

机械故障诊



# 故障诊断的 声学方法



李造鼎  
李锡润  
虞和济 编  
冶金工业出版社

机械故障诊断丛书

# 故障诊断的声学方法

李造鼎 李锡润 虞和济 编

冶金工业出版社

## 内 容 简 介

本书是机械故障诊断丛书之一，它简明地讲述了故障诊断的声学原理，介绍了各种利用声学 and 噪声信号进行故障诊断的方法。重点介绍了超声波诊断所用仪器及其诊断方法并对最新的故障诊断技术——声发射诊断技术作了扼要的介绍。

本书可供从事故障诊断技术工作的工程技术人员使用，也可供有关大专院校师生参考。

### 机 械 故 障 诊 断 丛 书 故 障 诊 断 的 声 学 方 法 李造鼎 李锡润 虞和济 编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街高碑店北街39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张5 5/8 字数144千字

1989年9月第一版 1989年9月第一次印刷

印数00,001~7,000册

ISBN 7-5024-0447-3

TH·23 定价4.20元

# 前 言

利用声波检测物品质量是一种古老的方法。夏季买西瓜时，人们利用拍打的声音判断西瓜生熟；买花盆，瓷器时，利用撞击声判断它们的好坏；医生利用听诊器看病；铁路工人用手锤检查车辆。这些简单而古老的检测方法一直延用至今，并发展成为目前较为先进的声波检测技术。

近年来，超声波检测技术有了长足的进步，其广泛用于军事、航海测量，医疗卫生等许多领域，并得到了人们的普遍重视。

本书作为机械故障诊断丛书之一，主要介绍了故障诊断的声学原理，简明地讲述了各种利用声学和噪声信号进行故障诊断的方法。书中重点阐述了超声波诊断所用仪器及其诊断方法，并对最新的故障诊断技术——声发射诊断技术作了扼要的介绍。

该书由李造鼎主编，虞和济和李锡润参加编写。书中第一章由李锡润编写，第二章由虞和济编写，第三、四、五、六章由李造鼎编写。

# 目 录

<b>1 故障诊断的声学基础</b> .....	1
<b>1.1 概述</b> .....	1
1.1.1 声波的概念 .....	1
1.1.2 超声波的特性 .....	1
1.1.3 声波检测系统 .....	2
1.1.4 振动和波动的区别 .....	2
<b>1.2 波动方程</b> .....	3
1.2.1 固体介质中的运动微分方程 .....	3
1.2.2 几何方程、体积应变 .....	5
1.2.3 物理方程 .....	8
1.2.4 波动方程 .....	8
1.2.5 纵波与横波 .....	9
1.2.6 纵波与横波的位移势函数 .....	9
<b>1.3 波动方程的解</b> .....	10
1.3.1 波动方程的通解 .....	10
1.3.2 谐和律振动的波 .....	11
1.3.3 平面波 .....	11
1.3.4 球面波 .....	11
1.3.5 表面波与板波 .....	12
<b>1.4 描述声波常用的物理量</b> .....	14
1.4.1 声速 .....	14
1.4.2 波长 .....	14
1.4.3 周期 .....	14
1.4.4 频率 .....	14
1.4.5 角频率 .....	14
1.4.6 声压 .....	14

1.4.7	声场 .....	15
1.4.8	声阻抗 .....	15
1.4.9	声能密度 .....	16
1.4.10	声强 .....	16
1.5	声波在界面上的反射与折射 .....	16
1.5.1	液体—固体界面 .....	16
1.5.2	固体、液体—空气界面 .....	19
1.5.3	两种液体的界面 .....	20
1.5.4	声波在多层平面中的穿透 .....	20
1.6	声波的衰减 .....	22
1.6.1	声波的扩散衰减 (几何衰减) .....	22
1.6.2	声波的散射衰减 .....	23
1.6.3	声波的吸收衰减 .....	27
1.6.4	衰减系数 .....	33
1.6.5	声波衰减系数测量方法 .....	34
1.6.6	品质因数 .....	35
1.7	声波的辐射 .....	36
1.7.1	声波的辐射现象 .....	36
1.7.2	平面活塞辐射 .....	40
1.7.3	平面活塞辐射器上的介质反作用力和辐射 阻抗 .....	46
1.8	声波的接收 .....	48
1.8.1	接收器表面的压力和接收面振速 .....	48
1.8.2	圆片上的接收压力 .....	51
2	声音和噪声诊断方法 .....	54
2.1	概述 .....	54
2.2	声的频率分析 .....	54
2.3	声的响度测量 .....	58
2.4	声功率分析 .....	59

<b>2.5 声音测量</b> .....	59
2.5.1 送话器—传声器 .....	60
2.5.2 传声器的选择与应用 .....	60
2.5.3 探管传声器 .....	60
2.5.4 标准耳机 .....	60
2.5.5 声级计 .....	61
<b>2.6 磁带录音机</b> .....	61
2.6.1 对磁带及录音机的要求 .....	61
2.6.2 磁带环 .....	62
2.6.3 冲击(单脉冲)波的记录 .....	62
<b>2.7 声信号的分析与处理</b> .....	64
2.7.1 声音分析器 .....	64
2.7.2 声音信号的数据处理 .....	64
<b>2.8 声音监测和诊断的工程应用</b> .....	64
2.8.1 声音诊断系统 .....	64
2.8.2 多声源的辨识 .....	66
2.8.3 声音分析器诊断系统 .....	67
2.8.4 发动机点火率的倒频谱分析 .....	67
<b>2.9 噪声定义</b> .....	68
<b>2.10 噪声诊断的工程应用</b> .....	69
2.10.1 发动机噪声的确定 .....	69
2.10.2 燃料油喷射装置的噪声 .....	70
2.10.3 大型柴油机的缺陷诊断 .....	70
<b>3 超声波传感器及诊断仪</b> .....	72
3.1 传感器的地位和作用 .....	72
3.2 传感器的工作原理 .....	72
3.3 压电效应 .....	73
3.4 压电方程 .....	75
3.5 压电体的参数 .....	77

3.5.1	压电系数	77
3.5.2	电容率 $\epsilon$ (介电常数)	79
3.5.3	频率常数 $N$	80
3.5.4	电学品质因数 $Q_e$	81
3.5.5	机械品质因数 $Q_m$	81
3.5.6	机电耦合系数 $K$	82
<b>3.6</b>	<b>传感器的振动模式</b>	<b>85</b>
3.6.1	压电振子的等效电路	85
3.6.2	压电振子的振动模式	89
3.6.3	振动模式对传感器性能的影响	90
<b>3.7</b>	<b>压电材料</b>	<b>90</b>
<b>3.8</b>	<b>传感器的特性及结构</b>	<b>92</b>
3.8.1	工作频率和频率特性	92
3.8.2	阻抗特性	93
3.8.3	辐射特性	93
3.8.4	换能特性	94
<b>3.9</b>	<b>超声诊断用传感器的种类及结构</b>	<b>95</b>
3.9.1	传感器种类	95
3.9.2	纵波传感器	96
3.9.3	横波传感器	97
3.9.4	复合结构纵波探头	98
3.9.5	单孔测井探头	99
<b>3.10</b>	<b>超声波诊断仪</b>	<b>100</b>
<b>4</b>	<b>超声波诊断方法</b>	<b>103</b>
4.1	概述	103
4.2	通用技术	103
4.3	共振法	105
4.4	穿透法	105
4.5	脉冲反射法	105



4.5.1	直接接触纵波脉冲反射法 .....	106
4.5.2	组合双探头纵波脉冲反射法 .....	108
4.5.3	横波脉冲反射法 .....	108
4.5.4	表面波脉冲反射法 .....	109
<b>4.6</b>	<b>液浸法 .....</b>	<b>110</b>
<b>4.7</b>	<b>大型锻件缺陷诊断 .....</b>	<b>111</b>
4.7.1	一般技术要求 .....	111
4.7.2	锻件中缺陷的定量法 .....	111
<b>4.8</b>	<b>铸件缺陷诊断 .....</b>	<b>115</b>
<b>4.9</b>	<b>焊缝缺陷诊断 .....</b>	<b>116</b>
<b>4.10</b>	<b>岩体与混凝土工程超声波诊断 .....</b>	<b>118</b>
4.10.1	概 述 .....	118
4.10.2	工程声学检测内容 .....	119
4.10.3	工程声学检测法 .....	120
4.10.4	岩石超声波衰减测量 .....	125
<b>6</b>	<b>超声波诊断信号处理特点 .....</b>	<b>131</b>
5.1	概 述 .....	131
5.2	数字滤波 .....	133
5.3	超声扫描成像及全息摄影技术 .....	146
5.3.1	超声扫描成像 .....	146
5.3.2	超声全息摄影技术 .....	147
<b>6</b>	<b>声发射诊断技术 .....</b>	<b>149</b>
6.1	概 述 .....	149
6.2	声发射技术的理论基础 .....	152
6.2.1	声发射条件及声发射源 .....	152
6.2.2	声发射信号的特征及表示方法 .....	154
6.2.3	声发射源定位 .....	157
6.3	声发射仪概述 .....	164

6.3.1	声发射仪 .....	164
6.3.2	声发射传感器 .....	165
6.4	声发射技术在岩体工程检测中的应用示例 .....	168
6.4.1	矿山岩石声发射模拟实验和现场实测 .....	168
6.4.2	用声发射的不可逆效应测量岩体中 原始应力 .....	169
6.4.3	岩体冒落和崩塌预报 .....	169
6.4.4	地震序列的研究 .....	169

# 1 故障诊断的声学基础

## 1.1 概述

### 1.1.1 声波的概念

在弹性介质中，当振源频率在20~20000赫之间时，振源引起的波动叫声波，人的耳朵可以感受到它。当振源频率低于20赫或高于20000赫时，人耳无法听到。低于20赫的波动叫次声波，高于20000赫的波动叫超声波。

利用声波检测物品质量是一个古老的方法。夏季买西瓜时，利用拍打的声音判断西瓜生熟。买花盆、瓷器时，利用撞击声音判断它们的好坏。医生利用听诊器看病，铁路工人用手锤检查车辆。这些简单而古老的检测方法一直沿用至今，并发展到目前较为先进的声波检测技术。

在人类利用超声波之前，生物早已利用超声波了，蝙蝠在飞行时发出30~120千赫的超声波脉冲，利用反射波辨别方向、捕捉食物。海豚能发出50千赫的超声波。

人类最早将超声波用于航海测量。第一次世界大战迅速推动了超声测量技术的发展，主要是在战时用于发现敌方潜艇。近年来超声检测技术得到了长足的进步，广泛用于军事、医疗以及国民经济各领域。

### 1.1.2 超声波的特性

超声波是频率高于20000赫的声波，它有如下二种特性并使之得到了广泛应用。

1) 普通广播用电磁波波长以米计，超声波的波长以毫米计，光波的波长更短一些。所以，它的特性与光波相近，有很好的指向性，频率越高、指向性越好。

2) 超声波可在物体界面上或内部缺陷处发生反射、折射和

绕射，据此可对物体内部进行测量，并且波长越短，识别缺陷的尺寸越小。

### 1.1.3 声波检测系统

最常用的声波检测系统如图1-1。发射电路接收到时基电路

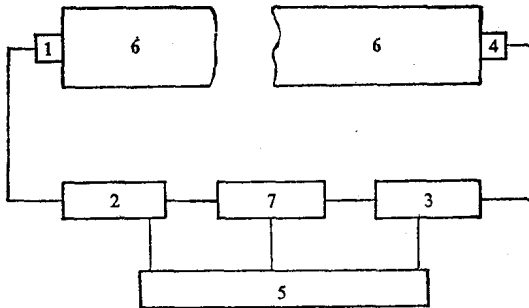


图 1-1 声波检测系统

- 1—发射传感器；2—发射电路；3—接收电路；4—接收传感器；  
5—电源；6—介质（物体）；7—时基电路

发出的信号后，发出电脉冲，送至发射传感器，发射传感器将电脉冲变成机械振动，并向物体辐射声波；声波在介质（物体）中传播，物体中的夹层、裂隙、界面、以及介质本身将改变声波的幅值、相位、频谱、传播时间等。于是在声波传播的过程中，声波携带了介质的信息。当声波传至接收传感器处，引起接收传感器振动。在接收传感器中，将机械振动信号变成电流（电压）信号，该信号送至放大器放大后，根据需要可显现出信号的波形，到达时间等信息，据此可对介质（物体）进行检测。

声波检测系统除图1-1所示模型外，尚有其它型式，但与图1-1无本质区别，以后还要详加叙述。

在图1-1声波检测系统中，仪器、传感器工作原理已在本套丛书中其它分册叙述，本章节着重论述声波的幅射、传播和接收。因篇幅所限，本书将着重阐明声波的物理意义，略去繁杂的推导过程。

### 1.1.4 振动和波动的区别

振动在介质中引起波动，但振动和波动有重大区别。振动是指质点在一定位置的附近，作来回往复的运动。波动是振动的传播过程，即振动状态的传播。

振动是指单一质点或者可以看作集中参数系统物体的振动。所谓集中参数系统是指可将系统内的质量、弹力、阻力集中于一点的系统。在自然界，质量、弹力、阻力集中于一点的物体严格地说是并不存在的，仅当物体变形时间与振动周期相比要小得多时，或者物体线度与波长（振动导致波动的波长）相比要小得多时，才可将物体视为集中参数系统。

波动发生在分散参数系统之中，所谓分散参数系统是指质量、弹力、阻力在空间连续分布。

振动是在封闭系统中进行的。当不考虑损耗时，作为振动的单一质点能量是守恒的。波动是在开放系统中进行的。当不考虑损耗时，波动是能量的传播过程，作为某一个特定质点，输入能量等于输出能量，即合能量为零。

## 1.2 波动方程

### 1.2.1 固体介质中的运动微分方程

在波动传播的固体介质中任取一个小体元  $dV$ ，见图1-2。它在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的长度分别为  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$ 。

一般而论，作用于体元上的应力分量是位置坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的函数，因而作用于左右、前后、上下两对面上的应力分量不完全相同，具有微小的差量。例如，设作用于后面的正应力为  $p_{xx}$ ，则作用于前面的正应力，由于  $x$  坐标的改变，将是  $p_{xx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} \times dx$ 。同样设后面  $z$  方向上的剪应力为  $p_{xz}$ ， $y$  方向的剪应力为  $p_{xy}$ 。则前面  $z$  方向上的剪应力为  $p_{xz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} dx$ ， $y$  方向的剪应力为  $p_{xy} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} dx$ 。其余各面上的应力分布见图1-2。各应力

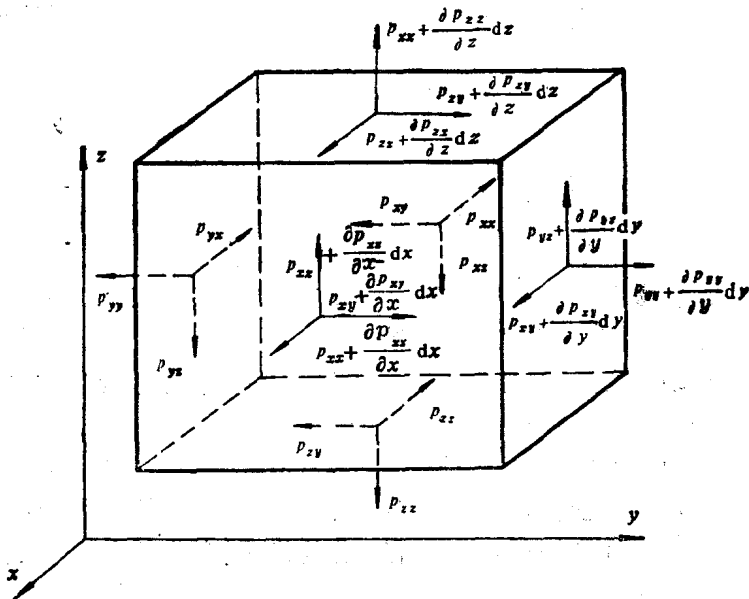


图 1-2 体元上的应力分布

的脚标意义为：第一脚标代表应力所在平面，第二脚标为应力方向。

首先，以连接六面体前后两面中心的直线为轴，列出力矩的平衡方程  $\Sigma M = 0$ ，得到

$$\left( p_{yz} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} dy \right) dx dy dz / 2 + p_{zy} dx dy dz / 2 - \left( p_{zy} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} dz \right) dx dy dz / 2 - p_{yz} dx dy dz / 2 = 0$$

化简，略去高阶微量后，得到

$$p_{yz} = p_{zy} \quad (1-1)$$

同理得到

$$p_{xz} = p_{zx}; \quad p_{xy} = p_{yx} \quad (1-2)$$

式1-1, 1-2是剪应力互等定理公式。

以  $x$  轴为投影轴, 写出  $x$  方向的合力, 得到

$$\begin{aligned}
 N_x = & \left( p_{xx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} dx \right) dydz - p_{xx} dydz \\
 & + \left( p_{yx} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} dy \right) dzdx - p_{yx} dzdx \\
 & + \left( p_{zx} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} dz \right) dxdy - p_{zx} dxdy \\
 & + X dxdydz
 \end{aligned}$$

式中  $X$  为体积力, 在波动问题中,  $X$  对波动影响不大, 可以忽略不计。按牛顿第二定律, 合力  $N_x$  等于单元体质量与  $x$  方向加速度的乘积, 即

$$N_x = \rho dxdydz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

式中  $\rho$  —— 介质密度;

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  ——  $x$  方向体元的加速度。

由以上两式, 在忽略体积力时, 可得到运动微分方程, 同理可得出其余两方向的运动微分方程, 总结为

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\
 \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\
 \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中  $u, v, w$  —— 分别为  $x, y, z$  方向位移。

式1-3是体元的运动微分方程, 它对一切弹性体都是普遍成立的。

### 1.2.2 几何方程、体积应变

经过弹性介质中的任意一点  $P$ ，在  $xOy$  平面内，沿  $x$  和  $y$  方向取两个微小长度线段  $PA = dx$  和  $PB = dy$ ，如图 1-3 所示。弹性介质受力变形后，设  $P$ 、 $A$ 、 $B$  三点分别移动到  $P'$ 、 $A'$ 、 $B'$ 。

首先来求出线段  $PA$  和  $PB$  的正应变，即  $\varepsilon_{xx}$ 、 $\varepsilon_{yy}$  用位移分量表示的表达式。设  $P$  点在  $x$  方向的位移分量为  $u$ ，则  $A$  点在  $x$  方向的位移分量、由于  $x$  坐标的改变、将是  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ 。可见线段

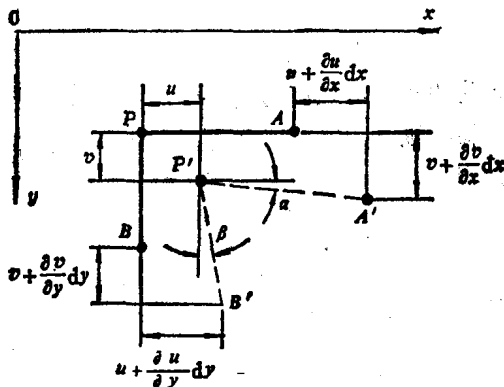


图 1-3 弹性介质内一点邻近的应变

$PA$  的正应变

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

在这里，由于位移是微小的， $y$  方向的位移  $v$  所引起的线段  $PA$  的伸缩是高一阶的微量，因此略去不计。同样线段  $PB$  的正应变是

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

现在来求出线段  $PA$  与  $PB$  之间直角的改变量，也就是将剪应变  $\varepsilon_{xy}$  用位移表示。由图可见，这个剪应变是由两部分组成的：



一部分是由  $y$  方向的位移  $v$  引起的, 即  $x$  方向的线段  $PA$  的转角  $\alpha$ ; 另一部分是由  $x$  方向的位移  $u$  引起的, 即  $y$  方向的线段  $PB$  的转角  $\beta$ 。

设  $P$  点在  $y$  方向的位移分量为  $v$ , 则  $A$  点在  $y$  方向的位移分量将是  $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$ 。因此, 线段  $PA$  的转角是

$$\alpha = \frac{\left(v + \frac{\partial v}{\partial x} dx\right) - v}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x}$$

同样线段  $PB$  的转角为

$$\beta = -\frac{\partial u}{\partial y}$$

于是可见,  $PA$  与  $PB$  之间的直角改变量, 也就是剪应变

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

分别取点  $P$  在平面  $xoz$  和  $yo z$  中的投影, 按上面三式的同样推导过程, 可分别得到  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{zx}$  的位移表达式, 它们是

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

上式为弹性介质中, 应变分量与位移分量之间的几何方程。

现在来导出体积的改变与位移分量之间的关系。在图1-1中, 变形前体元的体积是  $dx dy dz$ , 变形后, 体积为

$$(dx + \varepsilon_{xx} dx)(dy + \varepsilon_{yy} dy)(dz + \varepsilon_{zz} dz)$$

因此, 体元的体积改变, 即体应变为:

$$e = \frac{(dx + \varepsilon_{xx} dx)(dy + \varepsilon_{yy} dy)(dz + \varepsilon_{zz} dz) - dx dy dz}{dx dy dz}$$