

特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训教材（第2版）

CHAOSHENG JIANCE

超声检测

■ 辽宁省安全科学研究院 组编

辽宁大学出版社

非外借

特种设备I、II级无损检测人员培训教材（第2版）

CHAOSHENG JIANCE

超声检测

■ 辽宁省安全科学研究院 组编

辽宁大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

超声检测/辽宁省安全科学研究院组编. —2 版. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2017. 6
特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材
ISBN 978-7-5610-8685-8

I. ①超… II. ①辽… III. ①超声检测—技术培训—教材 IV. ①TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 125577 号

超声检测

CHAOSHENG JIANCE

出 版 者: 辽宁大学出版社有限责任公司

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 辽宁大学出版社有限责任公司

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 16.5

字 数: 400 千字

出版时间: 2017 年 6 月第 2 版

印刷时间: 2017 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 胡家诗

封面设计: 高梦琦

责任校对: 李 佳

书 号: ISBN 978-7-5610-8685-8

定 价: 62.00 元

联系电话: 024-86864613

邮购热线: 024-86830665

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: lnupress@vip.163.com

前言

辽宁省质量技术监督局特种设备安全监察处组编，辽宁省无损检测人员考核委员会编写的“特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训教材”丛书（该套教材第1版于2008年由辽宁大学出版社出版发行），使用至今，广大读者给予了很高的赞誉，取得了很好的社会效果。随着新的安全技术规范与标准颁布实施以及特种设备安全技术规范与标准的更新或修订，第1版教材部分内容已不能完全满足特种设备安全技术规范与标准的要求，同时通过几年的使用，发现第1版教材中有些内容需要更正、补充与删减。为适应无损检测人员培训工作的需要，完善该套教材内容，辽宁省安全科学研究院组织第2版教材编写组，对第1版教材实施修订。

本套教材以第1版培训教材内容为基础，更正、补充与删减了部分内容，其基础专业理论部分表述简明扼要，为了方便广大读者学习与应用，编写人员依据NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》的要求，详细介绍了各种无损检测方法的操作指导书的编制及应用。

本套教材包括《特种设备基础知识》、《射线检测》、《超声检测》、《磁粉检测》、《渗透检测》和《习题集》。

本套教材以TSG Z8001-2013《特种设备无损检测人员考核规则》的附件C《Ⅰ、Ⅱ级检测人员培训考核大纲》、NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》、特种设备相关安

全技术规范与特种设备产品制造验收标准等文件的要求为依据，全面系统地阐述了特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员需要理解和掌握的相关基础知识、常用检测方法的基础专业理论和实际操作内容。

为配合培训考核工作的需要，重新修订了习题集，其结构编排与教材章节相对应，编写要点与大纲要求相对应。

本套教材在编写及相关资料整理过程中得到了辽宁省安全科学研究院领导、行业专家的大力支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平和经验有限，书中难免存在疏漏和错误之处，敬请读者提出宝贵意见，以便进一步修订完善。

编 者

2016年10月

编写说明

随着特种设备安全技术规范、无损检测标准的更新及修订,原教材已不能满足法规标准要求;同时通过几年的使用,发现有些内容需要修订、增减和调整。为适应无损检测人员培训的需要,结合现行特种设备安全技术规范、TSG Z8001-2013《特种设备无损检测人员考核规则》附件C《I、II级检测人员培训考核大纲》及NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》等法规、标准的要求,辽宁省安全科学研究院组织编写人员重新编写了本教材。

本教材的内容以第1版《特种设备I、II级无损检测人员培训教材——超声波检测》为参考,第2版教材与第1版教材相比主要变化如下:

——完善了数字式超声仪器的原理及组成内容,修订了仪器和探头性能测试的有关内容;

——简化了灵敏度系统理论的叙述,理顺了超声检测中灵敏度校准、设定的程序及扫查灵敏度等相关概念;

——完善了各种工件检测方法选择的理由与依据;

——完善了超声仪时基线校准与灵敏度校准从模拟式仪器到数字式仪器的转换;

——增加了检测过程中缺陷位置、大小的具体测试方法;

——简化了承压设备管子和压力管道环向对接接头超声检测方法;

——增加了超声检测操作指导书的编制说明,根据NB/T 47013-2015《承压设备无损检测》标准,完善了超声检测工艺的编制要求。

本教材共分8章,主要内容包括声波基础知识、超声波发射声场与规则反射体的回波声压、超声检测设备与器材、超声检测方法和通用检测技术、板材和管材超声检测、锻件与铸件超声检测、焊接接头超声检测、超声检测工艺编制。

教材中楷体部分为参考资料，不作为考核内容。

本教材第1章、第2章由刘立群编写，第3章由王建忠编写，第4章由卢天惠编写，第5章由杨继斌、李敬军编写，第6章由杨继斌、冯斌、马彦利编写，第7章由杨继斌编写，第8章由赵小兵编写。全书由杨继斌、王建忠统稿。为配合培训考核工作，重新修订了习题集，其结构与教材章节相对应，出题要点与大纲相对应。习题集第1章、第2章由刘立群修订，第3章由王建忠修订，第4章由卢天惠修订，第5章、第6章、第7章由杨继斌修订。本教材配套习题集由王建忠负责统稿。

此外，在教材编写过程中，陈和坤、庞成学等对编写内容提出了宝贵的意见和建议，王立森、张贵东在资料整理过程中也给予了很大帮助，同时得到了国内多家超声仪器厂家的大力支持，在此一并表示真诚的感谢。

编 者

2016年10月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 声波基础知识	(2)
1.1 机械振动与机械波	(2)
1.1.1 机械振动	(2)
1.1.2 机械波	(3)
1.1.3 声波的分类	(4)
1.2 波的类型	(5)
1.2.1 根据质点的振动方向分类	(5)
1.2.2 按波的形状分类	(7)
1.2.3 按振动的持续时间分类	(8)
1.3 超声波的传播特性	(8)
1.3.1 波的干涉	(8)
1.3.2 波的衍射	(9)
1.4 超声波的传播速度	(10)
1.4.1 无限大固体介质中的声速	(10)
1.4.2 影响声速的物理量	(11)
1.4.3 液体介质、气体介质中的声速	(12)
1.5 超声场的特征值	(12)
1.5.1 声压	(12)
1.5.2 声阻抗	(13)
1.5.3 声强	(13)
1.5.4 分贝与奈培	(14)
1.6 超声波垂直入射到平界面时的反射和透射	(15)
1.6.1 单一平界面的反射率和透射率	(15)
1.6.2 薄层界面的反射率与透射率	(18)
1.6.3 声压往复透射率	(20)

1.7 超声波倾斜入射到界面时的反射和折射	(21)
1.7.1 波型转换与反射、折射定律	(21)
1.7.2 声压反射率	(23)
1.7.3 声压往复透射率	(24)
1.7.4 端角反射	(25)
1.8 超声波的聚焦与发散	(26)
1.8.1 声压距离公式	(26)
1.8.2 平面波在曲界面上的反射	(27)
1.8.3 平面波在曲界面上的折射	(27)
1.8.4 声透镜	(28)
1.9 超声波的衰减	(29)
1.9.1 衰减的原因	(30)
1.9.2 衰减方程与衰减系数	(30)
1.9.3 衰减系数测定	(32)
第2章 超声波发射声场与规则反射体的回波声压	(33)
2.1 纵波发射声场	(33)
2.1.1 圆盘波源辐射的纵波声场	(33)
2.1.2 矩形波源辐射的纵波声场	(36)
2.1.3 近场区在两种介质中的分布	(37)
2.1.4 实际声场与理想声场比较	(38)
2.2 横波发射声场	(39)
2.2.1 假想横波波源	(39)
2.2.2 横波声场结构	(40)
2.3 规则反射体的回波声压	(42)
2.3.1 平底孔回波声压	(43)
2.3.2 长横孔回波声压	(44)
2.3.3 短横孔回波声压	(44)
2.3.4 球孔回波声压	(45)
2.3.5 大平底面回波声压	(45)
2.3.6 圆柱曲底面反射波声压	(46)
2.4 AVG 曲线	(46)
2.4.1 纵波平底孔 AVG 曲线	(47)

2.4.2 横波平底孔 AVG 曲线	(51)
第3章 超声检测设备与器材	(52)
3.1 超声检测仪	(52)
3.1.1 仪器的作用和分类	(52)
3.1.2 A 型脉冲反射式超声检测仪	(53)
3.2 超声波探头	(61)
3.2.1 压电效应与压电材料	(61)
3.2.2 探头的结构及各部分的作用	(63)
3.2.3 探头的分类	(65)
3.2.4 探头型号	(67)
3.3 试块	(69)
3.3.1 试块的作用	(69)
3.3.2 人工反射体	(69)
3.3.3 试块的分类	(70)
3.3.4 试块的使用和维护	(79)
3.4 探头电缆线	(79)
3.5 耦合剂	(79)
3.6 超声检测仪和探头的性能及其测试	(80)
3.6.1 超声检测仪、探头的主要性能	(80)
3.6.2 超声检测仪和探头的组合性能	(85)
第4章 超声检测方法和通用检测技术	(90)
4.1 超声检测方法概述	(90)
4.1.1 按原理分类	(90)
4.1.2 按探头接触方式分类	(92)
4.1.3 按波型分类	(92)
4.1.4 按操作方式分类	(94)
4.1.5 按探头个数分类	(95)
4.2 仪器与探头的选择	(96)
4.2.1 检测仪的选择	(96)
4.2.2 探头的选择	(96)
4.3 耦合与补偿	(98)

4.3.1	耦合剂	(98)
4.3.2	影响声耦合的主要因素	(98)
4.3.3	表面耦合损耗的测定和补偿	(99)
4.4	仪器探头系统的校准、测定及检测灵敏度设定	(101)
4.4.1	时基线的校准	(101)
4.4.2	探头参数的测定	(102)
4.4.3	检测灵敏度的校准	(102)
4.4.4	检测灵敏度设定	(104)
4.5	检测方法	(104)
4.5.1	耦合方式	(104)
4.5.2	检测面的选择	(105)
4.5.3	声束的定位参数	(105)
4.5.4	扫查方式	(106)
4.5.5	缺陷的定位	(107)
4.5.6	缺陷的定量	(108)
4.6	影响缺陷定位、定量的主要因素	(110)
4.6.1	影响缺陷定位的主要因素	(110)
4.6.2	影响缺陷定量的主要因素	(112)
4.7	缺陷性质分析	(115)
4.7.1	根据加工工艺分析缺陷性质	(115)
4.7.2	根据缺陷特征分析缺陷性质	(115)
4.7.3	根据缺陷波形分析缺陷性质	(115)
4.7.4	根据底波分析缺陷性质	(117)
4.8	非缺陷回波的判别	(117)
4.8.1	迟到波	(117)
4.8.2	特殊角度61°反射	(118)
4.8.3	三角反射	(119)
4.8.4	其他非缺陷回波	(120)
4.9	侧壁干涉	(122)
4.9.1	侧壁干涉对检测的影响	(122)
4.9.2	避免侧壁干涉的条件	(123)
第5章	板材和管材超声检测	(125)
5.1	板材超声检测	(125)

5.1.1	板材的加工方法及常见缺陷	(125)
5.1.2	常用检测方法	(125)
5.1.3	板材超声检测过程	(128)
5.2	复合钢板超声检测	(136)
5.2.1	复合钢板的加工及主要缺陷	(136)
5.2.2	复合钢板超声检测的界面分析	(136)
5.2.3	复合钢板的超声检测	(137)
5.3	无缝钢管超声检测	(138)
5.3.1	钢管的分类	(138)
5.3.2	无缝钢管的加工方法	(139)
5.3.3	无缝钢管的常见缺陷	(139)
5.3.4	无缝钢管的常用检测方法	(139)
5.3.5	无缝钢管的超声检测	(143)
第6章	锻件与铸件超声检测	(148)
6.1	锻件超声检测	(148)
6.1.1	锻件加工及常见缺陷	(148)
6.1.2	锻件检测方法概述	(149)
6.1.3	检测条件的选择	(152)
6.1.4	时基线和灵敏度的校准	(155)
6.1.5	缺陷位置及大小的测定	(160)
6.1.6	缺陷反射回波的判别	(165)
6.1.7	非缺陷反射回波判别	(166)
6.1.8	锻件质量级别的评定	(167)
6.2	铸件超声检测	(168)
6.2.1	铸件的特点及常见缺陷	(168)
6.2.2	铸件超声检测的特点	(169)
6.2.3	铸件检测条件的选择	(169)
6.2.4	铸件质量评定及标准特点	(171)
第7章	焊接接头超声检测	(172)
7.1	焊接加工及常见缺陷	(172)
7.1.1	焊接方法	(172)

7.1.2	焊接接头中常见缺陷	(173)
7.2	中厚板对接焊接接头超声检测	(173)
7.2.1	对接焊接接头超声检测	(173)
7.2.2	检测条件的选择	(176)
7.2.3	仪器与探头选择	(178)
7.2.4	试块的准备	(180)
7.2.5	横波探头及仪器时基线的校准	(181)
7.2.6	距离—波幅曲线的绘制及检测灵敏度设定	(183)
7.2.7	检测面的准备、声能损失差的测量、检测面划线	(187)
7.2.8	扫查方式	(189)
7.2.9	检测面曲率半径小于 250mm 对接接头的超声检测	(191)
7.2.10	缺陷的测定	(191)
7.2.11	对接焊接接头超声检测真伪缺陷回波的识别	(196)
7.2.12	焊接接头检测记录与等级分类、质量评级	(198)
7.3	管座角接接头和 T 型焊接接头超声检测	(200)
7.3.1	管座角接接头超声检测	(200)
7.3.2	T 型焊接接头超声检测	(202)
7.4	堆焊层超声检测	(203)
7.4.1	堆焊层晶体结构的特点	(203)
7.4.2	堆焊层中常见的缺陷	(203)
7.4.3	超声检测方法及探头的选择	(203)
7.4.4	堆焊层对比试块的要求和型号选择	(204)
7.4.5	灵敏度校准	(205)
7.4.6	扫查方法	(206)
7.4.7	缺陷定量	(206)
7.4.8	质量分级	(206)
7.5	铝对接焊接接头超声检测	(206)
7.5.1	铝及铝合金对接焊接接头的特点及常见缺陷	(206)
7.5.2	检测条件的选择	(207)
7.5.3	检测准备工作	(208)
7.5.4	缺陷定量	(209)
7.5.5	缺陷评定	(209)
7.5.6	质量分级	(209)

7.6 钢制承压设备管子和压力管道环向焊接接头超声检测 (210)

7.6.1 仪器、探头选择 (210)

7.6.2 检测条件的准备 (211)

7.6.3 横波探头及时基线的校准 (212)

7.6.4 距离—波幅曲线的绘制及灵敏度校准与设定 (212)

7.6.5 检测面的准备、声能损失差的测量、检测面划线 (212)

7.6.6 扫查方式的选择 (212)

7.6.7 缺陷定量检测 (213)

7.6.8 检测结果的记录与评定 (214)

第8章 超声检测工艺 (216)

8.1 超声检测工艺规程 (216)

8.1.1 主题内容和适用范围 (216)

8.1.2 工艺规程编制依据(引用标准、法规) (216)

8.1.3 检测人员的要求 (217)

8.1.4 设备、器材 (217)

8.1.5 检测时机及表面准备 (217)

8.1.6 检测工艺方法、检测技术 (217)

8.1.7 检测结果和质量分级 (217)

8.1.8 技术档案要求 (217)

8.1.9 相关因素在工艺规程中的体现与控制 (217)

8.2 超声检测操作指导书 (219)

8.2.1 操作指导书的主要内容 (219)

8.2.2 超声检测操作指导书编制 (222)

8.2.3 操作指导书编制应用举例 (224)

主要参考文献 (250)

绪 论

超声检测一般是指超声波与工件相互作用,就反射、透射和散射的波进行研究,对工件进行宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的检测和表征,并进而对其特定应用性进行评价的技术。在特种设备行业中,超声检测通常指宏观缺陷检测和材料厚度测量。

利用超声波来进行无损检测始于 20 世纪 30 年代。第二次世界大战后研制成第一种穿透式检测仪器对材料中的缺陷进行初级阶段检测。

超声检测技术得以广泛应用,应归功于脉冲反射式超声检测仪的出现。利用脉冲反射式超声检测仪,超声波可从物体的一面发射并接收,并能够检测较小缺陷,较准确的确定其位置及深度,评定其尺寸。随后,由美国和英国开发出了 A 型脉冲反射式超声检测仪,并逐步用于锻钢和厚钢板的检测。20 世纪 60 年代,超声检测仪在灵敏度、分辨力和放大器线性等主要性能上取得了突破性进展,焊接接头检测问题得到了很好的解决。在此基础上,超声检测发展为一个有效而可靠的无损检测手段,并在工业领域得到了广泛的应用。A 型脉冲反射技术至今仍是通用性最好、使用最广泛的一种超声检测技术。

随着工业生产对检测效率和检测可靠性要求的不断提高,原有的以 A 型显示手工操作为主的检测方式不再能够满足要求。20 世纪 80 年代以来,对于规则的板、棒类等大批量生产的产品,逐渐发展了自动检测系统,配备了自动报警、记录等装置,发展了 B 型显示和 C 型显示。

随着电子技术和计算机技术的发展,超声检测设备不断向小型化、智能化方向改进,并于 20 世纪 80 年代末出现了数字式超声仪器。目前,数字式仪器已日益成熟,取代模拟式仪器成为主流产品。

近年来,超声检测新技术得到了迅猛发展,对缺陷的定性、定量评价的研究得到了较大的进展。利用缺陷部位的衍射波信号来检测和测定缺陷尺寸的超声检测方法,即衍射时差法超声检测 (TOFD),已经在国内得到了广泛应用;借鉴相控阵雷达技术的原理发展起来的超声相控阵技术的研究及应用,也在国内有效开展。

超声检测的适用范围非常广,从检测对象的材料来说,可用于各种金属材料和非金属材料;从检测对象的制造工艺来说,可以是锻件、铸件、焊接件、胶接件、复合材料构件等;从检测对象的形状来说,可以是板材、棒材、管材等;从检测对象的尺寸来说,厚度小至几毫米,大至几米,既可以是近表面缺陷,也可以是内部缺陷。

第 1 章 声波基础知识

超声波是一种机械波，是机械振动在介质中的传播。了解超声波本身的性质及其在介质中的传播特点，对于正确应用超声检测技术、解决实际检测中的各种问题是十分必要的。

1.1 机械振动与机械波

1.1.1 机械振动

1.1.1.1 机械振动的一般概念

物体在一定位置（平衡位置）附近往复运动称为机械振动。机械振动广泛地存在于自然界之中，如钟摆的摆动、发声物体的振动、机器的振动等。

振动状态是由振动位移的大小和方向以及速度的大小和方向决定的，当两个振动状态的位移和速度都相同时，这两个振动状态才相同。

振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的振幅，一般用 A 表示。

振动是往复、周期性的运动，从某一振动状态出发，又回到该振动状态所发生的振动称为一次全振动。振动物体完成一次全振动所需要的时间，称为振动周期，一般用 T 表示，常用单位为秒(s)；振动物体在单位时间内完成全振动的次数，称为振动频率，一般用 f 表示，国际单位为赫兹(Hz)，常用单位为兆赫兹(MHz)， $1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}$ 。

由周期和频率的定义可知，二者互为倒数，即：

$$T = 1/f \quad (1-1)$$

1.1.1.2 简谐振动

简谐振动是最简单最基本的振动形式，任何复杂的振动都可由简谐振动合成。

如图 1—1 所示，质点 M 作匀速圆周运动时，其在 y 轴上的投影与简谐振动的运动特点完全一致。质点 M 的水平投影在 y 轴上作往复的直线运动，其位移 y 随时间 t 按余弦函数规律变化，即：

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

式中：

A ——振幅，即最大水平位移；

ω ——圆频率，即 1 秒钟内变化的弧度数， $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ；

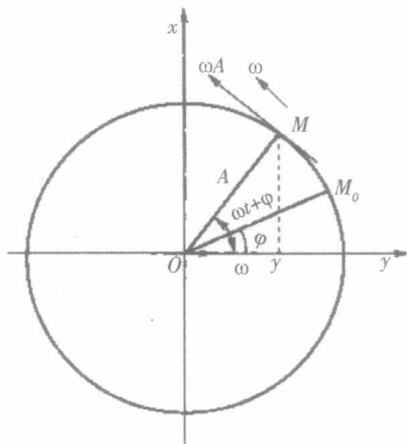


图 1—1 质点简谐振动等效图

Φ ——初相位，即 $t=0$ 时质点 M 的相位；

$\omega t + \Phi$ ——质点 M 在 t 时刻的相位。

简谐振动方程描述了谐振动物体在任一时刻的位移情况。

简谐振动的特点是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。简谐振动物体的振幅不变，为自由振动，其频率为固有频率。

由于物体做简谐振动时，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，简谐振动物体的能量遵守机械能守恒定律。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，总能量保持不变。

1.1.2 机械波

1.1.2.1 机械波的产生与传播

振动的传播过程，称为波动。波动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。

由于这里研究的超声波是机械波，因此下面只讨论机械波。

为了简单说明机械波的产生和传播，建立如图 1—2 所示的弹性模型模拟振动的传播过程。图中质点间以小弹簧 b 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、气体都可视为弹性介质。

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 产生弹性力使其回到平衡位置。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，使得质点 a 在平衡位置作往复运动，产生振动。与此同时， a 周围质点也会受到弹性力的作用，使它们离开平衡位置，并在各自的平衡位置附近振动。这样，弹性介质中的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，只是以交变的振动速度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。这种能量的传播，不是靠质点的迁移来实现的，而是由各质点的位移连续变化逐渐传播出去的。

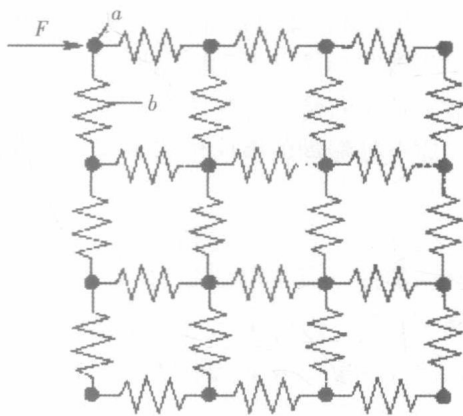


图 1—2 弹性介质模型