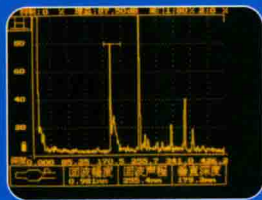




轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

超声波 检测技术及应用

万升云 等编著



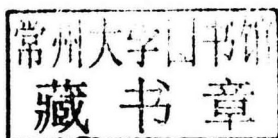
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

超声波检测技术及应用

万升云 等编著



中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司 组织编写

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

本书是由超声波检测人员资格鉴定考核的培训教材,按照 ISO/TR 25107《无损检测人员培训大纲》和 EN473、ISO9712 及 GB/T9445《无损检测人员资格鉴定与认证》标准要求编写。

本书共 9 章,主要内容包括:超声波检测概述,超声波检测设备及器材,超声波检测方法和通用检测技术,铸、锻件超声波检测,板材、棒材超声波检测,焊接接头超声波检测,轨道交通装备典型零部件超声波检测应用,超声波检测工艺及质量控制,超声波检测实验等。为了更好的掌握教材内容,本书还收录了国内外常用超声波检测标准等内容。

本书既符合欧盟及国际标准要求,且与国内及行业实际相适应;既注重理论与实践应用的结合,又紧跟现代科技技术的发展,并介绍了国内、外超声波检测的新观点和新技术。本书除作为超声波检测人员资格鉴定考核培训教材外,也可供各企业生产一线人员、质量管理人员、安全监督人员、工艺技术人员、研究机构及大专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

超声波检测技术及应用 / 万升云等编著. —北京:

机械工业出版社, 2017.4

轨道交通装备无损检测人员资格培训及认证系列教材

ISBN 978-7-111-56717-2

I. ①超… II. ①万… III. ①超声检验—技术培训—
教材 IV. ①TG115.285

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 073501 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张维官 责任编辑:张维官

版式设计:张 硕 封面设计:桑晓东

北京联兴盛业印刷股份有限公司印制

2017 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

185mm×260mm·22.25 印张·8 插页·480 千字

0001—2500 册

ISBN 978-7-111-56717-2

定价:45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

封面无防伪标均为盗版

编写人员名单

万升云 贾 敏 李来顺 段怡雄 孙元德 章文显
郑小康 高金生 宋以冬 石胜平 周庆祥 鲁传高
苏 杰 尹 利 李振楠

前 言

超声波检测是无损检测常规方法之一，也是应用最广泛、最成熟的方法。目前广泛应用于轨道交通、航空、军工、造船、冶金、机械等行业，在轨道交通装备制造、检修、运行、产品质量的保证、提高生产率、降低成本等领域正发挥着越来越大的作用，已成为保证轨道交通装备质量的有力手段。

超声波检测技术应用的正确性、规范性、有效性及可靠性，一方面取决于所采用的技术和装备水平，另一方面更重要的是取决于检测人员的知识水平和判断能力。无损检测人员所承担的职责要求他们具备相应的无损检测理论知识和综合技术素质。因此，必须制订一定的规则和程序，对超声波检测相关人员进行培训与考核，鉴定、认证其是否具备这种资格。

为进一步提高轨道交通装备行业无损检测技术保障水平和能力，研究并建立与国际惯例接轨，适应新时期发展需要的轨道交通装备行业合格评定制度势在必行。鉴于有关超声波检测方面的著作，无论品种还是数量，国内外已经非常多了。但适用于轨道交通装备行业无损检测人员资格鉴定与认证要求的教材，尤其是供培训使用及参考的资料几乎没有。为此，我们编著了这本教材。

全教材共分超声波检测概述，超声波检测设备及器材，超声波检测方法和通用检测技术，铸、锻件超声波检测，板材、棒材超声波检测，焊接接头超声波检测，超声波检测工艺及质量控制、超声波检测实验等九章。本书通俗易懂，简明扼要，图文并茂，是广大超声波检测人员培训、日常检验必备工具书，也可作为设计、工艺、管理及检验人员了解超声波检测的参考资料。

本教材结合技能操作人员的特点，力求实用，并尽量与欧盟及国际上通行的各国无损检测等级技术要求相适应。

由于编者水平有限，难免存在诸多不足和错误之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本教材能够为轨道交通装备行业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本教材编著过程中，参考了国内同类教材和培训资料，得到了中国中车各级领导及国内、外同行专家的指导和支持，谨此致谢！

编者

2017年4月16日

目录

前言

1 超声波检测概述	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	3
1.1.3 次声波、声波和超声波	5
1.2 波的类型	6
1.2.1 按质点的振动方向分类	6
1.2.2 按波阵面的形状分类	8
1.2.3 按振动的持续时间分类	10
1.3 超声波的传播速度	10
1.3.1 固体介质中的纵波、横波与表面波声速	11
1.3.2 板波声速	14
1.3.3 液体、气体介质中的声速	14
1.4 波的叠加、干涉、衍射和惠更斯原理	15
1.4.1 波的叠加与干涉	15
1.4.2 驻波	15
1.4.3 惠更斯原理	16
1.5 超声场的特征值	18
1.5.1 声压 P	18
1.5.2 声阻抗 Z	19
1.5.3 声强 I	19
1.5.4 贝尔与分贝	20
1.6 超声平面波在大平界面上垂直入射的行为	22
1.6.1 超声波在单一的平面界面的反射和透射	22
1.6.2 多层平面界面垂直入射	27
1.7 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射	29
1.7.1 斜入射时界面上的反射、折射和波形转换	29

1.7.2	临界角	32
1.7.3	斜入射时反射系数、折射系数和往复透射率	33
1.7.4	超声波在规则界面上的反射、折射和波形转换规律	36
1.8	超声波的聚焦与发散	39
1.8.1	声压距离公式	39
1.8.2	球面波在平界面上的反射与折射	40
1.8.3	平面波在曲界面上的反射与折射	41
1.8.4	球面波在曲界面上的反射和折射	43
1.9	超声波发射声场及规则反射体的回波声压	46
1.9.1	纵波发射声场	46
1.9.2	横波发射声场	57
1.9.3	聚焦声源发射声场	61
1.9.4	规则反射体的回波声压	64
1.10	超声波的衰减	69
1.10.1	衰减的原因	69
1.10.2	衰减方程与衰减系数	71
1.10.3	衰减系数的测定	72
2	超声波检测设备及器材	75
2.1	超声波检测仪	75
2.1.1	超声波检测仪概述	75
2.1.2	A型脉冲反射式超声波检测仪的一般工作原理	76
2.1.3	仪器主要开关旋钮的作用及其调整	80
2.1.4	数字式检测仪	82
2.2	铁路专用超声波检测设备	84
2.2.1	A型显示超声波自动检测机	84
2.2.2	铁路车辆轮轴B扫描或C扫描超声波自动检测机	85
2.2.3	轮轴相控阵超声波自动检测机介绍	87
2.2.4	车轮轮辋超声波数字成像检测系统	88
2.3	相控阵超声波检测仪	90
2.3.1	相控阵超声波检测技术原理	90
2.3.2	相控阵探头的发射与接收	91
2.3.3	相控阵超声波的扫描方式	91
2.3.4	相控阵检测仪	92
2.4	超声波探头	92
2.4.1	压电效应	92
2.4.2	压电材料的主要性能参数	93
2.4.3	探头的种类和结构	95

2.4.4 探头型号	103
2.5 耦合剂	104
2.5.1 耦合剂的作用	104
2.5.2 耦合剂要求	104
2.5.3 耦合剂及其声阻抗	104
2.5.4 影响耦合的主要因素	105
2.6 试块	106
2.6.1 试块的作用	106
2.6.2 试块的分类	107
2.6.3 国内外常用试块简介	107
2.7 仪器和探头的性能	116
2.7.1 超声波检测仪器的主要性能	117
2.7.2 探头的主要性能	118
2.7.3 超声波检测仪器和探头的组合性能	119
3 超声波检测方法和通用检测技术	121
3.1 超声波检测方法概述	121
3.1.1 按原理分类	121
3.1.2 按波形分类	124
3.1.3 按探头数目分类	126
3.1.4 按探头接触方式分类	127
3.2 仪器与探头的选择	129
3.2.1 检测仪的选择	129
3.2.2 探头的选择	129
3.3 表面耦合损耗的测定和补偿	131
3.3.1 耦合损耗的测定	131
3.3.2 补偿方法	132
3.4 检测仪的调节	132
3.4.1 扫描速度的调节	132
3.4.2 检测灵敏度的调节	136
3.5 缺陷位置的测定	138
3.5.1 纵波（直探头）检测时缺陷定位	138
3.5.2 表面波检测时缺陷定位	138
3.5.3 横波检测平面时缺陷定位	138
3.5.4 横波周向探测圆柱曲面时缺陷定位	140
3.6 缺陷大小的测定	144
3.6.1 当量法	144
3.6.2 测长法	147

3.6.3 底波高度法	150
3.7 缺陷自身高度的测定	150
3.7.1 表面波波高法	151
3.7.2 表面波时延法	151
3.7.3 横波串列式双探头法	152
3.7.4 相对灵敏度20dB法	153
3.7.5 衍射波法	153
3.7.6 端部最大回波法	154
3.8 影响缺陷定位、定量的主要因素	155
3.8.1 影响缺陷定位的主要因素	155
3.8.2 影响缺陷定量的因素	157
3.9 缺陷性质分析	160
3.9.1 根据加工工艺分析缺陷性质	161
3.9.2 根据缺陷特征分析缺陷性质	161
3.9.3 根据缺陷波形分析缺陷性质	161
3.9.4 根据底波分析缺陷的性质	165
3.9.5 缺陷类型识别和性质估判	165
3.10 非缺陷回波的判别	167
3.10.1 迟到波	167
3.10.2 61° 反射	168
3.10.3 三角反射	170
3.10.4 其他非缺陷回波	170
3.11 侧壁干涉	172
3.11.1 侧壁干涉对检测的影响	173
3.11.2 避免侧壁干涉的条件	173
3.12 表面波检测	175
3.12.1 表面波的性质	175
3.12.2 表面波的产生	176
3.12.3 人工缺陷对表面波的反射	177
3.12.4 棱边的反射	177
3.12.5 影响表面波传播的其他因素	177
3.13 板波检测	179
3.13.1 板波的种类	179
3.13.2 板波的产生	180
3.13.3 兰姆波的传播特点	181
3.13.4 板波检测的一般程序	181
3.14 AVG曲线	182

3.14.1	AVG方法概述	182
3.14.2	如何理解AVG方法以平底孔作为当量反射体	182
3.14.3	AVG方法的种类	183
3.14.4	AVG曲线的应用	185
3.14.5	AVG曲线板的简述	191
3.14.6	AVG曲线图的限制	194
4	铸、锻件超声波检测	198
4.1	概述	198
4.1.1	铸、锻件的基础知识	198
4.1.2	常见缺陷	199
4.1.3	铸、锻件分类	201
4.1.4	轨道交通装备用车轴相关知识	202
4.1.5	超声波检测目的与时机	204
4.2	铸件超声波检测	204
4.2.1	铸件的特点	204
4.2.2	铸件超声波检测的特点	205
4.2.3	检测技术要点	205
4.3	锻件超声波检测	208
4.3.1	锻件检测方法概述	208
4.3.2	轴类锻件的检测	208
4.3.3	盘类锻件的检测	209
4.3.4	筒类锻件的检测	209
4.3.5	检测技术要点	210
4.3.6	扫查	212
4.3.7	缺陷位置和大小的确定	212
4.3.8	质量评定	213
5	板材、棒材超声波检测	214
5.1	板材超声波检测	214
5.1.1	钢板加工及常见缺陷	214
5.1.2	检测方法	214
5.1.3	探头与扫查方式的选择	217
5.1.4	探测范围和灵敏度的调整	218
5.1.5	缺陷的判别与测量	220
5.1.6	钢板质量分级	220
5.2	棒材超声波检测	220
5.2.1	棒材及棒材中的主要缺陷	220

5.2.2	棒材超声波检测的特点	220
5.2.3	棒材超声波检测技术	223
6	焊接接头超声波检测	225
6.1	焊接基础知识	225
6.1.1	焊接方法	225
6.1.2	焊接接头形式	226
6.1.3	焊接坡口形式	228
6.1.4	常见焊接缺陷	229
6.2	焊接接头超声波检测通用技术及要求	230
6.2.1	检测方法和检测等级	230
6.2.2	检测区域和检测移动区域	231
6.2.3	探头	232
6.2.4	耦合剂	234
6.2.5	超声波检测仪扫描速度的调节	234
6.2.6	参考灵敏度的设定方法和距离-波幅曲线 (DAC)	234
6.2.7	扫查方向要求	235
6.2.8	常用的扫查方式	236
6.2.9	传输修正	237
6.2.10	缺陷回波性质判断	238
6.2.11	非缺陷回波的分析	241
6.2.12	缺陷的定量	242
6.3	对接接头检测	242
6.3.1	检测条件的选择	243
6.3.2	扫查	244
6.3.3	质量评定	244
6.4	其他形式接头的超声波检测	247
6.4.1	T形接头、角接头超声波检测	247
6.4.2	管座接头超声波检测	248
6.5	其他材料焊接接头超声波检测	249
6.5.1	铝合金焊接接头超声波检测	249
6.5.2	奥氏体不锈钢焊接接头超声波检测	250
7	轨道交通装备典型零部件超声波检测应用	253
7.1	车轴超声波检测	253
7.1.1	车轴缺陷的种类及其产生的原因	253
7.1.2	车轴超声波检测技术要求	255
7.1.3	检测工艺方法	256
7.1.4	缺陷波形特征及分析	260

7.1.5 质量控制	264
7.2 轮对压装部位疲劳裂纹超声波检测	265
7.2.1 疲劳裂纹的产生和危害	265
7.2.2 检测方法	266
7.2.3 检测工艺技术	266
7.2.4 常见波形分析	269
7.2.5 质量判定	276
7.3 空心轴超声波检测	276
7.3.1 空心车轴超声波检测方法	277
7.3.2 检测技术要求	277
7.3.3 质量标准	279
7.4 车轴轮座接触不良的超声波检测	280
7.4.1 接触不良的危害	280
7.4.2 接触不良的超声波检测	280
7.4.3 接触不良反射波形分析	282
7.5 车轮超声波检测	283
7.5.1 车轮的生产流程	283
7.5.2 车轮加工和主要缺陷	283
7.5.3 探伤方法概述	283
7.5.4 检测装置	284
7.5.5 探伤系统组成	284
7.5.6 试块	284
7.5.7 质量标准	285
7.6 球墨铸铁曲轴超声波检测	285
7.6.1 球墨铸铁曲轴缺陷的种类及其产生的原因	285
7.6.2 球铁曲轴的超声波检测	287
7.6.3 波形特征	288
7.7 制动盘超声波检测	289
7.7.1 制动盘制造工艺及常见缺陷	289
7.7.2 制动盘失效机理	289
7.7.3 制动盘超声波检测要点	290
7.8 螺栓的超声波检测	291
7.8.1 螺栓的基本知识	291
7.8.2 检测方法概述	292
8 超声波检测工艺及质量控制	295
8.1 工艺文件的管理	295
8.1.1 标准和规范	295

8.1.2	工艺规程、工艺卡(单)	296
8.1.3	无损检测工艺文件	296
8.1.4	记录与报告	299
8.2	质量控制	300
8.2.1	人员的控制	301
8.2.2	无损检测设备与器材的管理	301
8.2.3	工艺文件的管理	302
8.2.4	检测环境的控制	302
8.2.5	检测参数的控制	302
9	超声波检测实验	303
9.1	仪器与直探头的综合性能测定	303
9.2	仪器与斜探头的综合性能测定	306
9.3	直探头(SPK)的应用(一)	310
9.4	传输修正的测定	311
9.5	直探头DAC曲线的制作	313
9.6	直探头(SPK)的应用(二)	314
9.7	双晶探头(SEPK)的应用	315
9.8	焊接接头的超声波检测	316
9.9	实验用试块示意图	317
附录A	国内外常用超声波检测标准目录	320
参考文献		328

1 超声波检测概述

超声波检测是目前应用最广泛的无损检测方法之一。

超声波是一种机械波，机械振动与波动是超声波检测的物理基础。超声波检测中，主要涉及到几何声学 and 物理声学中的一些基本定律和概念，如几何声学中的反射、折射定律及波形转换，物理声学中波的叠加、干涉、绕射及惠更斯原理等。深入理解几何声学和物理声学中的有关概念，掌握其中的基本定律，对于灵活运用超声波理论去解决实际检测中的各种问题无疑是十分有益的。

1.1 机械振动与机械波

宇宙间的一切物质，大至宏观天体，小至微观粒子都处于一定的运动状态，振动和波动是物质运动的基本形式。

1.1.1 机械振动

物体沿着直线或曲线在某一平衡位置附近作往复周期性的运动，称为机械振动。

日常生活中到处可以见到振动现象，如弹簧振子的运动、钟摆的运动和汽缸中活塞运动等都是可以直接觉察到的振动现象。另外，如固体分子的热运动，一切发声物体的运动以及超声波波源的运动等则是人们难以觉察到的振动现象。

物体（或质点）受到一定力的作用，将离开平衡位置，产生一个位移，该力消失后，它将回到其平衡位置；并且还要越过平衡位置移到相反方向的最大位移位置，然后返回平衡位置。这样一个完整运动过程称为一个“循环”或叫一次“全振动”。

振动是往复、周期性的运动，振动的快慢常用振动周期和振动频率两个物理量来描述，振动的强弱则用振幅来描述。

周期——振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，用 T 表示。常用单位为秒（s）。

频率——振动物体在单位时间内完成全振动的次数，称为振动频率，用 f 表示。常用单位为赫兹（Hz）。

振幅——振动物体离开平衡位置的最大距离，称为振动的振幅，用 A 表示。

由周期和频率的定义可知，二者互为倒数：

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

1. 谐振动

最简单最基本的直线振动称为谐振动，任何复杂的振动都可视为多个谐振动的合成。如图1-1所示，质点M作匀速圆周运动时，其水平投影就是一种水平方向的谐振动。质点M的水平位移y和时间t的关系可用谐振方程来描述：

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

式中 A ——振幅，即最大水平位移；
 ω ——圆频率，即1s内变化的弧度数；
 φ ——初相位，即 $t=0$ 时质点M的相位；
 $\omega t + \varphi$ ——质点M在 t 时刻的相位。

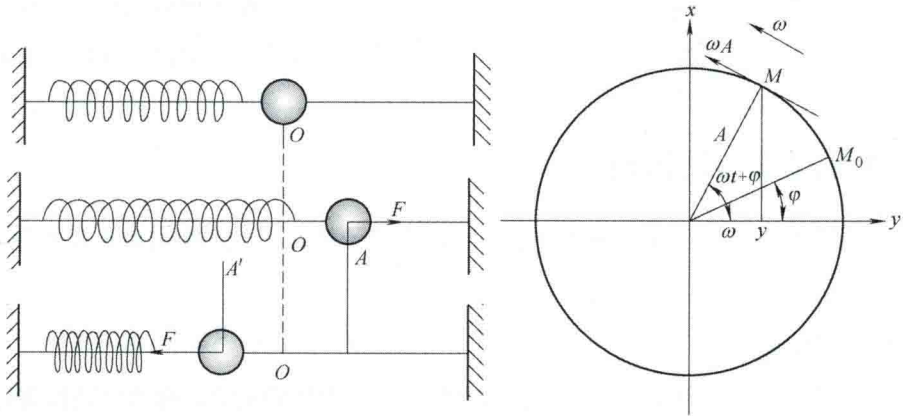


图1-1 质点谐振动参考图

谐振动方程描述了谐振动物体在任一时刻的位移情况，其特点如下：

- (1) 物体受到的回复力大小与位移成正比，其方向总是指向平衡位置，如：弹簧振子的振动，单摆与音叉的振动等。
- (2) 谐振物体的振幅不变，为自由振动，其频率为固有频率。
- (3) 由于物体做谐振动时，只有弹性力或重力做功，其他力不做功，符合机械能守恒的条件，因此谐振物体的能量遵守机械能守恒。
- (4) 在平衡位置时动能最大，势能为零；在位移最大位置时势能最大，动能为零；其总能量保持不变。

2. 阻尼振动

谐振动是理想条件下的振动，即不考虑摩擦和其他阻力的影响。但任何实际物体的振动，总要受到阻力的作用。由于克服阻力做功，振动物体的能量不断减少。同时，由于在振动传播过程中，伴随着能量的传播，也使振动物体的能量不断地减少。这种振幅或能量随时间不断减少的振动称为阻尼振动。

阻尼振动的位移与时间的关系曲线如图1-2所示。

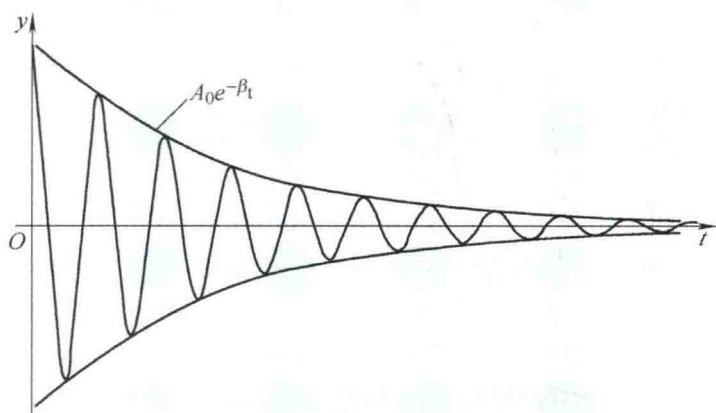


图1-2 阻尼振动

阻尼振动的振幅不断减少，而周期却不断增大。阻尼振动受到阻力作用，不符合机械能守恒。

3. 受迫振动

受迫振动是物体受到周期性变化的外力作用时所产生的振动，如汽缸中活塞的振动。

受迫振动的振幅与外力的频率有关，当外力频率与受迫振动物体固有频率相同时，受迫振动的振幅达最大值，这种现象称为共振。

受迫振动物体受到外力作用，不符合机械能守恒。

超声探头中的压电晶片在发射超声波时，一方面在高频电脉冲激励下产生受迫振动，另一方面在起振后受到晶片背面吸收块的阻尼作用，因此又是阻尼振动。压电晶片在接收超声波时同样产生受迫振动和阻尼振动。在设计探头中的压电晶片时，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，这时压电晶片的电声能量转换效率最高。

1.1.2 机械波

1. 机械波的产生与传播

振动在物体或空间中的传播过程叫做波动，简称波。波可分为机械波和电磁波两大类。

机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程，如：水波、声波、超声波等。

电磁波是交变电磁场在空间的传播过程，如：无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等。

为了简单说明机械波的产生和传播，不妨建立如图1-3所示的弹性介质模型。图中质点间以小弹簧联系在一起，这种质点间以弹性力联系在一起的介质称为弹性介质。一般固体、液体、气体都可视作弹性介质。

当外力 F 作用于质点 A 时， A 就会离开平衡位置，这时 A 周围的质点将对 A 产生弹性

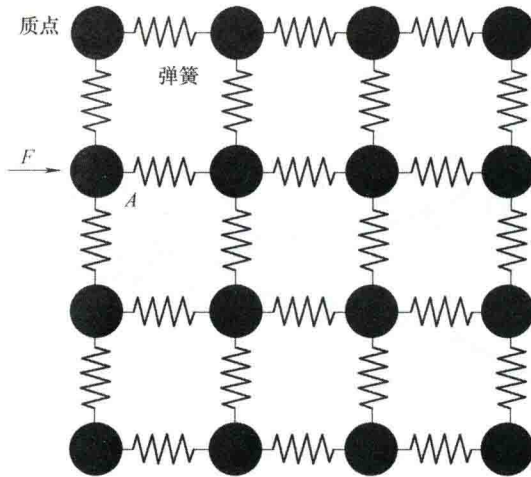


图1-3 弹性介质模型

力，使A回到平衡位置。当A回到平衡位置时，具有一定的速度，由于惯性A不会停在平衡位置，而会继续向前运动，并沿相反方向离开平衡位置，这时A又会受到反向弹性力，使A又回到平衡位置，这样质点A在平衡位置来回往复运动，产生振动。与此同时，A周围的质点也会受到大小相等方向相反的弹性力作用，使它们离开平衡位置，并在各自的平衡位置附近振动。这样弹性介质中一个质点的振动就会引起邻近质点的振动，邻近质点的振动又会引起较远质点的振动，于是振动就以一定的速度由近及远地向各个方向传播开来，从而就形成了机械波。

由此可见，产生机械波必须具备以下两个条件：

- 1) 要有作机械振动的波源。
- 2) 要有能传播机械振动的弹性介质。

振动与波动是互相关联的，振动是产生波动的根源，波动是振动状态的传播。波动中介质各质点并不随波前进，只是在各自的平衡位置附近做往复运动。

波动是振动状态的传播过程，也是振动能量的传播过程。但这种能量的传播，不是靠物质的迁移来实现的，也不是靠相邻质点的弹性碰撞来完成的，而是由各质点的位移连续变化来逐渐传递出去的。

2. 波长、频率和波速

(1) 波长 同一波线上相邻两振动相位相同的质点间的距离，称为波长，用 λ 表示，单位为米（m）。波源或介质中任意一质点完成一次全振动，波正好前进一个波长的距离。

(2) 频率 波动过程中，任一给定点在1s内所通过的完整波的个数，称为波动频率，用 f 表示，单位为赫兹（Hz）。波动频率在数值上同振动频率。

(3) 波速 介质中，波在单位时间内所传播的距离称为波速，用 c 表示，单位为米/秒（m/s）。