



超声检测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材

超 声 检 测

《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会 编

主 编 史亦韦

主 审 何双起 林猷文



机 械 工 业 出 版 社

“国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材”共 11 册,《超声检测》是其中之一。编写原则是:紧密围绕认证考试大纲,强调解决实际问题。

本书共分 9 章:第 1 章讲述基本原理;第 2 章讲述检测仪器、探头、试块、耦合剂的基础知识;第 3 章讲述检测技术的分类,各检测技术的原理、特点和适用性;第 4 章讲述超声检测中的通用技术;第 5~8 章讲述锻件、铸件、粉末冶金件,管、棒、板材,焊接接头,复合材料及胶接材料的超声检测;第 9 章讲述超声检测标准、规程与质量控制。

本书可作为 II、III 级无损检测人员认证考试的培训教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

超声检测/《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. —北京:机械工业出版社, 2005.7
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-17034-2

I. 超... II. 国... III. 超声检测—技术培训—教材
IV. TP553 .

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 082981 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:吕德齐 郑 铨

责任印制:杨 曦

高等教育出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·15.5 印张·362 千字

0 001—4 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

编审委员会

主 任 马恒儒

副主任 陶春虎 郑 鹏

成 员 (以姓氏笔画为序)

王自明 王任达 王跃辉 史亦韦 叶云长 叶代平 付 洋
任学冬 吴东流 吴孝俭 何双起 苏李广 杨明纬 林猷文
郑世才 徐可北 钱其林 郭广平 章引平

审定委员会

主 任 吴伟仁

副主任 徐思伟 耿荣生

成 员 (以姓氏笔画为序)

于 岗 王海岭 王晓雷 王 琳 史正乐 任吉林 朱宏斌
朱春元 孙殿寿 刘战捷 吕 杰 花家宏 宋志哲 张京麒
张 鹏 李劲松 李荣生 庞海涛 范岳明 赵起良 柯 松
宫润理 徐国珍 徐春广 倪培君 贾慧明 景文信

编委会办公室

主 任 郭广平

成 员 (以姓氏笔画为序)

任学冬 朱军辉 李劲松 苏李广 徐可北 钱其林

序 言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术。随着产品复杂程度的增加和对安全性保证的严格要求,无损检测技术在产品质量控制中发挥着越来越重要的作用,已成为保证军工产品质量的有力手段。无损检测应用的正确性和有效性,一方面取决于所采用的技术和设备的水平,另一方面在很大程度上取决于无损检测人员的经验和能力。无损检测人员的资格鉴定是指对报考人员正确履行特定级别无损检测任务所需知识、技能、培训和实践经历所作的验证;认证则是对报考人员能胜任某种无损检测方法的某一级别资格的批准并作出书面证明的程序。对无损检测人员进行资格鉴定是国际通行做法。美国、欧洲等发达国家都建立了有关无损检测人员资格鉴定与认证标准,国际标准化组织 1992 年 5 月制定了国际标准 ISO 9712,规定了人员取得级别资格与所能从事工作的对应关系,通过人员资格鉴定与认证对其能力进行确认。无损检测人员资格鉴定与认证对确保产品质量的重要性日益突出。

改革开放以来,船舶、核能、航天、航空、兵器、化工、煤炭、冶金、铁道等行业先后开展了无损检测人员资格鉴定与认证工作,对提高无损检测人员素质,确保产品质量发挥了重要作用。随着社会主义市场经济体制不断完善,国防科技工业管理体制改革逐步深化,技术进步日新月异,特别是高新技术武器装备科研生产对质量工作提出的新的更高要求,现有的无损检测人员资格鉴定与认证工作已经不能适应形势发展的要求。未来十年是国防科技工业实现跨越发展的重要时期,做好无损检测人员资格鉴定与认证工作对确保高新技术武器装备研制生产的质量具有极为重要的意义。

为进一步提高国防科技工业无损检测技术保障水平和能力,国防科工委《关于加强国防科技工业技术基础工作的若干意见》提出了要研究并建立与国际惯例接轨,适应新时期发展需要的国防科技工业合格评定制度。2002 年国防科技工业无损检测人员的资格鉴定与认证工作全面启动,各项工作稳步推进,2002 年 11 月正式颁布 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认证》;2003 年 8 月出版了《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》;2003 年 9 月国防科工委批准成立国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证委员会,授权其统一管理和实施承担武器装备科研生产的无损检测人员资格鉴定与认证工作,标志着国防科技工业合格评定制度的建立开始迈出了重要的第一步。鉴于国内尚无一套能满足 GJB 9712 和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》要求的教材,为了做好国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考核工作,国防科工委科技与质量司组织有关专家编写了这套国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材。

本套教材比较全面、系统地体现了 GJB 9712—2002《无损检测人员的资格鉴定与认

证》和《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲》的要求，包括了对无损检测 I、II、III 级人员的培训内容，以 II 级要求内容为主体，注重体现 III 级所要求的深度和广度，强调实际应用；同时教材体现了国防科技工业无损检测工作的特色，增加了典型应用实例、典型产品及事故案例的介绍，并力图反映无损检测专业技术发展的最新动态。全套教材共 11 册，包括《无损检测综合知识》、《涡流检测》、《渗透检测》、《磁粉检测》、《射线检测》、《超声检测》、《声发射检测》、《计算机层析成像检测》、《全息和散斑检测》、《泄漏检测》和《目视检测》。

由于无损检测技术涉及的基础科学知识及应用领域十分广泛，而且计算机、电子、信息等新技术在无损检测中的应用发展十分迅速，教材编写难度较大。加之成书比较仓促，难免存在疏漏和不足之处，恳请培训教师和学员以及读者不吝指正。愿本套教材能够为国防科技工业无损检测人员水平的提高和促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

本套教材参考了国内同类教材和培训资料，编写过程中得到许多国内同行专家的指导和支持，谨此致谢。

“国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训
教材”编审委员会

2005 年 6 月

前 言

根据国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试培训教材编辑委会 2003 年 4 月召开的“国防科技工业无损检测人员培训教材”编写工作会议和培训教材编写大纲审定会议确定分工,我们承担了《超声检测》教材编写,编写中的主要原则:一是紧密围绕考试大纲,强调解决实际问题;二是注重体现国防科技工作无损检测工作特色。

本教材共 9 章。

前四章是超声检测技术的基本内容。第 1 章超声检测的物理基础,讲述学习超声检测技术所需的超声学物理概念和物理原理,为理解后几章关于设备器材和检测技术的基本原理提供一个理论基础;第 2 章超声检测设备与器材,描述超声检测仪器、探头、试块、耦合剂等的组成或结构、原理、特性、性能检测等内容,为学员正确使用超声检测器材并进行必要的性能校验,提供一个知识基础;第 3 章超声检测技术分类与特点,叙述超声检测技术的分类,各检测技术的原理、特点与适用性,以使学员能够根据检测对象的特点,确定适当的超声检测技术;第 4 章超声检测通用技术,首先就主要超声检测技术实施过程中的共性技术问题进行了讨论,包括器材选用、检测面选择、记录与报告等内容,之后详细讲述了纵波、横波与瑞利波检测过程各步骤的具体实施方法,包括仪器调整、扫查方法、缺陷评定等。

第 5~8 章,针对国防工业中涉及的各种形式产品检测的特殊问题,包括工艺特点与常见缺陷、常用检测技术、检测技术应用中的特殊技术问题等,分别就锻件、铸件、粉末冶金制件的超声检测,管、棒、板材的超声检测,焊接接头的超声检测和复合材料与胶接结构的超声检测进行了介绍,是超声检测技术的应用部分。

第 9 章超声检测标准、规程与质量控制,一方面是关于现行的各类标准的分析、列举,以及检测规程的编写要求,使相关人员能够熟悉常用标准及其相互关系,正确地理解、运用有关标准,并为 II、III 级人员编制超声检测规程、工艺卡,提供参考知识;另一方面,针对 III 级人员在保证检测质量和进行超声检测过程管理方面的职责,使其了解影响检测质量的各方面因素,并掌握质量控制要点。

书中带有 * 号的章节(有些小节未在目录中体现)是仅要求 III 级人员学习的内容,可以不要求 II 级人员掌握,授课教师可根据 II、III 级人员职责及考试大纲要求在教学中作适当安排。

本教材的主要特点,一是在教材中根据目前超声检测技术应用水平的发展,增添了一些对数字式仪器、自动检测系统的介绍;二是在应用方面,结合国防工业超声检测的特点,增加了粉末冶金制件、复合材料与胶接结构检测的章节;三是教材从 III 级人员选择检测技术、制订检验规程的要求出发,将超声检测技术的分类与选用列为单独一章,

同时,作为知识的扩充,也介绍了几种常规技术以外的和较新的超声检测技术。

本教材在编写中,除了参考国内外公开出版的一些文献外,还特别参考了无损检测学会编写的培训教材及航空、航天、兵器、船舶、核工业等内部培训教材,编写组对有关作者表示衷心感谢。此外,教材也写入了编写组成员多年从事超声检测工作积累的经验和在培训教学中的一些体会。

本教材第1~4、7~9章由史亦韦编写,第5~6章由梁菁编写,全书由史亦韦整理定稿,何双起、林猷文担任主审,李泽、王海岭、邵建华、吴东流、王自明、苏李广、钱其林、花家宏等参加了审查。此外,本教材初稿征求意见过程中,王芝筠等许多教师与学员提出了有益的意见和建议,在此表示真诚的感谢。

限于编者水平,错误和疏漏恐在所难免,热诚欢迎培训教师、培训学员、读者提出宝贵意见。

《超声检测》编写组

2005年6月

目 录

序言

前言

绪论..... 1

0.1 超声检测发展简史..... 1

0.2 超声检测原理..... 2

0.3 超声检测的优点与局限性..... 2

0.4 超声检测的适用范围..... 3

第 1 章 超声检测的物理基础..... 4

1.1 机械振动与机械波..... 4

1.1.1 机械振动..... 4

1.1.2 机械波..... 5

1.2 超声波..... 7

1.2.1 超声波的定义..... 7

1.2.2 超声波的分类..... 7

1.2.3 超声波的传播速度..... 12

1.2.4 超声波的声压、声强和声阻抗..... 14

1.2.5 幅度的分贝表示..... 15

1.3 超声波的传播..... 16

1.3.1 超声波的波动特性..... 16

1.3.2 超声波垂直入射到平界面上时的反射和透射..... 19

*1.3.3 超声波垂直入射到多层平界面上时的反射和透射..... 21

1.3.4 超声波倾斜入射到平界面上时的反射、折射和波型转换..... 23

1.3.5 端角反射..... 27

1.3.6 超声波入射到曲界面上的反射、透射..... 28

1.3.7 超声波的传播衰减..... 30

1.4 声场..... 32

1.4.1 圆盘声源的声场..... 32

*1.4.2 聚焦声源的声场..... 36

*1.4.3 斜探头发射的横波声场..... 37

1.5 规则反射体回波声压..... 40

1.5.1 规则反射体回波声压简化公式..... 40

1.5.2 AVG 曲线..... 43

复习题..... 46

第 2 章 超声检测设备与器材..... 48

2.1 超声检测设备..... 48

2.1.1 超声检测仪的分类..... 48

2.1.2 A 型脉冲反射式超声检测仪..... 50

2.1.3 数字式超声检测仪..... 55

2.1.4 仪器的维护保养..... 57

2.1.5 自动检测设备..... 58

2.2 超声波探头..... 58

2.2.1 压电效应与压电材料..... 59

2.2.2 探头的结构及各部分的作用..... 61

2.2.3 探头的主要种类..... 63

2.2.4 探头的型号标识..... 65

2.2.5 探头电缆线..... 67

2.3 耦合剂..... 67

2.3.1 耦合剂的作用..... 67

2.3.2 常用耦合剂..... 67

2.4 试块..... 68

2.4.1 试块的分类..... 68

2.4.2 标准试块..... 69

2.4.3 对比试块..... 71

2.5 超声检测仪器与探头的性能..... 75

2.5.1 超声检测仪器、探头的主要性能及其组合性能..... 75

2.5.2 超声检测仪、探头及其组合性能的测试方法..... 77

复习题	83	4.5 斜射声束横波检测技术	126
第3章 超声检测技术分类与特点	85	4.5.1 检测的准备与仪器的调整	126
3.1 检测技术分类	85	4.5.2 检验	132
3.2 脉冲反射法与穿透法	86	4.5.3 缺陷的评定	133
3.2.1 脉冲反射法	86	4.6 表面波检测技术	135
3.2.2 穿透法	86	4.6.1 仪器的调整	135
*3.2.3 脉冲反射法与穿透法的 特点比较	87	4.6.2 扫查	136
3.3 直射声束法与斜射声束法	88	4.6.3 缺陷的评定	136
3.3.1 直射声束法	88	4.7 影响检测结果的因素	137
3.3.2 斜射声束法	89	4.7.1 超声检测影响因素分析	137
3.3.3 表面波法	90	4.7.2 检测设备与器材的影响因素	137
3.4 单探头法与双探头法	90	4.7.3 人员操作的影响因素	138
3.4.1 单探头法	90	4.7.4 试件与缺陷本身特性的影响	138
3.4.2 双探头法	91	4.8 记录与报告	140
3.5 接触法与液浸法	92	4.8.1 记录	140
3.5.1 接触法与液浸法的原理	92	4.8.2 检测报告	141
*3.5.2 液浸聚焦探头检测的特点	92	复习题	141
*3.5.3 接触法与液浸法的特点比较	93	第5章 锻件、铸件、粉末冶金制件检测	142
3.6 声速与厚度的测量	94	5.1 锻件检测	142
3.6.1 声速的测量	94	5.1.1 常见锻件类型	142
3.6.2 厚度的测量	96	5.1.2 锻件中的常见缺陷	142
*3.7 其他检测技术	97	5.1.3 锻件超声检测的特点	143
3.7.1 爬波检测技术	97	5.1.4 常见类型锻件的超声检测	144
3.7.2 衍射声时 (TOFD) 技术	98	5.2 铸件检测	148
3.7.3 超声相控阵扫描检测技术	99	5.2.1 铸件的特点及常见缺陷	148
复习题	101	5.2.2 铸件超声检测特点	149
第4章 超声检测通用技术	102	5.2.3 铸件超声检测常用技术	149
4.1 检测面的选择和准备	102	*5.3 粉末冶金制件检测	150
4.2 仪器和探头的选择	103	5.3.1 粉末冶金制件中常见缺陷	151
4.2.1 仪器的选择	103	5.3.2 粉末高温合金涡轮盘 超声检测	152
4.2.2 探头的选择	103	5.3.3 钨棒超声检测	156
4.3 耦合剂的选用	106	复习题	157
4.4 直射声束纵波检测技术	106	第6章 棒材、板材和管材检测	159
4.4.1 检测仪的调整	106	6.1 棒材检测	159
4.4.2 检验	116	6.1.1 棒材的特点	159
4.4.3 缺陷的评定	119	6.1.2 棒材超声检测常用技术	159

6.2 板材检测	163	*第 8 章 复合材料与胶接结构检测	206
6.2.1 板材类型及常见缺陷	163	8.1 复合材料检测	206
6.2.2 板材超声检测常用技术	164	8.1.1 复合材料类型及特点	206
6.3 管材检测	172	8.1.2 复合材料超声检测常用技术	208
6.3.1 管材的类型	172	8.2 胶接结构检测	214
6.3.2 管材超声检测常用技术	173	8.2.1 胶接结构类型及特点	214
复习题	181	8.2.2 胶接结构超声检测常用技术	215
第 7 章 焊接接头检测	183	复习题	217
7.1 焊接接头类型及特点	183	第 9 章 超声检测标准、规程与质量控制	218
7.1.1 焊接加工	183	9.1 超声检测标准	218
7.1.2 焊接接头中常见缺陷	185	9.1.1 超声检测标准的用途和分类	218
7.2 中厚板对接焊缝检测	186	*9.1.2 国防工业相关超声检测 标准简介	219
7.2.1 检测条件的选择	186	9.1.3 超声检测方法标准的主要 内容	223
7.2.2 检测仪器的调整	189	9.1.4 超声检测验收标准的形式、 内容及验收评定	224
7.2.3 扫查方式	192	9.2 超声检测规程与工艺卡	226
7.2.4 缺陷的评定	193	9.2.1 检测规程与工艺卡编制的 一般要求	226
*7.2.5 缺陷性质的估判与非缺陷 回波的判别	195	9.2.2 检测工艺卡示例	228
7.3 T 形焊缝和管座角焊缝检测	198	*9.3 超声检测质量控制	232
7.3.1 T 形焊缝	198	9.3.1 超声检测质量控制的目的	232
7.3.2 管座角焊缝	200	9.3.2 超声检测质量控制的要素	233
*7.4 奥氏体不锈钢焊缝检测	202	复习题	235
7.4.1 奥氏体不锈钢焊缝组织特点	202	参考文献	236
7.4.2 检测条件的选择	203		
7.4.3 仪器的调整与焊缝的检测	203		
复习题	204		

绪 论

超声检测是应用最广泛的无损检测方法之一。超声检测方法利用进入被检材料的超声波对材料表面与内部缺陷进行检测。利用超声波进行材料厚度的测量也是常规超声检测的一个重要方面。此外，作为超声检测技术的特殊应用，超声波还用于材料内部组织和特性的表征以及应力的测量。

0.1 超声检测发展简史

利用超声波来进行无损检测始于 20 世纪 30 年代。1929 年，前苏联 Sokolov 首先提出了用超声波探查金属物体内部缺陷的建议。几年以后，在 1935 年，他又发表了用穿透法进行试验的一些结果，并申请了关于材料中缺陷检测的专利。根据 Sokolov 的试验装置的原理制成的第一种穿透法检测仪器，是在第二次大战后出现在市场上的。由于这种设备是利用穿过物体的透射声能进行检测，因此需要把发射和接收换能器置于试件相对两侧并始终保持其对应关系，同时，对缺陷检测灵敏度也较低，使其应用范围受到极大的限制。不久，这种仪器就被淘汰了。

超声检测技术得以广泛应用，应归功于脉冲回波式超声检测仪的出现。20 世纪 40 年代，美国的 Firestone 首次介绍了脉冲回波式超声检测仪，并申请了该仪器的专利。利用该技术，超声波可从物体的一面发射并接收，且能够检测小缺陷，较准确地确定其位置及深度，评定其尺寸。随后，由美国和英国开发出了 A 型脉冲回波式超声检测仪，并逐步用于锻钢和厚钢板的探伤。20 世纪 60 年代，超声检测仪在灵敏度、分辨力和放大器线性等主要性能上取得了突破性进展，焊缝探伤问题得到了很好的解决。脉冲回波技术至今仍是通用性最好、使用最广泛的一种超声检测技术。在此基础上，超声检测发展为一个有效而可靠的无损检测手段，并得到了广泛的工业应用。

随着工业生产对检测效率和检测可靠性要求的不断提高，人们要求超声检测更加快速，缺陷的显示更加直观，对缺陷的描述更加准确。因此，原有的以 A 型显示手工操作为主的检测方式不再能够满足要求。20 世纪 80 年代以来，对于规则的板、棒类等大批量生产的产品，逐渐发展了自动检测系统，配备了自动报警、记录等装置，发展了 B 型显示和 C 型显示。与此同时，对缺陷的定性定量评价的研究得到了较大的进展，利用超声波技术进行材料特性评价也成为了重要的研究方向。

随着电子技术和计算机技术的发展，超声检测设备不断向小型化、智能化方向改进，形成了适应不同用途的多种超声检测仪器，并于 20 世纪 80 年代末出现了数字式超声仪器。目前，数字式仪器已日益成熟，正逐渐取代模拟式仪器成为主流产品。

0.2 超声检测原理

利用超声波对材料中的宏观缺陷进行探测,依据的是超声波在材料中传播时的一些特性,如:声波在通过材料时能量会有损失,在遇到两种介质的分界面时,会发生反射等等,常用的频率为 $0.5\sim 25\text{MHz}$ 。其主要过程由这样几部分组成:

- ① 用某种方式向被检测的试件中引入或激励超声波;
- ② 超声波在试件中传播并与试件材料和其中的物体相互作用,使其传播方向或特征被改变;
- ③ 改变后的超声波又通过检测设备被检测到,并可对其进行处理与分析;
- ④ 根据接收的超声波的特征,评估试件本身及其内部存在的缺陷的特性。

以脉冲反射技术为例,由声源产生的脉冲波被引入被检测的试件中后,若材料是均质的,则声波沿一定的方向,以恒定的速度向前传播。当遇到两侧声阻抗有差异的界面时,则部分声能被反射。这种界面可能是材料中某种缺陷(不连续),如裂纹、分层、孔洞等,也可能是试件的外表面与空气或水的界面。反射的程度取决于界面两侧声阻抗差异的大小,在金属与气体的界面上几乎全部反射。通过检测和分析反射脉冲信号的幅度、位置等信息,可以确定缺陷的存在,评估其大小、位置。通过测量入射声波和接收声波之间声传播的时间可以得知反射点距入射点的距离。

通常用以发现缺陷并对缺陷进行评估的基本信息为:

- ① 来自材料内部各种不连续的反射信号的存在及其幅度;
- ② 入射信号与接收信号之间的声传播时间;
- ③ 声波通过材料以后能量的衰减。

0.3 超声检测的优点与局限性

1. 优点

与其它无损检测方法相比,超声检测方法的主要优点有:

- ① 适用于金属、非金属、复合材料等多种材料制件的无损评价;
- ② 穿透能力强,可对较大厚度范围的试件内部缺陷进行检测,可进行整个试件体积的扫查。如对金属材料,可检测厚度 $1\sim 2\text{mm}$ 的薄壁管材和板材,也可检测几米长的钢锻件;

- ③ 灵敏度高,可检测材料内部尺寸很小的缺陷;
- ④ 可较准确地测定缺陷的深度位置,这在许多情况下是十分需要的;
- ⑤ 对大多数超声技术的应用来说,仅需从一侧接近试件;
- ⑥ 设备轻便,对人体及环境无害,可作现场检测。

2. 局限性

超声检测的主要局限性是:

- ① 由于纵波脉冲反射法存在的盲区,和缺陷取向对检测灵敏度的影响,对位于表面

和非常近表面的某些缺陷常常难于检测；

② 试件形状的复杂性，如小尺寸、不规则形状、粗糙表面、小曲率半径等，对超声检测的可实施性有较大影响；

③ 材料的某些内部结构，如晶粒度、相组成、非均匀性、非致密性等，会使缺陷检测的灵敏度和信噪比变差；

④ 对材料及制件中的缺陷作定性、定量表征，常常是不准确的，需要检验者丰富的经验；

⑤ 以常用的压电换能器为声源时，为使超声波有效地进入试件，一般需要有耦合剂。

0.4 超声检测的适用范围

超声检测的适用范围非常广，从检测对象的材料来说，可用于各种金属材料和非金属材料；从检测对象的制造工艺来说，可以是锻件、铸件、焊接件、胶接件、复合材料构件等；从检测对象的形状来说，可以是板材、棒材、管材等；从检测对象的尺寸来说，厚度可小至 1mm，也可大至几米；从缺陷的特点来说，既可以是表面缺陷，也可以是内部缺陷。

在国防工业各领域中，超声检测均为常用的无损检测手段。超声检测在国防工业各行业中的典型应用见下表。

超声检测在国防工业各行业中的典型应用

行 业	典 型 应 用
航空	发动机中的涡轮盘、压气机盘、涡轮轴、环形锻件的缺陷检测；飞机结构用模锻件的缺陷检测；高温合金、钛合金、铝合金及钢的棒材、管材、板材的缺陷检测；空心涡轮叶片壁厚的测量；碳纤维或玻璃纤维增强复合材料构件的缺陷检测；蜂窝胶接结构胶接质量的检测等
航天	液体发动机金属构件缺陷的检测；固体发动机质量的检测；碳纤维或玻璃纤维增强复合材料构件的缺陷检测；蜂窝胶接结构胶接质量的检测；防热等功能复合材料构件的检测等
兵器	火炮身管、弹体缺陷的检测，坦克、战车等运载装备的结构件检测等
船舶	大型钢锻件的缺陷检测；钢板、钢焊缝的缺陷检测；复合板材结合质量的检测；各种传输轴、螺旋桨的缺陷检测等
核工业	大厚度奥氏体焊缝的缺陷检测；小直径管材的缺陷检测等

第 1 章 超声检测的物理基础

超声波是一种机械波，是机械振动在介质中的传播。了解超声波本身的性质，及其在传播过程中、在与物质相互作用中的行为特征，对于正确应用超声检测技术，保证检测目的的实现，解释检测结果是十分必要的。本章将针对与超声检测技术相关的物理概念、物理原理进行阐述，以作为学习超声检测技术的理论基础。

1.1 机械振动与机械波

1.1.1 机械振动

1. 机械振动与谐振动

了解超声波首先要从机械振动开始。所谓机械振动，是指质点在平衡位置附近作往复的运动。日常生活中常见的钟摆的摆动，汽缸中活塞的运动，走在铁索桥上时桥的颤动，都是机械振动的例子。

图 1-1 所示为质点-弹簧系统的机械振动过程。当质点受到向下的拉力而离开其平衡位置以后，放开质点，则质点受到弹簧给予的向平衡位置回复的拉力而向平衡位置运动，这个力的大小与质点离开平衡位置的距离（位移）成正比，方向指向平衡位置。到达平衡位置以后，其已具有的速度使其继续向上运动，同时，由于受到弹簧所给的指向平衡位置的力而使速度减慢直至到达最高点。此时，质点又在弹簧恢复力的作用下，向下作上述相同的运动直至到达最低点。如此，质点回到了其初始状态，又将重复上述的整个运动过程。质点的这种运动即为典型的机械振动。

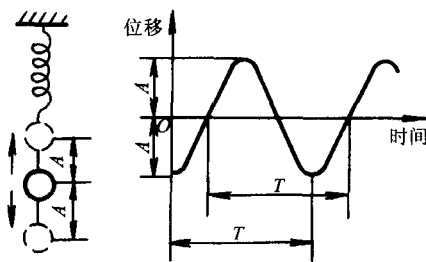


图1-1 质点-弹簧系统的机械振动

周期和频率是描述振动的重要的物理量。振动质点完成一次围绕平衡位置往复运动的过程所需要的时间称为周期，以 T 表示（见图 1-1），单位为 s （秒）或 μs （微秒）。而单位时间内振动的次数（周期数）则称为频率，以 f 表示，常用单位为 Hz （赫兹）。显然，周期与频率存在如下的关系：

$$T = \frac{1}{f} \quad (1-1)$$

描述一个振动仅以周期和频率两个概念是不够的，通常，还需要给出位移随时间的变化规律。如图 1-1 所示，当忽略空气阻力时，质点和弹簧系统自由振动的位移随时间

的变化满足余弦规律，其数学表达式为：

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-2)$$

式中 y —— 任意时刻的位移；

A —— 振幅， y 的最大值；

t —— 时间；

$(\omega t + \varphi)$ —— 相位角，其中 ω 为角频率， φ 为初始相位角 ($t=0$ 时的相位)。

人们将位移随时间的变化符合余弦规律的振动形式称为谐振动。谐振动的振幅和频率始终保持不变，因而是最简单最基本的一种振动。在上述质点和弹簧系统中，谐振动的频率为振动系统的固有频率，是由质点的质量和弹簧的弹性系数决定的。任何复杂的振动都可以视为多个谐振动的合成。研究谐振动的规律，可以帮助人们分析和理解各种复杂的振动。

*2. 阻尼振动和受迫振动

谐振动是一种理想状态下的振动。实际存在的振动形式，更多的是阻尼振动与受迫振动。

阻尼振动是一种振幅和能量随时间不断减少的振动形式。还以加载弹簧为例，在振动过程中，不可避免地会受到空气的阻力，为了克服阻力，质点振动的能量会不断地减少。其位移与时间的关系如图 1-2 所示。在超声波探头中，为了使晶片振动尽快停止，减小超声脉冲的宽度，通常在晶片后粘贴阻尼块以增大振动阻力。

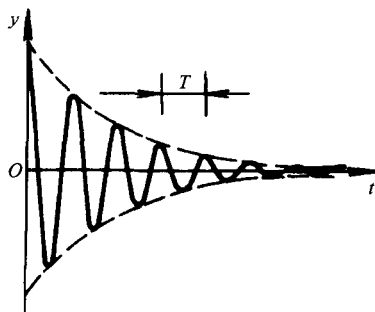


图1-2 阻尼振动

受迫振动是在周期性外力作用下物体所产生的振动。与物体的自由振动不同，受迫

振动的频率取决于外力作用的频率，外力的频率与物体的固有频率越接近，振动的幅度越大，两者相等时，振幅达到最大值，这种现象称为共振。

超声波探头中压电晶片在发射与接收超声波时，既经历了受迫振动又经历了阻尼振动。在发射超声波时，首先在高频电脉冲作用下产生受迫振动，同时，又在阻尼块的影响下作阻尼振动。而在接收超声波时，也是这样，既在回波作用下产生受迫振动，同时也产生阻尼振动。高频电脉冲和回波的频率与晶片固有频率越接近，则电声和声电转换效率就越高。由此，可以看出，超声检测仪的发射脉冲频谱，探头晶片的固有频率，探头的阻尼特性，均会对发射超声波的能量、频谱特性，以及接收的回波的特性产生影响。

1.1.2 机械波

1. 机械波

机械波是机械振动在弹性介质中的传播。产生机械波的首要条件是要有一个产生机械振动的波源，也就是说，要提供一个力使质点在其平衡位置附近作往复运动；第二个

条件是，要有能传播振动的弹性介质。

所谓弹性介质可以用图 1-3 所示的简化模型来表示，将其看作由以弹性力保持平衡的各质点所构成的点阵。当弹性介质中的质点在外力作用下离开其平衡位置时，由于组成物体的各质点间弹性力的作用，使其受到向其平衡位置回复的力，这种力使质点作围绕其平衡位置的振动。同时，该质点向其周围相邻质点施加相反的力，使其离开平衡位置作相同的运动，以这样的方式，振动由振源不断向远处传播，形成机械波。

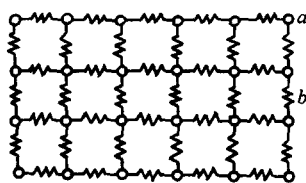


图1-3 弹性介质的模型

a—质点 b—表示弹性的弹簧

液体和气体不能以上述弹性力的模型来描述。液体和气体介质中的弹性波是由液体和气体受到压力时的体积的收缩和膨胀产生的。

在波的传播过程中，介质中的质点并不随波前进，它们在相邻质点所施加的力的作用下，按照与振源相同的振动频率在原来的位置上振动，并将能量传递给周围的质点。因此，机械波的传播不是物质的传播，而是能量的传播。

*2. 波动方程

当振源作谐振动时，所产生的波是最简单最基本的波。假设振动是在各向同性的、无吸收的均匀介质中传播，设谐振动的初始相位角 $\varphi=0$ ，可用下列波动方程来描述介质中任一点在任一时刻的位移：

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = A \cos (\omega t - Kx) \quad (1-3)$$

式中 y —— 介质中任一点在任一时刻的位移；

A —— 振幅， y 的最大值；

ω —— 角频率；

c —— 波速；

K —— 波数， $K = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$ ；

x —— 任一点距波源的距离。

上式中 $\frac{x}{c}$ 代表了波传播到 x 距离时，质点起始振动时间相对于波源的延迟， Kx 相当于距离 x 的质点相对于波源振动相位的延迟。其中包含的波速 c ，是波传播的速度，也就是单位时间内同一振动相位传播的距离，因此，波速 c 也称为相位速度。

3. 机械波的主要特征量

描述机械波的主要特征量有周期、频率、波长和波速。

机械波的周期和频率即波动经过的介质质点产生机械振动的周期和频率。机械波在传播过程中，其周期和频率始终是不变的。