

音频检测技术

柏逢明 著

 中国科学技术出版社

音频检测技术

柏逢明 著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

音频检测技术/柏逢明著. —北京:中国科学技术出版社,2005. 10
ISBN 7-5046-4192-8

I. 音... II. 柏... III. 音频设备-检测 IV. TN912.206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 115469 号

中国科学技术出版社出版
北京海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:62179148 62173865
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
北京长宁印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:17.625 字数:480 千字
2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷
印数:1—4500 册 定价:38.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

声音是人类最早认识和研究的物理现象之一,声学是经典物理学中历史最悠久,并且当前仍处在前沿地位之一的物理学分支学科。而音频检测技术则是基于声学、电子学和计算机技术等科学的一门交叉性学科。

音频检测是利用现代声学的基础理论和方法所进行的一系列检查和测量的技术应用研究。音频检测技术中同样涉及声音在介质中的相互作用及其产生的特性、特征。声学是音频检测技术的基础,音频检测技术是声学的理论外延及应用手段。音频检测系统集成机械、电子、计算机于一身,是声学理论、金属材料检测技术及自动控制技术的综合应用,因此,应具有多功能检测和处理能力并进一步实现音频检测仪器的智能化。

随着信息时代的到来,音频检测技术研究在近年来发展很快,新的研究成果不断涌现,已经发展为现代无损检测技术的重要组成部分。

本书主要介绍音频检测的理论与应用技术,结合典型检测方法讨论音频检测的基本理论、技术条件和实现过程。本书中的检测信号处理系统及单元电路、微机实用接口等大多数内容来自于工程应用实际。书中大部分音频检测理论与技术应用数据取自于作者多年来发表的学术论文、指导研究生学位论文和科学研究项目的部分科研成果。

全书共分十二章。第一章为绪论,主要讨论和综述音频检测理论与技术的发展概况,并介绍音频检测的基本概念和相关学科的相互关联。第二章主要介绍音频检测的理论与评价,从概念入手,直接面对波动理论,介绍声学的物理度量与主观评价,讨论了振动理论与波动理论的联系与区别。第三章和第四章介绍音频检测声波传输理论,主要阐述声波在不同介质中的传播特性,特别强调音频信号在固体、金属等介质内部的传播过程,讨论音频参数在音频信号传播过程中所携带的相关信息以及与声波的相互作用理论,研究共振频率、内耗与弹性介质相互作用机理,介绍金属材料内部组织对音频信号的影响规律。第五章主要讨论了音频检测方法,介绍在实验和工程中经常用到的音频检测方法,按照传统和现代音频检测技术的划分研究了音频检测的特点和工程应用的效果,以典型钢材和球墨铸铁材料的工件实际检测为例系统介绍音频检测方法,讨论分析了音频检测的技术条件和激励、支撑方法。第六章和第七章主要讨论音频检测系统与仪器的构成和特点,讨论音频检测原理和系统组成,介绍从传感器选择、音频检测单元电路设计到微机系统接口电路设计的过程,介绍了易于音频检测的相关器件和组成原理。第八章、第九章和第十章主要介绍关于音频检测系统中的非线性校正处理和补偿技术,讨论了音频检测技术中的抗干扰问题,从数值分析角度介绍音频检测数据分析和处理技术,讨论检测误差和计算机模拟音频检测分析处理技术。第十一章为音频检测中的虚拟仪器设计过程,介绍利用 C 语言、Labview 和 LabWindows/CVI 开发环境研究音频检测虚拟仪器的设计方法。第十二章介绍音频检测技术的应用,包括金属材料轴类件内部微观组织结构及缺陷检测、金属机械性能无损检测、非规则腔体容积音频检测技术与仪器和滚动轴承运动状态的故障诊断等应用技术。

总结多年以来在音频检测技术领域从事教学、科学研究工作中取得的经验,借鉴现有声

学理论、电子技术和计算机技术,建立科学、系统、完整的音频检测理论与技术,这是本书的主要目的。

全书力求深入浅出,系统全面,突出理论性和实用性。本书以硕士研究生、博士研究生为主要阅读对象,对于电子信息类、检测技术与自动化、测控技术、自动化仪表以及与检测技术相关领域的研究人员进一步学习和研究音频检测技术也具有参考价值。本书在叙述上注重对原始研究工作的分析,并在书末列出有关文献供参考。

在成书过程中,研究生燕慧英、刘思海、杨阳、王树利、刘小华、戴俊秀、陈恰、侯鹏、柏荷以及徐秀芳、刘胜利、赵桂艳、张帝、吕晓丽、孙占龙、崔艳、梁迪等做了许多具体的工作,书中大部分插图由王树利绘制完成。此外,长春理工大学研究生部对本书的出版给予了鼎力支持,在此一并表示最诚挚的谢意。

由于本人水平有限,加之时间仓促,书中不足甚至错误之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

柏逢明 (Bai Fengming)

E-mail: baifm@cust.edu.cn

2004年12月20日于长春理工大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 关于音频检测方法及音频检测系统	(1)
1.2 国外音频检测技术的发展概况	(1)
1.3 国内音频检测技术的发展概况	(4)
1.4 音频检测与现代声学	(5)
1.4.1 音频检测与声学理论的关系	(5)
1.4.2 声学的基础与检测研究	(5)
1.4.3 声学的研究方法 with 光学研究方法的比较	(6)
1.4.4 声学的分支学科	(6)
1.4.5 声学仪器	(6)
1.4.6 声学 with 生命科学	(7)
1.4.7 声学 with 环境	(8)
1.5 音频检测技术的未来发展趋向	(8)
第二章 音频检测理论与评价	(10)
2.1 音频振动 with 介质中的声波	(10)
2.1.1 音频检测的振动理论	(10)
2.1.2 音频检测的波动理论	(14)
2.2 振动 with 波动理论的区别 with 相关性	(22)
2.3 关于声学的物理度量	(23)
2.4 有关声音的主观评价	(25)
第三章 音频检测声波传输理论	(28)
3.1 音频信号中波形的概念	(28)
3.1.1 纵波 with 横波	(28)
3.1.2 平面波	(28)
3.1.3 球面波	(28)
3.1.4 表面波	(28)
3.1.5 板波	(29)
3.2 声波在界面上的反射 with 折射	(30)
3.2.1 液 - 固界面	(30)
3.2.2 固体、液体 - 空气界面	(32)
3.2.3 声波在多层平面中的穿透	(32)
3.3 声波在一般固体中的传播	(34)
3.3.1 各向同性弹性介质中的波动方程	(34)
3.3.2 表面波在半无限大固体表面的传播	(35)

3.3.3 声波在棒中的传播	(35)
3.4 声波在金属介质内部的传播	(35)
3.4.1 弹性模量对声波在金属中传播的相互作用与影响	(35)
3.4.2 内耗对声波在金属中传播的相互作用与影响	(37)
第四章 共振频率、内耗与弹性介质相互作用机理	(39)
4.1 声学振动激励的响应分析(频谱分析)	(39)
4.2 音频共振测量原理	(41)
4.2.1 圆柱体金属试棒的共振频率	(41)
4.2.2 变截面非规则金属试件的共振频率	(43)
4.3 音频能量(幅度)衰减检测原理	(43)
4.4 音频检测参数与球墨铸铁组织的作用机理	(45)
4.4.1 声波与石墨的作用原理	(45)
4.4.2 声波绕射与石墨形态的关系	(46)
第五章 音频检测方法	(50)
5.1 传统音频检测方法	(50)
5.1.1 主动敲击检测法(主观判断法)	(50)
5.1.2 被动音频捕捉法(声音识别判断法)	(50)
5.1.3 脉冲激振测量法	(51)
5.1.4 “速度共振”相位判别法	(52)
5.2 现代音频检测方法	(53)
5.2.1 电磁脉冲激励法	(54)
5.2.2 声级计	(54)
5.2.3 声波扫频法	(55)
5.2.4 声成像技术	(56)
5.2.5 声发射(AE)技术	(59)
5.2.6 AU 技术	(61)
5.3 音频检测方法的技术条件	(62)
5.3.1 环境因素的影响	(62)
5.3.2 音频检测被检对象的材料品质	(62)
5.3.3 被检对象的支撑条件与振型节点	(66)
5.3.4 被检对象的音频激励条件	(69)
第六章 音频检测系统与传感器选择	(72)
6.1 音频检测系统组成与工作原理	(72)
6.1.1 音频检测基本原理	(72)
6.1.2 检测系统的原理结构及其单元功能	(72)
6.1.3 音频检测系统及其工作过程	(74)
6.2 传感器与信号转换	(78)
6.2.1 传感器的工作原理	(78)
6.2.2 电感式传感器	(78)
6.2.3 压电式传感器	(83)

6.2.4 电容式传感器	(94)
6.2.5 音频检测中常用传感器比较	(98)
6.3 音频检测系统的组建与性能评定	(100)
6.3.1 音频检测系统性能评定	(100)
6.3.2 音频检测系统的组建原则	(101)
第七章 音频检测仪器及单元接口电路设计	(104)
7.1 音频检测仪器组成与设计特点	(104)
7.1.1 音频检测仪器的组成及特点	(104)
7.1.2 音频检测仪器的设计方法	(105)
7.2 音频检测仪器总体设计方案	(108)
7.2.1 等精度频率计数音频检测仪器	(108)
7.2.2 频率内耗音频检测综合测试仪器	(109)
7.3 音频检测仪器工作原理与结构	(109)
7.3.1 频率计数音频检测仪器的内部结构与工作原理	(109)
7.3.2 频率内耗音频检测仪器的内部结构与工作原理	(110)
7.4 音频检测仪器单元电路设计	(111)
7.4.1 小信号放大器	(111)
7.4.2 测量信号的滤波	(115)
7.5 音频信号检波与峰值保持电路	(118)
7.5.1 音频检测通用检波电路	(118)
7.5.2 音频检测内耗值的检波电路	(121)
7.6 音频检测微机系统硬件设计	(123)
7.6.1 通用接口方式	(123)
7.6.2 ICM7226 专用计数芯片与 8031 单片机接口	(124)
7.6.3 显示系统	(125)
7.6.4 打印系统设计	(125)
7.7 音频检测微机系统软件设计	(126)
7.7.1 主程序	(127)
7.7.2 频率计算子程序	(127)
7.7.3 内耗计算子程序	(128)
第八章 音频检测系统中的非线性校正处理和补偿	(130)
8.1 音频检测系统非线性特征及补偿方法	(130)
8.1.1 关于检测系统非线性特性的概念	(130)
8.1.2 传感器非线性特性的补偿方法	(130)
8.2 传感器非线性硬件校正方法	(135)
8.2.1 传感器非线性校正电路	(135)
8.2.2 实用性线性化器——对数放大器设计	(136)
8.3 音频检测技术中的温度补偿技术	(141)
8.3.1 关于温度补偿的概念	(141)
8.3.2 温度补偿原理	(141)

8.4 非线性数字域校正的新方法	(143)
8.4.1 数字域线性化工作原理	(144)
8.4.2 数字域线性化校正电路	(144)
8.4.3 EPROM 数据编码的方法	(145)
8.5 微机系统在非线性校正中的应用	(146)
8.5.1 算法	(146)
8.5.2 查表法	(146)
8.5.3 插值法	(146)
8.6 音频检测技术中的自补偿技术	(150)
8.6.1 频率自补偿	(150)
8.6.2 温度自补偿	(153)
第九章 音频检测数据分析与处理技术	(155)
9.1 测量误差及数据处理方法	(155)
9.1.1 测量与误差	(155)
9.1.2 检测数据处理方法	(157)
9.2 实验数据回归分析	(158)
9.2.1 一元线性回归	(158)
9.2.2 一元非线性回归	(167)
9.2.3 二元线性回归分析	(167)
9.2.4 二元非线性回归分析	(170)
9.2.5 多元回归分析	(170)
9.3 动态测量及数据处理	(173)
9.3.1 动态测量的特征量	(173)
9.3.2 平稳过程谱密度及其数据处理方法	(176)
9.3.3 非平稳过程及其数据处理方法	(181)
9.4 音频检测参数实验回归分析与数据处理	(181)
9.4.1 球墨铸铁动态弹性模量、内耗值与机械性能之间的关系	(181)
9.4.2 腔体容积与音频检测参数的回归分析	(183)
9.5 计算机模拟非等截面轴杆类零部件音频检测计算方法	(184)
9.5.1 数值计算求解非等直截面轴杆工件的共振频率	(184)
9.5.2 数值计算方法的实验验证	(186)
9.6 音频检测谐波分析	(187)
第十章 音频检测技术中的抗干扰问题	(188)
10.1 音频检测系统中常见的干扰类型与防护	(188)
10.1.1 干扰与防护	(188)
10.1.2 干扰的类型及防护	(188)
10.2 干扰源与耦合方式	(190)
10.2.1 噪声与信噪比	(190)
10.2.2 噪声源	(190)
10.2.3 噪声电压的叠加	(192)

10.2.4 噪声耦合方式	(192)
10.3 差模干扰与共模干扰	(197)
10.3.1 差模干扰	(197)
10.3.2 共模干扰	(198)
10.3.3 共模干扰抑制比	(199)
10.4 音频检测仪表的屏蔽与防护	(200)
10.4.1 测量仪表中实用屏蔽规则	(200)
10.4.2 数字电压表的屏蔽与防护分析	(202)
10.4.3 电子测量仪表的屏蔽与防护小结	(207)
10.5 接地问题	(208)
10.5.1 音频检测系统中地线的类型	(208)
10.5.2 接地问题的处理	(209)
第十一章 基于虚拟仪器的音频检测系统	(211)
11.1 音频检测虚拟仪器的原理与构成	(211)
11.1.1 音频检测中的虚拟仪器	(211)
11.1.2 音频检测虚拟仪器的组成	(211)
11.1.3 虚拟仪器的特点	(214)
11.1.4 LabVIEW 与虚拟仪器的设计方法	(214)
11.2 音频信号分析仪的系统构成及原理	(215)
11.2.1 系统构成	(215)
11.2.2 音频信号分析仪的工作原理	(215)
11.2.3 音频信号分析仪的硬件设计	(216)
11.2.4 音频信号分析仪的软件设计	(219)
11.3 基于虚拟仪器的弹体药室容积音频检测装置的硬件设计与选择	(227)
11.3.1 传感器的选择	(227)
11.3.2 数据采集卡的选择	(229)
11.4 基于虚拟仪器的弹体药室容积音频检测装置的软件设计	(233)
11.4.1 基于虚拟仪器的弹体药室容积音频检测装置的软件设计思想	(233)
11.4.2 基于虚拟仪器的弹体药室容积音频检测装置的面板及程序的设计	(235)
11.4.3 子 VI 的设计	(238)
第十二章 音频检测技术应用	(243)
12.1 轴类件音频检测应用	(243)
12.1.1 金属材料内部微观组织结构及缺陷检测	(243)
12.1.2 金属机械性能无损检测	(247)
12.2 非规则腔体容积音频检测技术与仪器	(253)
12.2.1 腔体容积音频检测基本原理	(253)
12.2.2 检测系统与工作原理	(254)
12.2.3 实验结果及分析	(255)
12.2.4 结论	(257)
12.3 导弹及飞行目标音频法距离探测技术应用	(257)

12.3.1	导弹脱靶量音频检测技术应用	(257)
12.3.2	基于瞬时频率估计的被动声学飞机测距应用	(259)
12.4	滚动轴承运动状态的故障诊断	(263)
12.4.1	滚动轴承的振动	(263)
12.4.2	滚动轴承故障的频率成分分析	(264)
12.4.3	滚动轴承疲劳故障的音频在线监测与诊断	(265)
12.4.4	结论	(267)
12.5	音频法预测等温淬火铸铁强度	(267)
12.5.1	检测原理	(267)
12.5.2	实验方法	(267)
12.5.3	结果整理及讨论	(269)
参考文献		(272)

第一章 绪论

声音是人类最早研究的物理现象之一,声学是经典物理学中历史最悠久,并且当前仍处在前沿地位之一的物理学分支学科。

音频无损检测,以不破坏被检对象的使用性能为前提,应用物理和化学现象,对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试,借以评价它们的完整性、安全可靠性和其物理性能,是实现质量控制、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段。随着现代工业化、机械化、电子与计算机技术飞速发展,将现代物理学、化学、电子技术和计算机技术等学科的最新成果装备于检测系统,用于材料和成品检验已成为可能和现实,使质量检测手段更进一步现代化。

目前无论是军品还是民品,都存在着一个现代化大生产与传统检测方法不合拍的现象。如何应用先进科学技术手段、先进的检测方法,一直是人们十分关注和潜心研究的课题。据美国专家 Donld J. Hagemair 提供的材料介绍,目前无损检测方法有 32 种之多。英国学者 D.J. Lavender 介绍金属材料有 10 种检测方法,国内也对无损检测新技术的进展有过专门论述,在这些检测方法中,绝大多数是宏观缺陷和探伤,真正能用于检测金属材料内在质量的方法,只有超声波法、电磁法和音频共振法。

对于超声波法和电磁法,目前有很多报道,研究领域异常活跃,其应用成果不断涌现。本章主要对音频检测技术及国内外发展概况作一分析和研究。

1.1 关于音频检测方法及音频检测系统

音频检测方法(声波法,共振法),是根据每种材料介质都有其固有的弹性模量和共振频率,在受到激励产生自由振动时就会发出固有频率的声音,通过测定在外力作用下工件振动的音频参数(共振频率和衰减率)就可以预测材料的内部质量,如球墨铸铁的石墨情况,基体组织和机械性能。音频检测可以在瞬间完成,无需对工件进行特别的预处理,既可以接触式检测,也可以非接触式检测,非常适合于生产线上对工件进行 100% 的自动化无损检测。

音频检测金属材料内在质量的理论根据是,金属材料的微观特征与音频参数存在着一种相互关联的依变关系,而且这种关系在某种条件下还可以相互转化。

音频检测系统,是以振动理论和内耗理论为基础,采用模拟电路和逻辑门阵列与微机技术的结合,专门用于金属材料零部件的无损检测装置。通过从工件尺寸、密度和共振频率来获得材料的弹性模量,通过材料弹性模量经计算机数值拟合就可以得到其力学性能。音频检测方法还可以不破坏被检工件,进而预测出材料的相变、弹性变形、硬化、冷轧和合金成分的影响等数据。

1.2 国外音频检测技术的发展概况

对声学的系统研究是从 17 世纪初伽利略研究单摆周期和物体振动开始的。从那时起直到 19 世纪,几乎所有杰出的物理学家和数学家都对研究物体的振动和声的产生原理作过贡献,而声的传播问题则更早就受到了注意,早在 2000 年前,中国和西方就都有人把声的传播与

水面波纹相类比。

1635 年有人用远地枪声测声速,以后方法又不断改进,到 1738 年巴黎科学院利用炮声进行测量,测得结果折合为 0°C 时声速为 332m/s ,与目前最准确的数值 331.45m/s 只差 0.15% ,这在当时“声学仪器”只有停表和人耳的情况下,的确是了不起的成绩。

牛顿在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》中推理:振动物体要推动邻近媒质,后者又推动它的邻近媒质等等,经过复杂而难懂的推导,求得声速应等于大气压与密度之比的二次方根。欧拉在 1759 年根据这个概念提出更清楚的分析方法,求得牛顿的结果。但是据此算出的声速只有 288m/s ,与实验值相差很大。

达朗贝尔于 1747 年首次导出弦的波动方程,并预言可用于声波。直到 1816 年,拉普拉斯指出只有在空气温度不变时,牛顿对声波传导的推导才正确,而实际上在声波传播中空气密度变化很快,不可能是等温过程,而应该是绝热过程。因此,声速的二次方应是大气压乘以比热容比(定压比热容与定容比热容的比)与密度之比,据此算出声速的理论值与实验值就完全一致了。

直到 19 世纪末,接收声波的“仪器”还只有人耳。人耳能听到的最低声强大约是 10^{-12}W/m^2 ,在 1000Hz 时,相应的空气质点振动位移大约是 $10\text{pm}(10^{-11}\text{m})$,只有空气分子直径的 $1/10$,可见人耳对声的接收能力确实惊人。19 世纪中就有不少人耳解剖的工作和对人耳功能的探讨,但至今还未能形成完整的听觉理论。目前对声刺激通过听觉器官、神经系统到达大脑皮层的过程有所了解,但这过程以后大脑皮层如何进行分析、处理、判断还有待进一步研究。

音调与频率的关系明确后,对人耳听觉的频率范围和灵敏度也都有不少的研究。发现著名的电路定律的欧姆于 1843 年提出,人耳可把复杂的声音分解为谐波分量,并按分音大小判断音品的理论。在欧姆声学理论的启发下,人们开展了听觉的声学研究(以后称为生理声学和心理声学),并取得了重要的成果,其中最有名的是亥姆霍兹的《音的感知》。

在封闭空间(如房间、教室、礼堂、剧院等)里面听语言、音乐,效果有的很好,有的很不好,这引起今天所谓建筑声学或室内音质的研究。但直到 1900 年赛宾得到他的混响公式,才使建筑声学成为真正的科学。

19 世纪及以前两三百年的大量声学研究成果的最后总结者是瑞利,他在 1877 年出版的两卷《声学原理》中集经典声学的大成,开创了现代声学的先河。至今,特别是在理论分析工作中,还常引用这两卷巨著。他开始讨论的电话理论,目前已发展为电声学。

20 世纪,由于电子学的发展,使用电声换能器和电子仪器设备,可以产生、接收和利用任何频率、任何波形、几乎任何强度的声波,已使声学研究的范围远非昔日可比。现代声学中最初发展的分支就是建筑声学 and 电声学以及相应的电声测量。以后,随着频率范围的扩展,又发展了超声学和次声学;由于手段的改善,进一步研究听觉,发展了生理声学和心理声学;由于对语言和通信广播的研究,发展了语言声学。

在第二次世界大战中,开始把超声广泛地用到水下探测,促使水声学得到很大的发展。20 世纪初以来,特别是 20 世纪 50 年代以来,全世界由于工业、交通等事业的巨大发展出现了噪声环境污染问题,促进了噪声、噪声控制、机械振动和冲击研究的发展,高速大功率机械应用日益广泛。非线性声学受到普遍重视。此外还有音乐声学、生物声学。这样,逐渐形成了完整的现代声学体系。

自从 1940 年美国执密安大学 P.A.Firestone 发明了超声波反射仪,并且随着电子技术和专业化生产水平的飞速发展,无损检测技术得到了广泛的应用。

音频法检测金属材料在工业上的应用研究始于 20 世纪 60 年代初期。1963 年英国的 A.G.Fuller 发表了“通过测量共振频率对金属铸件质量的估计”一文。由他建立的 3 个共振模型,揭示了振动物体的内在规律,认为物体振动因激励方向不同而分纵向振动、弯曲振动和扭转振动,产生各自不同的频率,即使同一物体也可以有几种不同的振动频率,但它们的基频和谐波频率在一定条件下是可以固定不变的。同时对几种不同形状工件进行了探索性研究,总结出规律:

$$\text{共振频率} = \text{形状因素} \times \text{物理性能因素}$$

1965 年,美国福特汽车公司的 R.R.Lavett 和英国的 N.Carter 合作,对音频检测做了进一步研究。认为,音频检测方法对采用纯镁处理的球墨铸铁有良好的规律性。音频法中的共振频率可以通过球化的程度来估计抗拉强度,共振频率对基体组织并不敏感。当时,用音频法估算球墨铸铁抗拉强度的误差在 5% 左右。1996 年美国的 J.W.Abar 等人“用音频法预测灰铸铁的机械性能”,进一步确定相同基体组织情况下灰铸铁的共振频率和抗拉强度的关系。1968 年, T.Morooka 等人又研究了冲击韧性与静态性能和共振频率的关系,分析成分和冷却速度对共振频率的影响。至此,音频检测研究已见雏形。

1975 年, B.V.Kovacs 在美国 Trans. AFS 发表了题为“声波和球铁铸件的相互作用”一文,它标志着音频法检测球墨铸铁零部件的研究工作全面展开。文章介绍用电磁场激发振动以共振频率和减振能力来研究球铁的组织特征,探索无损检测球铁质量的方法。利用超声波方法进行了比较,认为不如音频检测敏感。共振频率对球铁组织内石墨球的体积、形状和大小比较敏感,对某些显微组织也较灵敏,如马氏体会降低共振频率,而碳化物则使之提高,但共振频率对珠光体和铁素体则不敏感。

英国铸铁研究会(BCIA)的 P.J.Emerson 和 W.Simmons 共同合作,于 1976 年做了“用声波和超声波检验研究铁素体球铁的石墨形态及其机械性能的影响”方面的研究并指出,超声波和共振频率方法都可以检测球体的机械性能,并认为超声波的声速和声波性质与含有非球状石墨的铁素体球铁的机械性能有一定的关系,但未详细阐明。

美国福特汽车公司的 B.V.Kovacs 在 1977 年又发表论文“用音频共振法控制和保证球铁件质量”,他认为,音频法可以用于检测球铁的球化质量,它比超声声速法能够提供更多的检测信息,具有 5 个独特的优点:

- (1)测量速度快;
- (2)测量值代表整个工件的平均值;
- (3)所用设备相对超声声速法价格便宜;
- (4)可以进行逐件自动无损检测;
- (5)适用于大多数复杂工件。

球铁的机械性能和显微组织与通过音频共振测量所获得的数据有关。Kovacs 介绍了两种试验系统:一种是以撞击信号振荡和压电信号传感器为基础的系统,它适合于重大型工件的测试;另一种是用连续不断的电磁波激励振荡和电容传感器,它是用于试样或小工件的检测。详细阐述了共振频率、阻尼衰减与球墨铸铁组织和性能的相互关系。阻尼(衰减率或内耗)概念从此引入到音频检测中来,从而使得音频法检测已不局限于基体组织不变的概念了。1980 年,英国的 A.G.Fuller 的试验结果表明,随着球化率的增加,使共振频率增加,而内耗值减小,又与超声波声速法做了比较试验,结果证实,音频检测获得的关系更好,对于单一品种,大批量生产,音频法比超声声速法更优越。

A. G. Fuller, P. J. Emerson 和 G. F. Sergeant 三人,在对球铁进行机械性能无损检测试验时发现,抗拉强度 and 无缺口冲击韧性随着碳化物和非球形石墨增加而减小,而屈服强度随之增加;在预测屈服强度时,可以不必知道碳化物含量,但预测抗拉强度时则必须要知道基体组织情况。内耗对碳化物和非球石墨不敏感。

音频法检测在国外正试图用于生产线上。1984 年美国福特汽车公司将具有共振频率和阻尼衰减(内耗)两项检测参数的音频检测仪应用于曲轴生产线,试验了 10 000 根曲轴,可以反映出基体组织和石墨形态,效果很好。1988 年在英国的 Warwick 大学召开的铸件质量评定会议上,由意大利学者 G. Magistrili 再次对射线摄影技术、磁力探伤、超声波和音频法做了比较,强调音频法可以检测整个工件的质量。

日本东洋电器公司在 1990 年也曾报道,研制出音频检测球墨铸铁和控制材料质量的测试仪器。

1992 年 10 月,在巴西圣保罗市召开的第 13 届世界无损检测会议上,印度的 Baldev Raj 的报告“检测时用声信号分析可靠解决工程问题”,通过分析声信号可靠地解决工程问题,认为过去 20 年中无损检测已不仅仅是辅助技术,而是一种基本技术。采用模式和集群分析对马氏体和奥氏体不锈钢焊缝进行检验和特性鉴定,并用声学所产生的应力波原理来测定显微组织和机械性能,认为这是信号分析方法在声学 NDE(无损评价)中的成功应用。印度 J. I. Mohindru, C. R. L. Murthy 发表了“用声冲击技术检测直升机螺旋桨叶片的粘接缺陷。”

总之,美国和英国的音频无损检测在世界上处于领先地位,而且世界各地人才密集,学术活动频繁。意大利、德国是工业发达国家中无损检测与评价技术比较先进的国家,其音频检测装置比较先进,精度较高。前苏联已将音频法用于军事测控技术上,据兵器工业总公司军品局提供的信息,前苏联曾用音频法检测结构尺寸。

1.3 国内音频检测技术的发展概况

世界上最早的声学研究工作主要在音乐方面。《吕氏春秋》记载,黄帝令伶伦取竹作律,增损长短成十二律;伏羲作琴,三分损益成十三音。三分损益法就是把管(笛、箫)加长 $1/3$ 或减短 $1/3$,这样听起来都很和谐,这是最早的声学定律。传说在古希腊时代,毕达哥拉斯也提出了相似的自然律,只不过是弦作基础。

1957 年在中国河南信阳出土了蟠螭文编钟,它是为纪念晋国于公元前 525 年与楚国作战而铸的。其音阶完全符合自然律,音色清纯,可以用来演奏现代音乐。1584 年,明朝朱载堉提出了平均律,与当代乐器制造中使用的乐律完全相同,但比西方早提出 300 年。

古代除了对声传播方式的认知外,对声本质的认识也与今天的完全相同。在东西方,都认为声音是由物体运动产生的,在空气中以某种方式传到人耳,引起人的听觉。这种认识现在看来很简单,但是从古代人们的知识水平来看,却很了不起。

例如,很长时期内,古代人们对日常遇到的光和热就没有正确的认识,一直到牛顿的时代,人们对光的认识还有粒子说和波动说的争执,且粒子说占有优势。至于热学,“热质”说的影响时间则更长,直到 19 世纪后期,恩格斯还对它进行过批判。

国内音频检测技术起步也是在 20 世纪 60 年代。1965 年由上海材料研究所进行试验研究,1976 年,第二汽车制造厂在上海材料研究所研究基础上,对球墨铸铁曲轴进行音频试验。1983 年南京汽车制造厂研究所,利用锤击法检测汽车(锻钢)前轴和工字梁的裂纹倾向,同年,大连工学院也用共振频率反映出球铁的弹性模量,二汽技术中心还进行了“汽车排气管蠕化率

的音频检测”,武汉工学院也着手研究音频法自动检测球铁的球化率。

1989年,上海材料研究所利用“声波扫频法自动检测球墨铸铁球化质量”,采用连续扫描激励系统和电子逻辑电路,在线非接触快速测量球铁曲轴的固有频率和幅频特性,自动评价球化质量的无损检测方法和结构装置。实际音频检测试验表明,在严格控制球铁中自由渗碳体含量基本不变的条件下,其他凡是使球铁质量下降的因素,都不同程度地使共振频率下降。

1990年第二汽车制造厂总结了自1976年以来采用音频法所检测的100万件曲轴的经验,认为,在确保曲轴产品质量上,郁频检测方法发挥了非常重要的作用。

吉林工业大学于1986年利用郁频共振法研究了球墨铸铁的显微组织和机械性能,对球铁试棒在纵向振动模态下的音频特性进行理论分析,并对其他黑色金属材料做了探索性研究,设计出音频检测系统。试验结果表明,动态弹性模量和内耗值与球铁的石墨形状、体积、尺寸、分布密度以及基体中铁素体、珠光体比例含量密切相关。作者曾于1992年设计并研制出“球墨铸铁音频检测仪”,并在一汽集团二铸分厂进行“现场试验与测试,取得了明显效果。”

1993年长春理工大学(原长春光学精密机械学院)与国营七二四厂合作开发研究军工产品检测方法和设备,承接了军品技术的科研任务。1994年首次提出利用“音频法检测弹体药室容积的研究”,利用专门设计的共振激励系统,模拟出非规则的任一几何形状的空腔载体,并严格遵循所提供的必要的尺寸极限。一旦待测结构空腔的物体固定下来,载体空腔频率将是一个容积的函数。使用电子反馈技术,一次将音频信号按一定要求,经微机控制、处理,转化为量化的具体数值,直观地显示出共振频率、空腔的容积等基本指标。

由此可见,音频检测技术在国内研究与国外起步相同,但发展较迟缓,研究工作主要限于高等院校和研究所,随着改革开放的深入,现在音频检测技术已投向工厂企业的实际检测应用,取得了良好效果。

1.4 音频检测与现代声学

现代声学主要涉及声子的运动、声子和物质的相互作用,以及一些准粒子和电子等微观粒子的特性。所以声学既有经典性质,也有量子性质。

1.4.1 音频检测与声学理论的关系

音频检测是利用现代声学的基础理论和方法所进行的一系列检查 and 测量的技术应用研究。音频检测技术中同样涉及声音在介质中的相互作用及其产生的特性、特征。声学是音频检测技术的基础,音频检测技术是声学的理论外延及应用手段。

1.4.2 声学的基础与检测研究

声学的中心是基础物理声学,它是声学各分支的基础。声可以说是在物质媒质中的机械辐射,机械辐射的意思是机械扰动在物质中的传播。人类的活动几乎都与声学有关,从海洋学到语言音乐,从地球到人的大脑,从机械工程到医学,从微观到宏观,都是声学家活动的场所。

声学的边缘科学性质十分明显,边缘科学是科学的生长点,因此有人主张声学是物理学的一个最好的发展方向。音频检测是在声学中占有非常重要的地位,是现代社会自然现象的重要组成部分。

声波在气体和液体中只有纵波。在固体中除了纵波以外,还可能有横波(质点振动的方向与声波传播的方向垂直),有时还有纵横波。

声波场中质点每秒振动的周数称为频率,单位为赫兹(Hz)。现代声学研究的频率范围为万分之一赫兹到十亿赫兹,在空气中可听到声音的波长为17mm到17m,在固体中,声波波长

的范围更大,比电磁波的波长范围至少大一千倍。声学频率的范围大致为:可听声的频率为20~20 000Hz,小于20Hz为次声,大于20 000Hz为超声。

声波的传播与媒质的弹性模量、密度、内耗以及形状大小(产生折射、反射、衍射等)有关。测量声波传播的特性可以研究媒质的力学性质和几何性质,声学之所以发展成拥有众多分支并且与许多科学、技术和文化艺术有密切关系的学科,原因就在于此。

声行波强度用单位面积内传播的功率(以 W/m^2 为单位)表示,但是在声学测量中功率不易直接测量得到,所以常用易于测量的声压表示。在声学中常见的声强范围或声压范围非常大,所以一般用对数表示。称为声强级或声压级,单位是分贝(dB)。

1.4.3 声学的研究方法与光学研究方法的比较

声学分析方法已成为物理学三个重要分析方法(声学方法、光学方法、粒子轰击方法)之一。声学方法与光学方法(包括电磁波方法)相比有相似处,也有不同处。

相似处是:声波和光波都是波动,使用两种方法时,都运用了波动方程所应服从的一般规律,包括量子概念(声的量子称为声子)。不同处是:光波是横波,声波在气体中和液体中是纵波,而在固体中有纵波,有横波,还有纵横波、表面波等,情况更为复杂;声波比光波的传播速度小得多;一般物体和材料对光波吸收很大,但对声波却很小,声波在不同媒质的界面上几乎是完全反射。

这些传播性质有时造成结果上的极大差别,例如在普通实验室内很容易验证光波的平方反比定律(光的强度与到光源的距离平方成反比)。根据能量守恒定律,声波也应满足平方反比定律,但在室内则无法测出。因为室内各表面对声波来说都是很好的反射面,声速又比较小,声音发出后要反射很多次,在室内往返多次,经过很长时间(称为混响时间)才消失。任何点的声强都是这些直达声和反射声互相干涉的结果,与距离的关系很复杂。这就是为什么直到1900年赛宾提出混响理论以前,人们对很多声学现象不能理解的原因。

1.4.4 声学的分支学科

与光学相似,在不同的情况,依据其特点,需要运用不同的声学方法进行研究。

波动声学也称物理声学,它是使用波动理论研究声场的学科。在声波波长与空间或物体的尺度数量级相近时必须用波动声学分析。其主要内容是研究声的反射、折射、干涉、衍射、驻波、散射等现象。

在封闭空间(例如室内,周围有表面)或半封闭空间(例如在水下或大气中,有上、下界面),反射波的互相干涉要形成一系列的固有振动(称为简正振动方式或简正波)。简正方式理论是引用量子力学中本征值的概念并加以发展而形成的。

射线声学或称几何声学,它与几何光学相似。主要是研究波长非常小时,能量沿直线的传播的规律。即忽略衍射现象,只考虑声线的反射、折射等问题。这是在许多情况下都很有效的方法。例如在研究室内反射面、在固体中作无损检测以及在液体中探测等时,都用声线概念。

统计声学主要研究波长非常小,在某一频率范围内简正振动方式很多,频率分布很密时,忽略相位关系,只考虑各简正方式的能量相加关系的问题。赛宾公式就可用统计声学方法推导。统计声学方法不限于在关闭或半关闭空间中使用。在声波传输中,统计能量技术解决很多问题,就是一例。

1.4.5 声学仪器

20世纪以前,声源仅限于人声、乐器、音叉和哨子。频率限于可听声范围内,可控制的声强范围也有限。接收仪器主要是人耳,有时用歌弧、歌焰作定性比较,电话上的接收器和传声