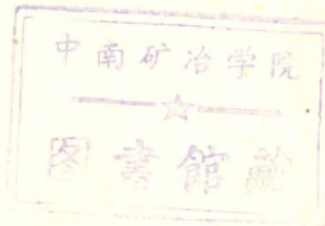


530738

美国无损检测教程

NDT Training Program



《汽轮机技术》编辑部编译

一九八五年



美国无损检测教程

NDT Training Program

《汽轮机技术》编辑部编译

一九八五年

译 者 前 言

近年来,在国家经济体制改革的过程中,通过合作生产、技术转让等多种形式从技术发达国家引进先进技术,以加快我国四个现代化建设进程。在无损检测领域中也同样,和西德、美国、加拿大等国家的无损检测人员接触逐渐增多。对日本和西德的无损检测书刊、教材,国内的无损检测人员早已熟悉;但美国的无损检测书刊和教材则见到的不多。最近,机械部有关工厂在引进美国西屋公司30—60万千瓦汽轮发电机组制造技术时,得到了美国无损检测学会的《无损检测教程》(ASNT.NDT.Training Program 1979年版)现将其翻成中文,介绍给国内的无损检测工作者。

这套包括超声波检测(UT)、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)四部分内容的教材,是美国培训初、中级探伤操作人员(美国称技师)的全国统一基础理论教材。可以作为地方学会专用的学习班教材,也可以在工厂企业内部用于在职人员的定期培训。其内容简练、技术较新,并且符合美国无损检测人员资格鉴定和证书颁发文件(SNT—TC—1A)要求。

本教材实质上是一种课堂上的讲义,在美国还将其直接制成透明塑料片,在课堂教学中放映。上述情况在西屋公司就曾看到过。此教材着重于无损检测操作技巧的描述及原理的文字解释,避免了大量的数学公式,特别适合国内广大无损检测操作工人学习。

使用本教材举办学习班,授课教师备课容易,不需化费很多时间,但学员收益却会是很大的,可谓事半功倍。如果教师适当补充个人实践经验和国内实际情况,将会收到更好的效果。课堂讲授每一课约需二小时。

本教材虽然是初、中级人员通用的,但初级人员(美国Ⅰ级人员,我国Ⅲ级人员)应着重掌握操作技术,即教材的前部分课文;而中级人员(美国和我国均为Ⅱ级人员)则应全部掌握教材内容,但应着重教材的后几课,即关于非连续性或缺陷的评定和分类,对此教师应更多地补充有关内容。

在本书的翻译工作中,对于许多技术论点、名词称乎虽然作了反复推敲和细致琢磨,但由于时间仓促和人员水平关系,一定存在不少错误,望广大读者给予指正。

本书的翻译工作由哈尔滨汽轮机厂中央试验室工程技术人员和情报科编译人员共同配合完成。参加工作的有:

朱涤新、姜传海、胡初民、孙智民、王乃井等同志。

目 录

第一课	应用、培训及发放证书·····	1
第二课	超声的原理·····	3
第三课	设备及其调节装置·····	6
第四课	波的传播、反射及折射·····	11
第五课	耦合剂、材料的特性、声束的扩散·····	16
第六课	衰减、声阻抗、共振·····	19
第七课	示波屏显示、用UT计算尺进行斜角检测·····	23
第八课	探头、标准试块·····	27
第九课	液浸式检测·····	33
第十课	接触式检测、纵波和横波、斯涅耳定律·····	37
第十一课	斜探头接触式检测的应用·····	42
第十二课	超声波的非相关显示·····	47
第十三课	UT中非连续性的分类·····	51
第十四课	非连续性的鉴别与比较·····	55
附录一	UT练习题以及测验题答案·····	56
附录二	常见英美制——公制单位换算·····	58

第一 课

应用、培训及发放证书

超声波检测的基本应用

超声波检测是一种多用途的检测手段，它可用于各种各样的金属和非金属产品，例如焊缝、锻件、铸件、板材、管材、塑料和陶瓷等。

超声波检测的优点是，仅从工件的一侧就能检测工件的皮下非连续性。

超声检测能够通过下述方式保证产品的可靠性：

- 1、获得有关非连续性的信息。
- 2、在不损害产品的前提下，揭示非连续性的性质。
- 3、按照予定的标准辨别材料的合格与否。

培训与发放证书

在采用超声检测及评定其结果以前，有必要对UT工作人员和工长进行资格考核。

美国无损检测学会推荐使用其文件“推荐实施方案NO. SNT—TC—IA”

该文件为雇主提供了必要的准则，以正确地对使用各种NDT方法的工作人员进行资格考核及发放证书。

用此资料，雇主必须根据该文件制订一个“书面实施方案”，详细地阐明如何对UT工作人员进行培训、考试及发放证书。

建议学员学习SNT—TC—IA（现行版），以确定培训UT工作人员所需要的课堂讲课时数和实际工作月数。

NDT工作人员通常分为三级，由雇主负责发放证书。

I 级——能够根据书面操作规程进行具体的仪器调整、工件检测以及检测结果的评定工作。

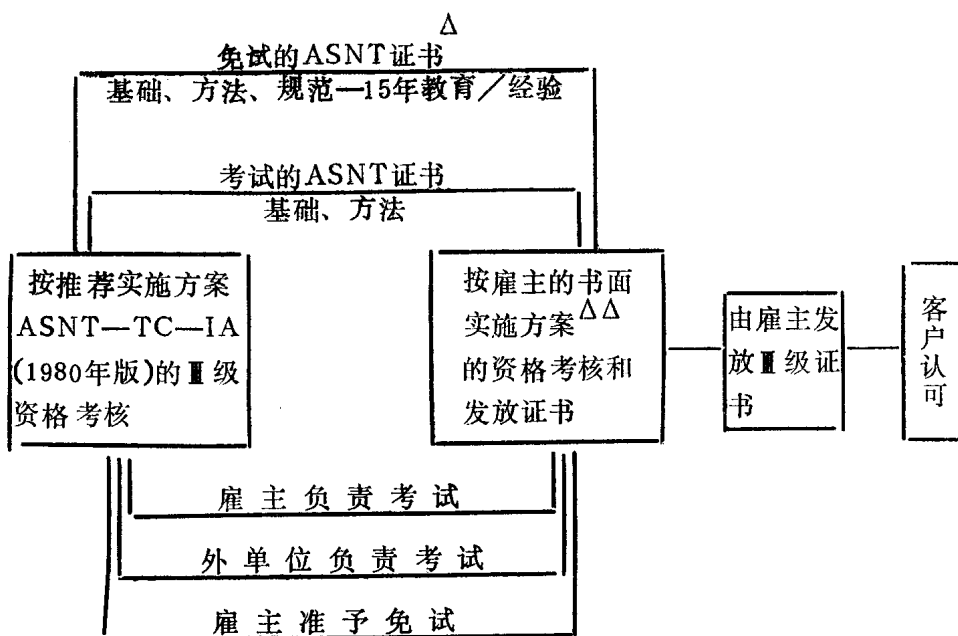
II 级——能应用法规、标准和规范进行仪器的安装和调整、检验结果的整理及其评定，并能编制书面操作规程、书写检测结果报告。

III 级——负责制订工艺，解释法规、确定需采用的检测方法和技术。必须具有工艺方面的实践经验，并熟悉常用的其它NDT方法。

据SNT—TC—IA文件推荐，对I、II级NDT工作人员需进行下列考试：

- A、一般的（基础知识）考试
- B、专门的（工艺规范）考试
- C、实际操作考试

美国无损检测学会（ASNT）协助工业部门对III级NDT工作人员进行基础知识和NDT方法方面的考试。鉴于许多工业部门在使用NDT方面均有各自的要求，故工艺规范方面的考核仍应是雇主的责任，下页所列流程图是根据SNT—TC—IA文件绘制的，可供考核时使用。



△、证书发给个人。

△△、按照SNT—TC—IA (1980年版) 的 5, 8·3·3, 8·3·4, 和 9 来制订。

测 验 题 (是非题)

- 1、探伤方法的选定, 通常由进行操作 I 级工作人员决定。
- 2、美国无损检测学会 (ASNT) 协助对 I、II 和 III 级 NDT 工作人员进行基础和规范方面的考试。
- 3、NDT 工作人员的证书只能由雇主按照 SNT—TC—IA 文件的要求负责发放。
- 4、在以 SNT—TC—IA 文件作为准则时, “书面实施方案” 必须呈报 ASNT 批准。
- 5、III 级人员在符合 SNT—TC—IA 文件的准则后, 尽管只需要在超声检测方面进行考核, 但还必须具备其它常用 NDT 方法的知识。
- 6、进行操作 I 级 UT 人员从 II 级或 III 级 UT 人员处获得书面操作规程, 他有权 (按照 SNT—TC—IA 文件) 接收或拒收待检工件。
- 7、按照 SNT—TC—IA 文件的准则, 在进行定级考试时, 对所有三个等级的 NDT 工作人员均必须进行 “一般的”、 “实际操作” 以及 “工艺规范” 三方面的考试。
- 8、按照 SNT—TC—IA 文件 1980 年 6 月版, 当工作人员的档案已表明其资格为 III 级时, 允许雇主免于进行 III 级工作人员考试。
- 9、凡雇主, 均需按照 SNT—TC—IA 文件制订 “书面实施方案”。
- 10、雇主在本公司没有 III 级工作人员的情况下, 可聘请公司以外的机构来执行相应的职能。
- 11、超声检测法的优点是仅从被检工件的一侧就能检测出其内部非连续性。

12、超声波检测对工件材质的使用性能不会产生任何不良后果。

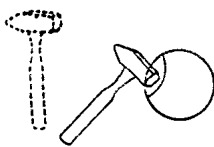
第二课

超声的原理

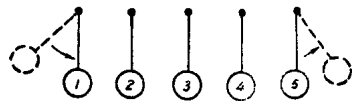
在超声检测中利用了所谓的“超声振动”，关于振动必须了解下述两点：

- 1、振动是一种往复运动。
- 2、振动是处于运动中的能量。

一个物体表面从其正常位置发生凹陷的现象称之为“位移”（下左图）。



振动通过一固体物质，
可视为粒子位移的连续，这
一点可以形象地用右图表示：



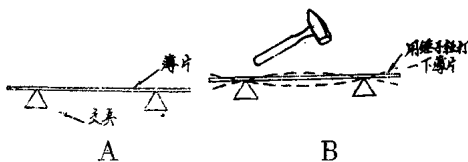
物质实际上是由许多很小的粒子或

者原子团所构成。这些粒子都有一个平衡位置，当受到一定的力的作用后，它们就产生一个位移，当该力消失后，它们又回到最初的位置。

在固体物质中，能量就是由其内部一系列微小粒子的连续位移来传递的。

超声振动在通过物质时的传递与该物质材料本身的弹性有关。

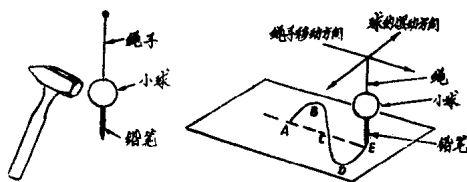
如果敲打一金属的表面，该表面即向内运动，产生位移（左下图）。



由于金属是弹性的，该表面将力图回到其最初的位置（平衡位置），并且还要越过平衡位置移动到其相反方向的最大位移位置。

这样一个完整运动过程称之为一个“循环”。

运动经过一个循环所需的时间称之为一个周期。



例：设左图中的摆球在1秒钟内移动的轨迹是ABCDE，则循环的周期是1秒。

在单位时间内的循环次数称之为**频率**。

例：设摆球在1秒钟内完成了三个循环，则频率就是3CPS（周/秒）。

例如在击鼓时，其频率是低的，大约为50CPS。但钢琴的高音部频率却很高，可达4100CPS左右。

用以表示一秒钟内循环次数的频率单位是“赫兹”（Hz）。1CPS=1Hz，2CPS=2Hz，以此类推。

象在空气中一样，声音也能在金属中传播。声音是一种具有一定频率的振动。

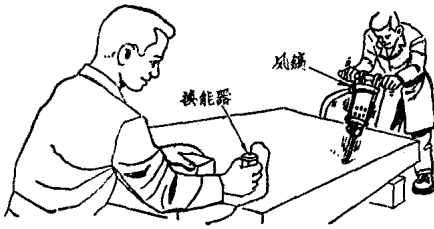
人们能够听到的振动（声音）的最高频率约20000Hz。

但是，用于超声波检测的振动频率约5000000Hz（5MHz）。

超过人们听力范围的振动称之为“超声振动”。

人们经常提到的两个术语“声”和“振动”，实际上是同一概念。

关于声的最恰当定义是：声是通过一系列微小物质粒子的连续位移传送能量的一种振动。



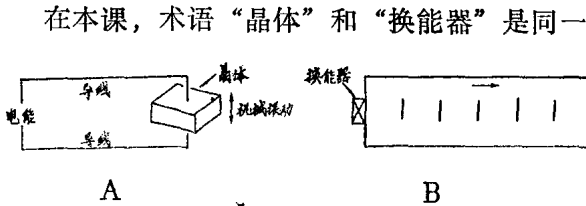
超声检测就是应用超声波通过工件来确定其完善性、厚度、或者某些物理特性。

引起工件内部物质粒子移动的能量，来源于所谓的“换能器”。

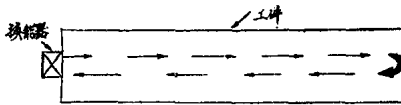
换能器是能够把一种形式的能量转换成另一种形式能量的元件。例如：它能把电能转换成机械能，或者把机械能转换成电能。收音机中的扬声器

就是用以将电能转换成往复的机械能的换能器。

下图A所示，是“压电效应”。两根导线接于晶体上，应用电能即可引起晶体的振动。



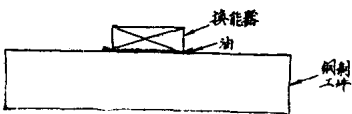
电能可使压电晶体膨胀和收缩，从而形成机械振动。压电晶体也能把机械能转换成电能。所以换能器既可发送能量又可接收能量。



换能器传递的能量可以是脉冲式的，也可以是连续式的。

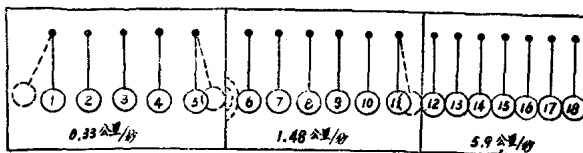
脉冲超声波的定义是：在很短的时间内换能器发射很短的一组振动。这种换能器也可作接收器。

超声波在钢、水和油类物质中都能很好地传递，但在空气中比较困难。



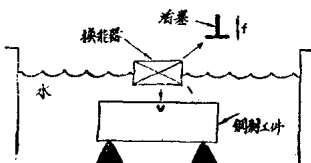
空气是超声波传递的不良介质，因为空气的密度很小，在其粒子之间传递声能较困难，这就是为什么要在换能器和工件表面之间加油（或油脂）耦合的原因。

声速与材料密度有关。从一种介质到另外一种介质，声速要发生变化，如下图所示。此外，材料的弹性也是影响声速的一个因素



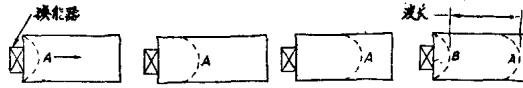
假定左图中的小球分别表示空气、水和钢的内部结构，如对这些成排的小球进行一次冲击，就形成一个所谓的“超声脉冲”。

下图是在不同材料中的声速实例。

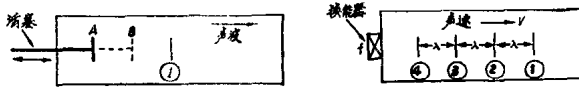


声波通过水的时间较之通过钢的时间为长，换句话说钢中的声速大约是水中声速的四倍。

波长的定义为两个相继位移之间的距离。



波长也可定义为波在一个完整循环内所经过的距离。



令符号“ λ ”表示波长，并读作“Lambda”（兰姆达）。

下图是换能器以一定的频率（ f ）振动，并向工件发送声波。



这些声波以一固定的速度（ V ）通过工件。

如果换能器的振动频率改变，波长也随之改变。

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{即：波长} = \frac{\text{声速}}{\text{频率}}$$

例如，可以通过增大频率的办法来缩短波长。

实际上，用超声检测所能探测到的最小缺陷尺寸是 $\frac{\lambda}{2}$ ，所以，为了探测到较小的缺陷需要用高频探头。

例：使用3MHz的探头，在钢制工件中声速是6KM/S（公里/秒），试求能够发现的最小缺陷尺寸？

解：

$$\lambda = \frac{6 \times 10^5 \text{CM/S (厘米/秒)}}{3 \text{MHz (兆赫)}} = 2 \text{MM (毫米)}$$

如果所能发现的最小缺陷尺寸是 $\frac{1}{2} \lambda$ ，则本题的答案将是1mm，即0.040”（英寸）。

练习

- A、两个相继位移之间的距离称之为“波长”，也即波在一个完整循环内所前进的距离。
- B、用于表示波长的符号是“ λ ”，读作“Lambda”（兰姆达）
- C、波长是一常量（声速）同一变量（频率）之比值：

$$\text{波长} = \frac{\text{声速}}{\text{频率}}, \quad \text{或 } \lambda = \frac{V}{f}$$

- D、在下列习题中，均采用脉冲反射式超声检测法，而且它所能检测的最小非连续性尺寸取为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

- 1、用2MHz的探头，来检测声速是 $6.0 \times 10^5 \text{CM/S}$ 的钢制工件，试求所能检测到的最小缺陷尺寸。
- 2、如果把上题中的频率增大到5MHz，试求所能检测到的最小缺陷尺寸。
- 3、在检测钢制工件时，已知声速为 $5.9 \times 10^5 \text{CM/S}$ ，试问在下列三种频率的探

头中，使用哪一种频率时，所检测到的缺陷尺寸为最小？并试求使用这三种频率的探头所能检测的最小缺陷的尺寸。

- 2.5MHz
- 5.0MHz
- 10MHz

4、在其它条件均相同的情况下，试问声波在水中的波长大还是在钢中的波长大？

测 验 题

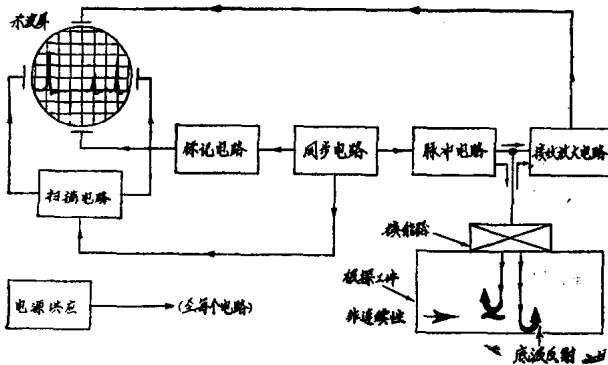
(1—10题——是非题，11—13题——填空题)

- 1、空气是超声检测时的良好介质，因此超声波主要在空气中传递。
- 2、材料的密度直接影响该材料中的声速。
- 3、表示波长的符号，读作“SHEPDA”。
- 4、在其他条件均相同的情况下，声波在水中的波长要比它在钢中的波长短。
- 5、按照本课对超声的定义，可认为钢球的弹性比铅球好。
- 6、人们能听到的声波的最大频率可达5000000Hz。
- 7、振动通过固体材料的情况，就好似一系列粒子位移的连续。
- 8、声在钢中的速度比它在水中的速度小。
- 9、振动在单位时间内所完成的循环次数称之为频率。
- 10、超声波检测方法所能检测的最小非连续性尺寸是 $\frac{1}{2}\lambda$ （波长）
- 11、如果铝中的纵波速是 $6.5 \times 10^5 \text{CM/S}$ ，使用2.5MHz的探头能发现的最小非连续性的尺寸是_____。
- 12、换能器所以能把电能转换成机械能或把机械能转换成电能，是利用了“_____效应”。
- 13、超声脉冲在一个完整周期内经过的距离称为_____。

第 三 课

设备及其调节装置

超声设备的系统大致如下图所示。



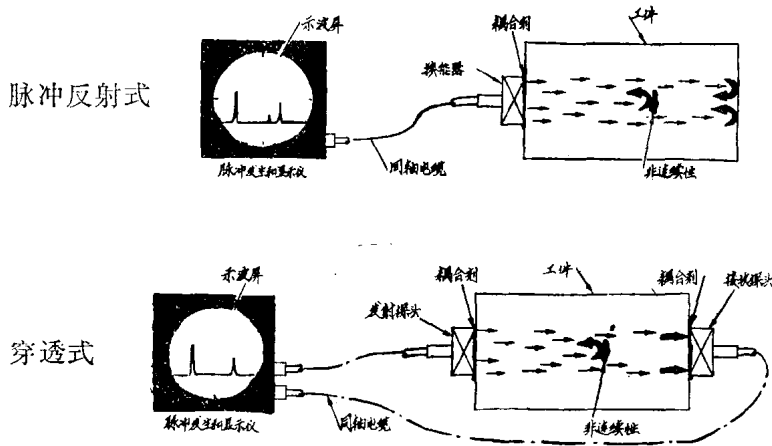
脉冲反射式超声仪器，能在很短时间内产生一高压电脉冲，这些电脉冲施加于换能器上，而后者把它们转变成机械振动（超声波），作用于被检工件。

声能的大部分由被检工件前表面所反射而返回换能器，剩余的部分被工件底面或非连续性所反射。返回换能器的声波，又转

变成电脉冲，然后再经电路放大，最终在示波屏（CRT）上显示为垂直脉冲信号。

A型显式：能显示非连续性的深度以及非连续性反射信号的幅值。这个幅值与反射信号的能量有关。

超声探伤仪可分为两大类型：脉冲反射式和穿透式（如下图）。



脉冲反射式超声探伤仪目前应用得最广泛。它在短时间内向被检工件发射超声脉冲，在它们前进的途中如果遇到非连续性或界面，将发生反射，然后在示波屏上显示出所接收到的反射信号。这种探伤仪中的换能器既能发射也能接收。

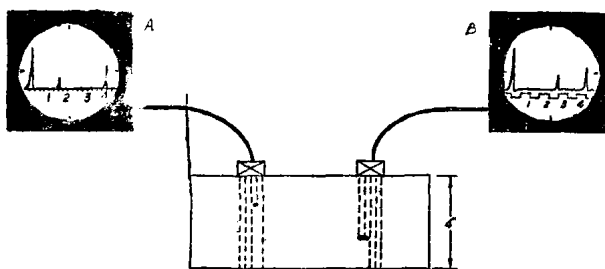
穿透式超声探伤仪需要两个换能器，一个用作发射信号，而另一个用作接收信号。这种探伤仪向工件内部发射的信号可以是脉冲式的，也可以是连续式的。被检工件质量的好坏，由超声波通过工件后所损失的能量来度量。

超声检测通常有两种方式：

“接触式检测”——在换能器和工件表面之间有一层很薄的耦合剂。

“液浸式检测”——换能器和工件都浸没在耦合液中（通常是水）。

为了决定被测工件内部非连续性的位置，在示波屏的水平方向标有刻度，例如CM（厘米）、INCH（英寸）



在给定的灵敏度（增益）下，示波屏上反射脉冲的幅值由反射信号的强度所决定。

鉴此，示波屏可以显示两种信息：

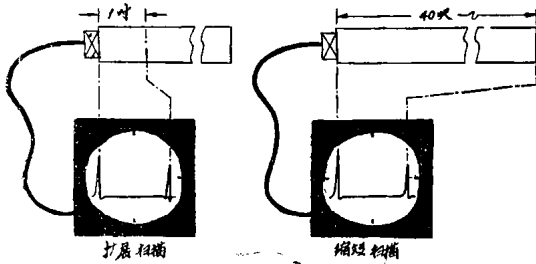
1、非连续性到换能器的距离（时间）。

2、反射声能的相对数值。

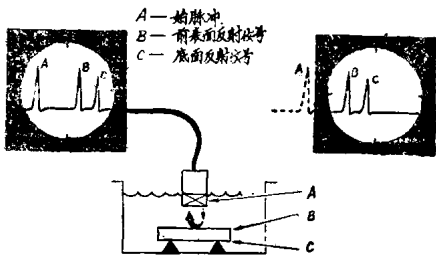
聚焦和散焦调节——调节显示信号的清晰度。

灵敏度或增益调节——决定所接收到的非连续性反射信号的放大程度。增大灵敏度（增益）时，在示波屏上的反射信号幅值也随之增加。

“扫描长度”和“扫描延迟”调节——调节被检工件的探测范围和探测部位。
示波屏上的“扫描长度”（材料调节）可以增大或缩小，如下图所示。



“扫描延迟”调节——允许视场沿被检工件深度方向移动。在液浸式检测中，经常用“扫描延迟”来移去示波屏上的始脉冲。



“脉冲重复频率”调节——调节给定时间内所发射的脉冲次数。一般情况下，每秒钟脉冲次数可为50—1200或者更高。当需要较长扫描时，脉冲重复频率要取得低一点，以便于在下一个脉冲出现之前有足够时间显示扫描。有些探伤仪的脉冲重复频率是自动调节的。

增加脉冲宽度，也就增加了施加被检工件的声能，但同时却降低了仪器的分辨能力。

为增加声的穿透能力，或为了探测粗晶材质，必须提高“脉冲能量”。

“抑制”调节——用于限制或降低“杂波”以及扫描线上特小幅度值的干扰信号。这种调节也会影响显示的垂直线性。

“缺陷报警”或“闸门电路”——用于沿扫描线的方向建立一个区域，在该区域内，非连续性反射脉冲信号超过一定限度时，即导致报警系统或者记录系统动作。



“距离/幅值”调节——对于同一尺寸的非连续性，当穿透深度增加时，相应的反射信号幅值就减小，因而在许多超声探伤仪器上装有这种电子调节系统来补偿上述衰减的现象。

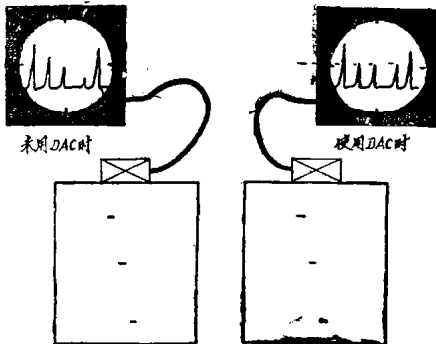
这种调节装置的一些常用名称是：

DAC——距离幅值校正装置

TCG——随时间校正增益装置

STC——随时间调节灵敏度装置

这种调节装置与缺陷报警或记录系统联用非常有效。



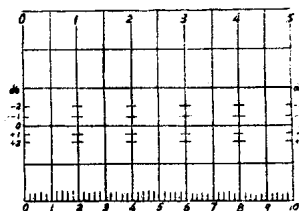
练 习 题 1 *

A、如下图所示，许多超声仪器的示波屏水平基线上均分有50个刻度，根据公式：
 声程/刻度 = 范围/50，便可以求出示波屏上每一刻度所代表的声程。整个水平基线代表的距离为0.5—100英寸以上。

例如：如果希望整个示波屏的显示范围是10"（英寸），
 则可以求出每一刻度所代表的声程：

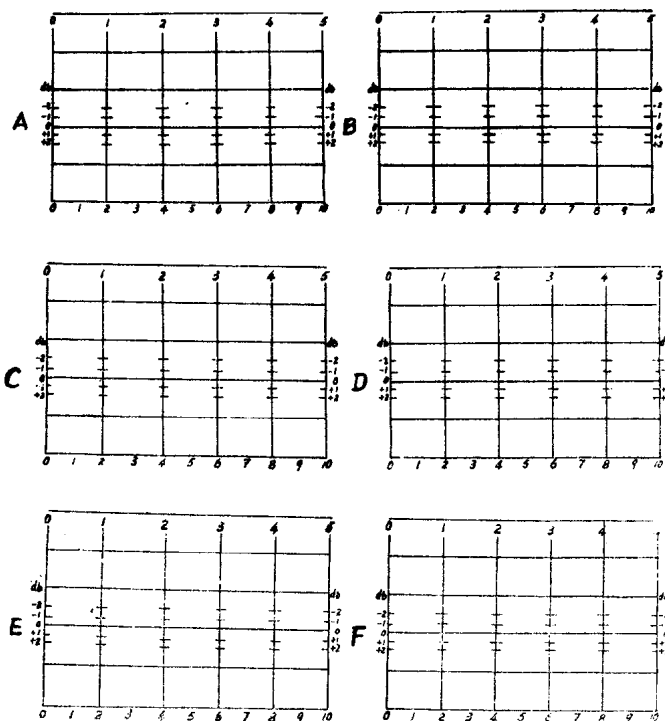
$$\text{声程/刻度} = 10 / 50 = 0.2''$$

B、选择了合适的示波屏范围后，在已知厚度的校准试块上调节仪器，调节“扫描长度”，移动示波屏上的脉冲信号。关于这点将在下面的课中介绍。



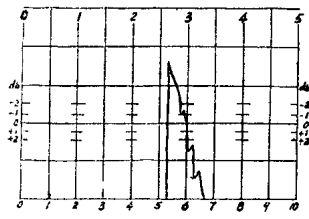
C、也有许多超声仪器上的示波屏水平基线不是分有50个刻度，而是分有100个刻度，此时，上面的公式就变为：声程/刻度 = 范围/100。

使用直探头，在试块上适当地调整仪器，并在下面示波屏上画出反射波形（至少要画两次反射波）。

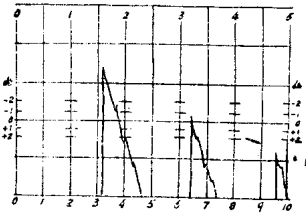


练 习 题 2 *

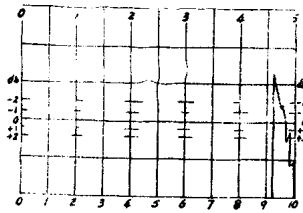
使用直探头，在试块上适当地调整仪器，并求出下面示波屏上的第一次反射波所代表的声程。



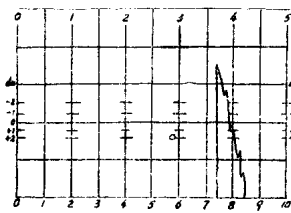
A



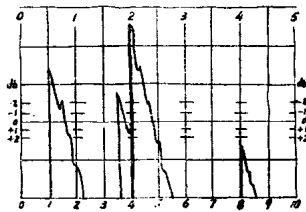
B



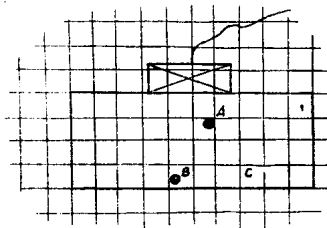
C



D



E

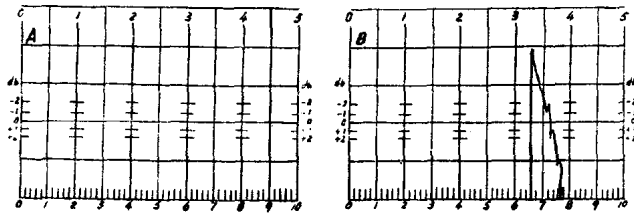


F

测 验 题

(1—7 题——是非题, 8—10 题——填空题)

- 1、在穿透式超声检测时, 如示波屏上显示信号幅值增大, 就表示工件内部可能存在着非连续性。
- 2、脉冲反射式超声检测, 利用的是连续式声波, 并且另有一个换能器来接收反射信号。
- 3、在接触式和液浸式检测中, 都需要耦合介质。
- 4、通常可用“增益”来测定示波屏上可疑的非连续性信号的放大程度。
- 5、“扫描长度”和“扫描延迟”是同一调节装置的两种名称。
- 6、在液浸式检测时, 往往利用“扫描长度”调节装置把始脉冲移到示波屏的外面。
- 7、当要检测厚工件时, “距离/幅度”调节装置能够自动增大示波屏的显示范围。
- 8、在接触式检测A型显示中, 垂直方向显示代表的是_____。
A、声速 B、时间 C、距离 D、信号的幅值
- 9、当整个示波屏范围为15" 时, 试在下面图A中画出声程为9" 的反射脉冲信号_____。
- 10、当整个示波屏范围为2.5" 时, 下面图B的脉冲信号声程是_____。



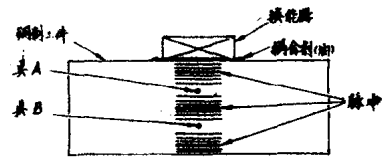
第四课

波的传播、反射及折射

超声波传播的波型

声速可定义为单位时间内（通常是1秒）声波在介质中所传播的距离。对于一定的介质，声速是一常数。

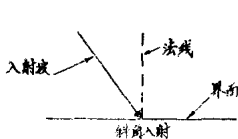
下表例举了几种物质的声阻抗、声速和密度值，这些数据可供下文中进行超声计算时使用。



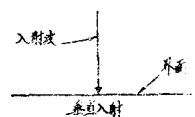
介质	声阻抗(G/CM ² ·S)	纵波声速(CM/S)	密度(G/CM ³)
空气	0.000033 × 10 ⁶	0.33 × 10 ⁵	0.001
水	0.149 × 10 ⁶	1.49 × 10 ⁵	1.00
铝	1.72 × 10 ⁶	6.35 × 10 ⁵	2.71
钢	4.56 × 10 ⁶	5.85 × 10 ⁵	7.8

当超声波遇到具有不同声阻抗的介质时就发生反射，发生反射的这个面称之为“界面”。通常，界面就是两种不同材料之间的边界，象铝—钢或水—钢边界。

向界面入射的声束称之为“入射波”。超声波以一定角度入射于界面，如左下图所示，这个角度称做“入射角”

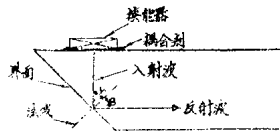
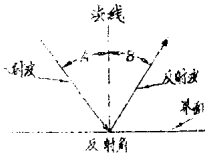


当声波传播方向垂直于界面时，这就是所谓的“垂直入射”情况，或者说是入射角为零的情况，如右图所示。



超声波达到界面后，其能量的一部分通过界面继续传播，而另一部分则被反射。反射部分的能量值取决于两种介质的声阻抗之比。

在界面上，反射角始终等于入射角，即， $\angle A = \angle B$ 如下图所示。



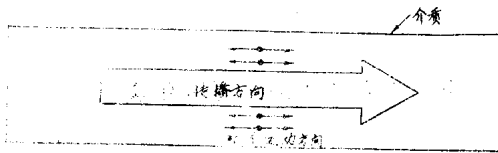
超声波传播的波型很多，通常分以下

几类：

- 1、纵波（压缩波）
- 2、横波（切变波）
- 3、表面波（瑞利波）
- 4、板波（兰姆波）

在超声波检测中，每一种波型的超声波都有各自的特点，必须充分了解每一种波型。

对于纵波波型，粒子是沿其传播方向往复振动。可以认为物质是由直线排列的原子形成的点阵所构成，当撞击点阵的一边时，将带动其它的粒子运动，形成所谓的纵波。

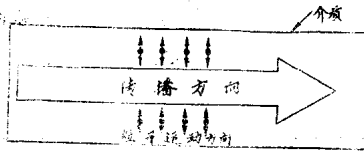


纵波

对于横波波型，粒子振动的方向垂直于波的传播方向。横波在液体和气体中不能传播。

在某些材料中，横波声速大约是纵波声速的 $\frac{1}{2}$ ，所以横波波长也是纵波波长的

$\frac{1}{2}$ （对于同一频率而言），这样，使用横波就能检测出更小的非连续性。



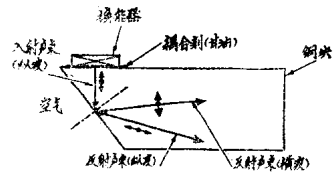
横波

当超声波以一定角度（不包括 90° ）倾斜射入到不同介质的界面上时，将出现波型的转变。

在左图所示的波型转换中，产生了两种反射波，一种反射波是纵波，而另一种反射波是横波。

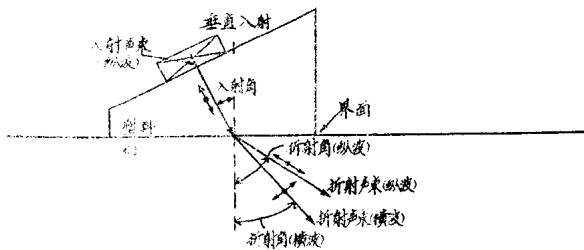
下面是使用斜探头的例子。在超声检测技术中折射横波是很有用的。

折射角就是在入射角不等于零的情况下，进入第二种介质发生折射的波同界面法线方向的夹角。



可用斯涅耳定律 (Snell's Law)

来确定两种介质界面上的角度关系。



$\phi_2 = \text{折射角}$

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

$\phi_1 = \text{入射角}$

$V_1 = \text{第一种介质中的声速}$

$V_2 = \text{第二种介质中的声速}$

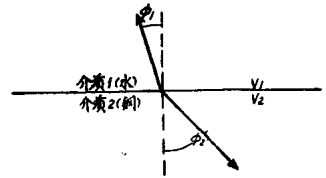
例：纵波通过水—钢界面，入射角 $\phi_1=10^\circ$ ，纵波在水中的速度 $V_1=1.49\text{KM/S}$ ，纵波在钢中的速度 $V_2=5.85\text{KM/S}$ ，求纵波的折射角 ϕ_2 。

由斯涅耳定律： $\text{SIN}\phi_1/\text{SIN}\phi_2=V_1/V_2$

$$\text{SIN}\phi_2 = \frac{V_2}{V_1} \text{SIN}\phi_1$$

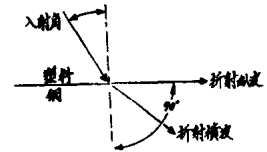
$$\text{SIN}\phi_2 = 0.6791$$

$$\phi_2 = 42^\circ 46'$$

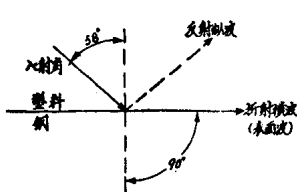


当入射角增大时，折射角也随之增大。如果入射角大到足以使纵波折射角达到 90° 时，折射纵波只能沿着分界面传播，此时的入射角称之为“第一临界角”。对于塑料—钢界面，其第一临界角大约是 28° ，此时在钢中只存在横波。

当入射角超过第一临界角时，在第二介质中只存在折射横波，如继续增大入射角直到横波的折射角也为 90° ，这就是入射角为第二临界角的情况，此时就产生了表面波。



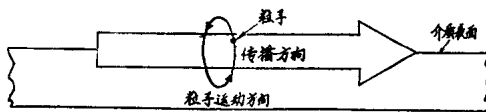
如下图所示，是纵波和横波都发生全反射的情况，对于塑料—钢界面，入射角大约要在 58° 以上时才能发生全反射的情况。



当入射角达到第二临界角时，就产生了第三种类型的超声波，称之为瑞利波或表面波。

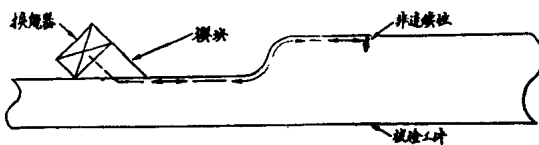
如左下图A所示，表面波在介质表面上传播时，粒子作椭圆运动。

表面波可用于检测表面裂纹。但表面波穿透工件的深度只能达到一个波长左右。



图A 表面波

如左下图B所示，表面波能够沿着工件的表面传播，但要求工件表面的形状不能有突然的变化。另外，表面波可能大多被过量的耦合剂或者被探头前面与工件表面接触的手指所吸收。



图B

板波也称兰姆波 (Lamb Wave)，它能在薄板中传播，其波型的变化与板厚、探头频率以及入射角有关。