



普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆检测技术

岳建海 主编



科学出版社

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆检测技术

岳建海 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书作为普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材之一, 主要介绍检测技术的基本理论和方法及其在轨道车辆检测中的应用。全书共7章, 包括绪论、检测系统的基本特性、传感器技术、检测系统设计与抗干扰技术、轨道车辆及检测概述、轨道车辆走行部的检测、红外线轴温探测系统。

本书可作为高等学校轨道车辆专业教材, 也可作为职工培训教材, 还可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆检测技术/岳建海主编. —北京: 科学出版社, 2016.3

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

ISBN 978-7-03-044548-3

I. ①轨… II. ①岳… III. ①轻轨车辆—检测—高等学校—教材
IV. ①U270.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第122383号

责任编辑: 毛莹 朱晓颖 张丽花 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 霍兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第一版 开本: 787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 344 000

定价: 42.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

轨道车辆检测技术是轨道车辆和检测技术的有机结合，并吸纳了现代控制理论、传感技术、信息处理、计算机控制等的相关成果，而建立起来的一门以应用为主、理论和实践紧密结合的综合性学科。通过系统地学习和掌握这门课程的基本知识、基本理论与方法，可以深入认识轨道车辆检测领域的基本问题，全面把握轨道车辆检测的运作规律，分析当前我国车辆检测领域存在的问题，提高轨道车辆检测的创新能力。因此，本书在车辆工程专业教学中处于十分重要的地位。

为适应新形势下轨道车辆检测技术课程教学工作的需要，本书在编写过程中参考了大量的相关书籍，内容安排上结合本专业培养目标，从创新的角度组织轨道车辆检测技术所需要的信号处理技术、传感器技术、轨道车辆检测系统的设计技术相关基础理论和实践环节等内容。本书编写力求具有创新性、实用性和先进性，并且通俗易懂、深入浅出，读者通过学习本书，可培养车辆检测领域专业技能并具有主动创新能力。

本书吸收了国内外最新研究成果，特别是借鉴了近年来国内外轨道车辆检测技术的案例。本书紧密贴近我国轨道车辆检测的最新发展和实践，内容新颖、体系健全、案例丰富。

全书共7章，由北京交通大学岳建海和胡准庆编写，第1、2、5~7章由岳建海编写，第3章和第4章由岳建海和胡准庆共同编写。

由于编者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请广大读者和专家、学者批评指正，以便于我们将来更好地修改和完善本书。

编者

2015年9月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 检测理论的相关概念及其发展	1
1.2 基本检测方法	11
1.3 检测系统的类型及基本组成	14
1.4 轨道车辆检测技术概述	21
第 2 章 检测系统的基本特性	24
2.1 检测系统静态特性	24
2.2 检测系统动态特性	29
第 3 章 传感器技术	42
3.1 传感器的基本概念	42
3.2 弹性敏感元件	45
3.3 电阻式传感器	55
3.4 压电式传感器	61
3.5 电容式传感器	70
3.6 电感式传感器	74
3.7 磁敏传感器	81
3.8 光电式传感器	95
3.9 热电式传感器	100
第 4 章 检测系统设计与抗干扰技术	108
4.1 概述	108
4.2 模拟式传感器信号的检测	113
4.3 数字式传感器信号的检测	129
4.4 检测信号的采集和预处理	133
4.5 检测系统抗干扰技术	139
第 5 章 轨道车辆及检测概述	150
5.1 轨道车辆概述	150
5.2 轨道车辆检测系统	155
5.3 自动检测系统	161
5.4 现代检测系统	164
第 6 章 轨道车辆走行部的检测	174
6.1 轮对检测系统的现状	174
6.2 轮对的动态检测	176
6.3 轮对踏面非接触自动检测系统	188
6.4 齿轮的检测	192
6.5 滚动轴承检测及故障诊断	200

第7章 红外线轴温探测系统.....	207
7.1 概述.....	207
7.2 红外线轴温探测的机理.....	212
7.3 红外探测器的应用.....	215
7.4 高速光子轴温探测器.....	222
参考文献.....	225

第 1 章 绪 论

1.1 检测理论的相关概念及其发展

1.1.1 检测理论的相关概念

1. 基本概念

(1) 测量。广义而言，测量就是使用专门的技术工具，依靠试验和计算，找到被测量值(包括大小和正负)的过程。测量不仅对被测的物理量进行定量的测量，还包括对更广泛的被测对象进行定性、定位的测量，如故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等。测量是以确定量值为目的的一组操作。

狭义测量是为了确定被测对象的量值而进行的试验过程。在测量过程中，人们借助专门的设备，把被测对象直接或间接地与同类已知单位进行比较，取得用数值和单位共同表示的测量结果。测量结果=测量数值×测量单位。

测量又被定义为“试验比较过程”，即用同性质的标准量与被测量比较，并确定被测量对标准量的倍数。可表示为

$$g = x/V \quad (1-1)$$

式中， g 为比值； x 为被测量； V 为标准量。

整个测量过程包括对比、示差、平衡和读数 4 个基本动作。

(2) 试验。国标 GB 6583《质量—术语》中对试验的定义是：对产品、过程或服务的特性进行的试验和测定。

(3) 测试。它是测量和试验的合称。

(4) 检验。常不需要被测参数的准确值，但要分辨参数所在的某一范围。检验就是确定产品是否满足设计要求的过成，即判断产品合格性的过程。检验的方法可以分为两类：定性检验和定量检验。定性检验的方法只能得到被检验对象合格与否的结论，而不能得到其具体的量值。定量检验的方法是在对被检验对象进行测量后，得到其实际值并判断它是否合格的方法，简称检测。检测的核心是测量技术。通过测量得到的数据，不仅能判断其合格性，还为分析产品制造过程中的质量状况提供最直接而可靠的依据。

(5) 检测。检测是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。人们常把检验和测量结合在一起，统称为检测。为了满足机械产品的功能要求，在正确合理地完成了可靠性、使用寿命、运动精度等方面的设计以后，还必须进行加工和装配过程的制造工艺设计，即确定加工方法、加工设备、工艺参数、生产流程及检测手段。其中，特别重要的环节就是质量保证措施中的精度检验。

(6) 自动检测。在整个测量过程中，对比、示差、平衡和读数 4 个基本动作以及检验过程完全不需要或仅需要很少的人工干预，由系统自动完成，这就是自动检测。

(7) 检测系统。由若干测量仪器或仪表，以及附加设备构成的一个有机整体。

2. 测量的基本要素

一个完整的测量过程应包括被测量、计量单位、测量方法(含测量器具)和测量误差四个要素。

(1) 被测量是在机械精度的检测中有关几何精度方面的参数量,其基本对象是长度和角度。

(2) 计量单位是以定量表示同种量的量值而约定采用的特定量。我国规定采用以国际单位制(SI)为基础的“法定计量单位制”。常用的长度单位有毫米(mm)、微米(μm)和纳米(nm);常用的角度单位有度($^{\circ}$)、分(')、秒(")和弧度(rad)、球面度(sr)。

(3) 测量方法是根据一定的测量原理,在实施测量过程中对测量原理的运用及其实际操作。广义地说,测量方法可以理解为测量原理、测量器具(计量器具)和测量条件(环境和操作者)的总和。

(4) 测量误差是被测量的测得值与其真值之差。由于测量会受到许多因素的影响,其过程总是不完善的,即任何测量都不可能没有误差。从测量的角度来讲,真值只是一个理想的概念。因此,对于每一个测量值都应给出相应的测量误差范围,说明其可信度。不考虑测量精度而得到的测量结果是没有任何意义的。

3. 检测的一般步骤

通常情况下,检测应有以下几个步骤。

(1) 确定被检测项目。认真审阅被测件图纸及有关的技术资料,了解被测件的用途,熟悉各项技术要求,明确需要检测的项目。

(2) 设计检测方案。根据检测项目的性质、具体要求、结构特点、批量大小、检测设备状况、检测环境及检测人员的能力等多种因素,设计一个能满足检测精度要求,且具有低成本、高效率的检测预案。

(3) 选择检测器具。按照规范要求选择适当的检测器具,设计、制作专用的检测器具和辅助工具,并进行必要的误差分析。

(4) 检测前准备。清理检测环境并检查是否满足检测要求,清洗标准器、被测件及辅助工具,对检测器具进行调整使之处于正常的工作状态。

(5) 采集数据。安装被测件,按照设计预案采集测量数据并规范地作好原始记录。

(6) 数据处理。对检测数据进行计算和处理,获得检测结果。

(7) 填报检测结果。将检测结果填写在检测报告单及有关的原始记录中,并根据技术要求进行合格性的判定。

4. 量具、测量仪器和测量装置

量具是一种具有固定形态、用以复现或提供一个或多个已知量值的器具。按用途的不同,量具可分为单值量具(如量块、角度量块等)、多值量具(如线纹尺、 90° 角尺等)、专用量具(如光滑极限量规、螺纹量规、检验样板、功能量规等)、通用量具(如游标卡尺、外径千分尺、百分表等)。

测量仪器是能将测量值转换成可直接观察的示值或等效信息的测量器具,如立式光学比较仪、卧式测长仪、万能工具显微镜等。

测量装置是为确定被测量值所必需的一台或若干台测量仪器(或量具)连同有关的辅助设备所构成的系统,如国家长度基准复现装置、产品自动分检装置等。

5. 测量器具的技术性能指标

技术性能指标是选择和使用测量器具、研究和判断测量方法正确性的重要依据,它主要

有以下几项。

(1)量具的标称值。标注在量具上用于标明其特性或指导其使用的量值。如标在量块上的尺寸、标在刻线尺上的尺寸、标在角度量块上的角度等。

(2)分度值。测量器具的标尺上,相邻两刻线所代表的量值之差。例如,一外径千分尺的微分筒上相邻两刻线所代表的量值之差为 0.01mm ,则该测量器具的分度值为 0.01mm 。分度值是一种测量器具所能直接读出的最小单位量值,它反映了读数精度的高低,从一个侧面说明了该测量器具测量精度的高低。

(3)示值范围。由测量器具所显示或指示的最低值到最高值的范围,如机械式比较仪的示值范围为 $-0.1\sim 0.1\text{mm}$ (或 $\pm 0.1\text{mm}$)。

(4)测量范围。在允许不确定度内,测量器具所能测量的被测量值的下限值至上限值的范围。例如,外径千分尺的测量范围有 $0\sim 25\text{mm}$ 、 $25\sim 50\text{mm}$ 等,机械式比较仪的测量范围为 $0\sim 180\text{mm}$ 。

(5)测量力。在接触式测量过程中,测量器具测头与被测量面间的接触压力。测量力太大会引起弹性变形,测量力太小会影响接触的稳定性。

(6)灵敏度。反映被测几何量微小变化的能力。如果被测参数的变化量为 ΔL ,引起测量器具示值变化量为 Δx ,则灵敏度 $S=\Delta x/\Delta L$ 。当分子分母为同一类量时,灵敏度又称放大比 K 。

(7)示值误差。测量仪器的示值与被测量的(约定)真值之差。示值误差是测量仪器本身各种误差的综合反映。因此,仪器示值范围内的不同工作点,示值误差是不相同的。一般可用适当精度的量块或其他计量标准器来检定测量器具的示值误差。

6. 测量方法分类

测量方法是指测量时所采用的测量原理、测量器具和测量条件的总和。

按所测得的量(参数)是否为欲测的量可分为直接测量和间接测量;按测量结果的读数不同可分为绝对测量和相对测量;按被测件表面与测量器具测头是否有机接触分为接触测量和非接触测量;按测量在工艺过程中所起的作用可分为主动测量和被动测量;按零件上同时被测参数的多少可分为单项测量和综合测量;按被测工件在测量时所处状态可分为静态测量和动态测量;按测量中测量因素是否变化可分为等精度测量和不等精度测量。

以上测量方法的分类是从不同角度考虑的。对于一个具体的测量过程,可能兼有几种测量方法的特征。例如,在内圆磨床上用两点式测头在加工零件过程中进行的检测,属于主动测量、动态测量、直接测量、接触测量和相对测量等。测量方法的选择应考虑零件结构特点、精度要求、生产批量、技术条件及经济效果等。

7. 检测中应遵循的重要原则

为了获得正确可靠的测量结果,在测量过程中,要注意应用并遵守有关测量原则,而阿贝原则、基准统一原则、最短测量链原则、最小变形原则和封闭原则是其中比较重要的原则。

阿贝原则是要求在测量过程中被测长度与基准长度应安置在同一直线上的原则。基准统一原则是要求测量基准要与加工基准和使用基准统一,即工序测量应以工艺基准作为测量基准,终结测量应以设计基准作为测量基准。最短测量链原则是由测量信号从输入到输出量值通道的各个环节所构成的测量链,其环节越多测量误差越大。最小变形原则是测量器具与被测零件都会因实际温度偏离标准温度和受力(重力和测量力)而发生变形,形成测量误差。封闭原则是在闭合的圆周分度中,全部角度分量的偏差的总和为零。在检测封闭圆周中各分量的角度(或弧长)时,根据封闭原则可不需高精度标准,用相对法进行检测。

8. 误差的分类

根据测量误差的性质、出现的规律和特点,可分为三大类,即系统误差、随机误差和粗大误差。

(1)系统误差。在相同条件下多次测量同一量值时,误差值保持恒定;或当条件改变时,其值按某一确定的规律变化的误差,统称为系统误差。系统误差按其出现的规律又可分为定值系统误差和变值系统误差。

(2)随机误差。在相同条件下,以不可预知的方式变化的测量误差,称为随机误差。在一定测量条件下对同一值进行大量重复测量时,总体随机误差的产生满足统计规律,即具有有界性、对称性、抵偿性、单峰性。因此,可以分析和估算误差值的变动范围,并通过取平均值的方法来减小其对测量结果的影响。

(3)粗大误差。某种反常原因造成的、歪曲测得值的测量误差,称为粗大误差。粗大误差的出现具有突然性,它是由某些偶尔发生的反常因素造成的。这种显著歪曲测得值的粗大误差应尽量避免,且在一系列测得值中按一定的判别准则予以剔除。

9. 测量不确定度

由于各种测量误差的存在,采用不同的测量方法、测量器具、测量条件和不同的测量人员,其测得值的可靠性是不同的。因而引入“不确定度”来定量说明测量的质量。

所谓不确定度,就是“表示测量结果中合理赋予被测量值的一个分散性参数”,也就是说“测量不确定度是表征被测量的真值所处量值范围的估计”。受随机误差和系统误差的影响,不确定度的存在是必然的,即使已修正的测得值也不一定是被测量的真值,因为系统误差不可能完全消除。已修正的测得值可称为真值的最佳估计。

因测量误差的存在,经过测量和数据处理后得到的测量结果,实质上是对被测量真值的估计。所以,一个完整的测量结果应包括测量值及其不确定度的说明,即

$$L \pm U \quad (1-2)$$

式中, L 为对已定系统误差进行修正后的测量值; U 为测量的总不确定度。

1.1.2 检测技术的地位与作用

对工业生产而言,采用各种先进的检测技术对生产全过程进行检查、监测,对确保安全生产、保证产品质量、提高产品合格率、降低能源和原材料消耗、提高企业的劳动生产率和经济效益是必不可少的。

中国有句古话:“工欲善其事,必先利其器”,用这句话来说明检测技术在我国现代化建设中的重要性是非常恰当的,今天我们所进行的“事”就是现代化建设大业,而“器”则是先进的检测手段。科学技术的进步、制造业和服务业的发展、军队现代化建设的大量需求,促进了检测技术的发展,而先进的检测手段也可提高制造业、服务业的自动化、信息化水平和劳动生产率,促进科学研究和国防建设的进步,提高人民的生活水平。

检测是测量,计量也是测量,两者有什么区别?一般来说,计量是指用精度等级更高的标准量具、器具或标准仪器,对送检量具、仪器或被测样品、样机进行考核性质的测量;这种测量通常具有非实时及离线和标定的性质,一般在规定的、具有良好环境条件的计量室、实验室,采用比被测样品、样机更高精度的并按有关计量法规定期校准的标准量具、器具或标准仪器进行测量。检测通常是指在生产、试验等现场,利用某种合适的检测仪器或综合测试系统对被测对象进行在线、连续的测量。

在工业生产中,为了保证生产过程能正常、高效、经济地运行,必须对生产过程的某些重要工艺参数(如温度、压力、流量等)进行实时检测与优化控制。例如,城镇生活污水处理厂在污水的收集、提升、处理、排放的生产过程中,通常需要实时准确地检测液位、流量、温度、浊度、泥位(泥、水界面位置)、酸碱度(pH)、污水中溶解氧含量(DO)、化学需氧量(COD)、各种有害重金属含量等多种物理和化学成分参量;再由计算机根据这些实测物理、化学成分参量进行流量、(多种)加药(剂)量、曝气量及排泥优化控制;为保证设备完好及安全生产,需同时对污水处理所需机电动力设备和电气设备的温度、工作电压、电流、阻抗进行安全监测,这样才能实现污水处理安全、高效和低成本地运行。据了解,目前国内外一些城市污水处理厂由于在污水的收集、提升、处理及排放的各环节均实现自动检测与优化控制,因而大大降低了污水处理的运营成本,其污水处理的平均运行费用约为 0.4 元/m^3 ;而我国许多基本上靠人工操作的城镇污水处理厂其污水处理的平均运行费用为 $1.0 \sim 1.6 \text{ 元/m}^3$,两者相比差距十分明显。

在军工生产和新型武器、装备研制过程中更离不开现代检测技术,对检测的需求更多,要求更高。研制任何一种新武器,从设计到零部件制造、装配到样机试验,都要经过成百上千次严格的试验,每次试验需要同时高速、高精度地检测多种物理参量,测量点经常多达上千个。飞机、潜艇等在正常使用时都要装备上百个不同的检测传感器,组成十几至几十种检测仪表,实时监测和指示各部位的工作状况。在新机型设计、试验过程中需要检测的物理量更多,而检测点通常在5000个以上。在火箭、导弹和卫星的研制过程中,需动态高速检测的参量也很多,要求也更高,没有精确、可靠的检测手段,要使导弹准确命中目标和卫星准确入轨是根本不可能的。

用各种先进的医疗检测仪器可大大提高疾病的检查、诊断速度和准确性,有利于争取时间,对症治疗,增加患者战胜疾病的机会。

随着生活水平的提高,检测技术与人们日常生活也越来越密切。例如,新型建筑材料的物理、化学性能检测,装饰材料有害成分是否超标检测,城镇居民家庭室内的温度、湿度、防火、防盗及家用电器的安全监测等,都不难看出检测技术在现代社会中的重要地位与作用。

1.1.3 检测技术的发展

1. 检测技术的发展概况

人们对自然界的认识,在很大程度上取决于检测。无论在日常生活中,还是在工程、医学、科学试验等各个领域,都与检测有密切关系。例如,在工业生产中,为了正确地指导生产操作,保证生产安全、产品质量和实现生产过程自动化,其中一项必不可少的工作,就是准确而及时地检测出生产过程中的有关参数,工业中测温仪表——热电偶、热电阻、双金属温度计等,压力仪表——压力表、压力变送器等。在科学技术的发展中,新的发明和突破,都是以试验测试为基础的。随着工业生产的不断发展,科学技术的突飞猛进,对检测技术又提出了许多新要求,而新的检测技术的出现,又进一步推动了科学技术的发展,故检测技术的发展程度决定了科学技术的水平,换句话说,检测技术是现代科学技术水平高低的一个标志。由于工业生产的不断发展,对检测技术提出了新要求,而随着科技的发展,新的检测理论和检测方法也逐步出现,因而出现了各种新的检测工具,可以从以下几方面来了解检测技术的发展。

(1) 检测信号数字化。随着计算机技术和光纤技术的发展,检测信号数字化,是当前主要

趋势之一,它有利于信息的传输、存储、运算、处理、判断和显示,同时还可以提高检测的可靠性和稳定性,使仪表的精度有较大提高,抗干扰能力加强。也为综合自动化提供了坚实的基础。

(2)检测理论方面。随着科学技术的发展、生产规模的扩大和提高,对于生产的控制与管理要求,也越来越高,因而需要收集生产过程中信息的种类也越来越多,这就对过程参数检测提出了更高要求。由于过程参数的检测理论和方法与物理、化学、电子学、材料、信息等学科密切相关,随着这些学科的发展,检测技术现已发展到相当水平,不仅能对过程的操作参数,如温度、压力表等进行检测,工业生产中温度检测仪表——热电偶,也可以远传输出显示,也能对物料或产品的成分进行检测,甚至物性、噪声、厚度、泄漏、火焰、颗粒尺寸及分布等也能进行检测。

(3)检测领域方面。科学、生产的发展,生活水平的提高,极大地扩展了人类的活动范围,它对检测的影响,首先反映在新的检测对象、检测领域和检测要求上。例如,随着工业生产的不断发展,工厂中的“三废”对自然界造成了严重污染,破坏了生态平衡,破坏了人们赖以生产的自然环境;为了保护环境,防止水污染、空气污染以及废渣污染就需要对环境所含各种杂质进行微量检测,并加以控制,这就要求制造新的灵敏度极高的检测元件和寻找新的检测方法,一些节能环保检测仪表也相继出现,如氧化锆氧气含量分析仪等。随着工业不断发展,生产过程中的参数检测已逐渐地由表征生产过程的间接参数如温度、流量、压力、物位等而转向表征生产过程本质的物性、成分、气分和能量等参数的检测,同时对于装置的检测,已经逐渐由单参数发展到多参数的综合检测,参数的显示已逐渐地由模拟式转向数字式或图像显示等。

(4)检测器件、检测方法和仪表。一方面,随着新的检测领域的出现,新的检测方法和检测工具也随着出现。例如,利用激光脉冲原理测量大距离(如地球到月球距离),可以大大提高精度;利用量子力学诸效应研制的高灵敏度传感器、响应速度极快的红外传感器、光纤传感器等。另一方面,随着计算机技术、通信技术和显示技术的突飞猛进,仪表功能也大大扩展,例如,在仪表中引入微处理器(CPU)、图形处理器(GPU)等各种模块,可实现数据分析、计算、处理、校验、判断及储存等功能,实现了原来单个仪表根本不可能实现的许多功能,大大提高了测量效率、测量精度和测量的经济性,如带微处理的智能化质量流量检测仪,利用微处理器等模块能储存大量数据和高速运算的特点,可对饱和蒸汽进行温度、压力补偿,同时还可以随着根据工况变化对流量系数进行即时修正,获得高进度的质量流量检测;现场总线的逐步应用,为信号的传输,提供了条件,使单信号传输可逐步过渡到多信号传输;随着各大公司产品日益丰富,它们都有自己的通信网络,同时也有各种接口,以便与其他公司的网络连接,这样便可以真正实现系统集成。

2. 检测技术的新发展

检测技术是科技领域的重要组成部分,科技发展的每一步都离不开检测技术的配合,检测技术已成为深化认识自然的重要手段。随着电子技术的快速发展,各种弱物理量(如弱光、弱电、弱磁、小位移、微温差、微电导、微振动等)的测量有了长足的发展,其检测方法大都是通过各种传感器进行电量转换,使测量对象转换成电量,基本方法有相干测量法、重复信号的时域平均法、离散信号的统计平均法及计算机处理法等。但由于弱信号本身的涨落、传感器本身及测量仪噪声等的影响,检测的灵敏度及准确性受到了很大的限制。近年来,随着对光声光热技术的研究,人们通过检测声波及热效应便可对物质的力、热、声、光、磁等各

种特性进行分析和研究；并且这种检测几乎适用于所有类型的试样，甚至还可以进行试样的亚表面无损检测和成像。还由此派生出几种光热检测技术，如光热光偏转法、光热光位移法、热透射法、光声喇曼光谱法及光热释电光谱法等。这些方法成功地解决了以往用传统方法所不易解决的难题，因而广泛地应用于物理、化学、生物、医学、化工、环保、材料科学等各个领域，成为科学研究中十分重要的检测和分析手段。尤其是随着光声光热检测技术的不断发展，光声光热效应的含义也不断拓宽，光源也由传统的光波、电磁波、X射线、微波等扩展到电子束、离子束、同步辐射等，探测器也由原来的传声器扩展到压电传感器、热释电探测器及光敏传感器，从而适应了不同应用场合的实际需要。

1) 光声光热检测的特点

光声光热检测之所以有如此迅速的发展并得到日益广泛的应用，是由其本身的特点所决定的。与普通的光谱测量技术相比，光声检测的光声信号直接取决于物质吸收光能的大小，反射光、散射光对光声检测的干扰很小，因此，对于弱信号则可以通过增大入射光功率的方法来提高检测的信噪比；同时，它还是唯一可用于检测试样剖面吸收光谱的方法。在光声检测中，试样本身既是被测物质，又是吸收光波的检测器，因此，可以在一个很宽的波谱范围内进行研究，而不必改变检测系统，给实际操作带来极大的方便。光声效应是研究物质荧光、光电和光化学现象极其灵敏而又十分有效的方法，这是因为光声信息是物质吸收了经调制后的外界入射能量，由受激态跃迁到低能态而产生的，因此，它与物质受激后的辐射过程、光化学过程等是互补的，从而大大提高了检测的灵敏度。光声效应还可以用来测量其他一些非光谱研究领域的物理量，如薄膜厚度、弹性形变、不透明材料的亚表面热波成像等。

当物质吸收强度变化的辐射能而使自身加热时，便会在它的内部产生热应力、热应变及折射率变化等多种效应。如果采用适当的检测手段及检测系统，便可对其物理、化学性质进行测量和研究。根据试样特性和检测目的的不同，可采用不同的检测方法。各种检测方法都有自己相应的检测装置。每个光声光热检测系统，通常都是由强度时变的辐射源、光声光热信号检测器和信号处理系统3个部分组成的。

2) 常见的光声光热检测技术

(1) 传声器光声检测技术。这是目前使用最广泛的一种光声检测系统，它适用于固体、液体、气体、粉末及胶体等各种形态物质特性的检测，其特点是理论较完善，易于实现定量检测。该系统的主要部分是一个光声腔，用于安装传声器和放置被测试样，检测过程中的光-热-声能量的转换过程都是在这里发生的。根据其工作方式的不同，光声腔又可分为谐振式和非谐振式两大类。物质吸收调制光能后，将在光声腔内形成光声信号，然后再由腔内的传声器检测并转换成电信号，最后输入信号处理系统，常用的传声器是电容传声器，它由一很薄金属膜或镀金属的塑料电介质膜与一刚性电极组成，它对体积的变化特别灵敏，对气体、固体试样常采用非谐振式，因其体积小，又工作在低调制频率，所以检测灵敏度高。对于流体试样，常采用谐振式，虽其体积较大，工作频率较高，但由于驻波“放大”作用及提高光声耦合等措施，也能达到很高的检测灵敏度。

(2) 光偏转和光位移检测技术。这是一种非接触式检测技术，可以在十分恶劣的环境下对试样进行检测，灵敏度极高。利用这项技术，不仅可以检测光热偏转信号，还可以检测试样的表面位移和表面斜率，所以，它也是观测声波、表面波以及对物质进行无损检测的十分有效的手段。当调制光束照射到试样时，试样的表面会产生时变的位移或振动。通常这种光热位移及光热偏转是非常小的，所以采用灵敏度高的非接触式检测技术十分有利。这里的关键

是选择一个理想的光检测系统,并尽可能地降低噪声干扰。目前广泛使用的光探测器,如光电倍增管、光电二极管、硅光电池等都是一种能量检测器,因其输出与入射光能成正比,故可采用一种由若干光敏元件阵列组成的象限光电探测器来提高灵敏度,还可以利用专门设计的电容或位移传感器,应用光的相干原理来精确测定简谐振动的微小位移。

(3) 压电和热释电检测技术。当某些电介质在外界应力作用下发生形变时,在其表面上产生束缚电荷,这种效应称为压电效应。反之,电介质在外电场作用下而产生形变的现象称为反压电现象。这一正一反的现象,表明在电介质中机械性质与电学性质之间存在相关的行为。在光声检测中主要是利用正压电效应,即试样受强度调制的入射光作用后,产生的应力波传递到压电传感器上时,将因正压电效应而输出光信号。为达到最佳的检测效果,必须选择合适的压电材料。通常压电材料分为单晶体、多晶陶瓷和有机压电体,在光声检测中用得最多的是多晶压电陶瓷。而压电传感器则必须根据检测固体、液体、粉末的不同要求,选择相应的灵敏度高、屏蔽性好、抗干扰能力强、声阻抗相匹配的传感器。所谓的热释电效应是指某些晶体、陶瓷或聚合物因温度的变化而引起自发极化强度发生变化,并在特定方向上产生表面电荷的现象。和压电效应一样,并非所有的材料都有热释电效应,它与晶体结构有关,只有那些非中心对称的晶体点阵才具有这种效应。热释电检测实际上是利用某些材料的热释电效应做成探测器检测热释电信号。其工作原理是:一束强度经调制的电磁波入射到试样上,在试样内引起的热波传到热释电探测器上,使探测器温度升高,并引起探测器材料的极化强度发生变化,在其表面产生电荷,并在外电路上形成正比于入射能量的输出信号,这种信号可随波长变化,也可随试样位置变化,或随外界条件(如温度、压力、场强等)而变化,通过这些变化可研究其光谱性质、热成像及其他有关的物理性质。

(4) 微弱信号检测技术。微弱信号是实际检测中经常遇到的,由于一些有用的信号往往会被强于自身数千甚至数十万倍的噪声所淹没,所以必须采用必要的手段将被覆盖的信号从噪声中提取出来。在光声检测中常用的模拟弱信号检测装置是锁相分析仪和 Boxcar 积分仪(取样积分器)。锁相分析仪又称锁相放大器,常用于检测周期性的连续信号。它主要由信号通道、参考通道及相关器 3 部分组成。相关器是它的核心部分,主要由乘法器和积分器组成。为了同时测出输入信号的幅值和相位,通常锁相分析仪采用两个相关器。在实际应用中,应根据检测信号的特性,选择适当的交流和直流增益及积分时间常数,以便获得最好的检测结果。Boxcar 积分器用于检测非周期性连续信号,是一种通过信号多次平均而改善信号信噪比的装置,所以又称 Boxcar 平均器。可用来检测淹没在噪声中重复脉冲的平均幅值和恢复被噪声模糊的重复信号波形,它主要由信号通道和时基单元组成,信号通道由前置放大器、快速采样开关和 RC 取样积分器组成。在实际应用中,首先确定窗口宽度,再按改善信噪比的要求设置 RC,然后由被测波形的覆盖范围来选择延迟范围,按照上面 3 个参数来确定扫描时间,以获得较好的检测结果。

3) 光声光热检测的应用

光声检测技术由于具有灵敏度高、可检测的波谱范围宽的特点,特别是它几乎适用于所有类型的试样,使之在众多领域获得越来越广泛的应用,前景十分诱人。

(1) 固、液材料的定量分析。自 20 世纪 80 年代开始,许多科学工作者分别测定了无机材料、有机材料、半导体的光声谱,并通过光声谱对材料的组元和成分进行定量分析。有人提出,这种新方法可以用来测定谷物中的农药含量、药片中的添加剂、食品中的着色剂及法医的检测分析等。提高用途与价格比和定量分析能力,是光声光热检测设备商业化及扩大该

技术应用范围的关键,已有不少科学工作者致力于这方面的研究与开发。对于液体材料,光声谱法和热透镜法都是灵敏度极高的分析方法,已有人成功地将其应用于溶液的痕量和超痕量分析,检测限比传统的分光光度法提高2~3个数量级,为分析化学开创了新的应用前景。

(2)气体分析。光声技术是检测微量气体浓度的一种极为有用的技术,利用激光光源的高强度功率及单色性激光光谱可达到很高的检测灵敏度和分辨率。因此,它特别适用于微弱吸收气体的检测。这项技术不仅为气体分子光谱学的研究提供了一种新颖的技术,还为大气污染的监测开辟了一条光明的道路,它能够有效地克服其他检测低浓度物质方法的缺点。

(3)表面与界面的研究。表面和界面现象是一种很普遍的现象,许多自然现象、生理现象和科学研究,几乎都涉及各种表面与界面。长期以来都是使用反射光谱仪和扫描电镜等工具,对表面处理要求严格、手续繁杂,由于光声检测信号只与吸收光能有关,使光声技术对表面和界面的研究具有独特之处。因为光声谱(PAS)是测定由物质吸收的光谱变成热而引起的压力波,故能直接理解为对表面的敏感测定。应用光声技术研究表面可以达到单分子层水平,如采用高分辨率光源,还能获得各种情况下的表面氧化作用、还原作用和钝化的重要信息,对研究表面的结构及表面间的相互作用机制有实际意义。

(4)在生物医药上的应用。光声光热技术的最大优点是试样可以不经处理直接进行测定,因而保存了原试样的自然状态,应用在生物医药上,可进行活体和剖面深度的断层分析,因此可以获得正常和变异的生物过程及病理学方面有价值的信息。近年来,它已应用于细胞组织、细菌繁殖过程、药品合成和渗透、植物光合作用及光声免疫反应的研究,因此可以找出组织病理和疾病之间的内在联系,为早期诊断(包括癌变)提供有价值的临床诊断工具。随着检测技术的不断发展和完善,对光声光热检测技术的认识也将逐渐深化,而且又因其本身的特点及功能的多样化,其应用领域必将不断拓展。可以预期在不远的将来,光声光热检测技术会成为各个领域广泛使用的常规研究和分析手段。若与现有的检测技术相结合,将会在工业上的实时检测、质量控制和产品分析等领域获得越来越广泛的应用。光声光热检测技术仍属发展中的新技术,需要不断完善和改进,还有许多问题有待进一步开发和探索。可以相信,一个广泛使用和发展光声光热技术的时代必然会到来。

4)无损检测技术的应用

所谓无损检测技术,是指在不破坏或不改变被检物体的前提下,利用物质因存在缺陷而使其某一物理性能发生变化的特点,完成对该物体的检测与评价的技术手段的总称。它由无损检测和无损评价两个不可分割的部分组成。

一个设备在制造过程中,可能产生各种各样的缺陷,如裂纹、疏松、气泡、夹渣、未焊透和脱黏等。在运行过程中,由于应力、疲劳、腐蚀等因素的影响,各类缺陷又会不断产生和扩展。现代无损检测与评价技术,不但要检测出缺陷的存在,而且要对其做出定性、定量评定,其中包括对缺陷的定量测量(形状、大小、位置、取向、内含物等),进而对有缺陷的设备分析其缺陷的危害程度,以便在保障安全运行的条件下,做出带伤设备可否继续服役的选择,避免由于设备不必要的检修和更换所造成的浪费。

现代工业和科学技术的飞速发展,为无损检测技术的发展提供了更加完善的理论和新的物质基础,使其在机械、冶金、航空航天、原子能、国防、交通、电力、石油化工等多种工业领域中得到了广泛的应用。它被广泛应用于制造厂家的产品质量管理、用户订货的验收检查以及设备使用与维护过程中的安全检查等方面,如锅炉、压力容器、管道、飞机、宇航器、船舶、铁轨和车轴、发动机、汽车、电站设备等方面,特别是在高温、高压、高速、高负载

条件下运行的设备。无损检测技术包括超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测等常规技术以及声发射检测、激光全息检测、微波检测等新技术。实践证明,开展无损检测技术,对于改进产品的设计制造工艺、降低制造成本以及提高设备的运行可靠性等具有重要的意义,已成为机械故障诊断学的一个重要组成部分。

5) 超声波检测

超声波检测是无损检测的主要方法之一。利用声响从物体外界不损坏地检测其内部情况的方法早就问世了。超声波检测就是利用电振荡在发射探头中激发高频超声波,入射到被检物内部后若遇到缺陷,超声波会被反射、散射或衰减,再用接收探头接收从缺陷处反射回来(反射法)或穿过被检工件后(穿透法)的超声波,并将其在显示仪表上显示出来,通过观察与分析反射波或透射波的时延与衰减情况,即可获得物体内部有无缺陷以及缺陷的位置、大小及其性质等方面的信息,并由相应的标准或规范判定缺陷的危害程度的方法。

超声波检测具有灵敏度高、穿透力强、检验速度快、成本低、设备简便和对人体无害等一系列优点,既适合在制造厂生产线上成批检查,也可以用于野外作业。超声波之所以被广泛地应用于无损检测,是基于超声波的如下特性:①指向性好。超声波是一种频率很高、波长很短的机械波,在无损检测中使用的超声波波长为毫米数量级。②它像光波一样具有很好的指向性,可以定向发射,犹如一束手电筒灯光可以在黑暗中寻找所需物品一样在被检材料中发现缺陷。③穿透能力强。超声波的能量较高,在大多数介质中传播时能量损失小,传播距离远,穿透能力强,在有些金属材料中,其穿透能力可达数米。

超声波检测既可用于锻件、棒材、板材、管材以及焊缝等的检测,又可用于厚度、硬度以及材料的弹性模量和晶粒度等的检测。

螺栓的超声波检测。电站中高温高压部件(如汽缸、主蒸汽门、调速汽门等)用的螺栓,在运行中经常有断裂的现象。

紧固螺栓螺纹根部产生的裂纹是沿螺栓横断面发展的横向裂纹,中心孔加热不当产生的内孔裂纹也是横向裂纹。因此将直探头放在螺栓端面上探测,声束刚好与裂纹面垂直,对发现这些裂纹很有利。

车轴的超声波检测。车轴是机车、车辆运行时受力的关键部件之一,它在水气的侵蚀中承受载荷,容易产生裂纹,多数是危险性较大的横向裂纹。经常采用横波探伤法和小角度纵波探伤法。

非金属材料的超声波检测。超声波在非金属材料(塑料、有机玻璃、陶瓷、橡胶、混凝土等)中的衰减一般都比金属大,为了减小衰减而多采用低频检测,一般为20~200kHz,有的也用2~5MHz。为了获得较窄的声束,常采用较大尺寸的探头。

6) 射线检测

射线检测是以X射线、 γ 射线和中子射线等易于穿透物质的特性为基础的。工业上常用的是X射线、 γ 射线检测。射线在穿过物质的过程中,由于受到物质的散射和吸收作用而使其强度衰减,强度衰减的程度取决于物体材料的性质、射线种类及其穿透距离。当把强度均匀的射线照射到物体上一个侧面,在物体的另一侧使透过的射线在照相底片上感光、显影后,就可得到与材料内部结构或缺陷相对应的黑度不同的图像,即射线底片。通过观察射线底片,就可检测出物体表面或内部的缺陷,包括缺陷的种类、大小和分布情况,并做出评价。

射线检测对缺陷的形象非常直观,对缺陷的尺寸、性质等情况判断比较容易。采用计算机辅助断层扫描法还可以了解断面的情况,可以进行自动化分析。射线检测对所测试检查物

体既不破坏也不污染，但射线检测成本较高，且对人体有害，在检测过程中必须注意要妥善保护。

射线检测是一种常用于检测物体内部缺陷的无损检测方法，它几乎适用于所有的材料，检测结果(照相底片)可永久保存。但从检测结果很难辨别缺陷的深度，要求在被检试件的两面都能操作，对厚的试件曝光时间需要很长。

对厚的被检测物来说，可使用硬 X 射线或 γ 射线；对于薄的被检测物则使用软 X 射线。射线穿透物质的最大厚度为：钢铁约 450mm、铜约 350mm、铝约 1200mm。

对于气孔、夹渣和铸造孔洞等缺陷，在 X 射线透射方向有较明显的厚度差别，即使很小的缺陷也较容易检查出来。而对于如裂纹等虽有一定的投影面积，但厚度很薄的一类缺陷，只有用与裂纹方向平行的 X 射线照射时，才能够检查出来，而用与裂纹面几乎垂直的射线照射时就很难查出。这是因为在照射方向上几乎没有厚度差别的缘故。因此，有时要改变照射方向来进行照相。

计算机与微电子技术的高速发展，使仪器仪表业发生革命性的变革，传统的测量仪器都要有独立的机箱，在面板上有操作按键和旋钮，有信号输入与输出端口，有显示测量结果的指示计或数码窗口等。每种仪器都有各自的专用功能，相互不能通用。虚拟仪器的出现，使操作者面对的不再是专用的机箱，而是一台通用计算机。由传感器或变送器送来的信息经过专门的接口卡进入计算机，通过软件处理在计算机显示屏上显示测量结果，并发送各种控制信号。操作者通过鼠标或键盘进行操作。特别是数字传感器的出现，可省去 A/D 转换的接口卡，更无须模拟量放大等处理，并可远距离传输。不同的传感器可以构成不同的仪器，可以共用一台计算机，可以将两台不同性质的仪器合在一台计算机上。虚拟仪器开放性很强，具有与其他设备互联的能力，可实现对现场实时的监测与管理。其另一特点就是性价比高，它能一机多用；它的主体采用的是通用的计算机，其功能强，质量高，成本远比专用仪器低，由于遍布的计算机服务网点，使仪器能得到及时的与星级的维修与服务等，这也是专用仪器所不能相比拟的。因此虚拟仪器将在未来测控领域中成为主导的中坚，并推动测控技术不断发展与变革。

1.2 基本检测方法

基本检测方法分为直接按照物理定律检测法、探查型检测法、比较型检测法和信息处理型检测法四类。

1.2.1 直接按照物理定律检测法

把从被测对象中取得的一部分能量作用到检测元件上，在检测元件上使其按照一定的物理定律转换为易于测量和传输的量，再对这一经变换所得的量进行直接测量，其大小就代表被测对象的值。采用此种方法，从被测对象中取得能量时不应影响被测对象的物理状态。根据是否需要辅助能源，可分为如下两类。

1) 无须辅助能源的直接变换式

它是从被测对象取得一部分能量作用到检测元件上，从检测元件得到反映被测量大小的输出量。如图 1-1 所示， $y=f(x)$ 。