

检测声学原理及应用

尚志远 编著

西北大学出版社

序

检测声学是主要研究声学检测原理的一门科学，具有较强的基础理论性。它是技术与应用性极强的声学检测技术的基础，是既古老而又迅速发展的声学学科的一个重要分支。

由于声学检测技术自身的固有特性，使其在各种检验及测量中的应用极为广泛，但要进一步研究、提高和开发声学检测的方法及技术手段，就必须以这一技术的基础理论，即检测声学为依据和指导，由此可见，它们二者的关系可谓密不可分。声学检测技术的发展促进了它的理论基础——检测声学的不断深入研究，而检测声学方面的研究成果，又进一步指导了声学检测技术的向前发展。

《检测声学原理及应用》着重讨论了声学检测的原理与方法。为了理论联系实际，少量介绍了一些应用实例。该书是作者在多年为声学专业研究生讲授《检测声学》课的基础上，并增加了部分新的内容和研究成果而形成的。如第四章检测声学的新原理和方法一章中的“合成孔径聚焦超声成像”、“ALOR 成像”、“应力的超声测量”及“光声检测原理”等。该稿取材比较新颖，对检测声学的介绍也比较全面详细，内容比较系统完整。

本书的出版将为高等院校相关专业的师生，为从事声学检测技术研究、开发和生产应用的科研工作者及工程技术人员提供一部有实用价值的参考书，必将对我国的检测声学的发展和更好地为经济建设服务起到积极的作用。

董彦武

1996年3月6日

前 言

检测声学是声学的一个重要组成部分，也是声检测技术的基础。近几年来由于声检测技术取得了世人瞩目的进展，不仅一些原有技术得到了发展，而且，其它领域的一些新原理、新方法不断地渗透到检测声学领域里来，提供了检测声学扩展和壮大的新鲜血液。

作者多年来给本所研究生开设“检测声学”课程，深感教材不足，现有的都是一些探伤方面的工程技术书籍，多数不适合于教学使用，为此，而萌发了写作此书的念头。

本书的着眼点主要从原理和方法方面阐述，少量引入了一些应用技术，尽量避免和一些工程技术书籍重复。

本书在写作和出版过程中得到了陕西师范大学应用声学研究所、西北大学出版社以及董彦武、程存第、仝杰、樊江水、田俊劳、张军平、张雪红、林欣里等同志的鼎力帮助，在此一并致谢！

本书涉及内容繁杂，难勉挂一漏万，错误或不当之处在所难免，恳求读者指正。

作者 1996.4.4 于西安

目 录

绪论.....	(1)
第一章 检测声学的一般理论.....	(4)
第一节 弹性介质中传播的声波.....	(4)
一、简谐振动.....	(5)
二、简谐振动的合成.....	(12)
三、不同类型介质中的声波.....	(14)
第二节 各种类型波在介质中传播的速度.....	(19)
一、声波在流体中传播的速度.....	(20)
二、在无限大各向同性固体介质中传播的横波声速.....	(21)
三、表面波(瑞利波)声速.....	(21)
四、板波在介质中传播的速度.....	(22)
第三节 声场参量.....	(25)
一、声压.....	(26)
二、声强度.....	(26)
三、声阻抗.....	(28)
第四节 声波在介质中传播的几种物理规律.....	(28)
一、声波在介质中传播时的散射.....	(28)
二、介质对声波的吸收.....	(31)
三、声波的衍射.....	(34)
四、运动着的传声介质或声源的多普勒效应.....	(35)

第五节 声波在平界面上的反射和折射	(37)
一、声波垂直入射到平界面上的反射和透射	(37)
二、声波斜入射到平界面上的反射和折射	(45)
三、球面波在平界面上反射和折射	(51)
第六节 声波在曲界面上的反射和折射	(53)
一、声波在曲界面上反射	(54)
二、声波在曲界面上的折射	(58)
三、声透镜聚焦	(60)
四、斜探头的聚焦	(63)
习题	(65)
第二章 检测换能器	(68)
第一节 压电超声换能器	(68)
一、晶体的压电性	(69)
二、压电材料及其特征常数	(70)
三、压电元件的振动模式	(77)
四、压电换能器的等效电路	(77)
第二节 探伤用的常规超声换能器	(81)
一、纵波直探头	(81)
二、横波斜探头	(82)
三、组合探头	(83)
四、表面波探头	(84)
五、板波探头	(86)
六、聚焦探头	(86)
第三节 检测用的宽带超声换能器	(87)
一、通常的宽带换能器	(87)
二、非均匀激发的宽带换能器	(88)
三、高斯换能器	(90)
第四节 工业测量中应用的压电气介换能器	(92)

一、厚度振动型的空气超声换能器	(92)
二、圆管式径向振动空气换能器	(93)
三、双压电片弯曲振动换能器	(95)
四、空气中强辐射超声换能器	(96)
第五节 磁致伸缩换能器	(98)
一、铁磁性材料及其磁致伸缩效应	(98)
二、磁致伸缩换能器的设计	(100)
第六节 电磁声换能器 (EMAT)	(103)
第七节 电容式声换能器 (ESAT)	(108)
第八节 压电换能器辐射的声场特征	(111)
一、圆形片状声源辐射的纵波声场	(111)
二、矩形片状声源辐射的纵波声场	(119)
三、斜探头辐射的横波声场	(123)
第三章 常规的超声波检测原理方法及应用	(127)
第一节 脉冲反射法	(127)
第二节 穿透法	(129)
第三节 共振法检测	(131)
第四节 缺陷的定位	(132)
一、纵波探伤缺陷的定位	(132)
二、横波探伤缺陷的定位	(133)
三、曲面周向缺陷的定位	(136)
第五节 缺陷的定量	(139)
一、声波在规则形体面上的反射	(140)
二、超声波探伤时探查灵敏度的调整	(148)
三、缺陷的定量	(153)
第六节 常规超声检测方法的应用	(163)
板、管、棒及焊缝的探伤	(163)
习题	(173)

第四章 检测声学的新原理和方法..... (175)

第一节 声图像检测方法简介..... (175)

一、B型扫描成像..... (177)

二、C型扫描成像..... (178)

三、超声CT成像..... (179)

四、声全息成像理论..... (185)

五、超声显微镜成像..... (187)

六 ALOK 检测成像原理..... (188)

七、合成孔径聚焦超声成像技术 (SAFT)..... (190)

第二节 声频谱法检测原理..... (193)

第三节 振动检测法原理及应用..... (196)

一、共振检测法的应用..... (198)

二、声阻法的应用..... (199)

第四节 一些特殊材料的超声检测..... (206)

一、混凝土材料的超声检测..... (206)

二、塑料的超声检测..... (211)

三、高温材料的超声检测..... (212)

第五节 应力的超声检测原理..... (218)

一、应力与应变的理论基础..... (218)

二、应力——应变对超声速度的影响..... (219)

三、应力与声速之间关系的检测..... (220)

第六节 光声检测原理和方法..... (227)

一、光产生声波的原理..... (228)

二、光声信号的检测方法..... (230)

三、光声检测的应用..... (231)

第五章 声发射检测技术..... (234)

第一节 声发射产生原理..... (235)

第二节 声发射源及其特征的检测.....	(239)
一、声发射信号的表征参数.....	(239)
二、声发射源特征的检测.....	(244)
第三节 声发射源的定位.....	(246)
第四节 声发射检测仪器的组成及声发射换能器.....	(249)
第五节 声发射检测技术的应用.....	(253)
一、声发射在材料和构件的断裂韧性测试中的应用.....	(254)
二、疲劳期间裂纹的生长.....	(255)
三、复合材料的声发射检测.....	(257)
四、用声发射技术检测应力腐蚀和氢脆.....	(259)
五、检测马氏体相变的声发射.....	(259)
六、对材料焊接的检测.....	(259)
七、利用声发射检测岩石的破碎过程.....	(260)
八、磁力声学声发射及应力测量.....	(261)
九、用声发射技术对材料及构件结构完整性评价.....	(261)

第六章 介质中声传播参量的测量方法及介质特性分析..... (263)

第一节 概述.....	(263)
第二节 声速的测量方法.....	(263)
一、共振干涉法测量声速.....	(264)
二、临界角法测量声速.....	(265)
三、相位比较法测量声速.....	(266)
四、脉冲法测量声速原理.....	(268)
五、用光学方法测量介质的声速.....	(272)
第三节 超声衰减的测量.....	(275)
第四节 声阻抗的测量原理.....	(278)
第五节 介质的特性分析.....	(279)

一、固体介质的特性分析·····	(279)
二、岩体的特性分析·····	(282)
三、流体介质的特性分析·····	(285)
第七章 超声工程测量技术·····	(289)
第一节 概述·····	(289)
第二节 超声物位测量原理·····	(290)
一、超声液位测量原理·····	(290)
二、液面高度的修正·····	(291)
三、超声料位测量原理·····	(293)
第三节 检测流体流量的超声方法·····	(295)
一、时差法测量流量·····	(296)
二、声束偏移法测量流量·····	(299)
三、超声多普勒法测量流量·····	(300)
四、检测流量误差的修正·····	(301)
第四节 超声测温技术·····	(303)
一、气介超声温度计的测量原理及方法·····	(304)
二、固介式的超声温度计原理·····	(305)
第五节 超声测量硬度·····	(308)
第六节 超声测量粘度的原理和方法·····	(310)
一、超声粘度计的基本原理·····	(311)
二、磁致伸缩超声粘度计的工作原理·····	(312)
第七节 超声测厚、测距的原理和方法·····	(315)
一、超声共振法测厚原理·····	(315)
二、超声干涉式测厚原理和方法·····	(316)
三、脉冲反射式超声测厚原理·····	(317)

绪 论

检测声学是声学的一个重要分支,也是一门技术性很强的学科。“检”和“测”是这个内容的两个方面。“检”是从声介质中提取带有介质特性的声信息,把它加以分析处理,根据其结果来判断介质的一些特征和性质。例如,声波在钢材中传播时把钢材中的缺陷、裂纹、气孔以及粒度的大小等的存在参入传播着的声波中,声波作为这些信息的载体。我们采集这些声信号采取成像显示或记录的方式,最后加以分析判断就可以评价钢材的好坏,这就叫做材料的超声无损检测或通称为超声探伤。“测”是利用声在介质中传播的性质和参量(如:声速、声衰减等)随介质的物理状态变化来度量与待测介质有关的一些非声学量,如液体的密度、浓度、粘度、流量、料位,固体的致密度、晶粒度或球化率、弹性、硬度、厚度、应力、距离以及温度等,对这些参量的声学测量通常也称为超声工程测量技术。所以,通常把检和测合起来称之为检测声学,主要讨论声学检测的原理。声学检测是应用较广的一门技术。它涉及到材料工业、机械制造业、石油化工、水文、地质、电力、运输业以及矿山勘探和开采等各个领域。

(一) 检测声学的重要意义

检测声学作为一门应用技术的基础,无论是在“无损检测”技术专业中或者是在声学学科的应用方面都具有重要的理论和实际意义,因为超声探伤技术和超声工业测量技术以及一些声学参量的测量都广泛地涉及国民经济的各个方面,它对于控制产品质量、改进生产工艺过程、节约原材料、保证产品或零件的可靠性以及提高劳

动生产效率起着极为关键性的作用，是发展现代工业技术不可缺少的一门学科。同时无损检测技术和工业测量技术的发展具有明显的社会效益和不可估量的经济效益。保证现代工业生产中的安全作用，可以防止或消除因压力容器的爆炸、飞行器、轮船的失事、发电机组等烧毁所造成的重大经济损失和人员伤亡。目前我国存在的产品寿命短、可靠性差、事故率高等问题就原因是多方面的，但可以肯定很大程度上是出在对无损检测制度重视不够或者根本就忽视这项工作。

(二) 声学检测的现状与研究开发的前景

由于现代工业技术的飞速发展对现有的检测声学提出了更高更新的要求。检测声学是一门多学科的综合技术。由于多种学科的最新成果不断地供给其营养，所以，也使得声检测技术得到突飞猛进的发展。大体情况如下：

(1) 由定性检测向定量与评价技术过渡和发展。原来的“探伤”一词已不大适合现今声检测技术，因“探”只是检查有无伤的存在，这并不能满足对伤的程度的评价，必须用断裂力学原理来确定极限寿命对被检测对象作出公正的判断。目前，对定量检测的研究主要有三个方面。①成像技术。如： B 扫描成像， C 扫描成像，相控阵成像，ALOK 成像以及合成孔径 (SAFT) 等成像技术。②加强开展各种缺陷的散射和逆散射理论的研究，发展可用于测定缺陷的逆散射技术。③开展信号处理技术中自适应技术的研究，例如把可能出现的各种类型的缺陷的信号存在计算机中用作标准判据，对测得的待测缺陷的信号与之比较进行判断识别。

(2) 发展新材料 (包括复合材料、工程陶瓷、高分子材料以及叠层压粘等材料) 及异形构件的非常规的检测方法及技术的研究。

(3) 开发研究自动化检测技术与系统，这样可以提高检测质量，保证有好的重复性和结果的一致性，减少随机误差，降低了对于手检操作的技术熟练程度的要求。

(4) 把单纯无损检测与生产过程的工艺和新产品的设计结合起

来，达到综合应用。

(5) 大力发展超声工业测量技术。超声工业测量技术和其它的测量技术相比有它的独特优点，如超声测量流量，它不扰动流体本身，所以，在测量过程不影响流体的流动。

第一章 检测声学的一般理论

第一节 弹性介质中传播的声波

声波是一个泛指的概念，它可以包括从次声——可听声——超

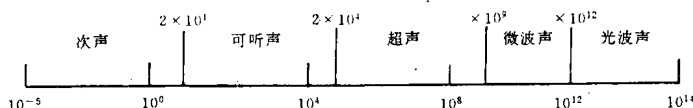


图 1-1 声波频率范围

声的整个范围，如图 1-1 所示。

通常人们划分可听声的范围即声频范围是从下限 20Hz 到上限 20KHz。这是一个习惯分法，实际上人耳的正常听觉范围远小于这个区间。一般把 20Hz 以下称为次声波，次声波也有许多特点和用途。但因篇幅有限已不在讨论之列，频率高于 20KHz 的声波称之为超声波，意思是这个频率已超出人耳的听觉范围。超声波也遵循一般声波在弹性介质中传播的规律，如在介质分界面处的反射和折射以及进入介质后的吸收衰减等规律。但它也有自己的个性，如，超声波的频率可以很高，因而在介质中传播时能量可以集中在很小的范围内，即有良好的成束性，方向性极好。所以，在检测中有良好的灵

敏度和分辨率。

在自然界有许多动物早已用超声波进行“导航”，逃避敌人或寻觅食物。像人们熟知的蝙蝠、海豚等，他们的眼睛已经退化没有视力、靠发射声波和接收从障碍物反射回来的超声波来判断该如何飞行或游动。

波分为两类：即电磁波和机械波，声波属于机械波。振动是产生声波的源，波动是振动在介质中传播能量的过程。要研究和了解声波的存在及性质，必须从研究机械振动着手。下面就来讨论机械振动和波。

一、简谐振动

物体或物体的质点在一定位置上作不断往复运动或沿平衡位置作摆动称作振动。例如敲击的锣、鼓、音叉以及钟表中摆的摆动，压电换能器中晶片的振动等都是机械振动的例子。在质点振动中，最简单的振动是简谐振动。任何复杂振动的研究都是建立在简单振动的基础上的，我们以简谐振动为例讨论简单机械振动的原理和过程。下面分为无阻尼自由振动和阻尼时的振动以及受迫振动分别分析讨论。

1. 无阻尼自由振动

设有一弹簧振子，使其左端固定，右端系一质量为 m 的物体（弹簧自身的质量可以忽略），将物体从 0 拉开到位置 A 后放掉，由于弹簧的弹力将被压缩到 B 位置，然后弹簧经过 0 来回振动。若取弹簧的平衡位置 0 为 x 轴的原点，并设弹簧拉伸的方向为 x 轴的正向。据 Hooke 定律，物体所受弹簧弹力 F 和弹簧形变之间的关系是

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

式中 k 是弹性常数， x 是物体的位移，负号表示弹力 F 和位移 x 的方向相反。上式说明在弹簧的弹性限度以内应力和应变间有线性关系。Hooke 定律所涉及的介质是各向同性介质而且是一维的。人们从实验证明了这个线性关系存在于更普遍的范围，那就是介质可以是

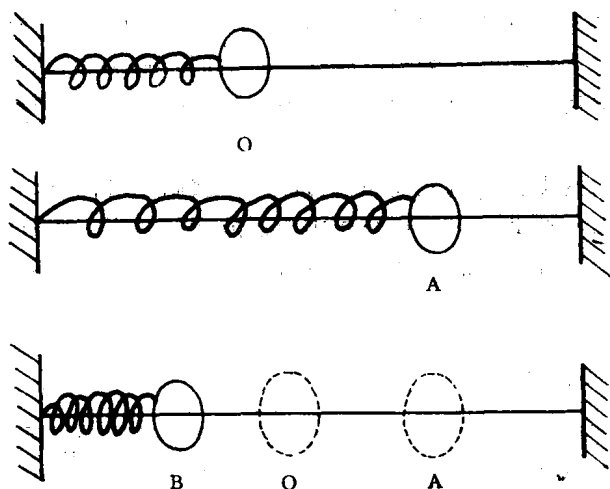


图 1-2 弹簧无阻尼自由振动

各向异性的、样品可以是多维的广义 Hooke 定律。假若无其它外力作用时，根据牛顿第二定律

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

变换 (1-2) 式

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (1-3)$$

$$\text{设 } \omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \text{则} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1-4)$$

这个微分方程的解很容易得到

$$x = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-5)$$

式 (1-5) 就是简谐振动方程式，说明物体作简谐振动时位移是时间的余弦函数。式中， A_m ， φ 是常量可由初始条件确定。在振动开始时即在 $t=0$ 时令其初始位移和速度为 x_0 和 v_0 ，将其代入 (1-5) 式得

$$A_m = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_0}\right)^2}, \quad \tan \varphi = \frac{v_0}{\omega_0 x_0} \quad A_m \text{ 为物体或质点作简谐振动时离开}$$

平衡位置的最大位移, φ 称为初始相位。

由 (1-5) 式可求出质点振动的速度和加速度分别为:

$$V = \frac{dx}{dt} = -A_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-6)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = -\omega_0^2 x \quad (1-7)$$

如果以时间为横坐标, 位移 x 、速度 v 和加速度 a 为纵坐标在同一个坐标系中画出三条曲线, 在设初始相位为 $\varphi=0$ 时, 从三条曲线

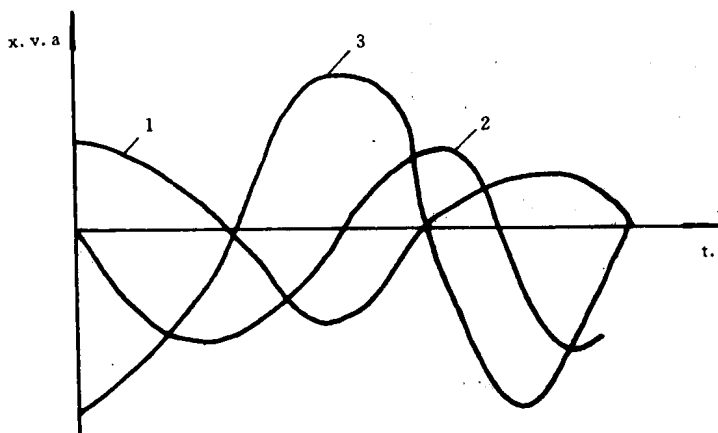


图 1-3 简谐振动中位移 x , 速度 v , 加速度 a 之间的关系

上可以看出简谐振动的位移、速度、加速度的周期性。为方便起见, 一般简谐振动常表示成复数形式

即位移 $x = A_m e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$ (1-8)

速度 $\dot{x} = j\omega_0 A_m e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$ (1-9)

加速度 $\ddot{x} = -\omega_0^2 x$ (1-10)

2. 阻尼振动

如果质点在振动过程中受到阻尼, 则简谐振动和上面讨论的就又不相同, 如图 1-4 所示。假设运动的物体或质点速度不太高时, 实

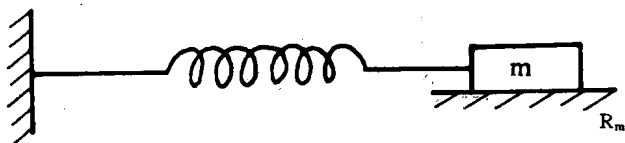


图 1-4 阻尼振动示意图

验结果表明阻力与速度成正比且方向相反。此时的运动方程就变成：

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1-11)$$

式中 R_m 表示阻尼特性，称为力阻。当 $R_m < 2\sqrt{km}$ 时系统作减幅阻尼振动。方程 (1-11) 的通解为

$$x = A_m e^{-bt} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-12)$$

式中 $b = \frac{R_m}{2m}$ 称为阻尼系数， $\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$ 是阻尼振动时的圆频率。当 $b \rightarrow 0$ 时，(1-12) 式变为无阻尼的简谐振动。振动时振幅衰减的快慢主要决定于 b 的大小。当力阻 $R_m > 2\sqrt{km}$ 时物体或质点将不发生振动，说明阻尼太大。

表征有阻尼情况下固有振动的另一个特征量是 τ_0 。

$$\tau_0 = \frac{1}{b} = \frac{2m}{R_m} \quad (1-13)$$

称为系统的时间常数。它的物理意义是系统由于阻尼，振幅由最大值衰减到 e 分之一时所需的时间。对于超声探头来说它直接表征了探头发射声波后在探伤仪上脉冲的占宽，因此，直接影响分辨力。

阻尼振动的另一个特点是阻尼振动的角频率 ω_0 和自由振动的角频率 ω 不相等，而是稍低于 ω_0 ， ω_0 是由系统本身的参数所决定。

3. 受迫振动

以上两节讨论了无阻尼自由振动和阻尼振动。但在讨论中都没有考虑外力的作用。阻尼振动虽有力作用，但只是物体自身在运动时的摩擦力，无力源（即是外力）供给。在受迫振动时，一定要有