

# 前 言

民用航空使用的航空器，是用当今世界最新技术制造的。随着我国改革开放和经济的繁荣，民用航空事业飞速发展，航空企业引进了大批新飞机，而原有的飞机逐步老龄化，这些变化促进了航空维修业迅速发展。航空维修/检查是航空器设计的延伸，在保持航空器固有安全性和可靠性水平等方面发挥着关键作用，是航空公司使用航空器不可缺少的行业，无损检测（NDT）是航空器维修、改装和保持持续适航的重要手段。

无损检测具有显著的行业特征，不同的行业根据其检测对象的不同而采用了不同的检测方法和技术。航空器无损检测侧重于在役航空器的原位检测，主要针对民用航空器使用过程中因疲劳、腐蚀、过载和意外损伤等原因造成的缺陷进行检测。为了有针对性地培训航空器无损检测人员，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会先后选用过中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、中国航空维修 NDT II 级教材和国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。这些教材是由国内各行业无损检测知名专家学者编著，内容详尽，论述准确，具有很高的理论水平和很强的实用性，为民航无损检测人员培训提供了很好的指导。但是上述教材侧重于各自行业特点，很少涉及在役航空器，与民用航空器无损检测实际联系不紧密。

为了进一步提高民航无损检测人员培训质量，民航局飞行标准司要求民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会根据航空器维修无损检测的特点，编写一套具有本行业特色的无损检测人员技术资格培训教材。按照飞行标准司的要求，民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会组织了民航系统的专家和技术人员，在总结多年从事无损检测人员培训和实际检测工作经验的基础上，参考国内其他行业培训教材和主要机型的 NDT 手册等资料，完成了本套教材的编写。

本套教材作为民航无损检测 2、3 级人员培训和自学使用，其内容分为基本部分和扩展部分，扩展部分注有“\*”号，不作为 2 级人员资格鉴定考试要求。教材内容翔实，篇幅较多，教员可根据培训学时和培训大纲的要求有所取舍。

本套教材参考了中国机械工程学会无损检测学会培训教材、航空航天无损检测人员资格鉴定培训教材、国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材，在此表示感谢！

本套教材包括《航空器无损检测综合知识》、《航空器磁粉检测》、《航空器渗透检测》、《航空器涡流检测》、《航空器超声检测》和《航空器射线检测》。

其他检测方法的教材将根据需要陆续增加。

本教材在基础理论方面与先前采用过的教材保持了一致性，在专业知识和实际应用方面加入了大量航空器维修无损检测的相关知识和实例，重点讲述在役民用航空器原位无损检测基本要求、规范和程序。体现民用航空器维修的特色，将民用航空器无损检测中的典型事例升华为教材，指导检测实践，是本套教材的创新。本教材经过 2007—2008 年几期培训班试用，后又进行了补充修改，现才正式出版。

参与本套教材策划、编写、审核的人员有徐超群、陈伦、许万忠、王学民、潘建华、聂有传、张晓、李光浩、侯树聪、常士基、李淑贤、刘兆江、付杭君、胡小虎、杨剑英、郑勇、苏金波、胡良进、刘仲文、张循等。

《航空器超声检测》一书共分 10 章，其中第 1 章、第 7~9 章由潘建华编写，第 2 章、第 4 章、第 6 章由杨剑英编写，第 3 章、第 5 章、第 10 章由刘兆江编写，全书由潘建华统稿、审校和修改，由丁克美主审。

由于编写、审核人员的水平有限和时间仓促，教材中难免存在缺陷和错误，欢迎指正。

民航无损检测人员资格鉴定与认证委员会

2009 年 3 月

## 目 录

## 前言

第 1 章 超声检测的物理基础	1
1.1 机械振动与机械波	1
1.1.1 机械振动	1
1.1.2 机械波	2
1.2 超声波	4
1.2.1 超声波的波型	4
1.2.2 超声波的波形*	7
1.2.3 连续波与脉冲波*	8
1.2.4 超声波的传播速度	9
1.2.5 超声场的特征量	12
1.2.6 幅度的分贝表示	14
1.3 超声波的界面上的行为	15
1.3.1 垂直入射到平界面上的反射和透射	15
1.3.2 垂直入射到薄层平界面上的反射和透射*	19
1.3.3 倾斜入射到平界面上的反射、折射和波型转换	20
1.3.4 端角反射	26
1.3.5 入射到曲界面上的反射和透射	27
1.3.6 超声波的波动性*	29
1.3.7 超声波的传播衰减	31
1.4 声场	33
1.4.1 圆盘声源的声场	33
1.4.2 聚焦声源的声场	38
1.4.3 斜探头发射的横波声场*	40

1.5 规则反射体回波声压	41
1.5.1 大平面反射体	41
1.5.2 圆形平面和方形平面的反射	42
1.5.3 圆柱形反射体	42
1.5.4 球形反射体	43
<b>第2章 超声检测设备</b>	<b>44</b>
2.1 超声检测仪	44
2.1.1 超声检测仪的分类	44
2.1.2 A型显示超声检测仪	45
2.1.3 B型超声检测仪	50
2.1.4 C型超声检测仪	50
2.1.5 数字超声检测仪	50
2.1.6 数字测厚仪	52
2.2 超声波探头	52
2.2.1 压电效应	52
2.2.2 压电材料	53
2.2.3 压电晶片的主要参数*	53
2.2.4 探头基本结构和作用	55
2.2.5 探头的类型	56
2.2.6 延迟块	59
2.2.7 连接电缆	59
2.3 试块	59
2.3.1 试块的作用	60
2.3.2 试块的分类	61
2.4 耦合剂	64
2.4.1 耦合剂的作用	64
2.4.2 常用的耦合剂	64
2.5 超声检测仪和探头的性能	65
2.5.1 超声检测仪的性能	65
2.5.2 探头的性能	66
2.5.3 超声检测仪和探头的组合性能	67
<b>第3章 超声检测技术</b>	<b>69</b>
3.1 检测技术分类与特点	69

3.1.1	脉冲反射法和透射法	70
3.1.2	直射声束法与斜射声束法	72
3.1.3	单探头法与双探头法	74
3.1.4	接触法和液浸法	75
3.2	基本参数的选择原则	76
3.2.1	对检测对象的了解	77
3.2.2	入射方向和入射面的选择	77
3.2.3	检测频率的选择	77
3.2.4	仪器的选择	78
3.2.5	探头的选择	78
3.2.6	参考试块的选择	79
3.2.7	耦合剂的选择	80
3.2.8	扫查的要求	80
3.3	直射纵波检测技术	80
3.3.1	直射纵波反射法的种类	80
3.3.2	时基线的调整	82
3.3.3	检测灵敏度的调整	83
3.3.4	扫查方法	87
3.3.5	缺陷位置的确定	88
3.3.6	缺陷尺寸的评定	88
3.3.7	侧壁对检测灵敏度及缺陷定位的影响*	92
3.3.8	其他非缺陷回波的判定	94
3.4	斜射横波检测技术	96
3.4.1	检测的准备	96
3.4.2	时基线的调整	98
3.4.3	检测灵敏度的调整	100
3.4.4	扫查方法	100
3.4.5	缺陷位置的确定	101
3.4.6	缺陷尺寸的评定	102
3.4.7	缺陷定位时应该考虑的因素*	102
3.4.8	侧壁界面对检测灵敏度的影响	102
3.5	水浸法检测技术*	103
3.5.1	水浸检测系统	103
3.5.2	直射声束和聚焦声束的应用	104
3.6	表面波检测技术	107

3.6.1	表面波的产生 .....	108
3.6.2	时基线及检测灵敏度的调整 .....	108
3.6.3	缺陷的检测 .....	109
3.7	兰姆波检测技术 .....	109
3.8	影响缺陷回波高度的因素 .....	109
3.8.1	缺陷形状的影响 .....	110
3.8.2	缺陷取向的影响 .....	110
3.8.3	缺陷性质的影响 .....	111
3.8.4	缺陷表面粗糙度 .....	111
3.8.5	缺陷回波指向性的影响 .....	111
3.9	声速与厚度测量 .....	111
3.9.1	声速的测量 .....	111
3.9.2	厚度的测量 .....	114
3.10	其他检测技术 .....	115
3.10.1	空气耦合技术 .....	115
3.10.2	爬波检测技术* .....	116
3.10.3	衍射声时 (TOFD) 技术* .....	117
3.10.4	相控阵扫描检测技术 .....	118
<b>第4章</b>	<b>声振检测技术 .....</b>	<b>121</b>
4.1	敲击 (TAP) 法 .....	121
4.1.1	检测原理 .....	121
4.1.2	检测设备 .....	122
4.1.3	检测方法及其适用范围 .....	123
4.2	机械阻抗 (MIA) 法 .....	124
4.2.1	检测原理 .....	124
4.2.2	检测设备 .....	125
4.2.3	检测方法及其适用范围 .....	129
4.2.4	涡—声法 .....	129
4.3	谐振法 .....	131
4.3.1	检测原理 .....	131
4.3.2	检测设备 .....	131
4.3.3	检测方法及其适用范围 .....	133

第5章 金属材料制品的检测	136
5.1 铸件检测	136
5.1.1 制造方法及常见缺陷	136
5.1.2 检测特点	136
5.1.3 常用检测技术	136
5.1.4 参考标准及评价	137
5.2 锻件检测	138
5.2.1 制造方法及常见缺陷	138
5.2.2 检测特点	138
5.2.3 常用检测技术	139
5.2.4 常见类型锻件的检测	139
5.2.5 参考标准及评价	140
5.3 板材检测	141
5.3.1 制造方法及常见缺陷	141
5.3.2 厚板常用检测技术	141
5.3.3 薄板常用检测技术*	142
5.3.4 参考标准及评价	146
5.4 管材检测	146
5.4.1 制造方法及常见缺陷	146
5.4.2 常用检测技术	146
5.4.3 参考标准及评价	150
5.5 棒材检测	150
5.5.1 制造方法及常见缺陷	150
5.5.2 常用检测技术	150
5.5.3 参考标准及评价	152
5.6 焊接接头的检测	152
5.6.1 焊接工艺及常见缺陷	152
5.6.2 板对接焊缝检测	153
5.6.3 T形焊缝检测	158
5.6.4 参考标准及评价	159
5.6.5 干扰信号和固定回波的判别	160
5.7 金属材料及其热工艺对声传播的影响	161
5.7.1 变形金属材料的声传播特性	161
5.7.2 热加工工艺对声传播特性的影响	162

<b>第 6 章 飞机维修检测</b> .....	165
6.1 超声检测特点 .....	165
6.2 紧固件的检测 .....	166
6.2.1 紧固件（原位状态）的检测 .....	166
6.2.2 紧固件（拆下状态）的检测 .....	167
6.3 结构件裂纹检测 .....	167
6.3.1 紧固件孔周围裂纹检测 .....	167
6.3.2 接头凸耳内壁裂纹检测 .....	173
6.3.3 枢轴销裂纹检测 .....	176
6.4 利用回波相位判断材料性质 .....	177
6.5 厚度测量 .....	177
6.6 参考标准及评价 .....	180
6.7 应用实例 .....	180
6.7.1 检测 B737 型飞机 PCU 液力总管内壁铬层 .....	180
6.7.2 B737 型飞机 178 站位隔框腹板裂纹检测 .....	182
6.7.3 B737 型飞机襟翼滑架芯轴检测 .....	184
6.7.4 相控阵检测蒙皮搭接处裂纹 .....	186
<b>第 7 章 发动机维修检测</b> .....	189
7.1 方法和技术 .....	189
7.1.1 纵波 .....	190
7.1.2 横波 .....	190
7.1.3 表面波 .....	190
7.1.4 C 扫描 .....	190
7.2 参考标准及评价 .....	190
7.3 应用实例 .....	190
7.3.1 CF6-50 发动机涡轮中介机匣后安装边圆周焊缝裂纹检查 .....	190
7.3.2 PWJT9D 发动机风扇叶片前后缘焊修区裂纹检查 .....	192
7.3.3 RB211 发动机风扇叶片超声波检查 .....	193
7.3.4 V2500 发动机 HPC 第 4 级叶片根部裂纹检查 .....	197
<b>第 8 章 复合材料与胶接结构的检测</b> .....	200
8.1 复合材料与胶接结构 .....	200



8.1.1 复合材料种类及特点 .....	200
8.1.2 胶接结构及特点 .....	201
8.1.3 使用中常见缺陷 .....	202
8.2 超声检测特点 .....	203
8.3 蜂窝结构的检测 .....	205
8.3.1 透射法 .....	205
8.3.2 脉冲回波法 .....	208
8.4 层板结构的检测 .....	209
8.4.1 脉冲回波法 .....	209
8.4.2 透射法 .....	213
8.5 超声检测应用实例 .....	215
8.5.1 B767 型飞机升降舵面板检测 .....	215
8.5.2 空气耦合技术检测 B777 型飞机主起落架舱门雷达板 .....	216
8.6 声振检测应用实例 .....	218
8.6.1 一般蜂窝胶接结构的检测 .....	218
8.6.2 B737 型飞机发动机消音板内整流罩胶接检测 .....	219
8.6.3 谐振法(高频)检测 B777 型飞机主起落架舱门隔热层和雷达板 .....	222
<b>第9章 超声检测标准、规范和程序 .....</b>	<b>224</b>
9.1 超声检测标准 .....	224
9.1.1 标准分类 .....	224
9.1.2 相关标准简介* .....	225
9.1.3 超声检测方法标准内容 .....	227
9.2 超声检测规范 .....	228
9.2.1 波音规范 .....	228
9.2.2 其他规范 .....	229
9.3 超声检测程序 .....	229
9.3.1 飞机结构检测程序 .....	229
9.3.2 发动机零件检测程序 .....	230
9.3.3 附件检测程序 .....	230
9.4 超声检测程序的编制* .....	230
9.4.1 程序编制要求 .....	230
9.4.2 程序编制实例 .....	231

<b>第 10 章 实验</b> .....	239
<b>第一部分 仪器系统性能的测定</b> .....	239
实验 1 水平线性的测定 .....	239
实验 2 垂直线性的测定 .....	240
实验 3 分贝调节器准确度的测定 .....	241
实验 4 动态范围的测定 .....	242
实验 5 纵波直射单探头近场长度的测定 .....	242
实验 6 分辨力的测定 .....	243
实验 7 灵敏度和信噪比的测定 .....	245
实验 8 探头性能测试 .....	246
<b>第二部分 纵波检测</b> .....	248
实验 9 时间基线的校准及缺陷深度的测定 .....	248
实验 10 检测灵敏度的调整 .....	249
实验 11 传输损失值的测定 .....	250
<b>第三部分 横波检测</b> .....	251
实验 12 斜探头入射点和折射角的测定 .....	251
实验 13 零点校正与时间基线按声程的校准 .....	252
<b>第四部分 其他实验</b> .....	253
实验 14 机械阻抗法测试 .....	253
<b>第五部分 实验用部分试块示意图</b> .....	257

# 第1章 超声检测的物理基础

## 1.1 机械振动与机械波

### 1.1.1 机械振动

物体在一定位置附近作来回的重复运动，称为振动。

在我们的日常生活中，物体振动的现象是到处可见的。例如，钟摆的摆动、汽缸中活塞的运动等等，都是物体振动的表现。另外，一切发声体的运动、超声波探头的晶片在高频电压激励下的运动等等，则是我们不能直接看到的振动现象。

上述的振动都是物体或质点在平衡位置附近作往复的运动，称为机械振动。在物理学中，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，且可用力学量（如位移、角位移等）来描述，则所作的振动称为机械振动。图 1.1 是往下拉安装在弹簧一端的小质点之后，由于松开而在其平衡位置作上下运动的机械振动的例子，这个例子描述了机械振动的过程。

周期和频率是描述振动的重要的物理量。振动质点完成一次围绕平衡位置往复运动的过程所需要的时间称为周期，以  $T$  表示（见图 1.1），单位为 s（秒）或  $\mu\text{s}$ （微秒）。单位时间内的振动次数则称为频率，以  $f$  表示，常用单位为 Hz（赫兹）。显然，周期与频率存在如下的关系：

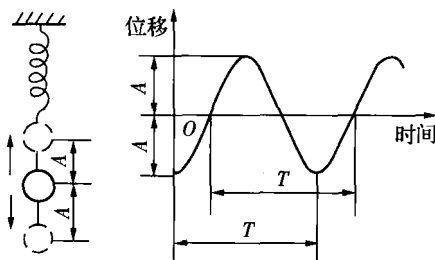


图 1.1 质点——弹簧的机械振动

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-1)$$

### 1. 谐振动

描述一个振动仅以周期和频率两个概念是不够的，通常，还需要给出位移随时间的变化规律。如图 1.1 所示，当忽略空气阻力时，质点和弹簧系统自由振动的位移随时间的变化满足余弦规律，其数学表达式为：

$$y = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (1-2)$$

式中  $y$  —— 任意时刻的位移；

$A$  —— 振幅， $y$  的最大值；

$t$  —— 时间；

$\varphi$  —— 相位角，其中  $\omega$  为角频率， $\varphi$  为初始相位角 ( $t=0$  时的相位)。

质点位移随时间的变化符合余弦规律的振动形式称为谐振动。谐振动的振幅和频率始终保持不变，因而是最简单最基本的一种振动。在上述质点和弹簧系统中，谐振动的频率为振动系统的固有频率，是由质点的质量和弹簧的弹性系数决定的。任何复杂的振动都可以视为多个谐振动的合成。

### 2. 阻尼振动、受迫振动、共振

谐振动是一种理想状态下的振动。实际存在的振动形式，更多的是阻尼振动与受迫振动。

阻尼振动是一种振幅随时间不断减少的振动形式，位移与时间的关系如图 1.2 所示。如超声探头中，为了使晶片振动尽快停止，减小超声脉冲的宽度，通常在晶片后面粘贴阻尼块以增大振动阻尼。

受迫振动是在周期性外力作用下物体所产生的振动。与物体的自由振动不同，受迫振动的频率取决于外力作用的频率。

共振是当受迫振动的频率与物体的固有频率相等时，振幅达到最大值的振动现象。

超声探头的压电晶片在发射与接收超声波时，既经历了受迫振动又经历了阻尼振动。在发射超声波时，首先在高频电脉冲作用下产生受迫振动，同时，又在阻尼块的影响下作阻尼振动。而在接收超声波时也是这样，即在回波作用下产生受迫振动，同时也产生阻尼振动。高频电脉冲和回波的频率与晶片固有频率越接近，则电—声和声—电转换效率就越高。由此，可以看出，超声检测仪的发射脉冲频谱、探头晶片的固有频率和探头的阻尼特性，均会对发射超声波的能量、频谱特性以及接收的回波特性产生影响。

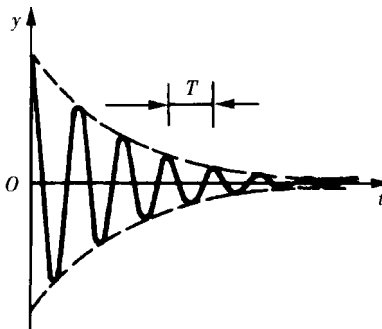


图 1.2 阻尼振动

#### 1.1.2 机械波

机械波是机械振动在弹性介质中的传播，如水波、声波、超声波等。产生机械波的

首要条件是要有一个产生机械振动的波源，也就是说，要提供一个力使质点在其平衡位置附近作往复运动；第二个条件是，要有能传播振动的介质。

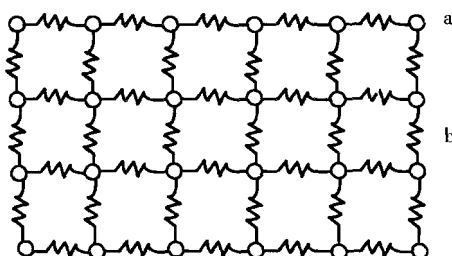


图 1.3 弹性体的模型

a. 质点 b. 表示弹性的弹簧

所谓的弹性介质可以用图 1.3 所示的简化模型来表示，将其看作由以弹性力保持的各质点所构成的点阵。当弹性介质中的质点在外力作用下离开其平衡位置时，由于组成物体的各质点间弹性力的作用，质点又受到向平衡位置回复的力，这种力使质点围绕其平衡位置作振动。同时，该质点向其周围相邻质点施加相反的力，使其离开平衡位置作相同的运动。以这样的方式，振动由振源不断向远处传播，形成机械波。

液体和气体不能以上述弹性力的模型来描述。液体和气体介质中的弹性波是由液体和气体受到压力时的体积的收缩和膨胀产生的。

在波的传播过程中，介质中的质点并不随波前进，它们在相邻质点所施加的力的作用下，按照与振源相同的振动频率在原来的位置上振动，并将能量传递给周围的质点。因此，机械波的传播不是物质的传播而是能量的传播。

描述机械波的主要特征量有周期、频率、波长和波速。

机械波的周期和频率即是波动经过的介质质点产生机械振动的周期和频率。机械波在传播过程中，其周期和频率始终是不变的。

波长是指两个振动位相相同质点之间的最小距离，实际上也是机械波经历一个完整周期所传播的距离。波的传播方向上相隔波长的整数倍的质点振动相位总是相同的。波长常用希腊字母  $\lambda$  表示，如图 1.4 所示。

波速为单位时间内波所传播的距离，常用字母  $C$  表示，单位为  $m/s$ （米/秒）。对于无限大介质中传播的波来说，特定波型的波速  $C$  是材料的固有参数，仅由材料的性质决定。

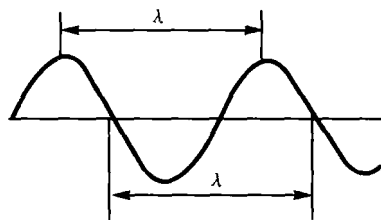


图 1.4 波长示意图

波长  $\lambda$  与波速  $C$ 、频率  $f$ 、周期  $T$  之间的关系为：

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT \quad (1-3)$$

其中频率和周期主要是由波源决定的，在给定材料中，波的频率越高，波长越短。

## 1.2 超声波

如果以频率来表征声波，并以人的可感觉频率为分界线，能引起听觉的声波频率范围为 20Hz ~ 20kHz 称为可闻声波，低于 20Hz 频率的声波称为次声波，高于 20kHz 频率的声波称为超声波。

在通常的超声检测系统中，用电脉冲激励探头的压电晶片使其产生机械振动，这种振动在与其接触的介质中传播形成超声波。

### 1.2.1 超声波的波型

超声波的波型是以波动中介质质点振动方向与波传播方向之间的关系来确定的。在超声检测中主要应用的波型有纵波、横波、表面波（瑞利波）和板波（兰姆波）。

#### 1. 纵波

纵波是质点振动方向平行于波的传播方向的一种波型。如图 1.5 所示。图中  $t=0$  时，各质点处于平衡位置。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，但在时间上要滞后一些。经过一段时间后  $t=T/4$  时，质点①已达到向右的最大位移，而质点④受到弹性力的作用将开始向右移动。时间  $t=T/2$ ，质点①向左运动回到平衡时位置，并因惯性作用继续向左移动，而质点⑦受到弹性力的作用将开始向右移动。经过时间  $t=3T/4$  和  $t=T$  时，质点①向左达到最大位移后向右运动又回到平衡位置，完成一个周期的振动。由此可见，当弹性介质受到交替变化的拉应力或压应力时，沿声传播方向的质点产生交替变化的密集区和疏松区（也称为伸缩形变或体积变化），这种变化又会产生弹性恢复力，从而产生振动并在介质中传播。根据质点的振动模式，纵波又称为压缩波或疏密波。

纵波是超声检测中应用最普遍的一种波型，也是唯一在液体、气体和固体中均可传播的波型。由于纵波的发射与接收较容易实现，在应用其他波型时，常采用纵波声源经波型转换后得到所需的波型。

#### 2. 横波

横波是质点振动方向垂直于波的传播方向的一种波型，如图 1.6 所示，是介质受到交变的剪切力作用时发生剪切形变而产生的，有时也称为切变波。由于气体和液体中不能传播剪切力，因此，横波只能在固体中传播，不能在气体和液体中传播。

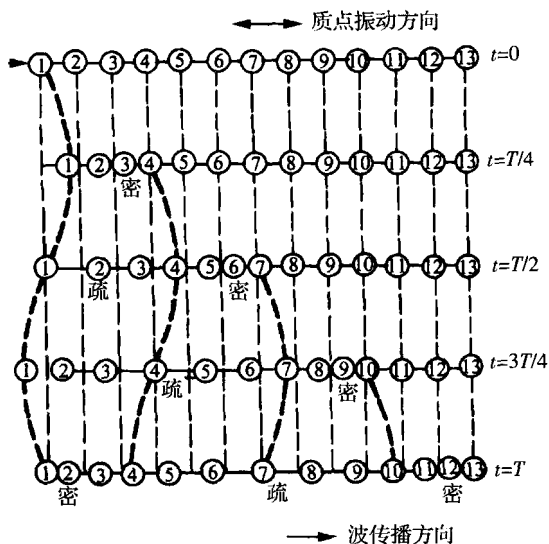


图 1.5 纵波传播示意图

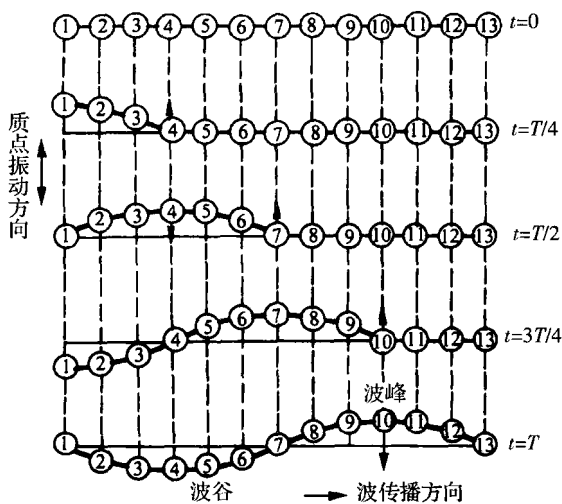


图 1.6 横波传播示意图

横波声速通常约为纵波声速的一半，因此，相同频率时横波波长约为纵波波长的二分之一。实际检测中常应用横波的主要原因是，通过波型转换，很容易在材料中得到一个传播方向与表面有一定倾角的单一波型，以对不平行于表面的缺陷进行检测。

\* 横波又分为垂直偏振横波 (SV) 波和水平偏振横波 (SH)，它们是以超声波入射界面为基准来区分的。当超声波入射到物体内部并以横波波型传播时，质点的振动方向

有垂直于入射界面的振动分量时，称为垂直偏振横波，如果没有垂直于入射界面的振动分量时，则称为水平偏振横波。常用的横波多为 SV 波。但据国外资料报道，在检测奥氏体钢焊缝中发现，SV 波在焊缝区会产生严重的扭曲现象，而 SH 波几乎没有扭曲现象。在本教材中不作说明时，所述的横波均是指 SV 波。

纵波和横波是应用最为广泛的波型。但必须记住，无论你使用的是纵波检测或是横波检测，在固体中这两种波常常可能同时存在。

### 3. 表面波

表面波是仅在半无限大固体介质的表面及其附近传播而不深入到固体内部传播的波型的总称。瑞利波是表面波的一种，是在固体介质与气体或液体介质的交界面上产生，并沿界面传播的一种波型。瑞利波传播时，质点沿椭圆轨迹振动，如图 1.7 所示，是纵向振动（平行于传播方向）和横向振动（垂直于传播方向）的合成。椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于波的传播方向。与横波一样，瑞利波也不能在液体和气体中传播。瑞利波的有效透入深度约为一个波长。

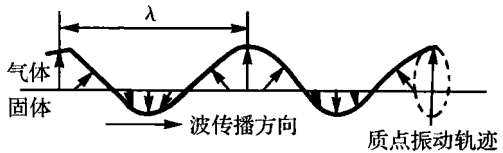


图 1.7 表面波示意图

超声检测中应用的表面波主要为瑞利波，因此，本教材所称的表面波是瑞利波。

\* 表面波传播时随着穿透深度  $Z$  增加，质点振动能量下降很快。通常认为，在距介质表面  $1/4\lambda$  处能量最大，1 个波长时能量下降为原来能量的  $1/5$ ，而距介质表面  $2\lambda$  时，为原来能量的  $1/100$ （-40dB）。从而可以看出，当深度在一个波长以上时，振幅已经很小了，如图 1.8 所示。

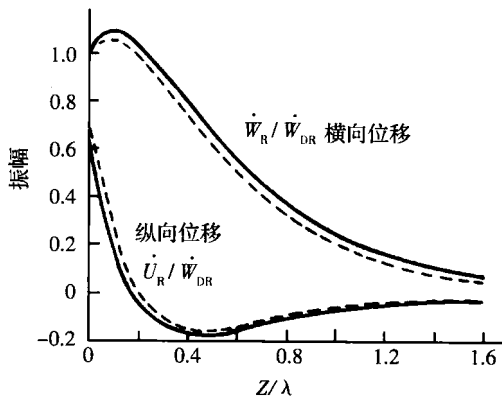


图 1.8 泊松比  $\sigma=0.45$  铝中表面波的能量分布（归一化图）

### 4. 板波（兰姆波）

板波是 1916 年由兰姆（Lamb）首先从理论上发现的。它是在板厚与波长相当的弹



性薄板中传播的一种波，也称兰姆波。与表面波不同，板波传播时整个板厚内的质点均产生振动，振动方式为纵向振动与横向振动的合成，在不同深度层面上质点振动幅度和方向是变化的。兰姆波有两种基本形式。质点相对于板的中间层作对称型运动称对称型（S 型），质点相对于板的中间层作非对称型运动称非对称型（A 型），如图 1.9 所示。

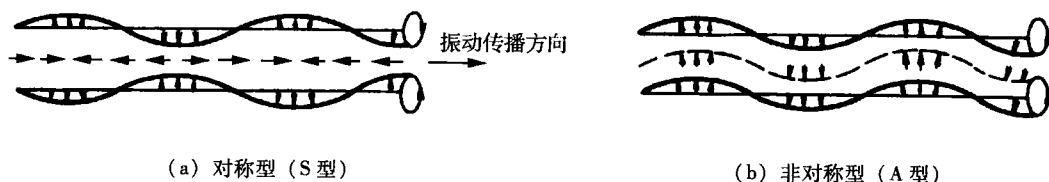


图 1.9 兰姆波示意图

### 1.2.2 超声波的波形\*

超声波由声源向四周传播扩散的过程可用波阵面进行描述。将同一时刻介质中振动相位相同的所有质点所连成的面称为波阵面。某一时刻振动传播到达的距声源最远的各点所连成的面称为波前，传播方向用波线表示。如图 1.10 所示。可见，在各向同性介质中波线垂直于波阵面。波阵面的形状即是波形。根据波形，可将波分为平面波、球面波和活塞波等。

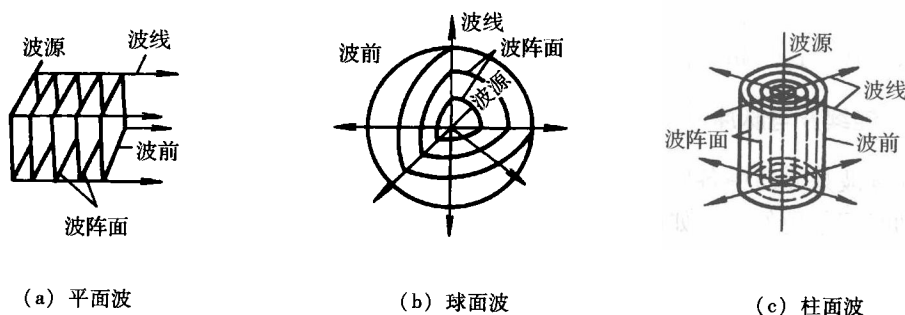


图 1.10 波线、波前与波阵面

平面波即是波阵面为平面的波。理想的平面波是不存在的，但如果声源平面的二维尺寸远大于声波波长，该声源发出的波可近似地看作平面波。

平面波的波动方程：

$$y = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) = A \cos (\omega t - Kx) \quad (1-4)$$