高差（图 36b），且两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 30 度。

3 声波发射与接收换能器应从桩底向上同步提升，声测线间距不应大于 100mm；提升过程中，应校核换能器的深度和校正换能器的高度，并确保测试波形的稳定性，同步提升声波发射与接收换能器的提升速度不宜大于 0.5m/s。

4 应实时显示、记录每条声测线的信号时程曲线，并读取首波声时、幅值；当需要采用信号主频值作为异常声测线辅助判据时，尚应读取信号主频值；保存检测数据的同时，应保存波列图信息。



器设置参数应保持不变。

(a) (b)

图 36 平测、斜测示意图

(a) 平测 ; (b) 斜测

【说明】

1 由于每一个声测管中的测点可能对应多个检测剖面，而声测线则是组成某一检测剖面的两声测管中测点之间的连线，它的声学特征反映的是其声场辐射区域的混凝土质量，有明确的对应关系，故本规程采用“声测线”代替了《JGJ 106-2003》采用的“测点”。径向换能器在径向无指向性，但在垂直面上有指向性，且换能器的接收响应随着发、收换能器中心连线与水平面夹角 θ 的增大而非线性递减。因此为了达到斜测的目的，同时测试系统又有足够的灵敏度，夹角 θ 应不大于 30 度。

2 声测线间距将影响桩身缺陷纵向尺寸的检测精度，间距越小，检测精度越高，但需花费更多的时间，一般混凝土灌注桩的缺陷在空间有一定的分布范围，规定声测线间距不大于 100mm，可满足工程检测精度的要求，当采用自动提升装置时，声测线间距还可进一步减小。

换能器提升过程中电缆线始终处于张拉状态，换能器位置是准确的，而下降过程中换能器在水中受到一定的悬浮力，下沉不及时可能导致电缆线处于松弛状态，从而导致换能器位置不准确，因此须从桩底开始同步提升换能器进行检测才能保证记录的换能器位置的准确性。

自动记录声波发射与接收换能器位置时，提升过程中电缆线带动编码器卡线轮转动。编码器计数卡线轮转动值换算得到换能器位置。电缆线与编码器卡线轮之间滑动、卡线轮直径误差等因素均会导致编码器位置计数与实际传感器位置有一定误差，因此每隔一定间距应进行一次高差校核。此外，自动记录声波发射与接收换能器位置时，如果同步提升声波发射与接收换能器的提升速度过快，会导致换能器在声测管中剧烈摆动，甚至与声测管管壁发生碰撞，对接受的声波波形产生不可预测

的影响。因此换能器的同步提升速度不宜过快，必须保证测试波形的稳定性。

3 在现场对可疑声测线应结合声时（声速）、波幅、主频、实测波形等指标进行综合判定。

4 桩内预埋 n 根声测管可以有 $m = c_n^2$ 个检测剖面，预埋 2 根声测管有 1 个检测剖面，预埋 3 根声测管有 3 个检测剖面，预埋 4 根声测管有 6 个检测剖面，预埋 5 根声测管有 10 个检测剖面。

5 同一根桩检测时，强调各检测剖面声波发射电压和仪器设置参数不变，目的是使各检测剖面的声学参数具有可比性，便于综合判定。

5.4 在桩身质量可疑的声测线附近，应采用增加声测线或采用扇形扫测、交叉斜测、CT 影像技术等方式，进行复测(图 37)或加密测试，确定缺陷的位置和空间分布范围，排除因声测管耦合不良等非桩身缺陷因素导致的异常声测线。采用扇形扫测时，两个换能器中点连线的水平夹角不应大于 40° 。

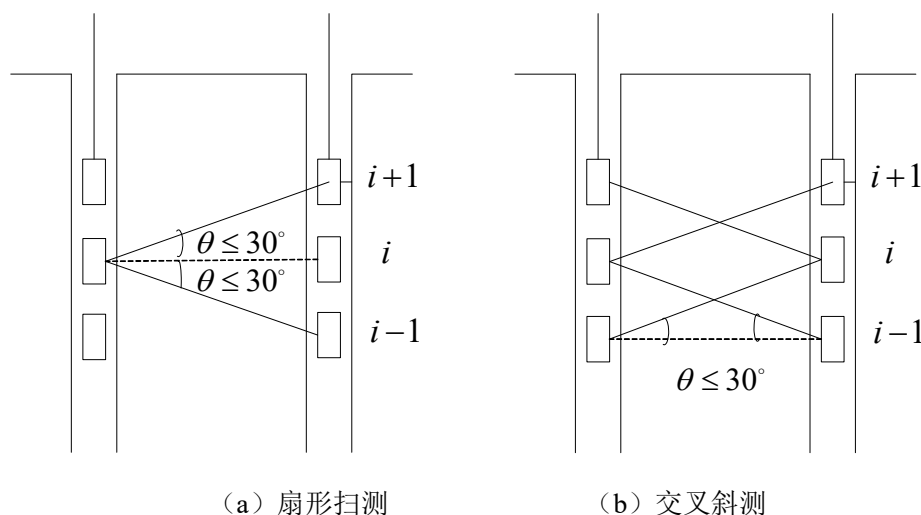


图 37 复测示意图

【说明】 经平测或斜测普查后，找出各检测剖面的可疑声测线，再经交叉斜测等方式既可检验平测普查的结论是否正确，又可以依据测试结果判定桩身缺陷的边界，进而推断桩身缺陷的范围和空间分布特征。基桩中部可疑声测线附近宜用交叉斜测进行复测，桩顶或桩底可疑声测线附近，由于交叉斜测受限制，宜用扇形扫测。

5.5 声学参数与混凝土质量的关系

结构混凝土在施工过程中常因各种原因产生缺陷，尤其是混凝土灌注桩，由于施工难度大，工艺复杂，隐蔽性强，混凝土硬化环境及成型条件复杂，更易产生空洞、裂缝、夹杂物、局部疏松、缩径等各种桩身缺陷，对建筑物的安全和耐久性构成严重威胁。

声波透射法是检测混凝土灌注桩桩身缺陷、评价其完整性的一种有效方法，当声波经混凝土传

播后，它将携带有关混凝土材料性质、内部结构与组成的信息，准确测定声波经混凝土传播后各种声学参数的量值及变化，就可以推断混凝土的性能、内部结构与组成情况。

目前，在混凝土质量检测中常用的声学参数为声速、波幅、频率以及波形。

(1) 声波波速与混凝土质量的关系

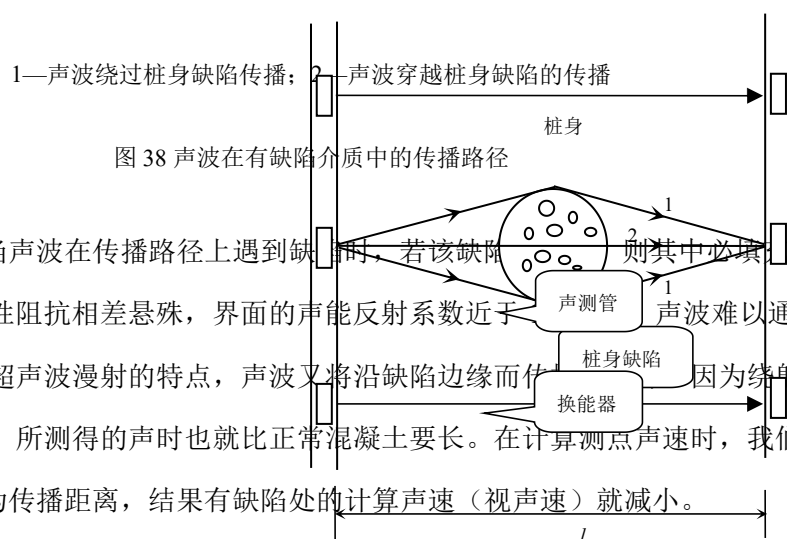
声波在混凝土中的传播速度是混凝土声学检测中的一个主要参数。混凝土的声速与混凝土的弹性性质有关，也与混凝土内部结构（是否存在缺陷及缺陷程度）有关。这是用声速进行混凝土测强和测缺的理论依据。

(a) 声波波速与混凝土强度的关系

声波在混凝土中的传播波速反映了混凝土的弹性性质，而混凝土的弹性性质与混凝土的强度具有相关性，因此混凝土声速与强度之间存在相关性。另一方面，对组成材料相同的构件（混凝土），其内部越致密，孔隙率越低，则声波波速越高，强度也越高。因此构件（混凝土）强度与声速之间亦应该有相关性。但是，混凝土材料是一种多相复合体，其强度与声速的关系不是完全稳定的，受到多种因素的影响，主要有混凝土原材料性质及配合比的影响、龄期影响、温湿度等混凝土硬化环境的影响、施工工艺等四大类。

对同一工程同类型构件（比如混凝土灌注桩），上述四类影响因素是相近的，因此，在这种情况下，构件的声速高低基本上可以反映其强度的高低。

(b) 混凝土内部缺陷对声波波速的影响



如图 12-35 所示，当声波在传播路径上遇到缺陷时，若该缺陷中必填充空气或水。由于混凝土与空气的特性阻抗相差悬殊，界面的声能反射系数近于 1，声波难以通过混凝土/空气界面。但由于低频超声波漫射的特点，声波又将沿缺陷边缘而传播，因为绕射传播的路径比直线传播的路径长，所测得的声时也就比正常混凝土要长。在计算测点声速时，我们总是以换能器间的直线距离 l 作为传播距离，结果有缺陷处的计算声速（视声速）就减小。

有时混凝土内缺陷是由较为松散的材料构成（例如漏振等情况形成的蜂窝状结构或配料错误形

成的低密实性区)。由于这些部位的材料的声速比正常混凝土小,也会使这些部位测点的声时增大。在这种情况下,超声波分两条路径传播:一是绕过缺陷分界面传播;二是直接穿过低声速材料。不论那种情况,在该处测得的声时都将比正常部位长。因为我们是首先到达的波(首波)为准来读取声时值,所以哪条路径所需声时相对短一些,则测读到的便是哪条路径传来的声信号时间。总之,在有缺陷部位测得的声速要比正常部位小。

(2) 接收声波波幅与混凝土质量的关系

接收声波波幅是表征声波穿过混凝土后能量衰减程度的指标之一。一般认为,接收波波幅强弱与混凝土的粘塑性有关。接收波幅值越低,混凝土对声波的衰减就越大。根据混凝土中声波衰减的原因可知,当混凝土中存在低强度区、离析区以及存在夹泥、蜂窝等缺陷时,吸收衰减和散射衰减增大,使接收波波幅明显下降。幅值可直接在接收波上观察测量,也可用仪器中的衰减器测量,测量时通常以首波(即接收信号的前面半个周期)的波幅为准。后续的波往往受其他叠加波的干扰,影响测量结果。幅值的测量受换能器与试体耦合条件的影响较大,在灌注桩检测中,换能器在声测管中通过水进行耦合,一般比较稳定,但要注意使换能器在管中处于居中位置,为此应在换能器上安装定位器。

接收声波幅值与混凝土质量紧密相关,它对缺陷区的反应比声时值更为敏感,所以它也是缺陷判断的重要参数之一。

(3) 接收波频率变化与混凝土质量的关系

声波脉冲是复频波,具有多种频率成分。当它们穿过混凝土后,各频率成分的衰减程度不同,高频部分比低频部分衰减严重,因而导致接收信号的主频率向低频端漂移。其漂移的多少取决于衰减因素的严重程度。所以,接收波主频率实质上是介质衰减作用的一个表征量,当遇到缺陷时,由于衰减严重,使接收波主频率明显降低。

接收波频率的测量一般以首波第一个周期为准,可直接在接收波的示波图形上作简易测量。近年来,为了更准确地测量频率的变化规律,已采用频谱分析的方法,它获得的频谱所包含的信息比采用简易方法时接收波首波频率所带的信息更为丰富,更为准确。

(4) 接收波波形的变化与混凝土质量的关系

接收波波形:由于声波脉冲在缺陷界面的反射和折射,形成波线不同的波束,这些波束由于传播路径不同,或由于界面上产生波形转换而形成横波等原因,使得到达接收换能器的时间不同,因而使接收波成为许多同相位或不同相位波束的叠加波,导致波形畸变。实践证明,凡超声脉冲在传播过程中遇到缺陷,其接收波形往往产生畸变,所以波形畸变程度可作为判断缺陷程度的参考依据。

(5) 声波透过混凝土后的波形特征

A) 声波透过正常混凝土后的波形特征

- a) 首波陡峭，振幅大；
- b) 第一周波的后半周即达到较高振幅，接收波的包络线呈半圆形，如图 12-36；
- c) 第一个周期的波形无畸变。

B) 声波透过有缺陷混凝土后波波形特征：

- 1) 首波平缓，振幅小；
- 2) 第一周期波的后半周甚至第二个周期，幅度增加得仍不够，接收波的包络线呈喇叭形（如图 12-37）；
- 3) 第一、二个周期的波形有畸变；
- 4) 当缺陷严重且范围大时，无法接收声波。

图 39 正常混凝土的接收波形(包络线为半圆形)

图 40 有缺陷混凝土的接收波形(包络线呈喇叭形)

导致波形畸变的因素很多，某些非缺陷因素：如换能器本身振动模式复杂，换能器性能的变化（比如老化），耦合状态的不同，都会导致波形的畸变。此外，后续波是各种不同类型波的叠加，同样会导致波形畸变，因此，观察波形畸变程度应以初至波（接收波的第一、第二周期的波形）为主。

由于声波在混凝土中传播过程是一个相当复杂的过程，目前对波形畸变的分析尚处于经验性的阶段，有待于进一步的研究。

(6) 判定混凝土质量的几种声学参数的比较

(a) 声速的测试值较为稳定，结果的重复性较好，受非缺陷因素的影响小，在同一桩的不同剖面以及同一工程的不同桩之间可以比较，是判定混凝土质量的主要参数，但声速对缺陷的敏感性不及波幅。

(b) 接收波波幅（首波幅值）对混凝土缺陷很敏感，它是判定混凝土质量的另一个重要参数。但波幅的测试值受仪器系统性能、换能器耦合状况、测距等诸多非缺陷因素的影响，它的测试值没有声速稳定，目前只能用于相对比较，在同一桩的不同剖面或不同桩之间往往无可比性。

(c) 接收波主频的变化虽然能反映声波在混凝土中的衰减状况，从而间接反映混凝土质量的好坏，但声波主频的变化也受测距、仪器设备状态等非缺陷因素的影响，因此在不同剖面以及不同桩之间的可比性不强，只用于同一剖面内各测点的相对比较，其测试值也没有声速稳定。因此，目前主频漂移指标仅作为声速、波幅的辅助判据。

(d) 接收波波形

接收波也是反映混凝土质量的一个重要方面，它对混凝土内部的缺陷也较敏感，在现场检测时，除逐点读取首波的声时、波幅外，还应注意观察整个接收波形态的变化，作为声波透射法对混凝土质量进行综合判定时的重要的参考，因为接收波形是透过两声测管间混凝土的声波能量的一个总体反映，它反映了发、收换能器之间声波在混凝土各种声传播路径上的总体能量，其影响区域大于直达波（首波）。

5.6 声学参数的检测技术

(1) 声速检测

(a) 测试精度要求

目前混凝土的声波检测在工程上主要用于两个方面：根据实测声参数（主要是声速）来推定混凝土强度；探测混凝土构件的内部缺陷，评价其完整性。

当声速用于推定混凝土强度时，则对声速的测试精度要求较高。

混凝土的强度 f 与混凝土声速 v 有一定相关性。用声波测量混凝土强度就是通过预先建立的 f - v 相关关系，用实测的混凝土声速 v 来推算其强度值。

大量试验证实， f 与 v 的相关曲线属于指数型，也就是说，混凝土强度较大的变化只相对于声速较小的变化，且混凝土强度愈高，这种趋向愈突出。这种情况使得必须对声速测量的精度提出较高要求。

除了要求声波仪在测时方面有足够的精度（ $0.1\mu\text{s}$ ）外，还必须注意在测量过程中那些影响测量结果准确性的各种因素并加以修正和消除。这些影响因素包括测读声时的方法与标准、仪器零读数问题、测距的影响、声波频率的影响等。

在用声波透射法检测混凝土灌注桩完整性时，没有涉及混凝土强度的推定问题，且声参数多用于相对比较，因此对声速的测试精度要求低于“测强”要求，在《规范》中对声时的测试精度要求是优于 $0.5\mu\text{s}$ 。

在实测时，声速不是直接测试量，而是根据测距和声时来计算的，因此声速的测试精度取决于测距和声时的测试精度。

在混凝土灌注桩的完整性检测中，测距就是声测管外壁间的净距，一般用钢卷尺在桩顶面度量。这个测试值代表了整个测试剖面内各测点的测距。因此，声测管的平行度对声速测试精度的影响是相当大的。

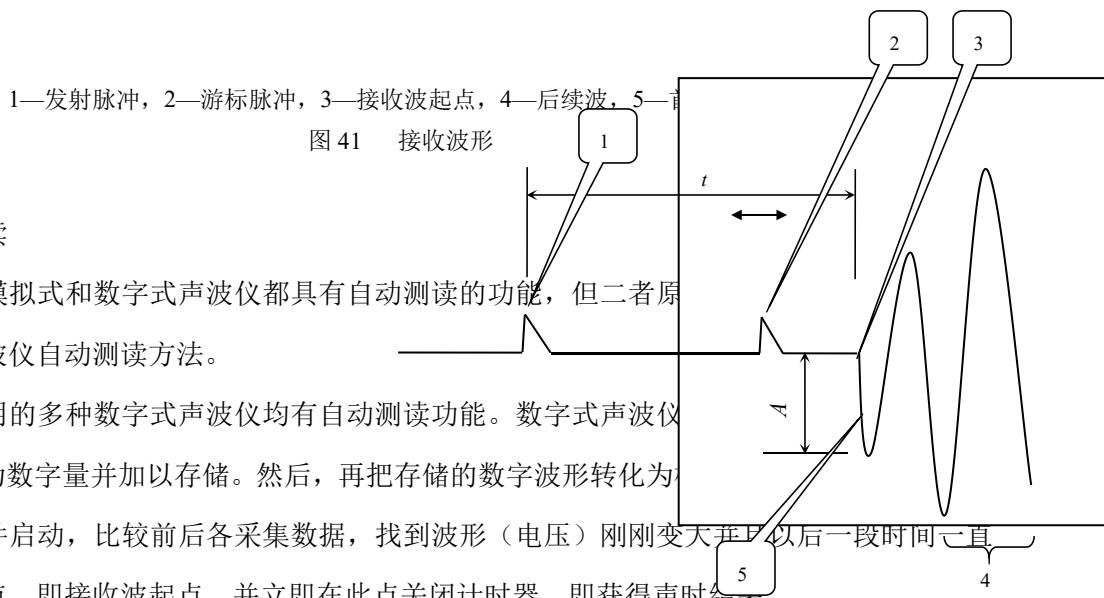
(b) 声时的测读方法

声波在被测介质中传播一定声程所需的时间称为声时。

声波仪以 100Hz（或 50Hz）的重复频率产生高压电脉冲去激励换能器，发射换能器不断重复发射出声脉冲波。声波经混凝土中传播后被接收换能器接收，接收换能器将接收到的声信号转化为电信号，再送回声波仪，经放大后加在屏幕上。因为声波仪在发射超声波时不断同步重复扫描（或采样并显示），使接收到的波形稳定显示在屏幕上。图 12-38 表示出屏幕上显示的波形。由于所显示的波形只能是从发射到接收这一时间段中的某一部分，当显示出波形时，往往看不到发射的起点（发射脉冲）。测量声时，就是测量从发射开始到出现接收波所经过的时间，如图 12-38 上的 t 。为了测量这段时间，仪器在一开启就产生发射脉冲发射声波，与此同时，还将计时器的门打开，计时器开始不断计时。现在的问题是如何在出现接收波时刻（图中的 3 点处）将计时器关闭。测量声时的方法就是如何关闭计时器的方法。方法分两种：手动测读（关门）与自动测读（关门）。

1) 手动测读

在声波仪上设置了专门的关闭计时器的电路，在关闭计时器的同时，在屏幕上显示一游标脉冲（模拟式声波仪）或游标竖线（数字式声波仪）。游标或竖线所在的位置（即时刻）也就是计时器被关闭的时刻。游标可以在屏幕上左右移动。当发、收换能器对准了测点后，调节仪器，使接收波显示在屏幕上，这时调节仪器有关旋钮或键，使游标脉冲的前（左）沿或游标线与接收波的起点（图 41 中的 3）对准，这时仪器上就显示出时间值，这就是发射开始时刻到接收波出现时刻所经过的时间 t 。



2) 自动测读

目前所用的模拟式和数字式声波仪都具有自动测读的功能，但二者原只介绍数字式声波仪自动测读方法。

目前广泛使用的多种数字式声波仪均有自动测读功能。数字式声波仪采集下来，转变为数字量并加以存储。然后，再把存储的数字波形转化为同时，计算机软件启动，比较前后各采集数据，找到波形（电压）刚刚变大并以后一段时间一直较大的那个采样点，即接收波起点，并立即在此点关闭计时器，即获得声时结束。

数字式自动测读一般不会丢波，可以在现场长测距测试中使用。但有时因各种干扰或信号太弱时，仪器也会出现将某个后续波误当作首波起点来测读，或来回不断寻找，不能确定首波的情况，因此仪器中设置了一条游标线，表明仪器当时的测读点，使用者在使用自动测读时也应监视屏幕，只有看到游标线正好在首波起点处时才能按下确定键，确认测定结果，此时也可将仪器的测读状态

由自动测读切换到手动调节方式，将游标线移至首波起点处测读声时。

另外，若仪器抗干扰能力不强，外界一些干扰会使自动确定测读起点的游标线左右跳动，影响仪器测读的重复性。因此，建议对于需要精确测量结果的测试，例如标定试件的测试，还是采用手动测读为好。

(2) 波幅检测

波幅是标志接收换能器接收到的声波信号能量大小的参量。

波幅的测量是用某种指标来度量接收波首波波峰的高度，并将它们作为比较多个测点声波信号强弱的一种相对指标。目前在波幅测量中一般都采用分贝（dB）表示法，即将测点首波信号峰值 a 与某一固定信号量值 a_0 的比值取对数后的量值定为该测点波幅的分贝（dB）值，表示为 $A_p = 20 \lg \frac{a}{a_0}$ 。

在数字式仪器中，由于数字化信号屏幕波幅可以量化，因此通过调整放大衰减系统，只要满足首波幅度不超出满屏的条件，即可用软件自动判定出首波波峰样品幅值并计算出接收到的原始信号的幅值。波幅的量值是放大器的增益（dB）值，衰减器的衰减（dB）值和屏幕显示波形的波幅（dB）值的综合值，这样大大提高了波幅量测的动态范围。

数字式声波仪的波幅测量有自动判读和手动判读两种方式，在绝大多数情况下均可使用自动判读的方法，在声时自动判读的同时即完成了首波波幅的自动判读，同时观察屏幕，如果波幅自动测读光标所对应的位置与首波波峰（或波谷）有差异时，应重新采样或改为手动游标读数。

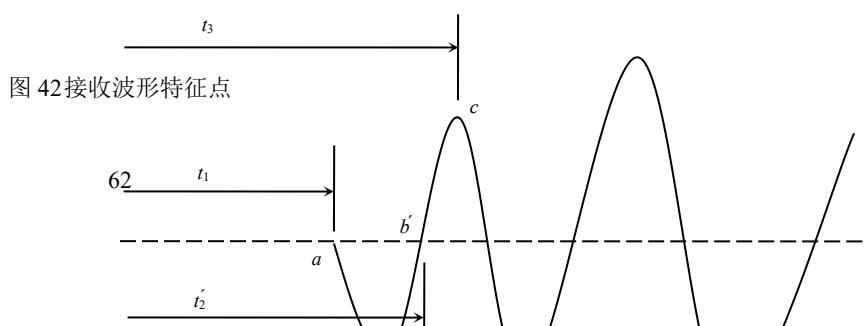
由于接收波幅大小不仅取决于混凝土本身的性能、质量，还与换能器性能（灵敏度、频率及频率特性）、仪器等一系列非缺陷因素以及换能器与混凝土的声耦合状态有关。为使波幅值能相对地反映混凝土性质、质量，在波幅测量中必须保证测量系统因素的一致性，以保证波幅的相互可比性。

- a) 要保持测试系统状态的一致性，即仪器、换能器及信号电缆线在同一批测试中保持不变。
- b) 要保持测试参数不变，如发射电压、采样频率等。
- c) 还要特别注意接收换能器与混凝土之间的耦合状况，尽量使其良好一致。如果被测体表面平整光滑或在钻孔中的水耦合条件下测试，耦合容易做到一致，波幅值具有较好的可比性；若难于保证耦合状况的良好一致，则波幅值将受到耦合状态的干扰，在这种情况下，波幅值只能作为评定混凝土质量的参考。

- d) 在运用波幅作相对比较时，还应尽可能保持测试在相同测距和相同测试角度情况下进行。

(3) 频率检测

对模拟式声波仪接收波形的主频测量通常采用周期法。



所谓周期法就是利用频率和周期的倒数关系，用声波仪测量出接收波的周期，进而计算出接收波的主频值，如图 12-9 所示，移动游标，分别对准接收波的 a 、 b 、 c 、 d 各波峰、波谷点，读取相应的声时读数 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 （其中， t_1 即首波起点声时，在声时测量中已测得），则接收波主频率可按下式计算：

$$f = \frac{1}{4(t_1 - t_2)} \text{ 或 } \frac{1}{2(t_3 - t_2)} \text{ 或 } \frac{1}{(t_4 - t_2)} \quad (12-87)$$

由于所接收到的一串波中，各个波的频率并不完全相同，越往后面，波的频率越低，同时也只有前面一、二个波才是真正的直达纵波，所以，测定频率时应取其中最前面一、二个波进行测量。

另外，从试验中发现，按 $f = \frac{1}{4(t_2 - t_1)}$ 计算出的频率明显偏小，因此若要测得较真实的主频率值，还是

以 $f = \frac{1}{2(t_3 - t_2)}$ 或 $\frac{1}{(t_4 - t_2)}$ 计算为好。在大量现场测试中，为了减小测量次数，也可在测读 t_1 后再

补测 b' 点（接收波和水平扫描延长线交点）的声时 t'_2 ，按 $f = \frac{1}{2(t'_2 - t_1)}$ 计算频率^[8]。

由于频率值系按两次声时读数之差计算的，仪器零读数已抵消，故不用扣零读数。

数字式声波仪都配有频域分析软件，可用频谱分析的方法更精确地测试接收声波信号的主频。和波幅类似，频率测值也与换能器种类、性能、声耦合状况、探测距离等因素有关。只有上述因素固定，频率值才能作为相对比较的参数而用于混凝土质量判断。

（4）波形的记录

声波在传播过程中遇到混凝土内部缺陷、裂缝或异物时会使波形畸变，因此，对接收波形的分析与研究有助于混凝土内部质量及缺陷的判断，模拟式仪器的波形记录只能用屏幕拍照方法。数字式仪器的高速数字信号采集系统既可实时观察接收波形的动态变化，又可将波形以数字信号方式记录并存储在波形文件中，波形可以文件的方式存储、显示、调用，并打印出波形图。将多次采样后的一组波列文件显示在同一屏中，可以形成波列列表图。同一测线上多个连续测点的波形记录组合为波列图后，可以直观地显示出声参量的变化。

5.7 现场测试

（1）检测前的准备工作

（a）制定检工作测程序。

（b）调查、收集待检工程及受检桩的相关技术资料 and 施工记录。比如桩的类型、尺寸、标高、施工工艺、地质状况、设计参数、桩身混凝土参数、施工过程及异常情况记录等信息。

（c）检查测试系统的工作状况，必要时（更换换能器、电缆线等）应按“时一距”法对测试系

统的延时 t_0 重新标定，并根据声测管的尺寸和材质计算耦合声时 t_w ，声测管壁声时 t_p 。

(d) 将伸出桩顶的声测管切割到同一标高，测量管口标高，作为计算各测点高程的基准。

(e) 向管内注入清水，封口待检。

(f) 在放置换能器前，先用直径与换能器略同的圆钢作吊绳。检查声测管的通畅情况，以免换能器卡住后取不上来或换能器电缆被拉断，造成损失。有时，对局部漏浆或焊渣造成的阻塞可用钢筋导通。

(g) 用钢卷尺测量桩顶面各声测管之间外壁净距离，作为相应的两声测管组成的检测剖面各测点测距，测试误差小于 1%。

(h) 测试时径向换能器宜配置扶正器，尤其是声测管内径明显大于换能器直径时，换能器的居中情况对首波波幅的检测值有明显影响。扶正器就是用 1~2mm 厚的橡皮剪成一齿轮形，套在换能器上，齿轮的外径略小于声测管内径。扶正器既保证换能器在管中能居中，又保护换能器在上下提升中不致与管壁碰撞，损坏换能器。软的橡皮齿又不会阻碍换能器通过管中某些狭窄部位。

(2) 检测前对混凝土龄期的要求

原则上，桩身混凝土满 28d 龄期后进行声波透射法检测是最合理的，也是最可靠的。但是，为了加快工程建设进度、缩短工期，当采用声波透射法检测桩身缺陷和判定其完整性等级时，可适当将检测时间提前。特别是针对施工过程中出现异常情况的桩，可以尽早发现问题，及时补救，赢得宝贵时间。

这种将检测时间适当提前的做法基于以下两个原因：

一方面，声波透射法是一种非破损检测方法，声波对混凝土的作用力非常小，即使混凝土没有达到龄期，也不会因检测导致桩身混凝土结构的破坏。

另一方面，在声波透射法检测桩身完整性时，没有涉及混凝土强度问题，对各种声参数的判别采用的是相对比较法，混凝土的早期强度和满龄期后的强度有一定的相关性，而混凝土内因各种原因导致的内部缺陷一般不会因时间的增长而明显改善。因此，原则上只要求混凝土硬化并达到一定强度即可进行检测。《规范》中规定：“当采用低应变法或声波透射法检测桩身完整性时，受检桩混凝土强度至少达到设计强度的 70%，且不小于 15MPa。”，混凝土达到 28d 强度的 70% 一般需要十天左右的时间。

(3) 检测步骤

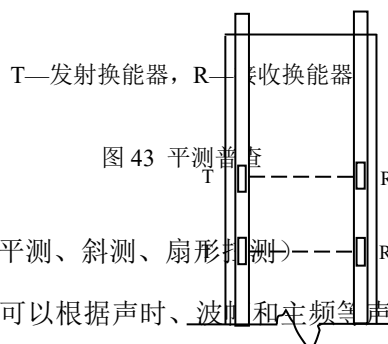
现场的检测过程一般分两个步骤进行，首先是采用平测法对全桩各个检测剖面进行普查，找出声学参数异常的测点。然后，对声学参数异常的测点采用加密测试、斜测或扇形扫测等细测方法进一步检测，这样一方面可以验证普查结果，另一方面可以进一步确定异常部位的范围，为桩身完整

性类别的判定提供可靠依据。

(a) 平测普查(如图 43 所示)

平测普查可以按照下列步骤进行：

- 1) 将多根声测管以两根为一个检测剖面进行全组合（共有 C_n^2 个检测剖面， n 为声测管数），并按图 31 进行剖面编码。
- 2) 将发、收换能器分别置于某一剖面的两声测管中，并放至桩的底部，保持相同标高。
- 3) 自下而上将发、收换能器以相同的步长（一般不宜大于 100mm）向上提升。每提升一次，进行一次测试，实时显示和记录测点的声波信号的时程曲线，读取声时、首波幅值和周期值（模拟式声波仪），宜同时显示频谱曲线和主频值（数字式仪器）。重点是声时和波幅，同时也要注意实测波形的变化。
- 4) 在同一桩的各检测剖面的检测过程中，声波发射电压和仪器设置参数应保持不变。由于声波波幅和主频的变化，对声波发射电压和仪器设置参数很敏感，而目前的声波透射法测桩，对声参数的处理多采用相对比较法，为使声参数具有可比性，仪器性能参数应保持不变。

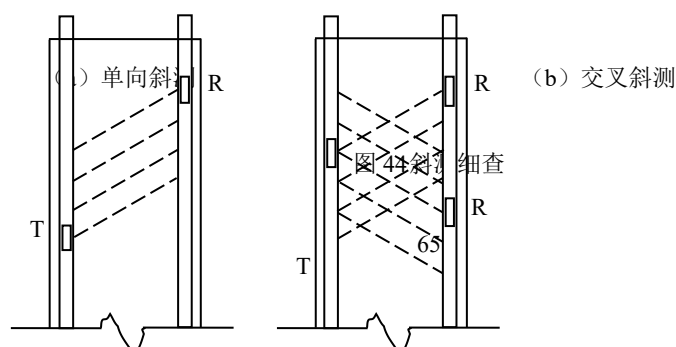


(b) 对可疑测点的细测（加密平测、斜测、扇形扫测）

通过对平测普查的数据分析，可以根据声时、波幅和主频等声学参数相对变化及实测波形的形态，找出可疑测点。

对可疑部位桩身混凝土，宜先进行加密平测（换能器提升步长应小于 10cm），核实可疑处的异常情况，并确定异常部位的纵向范围。再用斜测法对异常点缺陷的严重情况进行进一步的探测。斜测(如图 44(a)所示)就是让发、收换能器保持一定的高程差，在声测管内以相同步长同步升降进行测试，而不是象平测那样让发、收换能器在检测过程中始终保持相同的高程。斜测又分为单向斜测和交叉斜测（如图 44 所示）。

由于径向换能器在铅垂面上存在指向性，因此，斜测时，发、收换能器中心连线与水平面的夹角不能太大，一般不应大于 30° ，进行扇形扫测时一般不大于 40° 。



1) 局部缺陷：如图 45(a)所示，在平测中发现某测线测值异常（图中用实线表示），进行斜测，在多条斜测线中，如果仅有一条测线（实线）测值异常，其余皆正常，则可以判断这只是一个局部的缺陷，位置就在两条实线的交点处。

2) 缩颈或声测管附着泥团：如图 45(b)所示，在平测中发现某（些）测线测值异常（实线），进行斜测。如果斜测线中、通过异常平测点发收处的测线测值异常，而穿过两声测管连线中间部位的测线测值正常，则可判断桩中心部位是正常混凝土，缺陷应出现在桩的边缘，声测管附近，有可能是缩颈或声测管附着泥团。当某根声测管陷入包围时，由它构成的两个测试面在该高程处都会出现异常测值。

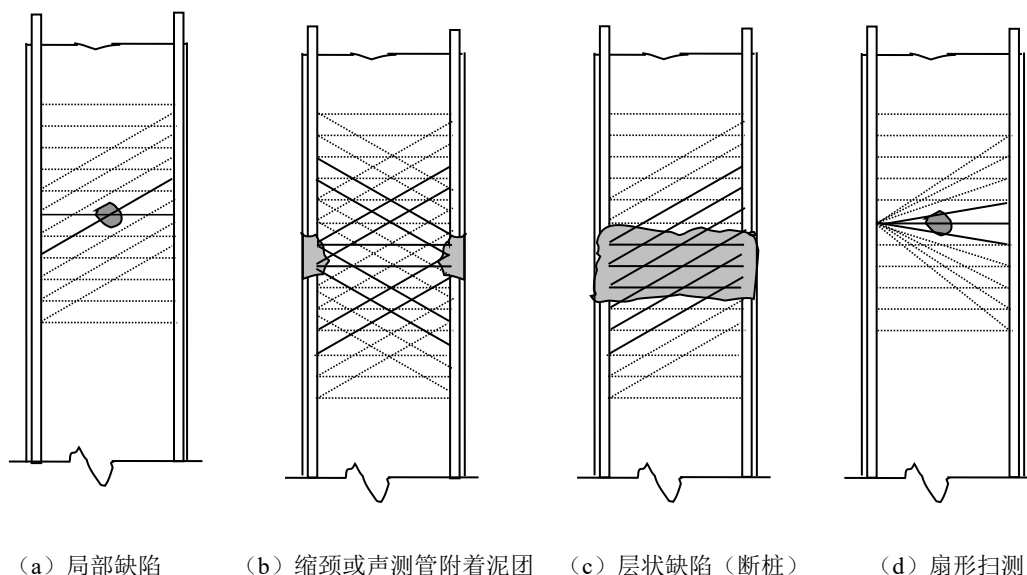


图 45 灌注桩的交叉斜测和扇形扫测

3) 层状缺陷（断桩）：如图 45(c)所示，在平测中发现某（些）测线值异常（实线），进行斜测。如果斜测线中除通过异常平测点发收处的测线测值异常外，所有穿过两声测管连线中间部位的测线测值均异常，则可判定该声测管间缺陷连成一片。如果三个测试面均在此高程处出现这样情况，如果不是在桩的底部，测值又低下严重，则可判定是整个断面的缺陷，如夹泥层或疏松层，既断桩。

斜测有两面斜测和一面斜测。最好进行两面斜测，以便相互印证，特别是像图 45(b)那种缩颈或包裹声测管的缺陷，两面斜测可以避免误判。

4) 扇形扫查测量：在桩顶或桩底斜测范围受限制时，或者为减少换能器升降次数，作为一种辅助手段，也可扇形扫查测量，如图 45(d)所示。一只换能器固定在某高程不动，另一只换能器逐点移动，测线呈扇形分布。要注意的是，扇形测量中各测点测距是各不相同的，虽然波速可以换算，相

互比较，但振幅测值却没有相互可比性（波幅除与测距有关，还与方位角有关，且不是线性变化），只能根据相邻测点测值的突变来发现测线是否遇到缺陷。

测试中还要注意声测管接头的影响。当换能器正好位于接头处，有时接头会使声学参数测值明显降低，特别是振幅测值。其原因是接头处存在空气夹层，强烈反射声波能量。遇到这种情况，判断的方法是：将换能器移开一定距离后，测值立刻正常，反差极大，往往属于这种情况。另外，通过斜测也可作出判断。

（c）对桩身缺陷在桩横截面上的分布状况的推断。

对单一检测剖面的平测、斜测结果进行分析，我们只能得出缺陷在该检测剖面上的投影范围，桩身缺陷在空间的分布是一个不规则的几何体，要进一步确定缺陷的范围（在桩身横截面上的分布范围），则应综合分析各个检测剖面在同一高程或邻近高程上的测点的测试结果，如图 46 所示，一灌注桩桩身存在缺陷，在三个检测剖面的同一高程上通过细测（加密平测和斜测），确定了该桩身缺陷在三个检测剖面上的投影范围，综合分析桩身缺陷的三个剖面投影可大致推断桩身缺陷在桩横截面上的分布范围。

桩身缺陷的纵向尺寸可以比较准确地检测，因为测点间距可以任意小，所以在桩身纵剖面上可以有任意多条测线。而桩身缺陷在桩横截面上的分布则只是一个粗略的推断，因为在桩身横截面上最多只有 C_n^2 条测线（ n 为声测管埋设数量）。

近几年发展起来的灌注桩声波层析成像（CT）技术是检测灌注桩桩身缺陷在桩内的空间分布状况的一种新方法。

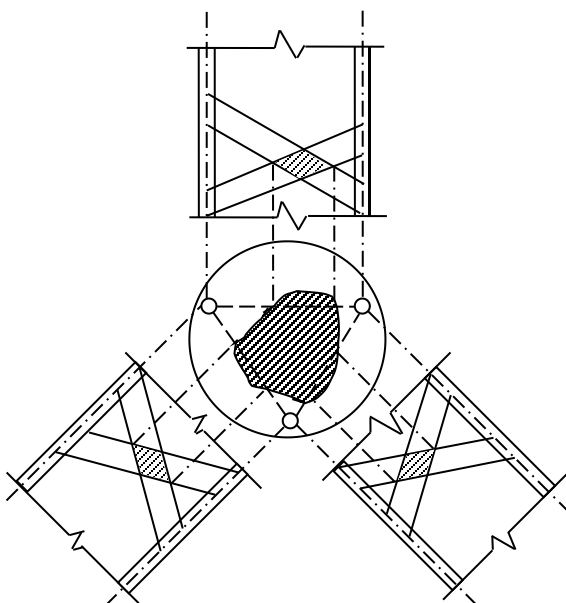


图 46 桩身缺陷在桩横截面上的分布及在各检测剖面上的投影

第六节 检测数据分析与判定

6.1 平测时各声测线的声时、声速、波幅及主频，应根据现场检测数据，分别按下列公式计算，并绘制声速-深度曲线和波幅-深度曲线，也可绘制辅助的主频-深度曲线以及能量-深度曲线。

$$t_{ci}(j) = t_i(j) - t_0 - t' \quad (6-1)$$

$$v_i(j) = \frac{l_i'(j)}{t_{ci}(j)} \quad (6-2)$$

$$A_{pi}(j) = 20 \lg \frac{a_i(j)}{a_0} \quad (6-3)$$

$$f_i(j) = \frac{1000}{T_i(j)} \quad (6-4)$$

式中： i ——声测线编号，应对每个监测剖面自下而上（或自上而下）连续编号；

j ——检测剖面编号，按本规程第 10.3.2 条编组；

$t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时（ μs ）；

$t_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时测量值（ μs ）；

t_0 ——仪器系统延迟时间（ μs ）；

t' ——声测管及耦合水层声时修正值（ μs ）；

$l_i'(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的两声侧管的外壁间净距离（mm），当两声测管平行时，可取两声测管管口的外壁间净距离；

$v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速（km/m）；

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的首波幅值(dB)；

$a_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号首波幅值(V)；

a_0 ——零分贝信号幅值(V)；

$f_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号主频值（kHz），可经信号频谱分析得到；

$T_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号周期（ μs ）。

灌注桩的声波透射法检测需要分析和处理的主要声学参数是声速、波幅、主频，同时要注意对实测波形的观察和记录。目前大量使用的数字式声波仪有很强的数据处理、分析功能，几乎所有的

数学运算都是由计算机来完成的。作为一个合格的现场检测技术员了解这些数据整理的方法有助于对桩身缺陷的正确判别和桩身完整性的正确判定。实测波形的形态能综合反映发、收换能器之间声波能量在混凝土中各种传播路径上的总的衰减状况，应记录有代表性的混凝土质量正常的测点的波形曲线，和异常测点的波形曲线，可作为对桩身缺陷的辅助判断。

根据各个测点声参数的计算值和测点标高，绘制声速~深度曲线、声幅~深度曲线、主频~深度曲线，将三条曲线对应起来进行异常测点的判断更直观，便于综合分析。

6.2 当采用平测或斜测时，第 j 检测剖面的声速异常判断的概率统计值应按下列方法确定：

1 当第 j 检测剖面各声测线的声速值 $v_i(j)$ 由大到小依次排序，即：

$$v_1(j) \geq v_2(j) \geq \dots v_{i-1}(j) \geq v_i(j) \geq v_{i+1}(j) \geq \dots v_{n-k}(j) \geq \dots v_{n-1}(j) \geq v_n(j) \quad (6-5)$$

式中： $v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速， $i = 1, 2, \dots, n$ ；

n ——第 j 检测剖面声测线总数；

k ——拟去掉的低声速值的数据个数， $k = 1, 2, \dots, n$ ；

k' ——拟去掉的高声速值的数据个数， $k' = 1, 2, \dots, n$ 。

2 对逐一去掉 $v_i(j)$ 中 k 个最小数值和 k' 个最大数值后的其余数据，按下列公式进行统计计算：

$$v_{01}(j) = v_m(j) - \lambda \cdot s_x(j) \quad (6-6)$$

$$v_{02}(j) = v_m(j) + \lambda \cdot s_x(j) \quad (6-7)$$

$$v_m(j) = \frac{1}{n-k-k'} \sum_{i=k'+1}^{n-k} v_i(j) \quad (6-8)$$

$$s_x(j) = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} (v_i(j) - v_m(j))^2} \quad (6-9)$$

$$C_v(j) = \frac{s_x(j)}{v_m(j)} \quad (6-10)$$

式中： $v_{01}(j)$ ——第 j 剖面的声速异常小值判断值；

$v_{02}(j)$ ——第 j 剖面的声速异常大值判断值；

$v_m(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的平均值；

$s_x(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的标准差；

$C_v(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的变异系数;

λ ——由表 5 查得的与 $(n-k-k')$ 相对应的系数。

表 5 统计数据个数 $(n-k-k')$ 与对应的 λ 值

$n-k-k'$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
λ	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.64
$n-k-k'$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
$n-k-k'$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
$n-k-k'$	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ	2.13	2.14	2.15	2.18	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
$n-k-k'$	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
$n-k-k'$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.4	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k-k'$	150	160	180	180	190	200	220	240	260	280
λ	2.47	1.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69
$n-k-k'$	300	320	340	360	380	400	420	440	470	500
λ	2.72	2.74	2.76	2.77	2.79	2.81	2.61	2.84	2.86	2.88
$n-k-k'$	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
λ	2.191	2.94	2.96	2.98	3.00	3.02	3.04	3.06	3.08	3.09
$n-k-k'$	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1800	1800	1900	2000
λ	3.12	3.14	3.18	3.19	3.21	3.23	3.24	3.26	3.28	3.29

3 按 $k=0$ 、 $k'=0$ 、 $k=1$ 、 $k'=1$ 、 $k=2$ 、 $k'=2$... 的顺序, 将参加统计的数列最小数据

$v_{n-k}(j)$ 与异常判断值 $v_{01}(j)$ 进行比较, 当 $v_{n-k}(j) \leq v_{01}(j)$ 时, 则剔除最小数据; 将最大数据 $v_{n-k'}(j)$

与 $v_{02}(j)$ 进行比较, 当 $v_{n-k'}(j) \geq v_{01}(j)$ 时, 剔除最大数据。每次剔除一个数据, 然后对剩余数据构成的数列重复式 (10.3.5-2) ~ (10.3.5-5) 的计算步骤, 直到下列两式成立:

$$v_{n-k}(j) > v_{01}(j) \quad (6-10)$$

$$v_{n-k'}(j) < v_{02}(j) \quad (6-11)$$

4 第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值按下式计算：

$$v_0(j) = \begin{cases} v_m(j)(1-0.015\lambda) & \text{当 } C_v(j) < 0.015 \text{ 时} \\ v_0(j) & \text{当 } 0.015 \leq C_v(j) \leq 0.045 \text{ 时} \\ v_m(j)(1-0.045\lambda) & \text{当 } C_v(j) > 0.045 \text{ 时} \end{cases} \quad (6-12)$$

式中： $v_0(j)$ ——第 j 检测剖面声速异常判断概率统计值。

【说明】

1 同批次混凝土试件在正常情况下强度值的波动是服从正态分布规律的，这已被大量的实测数据证实。由于混凝土构件的声速与其强度存在较好的相关性，所以其声速值的波动也近似地服从正态分布规律。灌注桩作为一种混凝土构件，可认为在正常情况下其各条声测线的声速测试值也近似服从正态分布规律。这是用概率法计算混凝土灌注桩各剖面声速异常判断概率统计值的前提。

2 如果某一剖面有 n 条声测线，相当于进行了 n 个试件的声速试验，在正常情况下，这 n 条声测线的声速值的波动可认为是服从正态分布规律的。但是，由于桩身混凝土在成型过程中，环境条件的影响或人为过失的影响或测试系统的误差等都将导致 n 个测试值中的某些值偏离正态分布规律，在计算某一剖面声速临界值时，应剔除偏离正态分布的声测线，通过对剩余的服从正态分布规律的声测线数据进行统计计算就可以得到该剖面桩身混凝土在正常波动水平下可能出现的最低声速，这个声速值就是判断该剖面各声测线声速是否异常的概率统计值。

3 在计算剖面声速临界值时采用了“双边剔除法”。一方面，桩身混凝土硬化条件复杂、混凝土粗细骨料不均匀、桩身缺陷、声测管耦合状况的变化、测距的变异性（将桩顶面的测距设定为整个检测剖面的测距）、首波判读的误差等因素可能导致某些声测线的声速值向小值方向偏离正态分布。另一方面，混凝土离析造成的局部粗骨料集中、声测管的耦合状况的变化、测距的变异、首波判读的误差、以及部分声测线可能存在声波沿环向钢筋的绕射等因素也可能导致某些声测线声速测试值向大值方向偏离正态分布，这也属于非正常情况，在声速临界值的计算时也应剔除，否则两边的数据不对称，加剧剩余数据偏离正态分布，影响正态分布特征参数 v_m 和 s_x 的推定。

双剔是按照下列顺序逐一剔除：(1)异常小，(2)异常大，(3)异常小，..，每次统计计算后只剔一个，每次异常值的误判次数均为 1，没有改变原规范的概率控制条件。

在实际计算时，先将某一剖面 n 条声测线的声速测试值从大到小排列为一数列，计算这 n 个测试值在正常情况下（符合正态分布规律下）可能出现的最小值 $v_{01}(j) = v_m(j) - \lambda \cdot s_x(j)$ 和最大值

$v_{02}(j) = v_m(j) + \lambda \cdot s_x(j)$ ，依次将声速数列中大于 $v_{02}(j)$ 或小于 $v_{01}(j)$ 的数据逐一剔除（这些被剔除的数据偏离了正态分布规律），再对剩余数据构成的数列重新计算，直至式(18.5.3-7)和式 (18.5.3-8)

同时满足，此时认为剩余数据全部服从正态分布规律。 $v_{01}(j)$ 就是判断声速异常的概率法统计值。

由于统计计算的样本数是 10 个以上，因此对于短桩，可通过减小声测线间距获得足够的声测线数。

桩身混凝土均匀性可采用离差系数 $C_v(j) = s_x(j)/v_m(j)$ 评价。

4 当桩身混凝土质量稳定，声速测试值离散小时，由于标准差 $s_x(j)$ 较小，可能导致异常判断概率统计值 $v_{01}(j)$ 过高从而误判；另一方面当桩身混凝土质量不稳定，声速测试值离散大时，由于 $s_x(j)$ 过大，可能会导致 $v_{01}(j)$ 过小从而导致漏判。为尽量减小出现上述两种情况的机率，对变异系数 $C_v(j)$ 作了限定。通过统计分析，发现将 $C_v(j)$ 限定在[0.015, 0.045]区间内，声速异常判断概率统计值的取值落在合理范围内的机率较大。

6.3 受检桩的声速临界值应按下列方法确定：

1 根据本地区经验，结合预留同条件混凝土试件或钻芯法获取的芯样试件的抗压强度与声速对比试验，结合本地区经验，分别确定桩身混凝土声速的低限值 v_L 和平均值 v_p 。

2 当 $v_L < v_0(j) < v_p$ 时， $v_c(j) = v_0(j)$ (6-13)

式中： $v_c(j)$ ——第 j 检测剖面的声速异常判断临界值；

$v_0(j)$ ——第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值。

3 当 $v_0(j) \leq v_L$ 或 $v_0(j) \geq v_p$ 时，应分析原因； $v_c(j)$ 的取值可参考同一桩的其它检测剖面的声速异常判断临界值或同一工程相同桩型的混凝土质量较稳定的受检桩的声速异常判断临界值综合确定。

4 对只有单个检测剖面的桩，其声速异常判断临界值等于检测剖面声速异常判断临界值。对于三个及三个以上检测剖面的桩，应取各个检测剖面声速异常判断临界值的算术平均值作为该桩各声测线声速异常判断临界值。

$$v_c = \frac{\sum_{j=1}^{m_s} v_c(j)}{m_s} \quad (6-14)$$

式中： v_c ——受检桩桩身混凝土声速异常判断临界值；

m_s ——受检桩的检测剖面总数。

【说明】

1 当桩身混凝土未达到龄期而提前检测时，应对 v_L 、 v_p 的取值作适当调整。

2 概率法从本质上说是一种相对比较法，它考察的只是各条声测线声速与相应检测剖面内所有声测线声速平均值的偏离程度。当声测管倾斜或桩身存在多个缺陷时，同一检测剖面内各条声测线声速值离散很大，这些声速值实际上已严重偏离了正态分布规律，基于正态分布规律的概率法判据已失效，此时，不能将概率法临界值 $v_0(j)$ 作为该检测剖面各声测线声速异常判断临界值 v_c ，式（10.5.4）就是对概率法判据值作合理的限定。

3 同一桩型是指施工工艺相同、工程地质条件相近、混凝土的设计强度和配合比相同的桩。

4 声速的测试值受非缺陷因素影响小，测试值较稳定，不同剖面间的声速测试值具有可比性。取各检测剖面声速异常判断临界值的平均值作为该桩各剖面内所有声测线声速异常判断临界值可减小各剖面间因为用概率法计算的临界值差别过大造成的桩身完整性判别上的不合理性，另一方面，对同一根桩，桩身混凝土设计强度和配合比以及施工工艺都是一样的，应该采用一个临界值标准来判定各剖面所有声测线对应的混凝土质量。

5 声速异常应按下式判定：

$$v_j(j) \leq v_c \quad (6-15)$$

6.4 波幅异常判断的临界值应按下列公式计算：

$$A_m(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{pi}(j) \quad (6-16)$$

$$A_c(j) = A_m(j) - 6 \quad (6-17)$$

波幅异常应按下式判定：

$$A_{pi}(j) < A_c(j) \quad (6-18)$$

式中： $A_m(j)$ ——第 j 检测剖面各声测线波幅平均值(dB)；

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的波幅值；

$A_c(j)$ ——第 j 检测剖面波幅异常判断的临界值；

n ——第 j 检测剖面的声测线总数。

【说明】波幅临界值判据式为 $A_{pi}(j) = A_m(j) - 6$ ，即选择当信号首波幅值衰减量为对应检测剖面所有信号首波幅值衰减量平均值的一半时的波幅分贝数为临界值。

波幅判据没有采用如声速判据那样的各检测剖面取平均值的办法，而是采用单剖面判据，这是因为不同剖面间测距及声耦合状况差别较大，使波幅不具有可比性。此外，波幅的衰减受桩身混凝土不均匀

性、声波传播路径和点源距离的影响，故应考虑声测管间距较大时波幅分散性而采取适当的调整。

因波幅的分贝数受仪器、传感器灵敏度及发射能量的影响，故应在考虑这些影响的基础上再采用波幅临界值判据。

当波幅差异性较大时，应与声速变化及主频变化情况相结合进行综合分析。

6.5 当采用信号主频值作为辅助异常声测线判据时，主频-深度曲线上主频值明显降低的声测线可判定为异常。

【说明】 声波接收信号的主频漂移程度反映了声波在柱身混凝土中传播时的衰减程度，而这种衰减程度又能体现混凝土质量的优劣。接收信号的主频受诸如测试系统的状态，声耦合状况、测距等许多非缺陷因素的影响，测试值没有声速稳定，对缺陷的敏感性不及波幅。在实用时，作为声速、波幅等主要声学参数判据之外的一个辅助判据。

在使用主频判据时，应保持声波换能器具有单峰的幅频特性和良好的耦合一致性，若采用 FFT 方法计算主频值，还应保证足够的频域分辨率。

6.6 当采用接收信号的能量作为辅助异常声测线判据时，能最一深度曲线上接收信号能量明显降低可判定为异常。

【说明】 接收信号的能量与接收信号的幅值存在正相关性，可以将约定的某一足够长时间段内的声波信号时域曲线的绝对值对时间积分后得到的结果（或约定的某一足够长时段内的声波信号时域曲线的平均幅值）作为能量指标。接收信号的能量反映了声波在混凝土介质中各个声传播路径上能量总体衰减情况，是测区混凝土质量的全面、综合反映，也是波形畸变程度的量化指标。

6.7 当采用斜率法的 PSD 值作为辅助异常声测线判据时，PSD 值应按下列公式计算：

$$PSD(j,i) = \frac{[t_{ci}(j) - t_{ci-1}(j)]^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (6-19)$$

式中： $t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时(μs)；

$t_{ci-1}(j)$ ——第 j 检测剖面第 $i-1$ 声测线声时(μs)；

z_i ——第 i 声测线深度(m)；

z_{i-1} ——第 $i-1$ 声测线深度(m)。

根据 PSD 值在某深度处的突变，结合波幅变化情况，进行异常声测线判定。

【说明】 在桩身缺陷的边缘，实测声时将发生突变，桩身存在缺陷的声测线对应声时-深度曲线上的突变点。经声时差加权后的 PSD 判据图更能突出桩身存在缺陷的声测线，并在一定程度上减

小了声测管的平行度差或混凝土不均匀等非缺陷因素对数据分析判断的影响。在实际应用时可先假定缺陷的性质（如夹层、空洞、蜂窝等）和尺寸，来计算临界状态的 PSD 值，作为 PSD 临界值判据，但需对缺陷区的声波波速作假定。

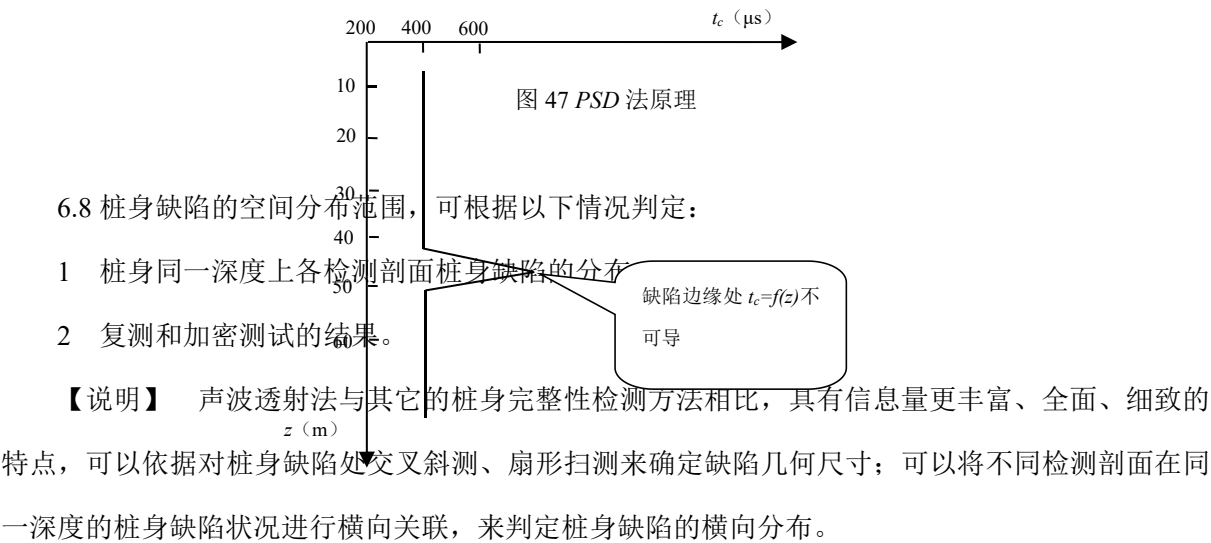
根据桩身某一检测剖面各测点的实测声时 $t_c(\mu s)$ ，及测点高程 $z(mm)$ ，可得到一个以 t_c 为因变量， z 为自变量的函数。

$$t_c=f(z)$$

(6-20)

当该桩桩身完好时， $f(z)$ 应是连续可导函数，即 $\Delta z \rightarrow 0, \Delta t_c \rightarrow 0$ 。

当该剖面桩身存在缺陷时，在缺陷与正常混凝土的分界面处，声介质性质发生突变，声时 t_c 也发生突变，当 Δz 趋于 0 时， Δt_c 不趋于 0，即 $f(z)$ 在此处不可导。因此函数 $f(z)$ 不可导点就是缺陷界面位置，如图 12-47。在实际检测时，测点有一定间距， Δz 不可能趋于零，而且由于缺陷表面凹凸不平，以及孔洞等缺陷是由于声波绕行导致声时变化的，所以 $f(z)$ 的实测曲线在缺陷界面只表现为斜率的变化。 $f(z) \sim z$ 图上各测点的斜率只能反映缺陷的有无，不能明显反映缺陷的大小（声时差），因而用声时差对斜率加权。



6.9 桩身完整性类别应结合桩身缺陷处声测线的声学特征、缺陷的空间分布范围，按规范中的桩身完整性分类表和表 6 桩身完整性判定的特征进行综合判定。

表 6 桩身完整性判定

类别	特征
----	----

I	所有声测线声学参数无异常，接收波形正常； 存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
II	存在声学参数轻微异常、波形轻微畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
III	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，但在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，但在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于底限值的异常声测线，异常声测线在任一检测剖面的任一区段内纵向不连续分布，且在任一深度横向分布的数量小于检测剖面数量的 50%
IV	存在声学参数明显异常、波形明显畸变的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，且在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%； 存在声学参数严重异常、波形严重畸变或声速低于底限值的异常声测线，异常声测线在一个或多个检测剖面的一个或多个区段内纵向连续分布，或在一个或多个深度横向分布的数量大于或等于检测剖面数量的 50%

注：1 完整性类别由IV类往I类依次判定。

2 对于只有一个检测剖面的受检桩，桩身完整性判定应按该检测剖面代表桩全部横截面的情况对待。

【说明】表 6 围绕桩身缺陷这个核心，综合考虑桩身缺陷的数量（对应异常声测线的数量）、缺陷的程度（对应异常声测线的声学特征）、空间分布范围（对应异常声测线连续分布的空间范围），对桩身完整性等级进行判定，体现了声波透射法的特点，缺陷空间分布范围大小的判定是一个相对的概念，是缺陷的几何尺寸与桩径、桩长等几何参数相比较的结果。桩身缺陷数量多或少的判断也与桩的几何尺寸有关。

1. 综合判定的必要性

在灌注桩的声波透射法检测中，如何利用所检测的混凝土声参数去发现桩身混凝土缺陷、评价桩身混凝土质量从而判定桩的完整性类别是我们检测的最终目的，同时又是声学检测中的一个难题。其原因一方面是因为混凝土作为一种多种材料的集结体，声波在其中的传播过程是一个相当复杂的物理过程；另一方面，混凝土灌注桩的施工工艺复杂、难度大，混凝土的硬化环境和条件以及影响混凝土质量的其它各种因素远比上部结构复杂和难以预见，因此桩身混凝土质量的离散性和不确定性明显高于上部结构混凝土。另外，从测试角度看，在桩内进行声测时，各测点的测距及声耦合状况的不确定性也高于上部结构混凝土的声学测试，因此一般情况下桩的声测测量误差高于上部结构混凝土。

用于判断桩身混凝土缺陷有声速、PSD 判据、波幅、主频、实测波形等多个声学指标，它们各有特点，但均有不足，在实际应用时，既不能唯“声速论”，也不能不分主次将各种判据同等对待。

声速与混凝土的弹性性质相关，波幅与混凝土的粘塑性相关，采用以声速、波幅判据为主的综合判定法对全面反映混凝土这种粘弹塑性材料的质量是合理的、科学的处理方法。

2. 综合判定的方法

相对于其它判据来说声速的测试值是最稳定的、可靠性也最高，而且测试值是有明确物理意义的量，与混凝土强度有一定的相关性，是进行综合判定的主要参数，波幅的测试值是一个相对比较量，本身没有明确的物理意义，其测试值受许多非缺陷因素的影响，测试值没有声速稳定，但它对桩身混凝土缺陷很敏感，是进行综合判定的另一重要参数。

综合分析往往贯彻于检测过程的始终，因为检测过程中本身就包含了综合分析的内容（例如对平测普查结果进行综合分析找出异常测点进行细测），而不是说在现场检测完成后才进行综合分析。

现场检测与综合分析可按以下步骤：

(1) 采用平测法对桩的各检测剖面进行全面普查。

(2) 对各检测剖面的测试结果进行综合分析确定异常声测线。

a) 采用概率法确定各检测剖面的声速临界值。

b) 如果某一检测剖面的声速临界值与其它剖面或同一工程的其它桩的临界值相差较大，则应分析原因，如果是因为该剖面的缺陷点很多声速离散太大则应参考其它桩的临界值；如果是因声测管的倾斜所致，则应进行管距修正，再重新计算声速临界值。

c) 对低于临界值的声测线或 *PSD* 判据中的可疑声测线，如果其波幅值也明显偏低，则这样的声测线可确定为异常声测线。

(3) 对各剖面的异常测点进行细测（加密测试）

a) 采用加密平测和交叉斜测等方法验证平测普查对异常声测线的判断并确定桩身缺陷在该剖面的范围和投影边界。

b) 细测的主要目的是确定缺陷的边界，在加密平测和交叉斜测时，在缺陷的边界处，波幅较为敏感，会发生突变；声速和接收波形也会发生变化，应注意综合运用这些指标。

(4) 综合各个检测剖面细测的结果推断桩身缺陷的范围和程度。

a) 缺陷范围的推断

考察各剖面是否存在同一高程的缺陷。

如果不存在同一高程的缺陷，则该缺陷在桩身横截面的分布范围不大，该缺陷的纵向尺寸将由缺陷在该剖面的投影的纵向尺寸确定。

如果存在同一高程的缺陷，则依据该缺陷在各个检测剖面的投影大致推断该缺陷的纵向尺寸和在桩身横截面上的位置和范围。

对桩身缺陷几何范围的推断是判定桩身完整性类别的一个重要依据，也是声波透射法检测混凝土灌注桩完整性的优点。

b) 缺陷程度的推断

对缺陷程度的推断主要依据以下四个方面：

缺陷处实测声速与正常混凝土声速（或平均声速）的偏离程度。

缺陷处实测波幅与同一剖面内正常混凝土波幅（或平均波幅）的偏离程度。

缺陷处的实测波形与正常混凝土测点处实测波形相比的畸变程度。

缺陷处 *PSD* 判据的突变程度。

(5) 在对缺陷的几何范围和程度作出推断后，对桩身完整性类别的判定可按表 6 描述的各种类别桩的特征进行，但还需综合考察下列因素：桩的承载机理（摩擦型或端承型），桩的设计荷载要求，受荷状况（抗压、抗拔、抗水平力等），基础类型（单桩承台或群桩承台），缺陷出现的部位（桩上部、中部还是桩底）等等。

(6) 对表 6 需要做如下补充说明：

表中声波透射法桩身完整性类别分类特征已考虑了以下几个因素：1) 缺陷空间几何尺寸的大小；2) 声学参数异常的相对程度；3) 接受波形畸变的相对程度；4) 在确定声速异常判断临界值 时已综合考虑了声速低限制的要求，所以在表 6 中没有再出现声速低限值判据。

预埋有多个声测管的声波透射法测试过程中，多个检测剖面中也常出现某一检测剖面个别声测线声学参数明显异常情况，即空间范围内局部较小区域出现明显缺陷。这种情况，可依据缺陷在深度方向出现的位置和影响程度，以及基桩荷载分布情况和使用特点将类别划分的等级提高一级，即多个检测剖面中某一检测剖面只有个别声测线声学参数明显异常，波形明显畸变，该特征归类到 II 类桩；而声学参数严重异常，接受波形严重畸变或接受不到信号，则归类为 III 类桩。

这里需要说明：对于只预埋 2 根声测管的基桩，仅有一个检测剖面，只能认定该检测剖面代表基桩全部横截面，无论是连续多根声测线还是个别声测线声学参数异常均表示为全断面异常，相当于表中的“大于或等于检测剖面数量的一半。”

根据规范规定采用的换能器频率对应的波长以及 100mm 最大声测线间距，使异常声测线至少连续出现 2 次所对应的缺陷尺度一般不会低于 10cm 量级。

3. 混凝土灌注桩的常见缺陷性质与声学参数的关系

灌注桩可能产生各种类型的缺陷。所有缺陷虽然都会引起声学参数的异常变化，但不同类型的缺陷使声学参数变化的特征有所不同。目前还难以根据声学参数的变化明确确定出缺陷的性质，但可

以总结出某些规律：

(a) 沉渣：沉渣是松散介质，其本身声速很低，对声波的衰减也相当剧烈，所以凡遇到沉渣，必然是声速和振幅均剧烈下降。通常在桩底出现这种情况多属沉渣所引起。

(b) 泥砂与水泥浆的混合物：这类缺陷多由浇注导管提升不当造成，若在桩身就是断桩；若在桩顶就是桩顶标高不够。其特点也是声速和振幅均明显下降。只不过出现在桩身时往往是突变，在桩顶是缓变。若桩顶缓变低到某一界限（可根据波速值确定这一界限），其以上部位应截桩，根据应截桩的标高可判定桩顶标高是否够。

(c) 若是挖孔桩出现各断面均测值异常的层状缺陷则往往是施工中的事故引起的疏松层或桩孔中下部排水不净或混凝土浇注后出水，稀释混凝土所致。

(d) 孔壁坍塌或泥团：声速与振幅均下降，但下降多少则视缺陷情况而定。如果是局部的泥团，并未包裹声测管，则下降的程度并不很大；如果泥团包裹声测管，则下降程度较大，特别是振幅的下降更为剧烈。一根声测管被泥团包裹将影响两个测试面。通过斜测可以分辨这些情况。

当确定为包裹声测管的泥团，可根据泥团处两声测管间的声时、正常混凝土处的声时，并假定泥团的声速（2000m/s 左右），大致估算在两声测管间泥团的尺寸。

(e) 混凝土离析：灌注桩容易发生混凝土离析，造成桩身某处粗骨料大量堆积，而相邻部位浆多骨料少的情况。粗骨料多的地方，由于粗骨料多，而粗骨料本身波速高，往往造成这些部位声速值并不低，有时反而有所提高。但由于粗骨料多，声学界面多，对声波的反射、散射加剧，接收信号削弱，于是波幅下降。至于粗骨料少而砂浆多的地方则正好相反：由于该处砂浆多，粗骨料少，测得的波速下降，但振幅测值不但下降，有时还会高于附近测值。这显然是由于粗骨料少，则声波被反射、散射少的缘故。应采用波速和振幅两个参数进行综合的分析判断。

(f) 气泡密集的混凝土：在灌注桩上部桩身有时因为混凝土浇注管提升过快有大量空气封在混凝土内。虽不一定造成孔洞，但可能形成大量气泡分布在混凝土内，使混凝土质量有所降低。这种混凝土内的分散气泡不会使波速明显降低，但却使声波能量明显衰减（散射），接收波能量明显下降，这是这类缺陷的特征。

4. 桩身混凝土均匀性的评价

对桩身各高程的实测声速进行数理统计（桩身各高程的波速取同一高程各检测剖面测点波速的平均值），可以得到桩身混凝土声速的平均值 v_m 、标准差 S_v 、离异系数 C_v

$$C_v = \frac{S_v}{\bar{v}} \quad (6-21)$$

由于混凝土声速与强度存在相关性，因此，声速的离散性大小可以在一定程度上定性地反映混

凝土强度的离散性大小，但是声速与强度的相关性为非线性，这种相关性在桩身混凝土中受许多因素干扰（配合比、硬化环境等）没有上部结构混凝土稳定，因此，桩身混凝土声速的离异系数与强度的离异系数在数值上存在很大差别，且声速的数理统计值（ v_m ， S_v ）与测距也有关系。因此波速的数理统计值（ S_v ， C_v ）只能作为同类型灌注桩比较混凝土质量均匀性的一个相对指标。

6.10 首先按《规范》基本规定中的第 3.5.3 条的要求，检测报告应包括以下内容：

1. 委托方名称，工程名称、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构形式，层数，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期；
2. 地质条件描述；
3. 受检桩的桩号、尺寸、桩号、桩位、桩顶标高和相关施工记录；
4. 检测方法，检测仪器设备，检测过程叙述；
5. 受检桩的检测数据，实测与计算分析曲线、表格和汇总结果；
6. 与检测内容相应的检测结论。

第（5）款的受检桩的检测数据，在声波透射法中应为异常测点数据，否则报告所附数据量太大，没有这个必要。

对声波透射法检测报告还应包括：

- 1 声测管布置图及声测剖面编号；
- 2 受检桩（槽段）每个检测剖面声速—深度曲线、波幅—深度曲线，并将相应判据临界值所对应的标志线绘制于同一个坐标系；
- 3 当采用主频值、PSD 值、接收信号能量进行辅助分析判定时，绘制主频-深度曲线、PSD 曲线、能量—深度曲线；
- 4 各检测剖面实测波列图；
- 5 必要时，对复测的有关情况进行说明；
- 6 当对管距进行修正时，应注明进行管距修正的范围及方法。

实测波形的后续部分可反映声波在接、收换能器之间的混凝土介质中各种声传播路径上总能量衰减状况，其影响区域大于首波，因此检测剖面的实测波形波列图有助于测试人员对桩身缺陷程度及位置直观地判定

第七节 工程实例分析

本节给出了四个工程实例，对应规范中 I、II、III、IV 类桩的特征分别各举了一个工程实例。

工程实例一

工程名称	某高层建筑				
桩号	桩径 (m)	桩顶标高 (m)	桩底标高 (m)	混凝土设计强度	检测时混凝土龄期 (d)
1	1.40	0	-20.8	C30	36

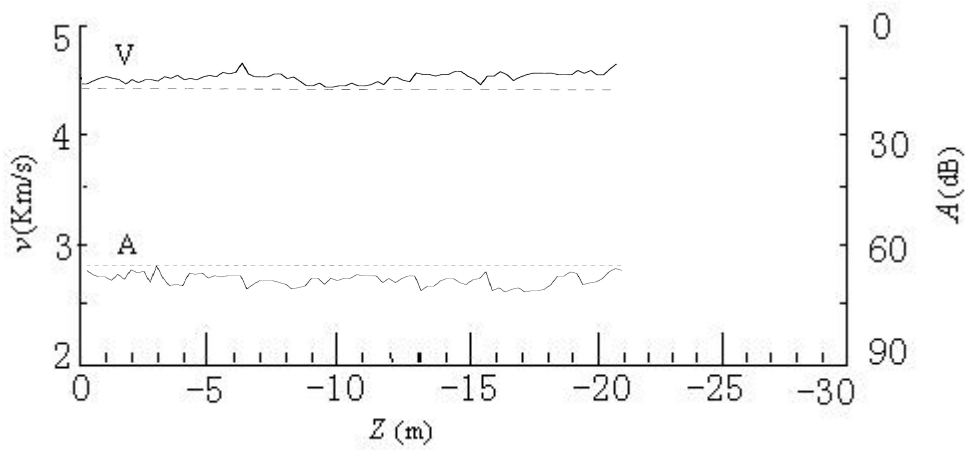


图 7.1 (a) 1 号桩 AB 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲线

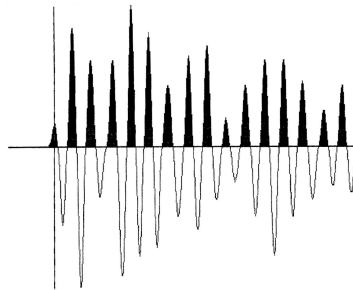


图 7.1 (b) 1 号桩 AB 剖面正常声测线实测波形

测点标高-10.0m；换能器主频 45.0kHz；波形主频 36.4kHz；测点波速 4.36km/s。

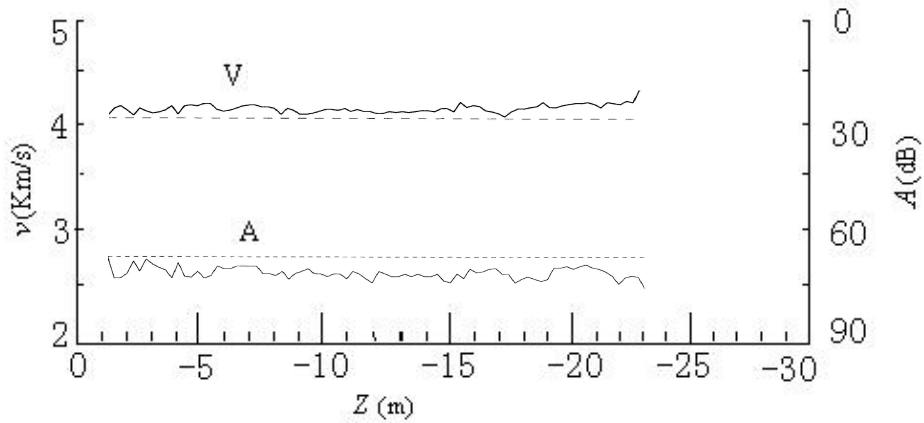


图 7.2 (a) 1 号桩 BC 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲线

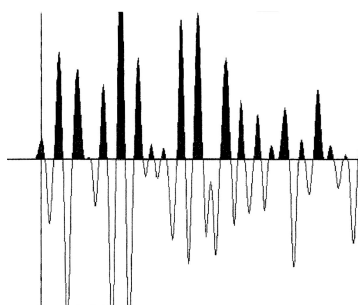


图 7.2 (b) 1 号桩 BC 剖面正常声测线实测波形

测点标高-15.0m; 换能器主频 45.0kHz; 波形主频 36.64kHz; 测点波速 4.40km/s。

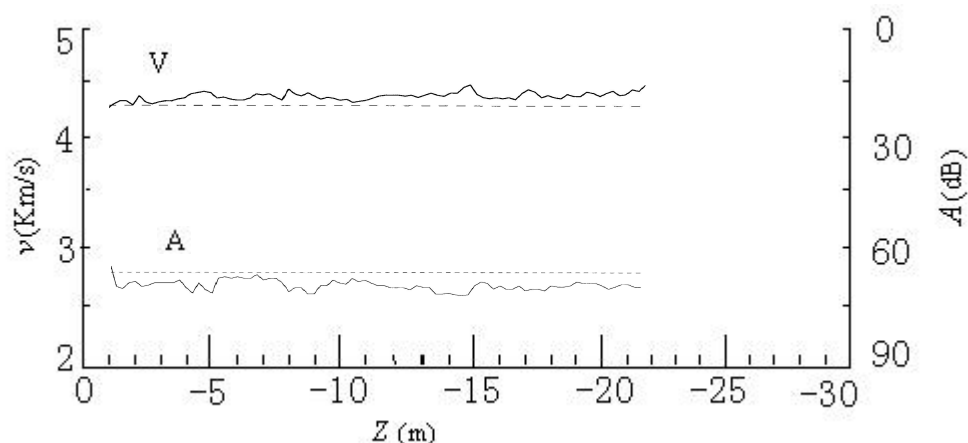


图 7.3 (a) 1 号桩 CA 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲线

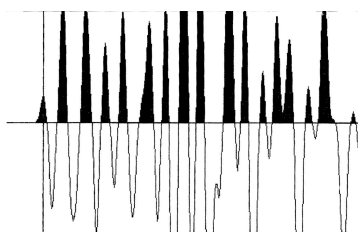


图 7.3 (b) 1 号桩 CA 剖面正常声测线实测波形

测点标高-20.0m; 换能器主频 46.0kHz; 波形主频 35.5kHz; 测点波速 4.50km/s。

综合分析评价:

1) 该桩三个检测剖面 $v(z)$ 、 $A(z)$ 曲线各声测线值离散性不大, 可用概率法进行声速临界值的计算, 用概率法计算声速临界值后无异声测线出现, 波幅也无异常声测线。

2) 三个检测剖面声测线声速平均值在 4.4~4.5km/s 之间, 最小值 4.31km/s 均在混凝土声速的正常取值范围内。

3) 实测波形首波陡峭, 后续波波幅大。

4) 实测波形主频为 35~37kHz (换能器主频为 45kHz), 主频漂移量不大, 且该漂移量较稳定。综合以上特征, 该桩桩身完整性等级判定为 I 类。

5) 工程实例

工程名称	某工厂办公楼				
桩号	桩径 (m)	桩顶标高 (m)	桩底标高 (m)	混凝土设计强度	检测时混凝土龄期 (d)
4	1.40	0	-27.8	C25	40

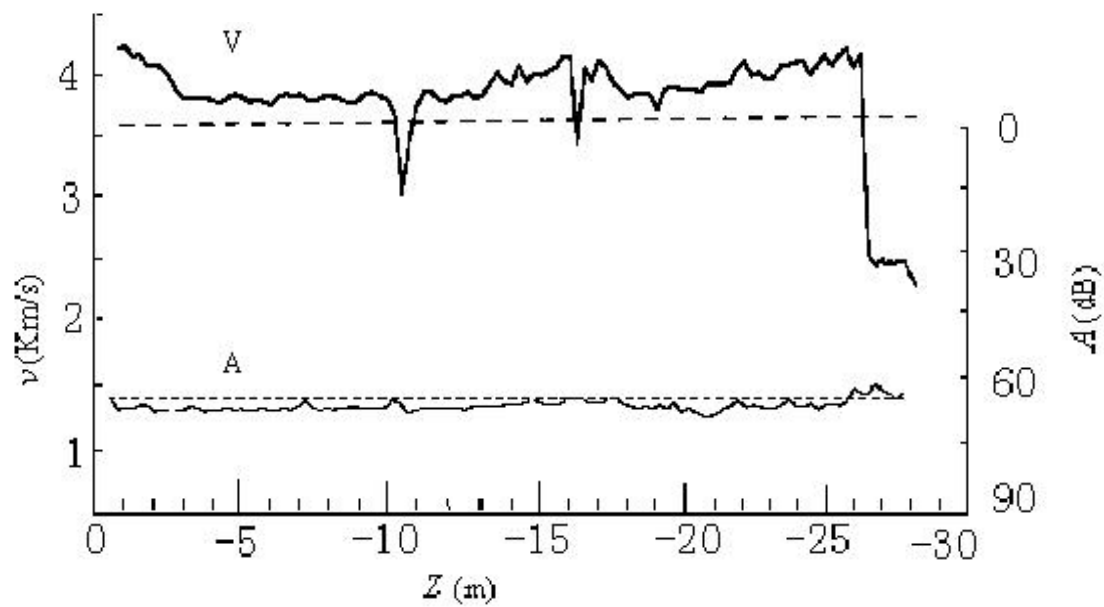


图 7.4(a) 4 号桩 AB 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲

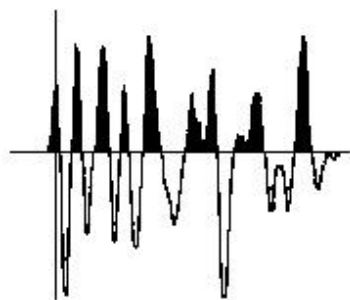


图 7.4 (b) 4 号桩 AB 剖面正常声测线实测波形
测点标高-6.0m；换能器主频 45.0kHz；
波形主频 33.2kHz；测点波速 3.9km/s。

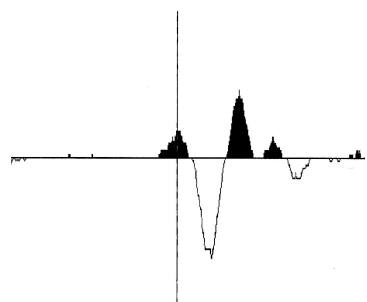


图 7.4 (c) 4 号桩 AB 剖面异常声测线实测波形
测点标高-26.0m；换能器主频 45.0kHz；
波形主频 14.8kHz；测点波速 2.8km/s。

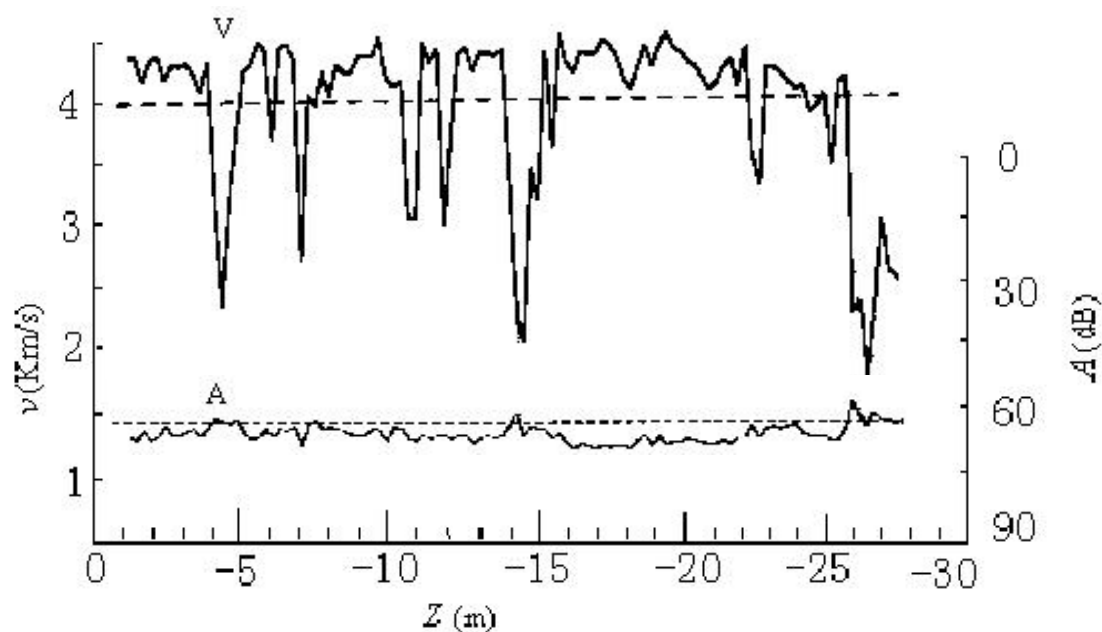


图 7.5(a) 4 号桩 BC 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲线

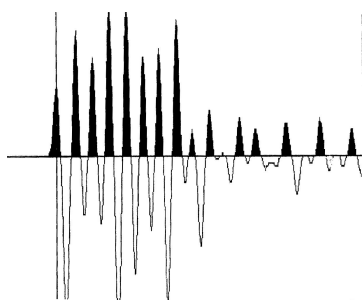


图 7.5 (b) 4 号桩 AB 剖面正常声测线实测波形

声测线标高-9.0m; 换能器主频 45.0kHz;

波形主频 41.7kHz; 波速 4.21km/s。



图 7.5 (c) 4 号桩 AB 剖面异常声测线实测波形

声测线标高-26.5m 换能器主频 45.0kHz;

波形主频 16.0kHz; 波速 2.82km/s。

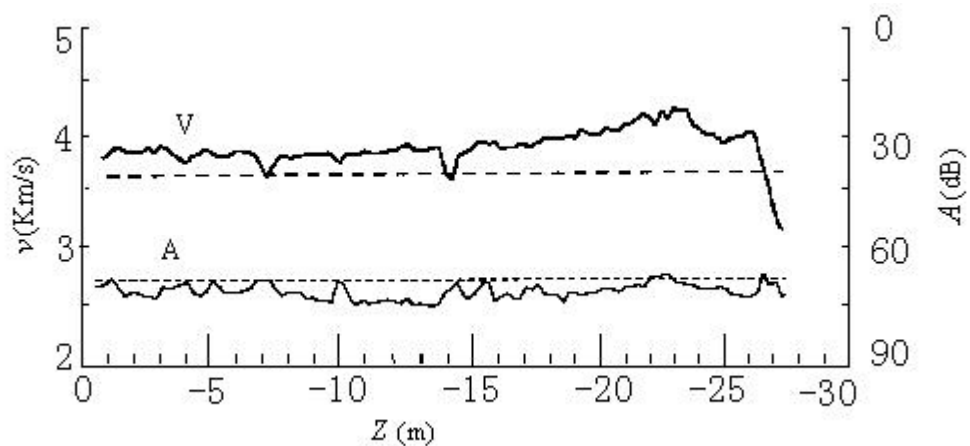


图 7.6 (a) 4 号桩 CA 剖面声速 (v)、波幅 (A) 曲线

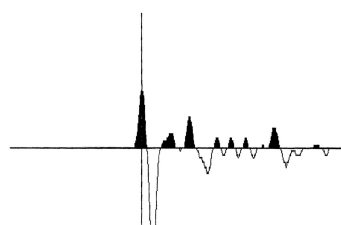
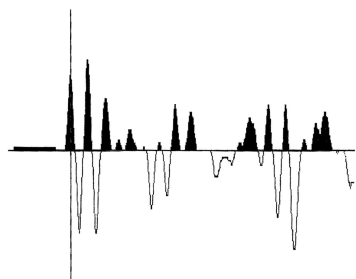


图 7.6 (b) 4 号桩 CA 剖面正常声测线实测波形
声测线标高-20.0m; 换能器主频 45.0kHz;
形主频 37.4kHz; 波速 4.05km/s。

图 7.6 (c) 4 号桩 CA 剖面异常测点实测波形
声测线标高-27.0m; 换能器主频 45.0kHz; 波
波形主频 22.7kHz; 波速 3.0km/s。

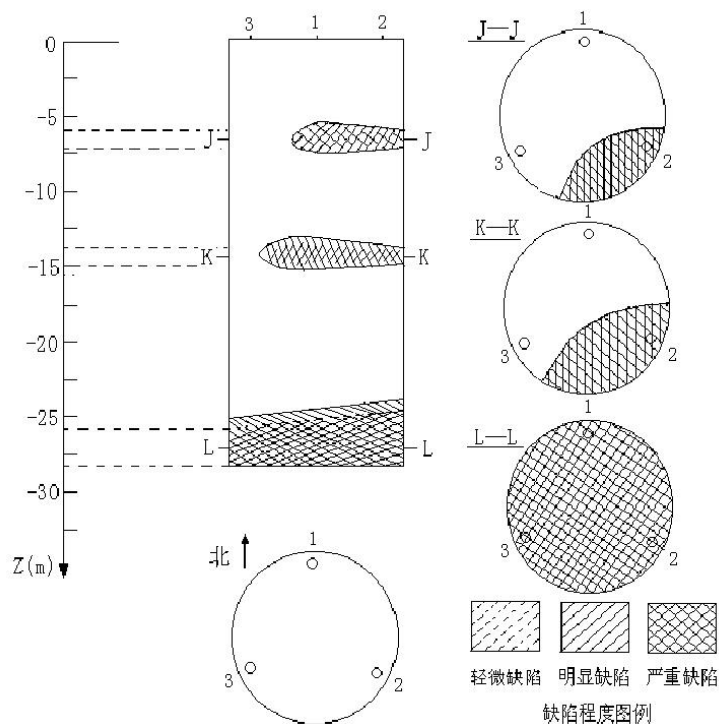


图 7.7 实例四 4 号桩声测管布置及桩身缺陷在桩中的分布图

综合分析评价（参见图 7.4～图 7.7）：

1) AB 剖面在 10m、16m 处声速明显偏低，波幅偏小。

BC 剖面在 4m、6.5m、10m、12m、14m、23m 等多处声速测值明显偏低，波幅明显减小。CA 剖面在 6.5m、14m 声速测值偏低，波幅偏小。

三各剖面在 26~27.8m 范围内声速、波幅均明显异常（声速最小值不足 3.0km/s）。由于桩身存在多个缺陷，概率法临界值无实际意义，以低限值判据为主。

2) 3 个剖面异常声测线的实测波形与正常声测线相比波幅明显下降，主频大幅度漂移，后续波幅度也明显降低，有些声测线无法接收声波信号。

3) 缺陷在桩身的分布如图 7.7 所示，由于桩身存在多个缺陷，因此图中只画出明显缺陷和严重缺陷的分布特征，三个剖面在 26~27.8m 存在同一高程缺陷。

4) 综合以上分析, 该桩桩身完整性等级判定为Ⅳ类。

该桩在声测完成后, 经钻芯法验证桩身混凝土多处胶结差, 桩底以上两米范围内混凝土松散, 无法获取芯样。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准.建筑基桩检测技术规范 (JGJ106-2014). 北京: 中国建材工业出版社, 2014.
- [2] 陈 凡 徐天平 陈久照 关立军编著.基桩质量检测技术(第二版).北京: 中国建筑工业出版社, 2014 年 7 月.
- [3] 中国工程建设标准化协会标准.超声法检测混凝土缺陷技术规程 (CECS21: 2000)。