(2)在骨料与水泥石的界面，以及其它声阻抗发生变化的界面上超声波被反射，这种反射往往是杂乱的，因而使入射波束向周围散射，降低了束射的方向性。

(3)混凝土中颗粒的几何尺寸大小不一，它们的固有频率几乎是一个连续的波谱，因而任何入射波的频率都可能激起某种颗粒的共振，可以说在混凝土中颗粒的共振现象几乎是经常存在的。由于发生共振的颗粒向四周射出球面波，使入射波束的传播方向大为混杂而降低了束射方向性。

由于超声波在混凝土中传播的方向性差和能量衰减大，因而，混凝土的检测一般不采用反射法，通常采用低频的绕射法。

混凝土缺陷的探测频率选择，应兼顾穿透的测距和检测灵敏度。若采用较低频率的超声波检测，能量衰减小，穿透的距离长。但由于波长长，传播的方向性下降，在绕射的过程中，检测的灵敏度将有所下降；若采用较高频率的超声波检测，超声波波长短而传播的方向性较好，检测的灵敏度将相应提高，但由于能量衰减大，所以探测的距离短。

于是，混凝土缺陷的超声波检测的频率选择，在保证接受到明晰的探测信号的前提下，选取较高的探测频率则可以提高检测的灵敏度。混凝土材料的超声波检测的频率一般采用 50~200kHz，最适用的频率为 25～100kHz.

2.1.2.检测的方法

混凝土缺陷是指因技术管理不善和施工疏忽，造成结构混凝土内部存在空洞、疏松、施工缝，或由于工艺违章、配料错误造成的低强度区；严重的分离离析造成组织构造的不均匀性；使用过程产生裂隙以及化学侵蚀、冻害、火烧的损坏层等。混凝土缺陷的超声波检测系统如图 2—1 所示。发射的电声换能器将来自脉冲发生器的触发电信号转换成机械振荡的低频超声波。通过声耦合层进入试体，接受的电声换能器则将传来的超声纵波（诸型波中纵波传播的速度最快）转换为电脉冲信号，经放大后在示波屏上显示出接受信号的波形。示波屏上发射脉冲至信号首波起始点的时间标度，即为超声脉冲在试体中通过距离 L 的传播时间，以微秒（μs）为单位（$1\mu s=10^{-6}s$），首波的幅度高低与被测材料的性能、密实度和穿透的距离有密切的关系。

硬化的混凝土中如果存在缺陷，超声波脉冲通过该介质传播的声速比相同材料通条件下的无缺陷混凝土的传播的时间要大（即声速要小），能量衰减大，接受信号的波形平缓甚至发生畸变，而且接受信号的主频也发生变化，综合这些声学参量，则可评定混凝土的质量情况。

2.1.3．构混凝土缺陷的声时—振幅—波形综合分析方法。

用超声波检测混凝土缺陷时，声时、振幅和波形等超声参量的变化与结构混凝土的密实度、均匀性和局部缺陷的状况有密切关系。用上述的超声参量作

为判断质量的依据，从原理上可作如下的解析：

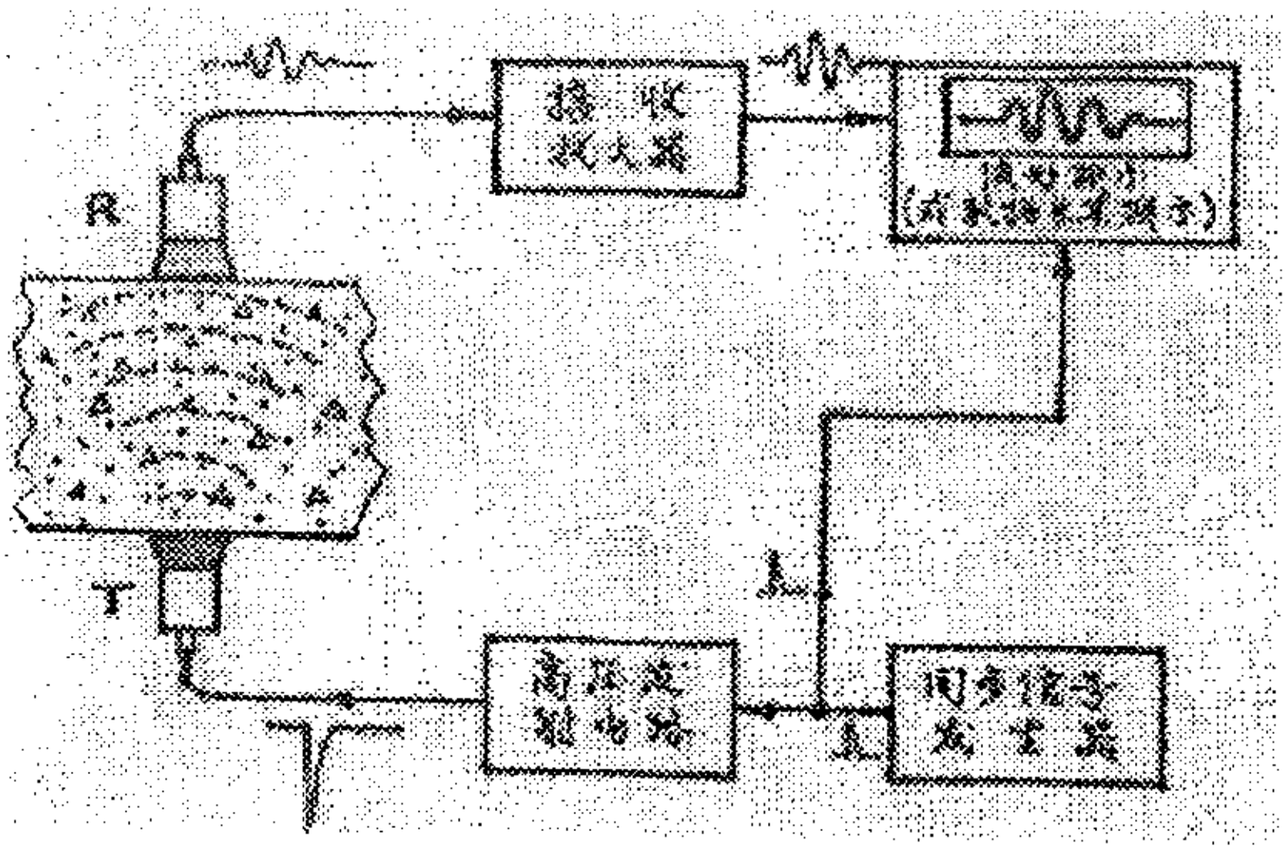


图 2—1　　混凝土缺陷超声波检测系

（1）当混凝土内部或表层存在缺陷时，在超声波发—收通路上形成了不连续的介质，在缺陷的孔、缝或疏散的空间则充有低声阻抗的气体或水（空气的声阻抗 $\rho C_L=0.004*10^4$，水的 $\rho C_L=14.8*10^4$，混凝土的 $\rho C_L=96.6*10^4 g/cm^2.s$），声波透过率极低，低频超声波将绕射缺陷向前传播。在探测的距离内，其绕射到达所需要的“声时”比超声纵波在密致的混凝土中直接传播所需的“声时”长，反映了存在缺陷的混凝土的超声波声速要小。对测法的换能器一旦顺着密致 →缺陷 → 密致区域的混凝土扫测，超声的声速则从高→ 低→ 高过度变化。声速差异是判断缺陷的参量之一。

（2）由于混凝土存在缺陷，不连续介质构成固—气，固—液的界面。二介质声阻抗显著的不同，使投射的声波产生不规则的散射，在界面上，声波垂直入射时，声压和声强反射率分别为：

$$R=(\rho_2C_2-\rho_1C_1)/(\rho_2C_2+\rho_1C_1) \tag{2.1}$$

$$\beta=((\rho_2C_2-\rho_1C_1)/(\rho_2C_2+\rho_1C_1))^2=R^2 \tag{2.2}$$

式中 ρ_1C_1、ρ_2C_2-分别为第一介质和第二介质的声阻抗。

可见，当两个介质的声阻抗相等（$\rho_1C_1=\rho_2C_2$）时，则 R 或 β 均为 0，即所谓全透射；而当 $\rho_1C_1/\rho_2C_2 \longrightarrow \infty$ 或 0 时，则 R 或 β 均接近于全反射。超声波在混凝土中传播，垂直射到充气缺陷的界面上，其能量近乎 100%反射，即绕射到达的信号微弱，相对于无缺陷密致的混凝土而言，超声波能量损失较大，在

同一或稳定的测试条件下，接受信号首波幅度下降，即反映超声波遇到缺陷导致声能的衰减。因此，首波高低变化是判断结构混凝土的密实度的参量之二。

（3）混凝土的组织构造的不均匀性，加上内存缺陷，使探测脉冲在传播过程发生反射、折射；高频成分比低频成分消失的快，接受信号的频率总是比探测频率或通过相同测距的无缺陷混凝土收到的频率低，探伤学中分析接收信号频率的变化，对判断混凝土质量情况是个有效的参量。

关于接收信号起始波形的频率变化，可以采用带示波器的超声仪进行测量。接收信号如图 2-2，用移动仪器上的游标装置，使脉冲分别与接受波各波峰、波谷的 a、b、c、d 、e、f 各点对准，读取相应的声时 t_1、t_2、t_3、t_4、t_5、t_6等值，则接受信号的频率 f 可按下式计算：

$$f=\frac{1}{4(t_2-t_1)} 或 \frac{1}{2(t_3-t_2)} 或 \frac{1}{2(t_4-t_3)} 或 \frac{1}{t_4-t_2} \quad \cdots \tag{2.3}$$

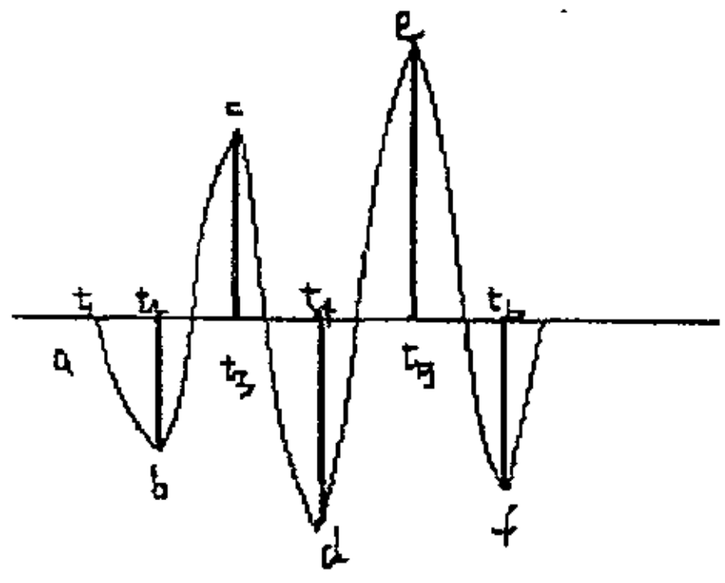


图　2-2　原始波形图

由于后面的波形可能有叠加现象，所以采用起始几个波测量频则较纯正。T_1的读数随着首波幅度是否陡峭可能有偏差，故测量时尽可能使幅度高，波形陡峭则 a 点确定偏差较小。但是随着计算机和电子技术的快速发展，新的超声波仪器可以直接读取 T_1和首波振幅。

用接受信号的频率变化判断混凝土内部有无缺陷，是根据各测区接受信号频率变化作相对比较的。对于有缺陷的混凝土，超声波探测降低较大，而完好的混凝土，超声波探测频率下降则较有缺陷混凝土的小。为了减小测读次数，宜采用 $f=\frac{1}{4(t_2-t_1)}$，计算较简单，但 T_1的测读当首波幅度陡峭时，测量的频率重复性较好，偏差也小。

（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