（4）由于超声波在缺陷的界面上的复杂反射、折射、使声波传播的相位发生差异，叠加的结果导致接受信号的波形发生不同程度的畸变，根据探测时波形的重演性，可以作为判断混凝土质量的依据。

由于混凝土中骨料状况及其分布的随机性，它又是多相的凝聚体和具有弹、粘、塑性的非均质材料，在正常的情况下，这些特性可使单一的某些超声参量的测试值产生波动，因此，采用诸超声参量综合分析混凝土的缺陷性质和范围，无疑比单一指标的分析更为合理与有效。

2.1.4 概率分析方法

上述方法说明混凝土存在缺陷，使声时、振幅和波形等参量发生变化，但由于混凝土材料的不均匀性和施工中不可避免的随机偏差，使构件各处的密实度、强度存在着一定的波动和离散，反映在检测的声学参量上也将是离散，而符合质量保证率的条件下，这种波动和离散性是允许的，不应该当作缺陷来处理，但究竟以何种程度的离散值（低于某临界值）才能表明混凝土内部确实存在缺陷呢？

混凝土强度的质量检验表明，它的强度是服从正态分布的，根据超声波声速与混凝土强度相关性建立的 R-V 相关曲线，以声速 V 换算为强度 R,然后以 $\bar{R}-2\sigma_R$($\bar{R}$、σ_R-分别为一组换算强度的平均值和均方差)作为判断缺陷的依据。按概率统计原理，平均值 $\bar{R}$减去二倍均方差的小概率应为 2.27%,如果测点的强度低于 $\bar{R}-2Q_R$ 的界限，就不是随机误差引起的，而是属于施工中差错造成的缺陷，对于这种数据的测点应属于可疑点。

在现场检测中，在没有具备 R-V 相关曲线的条件下，也借用上述概率统计的方法，近似地以声时的平均值和均方差关系式 $\bar{t}-2Q_t$ 或声速的平均值和均方差的关系式 $\bar{V}-2Q_v$ 作为判别缺陷的临界值，实践表明用这种声学参量直接判断混凝土的缺陷也有一定的准确性。

（1） 孤立的低声速点。

对于孤立的低声速点的判断，先计算该点声速（$V_{低}$）与所有测点 N 的平均声速（$\bar{V}$）之差是声速均方差 Q_v 的多小倍，即

$$V_{低}=\bar{V}-kgQ_v \qquad kg=\frac{\bar{V}-V_{低}}{Q_v} \qquad (2.4)$$

再根据 kg 查出小概率 P。如果 N*P<1，则说明在正常情况下，这样的低声速点是不应当出现的。若在检测中出现了一个，说明该测位可能有缺陷。

(2)声速存在波动的测点

一组波动声速的测点 1、2、3、4、… n, 运用概率统计方法计算最低的声速

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：

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

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