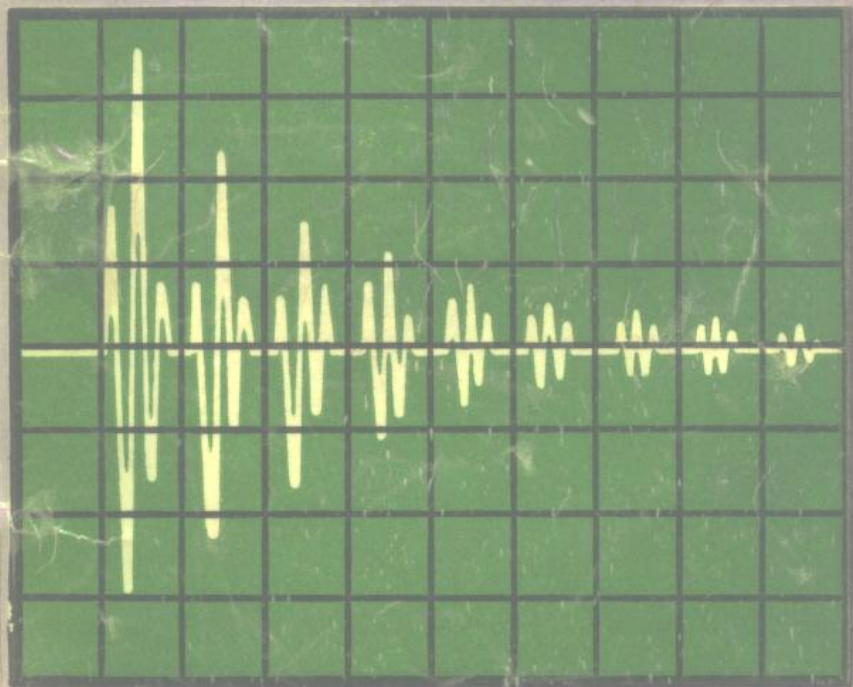


超声检测原理和方法

胡建恺 张谦琳 编著



中国科学技术大学出版社

1563

385

1

~~DG56/26~~

超声检测原理和方法

胡建恺 张谦琳 编著

DG56/26

中国科学技术出版社
1993·合肥

(皖)新登字 08 号

超声检测原理和方法

胡建恺 张谦琳 编著

*

中国科学技术大学出版社出版
(安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026)

安徽省金寨县印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 850×1168/32 印张: 9.875 字数: 252 千

1993 年 10 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

ISBN7-312-00447-4/TB·1 定价: 8.00 元

(凡购买中国科大版图书、如有缺页、白页、倒页者,由本社发行部负责调换)

内 容 简 介

本书系统地介绍超声检测的原理和方法。全书共分十四章，首先简要阐述了超声检测的物理基础，介绍超声检测设备和方法，然后论述常规超声检测技术；还详细地叙述了超声检测新技术及其应用，其中包括声成像、超声全息、声学显微镜技术以及激光超声和电磁声等非接触超声检测技术；最后简明地论述声发射技术和 AU 技术。

本书注重实际，理论简明扼要，概念清楚，系统性强，对于新技术的论述力求深入浅出。

本书适合高等院校有关专业的大专生、本科生和研究生作为教材，也适合于无损检测工程技术人员作为参考书。

前 言

最近 10 多年来,超声无损检测技术得到了迅速的发展。这主要体现在两个方面:一是各种超声检测新技术和新方法的研究得到了很大进展,有些已在走向实用阶段;二是超声检测设备在自动测量、智能化和成像技术方面获得长足的进步。当然,这些新技术、新方法和新设备无一不是在传统的检测基础上发展起来的,但它们各自又以一定的物理学原理为依据,它们在工业、工程和新材料的检测中日益显得至关重要。

本书的目的在于简明阐述常规超声检测技术的原理和方法,重点介绍新的超声检测技术,其中有些是作者近 10 年来的研究成果,以适应目前国内超声检测事业发展的需要。

由于作者水平和时间有限,错误缺点实属难免,恳请同行和读者指正,不胜感谢。

本书在编写和出版过程中得到中国科技大学超声无损检测实验室的支持,沈黎明等同志在初稿的打印和绘图中做了大量的工作,在此一并致谢。

作 者

一九九二年夏于合肥

引 言

1. 超声检测技术简史

超声波是指频率在人耳听阈以上的在连续介质中传播的弹性波。人们早就从大自然中得到启示,利用超声波可以探测目标,如蝙蝠在黄昏时飞行自如而不撞击墙壁和树木,海豚在水中可以准确地跟踪捕捉目标,都是因为他们具有发射和接收超声波的功能。后来,在航海中人们就用超声波探测冰山。

利用超声波探测物体内部的缺陷和结构最早是原苏联的萨卡洛夫(Sokolov)于1929年提出的。1931年德国人在专利中提出了工业应用方案。在二次世界大战中,由于雷达技术和脉冲技术的发展以及战争的需要,大大促进了超声检测技术的发展。1944年美国的F. A. Firestone发表采用超声脉冲法的探伤仪的报告,1946年英国D. O. Sproule制成A型脉冲反射式超声波探伤仪,并用于钢材的探伤。到了本世纪50年代,A型脉冲反射式超声探伤仪已广泛应用于世界先进工业国家的钢铁、机械制造和造船工业领域。1964年前联邦德国Krautkrämer公司研制成功小型超声探伤仪,其主要性能指标取得了突破性的进展,标志着跨入了近代超声探伤技术阶段。在本世纪七八十年代,由于超声全息、回波频谱分析、超声探头和大规模集成电路、计算机技术的迅速发展,使得数字化、自动化、智能化超声检测和超声成像技术变成了热点。另一方面,由于各种新型材料,特别是高性能功能材料的发展(如先进复合材料,功能陶瓷材料,微电子材料等),使得超声检测广泛地用于材料的物性评价和工程寿命评估,超声检测技术与断裂力学和材料科学发生了更加深入密切的联系,在工业领域中得到广阔的用武之地。

2. 超声检测技术在国民经济中的地位

超声检测技术是一种重要的无损检测技术，由于它的穿透能力强，对材料和人体无损害，使用方便等特点，广泛地应用于现代工业领域和高技术产业之中，诸如材料工业、机械工业、石油化工、水文地质和宇航、能源等领域。世界上工业发达国家，无一不把无损检测技术放在重要地位上，美国前总统里根在美国无损检测学会纪念会贺词中曾说：“没有无损检测技术，美国就不能享有众多领域中的领先地位”。日本人认为“现代工业是建立在无损检测的基础之上的”。

在美国全国建有近十个国家级无损检测中心，100多所大专院校设置无损检测与评价技术课程，政府实施研究计划，分别由各大学、中心实验室进行前沿性基础研究，而由各大公司进行应用研究和开发。德国政府制定了有效的发展计划，建有完备的研究中心，政府和工业界密切合作，保证从基础研究到应用开发各阶段的实施。前苏联中央曾作出开发无损检测与评价技术，支持全苏工业产品和武器生产的决定，其中特别强调在先进空间武器系统中的应用。

无损检测技术之所以受到如此重视，是和它在国民经济中体现出的社会效益和经济效益分不开的。它的社会效益主要体现在保障设备安全可靠，提高使用寿命，减少和避免重大事故方面。近年来，世界上发生的多起重大恶性事故，如铁路断轨，火车翻车，蒸汽釜爆炸，石油液化气储罐爆炸等等，直接涉及重大的经济损失和人身安全，这些事故是可以利用无损检测技术得以避免的。

无损检测技术的经济效益表现为直接性的和潜在性的。直接性经济效益是指在生产过程中通过降低成本、提高成品率和劳动生产率而取得的，它容易被人们重视。例如无损检测可改进钢材的制造工艺，可节省费用并提高质量，经过无损检测后的材料可直接提高售价。潜在性经济效益是指长期的综合效益，是由于产

品质量在商品市场上的信誉的增长而取得的，它往往不易为领导者和生产者所重视。产品质量低劣，必然会失去销售市场，直到工厂倒闭。一个有远见而又务实的企业领导者必须对产品的无损检测予以高度重视，一个先进的国家也必须把无损检测技术的发展放在重要的位置上。

3. 展望

需要是发明之母，无损检测技术的发展是与现代工业的发展需要紧密相关的。最近 10 年的超声检测技术已明显地表明了下列趋向：

1) 由定性检测向定量检测和直接显示缺陷的图像发展。经过 70 年代和 80 年代的科研积累和计算机图像科学的发展，现正由定性判断缺陷的有无而发展为对缺陷的位置、大小、形状、性质进行定量判断，并且利用各种成像技术直接显示缺陷的二维、准三维图像。

2) 向在线自动检测和仪器的智能化发展，其中非接触超声检测技术将获得突破性进展。

3) 超声检测和断裂力学相结合，对于重要工程构件的寿命进行评价。

4) 超声检测和材料的物性评价相结合，在新材料的设计、加工和工程应用中迅速得到发展。

近 10 年来，由于改革开放以来工业发展的刺激，我国的超声检测技术也得到了较快的发展。总的看来，现处于高技术引进阶段。随着进一步的改革开放，预计我国的超声检测技术将在深度和广度方面得到更快发展。

目 次

前 言	I
引 言	II

第一篇 超声检测的物理基础

第一章 振动与波	1
1-1 简单机械系统的振动	1
1-2 波	8
第二章 超声波	14
2-1 超声波的波型	14
2-2 超声场及其特征参量	17
2-3 固体中超声波的传播	22
2-4 超声波在平面界面上的反射与折射	24
2-5 几何超声	44
2-6 超声波在传播中的衰减	53
2-7 声源的声场特性	55

第二篇 超声检测设备与方法

第三章 超声检测仪器	68
3-1 超声探伤仪的分类	69
3-2 A型显示脉冲反射式超声探伤仪	71
3-3 平面显示超声探伤仪	75
第四章 超声换能器	80
4-1 压电效应和压电材料	80
4-2 压电方程和压电参数	87
4-3 压电圆片的厚度振动	92
4-4 压电超声换能器	99
第五章 超声检测方法	109
5-1 共振法	109

5-2	穿透法	110
5-3	脉冲反射法	114
第六章	当量法和试块	127
6-1	缺陷的定位和定量	127
6-2	试块	143

第三篇 常规超声检测技术

第七章	锻件探伤	150
7-1	锻件探伤的技术要求和缺陷的定量	150
7-2	锻件中的常见缺陷及其定性	155
第八章	铸件探伤	165
8-1	铸钢件的探伤	166
8-2	铸铁件和有色金属铸件的探伤	171
第九章	焊缝的探伤	174
9-1	斜角法焊缝探伤基础	174
9-2	扫查方式及其试块	182
9-3	单斜探头探伤法	186
9-4	焊缝中的缺陷和波形估判	196
第十章	型材探伤	204
10-1	无缝管材的探伤	204
10-2	棒材探伤	211
10-3	板材探伤	217

第四篇 超声检测新技术

第十一章	声成像和超声全息	229
11-1	声成像技术	229
11-2	超声全息	237
第十二章	声学显微镜	246
12-1	声学显微镜的工作原理	246
12-2	声学显微镜的成像原理、工作模式和性能指标	248
12-3	声学显微镜的应用	251
第十三章	非接触超声无损检测技术	254
13-1	直接磁致伸缩技术	254

13-2	电磁声技术.....	257
13-3	激光超声技术.....	263
13-4	静电耦合、干耦合和空气耦合技术.....	274
第十四章 声发射技术和 AU 技术		278
14-1	声发射的物理基础.....	279
14-2	声发射信号的特征参数和检测仪器.....	284
14-3	声发射技术的应用.....	292
14-4	AU 技术.....	268
主要参考文献		301

第一篇 超声检测的物理基础

第一章 振动与波

波分为机械波和电磁波两大类,超声波是机械波的一种,是机械振动在连续介质(气体、液体、固体)中的传播过程,所以,机械振动是超声波产生的根源。为了了解超声波,首先要了解机械振动的一般规律。

1-1 简单机械系统的振动

一、谐振动

振动是指物体在其平衡位置附近的来回往复运动,是物体运动的一种普遍形式,如超声探头内压电晶片的振动,单摆的运动等等。最简单的振动是谐振动,其特点是振动物体在其平衡位置附近作一维往复的周期性运动。如图 1-1 所示的弹簧振子:质量为 M 的物体连接在一端固定的弹簧上,物体置于没有摩擦的光滑水平面上。当对物体施加瞬时水平外力后,物体便在弹簧力 F 的作用下做谐振动。

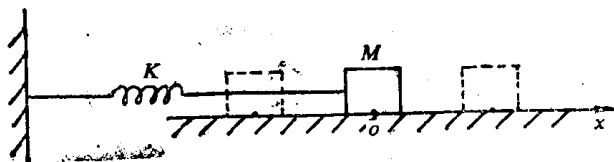


图 1-1 弹簧振子

若弹簧的弹性系数为 K ，重量忽略不计，物体质量为 M ，物体的位移为 x ，则由虎克定律

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

由牛顿第二定律

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

联合上述两式可得

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x \quad (1-3)$$

其中 $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ，叫振动的圆频率。其解为

$$x = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-4)$$

A_m 为位移振幅， φ 为初始相位，是由初始条件确定的常数。

式(1-3)是描述物体谐振动的一维微分方程，由于略去了运动时的摩擦阻力，又叫自由谐振动微分方程。式(1-4)说明自由谐振动的位移是时间的简谐函数，它描述物体在其平衡位置附近随时间作圆频率为 ω_0 的往返运动的规律。

以 f 表示物体振动的频率，即在一秒时间的振动次数。

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1-5)$$

以 T 表示振动周期

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (1-6)$$

上述两式表明，自由谐振动的频率 f 和周期 T 只与振动系统的固有常数即质量 M 和弹性常数 K 有关。

物体的振动速度 v 和振动加速度 a 可以从式(1-4)求得

$$v = \frac{dx}{dt} = v_m \overset{\cos}{\sin} \left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-7)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = a_m \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi) \quad (1-8)$$

式中，若初始相位 $\varphi=0$ ，将 $x(t)$ 、 $v(t)$ 和 $a(t)$ 绘于图 1-2，比较可知自由谐振动的位移、速度和加速度之间的关系和特点：

- 1) 振幅均为常数，不随时间改变；
- 2) 具有相同的恒定周期；
- 3) 位移、速度和加速度的相位依次相差 $\frac{\pi}{2}$ 。

也常用复数形式描述自由谐振动：

$$x(t) = A_m e^{i(\omega_0 t + \varphi)} \quad (1-9)$$

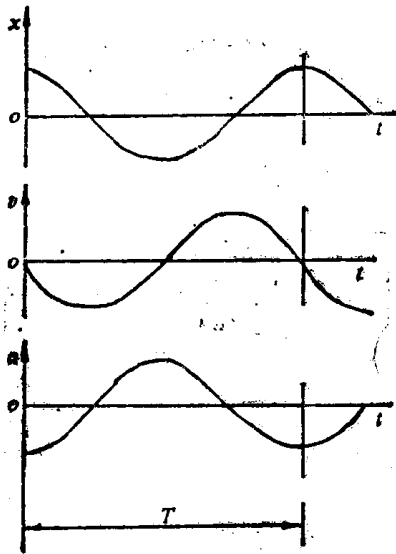


图 1-2 自由谐振动的位移、速度和加速度

二、阻尼振动

如上所述，自由谐振动的振幅是常数，是不随振动时间而变的，换言之，它是等幅振动。这是没有考虑振动系统的阻尼力的缘故。在实际振动系统中总是存在着各种形式的阻尼力的，如摩擦力，空气阻力等等。

设振动物体在振动过程中受阻尼力 F_r ，在小振幅振动中，它与振动速度的大小成正比

$$F_r = -R_M \frac{dx}{dt}$$

其中 R_M 叫系统的阻力系数或力阻，负号表示阻尼力与运动方向相反。

为了得到描述阻尼振动的微分方程，须在自由谐振动微分方程中加入阻尼力，即得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1-10)$$

其中 $\delta = \frac{R_M}{2M}$ 称为衰减系数或振幅衰变率

上式的通解为

$$x(t) = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (1-11)$$

式中 $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ，叫做阻尼振动的自然频率； A_0 和 φ 为两个实常数，由初始条件确定。记

$$A(t) = A_0 e^{-\delta t} \quad (1-12)$$

表示物体做阻尼振动时，振幅 $A(t)$ 随时间按指数规律减小，衰减系数 δ 越大，振幅衰减越快。定义振幅衰减到初始振幅值的 $1/e$ 所需要的时间叫做衰减模量 τ ，用来度量衰减之快慢。

$$\tau = \frac{1}{\delta} = \frac{2M}{R_M} \quad (1-13)$$

$\omega_d < \omega_0$ ，表明系统作阻尼振动时的固有振动的圆频率略低于自由谐振动时的圆频率。

当 $\delta^2 \ll \omega_0^2$ 时， $\omega_d \approx \omega_0$ 则

$$x(t) \approx A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-14)$$

如图 1-3 所示。

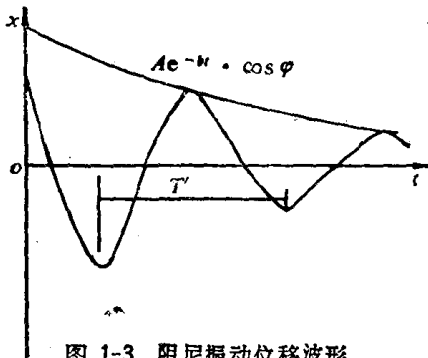


图 1-3 阻尼振动位移波形

三、受迫振动

阻尼振动由于振幅的衰减而难以持久,若要使振动持续不停,必须不断从外界获得能量,即必须施加外力到振动系统,这种物体在外力持续作用下而产生的振动称为受迫振动。超声探头中的压电圆片在交变电信号的策动下的振动就是一种受迫振动。如图 1-4 所示。

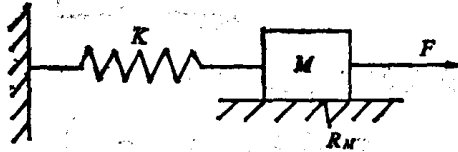


图 1-4 受迫振动系统

设外力为作周期性变化的简谐力,即

$$F(t) = F_m e^{j\omega t}$$

则受迫振动的微分方程为

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_M \frac{dx}{dt} + Kx = F_m e^{j\omega t}$$

可写为

$$M \frac{dv}{dt} + R_M v + K \int v dt = F_m e^{j\omega t} \quad (1-15)$$

方程(1-15)可以和电学中的 L-R-C 串联交流回路方程相类比

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = V_m e^{j\omega t}$$

其稳态解

$$I = \frac{V_m e^{j\omega t}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{V_m e^{j\omega t}}{Z}$$

同理,方程(1-15)的稳态解为

$$v = \frac{F_m e^{j\omega t}}{R_M + j\left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right)} = \frac{F_m e^{j\omega t}}{Z_M} \quad (1-16)$$

其中 $Z_M = R_M + j\left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right)$, 叫力阻抗,也可写成

$$Z_M = |Z_M| e^{j\theta}$$

$$|Z_M| = \sqrt{R_M^2 + \left(\omega M - \frac{K}{\omega}\right)^2} \quad (1-17)$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega M - K/\omega}{R_M}$$

式(1-16)可写成三角函数形式

$$v = v_m \cos(\omega t - \theta) \quad (1-16')$$

振动位移 x 和振动加速度可写成为

$$x = A_m \cos\left(\omega t - \theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a = a_m \cos\left(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-18)$$

受迫振动在达到稳态以后, 系统按外力的角频率作简谐振动。振动位移、速度和加速度的相位依次相差 $\pi/2$ 。

在稳态振动中, 由于存在阻力, 振动系统不断损失能量, 把每秒钟阻力 F_r 对系统所作的功叫做损耗功率 W_r ,

取一个周期的平均

$$\overline{W} = \frac{1}{T} \int_0^T W_r dt = -\frac{1}{2} R_M v_m^2 = -\frac{1}{2} R_M \omega^2 A_m^2 \quad (1-19)$$

此式表明, 平均损耗功率与力阻成正比。若力阻是由振动系统向空间辐射超声波所引起的, 则力阻越大, 就表示辐射的能量越多。

在声学中把此力阻叫做声辐射阻 R_r , (1-19)还表明, \overline{W} 与 ω^2 成正比, 即振动频率 ω 越高, 振动系统向空间辐射声能越多。换言之, 对于一个振动系统, 要达到一定的声辐射功率, 用高频辐射比用低频容易得多。

由式(1-17), 当 $\omega \ll \omega_0$ 时,

$$|Z_M| \approx K/\omega$$

$$A_m \approx F_m/K$$

$$v_m \approx F_m \omega / K$$