

高等学校无损检测本科专业系列教材

广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司独家赞助出版

GONGYE WUSUN JIANCE JISHU

工业无损检测技术

(超声检测)

夏纪真 编著



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

高等学校无损检测本科专业系列教材

广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司独家赞助出版

GONGYE WUSUN JIANCE JISHU

工业无损检测技术

(超声检测)

夏纪真 编著

图书馆
书章



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工业无损检测技术. 超声检测/夏纪真编著. —广州: 中山大学出版社, 2017. 1
ISBN 978 - 7 - 306 - 05822 - 5

I. ①工… II. ①夏… III. ①无损检测 ②超声检测 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 211937 号

出版人: 徐 劲

策划编辑: 李 文 曹丽云

责任编辑: 曹丽云

封面设计: 曾 斌

责任校对: 杨文泉

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广东省农垦总局印刷厂

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 32.75 印张 4 彩插 800 千字

版次印次: 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 88.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

新一代 相控阵仪器



汕头超聲

创建于1957年

岁月流金 品质永恒

CTS-PA22A

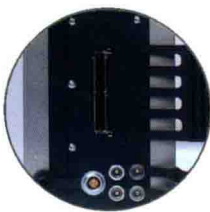
便携式相控阵超声检测仪



触屏操作，提升操作体验



工艺精细的铝合金边框



接口丰富，全密封防水防尘设计

- 便携式64个检测通道设计
- 业界领先应用的防水防油工业级触摸屏
- 抗撞击金属外壳、低功耗、全密封和无散热风扇设计
- 检测数据全程记录，长续航时间工作的双锂电池智能管理设计
- “方案”级别制造商，仪器、探头全自主研发制造，可为用户提供探伤工艺

广东汕头超声电子股份有限公司 超声仪器分公司

地址：广东省汕头市兴业路21号
<http://www.st-ndt.com> 或 www.cts-22.com
E-mail: stndt@pub.shantou.gd.cn

销售热线：
0754-88250577 88258441 88628010
0754-89892841~89892849



官方网站



微信服务号

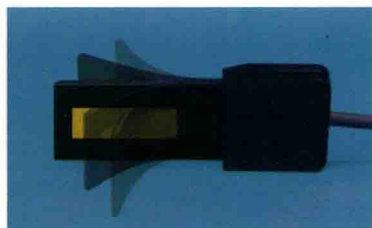


相控阵探头

Phased Array Probes

“汕头牌”
超声换能器

累计至今已有五大系列、七百多个型号的产品投产，产销量约100万只。最新研发和推向市场的多种型号相控阵系列探头和TOFD探头，其性能和稳定性在国内处于领先地位，更好地满足高端检测市场应用的需求。



④ 楔块



④ 柔性探头

④ 轮式探头





创建于1957年

汕头超声

岁月流金 品质永恒

CTS-2009

TOFD多通道超声检测仪



CTS-2009型TOFD多通道超声检测仪一次性、不带限定条件通过中国特检院的检测并获得B级证书，广东省获得此殊荣的产品仅此一家。

- 一次性TOFD扫描长度达40m
- 方波激励，独特的通道间噪声抑制技术
- “3+4+1”多通道设计，一次覆盖200mm厚度的焊缝检测
- 8.4英寸工业级TFT显示屏（800×600），触屏及键盘兼容设计
- 12位的AD转换器，图像采用256阶灰度色阶显示，图像清晰且对比度强
- 合成孔径聚焦（SAFT）、曲线拟合等多种图像处理方法，还原缺陷特征

本公司定期开展

衍射时差法超声检测(TOFD)设备操作培训班

欢迎参加报名，报名具体时间请查询官网或来电查询。



根据中国特种设备检验协会的委托，广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司为中国特种设备检验协会TOFD操作设备培训的正式授权合作单位。

凭此证书可报名参加国家TOFD- II级考核，为学员掌握TOFD技术、顺利通过国家TOFD- II级考试提供有力保障。

为了更好地培训操作人员，我公司按协会的课程要求进行培训和考核，为参加培训合格者颁发“衍射时差法超声检测（TOFD）设备操作培训合格证书”。



汕頭起聲

創始於1957年

歲月流金 品質永恒

TOFD探頭與楔塊

TOFD 探頭是高分辨率縱波探頭，特別適合 TOFD 檢測應用，滿足 GB/T 23902-2009、JB/T 4730、BS 7706 等標準對 TOFD 探頭的性​​能要求。

主要應用於石油天然氣、電力、特檢、船舶、核電、重工等領域各類焊縫的 TOFD 檢測。



特殊探頭



絕緣子探頭



渦流探頭



非金屬探頭



電磁測厚探頭

CTS-409

電磁超聲測厚儀



非接觸式測厚



適合高溫環境



數據無線傳輸
(選配功能)

- 厚度測量結果不受角度影響，測量精度高（精確到0.01mm）
- 無需耦合劑，測量更方便，探頭前帶耐磨層，硬度80D+（邵氏）
- 粗糙工件表面氧化皮及油漆等對工件測量結果沒有影響；可穿過塗層測厚
- 適用於高溫測厚（檢測時間少於4秒時可支持到600℃，提供高溫手柄），適合碳鋼、銅、不銹鋼等各種導電金屬材料



作者 简介

夏纪真 (Xia Jizhen):

高级工程师。男, 汉族, 1947 年生于广东省广州市, 祖籍江苏高邮。

1991 年获得航空航天工业部“有突出贡献的中青年科技专家”称号。

1992 年获得国务院授予的“有突出贡献专家”称号并终身享受国务院的政府特殊津贴。

2000 年创建并主持无损检测技术专业综合资讯网站——无损检测图书馆 (www.ndtinfo.net)。

1960 年毕业于中山大学附属小学, 1965 年毕业于广东省广雅中学, 1970 年毕业于中国人民解放军军事工程学院空军工程系飞机电器专业 (哈尔滨军事工程学院最后一期学员)。

从事过多种技术工作 (锻造、电器维修、电子仪表测温、理化测试、无损检测、计算机等), 曾长期在航空工业系统生产第一线 (贵州安顺) 工作, 并具有在高等院校 [南昌航空航天大学 (原南昌航空工业学院)、广州铁路职业技术学院、北京理工大学珠海学院] 从事大专、本科无损检测专业教学、科研与科技开发, 以及在广州某大型国有企业从事质量管理和计算机技术工作等的实践经历。

历任工厂无损检测组组长、大学无损检测专业教研室副主任、高新技术开发总公司副总经理、国有企业集团公司机械公司质量管理部副部长兼理化计量测试中心主任、集团公司计算机与信息中心主任等职, 曾任航空航天工业部无损检测人员资格鉴定考核委员会委员, 中国机械工程学会无损检测专业委员会会刊《无损检测》杂志编委, 广东省机械工程学会无损检测分会理事长, 具备原航空航天工业部无损检测人员超声检测、磁粉检测和渗透检测的高级技术资格, 原劳动部锅炉压力容器无损检测人员超声检测高级技术资格。自 1982 年至今 30 多年来长期兼职从事无损检测人员的技术资格等级培训考核工作, 1991—1993 年期间还担任闽台超声波检测、射线检测研讨班 (对我国台湾地区无损检测人员中高级技术资格培训考核) 的主讲教师和考核人员。

专长于无损检测技术, 尤其在超声波检测方面有较高造诣, 在国际和全国性杂志与学术会议发表论文 30 多篇、译文 30 多篇, 编写出版专业教材和专著 10 余本, 从事科研课题数十项, 开发新产品 9 项, 曾获国家科技进步一等奖, 航空工业与国防工业重大



科技成果，科技成果一、二等奖等。

现任北京理工大学珠海学院“应用物理（无损检测方向）”本科专业责任教授，兼任中国机械工程学会无损检测专业委员会教育培训科普工作委员会委员、辽宁省无损检测学会会刊《无损探伤》杂志特邀编委等。2009年3月获中国机械工程学会无损检测分会第一届“百人奖”——“优秀工作者奖”，2013年获中国机械工程学会无损检测分会第二届“百人奖”——“特殊贡献奖”。

自1996年起陆续被收入《中国高级专业技术人员辞典》（中国人事出版社1996年版）、《中国专家大辞典》（国家人事部专家服务中心，中国人事出版社2001年版）、《数风流人物——广州市享受政府特殊津贴专家集》（广州市人事局，广州出版社1998年版）、《世界优秀专家人才名录》（香港中国国际交流出版社1999年版）、《中国设备工程专家库》（中国设备管理协会，国际商务资讯传播出版集团有限公司2007年版）、“广州市科技专家库”（广州市科技局，2009年6月，广州市科技信息资源公共服务平台<http://www.gzstp.cn>）等。

通信地址：中国广东省广州市海珠区新港西路中山大学园西区745号之一201室

邮编：510275

手机：13922301099，E-mail：xjz@ndtinfo.net

前 言



本书是在广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司独家赞助出版的《工业超声波无损检测技术》(夏纪真编著,广东科技出版社2009年版)的基础上做了较大幅度的补充与更新而成的。

笔者从事无损检测技术工作40多年,本书除了结合本人多年从事超声波检测技术生产第一线工作和科研与技术咨询服务的实践经验,并以超声波无损检测人员技术资格等级培训,以及在原南昌航空工业学院无损检测教研室、北京理工大学珠海学院应用物理(无损检测方向)专业(本科)和广州铁路职业技术学院机电系无损检测专业(大专)教学的讲稿等为基础外,还关注超声波无损检测技术的发展以及注重资料的搜集积累,力图对工业超声无损检测技术作尽可能全面的综合与系统化整理。

本书侧重于实际应用,有关声学基础理论方面仅作简练的阐述。

本书可以作为“超声检测技术”工艺课程教材,适用于无损检测专业本科(推荐理论讲授为64课时,另加实验64课时)与大专(推荐理论讲授为48课时,另加实验48课时)层次的学生,可作为各行业、领域超声波无损检测技术人员的参考工具书,对于报考初、中、高级超声波无损检测技术资格等级的人员也有重要的参考价值。

本书继续由广东汕头超声电子股份有限公司超声仪器分公司独家赞助出版,笔者谨对该公司的全力支持表示衷心的感谢。

夏纪真

2016年2月于广州

目 录

第1编 超声波检测的物理基础

第1章 超声波检测技术的基本概念	(2)
1.1.1 超声波的性质及传播速度、波长与频率的关系	(2)
1.1.2 超声波的类型	(3)
1.1.3 超声波声场的特征量与声场特性	(9)
1.1.4 超声波在介质中的传播特性	(12)
第2章 超声波传播特性的应用	(25)
1.2.1 超声波反射与折射特性的应用	(26)
1.2.2 超声波衍射与散射特性的应用	(28)
1.2.3 超声波衰减特性的应用	(29)
1.2.4 超声波速度特性的应用	(29)
1.2.5 超声波谐振特性的应用	(31)

第2编 超声波检测仪器与探头

第1章 工业超声波检测仪器的发展历史与现状	(36)
2.1.1 工业超声波检测仪器的发展历史	(36)
2.1.2 工业超声波检测仪器的现状	(39)
第2章 超声波检测仪器的类型	(56)
2.2.1 超声波检测仪器的分类	(56)
2.2.2 模拟式超声波探伤仪	(64)
2.2.3 数字式超声波检测仪器	(64)
2.2.4 自动化超声波检测设备	(68)
2.2.5 扫查器	(77)
第3章 工业超声波检测仪器的基本工作原理与结构	(80)
2.3.1 模拟式 A 型显示脉冲反射超声波探伤仪的基本工作 原理	(80)
2.3.2 模拟式 A 型显示脉冲反射超声波探伤仪上各旋钮的 功能作用	(91)



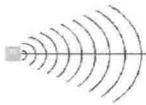
2.3.3	数字式超声波探伤仪	(98)
第4章	超声波检测换能器的基本工作原理、种类与结构	(110)
2.4.1	换能器的用途和基本原理	(110)
2.4.2	压电换能器的基本概念	(115)
2.4.3	超声波检测用压电换能器的种类、结构设计与制作 工艺的考虑因素	(144)
2.4.4	超声波检测用压电式换能器的主要工作性能	(171)
2.4.5	超声波检测常用探头及探头连接电缆实物展示	(173)
第5章	超声波检测系统工作性能测试	(177)
2.5.1	超声波探伤仪与超声波探头的主要性能	(177)
2.5.2	超声波检测中应用的试块	(180)
2.5.3	超声波检测系统的工作性能测试	(194)
第3编	超声波检测的基本方法	
第1章	工业超声波检测方法分类	(220)
第2章	纵波检测的基本方法	(223)
3.2.1	垂直入射纵波法	(223)
3.2.2	小角度入射纵波法	(234)
第3章	横波检测的基本方法	(236)
3.3.1	横波法检测条件选择的考虑因素	(236)
3.3.2	横波检测方法	(240)
第4章	兰姆波检测的基本方法	(242)
第5章	瑞利波检测的基本方法	(243)
第6章	其他超声波检测方法	(245)
3.6.1	爬波法	(245)
3.6.2	超声测速法	(247)
3.6.3	超声波测厚	(250)
3.6.4	超声波检漏	(254)
3.6.5	其他声学无损检测技术	(255)
第4编	工业产品的超声波检测技术	
第1章	锻件的超声波检测	(258)
4.1.1	综述	(258)
4.1.2	锻件的超声波检测程序	(272)
第2章	铸件的超声波检测	(302)
4.2.1	综述	(302)
4.2.2	铸件超声波检测的特点	(309)



第3章 焊缝的超声波检测	(312)
4.3.1 综述	(312)
4.3.2 金属熔化焊缝横波检测的一般程序	(324)
4.3.3 一些特殊形式焊缝的超声波检测	(345)
第4章 板材的超声波检测	(355)
4.4.1 厚板与中厚板的超声波检测	(355)
4.4.2 薄板的超声波检测	(359)
第5章 棒材与型材的超声波检测	(366)
4.5.1 综述	(366)
4.5.2 丝材的超声波检测	(366)
4.5.3 型材的超声波检测	(367)
4.5.4 大直径圆截面棒材的超声波检测	(368)
4.5.5 小直径圆截面棒材的超声波检测	(375)
第6章 管材的超声波检测	(378)
4.6.1 综述	(378)
4.6.2 一般无缝管材的超声波检测	(378)
4.6.3 管材的周面轴向横波检测	(383)
4.6.4 厚壁无缝管材的超声波检测	(383)
4.6.5 国外新型的管材超声波检测系统	(385)
第7章 非金属材料的超声波检测	(388)
4.7.1 非金属材料超声波检测特点	(388)
4.7.2 非金属材料超声波检测实例	(388)
第8章 胶接结构与复合材料的超声波检测	(398)
4.8.1 胶接结构与复合材料的特点与分类	(398)
4.8.2 胶接结构与复合材料的超声波检测方法	(399)
4.8.3 国外新型的复合材料检测系统	(403)
第9章 在役超声波检测	(405)
4.9.1 零部件使用过程中产生的缺陷	(405)
4.9.2 在役零部件超声波检测的方法	(407)
第10章 超声波检测中的缺陷定性评定	(411)

第5编 最新超声波检测技术介绍

第1章 超声波相控阵检测技术	(418)
5.1.1 基本原理	(418)
5.1.2 应用实例	(427)
第2章 超声导波检测技术	(432)
第3章 TOFD 检测技术	(445)
5.3.1 TOFD 检测方法的由来	(445)



5.3.2	端点反射波法	(445)
5.3.3	端点衍射波法	(447)
5.3.4	TOFD 检测方法	(448)
第4章	电磁超声检测技术	(464)

附录

附录1	超声波检测仪器设备与探头性能测试的相关标准目录	(472)
附录2	超声波检测用对比试块的平底孔钻制	(476)
附录3	一些压电材料的性能参数	(480)
附录4	常见材料的物理、声学性能参数	(483)
附录5	常用金属材料的密度	(502)
主要参考文献	(505)

第1编 超声波检测的物理基础



第 1 章 超声波检测技术的基本概念

1.1.1 超声波的性质及传播速度、波长与频率的关系

1.1.1.1 超声波的性质

按照经典声学理论的划分, 振动频率范围在 16 Hz ~ 20 kHz 的机械振动波称为声波 (人耳能感受到的纵波模式的机械振动波), 频率低于 16 Hz 的机械振动波称为次声波 (又称为亚声波, 也有的划分是以频率低于 20 Hz 的机械振动波为次声波, 人耳不能感受到), 频率高于 20 kHz 时, 人耳也不能感受到, 这种机械振动波则称为超声波。

实际上, 目前工业超声波检测技术中应用的超声波频率范围在 2 kHz 到 25 MHz, 在航天工业中甚至应用到数百兆赫兹 (例如检测航天飞机隔热陶瓷片的超声波频率达 400 MHz 甚至更高, 要求发现直径小至 0.5 μm 的微细孔隙)。

机械振动波是由机械振动源在弹性介质中激发的。在弹性介质中, 介质中的质点在其平衡位置的附近做具有周期性的往复运动 (振动), 由于弹性介质中一个质点的振动会引起邻近质点的振动, 邻近质点的振动又会引起较远质点的振动, 这种机械振动状态在弹性介质中的传递 (能量传递) 过程就构成机械振动波。波动传播过程的实质是以应力波的形式传递振动能量 (即能量的传播过程), 其必要条件是要有机械振动源和能传递机械振动的弹性介质 (实际上包括了几乎所有的气体、液体和固体)。这种机械振动波能透入物体内部并可以在物体中传播。

应当注意, 机械振动波与电磁波有实质性的不同, 电磁波是以光速在空间传播的交变电磁场, 因此电磁波可以在真空中传播, 而机械振动波则不能, 因为真空中没有弹性介质的存在。

超声波具有以下主要特性:

- 1) 超声波具有波长短、沿直线传播 (在许多场合可应用几何声学关系进行分析研究)、指向性好等特性, 可在气体、液体、固体、固熔体等介质中有效传播, 特别是在固体中传输损失小, 探测深度大。
- 2) 超声波可传递很强的能量, 穿透力强。
- 3) 超声波在介质中的传播过程遵循几何声学和物理声学的规律, 传播特性包括反



射与折射、衍射与散射、衰减、声速、干涉、叠加和共振等多种变化，并且其振动模式可以改变（波型转换）。

4) 超声波在液体介质中传播时，达到一定程度的声功率就可在液体中出现“空化现象”，能对液体中的物体界面产生强烈的冲击，可做超声清洗、超声加工等强功率超声应用。

1.1.1.2 超声波的传播速度、波长与频率的关系

超声波在介质中的传播速度 C ：即超声波在弹性介质中单位时间内传播的距离，与介质的弹性模量（杨氏模量 E 、切变弹性模量 G ）、介质的密度 ρ 以及介质的边界条件、波型（振动模式）等有关，在超声检测技术中最常用的单位是 m/s 。

超声波的波长 λ ：介质质点每完成 1 次全振动时，超声波在其前进方向所传播的距离称为波长，或者说在 1 个波列中相同相位的相邻点之间的距离，亦即相近两波峰或相近两波谷之间的距离，在超声检测技术中最常用的单位是 mm 。

超声波的振动频率 f ：即超声波在单位时间内完成全振动的次数，在国际标准单位里，以每秒钟完成 1 次全振动为 1 个赫兹，表示符号为 Hz ，这是以德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹的名字命名的，在超声检测技术中最常用的单位是 kHz （千赫兹）、 MHz （兆赫兹）。

三者有如下关系： $C = \lambda f$ ，式中： λ 为波长，单位为 m ， f 为频率，单位为 Hz ， C 为声速，单位为 m/s 。

应当注意， $C = \lambda f$ 这个表达式只是一个数学量的关系式，不能认为增高频率或者加大波长就能增大声速，因为同一波型的超声波在不同介质中具有不同的传播速度，而在同一介质中不同的超声波波型也具有不同的传播速度，只有在同一介质中相同波型的超声波才有相同的传播速度。

还应当注意，超声波在介质中的传播是通过介质中的质点振动实现的，在超声波传播时，介质中的质点在其平衡位置附近做往复运动（周期性往返振动），质点自身的振动位移速度称为质点振动速度（质点振速），它远小于超声波在介质中的传播速度（声速）。质点振速与声速是两个完全不同的概念，超声波在介质中的传播并不是把在平衡位置附近振动的质点迁移走，而只是振动状态或振动能量的传播。

1.1.2 超声波的类型

1.1.2.1 按振动模式分类

超声波在弹性介质中传播时，视介质质点的振动形式（振动方向）与超声波传播方向的关系，最常见的有以下几种波型。

1. 纵波（longitudinal wave，简称 L 波）

纵波的特点是传声介质的质点振动方向与超声波的传播方向平行（见图 1-1），传