

NSHU CAILIAO, JIANC



职业教育金属材料检测类规划教材

# 超声检测

郭伟 主编

CHUANSHENG JIANCE



赠电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

策划编辑：齐志刚  
封面设计：王伟光



## 职业教育金属材料检测类规划教材

| 书名             | 主编  |
|----------------|-----|
| 金属力学性能         | 王学武 |
| 金属材料化学分析       | 司卫华 |
| 金相检验           | 张 博 |
| 射线检测           | 王乐生 |
| 超声检测           | 郭 伟 |
| 表面检测——磁粉、渗透与涡流 | 李丽茹 |
| 无损检测实训         | 邓洪军 |

投稿邮箱：WSG3333@163.com

编辑热线：010-88379201

地址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037  
联系电话：(010)68326294 网址：http://www.cmpedu.com(机工教材网)  
(010)68993821 E-mail: cmp@cmpedu.com  
购书热线：(010)88379639 网址：http://www.cmpbook.com(机工门户网)  
(010)88379641 E-mail: cmp@cmpbook.com  
(010)88379643

ISBN 978-7-111-27988-4

定价：23.00元

ISBN 978-7-111-27988-4



9 787111 279884 >

职业教育金属材料检测类规划教材

# 超 声 检 测

主 编 郭 伟

参 编 李红莉 唐迎春

主 审 生利英



机 械 工 业 出 版 社



本书共分为六个单元,内容包括超声波检测的物理基础、超声波检测设备和器材、超声波检测的工艺、超声波检测的应用、超声波检测工艺文件的编制与管理 and 超声检测实验。在每个单元中,根据内容的相对独立性和知识连贯性,又分为若干模块。在每个单元后面都附有可供选用的复习题,全书最后备有一个超声波检测标准附录,可供读者查阅。

本书内容的选取体现了“实用、够用”思想,以劳动部超声波检测三级人员的考核知识点为参考,尽量避免了冗杂的文字描述和繁琐的公式推导,而辅之以大量的插图来反映其中的规律,便于读者理解。为便于教学,本书另配备了电子教案,选择本书作为教材的教师可来电索取(010-88379201),或登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 网站注册免费下载。

本书可作为高职、高专、各类成人教育金属材料检测类专业教材或培训用书,也可供有关技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

超声检测/郭伟主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

职业教育金属材料检测类规划教材

ISBN 978-7-111-27988-4

I. 超… II. 郭… III. 超声检测 - 职业教育 - 教材 IV. TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 139105 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:齐志刚 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:王伟光 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 320 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-27988-4

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379182

封面无防伪标均为盗版



# 前言

为了进一步贯彻“国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定”的文件精神，加强职业教育教材建设，满足现阶段职业院校金属材料检测类专业教学对教材建设的需求，根据现阶段职业院校该专业没有一套较为合适的教材，大部分院校采用自编或行业的考证培训教材组织教学，非常不适合职业教育的实际情况，机械工业出版社于2008年8月在北京召开了“职业教育金属材料检测类专业教材建设研讨会”。在会上，来自全国该专业的骨干教师和企业专家经过多次研究讨论，确定了系列教材的编写计划，本书是根据会议所确定的教学大纲要求和高职教育培养目标组织编写的。

本书结合了现阶段高职院校学生特点，按照金属材料检测类专业培养目标和各用人单位的要求以及学员考证的需要编写的。本书以“实用、够用”为指导思想讲解相关理论，基于“工作过程”的基本原则安排内容的顺序，并适当增加一些重要知识点应用的实例、小知识等，同时在广度和深度两方面进行了适当的拓展。如讲到基础知识部分，增加了波的应用；在讲到声束扩散时，又深入讨论了它对实际检测的影响；在讲到超声检测仪器时，把数字式超声检测仪也进行较为详细的描述等。在内容上紧密结合最新的常用国内超声检测标准，并适当与国外同类型标准进行了简单评述和比较。通过这些努力，使初学者全面熟悉从工艺制订到最终检测结果评价的超声检测过程，由浅入深地掌握超声检测的基本理论，并能熟练地应用理论来指导实践，分析解决检测中的实际问题。

在本书的编写过程中，力求做到言简意赅，图文并茂，免去了大量的公式推导，将典型实例与理论知识相结合，便于各院校教学和学生自学。为了满足教学需要，在编写中借鉴了相关参考书籍的精彩部分，如有内容相似之处，绝非本意所为，在此谨向有关作者表示最诚挚的感谢，我们也真诚希望从事高等职业教育的老师、各行业专家与我们联系，共同探讨超声检测的相关问题，以便修订时改进和完善。

本书由四川工程职业技术学院郭伟主编。其中第一、三、六单元由郭伟编写，第二单元由李红莉编写，第四、五单元由唐迎春编写。全书由内蒙古包头职业技术学院生利英主审。

由于编者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请读者对书中不当之处给予批评指正。

编者



# 目 录

## 前言

## 第一单元 超声检测的物理基础 ..... 1

### 模块一 机械振动与机械波 ..... 1

#### 一、机械振动 ..... 1

#### 二、机械波 ..... 3

### 模块二 机械波的衍射与干涉 ..... 5

#### 一、惠更斯原理 ..... 5

#### 二、波的衍射 ..... 6

#### 三、波的叠加 ..... 7

#### 四、波的干涉 ..... 7

#### 五、驻波 ..... 8

### 模块三 机械波的类型 ..... 9

#### 一、按照介质质点的振动方式分类 ..... 9

#### 二、按照波的形状分类 ..... 12

#### 三、按照波源振动的持续时间分类 ..... 13

### 模块四 超声波的产生 ..... 14

### 模块五 超声场的特征 ..... 16

#### 一、超声场的特征值 ..... 16

#### 二、圆盘声源辐射的超声纵波声场 ..... 19

#### 三、矩形声源辐射的纵波声场 ..... 23

#### 四、横波声场 ..... 24

#### 五、实际声场与理想声场 ..... 27

### 模块六 超声波在介质中的传播 ..... 28

#### 一、超声波的传播速度 ..... 28

#### 二、超声波的反射、折射 ..... 32

#### 三、超声波的衰减 ..... 42

### 模块七 规则反射体的回波声压 ..... 45

#### 一、平底孔的回波声压 ..... 46

#### 二、长横孔的回波声压 ..... 47

#### 三、短横孔的回波声压 ..... 48

#### 四、球孔的回波声压 ..... 48

#### 五、大平底的回波声压 ..... 49

#### 六、圆柱形曲面底面的回波声压 ..... 49

#### 综合训练 ..... 50

## 第二单元 超声检测设备和器材 ..... 54

### 模块一 超声检测仪器 ..... 54

#### 一、超声探伤仪的分类 ..... 54

#### 二、A 型显示脉冲反射式超声波探伤仪的

#### 工作原理 ..... 56

#### 三、数字式超声探伤仪 ..... 60

#### 四、仪器的维护 ..... 63

#### 五、自动检测系统 ..... 64

#### 六、超声相控阵检测系统 ..... 64

### 模块二 探头 ..... 67

#### 一、超声探头的种类 ..... 67

#### 二、压电效应与压电材料 ..... 68

#### 三、压电材料的主要性能参数 ..... 69

#### 四、探头的种类和结构 ..... 71

#### 五、探头型号 ..... 73

### 模块三 试块 ..... 74

#### 一、试块的作用 ..... 74

#### 二、试块的分类 ..... 75

#### 三、试块的要求和维护 ..... 75

#### 四、常用标准试块 ..... 75

#### 五、常用对比试块 ..... 77

### 模块四 超声探伤仪、探头及其组合性能

#### 与测试 ..... 79

#### 一、超声探伤系统的性能及其测试 ..... 80

#### 二、超声探头的基本性能及其测试 ..... 81

#### 综合训练 ..... 83

## 第三单元 超声检测的工艺 ..... 86

### 模块一 超声检测方法概述 ..... 86

#### 一、按照检测原理分类 ..... 86

#### 二、按照使用的波型分类 ..... 87

#### 三、按照探头的接触方式分类 ..... 88

#### 四、按照使用探头的数目分类 ..... 89

### 模块二 超声检测设备的选择 ..... 90

#### 一、超声探伤仪的选择 ..... 90

#### 二、探头的选择 ..... 90

### 模块三 耦合与补偿 ..... 92

#### 一、影响声耦合的因素 ..... 92

#### 二、耦合损耗的测定与补偿 ..... 93

### 模块四 缺陷位置的测定 ..... 94

|                           |     |                               |     |
|---------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 一、扫描速度的调节 .....           | 94  | 综合训练 .....                    | 166 |
| 二、缺陷定位 .....              | 97  | <b>第五单元 超声检测工艺文件的编制与</b>      |     |
| 三、横波周向检测圆柱形工件时的缺陷定位 ..... | 99  | <b>管理</b> .....               | 169 |
| 四、影响缺陷定位的因素 .....         | 100 | 模块一 工艺规程的编制 .....             | 169 |
| 模块五 缺陷大小的测定 .....         | 102 | 一、超声检测工艺规程 .....              | 169 |
| 一、AVG 曲线绘制 .....          | 102 | 二、超声检测工艺规程的内容与编制要求 .....      | 169 |
| 二、距离-波幅曲线绘制 .....         | 103 | 三、超声检测工艺规程示例 .....            | 170 |
| 三、检测灵敏度的调节 .....          | 105 | 模块二 超声检测工艺卡的编制 .....          | 173 |
| 四、缺陷大小的测定 .....           | 106 | 一、超声检测工艺卡 .....               | 173 |
| 五、影响缺陷定量的因素 .....         | 109 | 二、超声检测工艺卡的内容及编制要求 .....       | 174 |
| 模块六 缺陷的性质分析 .....         | 110 | 三、超声检测工艺卡示例 .....             | 174 |
| 一、根据加工工艺分析缺陷性质 .....      | 111 | 模块三 超声检测工艺文件的管理 .....         | 178 |
| 二、根据缺陷特征分析缺陷性质 .....      | 111 | 一、超声检测引用的相关标准、技术文件、参考资料 ..... | 178 |
| 三、根据缺陷波形分析缺陷性质 .....      | 111 | 二、检测过程控制和操作监督的相关文件 .....      | 178 |
| 模块七 非缺陷波的识别 .....         | 112 | 三、超声检测工艺规程、工艺卡或检测报告 .....     | 178 |
| 一、三角反射波 .....             | 112 | 综合训练 .....                    | 180 |
| 二、迟到波 .....               | 113 | <b>第六单元 超声检测实验</b> .....      | 184 |
| 三、61°反射 .....             | 113 | 实验一 超声检测仪的使用 .....            | 184 |
| 四、其他非缺陷回波 .....           | 114 | 一、实验目的 .....                  | 184 |
| 综合训练 .....                | 115 | 二、实验设备和器材 .....               | 184 |
| <b>第四单元 超声检测的应用</b> ..... | 118 | 三、实验内容 .....                  | 184 |
| 模块一 板材的超声检测 .....         | 118 | 四、实验步骤 .....                  | 186 |
| 一、板材的生产工艺过程 .....         | 118 | 五、思考题 .....                   | 186 |
| 二、板材中的常见缺陷 .....          | 118 | 实验二 水平线性和垂直线性测定 .....         | 187 |
| 三、板材的超声检测方法与技术 .....      | 119 | 一、实验目的 .....                  | 187 |
| 模块二 锻件的超声检测 .....         | 127 | 二、实验设备和器材 .....               | 187 |
| 一、锻件的生产工艺过程 .....         | 127 | 三、实验内容 .....                  | 187 |
| 二、锻件中的常见缺陷及波形分析 .....     | 127 | 四、实验步骤 .....                  | 187 |
| 三、锻件的超声检测方法与技术 .....      | 129 | 五、思考题 .....                   | 188 |
| 模块三 焊缝的超声检测 .....         | 133 | 实验三 斜探头性能测试 .....             | 188 |
| 一、焊接加工过程 .....            | 134 | 一、实验目的 .....                  | 188 |
| 二、焊缝中的常见缺陷 .....          | 135 | 二、实验设备和器材 .....               | 188 |
| 三、焊缝的超声检测方法与技术 .....      | 136 | 三、实验内容 .....                  | 188 |
| 模块四 管材的超声检测 .....         | 152 | 四、实验步骤 .....                  | 188 |
| 一、管材的生产工艺过程 .....         | 152 | 五、思考题 .....                   | 189 |
| 二、管材的主要缺陷 .....           | 152 | 实验四 AVG 曲线的绘制 .....           | 190 |
| 三、管材的超声检测方法与技术 .....      | 153 | 一、实验目的 .....                  | 190 |
| 模块五 铸件的超声检测 .....         | 160 |                               |     |
| 一、铸件的生产工艺过程 .....         | 160 |                               |     |
| 二、铸件的特点 .....             | 160 |                               |     |
| 三、铸件的超声检测方法与技术 .....      | 161 |                               |     |
| 四、铸件的超声检测应用 .....         | 161 |                               |     |

|                   |     |                        |     |
|-------------------|-----|------------------------|-----|
| 二、实验设备和器材 .....   | 190 | 实验六 焊缝的超声检测 .....      | 191 |
| 三、实验内容 .....      | 190 | 一、实验目的 .....           | 191 |
| 四、实验步骤 .....      | 190 | 二、实验设备和器材 .....        | 192 |
| 五、思考题 .....       | 190 | 三、实验内容 .....           | 192 |
| 实验五 锻件的超声检测 ..... | 191 | 四、实验步骤 .....           | 192 |
| 一、实验目的 .....      | 191 | 五、思考题 .....            | 192 |
| 二、实验设备和器材 .....   | 191 | 附录 JB/T 4730—2005《承压设备 |     |
| 三、实验内容 .....      | 191 | 无损检测》标准简介 .....        | 193 |
| 四、实验步骤 .....      | 191 | 参考文献 .....             | 201 |
| 五、思考题 .....       | 191 |                        |     |



# 第一单元 超声检测的物理基础



**内容导入：**超声检测全称超声波检测，也叫超声波探伤，是无损检测的一种常用方法。目前，绝大部分的超声检测是根据超声波在介质中的传播时间和能量变化情况来判定缺陷位置和大小的。因此要真正掌握超声波检测技术，就必须了解超声波的产生机理，熟悉超声波在介质中的传播方式及其能量变化的规律。

超声波在被检测材料中传播时，材料的声学特性和内部组织的变化对超声波的传播产生一定的影响，通过对超声波受影响程度和状况的探测了解材料性能和结构变化的技术称为超声检测。超声检测是无损检测的主要方法之一，它广泛用于国防、航空、船舶、冶金、核电等许多行业，在保证产品质量和工程质量上发挥着越来越重要的作用。在超声检测中，主要涉及几何声学 and 物理学中的一些基本概念和基本定律，如声学中的超声波反射、折射、波型转换和物理学中波的叠加、干涉等基本知识。准确理解这些相关的概念，掌握其中的基本定律，将有利于我们灵活运用这些基础理论解决实际检测中的问题。

## 模块一 机械振动与机械波

超声波属于机械波的一种，是物质运动的一种形式。机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程和形式。

### 一、机械振动

自然界的一切物质每时每刻都在运动着，其运动形式大致可分为五种基本形式：机械运动、物理运动、化学运动、生物运动和社会运动。在这些运动的物质中，有些物体在某一固定的位置（即平衡位置）附近作周期性的往复运动，这种运动形式被称为机械振动，简称振动。在日常生活中，物体振动的现象随处可见。例如，钟摆周而复始的摆动、活塞在气缸中来回往复的运动、发声体的运动等都是物体振动的表现。

根据振动过程中物体的受力情况不同，振动可分为自由振动和受迫振动。

#### 1. 自由振动

做振动的系统在外力的作用下物体离开平衡位置以后就能自行按其固有频率振动，而不再需要外力的作用，这种不在外力作用下的振动称为自由振动。理想情况下的自由振动叫无阻尼自由振动。自由振动时的周期叫固有周期，自由振动时的频率叫固有频率，它们由振动系统自身条件所决定，与振幅无关。最简单最基本的直线无阻尼自由振动称为简谐振动，简称谐振。下面以弹簧振子为例分析谐振的一些规律。

如图 1-1 所示，把一个与弹簧连接的弹簧振子放在某一光滑（不考虑摩擦）的支撑面上。显然当弹簧振子位于平衡位置  $O$  时，受到的合力为  $0$ 。如果把弹簧振子水平地拉动后释放，它就会在平衡位置  $O$  左右来回往复运动。当弹簧振子离开平衡位置向右运动过程中，

弹簧被拉长产生始终指向平衡位置的弹力，它力图使振子回到平衡位置，振子的动能逐渐减小，而弹性势能逐渐增大。当振子运动到最大位移的位置  $A$  时，动能减小为零，势能达到最大。在弹簧弹力的作用下，振子改为向左运动，渐渐返回平衡位置。在振子返回达平衡位置的过程中，势能逐渐减小，动能逐渐增大。当振子到达平衡位置时，动能最大而势能为零。由于惯性作用，振子不会停留在平衡位置而继续向左运动使弹簧压缩，再次受到弹簧的弹力作用。在振子向左运动的过程中，弹簧的弹力逐渐增大，振子的运动速度逐渐减小，动能逐渐降低，弹性势能逐渐增大。当振子达到位置  $A'$  时，运动速度为零，不再向左运动，动能减小为零，势能又达到最大。弹簧弹力迫使振子加速向右运动，其状态与振子从  $A$  到  $O$  相似，只是弹簧弹力的方向相反。这样振子就以平衡位置  $O$  为中心重复运动，形成振动。

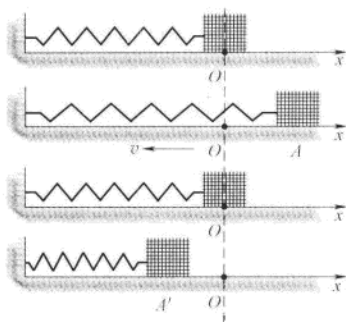


图 1-1 弹簧振子

一般我们把振动物体偏离平衡位置后所受到的总是指向平衡位置的力，叫做回复力。在图 1-1 中，设振子离开平衡位置的位移为  $x$ ，对应的回复力为  $F$ ，显然

$$F = -kx \quad (1-1)$$

式中， $k$  是弹簧的刚度系数，负号表示回复力  $F$  与位移  $x$  方向相反。凡是符合式 (1-1) 的力称为弹性力或准弹性力，其特征是力的大小与平衡位置到作用点的位移大小成正比，而与位移的方向相反，即始终指向平衡位置。

设振子的质量为  $m$ ，根据牛顿第二定律  $F = ma$  知，振子的加速度为

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1-2)$$

由于  $k$  和  $m$  都是不变的常量，令  $\frac{k}{m} = \omega^2$ ，则

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x &= 0 \\ x &= A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中  $\omega$ ——圆频率， $\omega = 2\pi f$ ；

$A$ ——振幅，即最大位移；

$\varphi$ ——初相位；

$\omega t + \varphi$ ——振子在  $t$  时刻的相位。

凡满足上述规律的运动称为谐振运动。谐振运动的特点是：物体受到的回复力大小与位移大小成正比，其方向与位移方向相反，总是指向平衡位置。谐振时物体的振幅不变，只有弹性力或重力做功，其他力不做功，符合机械能守恒规律。在平衡位置时的动能最大而势能为零，在最大位移处势能最大而动能为零，其总能量保持恒定不变。

谐振是理想条件下的振动，即不考虑物体受到的摩擦和其他阻力的影响。实际上任何物体的振动总会受到各种阻力的作用，振动物体的能量会不断减少，振幅也逐渐减小。这种振幅或振动能量不断降低的振动称为阻尼振动，如图 1-2 所示。

阻尼振动能量的减少通常有两种方式：一是振动物体因克服摩擦阻力而使系统的机械能

不断减少；二是由于系统的振动导致周围的相邻质点振动，实现能量的传递而使振动系统的机械能不断减少。

## 2. 受迫振动

在周期性外力的作用下产生的振动称为受迫振动，这个周期性的外力称为策动力。如扬声器中纸盆的振动、气缸中活塞的振动等都是受迫振动的例子。受迫振动刚开始时很复杂，经过一段时间后，进入到稳定状态，变为周期性的谐振。这时的振动频率与策动力频率相同，振幅保持不变。改变策动力频率将使振幅发生变化，当策动力频率与受迫振动系统的固有频率相同时，受迫振动的振幅达到最大值，系统处于共振状态。此时的频率称为共振频率，如图 1-3 所示。

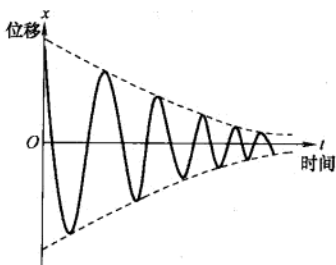


图 1-2 阻尼振动

在受迫振动中，策动力的方向在整个周期中始终与振动系统的运动方向一致，策动力对振动系统做正功。显然当物体发生共振时，策动力供给振动系统的能量为最大。对于一定的振动物体，在相同的策动力作用下，阻尼越小，消耗的能量就越小，共振幅值就越大。有时物体会因为振动幅值过大而遭到破坏，我们应该注意防止，避免外力的频率接近物体的固有频率。但是有时为了获得最大的振动能量，又需要物体产生共振。如在设计超声波探头的

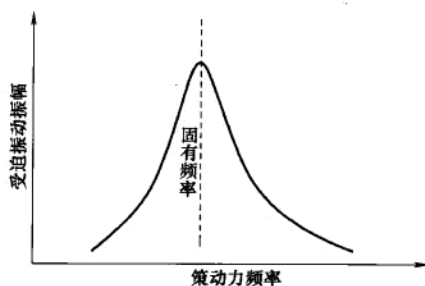


图 1-3 受迫振动

的压电晶片时，应使高频电脉冲的频率等于压电晶片的固有频率，从而产生共振，以获得最大的电声能量转换效率。

## 想一想

18 世纪中叶，法国昂热市一座 102m 长的大桥上有一队士兵经过。当他们在指挥官的口令下迈着整齐的步伐过桥时，桥梁突然断裂，造成 226 名官兵和行人丧生。这是为什么呢？

## 二、机械波

### 1. 机械波的产生和传播

振动的传播过程称为波动。波动是一种常见的物质运动形式，通常可分为机械波和电磁波两大类。机械振动在弹性介质中的传播过程，称为机械波，如空气中的声波，水面的涟漪等。周期性变化的电场和磁场在空间的传播，称为电磁波，如太阳的热辐射，各种波段的无线电波、光波、X 射线、 $\gamma$  射线等。

由于超声波属于机械波的范围，因此下面只讨论机械波的一些规律。

形成机械波必须有机械振动振源和传播振动的弹性介质。引起波动的初始振动物称为振源。振动赖以传播的媒介物则称为弹性介质。在弹性介质中，各质点间是以弹性力互相联系着的，就像用无数的弹簧将组成物质的各个质点连接起来一样，如图 1-4 所示。当弹性介质的某一部分质点受外力作用发生振动时，由于它与相邻部分质点之间有相互作用的弹性力存在，振动就会传到与之相邻的其他质点，使它们也产生振动。同理，这些相邻质点的振动又

会引起与之相邻的较远的质点跟着振动，于是振动就以一定的速度由近及远地向外传播出去而形成机械波。

机械波只是振动状态的传播，介质中各质点并不随波前进，各质点只以周期性变化的振动速度在各自的平衡位置附近振动。振动是产生波动的根源，波动是振动状态在弹性介质中的传播，也是振动能量在弹性介质中的传播。但是这种能量的传播，不是靠物质的迁移来实现的，也不是靠振动质点的弹性碰撞来完成的，而是由各个质点的连续的周期性位移变化逐渐传递出去的。

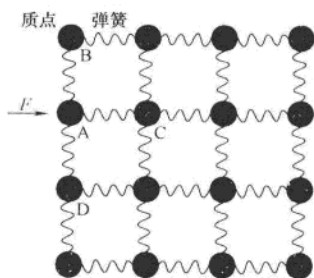


图 1-4 弹性介质

### 想一想

在波动的水面上漂浮的树叶只在原处上下沉浮并不随波移向远处。这是为什么呢？

### 2. 机械波的常用物理量

波长、波的频率（或周期）和波速是描述波动的三个重要物理量。

(1) 波长 在同一波线上两个相邻的振动相位相同的质点之间的距离，称为波长（即一个“波”的长度），用符号  $\lambda$  表示。波长的常用单位是毫米（mm）或米（m）。

(2) 频率 单位时间内波动通过某一位置的完整波的数目，称为波动频率，也是质点在单位时间内的振动次数，用符号  $f$  表示。频率的常用单位是赫兹（Hz），即（次）/秒。在一秒钟内通过弹性介质某一位置一个波动，称这个波的频率为 1Hz。频率的单位还有千赫（kHz）、兆赫（MHz）、吉赫（GHz）等， $1\text{GHz} = 10^3\text{MHz} = 10^6\text{kHz} = 10^9\text{Hz}$ 。

周期在数值上等于频率的倒数，它是波动前进一个波长的距离所需要的时间，用符号  $T$  表示。周期的常用单位有秒（s）、毫秒（ms）、微秒（ $\mu\text{s}$ ）等， $1\text{s} = 10^3\text{ms} = 10^6\mu\text{s}$ 。

由于波源作一次完全振动，波就前进一个波长的距离，所以波的周期（或频率）等于波源的振动周期（或频率）。

(3) 波速 在波动过程中，某一振动状态（即振动相位）在单位时间内所传播的距离叫做波速，用  $c$  表示，其常用单位为米/秒（m/s）。对于一定的波动，波速的大小与介质的性质有关，不同的介质中，波速也不相同。例如，在标准状态下，声波在空气中传播的速度为 331m/s，而在氢气中传播的速度是 1263m/s。

根据波长、频率和波速的定义可得：

$$\lambda = cT = c/f \quad (1-4)$$

由于波速与介质有关，而波的频率是波源振动的频率，与介质无关。因此，由式（1-4）可知，同一频率的波，其波长将随介质的不同而不同。该式具有普遍的意义，适用于所有的波动。

### 小知识

机械波在弹性介质传播时，如果波长远大于介质分子之间的距离时，在介质一个波长的距离内有无数个分子在陆续振动，宏观上看来介质就像是连续的。但是如果波长小于或等于介质分子间距离时，我们再不能认为介质是连续的，这时机械波也就不能传播。因此机械波

在弹性介质中传播存在着一定的频率上限。

在超声检测中,波长是一个重要的物理量,对于不同晶粒大小和质量要求,只有选择合适的波长才能达到检验的目的。晶粒较细的材料或质量要求高时,应提高频率,减小波长,以获得较高的检测灵敏度。但是频率的提高不是无限度的,必须保持波长与被检材料的晶粒度有合适的比例,否则,晶粒反射就会影响检测结果的准确性,甚至无法检测。

### 3. 机械波的波动方程

在均匀的、无吸收的弹性介质中,当波源作谐振时,波所经历的所有质点都按余弦(或正弦)规律振动,则在此弹性介质中所形成的波,称为简谐波。它是最简单最基本的波动,任何复杂的波都可以看成是由若干频率不同的简谐波叠加而成的。下面讨论简谐波的波动规律。

如图 1-5 所示,设有一简谐波沿  $x$  轴正方向向前传播,介质质点沿  $y$  轴作上下振动。任取一质点的平衡位置作为坐标原点  $O$ ,选择某一时刻作为起始时刻, $O$  点处(即  $x=0$  处)质点的振动方程可表示为

$$y = A \cos \omega t$$

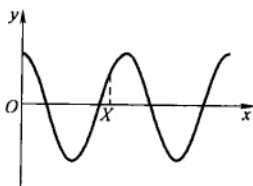


图 1-5 波动方程推导

假定介质是均匀无限大、无吸收的,那么各点的振幅将保持不变。当振动从  $O$  点传至该  $X$  点时,该质点将以相同的振幅和频率重复  $O$  点的振动。由于振动从  $O$  点传播到  $X$  点需要的时间为  $x/c$ ,即  $X$  点的振动落后于  $O$  点  $x/c$ ,因此  $X$  处的质点在时刻  $t$  的位移为  $O$  点在  $(t-x/c)$  时刻的位移:

$$y = A \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) = A \cos (\omega t - kx) \quad (1-5)$$

式中  $k$ ——角波数,  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

$c$ ——波速;

$x$ —— $X$  点到  $O$  点的距离。

上式就是沿  $x$  轴正方向传播的平面简谐波的波动方程,它反映了波动过程中沿波传播方向上任意一点在任意时刻的位移情况。

## 模块二 机械波的衍射与干涉

### 一、惠更斯原理

波动的起源是波源的振动,波动的传播是由于介质中各质点间的相互作用。假设介质是连续分布的,介质中任何一点的振动都会引起临近各点的振动,因此在波动中任何一点都可以看作新的波源。例如,在水面上有一列自由传播的水波,如图 1-6 所示。在前进中遇到障碍物  $AB$ ,  $AB$  上有一小孔,小孔的孔径  $a$  远小于波长  $\lambda$ 。这时,我们可以看到穿过小孔的波是圆形的波,与原来波的形状无关。说明小孔可看作新的波源。

1690 年,荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯 (Christian Huygens) 总结了上述现象,提出了著名的惠更斯原理:媒质中波动传到的各点,都可以看作是发射子波的波源,在其后的任一时刻,这些子波的包迹就决定新的波阵面。

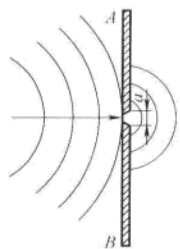


图 1-6 惠更斯原理示意图

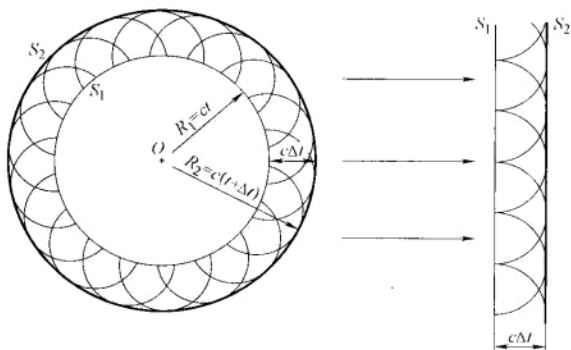
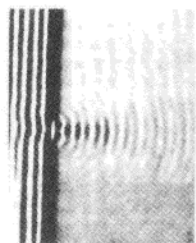


图 1-7 用惠更斯原理求球面波和平面波的新波阵面

惠更斯原理对任何波动过程都适用，不论是机械波或电磁波，不论这些波动经过的介质是均匀的或非均匀的。利用惠更斯原理可以确定波前的几何形状和波的传播方向。

如图 1-7 所示，设有波动从波源  $O$  以速度  $c$  传播。在时刻  $t$  的波阵面  $S_1$ ，根据惠更斯原理，波阵面  $S_1$  表面各点即为新的子波源。以  $S_1$  表面各点为圆心，以  $c\Delta t$  为半径画出各球形子波，作切于各子波的包迹得经时间  $\Delta t$  后新的波阵面  $S_2$ 。由波线垂直于波阵面便可确定波的传播方向。

## 二、波的衍射

波在传播过程中遇到障碍物时，能绕过障碍物的边缘，在障碍物的阴影区内继续传播的现象，称为波的衍射。

如图 1-8 所示，当水波到达狭缝处，根据惠更斯原理，狭缝上各点都可看作子波源，作出子波包络，得到新的波阵面。在狭缝的边缘处，波的传播方向发生改变，绕到了障碍物的背后。

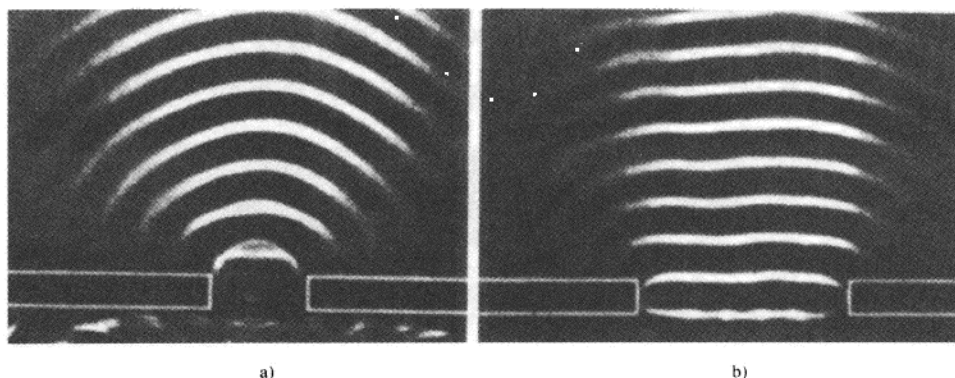


图 1-8 波的衍射

从图 1-8 中可以看出，波的衍射与障碍物的尺寸和与波长的相对大小有关。当狭缝宽度小于波长时，衍射效果显著。在超声检测中，如果缺陷尺寸远小于波长，由于波的衍射较强，反射回波强度较弱，缺陷回波很低，容易漏检。超声检测的灵敏度约为  $\lambda/2$ ，这是一个很重要的原因。但是，由于波的衍射使超声波绕过晶粒顺利在介质中传播，这对检测是有利

的。

衍射现象是波动特征之一。

### 三、波的叠加

几列波在空间传播时, 无论是否相遇, 都将保持各自原有的频率、波长、振动方向、传播方向继续传播, 并不会因其他波的存在而改变, 这一规律称为波传播的独立作用原理。在几个人同时讲话时, 我们能够听到每个人的声音, 这就是声波的独立性的例子。天空中同时有许多无线电波在传播, 我们能接收到某一电台的广播, 这是电磁波传播的独立性的例子。

当几列波在空间相遇时, 在相遇区域内任一点的振动, 为各列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和, 这一规律称为波的叠加原理。显然, 波的叠加原理实际上是运动叠加原理在波动中的表现。

### 四、波的干涉

一般来说, 任意的几列简谐波在空间相遇时, 叠加的情形是很复杂的, 它们可以合成多种形式的波动。下面我们只讨论波的叠加中一种最简单而又最重要的情形, 即两列频率相同、振动方向相同、相位差恒定的简谐波的叠加。这种波的叠加会使空间某些点处的振动始终加强, 而另一些点处的振动始终减弱, 呈现规律性分布, 如图 1-9 所示, 这种现象称为干涉现象。能产生干涉现象的波称为相干波, 相应的波源称为相干波源。同频率、同振动方向、恒相位差称为相干条件。

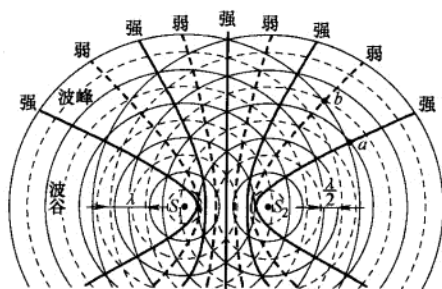


图 1-9 波的干涉图样

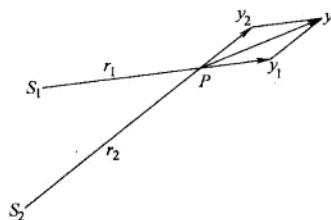


图 1-10 波的干涉

下面分析波干涉的一些规律。

如图 1-10 所示, 设有两个相干点波源  $S_1$ 、 $S_2$  的振动分别为

$$y_{S_1} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_{S_2} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

它们发出的两列相干波在空间某  $P$  点 (称为干涉点) 相遇, 两列波在该点引起的分振动为

$$y_{P_1} = A_1 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) + \varphi_1\right]$$

$$y_{P_2} = A_2 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) + \varphi_2\right]$$

若不考虑介质对波能量的吸收, 对于平面波, 波的振幅等于波源的振幅, 对于球面波, 要考虑振幅随距离的增加而减小的规律。这里我们只考虑平面波。根据叠加原理, 干涉点的

合振动为

$$y_P = y_{P_1} + y_{P_2} = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi} \quad (1-6)$$

$$\tan\varphi = \frac{A_1\sin\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2\sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)}{A_1\cos\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2\cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)} \quad (1-7)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——波源  $S_1$  和  $S_2$  在  $P$  点引起的振幅；

$A$ —— $P$  点的合振幅；

$r_1$ 、 $r_2$ ——波源  $S_1$  和  $S_2$  到  $P$  点的距离；

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——波源  $S_1$  和  $S_2$  的振动初相位；

$\Delta\varphi$ ——两列相干波在干涉点引起的振动的相位差， $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$ ；

$\lambda$ ——波长。

由上面的式子可知：

1) 两列相干波在空间任一点的合振动相位差是一个恒量，每一点的合振幅也是恒量。但是对于不同的干涉点，它们到波源的波程差一般并不相同，因而两列波的相位差也不相同，振动的合振幅也不同。

2) 当  $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$  ( $k$  为整数) 时，合成振幅达最大值， $A = A_1 + A_2$ 。这时，两列波在  $P$  点互相加强，产生相长干涉。

3) 当  $\Delta\varphi = \pm (2k+1)\pi$  ( $k$  为整数) 时，合成振幅达最小值， $A = |A_1 - A_2|$ 。这时，两列波在  $P$  点互相削弱，产生相消干涉。

4) 如果两列具有相同初相位的相干波在空间相遇，当波程差  $r_2 - r_1 = n\lambda$  ( $n$  为整数) 时，合成振幅  $A = A_1 + A_2$ 。如果波程差  $r_2 - r_1 = (2n+1)\lambda/2$  ( $n$  为整数) 时，合成振幅  $A = |A_1 - A_2|$ 。若  $A_1 = A_2$ ，则  $A = 0$ ，即二者完全抵消，干涉点处于静止状态。

5) 当两相干波源的振幅相近或相等时干涉现象变得很明显。

干涉现象也是波动特征之一。在超声检测中，由于波的干涉，使超声波波源附近出现很多声压极大值点和极小值点。

## 五、驻波

驻波是波动干涉的特例。当两列振幅相同的相干波在同一条直线上相向传播时互相叠加而形成的波，称为驻波。

如图 1-11 所示，设有两列相干波，分别沿  $x$  轴正、负方向传播，选初相位均为零的波动方程为

$$y_1 = A \cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad y_2 = A \cos\omega\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

则驻波的波动方程为

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cos(2\pi x/\lambda) \cos\omega t \quad (1-8)$$

由驻波方程可知：

1) 驻波波线上各点作振幅为  $|2A \cos(2\pi x/\lambda)|$  的谐振，其振动频率仍为原来的频率，

但是各点的振幅随位置不同而不同。

2) 当  $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 1$  时, 振幅达最大值  $2A$ , 这些位置称为波腹。因此有

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = k\pi \quad x = k \frac{\lambda}{2} \quad (k \text{ 为整数})$$

3) 当  $|\cos(2\pi x/\lambda)| = 0$  时, 振幅达最小值 0, 这些位置称为波节。因此有

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = (2k+1) \frac{\pi}{2} \quad x = (2k+1) \frac{\lambda}{4} \quad (k \text{ 为整数})$$

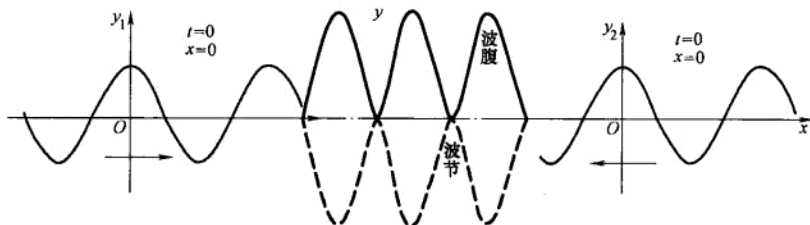


图 1-11 驻波的形成

可见, 驻波的波腹和波节位置总是固定不变的, 驻波的相位也不随位置变化, 故驻波的波形是强弱相间的, 并且不随时间而变化, 好像永驻不动似的, 人们正是根据它的这个特点称其为驻波。

驻波是分段的振动, 相邻段振动相位相反。相邻波腹或波节的距离为  $\lambda/2$ , 相邻波腹与波节的距离为  $\lambda/4$ 。

在超声检测中, 入射到缺陷的超声波与从缺陷反射回来的超声波互相叠加就会形成驻波。形成驻波时, 在界面处产生波节还是波腹与两侧介质的疏密程度有关。当波从波疏介质垂直入射到波密介质, 又从波密介质反射回到波疏介质时, 在界面处形成波节; 反之则形成波腹。如超声波垂直入射到钢/水界面, 就会在钢/水界面处产生波腹; 超声波垂直入射到水/钢界面, 就会在水/钢界面处产生波节。

在生活中驻波应用的例子很多。如各种乐器, 包括弦乐器、管乐器和打击乐器, 都是由于产生驻波而发声的。为得到最强的驻波, 弦线或管内空气柱的长度必须等于半波长的整数倍。设计超声波探头时, 为了在晶片形成驻波, 须将晶片厚度设计成  $\lambda/2$ 。

### 模块三 机械波的类型

由于振动的形式多种多样, 所以由振动引起的波动也是多种多样。机械波的分类方法很多, 通常按照质点振动方式的不同或波的形状进行分类。

#### 一、按照介质质点的振动方式分类

根据波动传播时介质质点的振动方向与波传播方向间的关系, 波动分为纵波、横波、表面波和板波等。

##### 1. 纵波

介质质点的振动方向与波的传播方向相互平行的波, 称为纵波, 如空气中传播的声波等。纵波用符号  $L$  表示, 如图 1-12 所示。

弹性介质的质点间弹性力可以有正应力和切应力。当介质质点受到交变的拉压作用时,