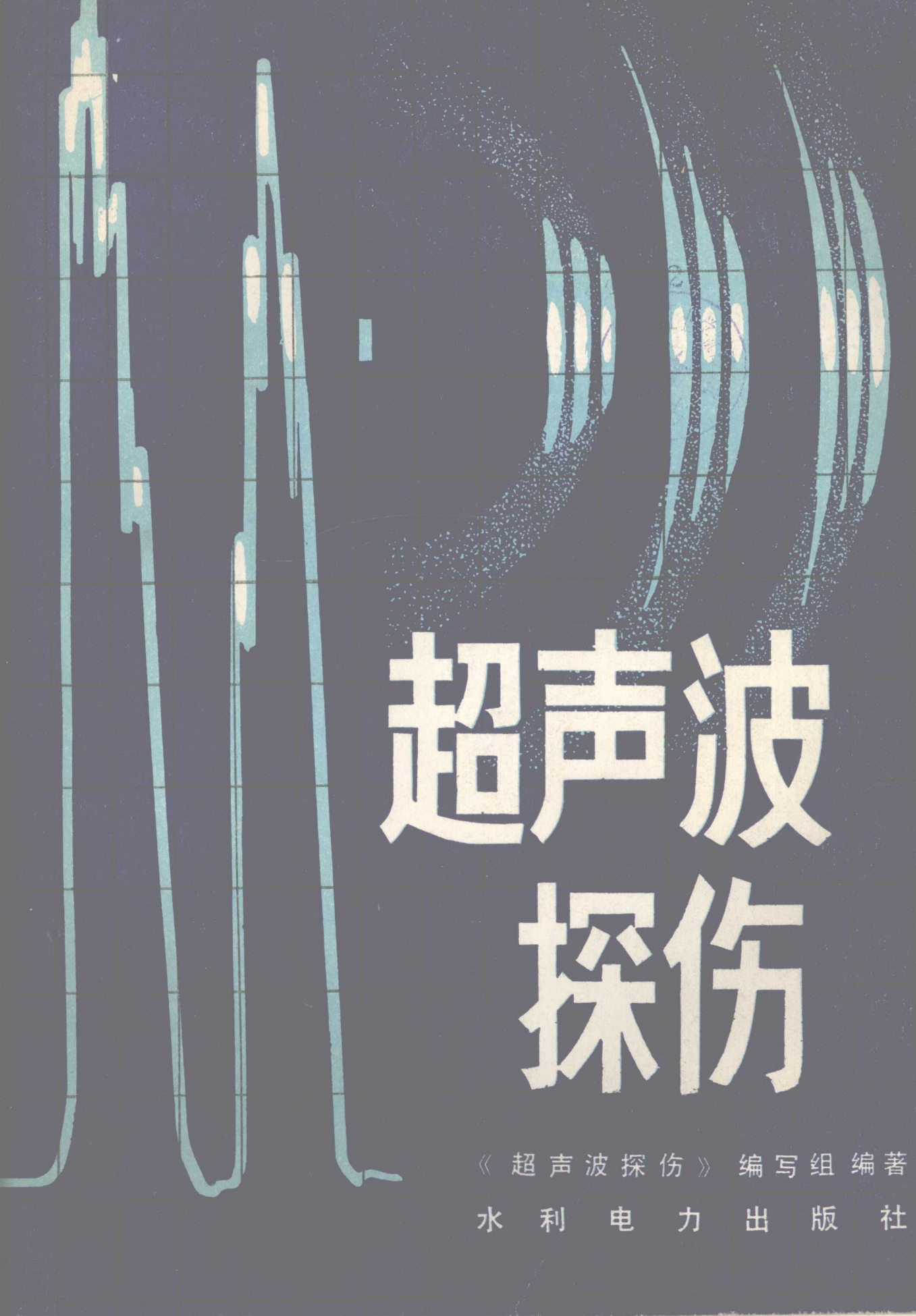




# 超声波 探伤

《超声波探伤》编写组 编著  
水利电力出版社

# 超 声 波 探 伤

《超声波探伤》编写组编著

水 利 电 力 出 版 社

## **超 声 波 探 伤**

《超声波探伤》编写组编著

(根据电力工业出版社纸型重印)

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 28印张 635千字 1插图

1980年11月第一版

1985年1月新一版 1985年1月北京第一次印刷

印数0001—9750册 定价4.85元

书号15143·5584

## 前 言

超声波探伤是无损检验的主要方法之一。它是利用材料本身或内部缺陷的声学性质对超声波传播的影响,非破坏性地探测材料内部和表面的缺陷(如裂纹、气泡、夹渣等)的大小、形状和分布状况以及测定材料性质。超声波探伤具有灵敏度高、穿透力强、检验速度快、成本低、设备简单轻便和对人体无害等一系列优点。因此,它已广泛应用于机械制造、冶金、电力、石油、化工和国防等各工业部门,并已成为保证产品质量、确保设备安全运行的一种重要手段。

为了适应我国工业迅速发展的需要,便于普及超声波探伤技术和提高探伤水平,电力工业部西安热工研究所组织武汉水利电力学院、湖北省电力中心试验所、北京电力科学研究所、山东省电力科学研究所、东北电业管理局技术改进局、陕西省电业管理局中心试验所、华东电业管理局电力试验研究所、北京石景山发电厂等单位,在总结电力系统多年的科研成果和探伤经验的基础上,参考国内外有关文献资料,编写了这本《超声波探伤》。

本书比较详细地论述了超声物理的基础理论、各种声源(圆盘源、矩形源等)辐射的纵波声场特性和斜探头辐射的横波声场特性,对固体中与液体中的声场、连续波与脉冲波的声场进行了比较。这些论述和比较对学习超声波探伤基础理论,深入了解声场特性有一定参考价值。书中以相当大的篇幅叙述了超声波探伤的通用技术问题和各种探伤方法,这些内容对探伤人员来说是很实用的,例如:在通用技术问题中讨论了工件界面的影响并给出无边界影响时探头至边界的最小距离计算公式,讨论了缺陷状况(形状、方位、性质等)对缺陷波波高的影响;在各种探伤法中介绍了仪器灵敏度的调整,缺陷的定量、定位和定性;在表面波探伤中还介绍了表面波反射率理论研究的结果;讨论了规则形状反射体(平底孔、球孔、横孔等)的反射波波高及其在探伤中的应用,介绍了AVG法的原理及其在缺陷定量中的应用,以及有关曲线的绘制和使用的条件。本书系统地介绍了汽轮机叶轮和叶片、紧固螺栓、管道焊缝等的探伤方法和探伤实例,可供发电厂设备检验时参考。本书还简要地介绍了探头的结构及其性能的测试,试块的制作及其用途,探伤仪的原理及其使用维修。附录中列出了有关公式、数据、图表和国外的探伤标准,以及常用的探伤术语,可为更好地开展探伤工作提供方便条件。书末还列有主要参考资料书目,本书还直接或间接地引用了其中一些资料。

参加本书编写的人员有:

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 李克明 | 刘德荣 | 张志永 | 孟传亨 | 毛森祥 |
| 祁乃春 | 陈秉忠 | 蒋达璋 | 肖州生 | 沙命余 |
| 曾渊淮 | 侯成章 | 徐锡谷 | 卢存仁 | 倪政群 |

在本书编写过程中,得到了编写人员所在单位和湖南省水电局中心试验所、江西省电

力局中心试验所、北京热电厂等单位领导和同志们的大力支持和协助，有关单位的同志还提供了宝贵资料，对此我们表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中定有不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

《超声波探伤》编写组

一九八〇年四月于北京

## 内 容 提 要

本书共分十章，主要内容有：超声物理的基础理论；圆盘源、矩形源辐射的纵波声场特性和斜探头辐射的横波声场特性；超声波探伤的通用技术问题；各种探伤方法；发电厂几种部件的探伤；探头的结构及其性能的测试；试块的制作及其用途；探伤仪的基本原理及其使用维修等。

书中探伤实例较多，有插图 500 余幅，便于读者理解和掌握各种探伤方法及有关技术问题。

本书可供电力、机械、冶金、石油、化工和国防等工业部门无损检验人员、科研人员和大专院校有关专业师生参考。

# 目 录

## 前 言

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 超声波                                                                                          | 1  |
| 第一节 振动和波                                                                                         | 1  |
| 一、振动学基础    二、波的一般概念                                                                              |    |
| 第二节 波的种类和形式                                                                                      | 10 |
| 一、波的种类(波型)    二、波的形式    三、超声场的特征量    四、声速                                                        |    |
| 第三节 波的叠加、干涉及驻波                                                                                   | 17 |
| 一、波的叠加与干涉    二、驻波    三、惠更斯原理                                                                     |    |
| 第四节 垂直入射界面时的超声波                                                                                  | 20 |
| 一、单一的平面界面    二、双界面——平板和空隙                                                                        |    |
| 第五节 倾斜入射界面时的超声波                                                                                  | 25 |
| 一、超声波的反射、折射与波型转换    二、声压值    三、在直角边与方角内的反射                                                       |    |
| 第六节 几何光学在超声中的应用                                                                                  | 34 |
| 一、适用范围    二、球面波和柱面波的声压距离定律    三、球面波在平面上的反射和折射    四、平面波和球面波在曲面和透镜上的反射和折射                          |    |
| 第七节 超声波的衰减                                                                                       | 43 |
| 一、超声波的衰减及其原因    二、衰减的表示方法和衰减系数    三、分贝(dB)和奈培(Np)的概念                                             |    |
| 第二章 超声波声场特性                                                                                      | 48 |
| 第一节 超声场的波动物理                                                                                     | 48 |
| 一、超声波的衍射    二、圆盘源辐射的纵波声场    三、矩形源辐射的纵波声场                                                         |    |
| 四、液体介质和固体介质中纵波声场的比较    五、非均匀激发声源(高斯声源)的纵波声场    六、压电晶片辐射的纵波声场有关问题    七、斜探头辐射的横波声场    八、介质对声波的衰减因子 |    |
| 第二节 脉冲波与连续波及脉冲波声场                                                                                | 72 |
| 一、脉冲波与连续波    二、脉冲波声场                                                                             |    |
| 第三章 压电效应与超声波换能器                                                                                  | 75 |
| 第一节 压电效应和压电材料                                                                                    | 75 |
| 一、压电效应    二、压电方程和压电材料有关常数的物理意义    三、机电耦合系数                                                       |    |
| 四、石英和探伤用压电陶瓷的有关常数值    五、压电振子    六、压电单晶体及压电陶瓷的测量                                                  |    |
| 第二节 探头                                                                                           | 91 |
| 一、探头的种类    二、各类探头的结构与设计    三、探头的制作工艺                                                             |    |

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第三节 探头基本性能的测定 .....                                                                   | 103 |
| 一、声场的测定    二、有关探头频率特性的测试    三、斜探头入射点和折射角的测定                                           |     |
| 第四节 产生超声波的其他方法 .....                                                                  | 108 |
| 一、电动力学法    二、磁致伸缩法    三、机械法    四、热效应法    五、静电法                                        |     |
| 第四章 试块 .....                                                                          | 112 |
| 第一节 试块的用途 .....                                                                       | 112 |
| 一、确定合适的探伤方法    二、确定探伤灵敏度和评价缺陷大小    三、校验仪器及测试探头性能                                      |     |
| 第二节 常用的标准试块 .....                                                                     | 112 |
| 一、IIW试块    二、IIW <sub>2</sub> 试块    三、CS-2试块    四、B.S.A <sub>1</sub> 试块               |     |
| 五、B.S.A <sub>3</sub> 试块    六、JIS-STB-A <sub>2</sub> 试块    七、JIS-STB-A <sub>3</sub> 试块 |     |
| 八、JIS-STB-G试块    九、ASME试块    十、半圆试块    十一、SC试块                                        |     |
| 十二、DSC试块                                                                              |     |
| 第三节 使用 and 制作试块时应注意的几个问题 .....                                                        | 132 |
| 一、保留原始标准试块    二、试块材质与被测工件材质不同时造成的误差                                                   |     |
| 三、试块的维护    四、试块的制作要求和检查                                                               |     |
| 第五章 超声波探伤的通用技术问题 .....                                                                | 134 |
| 第一节 超声频率和探头的选择 .....                                                                  | 134 |
| 一、频率的选择    二、探头的选择                                                                    |     |
| 第二节 耦合 .....                                                                          | 135 |
| 一、表面状况    二、耦合剂    三、表面光洁度差异的补偿    四、曲面接触与曲率补偿                                        |     |
| 五、用中间耦合层的耦合                                                                           |     |
| 第三节 工件界面的影响 .....                                                                     | 140 |
| 一、与声束轴线平行的工件侧边界面的影响    二、变型波的影响    三、三角形反射                                            |     |
| 四、61°反射    五、利用变型波的可能性                                                                |     |
| 第四节 宽脉冲与窄脉冲 .....                                                                     | 150 |
| 一、宽脉冲与窄脉冲在声场方面的区别    二、宽脉冲与窄脉冲在探伤中的特点                                                 |     |
| 三、宽脉冲与窄脉冲的产生                                                                          |     |
| 第五节 林状回波和应力引起的声波折射 .....                                                              | 153 |
| 一、林状回波    二、应力引起的声波折射                                                                 |     |
| 第六节 缺陷状况对缺陷波波高的影响 .....                                                               | 155 |
| 一、缺陷形状的影响    二、缺陷方位的影响    三、缺陷表面粗糙度的影响                                                |     |
| 四、缺陷波的指向性    五、缺陷性质的影响                                                                |     |
| 第七节 外界高频信号和超声波对探伤的干扰 .....                                                            | 159 |
| 第六章 规则形状反射体的反射波波高及其在探伤中的应用 .....                                                      | 161 |
| 第一节 AVG图 .....                                                                        | 161 |
| 一、原理    二、实用AVG图的绘制    三、斜探头AVG图                                                      |     |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 第二节 AVG图的应用 .....                                  | 169 |
| 一、直探头探伤中应用AVG图的几种方法    二、斜探头探伤中应用AVG图的方法           |     |
| 三、影响AVG法准确性的因素    四、应用AVG法的条件                      |     |
| 第三节 各种规则形状反射体的反射波波高及其应用 .....                      | 177 |
| 一、纵波反射    二、横波反射    三、应用举例    四、长横孔的AVG图           |     |
| 第七章 探伤法 .....                                      | 182 |
| 第一节 纵波探伤法 .....                                    | 182 |
| 一、扫描速度的调整和缺陷位置的判断    二、缺陷大小的确定    三、缺陷的定性          |     |
| 四、多次反射法    五、双探头和双晶片探头法                            |     |
| 第二节 横波探伤法 .....                                    | 195 |
| 一、探测条件的确定    二、扫描速度的调整    三、缺陷位置的确定    四、缺陷的定量     |     |
| 五、缺陷的定性    六、焊缝探伤                                  |     |
| 第三节 表面波探伤法 .....                                   | 225 |
| 一、表面波的性质    二、表面波的产生    三、人工缺陷对表面波的反射    四、棱边的反射   |     |
| 五、影响表面波传播的其他因素    六、表面波探伤的应用                       |     |
| 第四节 板波探伤法 .....                                    | 235 |
| 一、板波的种类    二、板波的相速度与群速度    三、板波的产生    四、兰姆波传播的特点   |     |
| 五、板波探伤的一般程序                                        |     |
| 第五节 水浸探伤法 .....                                    | 241 |
| 一、水浸法的原理和特点    二、水浸法中声波的传播情况    三、界面波触发的应用         |     |
| 四、水浸法中需要注意的几个问题                                    |     |
| 第八章 发电厂几种部件的超声波探伤 .....                            | 247 |
| 第一节 紧固螺栓的探伤 .....                                  | 247 |
| 一、探伤方法    二、裂纹波的鉴别    三、假信号的识别    四、实例             |     |
| 第二节 汽轮机叶轮轴向键槽的探伤 .....                             | 254 |
| 一、叶轮轴向键槽的结构和裂纹产生的原因    二、探伤方法    三、裂纹波的特征          |     |
| 四、假信号的识别    五、辅助探测    六、探伤步骤    七、实例               |     |
| 第三节 汽轮机叶轮轮缘小脚的探伤 .....                             | 266 |
| 一、探伤原理    二、探头的选择    三、探测规范    四、波形分析              |     |
| 第四节 汽轮机叶片的探伤 .....                                 | 270 |
| 一、叶片工作部分裂纹的检查    二、叶片根部裂纹的检查                       |     |
| 第五节 铆胀接锅炉汽包的探伤 .....                               | 282 |
| 一、苛性脆化损坏的特点    二、探伤的准备工作    三、探伤方法                 |     |
| 第六节 管道焊缝的探伤 .....                                  | 286 |
| 一、管道焊缝的结构型式及根部特点    二、探头与试块    三、探伤方法    四、探伤的一般程序 |     |
| 五、联箱堵头焊缝的探伤                                        |     |
| 第七节 小径薄壁管焊缝的探伤 .....                               | 302 |
| 一、双晶片斜探头的设计与制作    二、试块    三、探伤方法                   |     |
| 第九章 超声检测技术有关问题 .....                               | 309 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一节 声速测量 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 309 |
| 一、用超声波探伤仪测量声速    二、用超声波测厚仪测量声速                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
| 第二节 超声波衰减系数测定 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 311 |
| 一、概述    二、衰减系数的测量方法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 第三节 超声波测厚 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 313 |
| 一、共振式测厚仪    二、脉冲反射式测厚仪                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
| 第四节 超声波测量液位和流量 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 319 |
| 一、超声波测量液位    二、超声波测量流量                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
| 第五节 金属件超声检测的有关问题 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 325 |
| 一、钢    二、铸钢    三、铸铁    四、轻金属    五、铜和铜的合金    六、其<br>他有色金属    七、硬金属和其他烧结金属                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
| 第十章 超声波探伤仪 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 332 |
| 第一节 脉冲反射式超声波探伤仪的原理和显示方式 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 333 |
| 一、脉冲反射式超声波探伤仪的原理    二、缺陷的显示方式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
| 第二节 A型显示脉冲反射式超声波探伤仪 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 336 |
| 一、同步电路    二、发射电路    三、接收电路    四、时基电路    五、延迟电<br>路    六、示波管电路    七、电源电路                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
| 第三节 探伤仪性能及其测试方法 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 353 |
| 一、阻塞特性    二、灵敏度(增益余量)    三、动态范围    四、接收电路频带<br>五、衰减器特性                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
| 第四节 CTS-8A型和CTS-15型探伤仪线路分析 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 356 |
| 一、CTS-8A型探伤仪线路分析    二、CTS-15型探伤仪线路分析                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
| 第五节 探伤仪的维护和修理 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 362 |
| 一、探伤仪的使用和维护    二、探伤仪的修理                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
| 第六节 成像法简介 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 366 |
| 一、超声电视法    二、超声全息成像法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
| 附录 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 368 |
| 附录一 有关公式、数据和图表 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 368 |
| 一、流体中波动方程的一般形式    二、固体中波动方程的一般形式    三、速度势<br>四、波动方程式的解    五、平面波的解    六、平面波在一般坐标系中的公式<br>七、复数表示和符号法    八、柱面波的解    九、球面波的解    十、求面声<br>源前任意点声压的方法    十一、各种声源的声场及AVG图    十二、固体中声<br>源的指向性    十三、群声源的指向性    十四、流体中界面的反射和折射<br>十五、固体中界面的反射和折射    十六、固体自由界面的反射    十七、不同<br>泊松比材料的反射    十八、液体到固体的反射和折射    十九、固体到液体的<br>反射和折射    二十、各种物质界面的声压反射率    二十一、第一、三介质中<br>有第二介质层时的反射和透射    二十二、平面缺陷的反射(液体中的刚体)<br>二十三、圆柱形缺陷和球形缺陷的反射(液体中的刚体)    二十四、横波声强<br>度、切应力及质点位移振幅之间的关系    二十五、参考用表    二十六、板波 |     |
| 附录二 国外超声波探伤质量评定标准简介 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 408 |
| 附录三 超声波探伤术语(附英文) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 428 |
| 主要参考资料 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 437 |

# 第一章 超 声 波

## 第一节 振 动 和 波

### 一、振动学基础

#### (一) 谐振动

物体在一定位置附近作来回重复的运动,称为振动。例如摆的运动、汽缸中活塞的运动、弹簧振子的运动等,都是可以直接看到的振动。又例如一切发声体的运动、在高频电压激励下压电晶体的运动、固体中分子的热运动等,则是不易或不能直接看到的振动。

相互间由弹性力连系着的质点所组成的物质,称为弹性介质。需要进行超声检验的大量金属及非金属固体构件都是弹性介质。我们可以认为弹性介质是由相互间用小弹簧连系着的质点所组成,如图1-1所示。若这种介质中任何一个质点离开了平衡位置,则会产生使它恢复到平衡位置的力。

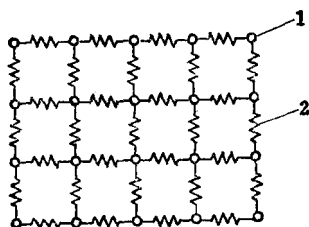


图 1-1 弹性介质的模型

1—质点; 2—小弹簧

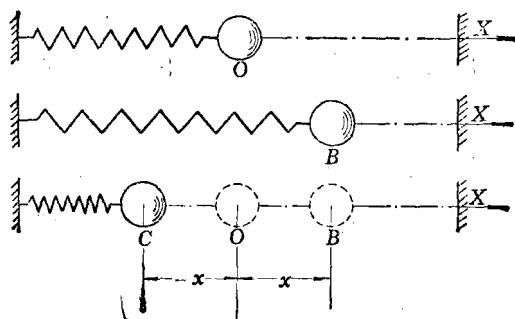


图 1-2 弹簧振子的振动

可以用弹簧振子来说明谐振动。如图1-2所示,轻弹簧左端固定,右端系一物体。略将物体移动后,物体就在弹性力的作用下左右来回运动。这种振动系统称为弹簧振子。为了使讨论较为简单,把弹簧振子穿在光滑的水平玻璃棒上,以避免重力对运动的影响。设物体在位置O时,弹簧作用在物体上的力是零,这个位置就是物体的平衡位置。若把物体向右移到位置B,这时弹簧被拉长,相应地有指向左方即指向平衡位置的弹性力作用在物体上,使物体返回平衡位置。当物体回到平衡位置时,弹簧的弹性力等于零,但物体在返回时获得了速度,由于惯性,使它继续向左移动。当物体在平衡位置左边时,弹簧被压缩,物体所受的弹性力是指向右方,即指向平衡位置。这时弹性的作用是阻碍物体运动,直至使物体停止在位置C。在这以后,物体在弹性力的作用下向右移动,情况和上述向左移动相似。这样,在弹簧的弹性力作用下,物体就在平衡位置的左右作重复运动,即振动。

取平衡位置 $O$ 为 $x$ 轴的原点, 并设 $x$ 轴的正向向右。根据胡克定律<sup>①</sup>, 物体所受的弹性力 $F$ 与物体位移 $x$  (即弹簧的变形量) 的关系为:

$$F = -kx$$

式中 $k$ 是弹簧的弹性系数, 负号表示力和位移的方向相反。设物体的质量为 $m$ , 根据牛顿第二定律<sup>②</sup>, 它的加速度 $a$ 为:

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x$$

因为 $k$ 和 $m$ 都是正数, 所以它们的比值可以用一恒量 $\omega$ 的平方来表示, 即:

$$k/m = \omega^2 \quad (1-1)$$

代入上式, 得:

$$a = -\omega^2 x \quad (1-2)$$

或

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (1-2a)$$

所以上述振动的特征是加速度和位移成正比且方向相反, 这种振动称为谐振动。由上可知, 物体在弹性力作用下发生的运动是谐振动。

根据微分方程理论, 式(1-2a)的解为:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

式中 $A$ 和 $\varphi$ 是两个恒量, 它们的物理意义和数值将在后面讨论。又因为 $\cos(\omega t + \varphi) = \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$ , 如果令 $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$ 则式(1-3)可改写为:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi') \quad (1-3a)$$

式(1-3)或(1-3a)都是谐振动的运动方程式(位移 $x$ 与时间 $t$ 的关系式), 简称谐振方程式。因此, 物体作谐振动时, 位移是时间的正弦或余弦函数。本节中我们均用余弦函数来表示谐振动。

下面我们用几何的方法来研究谐振动中位移与时间的关系。如图1-3所示, 设有质点 $M$ 以角速度 $\omega$ 在半径为 $A$ 的圆周上作匀速圆周运动, 那么它在直径 $BC$ 上的投影点 $P$ , 就在 $BC$ 上作来回的运动。设 $t=0$ 时,  $M$ 点在 $M_0$ 处, 半径 $OM_0$ 和 $OB$ 间的夹角是 $\varphi$ 。经过时间 $t$ 后,  $M_0$ 点到 $M$ 处, 半径 $OM$ 和 $OB$ 间的夹角变为 $\omega t + \varphi$ , 这时投影点 $P$ 离开圆心的位移为:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

由上可知, 当质点作匀速圆周运动时, 它在直径上的投影点的运动是谐振动。

应该注意, 谐振动是指 $M$ 点的投影点 $P$ 在直线 $BC$ 上的运动, 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的意义, 所以称 $M$ 点为辅助点, 称它所走的圆为参考圆。

① 胡克定律: 物体在弹性形变范围内, 作用力 $F$ 与形变 $x$ 成正比, 即:

$$F = kx$$

对于一定固体在弹性极限范围内 $k$ 是常数。

② 牛顿第二定律: 物体所得到的加速度 $a$ 与作用于此物体上的力 $F$ 成正比, 与物体的质量 $m$ 成反比, 如果选用适当的单位, 可使比例系数为1, 即:

$$F = ma$$

根据式 (1-3) 可以得出谐振动质点的振动速度  $v$  及加速度  $a$ ,

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-4)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-5)$$

可见, 当质点作谐振动时, 它的振动速度及加速度都是时间  $t$  的正弦或余弦函数。

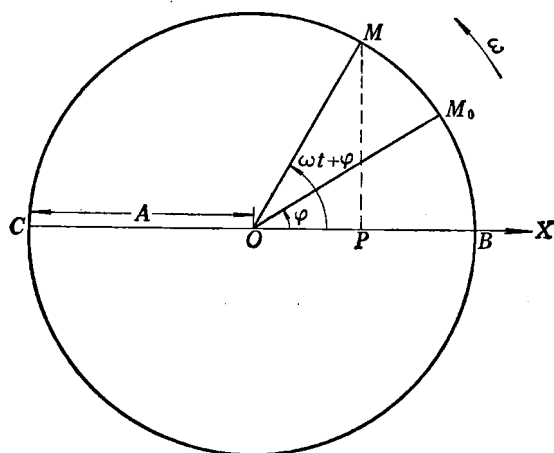


图 1-3 质点谐振动的参考圆

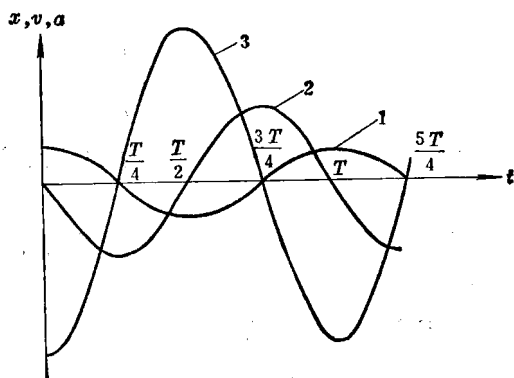


图 1-4 谐振动的位移、速度和加速度与时间的关系

(1) 位移曲线; (2) 速度曲线; (3) 加速度曲线

如果以时间  $t$  为横座标, 位移  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  为纵座标, 可画出三条曲线, 如图 1-4 所示, 图中假定  $\varphi = 0$ 。从三条曲线可以清楚地看出谐振动中的位移、速度和加速度的周期性。

谐振动是最简单最基本的振动。

## (二) 谐振动中的振幅、周期、频率和相位

下面讨论谐振方程式中各参量的物理意义。式 (1-3) 中的  $A$  称为振幅, 它是振动质点离开平衡位置的最大位移。 $(\omega t + \varphi)$  称为振动的相位。由式 (1-3) 可知, 当  $A$  为已知时, 根据相位的大小, 可以决定振动质点在某一时刻  $t$  的位置。而且, 由于振动是质点作往复的周期性运动, 所以在一个完全振动的过程中 (即来回一次), 运动轨迹上任何一个位置, 质点都将两次经过它, 但每次通过的方向不同。振动的相位不仅决定振动质点在任一时刻  $t$  的位置, 而且也决定了这时质点的运动方向, 所以相位表示了振动物体的运动状态。恒量  $\varphi$  是  $t = 0$  时的相位, 称为振动的初相位。从图 1-3 可知,  $\varphi$  的数值表示物体在开始振动时的运动状态。

对于辅助点  $M$  来说,  $\omega$  是角速度; 对于谐振动讲,  $\omega$  称为角频率。辅助点  $M$  旋转一周所需要的时间是:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

它就是振动质点完成一次完全振动 (来回一次) 所需的时间, 称为振动的周期。周期

的倒数称为频率, 用  $f$  表示,

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

或

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  表示单位时间内振动质点所作完全振动的次数。其单位为周/秒, 称为“赫”(Hz)。

角频率表示振动质点在  $2\pi$  秒时间内所作振动的次数。谐振方程式也常用周期或频率来描述:

$$x = A \cos \left( \frac{2\pi}{T} t + \varphi \right)$$

或

$$x = A \cos(2\pi f t + \varphi)$$

由上所述可知, 谐振动的周期(频率)、初相位和振幅三个参量确定后, 就可完全确定一个谐振动。

当振动系统作谐振动时, 它的周期或频率完全由系统本身性质所决定, 我们称其为固有周期或固有频率。

### (三) 振动的合成

在某种运动中, 质点同时参与两个振动, 例如有两个超声波同时传播到介质中的某一点时, 该处质点就同时参与了两个振动。这时质点所作的运动就是两个振动的合成。

#### 1. 同一直线同周期振动的合成

设有两个各自独立的谐振动在同一直线上进行, 它们的周期相同, 即角频率  $\omega$  相同, 振幅和初相位不同, 分别为  $A_1$ 、 $A_2$  和  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 则在任何时刻  $t$  的位移分别为:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

这两个振动既然在同一直线上进行, 则合振动的位移  $x$  就等于上述两个位移的代数和, 即:

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

利用三角函数关系将上式化成:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-6)$$

式中  $A$  和  $\varphi$  分别为合振动的振幅和初相位, 数值由下两式决定:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (1-6a)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad (1-6b)$$

上述结果说明, 由两个周期相同并在同一直线上进行的谐振动所合成的运动, 它的周期等于原来振动的周期, 振幅和初相位由原来两个振动的振幅和初相位所决定。

上述结果可以用矢量图表示, 如图1-5所示。

从式(1-6a)看出, 合振动的振动与原来两个振动的相位差  $(\varphi_2 - \varphi_1)$  有关。下面讨论两个特例, 它是后面讨论超声波干涉和衍射的基础。

(1) 相位相同, 即相位差  $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 2n\pi$ ,  $n$  等于零或正整数。这时的  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

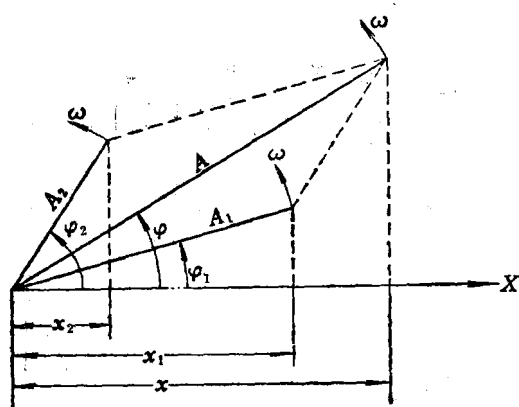


图 1-5 两个同一直线同周期谐振动的合成

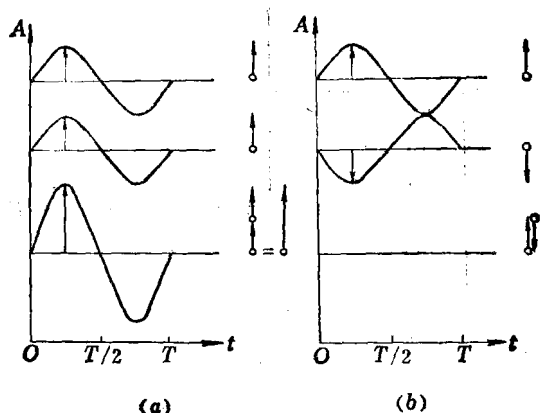


图 1-6 振动的合成

(a)两个分振动的相位相同, (b)两个分振动的相位相反

$= 1$ , 按式 (1-6a) 得:

$$A = A_1 + A_2$$

即合成振动的振幅等于原来两个振动的振幅之和, 如图1-6a所示。它是合成振幅可能达到的最大值。

(2) 相位相反, 即相位差  $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm(2n+1)\pi$ ,  $n$  等于零或正整数, 这时  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ , 式 (1-6a) 变成:

$$A = |A_1 - A_2|$$

即合成振动的振幅等于原来两个振动的振幅之差 (振幅在物理意义上是正量, 所以在式中取绝对值)。它是合振幅可能达到的最小值。如果在这种情况下, 若  $A_1 = A_2$ , 则  $A = 0$ , 即振动合成的结果, 使质点处于静止状态, 如图1-6b所示。

上述结果表明, 两振动的相位差对合成振动起着重要的作用。

## 2. 相互垂直振动的合成

设两个谐振动分别在相互垂直的  $X$  轴和  $Y$  轴上进行, 位移方程为:

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

在任何时刻  $t$ , 质点的位置是  $(x, y)$ ,  $t$  改变时, 位置  $(x, y)$  也改变。所以上述两方程就是用参量  $t$  来表示的质点运动轨迹的参变方程。如果把参量  $t$  消去, 就得到质点振动轨迹的直角坐标方程:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - 2 \frac{xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1-7)$$

这个方程是椭圆方程式。因为质点的位移  $x$  和  $y$  在有限范围内移动, 所以椭圆的轨迹不会超出以  $2A_1$  和  $2A_2$  为边的矩形范围之外, 如图1-7所示。椭圆轨迹的形式由相位差  $(\varphi_2 - \varphi_1)$  而定。图1-8示出了八种不同相位差的合成图形。

上面例子反过来可以说明, 任何一个直线谐振动、椭圆振动或匀速圆周运动都可以分解为两个互相垂直的谐振动。

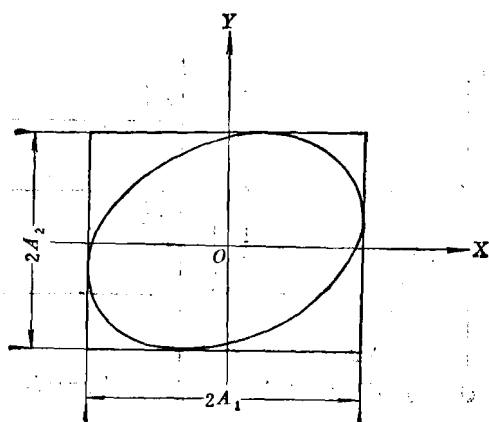


图 1-7 两个相互垂直同周期谐  
振动的合成

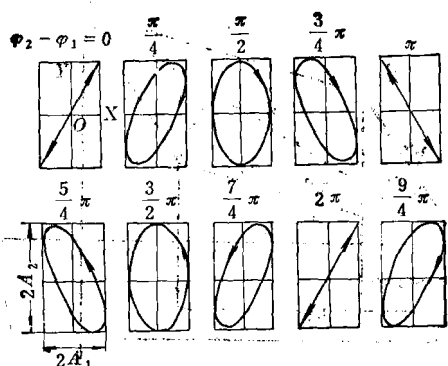


图 1-8 两个相互垂直同周期谐振动不同  
相位差的合成

## 二、波的一般概念

### (一) 机械波的产生和传播

波动是物质的一种运动形式，振动是产生波动的根源。波动可以分成两大类：一类是机械波，它是由于机械振动在弹性介质中引起的波动过程，例如水波、声波、超声波等；另一类是电磁波，它是由于电磁振荡所产生的变化电场和变化磁场在空间的传播过程，例如无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线等。

下面我们来讨论机械波的产生和传播。在弹性介质中，任何一个质点作机械振动时，因为这个质点与其邻近的质点间有相互作用力连系着，所以它的振动将传递给与之邻近的质点，使此邻近的质点也同样地发生振动，然后振动又传给下一质点，依此类推，这样振动就由近及远向各个方向以一定的速度传播出去，从而形成了机械波。因此机械波的产生，首先要有作机械振动的物体作为波（声）源，其次要有能够传播这种机械振动的介质。

例如，把石块投入平静的水中，在水面上可以看到一圈圈向外扩展的水波。

又如手握绳子的一端上下振动，可以看到绳子形成一个凸起的状态，然后又形成一个下凹的状态，凸凹起伏的状态就沿绳子传播下去，形成如图 1-9 所示的有规律的横波波动的过程。

再如图 1-10 所示，用手迅速而有节奏地推压弹簧的一端，可以看到弹簧上有的部分密集，有的部分稀疏，疏密相间，沿着弹簧向前传播，这就形成了弹性纵波。

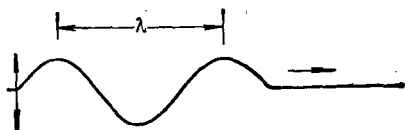


图 1-9 绳子上的横波

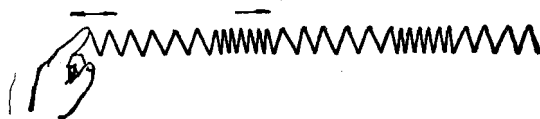


图 1-10 弹簧上的纵波

下面简要地说明弹性波形成的大概情况。图1-11为纵波传播示意图，其中①到⑬13个小圆圈代表介质质点，它们之间有弹性力连系着。第一行表示声源尚未振动但将要振动的那一瞬间，即  $t = 0$  时的各质点的位置，此时各质点都在平衡位置上。当声源作机械振动后，质点①受到向右的外力，开始向右移动。经过一段时间 ( $t = T/4$ ， $T$  为振动周期)，质点①已达到向右的最大位移，正要向左运动，而质点④受到弹性力的作用开始向右移动。再经过一段时间 ( $t = T/2$ )，质点①已回到平衡位置，但因惯性继续向左运动，而质点⑦受到弹性力的作用开始向右运动。当  $t = 3T/4$  时，质点①达到向左的最大位移，弹性力使质点⑩将要开始向右运动。当  $t = T$  时，质点①回到平衡位置，已完成了一个周期的振动，弹性力使质点⑬将要开始向右运动。由此可见，对纵波而言，介质中各质点沿着波的传播方向振动，形成稠密与稀疏相间的波形。

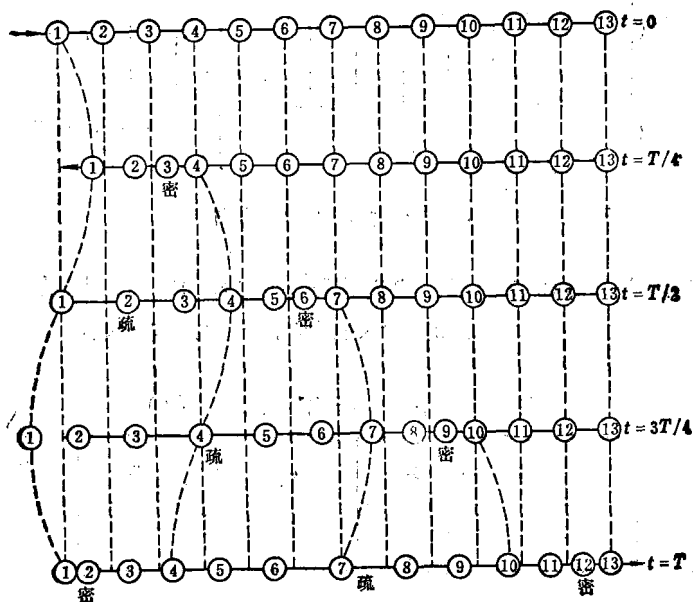


图 1-11 纵波传播示意图

图1-12为横波传播示意图，13个小圆圈同样表示着介质中沿某一直线均匀排列着的质点，质点间有弹性力连系着。第一行表示  $t = 0$  时的各质点的位置，此时各质点都在平衡位置上。当声源辐射超声波以后，质点①受到向上的外力，开始向上移动，经过一段时间，即  $t = T/4$  时，质点①已达到向上的最大位移，正要向下运动，而质点④受到弹性力的作用，开始向上移动。再经过一段时间，即  $t = T/2$  时，质点①已回到平衡位置，但因惯性继续向下运动，而质点⑦受到弹性力的作用开始向上运动。当  $t = 3T/4$  时，质点①达到向下的最大位移，弹性力使质点⑩开始向上运动。当  $t = T$  时，质点①回到平衡位置，完成了一个周期的振动。弹性力使质点⑬开始向上运动。由此可见，对横波而言，介质中各质点的振动方向与波的传播方向垂直，形成具有波峰和波谷的波形。

声波是弹性介质的机械波。人们所能听到的声波频率范围是  $20 \sim 2 \times 10^4$  赫。声波的频