

无损检测 II 级培训教材

超声波探伤

CHAOSHENGBO
TANSHANG

中国机械工程学会无损检测学会 编



机械工业出版社

5.28

无损检测Ⅱ级培训教材

超声波探伤

中国机械工程学会无损检测学会 编



机械工业出版社

本书是无损检测学会推荐使用的Ⅰ级人员培训通用教材之一(全套教材有五册:超声、磁粉、射线、渗透、涡流检测)。本书提供的是最低公共要求,各部门可在此基础上增加更多的专业内容以适合各自的培训需要。

本书内容包括基础教材(十二章)和实验指导(二十六个)两大部分,系统地讲述了超声探伤的物理基础、所用的仪器设备、各种探伤方法的基本知识及应用。在每章教材和每一实验之后均附有习题和思考题供加深理解。

本书主要读者对象是生产第一线的工人、工程技术人员以及参加无损检测等级人员培训的教师、工程师,也可供质量管理人员、安全监察人员及无损检测专业的师生参考。

超 声 波 探 伤

中国机械工程学会无损检测学会 编

责任编辑: 武江 方婉莹 责任校对: 丁丽丽

封面设计: 郭景云 版式设计: 冉晓华

责任印制: 张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街1号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 850×1168¹/₃₂·印张7¹/₂·字数193千字

1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 0,001—6,480·定价: 5.90元

ISBN 7-111-01477-4/TG·365

前 言

当前全国各地已广泛开展对无损检测人员进行技术培训和资格鉴定工作。Ⅱ级人员处于工业生产的第一线，但大量人员未经过正式培训。为了确保检验质量并逐步适应广泛国际经济技术合作的需要，加速对Ⅱ级人员的培训已是当前一项紧迫而又繁重的任务。为此，中国机械工程学会无损检测学会在全国范围内组织力量编写无损检测五种常用方法的Ⅱ级教材，《超声波探伤》就是其中的一本。

这本教材的编写原则是在1984年无损检测第三届全国年会期间提出的。考虑到各工业部门的主要检测对象并不相同，编写本教材的意图是满足一个最低的公共要求，各部门可在此基础上增加更多的专业内容，以适合各自的培训需要。

本书内容包括基础教材和实验指导两大部分。基础教材共十二章。第一、二章为物理基础和设备、器材；第三～七章为各种探伤方法的基础知识；第八～十二章为方法的主要应用，以之形成一较完整的体系，希望读者能循序渐进。限于本书的性质，有些问题不宜展开，若读者想进一步研究学习，可参阅其它有关书籍。实验共二十六个，与教材内容是紧相配合的。我们深感只有理解了的东西才能更好的掌握，而实验又可加深理解，两者相辅相成而绝不可有所偏废，恳切希望本教材的采用者能注意这一点。

本书是由李家伟、王怡之两人编写的。但在此之前很多同志（如郑家勋、苏恒兴、顾世瑶、李克明、李衍、张国城、马铭刚等同志）都为超声Ⅱ级人员的培训做过大量工作，其中就包括有教材的编写和翻译，可以说，本书的编写是在他们辛勤劳动的基础上完成的。在此编者谨向他们表示诚挚的感激。此外左厚扬、夏纪真、李克明、孙德江等同志对本书的编排等均提出有益的意见，

我们谨向他们表示谢意。

在这套教材的组织编写过程中，陶亨咸、应崇福、赖坚、程瑞全、张企耀、王务同、李明等同志都曾直接予以指导和支持，谨此表示感谢。

我们希望通过本教材的使用，能使学员对超声探伤方法有较清晰的物理概念，为准确使用仪器对产品进行可靠检查打下较好的基础。但由于编者水平所限，书中错误不当之处在所难免，恳请读者指正。

编 者

一九八八年四月

目 录

第一章 超声波探伤的物理基础	1
第一节 振动与波	1
第二节 超声波的传播	10
第三节 超声平面波在大平界面上垂直入射的行为	13
第四节 超声平面波在平界面上斜入射的行为	16
第五节 聚焦与发散	23
第六节 超声波的获得和超声场	24
第七节 超声波对规则形状反射体的反射	27
第八节 超声波在传播过程中的衰减	31
习题	33
第二章 超声波探伤仪、探头及试块	35
第一节 超声波探伤仪	35
第二节 超声波探头	43
第三节 试块	48
第四节 超声波仪器、超声波探头的性能	51
习题	52
第三章 超声波探伤的基本问题	53
第一节 对检测对象的了解与要求	53
第二节 入射方向和探测面的选择	54
第三节 对仪器的要求	54
第四节 对频率的选择	55
第五节 对探头的选择	56
第六节 对耦合剂的选择	57
第七节 对比试块	58
第八节 扫查	59
第九节 影响缺陷回波幅度的因素	60
第十节 实际缺陷的定量评定方法	62
习题	64

第四章 纵波探伤要点	65
第一节 基本操作	65
第二节 缺陷位置的确定	69
第三节 用AVG图法确定缺陷的当量值	70
第四节 用试块对比法测定缺陷的当量值	75
第五节 以缺陷波相对底波波高为基准的方法	76
第六节 缺陷长度测量	76
第七节 聚焦探头和联合双探头的运用	77
第八节 纵波探伤时侧边界面的影响	79
第九节 纵波探伤顺序	83
习题	83
第五章 横波探伤要点	84
第一节 探伤前的准备	85
第二节 探伤作业	91
第三节 横波探伤时侧壁的影响	96
第四节 横波探伤的程序	97
习题	98
第六章 瑞利波和蓝姆波探伤要点	99
第一节 瑞利波探伤	99
第二节 蓝姆波探伤	101
习题	106
第七章 板材的超声波探伤	107
第一节 板材的制造方法及常见缺陷	107
第二节 中厚板的超声波探伤	108
第三节 复合板的超声波探伤	113
第四节 薄板的超声波探伤	114
习题	116
第八章 铸锻件的超声波探伤	117
第一节 铸件的超声波探伤	117
第二节 锻件的超声波检验	122
习题	130
第九章 棒材的超声波探伤	131
第一节 棒材的制造方法及常见缺陷	131

第二节 棒材超声探伤的特点	131
第三节 大直径轧制棒材的超声波探伤	133
第四节 较小直径轧制棒材的探伤	135
第五节 细棒的检查	136
第六节 灵敏度的调整和缺陷的评定	136
习题	137
第十章 管材的探伤	138
第一节 管材超声波横波探伤基础	138
第二节 直接接触法(包括间隙扫查法)	141
第三节 水浸法	144
第四节 厚壁管探伤法	147
习题	148
第十一章 焊缝的超声波探伤	149
第一节 预备知识	149
第二节 平板对接焊缝的超声波探伤方法	152
第三节 T字形焊缝、角焊缝及搭接焊缝的探伤	156
第四节 干扰回波	157
习题	160
第十二章 用于在役设备维修的超声波检测技术	161
第一节 疲劳裂纹及蠕变开裂的探测	161
第二节 厚度测量	162
第三节 应力腐蚀开裂的超声波检查	165
习题	165
超声波探伤实验	166
绪言	166
第一部分 仪器性能、探头(纵波)性能、仪器-探头	
组合性能的测定	167
实验一 仪器水平线性的测定	167
实验二 仪器垂直线性的评定	168
实验三 分贝调节器准确度的测定	170
实验四 纵波直射单探头近场长度的测定	172
实验五 纵波直射单探头在近场和远场区中声束截面 上声压的分布	173

实验六	仪器-探头组合性能测试之一: 深度分辨力的测定	175
实验七	仪器-探头组合性能测试之二: 灵敏度和信噪比的测定	176
实验八	双晶纵波探头性能的测试	179
第二部分	纵波探伤	181
实验一	时间基线的校准及缺陷深度的测定	181
实验二	探测灵敏度的调整	183
实验三	传输损失值的测定及其在调灵敏度时的应用	185
实验四	用AVG图求缺陷当量	187
实验五	反射体延伸度的估测	188
实验六	侧面再反射形成迟到回波	190
第三部分	横波探伤	191
实验一	横波探头入射点和折射角的测定	191
实验二	波束指向性的测定	194
实验三	零点校正与时间基线按声程的校准	196
实验四	横波探伤灵敏度的调整	198
实验五	用横波斜探头检测时反射体的定位	201
实验六	缺陷当量值的确定、缺陷延伸度的估测	202
第四部分	瑞利波和蓝姆波	204
实验一	关于瑞利波的实验	204
实验二	蓝姆波的实验	206
第五部分	试件的检验	208
实验一	中厚板的检验—水浸法	208
实验二	轴类的检验	210
实验三	管材的检验	212
实验四	平板对接焊缝的检验	215
附录一	实验用试块示意图及编号	217
附录二	各种物质界面上的纵波声压反射率(平面波、 法线入射)	228
主要参考文献		229

第一章 超声波探伤的物理基础

第一节 振动与波

一、机械振动和机械波

1. 机械振动

在物理学术语中,振动的定义是:一个物理量的值在观测时间内不停地经过极大值和极小值而变化,这种变化状态称为振动。如果振动量是一个力学量,如位移、角位移等,所作的振动则称为机械振动。例如,如图1.1所示,往下拉一下安装在弹簧一端的小质点之后,由于松开而产生的运动就是机械振动;平摆的运动(如图1.2)则是机械振动的另一个例子,当摆移离其平衡位置尔后放开时,摆也就在其平衡位置附近作机械振动。

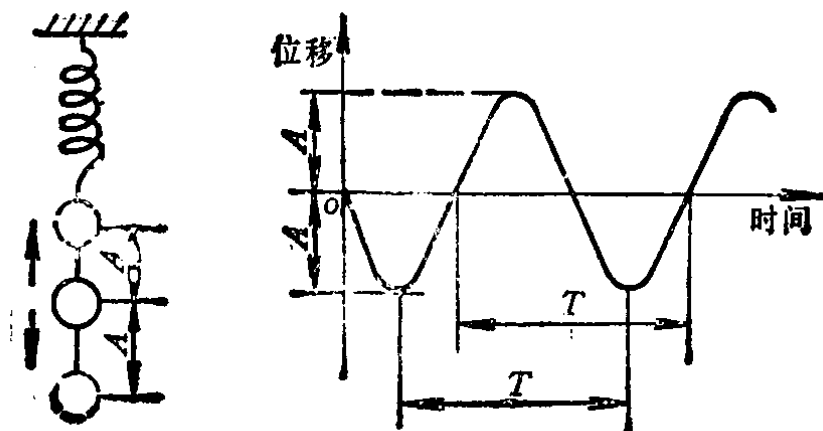


图1.1 加载弹簧的振动

在摩擦力可忽略的情况下,上述振动都是正弦函数性质的,称为谐振动。

一种振动当其振动量每隔一固定的时间 T 就完全重复一次,这种振动称为周期振动,时间 T 称为周期运动的周期,而每秒钟

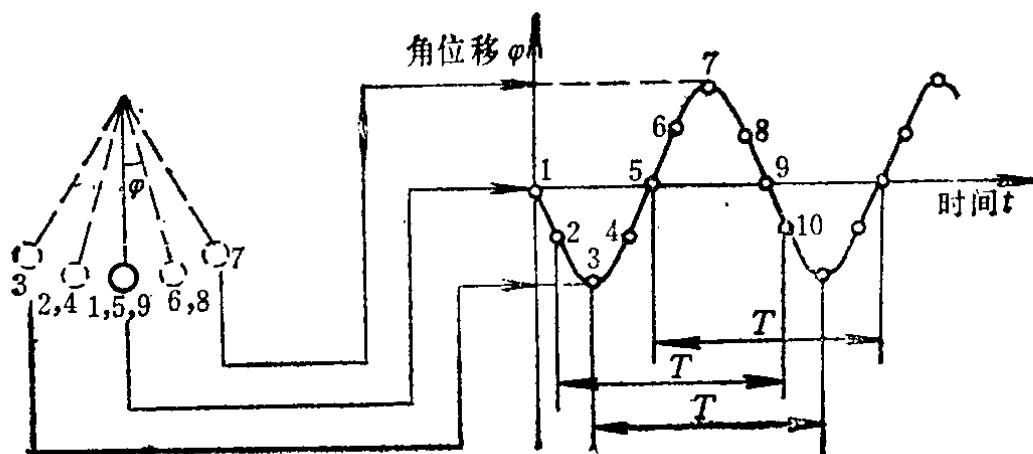


图1.2 平摆的振动

所完成的周期数即称为频率。

2. 机械波和声波

可以认为物体是由以弹性力保持平衡的各个质点所构成的，这种弹性体的简化模型如图

1.3所示。当某一质点受到外力的作用后，该质点就在其平衡位置附近振动。由于一切质点都是彼此联系着的，振动质点的能量就能够传递给周围的质点而引起周围质点的振动。机械振动在介质中的传播过程称为机械波；机械振动在上述弹性体中的传播就称为弹性波（即声波）——它是一种重要的机械波。

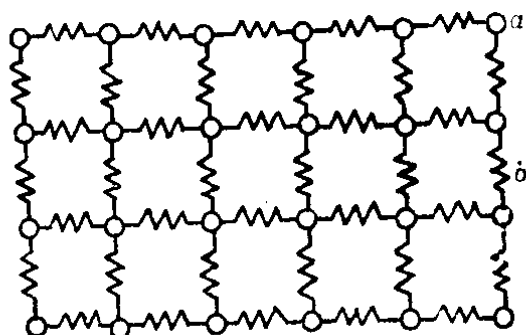


图1.3 弹性体的模型

a —质点 b —表示弹性的弹簧

由此可知，机械波产生的条件是首先要有一个作机械振动的质点作波源，其次要有传播振动的介质。此外，当振动传播时，振动的质点并不随波而移走，只是在自己的平衡位置附近振动而已。

3. 超声波

如果以频率 f 来表征声波，并以人的可感觉频率为分界线，则可将声波划分为次声波 ($f < 20\text{Hz}$)，可闻声波 ($20\text{Hz} \leq f \leq 20\text{kHz}$) 及超声波 ($f > 20\text{kHz}$)。在超声波探伤中，最常使用的频率

范围为 $0.5\sim 10\text{MHz}$ 。

4. 连续波、简谐波和脉冲波

连续波是指介质各质点振动持续时间为无穷的波动；其中最重要的特例是各质点都作同频率的谐振动，这种情况下的连续波称为简谐波（也称正弦波、余弦波）。

振动持续时间有限（单个或间发）的波动，则称脉冲波。

图1.4表示连续波与脉冲波的振动情况。

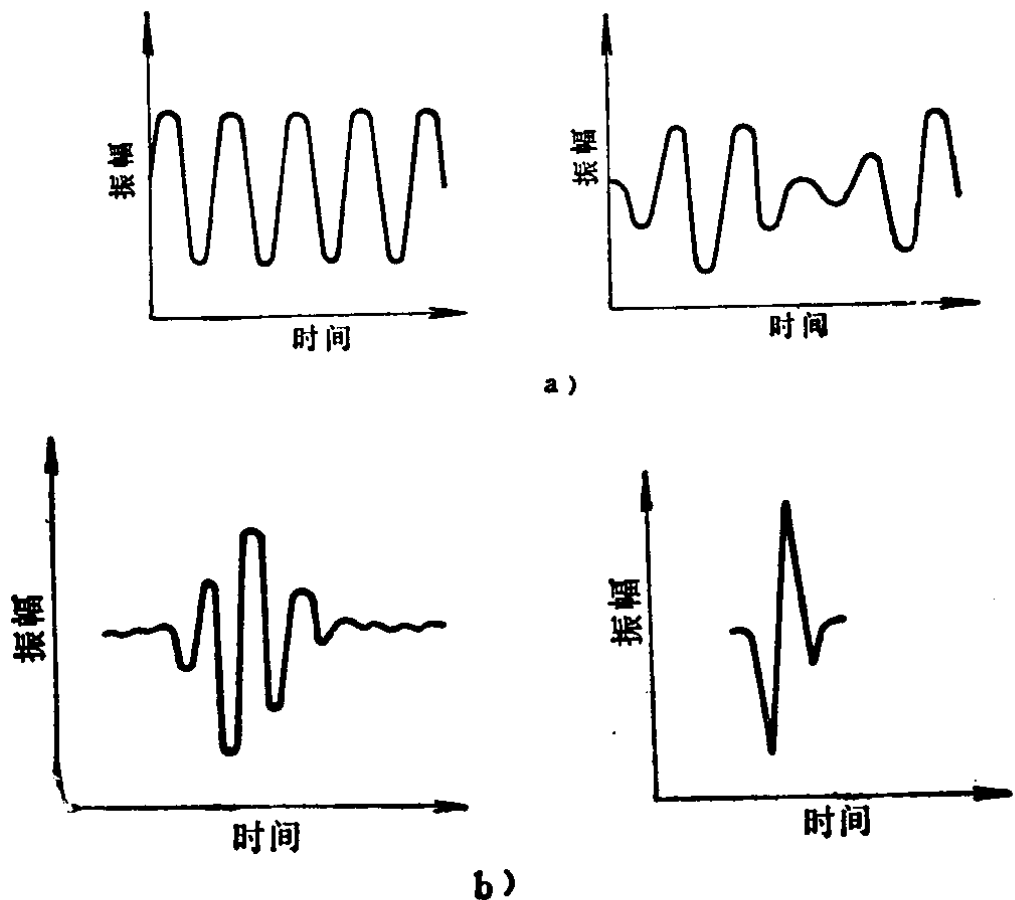


图1.4 连续波与脉冲波

a) 连续波 b) 脉冲波

5. 超声脉冲的频谱

根据数学方面的知识,我们知道,任何周期振动可以分解为许多谐振动之和,对于非周期性的振动也可分解为无限多个频率连续变化的谐振动之和。这种把复杂振动分解为谐振动的方 法,称为频谱分析。图1.5为两例。

6. 谐振动,简谐波的表达式

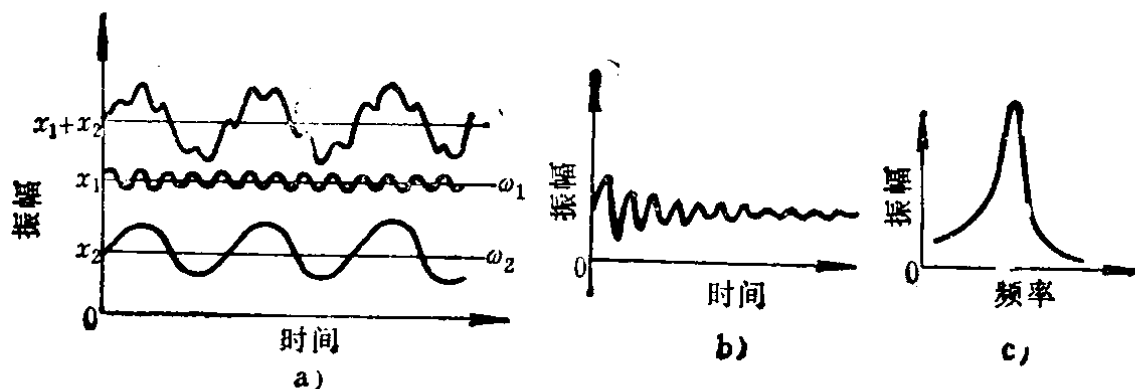


图1.5 脉冲的频谱

a) 频率为 ω_1 和 ω_2 的两个谐振动的合成 b) 阻尼振动 c) 该阻尼振动的频谱

物体作谐振动时，位移是时间的正弦或余弦函数，其数学表达式是

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中 y ——为振动幅度在任意时刻 t 时的数值；

A ——为振幅，是 y 的最大值；

$(\omega t + \varphi)$ ——为相位角，其中 ω 为角频率（角速度）， φ 为初始相位角（ $t = 0$ 时的相位角）。

为了对上式有较好的理解，我们可以用几何的方法来研究谐振动中位移与时间的关系。

如图1.6所示，设有质点 M 以角速度 ω 在半径为 A 的圆周上作匀速圆周运动，则在直径 $A'B'$ 上的投影点 P 就在 $A'B'$ 上作来回的运动，设 $t = 0$ 时（即开始观测时） M 点在 M_0 处，半径 OM_0 和 OB' 间的夹角是 φ ，经过时间 t 后， M_0 点到 M 处，半径 OM 和 OB' 间的夹角将变为 $\omega t + \varphi$ ，这时投影点 P 离开圆心的位移为：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

方程式 (1) 和 (2) 是完全一样的，两相对比可知：

φ ——为初始相位角，它所表示的实为位移的起始值或开始观测时的值；

ω ——为角频率（角速度），它所表示的实为振动的快慢程度；

$(\omega t + \varphi)$ ——为相位角，它表示振动的某一瞬时状态。这样，在

比较两个谐振动在某一时刻的位移时，就可以用 $A_1, \omega_1 t + \varphi_1$ 和 $A_2, \omega_2 t + \varphi_2$ 的差来表示，如果两个谐振动的 A 和 ω 相同，则可用 $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ 来表示。

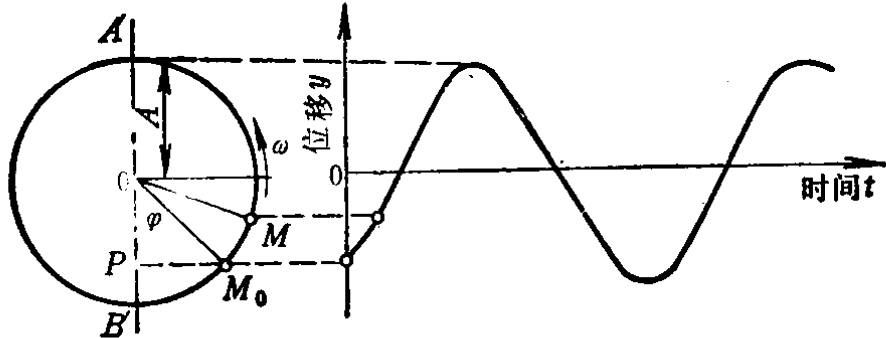


图1.6 谐振动的位移与时间的关系

应该注意，谐振动是指 M 点的投影点 P 在直径 $A'B'$ 上的运动而不是 M 点本身在圆周上的运动。 M 点的运动在这里只有辅助意义。

当振源作谐振动时，所产生的波是最简单最基本的简谐波，它的数学表达式也就是：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中 y ——波的幅度在任意一瞬间 t 的数值；

A ——波的振幅是 y 的最大值；

$(\omega t + \varphi)$ ——为相位角，其中 ω 为角频率（角速度）， $\omega = 2\pi f$ ， f 为频率；而 φ 则为初始相位角。

二、超声波的波型

由于声源在介质中施力的方向与波在介质中传播的方向可以相同也可以不同，这就可产生不同类型的声波，超声波的波型主要有以下几种。

1. 纵波

图1.7为纵波传播示意图。 $t=0$ 时各质点都处于平衡位置，设当振源开始作谐振动时，质点①受到向右的力，开始向右移动，由于弹性力的作用相邻质点也发生移动，但在时间上要稍迟一些。经过一段时间后 $t = \frac{T}{4}$ ，质点①已达到向右的最大位移，由于弹性力

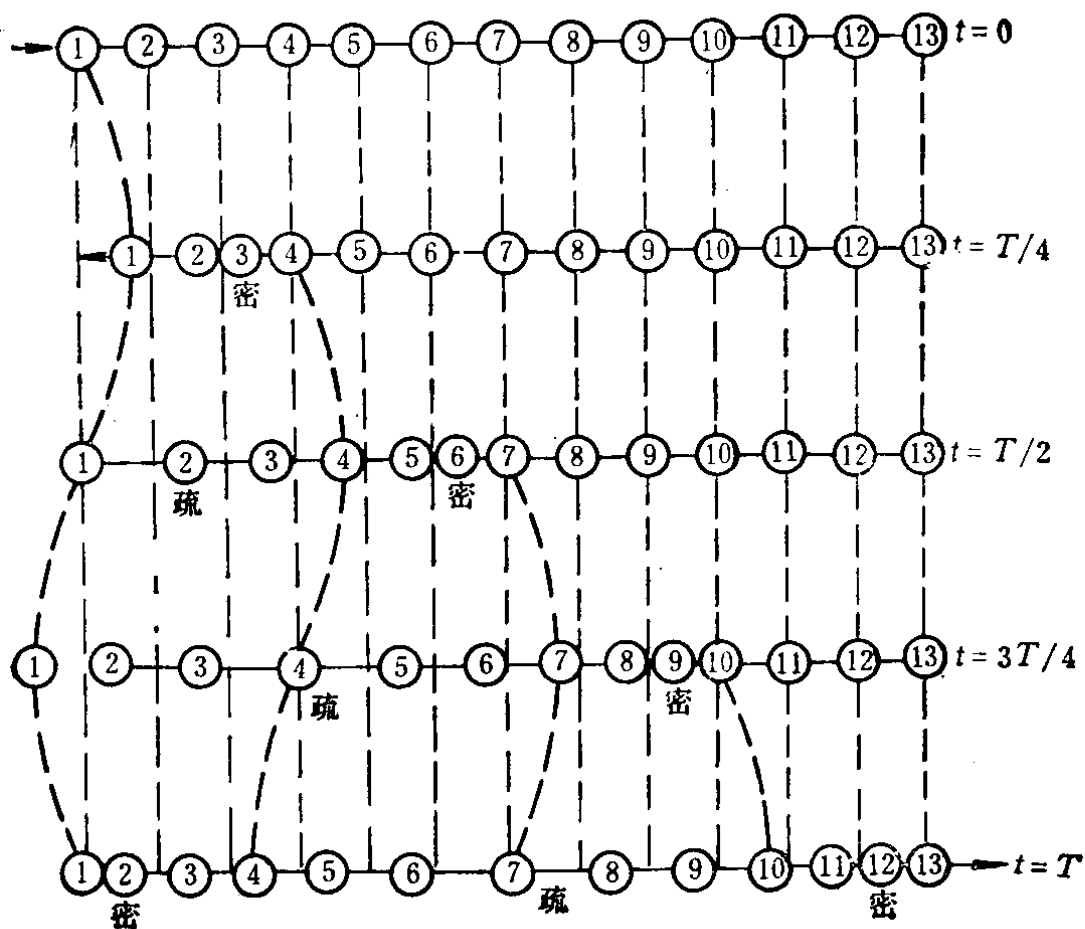


图1. 7 纵波传播示意图

的作用正要向左运动；而质点④受到弹性力的作用才开始向右移动。再经过一段时间到 $t = \frac{T}{2}$ 时，质点①已回到平衡时的位置，但因惯性继续向左运动，而质点⑦受到弹性力的作用才开始向右移动。当 $t = \frac{3T}{4}$ 时，质点①达到向左的最大位移，弹性力使质点⑩将开始向右运动。当 $t = T$ 时，质点①回到平衡位置，完成一个周期的振动，弹性力使⑬将要开始向右运动。由此可见，这种波的传播方向是与质点的运动方向相一致的，这样的波称为纵波。又因这种波在传播时会产生质点的稠密部分和稀疏部分故又称疏密波。

2. 横波

图1.8为横波传播示意图。各质点的运动情况与纵波情况相似。但由于质点的振动方向对波的传播方向来说是横方向的，这种波称为横波。

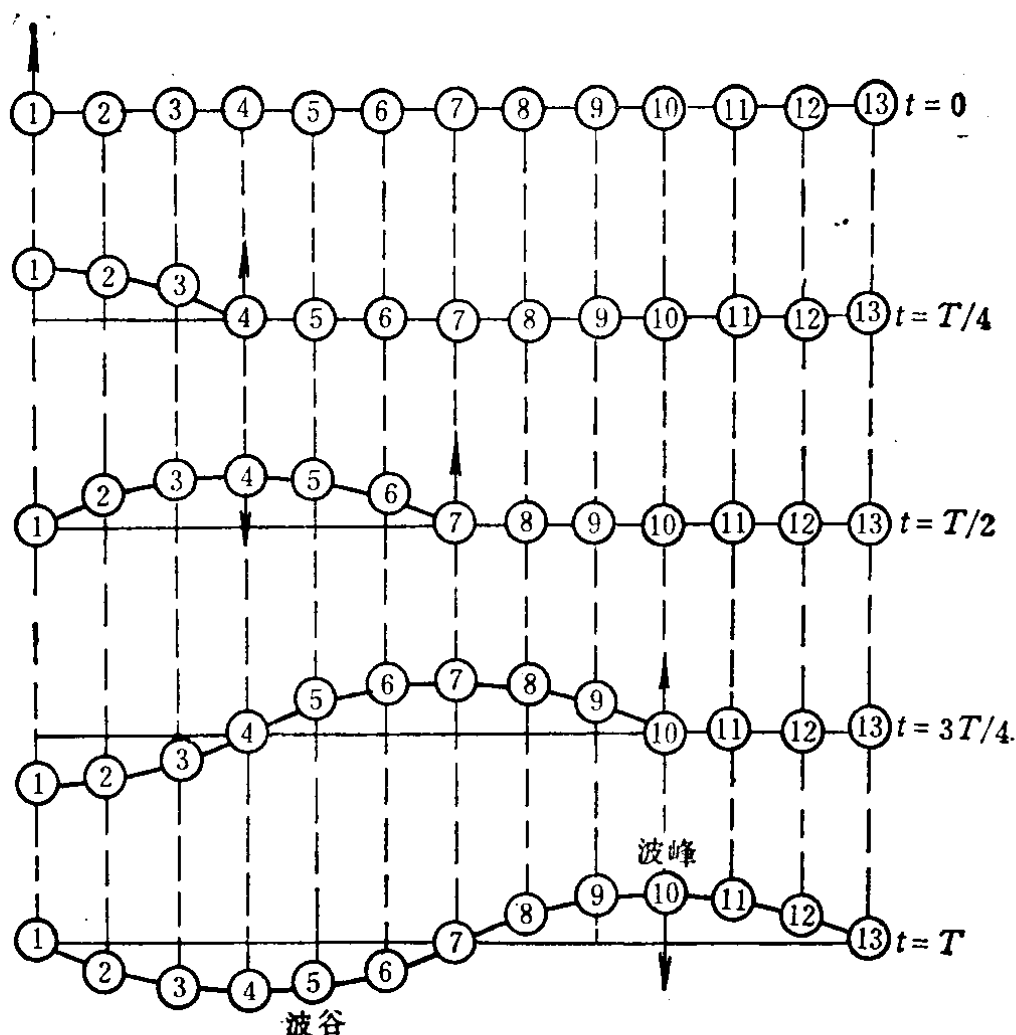


图1.8 横波传播示意图

因为液体和气体中缺乏横向运动的弹性力，所以横波不能存在，只有纵波才能存在。但在固体中纵波和横波都能存在。超声探伤是以固体为对象的，必须记住在固体中这两种波常常可能同时存在。

3. 瑞利波

在半无限大固体介质与气体介质的交界面上，可产生瑞利波。图1.9为瑞利波传播示意图。图中示出了瞬时的质点位移状态，在左侧的椭圆表示质点振动的轨迹；由图可知，它在固体表面（ xz 平面）沿 x 方向传播。质点只在 xy 平面内作椭圆振动，椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于传播方向。

4. 板波

如果固体物质的尺寸进一步受到限制而成为板状，则当板厚小到某一程度时，瑞利波就不会存在而会产生各种类型的板波。

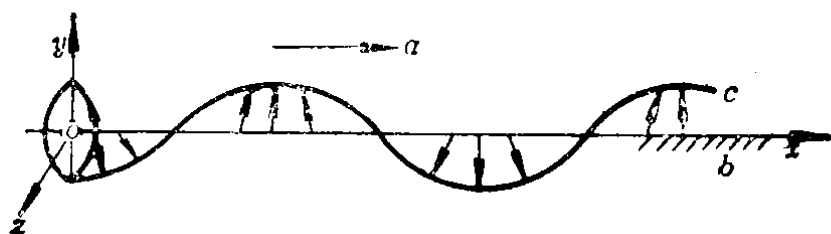


图1.9 瑞利波传播示意图

a —波传播方向 b —固体介质 c —空气

板波中最主要的一种是蓝姆波,狭义地讲,通常所说的板波即指蓝姆波。有关蓝姆波的分类及特点将在第六章中叙述。

三、波长和声速

两个振动位相相同点之间的最小距隔称为波长,常用希腊字母 λ 表示,如图1.10。

一定频率的简谐波(余弦或正弦波),在介质中传播时,单位时间内波所传过的距离称为这种频率的波在该介质中的传播速度,简称声速,常用英文字母 C 表示。

波长 λ , 声速 C , 频率 f 和周期 T 之间的关系为:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

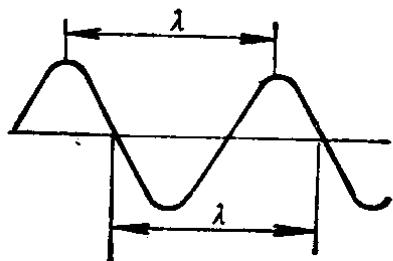


图1.10 简谐波的波长示意图

不同材料的声速有很大的差异。表1.1列出了几种材料的纵波速度(C_L),横波速度(C_S),及5MHz时的相应波长,瑞利波的速度大体是横波速度的0.9倍。

四、声压、声强、声阻抗,声压、声强的分贝表示

1. 声压

在有声波传播的介质中,某一点在某一瞬间所具有的压强与没有声波存在时该点的静压强之差称为声压。声压的单位是帕斯卡(Pa)。

声压是个交变量,可写成 $p(x) = p \cos(\omega t + \varphi)$,在实用上,比较二个超声波并不需要对每个时间 t ,每个位置 x 进行比较,只须用