或首波振幅临界值来判断哪些测点属于缺陷的可疑点

根据测点数为 n 时允许出现一个最低声学参数值，计算概率 $P=\frac{1}{n}$,查表得 ka 值，并计算所有测点的声速或首波振幅的 V^- 或 A^-和 Q_V 或 Q_A,按下式确定 V_{min} 或 A_{min} 值：

$$\left.\begin{aligned} V_{min}&=V^--kaQ_v \\ A_{min}&=A-kaQ_A \end{aligned}\right\} \tag{2.5}$$

低于 V_{min} 或 A_{min} 的测点应为缺陷的可疑点

2.2 超声波检测的物理基础

超声波是频率大于 20kHz 的弹性波，弹性波在介质中的传播速度主要取决于介质的惯性，对于混凝土来说，主要是受混凝土的密度（ρ）、泊松比（μ）和弹性模量（E）控制。在无限弹性介质中，振动质点的位移 u 沿 x 轴移动，u=u（x,t）,与 y 和 z 轴无关，相应的位移 v=w=0。因介质无限的，可以不考虑位移函数 u 满足边界条件的问题，只讨论它满足用位移表示的弹性振动的平衡方程

$$\left.\begin{aligned} (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial x}+\mu\nabla^2 u+X\rho&=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial y}+\mu\nabla^2 v+Y\rho&=\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ (\lambda+\mu)\frac{\partial\theta}{\partial z}+\mu\nabla^2 w+Z\rho&=\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned}\right\} \tag{2.6}$$

式中，θ 为体积变形，$\theta=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}$，拉普拉斯算子 $\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$，$\rho$ 为物体的密度。由所设可知：

$$\theta=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=\frac{\partial u}{\partial x};$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial x}=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2};\qquad \frac{\partial\theta}{\partial y}=\frac{\partial\theta}{\partial z}=0;$$

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \qquad \nabla^2 v = \nabla^2 w = 0;$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0.$$

将以上各式代入式（2.6），并假定体力 X=Y=Z=0,则第二、第三式恒等于零，第一式为

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \tag{2.7}$$

于是可得

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (v_p)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \\ v_p &= \sqrt{\frac{\lambda+2u}{\rho}}. \end{aligned}\right\} \tag{2.8}$$

将 $\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}$ 及 $\mu = \frac{E}{2(1+v)}$ 代入(2.8)式化简，

$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$ 这就是纵波在无限均匀介质中的传播速度。

同理可得横波的传播速度，这时应设 x 轴上的振动质点的位移沿 z 轴方向振动，w=w(x, t), u=v=0。其它假设与讨论纵波的过程相同，并以同样方法解式（2.6）平衡方程，得：

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (v_s)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \\ v_s &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned}\right\} \tag{2.9}$$

将 $\mu = \frac{E}{2(1+v)}$ 代入 v_s 得 $v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$ 这就是横波在无限均匀介质中的传播速度。

纵波和横波的速度比，即：

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}}. \tag{2.10}$$

对于大多数的混凝土，泊松比为 0.20 左右，将它代入上式，得

$$v_p = \frac{2}{3}\sqrt{6}v_s, \tag{2.11}$$

即纵波速度是横波速度的$\frac{2}{3}\sqrt{6}$倍。所以，对于超声波透射法观测到的首波信号为纵波。不同的混凝土之间在密度和力学及变形参数上都存在着差异，超声波在其中的传播的速度必然不同，而构成了混凝土力学的物理基础。

2.3 超声波信号处理的基础知识

超声波信号处理主要研究频谱分析，超声频谱分析法在 50 年代末由 Krauthramer 提出的。60 年代，Whaley 和 Cook 建立了第一个超声频谱分析系统。70 年代，很多学者侧重于超声场和缺陷相互作用机理的研究。到目前为止，在超声频谱分析的理论和实验研究方面，国内外均做了不少的工作。一个复杂的周期振动波形可用傅立叶级数分解为许多谐波分量，而每一个谐波分量可由其振幅和相位来表征。各次谐波按其频率高低依次排列成为谱状，这样排列的各次谐波的总体称为频谱。有相位谱、幅度谱和功率（能量）谱。通过频谱分析可以得知超声波信号中的各个频率成分和频率分布的范围；还可得到振动参量各个频率成分的幅值分布、相位谱和能量分布，从而得到主要幅度、相位和能量分布的频率值。这些工作表明，超声频谱分析法可以从对通过缺陷波的频谱包络形状的分析中，得到多于常规超声检测的可用信息，能较好地确定缺陷的种类和性质，从而减少了检测中的主观因素，提高了检测结果的可信度。

2.3.1 超声频谱分析法原理

超声频谱分析法的原理，该系统可以认为是线性的，系统模型可用图 2-3 来表示。来自均匀介质中某个缺陷的超声直达波经过整个系统送入频谱分析仪的信号为 $V_2(t)$, $V_2(t)$的傅立叶变换为

$$V_2(f)=\int_{-\infty}^{\infty} V2(t)e^{-j2\pi t}d(t) \tag{2.12}$$

$V_2(f)$包含实部和虚部两部分，也可以分为幅值谱 $|V_2(f)|$ 和 相位谱 $\angle V_2(f)$。前者是总信号强度的度量，而后者则代表了测试材料依赖于频率的延迟特性。在超声探测的研究中，一般只利用幅值谱，虽然相位谱中也有不少信息可以丰富这一研究，但往往受客观条件的限制。

从图 2-3 可见，频谱分析仪所显示的缺陷波频谱可表示为

$$V_2(f)= V_1(f)\,B_1(f)\,X_1(f)\,C_1(f)\,M_1(f)\,M_2(f).\,C_2(f)\,X_2(f)\,B_2(f)\,G(f)\,D(f) \tag{2.13}$$

在一定检测条件下，（2.13）式可写成