

基于小波分析及神经网络的 混凝土内部缺陷智能识别



张立新 著



燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

基于小波分析及神经网络的 混凝土内部缺陷智能识别

张立新 著



燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

· 秦皇岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于小波分析及神经网络的混凝土内部缺陷智能识别/张立新著. —秦皇岛:燕山大学出版社, 2016. 6

ISBN 978-7-81142-295-5

I. ①基… II. ①张… III. ①混凝土—缺陷—识别—研究 IV. ①TU755.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 159373 号

基于小波分析及神经网络的混凝土内部缺陷智能识别

JIYU XIAOBO FENXI JI SHENJING WANGLUO DE HUNNINGTU NEIBU QUEXIAN ZHINENG SHIBIE

著 者: 张立新

责任编辑: 孙志强

封面设计: 尹 佳

出版发行:  燕山大学出版社
YANSHAN UNIVERSITY PRESS

地 址: 河北省秦皇岛市河北大街西段 438 号

邮政编码: 066004

电 话: 0335-8387555

印 刷: 中国标准出版社秦皇岛印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 700 mm×1000 mm 1/16 印 张: 8 字 数: 155 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版 印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81142-295-5

定 价: 20.00 元

版权所有 侵权必究

如发生印刷、装订质量问题,读者可与出版社联系调换

联系电话: 0335-8387555

前言

21 世纪社会发展日新月异,混凝土作为最基本的建筑材料,以其优良性能得到了广泛应用。据不完全统计,在所有建筑结构材料中,混凝土所占比重在 70% 以上。但是,由于混凝土是多种材料混合水化形成的聚合物,在浇筑及使用过程中,内部常会出现质量缺陷,严重影响建筑物承载能力及使用年限,成为威胁人们生命财产安全的重要隐患。

在生产和使用过程中对混凝土构件进行检测是消除隐患的重要手段,其中超声波及应力波检测以其简便高效得到了广泛应用。但是由于混凝土内部界面复杂,微小孔隙、裂缝众多,使得检测波形复杂难辨,识别缺陷有无精度较高,但识别缺陷类型精度及可靠性较低。因此,研究检测精度可靠性更高的检测方法具有重要的理论价值及工程应用价值。为此,本书提出将检测信号从时域转换到频域,利用先进频谱分析方法增强识别效果。

小波分析是一种近几十年发展起来的先进信息处理方法,可以通过多分辨率分析,精确到信号的任何细节,在信号降噪及信息提取方面有着优良的性能。人工神经网络具有很好的分类能力及模式识别能力,可以实现对信息的智能识别。所以,在本书中,应用小波分析对信号降噪及特征向量提取,然后通过神经网络对特征向量进行训练及识别,以实现缺陷有无及缺陷范

围、尺寸及类型的识别。

本书在撰写过程中,得到了燕山大学李慧剑教授及相关同事的大力支持与帮助,在此表示深深的谢意!

本书的撰写参考了大量的相关文献,在此向相关作者表示感谢!

由于笔者水平有限,书中难免有不当之处,请读者不吝赐教!

著 者
2016年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外混凝土缺陷检测研究进展	2
1.3 混凝土缺陷检测存在的问题	3
1.4 高效新型信息处理技术的发展	4
1.4.1 频谱分析在无损检测中的应用发展	4
1.4.2 小波分析和神经网络在无损检测中的应用发展	5
1.5 本书研究内容和技术路线	6
1.5.1 主要研究内容	6
1.5.2 研究技术路线	7
第 2 章 超声波检测理论及检测系统设计	8
2.1 超声波检测的理论	8
2.1.1 超声波的一般概念	8
2.1.2 超声波在弹性介质中的波动方程	9
2.1.3 超声波在混凝土中的传播方式	11
2.1.4 超声波的衰减	13
2.1.5 超声检测混凝土缺陷的原理	14
2.2 检测系统设计	15
2.2.1 超声检测设备	15
2.2.2 检测方法	16
2.2.3 试件制备及规格	16
2.3 超声信号处理	18
2.3.1 信号采集	18



2.3.2 信号预处理	18
2.4 观察法检测结果分析	20
2.5 本章小结	22
第3章 混凝土内部缺陷超声检测频谱分析	23
3.1 概述	23
3.2 频谱分析的理论及应用研究	23
3.2.1 傅立叶变换	24
3.2.2 快速傅立叶变换及其应用研究	24
3.2.3 功率谱及其应用研究	27
3.3 本章小结	30
第4章 基于小波分析的混凝土缺陷特征信息提取	31
4.1 概述	31
4.2 小波分析	31
4.2.1 小波分析的发展	31
4.2.2 小波分析国内外研究现状	33
4.2.3 小波分析的定义	34
4.2.4 小波变换的特点	36
4.2.5 常用小波基简介	37
4.2.6 小波函数的选择	40
4.2.7 基于小波分析的多分辨率分析	40
4.2.8 小波分析在超声信号消噪方面的应用	43
4.3 小波包分析	47
4.3.1 小波包概述	47
4.3.2 小波包的定义	48
4.4 基于小波包分析的混凝土缺陷特征提取	48
4.4.1 小波包分析步骤	49
4.4.2 小波包分析结果	49
4.5 本章小结	53
第5章 基于神经网络的混凝土缺陷定量识别	54
5.1 概述	54
5.2 神经网络的发展	54

5.3 神经网络的基本原理及特点	55
5.4 BP 神经网络	57
5.4.1 BP 网络结构	57
5.4.2 BP 算法原理	57
5.4.3 BP 算法参数选取	59
5.4.4 基于 BP 神经网络对混凝土缺陷定量识别	61
5.4.5 检测结果分析	70
5.5 本章小结	70
 第 6 章 小波分析及神经网络在混凝土裂缝深度诊断上的	
应用	71
6.1 概述	71
6.2 理论基础	73
6.2.1 小波分析	73
6.2.2 RBF 神经网络	73
6.3 基于能量法的特征向量构造	74
6.4 试验验证	74
6.5 本章小结	78
 第 7 章 基于小波分析及神经网络内孔透射法灌注桩检测	
研究	79
7.1 概述	79
7.2 理论基础	81
7.3 能量特征向量的构造	82
7.4 试验验证	83
7.4.1 试验系统	83
7.4.2 声速法识别	83
7.4.3 频谱能量法识别	84
7.5 本章小结	85
 第 8 章 低应变法灌注桩缺陷检测研究及小波分析和神经网络	
应用	86
8.1 概述	86
8.2 反射波法基本原理	87

■ ■ ■ 基于小波分析及神经网络的混凝土内部缺陷智能识别

8.2.1 反射波法基本模型	87
8.2.2 应力波在桩身传播和缺陷诊断原理	88
8.3 试验验证及工程实例分析	90
8.3.1 检测系统	90
8.3.2 检测结果计算及效果分析	94
8.3.3 工程实例分析	96
8.4 小波分析去噪在桩基检测上的应用	101
8.4.1 不同小波基对去噪的影响	102
8.4.2 不同分解层数对去噪的影响	103
8.4.3 去噪效果分析	103
8.5 小波神经网络在桩基检测上的应用	105
8.5.1 小波神经网络	105
8.5.2 广义能量特征向量的构造	105
8.5.3 试验验证	105
8.6 本章小结	107
第9章 结论	108
9.1 主要结论	108
9.2 研究展望	108
参考文献	110

第 1 章 绪 论

1.1 引言

建筑物的质量,无论对人民的生命财产,还是对国民经济来说,都是十分重要的,其中混凝土作为当今建筑物最重要的建筑结构材料,其质量更是重中之重。每一个建筑物按设计和规范都应有一定的安全性、适用性和耐久性,但是由于混凝土通常是在工地进行配料、搅拌、成型和养护,所以每一个环节稍有不慎都将影响其质量,甚至在其内部产生各种质量缺陷,从而危及整个结构的安全和使用功能。近年来,因混凝土质量缺陷引起的灾难性桥梁断裂、房屋倒塌的安全事故时有发生,无损检测是防止这类恶性事故发生的重要手段;另一方面,对旧建筑物进行无损检测,可以大大减少维修保养的盲目性,节约大量资金。建筑工程无损检测技术能够以低成本、少费时的方式,起到监督、诊断和检测的作用,对评价和保证建筑物的安全性和使用功能,对保护和保养珍贵古建筑起到了不可替代的作用,因此加强混凝土的质量监测与控制已成为当今建筑工程技术中的重要课题^[1]。

结构混凝土无损检测的方法有很多,从检测目的来说,检测方法可分为四类,以检测强度为目的,有半破损法(如钻芯法、拔出法和射击法等)和非破损法(如回弹法、超声法、超声回弹综合法、振动法和冲击回波法^[2]等)以及以上两种方法的综合;以检测混凝土内部缺陷(施工过程中因成形、养护等因素造成的蜂窝、孔洞、裂缝及保护层厚度不当等缺陷以及使用过程中因腐蚀、冰冻和火灾等原因所造成的损伤)为目的,检测方法有超声脉冲法、超声 CT 法^[3]、红外成像法、射线法、声发射法、雷达法^[4,5]及电磁法等;以检测结构混凝土受力历史和受力损伤程度为目的,检测方法有超声法、声发射法和钻芯法等;以检测结构混凝土的弹性模量、粘塑性指标、密实度和抗冻性等为目的,检测方法有振动法、超声法、射线法和钻芯法等;对于钢筋的位置和锈蚀等可采用电磁法和射线法等检测。

在众多无损检测方法中,超声无损检测以其独特的优势成为国内外应用最广泛、使用频率最高的无损检测方法之一。其基本原理是:由超声脉冲发射源激发高频弹性脉冲波,脉冲波通过混凝土后,用高精度的接收系统记录该脉冲

波在混凝土内传播过程中表现的波动特性,根据波的初始到达时间和波的能量衰减特性、频率变化及波形畸变特征,可以获得测区内混凝土质量的参数。超声无损检测作为一门综合性很强的边缘应用科学,与其他常规无损检测相比,具有以下优点:方向性好、穿透能力强、能量高、应用灵活、精确度高和对人体无害。现代超声无损检测技术借助计算机技术、回波频谱分析技术、电子技术、机电一体化技术等,正向着数字化、图像化、智能化和自动化方向发展^[6,7]。

总之,混凝土超声无损检测技术应用前景非常广阔,目前已成为建筑工程领域中一个重要的研究方向,也是衡量一个国家建筑工程测试技术水平的重要标志之一。充分有效地利用该项技术,有助于工程师科学合理地评定建筑物的可靠性,安全合理地使用既有建筑物,提高材料资源的再利用率,促进建筑工程业的良性发展和可持续发展^[8]。

1.2 国内外混凝土缺陷检测研究进展

一般认为,关于超声波的研究最初起始于 1876 年 F. Galton 的气哨实验。当时 Galton 哨在空气中产生的频率达 3×10^4 Hz,这是人类首次有效产生的高频声波;1949 年加拿大的莱斯利(Leslie)、齐斯曼(Cheesman)和英国的琼斯(R. Jones)等运用超声脉冲进行混凝土密实度和强度检测;前苏联、罗马尼亚的弗格瓦洛提出了用声速、回弹法综合估算混凝土强度的方法,为混凝土无损检测技术开拓了多因素综合分析的新途径;20 世纪 60 年代声发射技术引入混凝土检测体系,吕施(H. Rush)、格林(A. T. Green)等人先后研究了混凝土的发射特性,为声发射技术在惠特尼结构中的应用打下了基础;我国在这一领域的研究工作始于 50 年代中期,开始引进瑞士、英国、波兰的回弹仪和超声仪,并结合工程应用开展了许多研究工作;60 年代初即开始了批量生产回弹仪,并研制成功了多种型号的超声检测仪,在检测方法方面也取得了许多进展^[9];70 年代以后,我国曾多次组织力量合作攻关,大大推进了无损检测技术的研究和应用,现已使超声回弹综合法、超声缺陷检测法等主要无损检测技术规范化,如 CECS02:1988《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(1988 年开始实施)、CECS02:2005《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(2005 年开始实施)、CECS21:2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(2000 年开始实施)等。

近几十年来,超声无损检测技术在检测混凝土厚度、材料疲劳损伤和材料内部缺陷等方面有了更多的应用。如在国内,刘致远等用透射法检测混凝土灌注桩质量^[10],严碧歌等用超声法检测混凝土厚度^[11],马少军等用超声波平测法



检测混凝土梁的裂缝^[12],黄湘平等用超声法检测混凝土结构内部不密实区和空洞^[13],均取得了较好的效果;在国外,S. I. Rokhlin 等利用超声波检测疲劳样品中内部微裂纹的位置、大小^[14],Matteo Colomb 等用超声波法评估混凝土的热损伤^[15],也取得了较好的效果。

随着计算机技术的发展,超声波透射层析成像技术(简称超声波 CT)在混凝土质量检测中也得到了较多应用。如周黎明等将超声波 CT 技术应用于三峡工程混凝土质量检测^[16],南金生等将超声波 CT 技术应用于桩基质量的检测^[17]。超声波 CT 借鉴了医用 X 射线 CT 扫描原理,利用大量超声波信息及反演计算,通过再现被测混凝土某参数的分布规律来确定缺陷的位置和范围^[18]。

总之,混凝土结构超声无损检测技术经历了几十年的发展后日趋成熟,工程应用也越来越广泛,成为现场检测结构工程质量的主要手段之一,为提高建筑工程质量,推动建筑技术的发展做出了很大的贡献。

1.3 混凝土缺陷检测存在的问题

超声波法是当前混凝土无损检测的最有效的方法之一^[19],但由于混凝土是由几种材料混合复合而成,材料内部界面十分复杂,不论是采用反射法还是透射法,仪器采集到的信号均是众多反射波、透射波、散射波和表面波的叠加,波形非常复杂,如何将与缺陷有关的波形从众多干扰波中提取出来,一直是超声检测中的关键问题。当前应用的超声检测方法,不论是平测法、斜测法,还是混凝土超声 CT 层析成像技术,在信号采集时大多只采集初波声时,求超声波在材料中传播的平均声速,再通过声速与混凝土质量的关系判断混凝土质量;或在信号采集时同时采集初波声时、波幅和频率,通过统计方法得到其异常值,从而判断混凝土质量。这类方法的优点就是简便易行、数据处理简单。但由于只利用了波速这一种与缺陷有关的信息,或部分综合利用了波速、波幅、频率信息来判定混凝土质量,而与缺陷有关的整个波形的波幅、频谱能量、频率等大量信息并没有得到充分利用,所以难于取得混凝土缺陷更确切的信息;另一方面,在通过时域信号判别混凝土时,由于没有定量的判别标准,人为判断时又不可避免的带有主观性,判别结果可靠性较差。

总的来看,现有的混凝土超声无损检测技术大多还处于定性判断材料缺陷有无,或凭经验大致判断缺陷位置和范围的阶段,检测结果还不能完全满足实际工程结构鉴定、可靠性评估以及加固设计的需要。如能通过某种方法综合利用超声检测信号中的大量信息,并将与缺陷有关的信息有效提取出来,再通过



某种方法对提取到的信息进行定量识别判断,从而实现对混凝土缺陷的类型、位置和范围的识别,无疑将有重要的理论价值和工程应用价值。

1.4 高效新型信息处理技术的发展

1.4.1 频谱分析在无损检测中的应用发展

近年来,超声波频谱分析技术在钢材、木材等材料的无损检测领域有了大量应用。如果将被检对象视为传播超声波信号的通道,接收到的超声波信号则是受通道作用后,携带有对超声波的反射、散射、吸收、衰减等大量信息的声波信号。利用频谱分析技术从采集到的这些信息中,提取尽可能多的有关传输通道的特征信息用于研究和分析被检测对象物理性能的细微变化和不连续性。所采集的超声波可以是反射波、透射波、表面波、散射波等超声波检测技术中涉及的各种波型,特征信息可以是振幅、相位、相位差或是功率谱、相关谱等。通过频谱分析,可以解决下列问题:

(1) 确定检测信号中的各个频率成分和频率分布范围。

(2) 确定检测信号各个频率成分的幅值分布和能量分布,从而得到主要幅值和能量分布的频率值,为结构分析和设计提供依据。

(3) 通过对测试波形的分析,求得频率成分和它们的幅值,来校正测试波形,即通过测量系统的幅频特性和相频特性的校正,来反演测试波形,作为求得真实波形的重要手段。

(4) 频谱分析所提供的频率值、幅值、相位角和各种谱密度为研究动力过程的传递和衰减机理,求得被测结构的传递函数、振型和结构动力反应的各种模态参数,进行模态分析以及为解决消振、隔振等问题提供了条件。

(5) 通过频谱分析,可开展对各种对象或结构物之特征和故障诊断分析工作,如检查零部件的松动、磨损、裂纹等病害,也可用于军事侦察工作,如侦察潜水艇和飞机的型号等。

20 世纪 60 年代及更早期的谱分析技术主要由模拟电子技术来实现,其设备体积大且价格昂贵。进入 70 年代后,随着快速傅里叶变换(FFT)算法的出现及计算机技术的飞速发展,愈来愈多的谱分析由数字化设备完成;功能越来越强、使用越来越方便、设备的价格也不断走低,这都为超声无损检测技术注入了新的活力,对某些超声波检测技术起到了变革作用^[20]。

“超声频谱测定法”(Ultrasonic Spectroscopy)是 O. R. Gericke 首先应用的,他发明了一种装置,并取得了技术专利。该装置可将来自试件内部不连续



处的超声回波脉冲与它们的频谱一起显示在示波器上。其方法提供了材料评定和在金属部件中模拟缺陷定性诊断的可能性。通过一系列实验结果,得出了关于不同晶粒钢试件超声衰减对频率的完整曲线而不需要用许多单频探头进行检测。

在频谱分析的技术应用方面,其适用范围也非常广。如在国内,李雷等利用快速傅里叶变换提取缺陷性质特征值^[21];在国外,Wallaley 等通过试验建立了一个定量模型,用频谱法成功实现了缺陷大小和方位的预测;Lomenz 以缺陷超声回波信号的频谱为特征,进行钢板中圆柱孔和平底孔缺陷的类型识别;Adam C. Cobb 用超声波时频分析方法检测材料疲劳裂纹^[22]等。

1.4.2 小波分析和神经网络在无损检测中的应用发展

小波分析方法在信号处理方面具有得天独厚的优越性。它具有良好的时频局部化特性,可以聚焦到信号的任意细节,因此被誉为分析信号的数学显微镜^[23]。正因如此,它可以用来探测正常信号和反常信号间的细微差别,提取反常信号的特征信息。如张海燕等利用小波包变换对缺陷信号降噪及特征值提取^[24];Luciano Telesca 利用多分辨率小波分析揭示了在爱琴海南部的地震活动^[25]等。

近年来,人工神经网络(ANN)技术也取得了较大发展。由于神经网络能够任意逼近任何非线性映射,可以对大量繁杂的、看似毫无规律的信息进行有效的分类,因此在模式识别、控制工程、信号处理、辅助决策等领域得到了广泛应用。如李清富等利用神经网络方法建立了混凝土测强换算的 BP 网络模型^[26];窦继民利用 BP 神经网络建立水工混凝土裂缝深度与其相关参数之间的关系模型^[27];田宝国等利用人工神经网络进行目标识别和分类^[28];国外有研究人员采用神经网络技术开发了智能定位仪来对设备的连续声发射源进行定位^[29]。

将小波分析和神经网络结合起来,发挥各自优势,现在已在包括金属、木材无损检测等领域有了较多应用。如在国内,卢超等对合金材料超声信号的小波变换进行了特征分析,提取了各级小波分解信号的能量分布特征,然后将这些特征输入人工神经网络进行训练和分类^[30];刘旭等对典型的金属缺陷信号特征进行提取,利用 BP 网络分类^[31];吴森等利用小波变换提取焊接试件超声检测中的缺陷信号特征值,然后采用 BP 神经网络对缺陷进行定性分类^[32];Cheol-Ki 等利用小波和人工神经网络检测水质^[33]等。

对无损检测信号进行处理,判定缺陷的类型、位置、范围,实现混凝土缺陷

的定量检测,为混凝土缺陷无损检测开拓新的途径。混凝土内部界面复杂,受缺陷的分布位置、缺陷的大小等诸多因素的影响,在混凝土中传播的超生波信号包含大量的信息。从波速角度可以对混凝土缺陷进行定性的检测,但由于采集到的信息有限,有时缺陷的位置和大小很难得出确切结论。用频谱分析和小波处理检测数据在理论上为混凝土缺陷定量检测奠定了理论基础,提高了检测质量,扩展了混凝土缺陷无损检测的途径。

1.5 本书研究内容和技术路线

1.5.1 主要研究内容

本书在总结前人研究成果的基础上,结合试验对频谱分析、小波分析和神经网络应用于混凝土无损检测作了详细的研究。具体说来,本书的主要研究内容如下:

(1) 设计信号采集系统,探讨偶然信号剔除方法及信号归一化问题。

(2) 编写 MATLAB 程序,将快速傅里叶变换(FFT)和 Welch 功率谱应用于混凝土超声检测信号处理,分析混凝土密实区域及五类缺陷(空洞、裂缝、隔离层、漏振、离析)区域信号频谱特征,探讨通过频谱分析识别混凝土内部状态的可行性及可靠性。

(3) 应用 MATLAB 小波工具箱编写程序,通过小波多分辨率分析,对信号进行消噪处理,并探讨了不同消噪方法对处理效果的影响。

(4) 通过小波包变换,将信号从时域转换到频域,提取频率特征向量,分析各类信号特征向量特点。

(5) 构造神经网络,将通过小波包变换得到的特征向量作为输入向量,对缺陷类型进行识别。

(6) 分析探讨不同小波基函数、不同小波分解层数、不同神经网络类型及各有关参数对识别效果的影响。

(7) 将小波分析及神经网络应用到混凝土裂缝深度检测领域,与传统声时法比较,分析检测效果。

(8) 将小波分析及神经网络应用到内孔透射法,实现对大直径混凝土灌注桩缺陷检测识别,并分析识别效果。

(9) 介绍低应变检测混凝土灌注桩方法,并将小波分析及神经网络应用于信号消噪及桩体类型识别,并分析识别效果。



1.5.2 研究技术路线(见图 1-1)

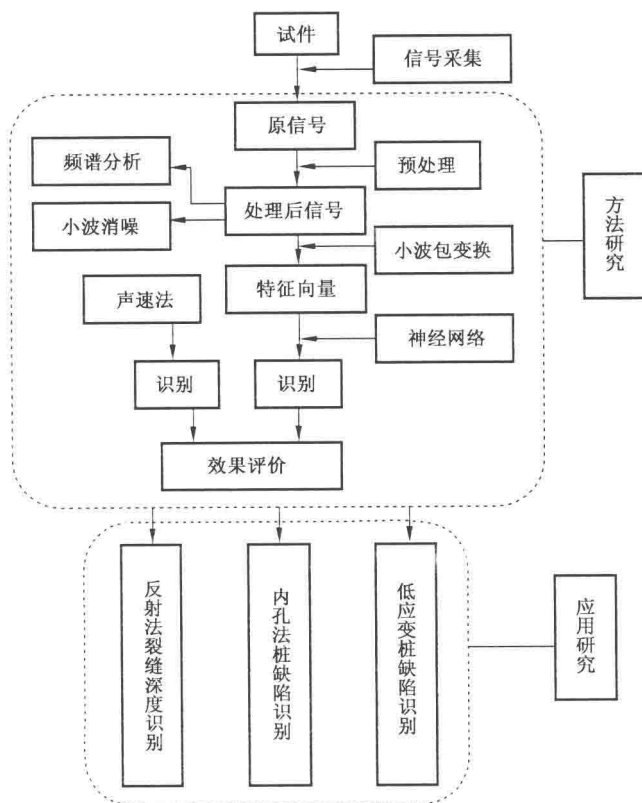


图 1-1 研究技术路线

第2章 超声波检测理论及检测系统设计

在第1章里介绍了超声检测国内外发展现状、存在问题、新型高效信息处理技术发展及本书研究技术线路。本章主要介绍超声波检测理论、检测系统及信号预处理相关内容,最后分析研究了各类区域超声透射波的特点。

2.1 超声波检测的理论

2.1.1 超声波的一般概念

超声波即超过了人类耳朵所能听到范围的声波。如以频率 f 来表征声波,并以人的可感觉频率为分界线,频率 $f > 20 \text{ kHz}$ 的声波称为超声波^[34]。

与光波不同,超声波是一种弹性机械波,它可以在气体、液体和固体中传播。超声波在空气中的传播速度为 340 m/s 。超声波在相同的传播媒体里传播速度相同,即在相当大的频率范围内声速不随频率变化,但如果介质的密度等参数发生了变化,波速也会发生变化。

一般超声波发生器可分为两大类:一类使用电气方式产生超声波,一类采用机械方式产生超声波。

电气方式包括压电型、磁致伸缩型和电动型等;机械方式有加尔统笛、液哨和气流旋笛等。它们所产生超声波的频率、功率和声波特性各有差异,因而用途也各不相同。目前较为常用的是压电式超声波发生器,尤其是压电陶瓷发生器,其特点是成本低、制作工艺简单、性能优良,因而被广泛应用。

超声波根据质点的振动方向可分为纵波、横波、表面波和板波;根据波的形状分为平面波、柱面波和球面波;根据振动的持续时间分为连续波和脉冲波。

充满超声波的空间或超声振动所波及的部分介质称为超声场。任何静止介质不受外力作用时的压强称为静态压强,当介质中有超声波传播时由于介质质点振动,压强会发生交替变化,超声场中某点在某一瞬时的压强 P_1 ,与没有超声波存在时同一点的静态压强 P_0 之差称为该点的声压。

对于平面余弦波,声压 P 为

$$\begin{cases} P = \rho c A \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \\ P_m = \rho c A \omega \end{cases} \quad (2-1)$$