建筑工程质量控制丛书

# 超声波在混凝土质量检测中的应用

张治泰
邱　平　编著

化学工业出版社

建筑工程质量控制丛书

# 超声波在混凝土质量检测中的应用

张治泰
邱　平　编著

化学工业出版社
·北京·

本书为《建筑工程质量控制丛书》的一个分册。

本书系统介绍了超声波在混凝土质量检测技术中的应用。内容包括：超声波基础知识、超声波检测设备技术要求、声学参数测量方法、混凝土强度超声回弹综合检测技术、混凝土缺陷超声波检测技术、检测报告等。全书内容密切结合混凝土工程检测实际，针对不同检测内容列举了许多典型工程检测实例。

本书可作为混凝土质量检测人员的培训教材，也可供建筑设计、施工、监理、检测人员以及高等院校有关专业师生参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

超声波在混凝土质量检测中的应用/张治泰，邱平编著. —北京：化学工业出版社，2006.5
（建筑工程质量控制丛书）
ISBN 7-5025-8599-0

Ⅰ.超… Ⅱ.①张…②邱… Ⅲ.超声波-应用-混凝土-产品质量-检测 Ⅳ.TU528.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 040780 号

建筑工程质量控制丛书
**超声波在混凝土质量检测中的应用**
张治泰 邱 平 编著
责任编辑：郭乃铎 马燕珠
文字编辑：汲永臻
责任校对：李 林
封面设计：于 兵
*
化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）
购书咨询：(010)64982530
(010)64918013
购书传真：(010)64982630
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 720mm×1000mm 1/16 印张 14¾ 字数 257 千字
2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-8599-0
定 价：48.00 元

**版权所有 违者必究**
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

**邱平** 男，1940年8月20日出生。中国建筑科学研究院高级工程师。曾从事建筑结构预应力工艺施工技术研究与新技术推广应用。参加结构改革课题研究与推广应用，曾获得全国科学大会奖。后从事结构混凝土无损检测技术研究相关工作。主、修编《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》[CECS 02: 88（2005）]、《回弹法检测高强混凝土强度技术规程》（Q/JY 17-2000)、《回弹法、超声回弹综合法检测泵送混凝土强度技术规程(DBJ/T01-78-2003）等多项技术规程。参加“北京地区测强曲线制订与研究”、“混凝土缺陷检测技术研究”等多项科研工作，并获建设部1985年科技进步三等奖；负责完成建设部“八五”科技项目《混凝土缺陷显示及定量分析研究》，该课题达到国际先进水平并获中国建筑科学研究院2000年科技进步三等奖。曾参加亚运会工程13个体育场馆网架焊接质量、西客站45米预应力钢桁架焊接质量、长江三峡13#、15#泄洪坝坝体混凝土质量等多项重点项目的质量检测工作。并应外交部邀请参加了中国驻保加利亚大使馆、中国驻西萨摩亚大使馆、中国驻美国大使馆、中国驻委内瑞拉大使馆、格林纳达国家体育场等工程的质量检测工作。发表论文三十余篇，组织编写书籍四部。

**张治泰** 男，1939年6月出生。陕西省建筑科学研究院高级工程师。1965年开始从事混凝土质量非破损检测技术的研究与应用。参加或负责完成的科研成果有：《混凝土回弹仪性能研究》、《回弹法检测混凝土强度主要影响因素研究》、《综合法检测混凝土强度主要影响因素研究》、《砂浆声速法检测混凝土强度研究》、《超声波检测结构混凝土缺陷研究》等。主编了陕西省标准《综合法检测混凝土强度技术规程》（DBJ-24-7）、负责编写并修订了中国工程建设标准化协会标准《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21）、参加编写并修订了《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》（CECS 02）。先后参加编写了《混凝土无损检测技术》、《新编混凝土（应用新规范）无损检测技术》、《混凝土无损检测技术手册》等著作。发表论文数十篇。先后参加或负责检测鉴定了新疆红雁池电厂、陕西秦岭电厂、葛洲坝水利工程、洛阳玻璃厂、青海大通桥头电厂、秦兵马俑二号坑等数百个重要工程。

# 丛书编委会名单


**主　任**　姚　燕　中国建筑材料科学研究院院长、教授级高级工程师、博士生导师，中国建筑材料工业协会副会长，中国混凝土外加剂协会会长、中国水泥制品工业协会副会长、中国硅酸盐学会水泥分会主任、中国水泥协会副会长、中国建筑学会建材分会副主任

**副主任**　韩素芳　中国建筑科学研究院教授级高级工程师，中国土木工程学会混凝土质量专业委员会主任委员

王铁梦　冶金建筑研究总院原副院长兼上海分院总工程师、教授级高级工程师、博士生导师，国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心技术顾问

陈龙珠　上海交通大学教授、博士生导师，安全与防灾工程研究所所长，建设部桩基动测单位资质评审专家委员会委员

王　玲　中国建筑材料科学研究院高级工程师，中国混凝土外加剂协会秘书长，中国土木工程学会外加剂专业委员会副主任，中国建筑学会建材分会外加剂应用技术委员会副主任

**委　员**（按姓氏笔画排序）

王　玲

王铁梦

邱　平　中国建筑科学研究院、国家建筑工程质量监督检验中心高级工程师

沈荣熹　中国建筑材料科学研究院水泥新材料研究所顾问、教授级高级工程师

张荣成　中国建筑科学研究院、国家建筑工程质量监督检验中心教授级高级工程师

张树凯　原建材局生产司司长、中国水泥制品工业协会名誉会长、高级工程师

陈龙珠

陈拴发　长安大学公路学院教授

岳跃真　中国水利水电科学研究院结构材料所副总工程师、教授级高级工程师

周德源　同济大学土木工程学院教授、博士生导师

胡曙光　武汉理工大学教授、武汉市副市长

姜　红　国家建筑工程质量监督检验中心常务副主任、中国建筑科学研究院建筑工程检测中心主任、教授级高级工程师

姚　燕

崔庆怡　陕西建筑科学研究院顾问、教授级高级工程师

隋同波　中国建筑材料科学研究院院长助理、所长、教授级高级工程师、博士生导师，中国硅酸盐学会水泥分会秘书长

韩素芳

韩继云　中国建筑科学研究院、国家建筑工程质量监督检验中心研究员、一级注册结构师

# 出版者的话

混凝土具有强度高、耐久性好、原料来源广、制作工艺简单、成本较低、适用于各种自然环境等优点，因此，它是世界上使用量最大、最为广泛的工程材料。近年来，随着工程技术的不断更新，混凝土的组成及施工工艺也发生了巨大变化，混凝土结构的研发与创新；新材料、新工艺、新技术的开发应用，典型工程的创新应用等均取得了长足的进步，建造了许多举世瞩目的工程项目。为了及时总结推广和应用混凝土的新技术、新工艺、新材料，总结在混凝土研究开发方面的创新，以期能进一步促进对混凝土的科学研究和技术发展，我们特邀请了中国建筑材料科学研究院、中国建筑科学研究院、原冶金部建筑科学研究总院、上海交通大学等有关科研院所和企业的专家、教授编写了《混凝土技术丛书》、《建筑工程质量控制丛书》。

这两套丛书总结和反映了国内外有关混凝土研究、开发、应用的最新技术、最新进展，书中有不少数据与理论是作者的长期实践经验与总结，这些资料非常宝贵，有的是第一次公开出版，有非常重要的参考价值。这两套丛书是从事土木与水利工程的地质勘探、结构设计、施工技术、质量检测和监理等科研院所人员和工程技术人员自学提高的参考书，同时也可作为继续教育的培训用书及相关院校师生的参考书。

我们真诚地欢迎读者和用户对本丛书提出宝贵的意见和建议，以便在再版时不断使其得到改进和完善。

化学工业出版社

2005 年 11 月

# 序

建筑工程是一种特殊的产品，其特殊性就在于它具有一次建造、长期使用和投资额巨大的特点，不但因环境复杂和建造工期长而具有建造风险，而且在使用过程中将涉及更多的人民生命和财产安全。“百年大计，质量第一”，其核心也就在于严把建造质量关，以保证建筑工程在今后长期使用过程中的安全可靠性。我国《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB 50068—2001）规定建筑结构必须满足如下安全可靠性要求：

（1）能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种作用；

（2）在正常使用时具有良好的工作性能；

（3）在正常维护条件下具有足够的耐久性；

（4）在偶然作用（如地震、爆炸、撞击等）发生时及发生后，结构仍能保持必要的整体稳定性。

为了确保建筑工程的质量，我国已经制定了一系列的政策法规和技术标准，建立了遍及全国的工程质量及建筑材料质量的检验机构，并逐步健全了相关的行政和企业管理体系，从而大大地提高了我国建筑工程的质量水平。但是，我们也应看到，由于我国正处于高速发展阶段，建筑工程规模急速增大，加上经济体制处于向多元化转变的过渡阶段，目前在技术和管理方面还存在一些问题，以至于工程质量事故一时仍难以杜绝。因此必须进一步加强对建造过程的质量控制和质量检验；加强工程验收时的质量检验，以及时发现质量隐患，及时治理，避免严重工程质量事故的发生。

针对国内建筑工程发展的形势和存在的问题，化学工业出版社组织国内具有丰富工程质量检验和控制实践的部分专家、学者编辑了这套《建筑工程质量控制丛书》，较为系统地阐述了混凝土结构施工质量控制、工程质量检测、裂缝和变形控制、建筑结构安全鉴定和加固、结构防灾和耐久性等方面的新方法和新技术，其目的就在于总结和宣传推广建筑工程质量检测的经验和技术。我相信，这套丛书的出版，对提高我国建筑工程的安全可靠性，必将具有很重要的促进作用。

**国家建筑工程质量监督检验中心主任**



**2006 年 3 月**

# 前　言

混凝土是当代建筑工程中最主要的结构材料之一，它的质量直接关系到建筑结构的安全性和耐久性，也是关系国家建设和社会经济发展的大事，与广大民众的工作生活息息相关，一直受到有关主管部门的高度重视。

我国《混凝土强度检验评定标准》和《混凝土结构工程施工及验收规范》中规定："当对混凝土试件强度的代表性有怀疑时，可用从结构中钻取试样的方法或采用非破损检验方法，按有关标准规定对结构或构件中混凝土的强度进行推定"。采用超声波检测混凝土强度和缺陷，是在不影响结构或构件受力性能或其它使用功能的前提下，直接进行检测并推定混凝土强度或评估混凝土缺陷，它既适用于在建工程施工过程中的混凝土质量监测，又适用于工程竣工验收和已建工程使用期间混凝土的质量鉴定。由于混凝土无损检测技术具有直接、快速、灵活、重复、可靠、经济等优点，已成为建筑工程中一项自成体系的测试技术，得到了日益广泛的应用。

由于超声波检测混凝土质量是一项技术性很强的工作，它涉及建筑结构、工程材料、声学、电子学和数理统计学等多学科领域，不是什么人拿着标准都能正确操作执行的。为了提高超声波检测混凝土质量的技术水平和检测人员素质，确保检测工作质量，我们根据《超声回弹综合法检测混凝土强度技术》（CECS 02：2005）和《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21：2000）的规定，参考国内外同行的宝贵资料并结合编者历年来的研究成果和实践经验，编写了《超声波在混凝土质量检测中的应用》一书。

本书除可作混凝土质量检测人员的培训教材外，还可供建筑工程质量管理、监督、监理人员以及高等院校有关专业师生参考。

本书第一章、第二章、第五章、第六章由张治泰（陕西省建筑科学研究院）编写；第三章、第四章、第七章由邱平（中国建筑科学研究院）编写。全书由张治泰校阅，邱平统稿。

本书在编写过程中得到有关单位和个人的大力支持和帮助，谨致由衷的谢意。书中不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编　者

2006 年 4 月

# 目　　录

**第一章　概述** …… 1
第一节　混凝土超声波检测技术发展概况 …… 1
第二节　超声波基础知识 …… 2
一、振动与波 …… 2
二、波的种类和形式 …… 4
三、波动方程 …… 7
四、声场 …… 9
五、超声波在媒质界面上的传播特性 …… 12
六、超声波传播过程中的能量衰减 …… 16
第三节　超声波检测混凝土质量的意义及特点 …… 18
一、超声波检测混凝土质量的意义 …… 18
二、混凝土超声波检测的特点 …… 19
思考题 …… 24
参考文献 …… 24
**第二章　混凝土超声波检测设备** …… 25
第一节　混凝土超声波检测仪 …… 25
一、混凝土超声波检测仪的发展概况 …… 25
二、超声波检测仪的分类及其基本原理 …… 26
三、超声波检测仪的技术性能 …… 31
四、超声波检测仪的检定 …… 34
五、超声波检测仪的维护与保养 …… 37
第二节　超声波换能器 …… 37
一、基本概念 …… 37
二、压电效应 …… 38
三、压电体的制作及主要技术参数 …… 39
四、超声波换能器的分类与选用 …… 40
五、混凝土超声波换能器的检验和保养 …… 45
思考题 …… 53
参考文献 …… 54

**第三章　混凝土声学参数测量** …… 55
第一节　声时测量 …… 55
一、采用模拟式超声波检测仪进行声时测量 …… 55
二、采用数字式超声波检测仪进行声时测量 …… 56
三、声时初读数的扣除方法 …… 57
第二节　波幅测量 …… 58
一、采用模拟式超声波检测仪进行波幅测量 …… 58
二、采用数字式超声波检测仪进行波幅测量 …… 59
第三节　主频率测量 …… 59
一、采用模拟式超声波检测仪进行主频率测量 …… 60
二、采用数字式超声波检测仪进行主频率测量 …… 60
第四节　超声测试距离测量 …… 61
一、超声对测时的测距测量 …… 61
二、超声角测或斜测时的测距测量 …… 62
三、超声平测时的测距测量 …… 63
思考题 …… 63
参考文献 …… 64
**第四章　超声波检测混凝土强度** …… 65
第一节　概述 …… 65
一、超声波检测混凝土强度基本概念 …… 65
二、超声波检测混凝土强度基本原理 …… 65
三、超声波检测混凝土强度的主要影响因素 …… 67
第二节　超声法检测混凝土强度 …… 74
一、混凝土声速法 …… 74
二、浆体声速法 …… 74
第三节　超声回弹综合法检测混凝土强度 …… 78
一、超声回弹综合法检测混凝土强度基本原理及其特点 …… 78
二、综合法测量仪器的技术要求 …… 81
三、超声回弹综合法测强曲线的制订 …… 83
四、现场测试步骤 …… 89
五、检测实例 …… 95
第四节　超声回弹综合法检测高强混凝土强度 …… 108
一、高强混凝土定义与现状 …… 108
二、高强混凝土回弹仪技术要求 …… 110

三、高强混凝土强度检测与推定…… 111
四、检测实例…… 111
思考题…… 112
参考文献…… 112
**第五章　超声波检测混凝土缺陷**…… 113
第一节　概述…… 113
一、超声波检测混凝土缺陷基本概念…… 113
二、超声波检测混凝土缺陷基本原理…… 114
三、混凝土缺陷检测的意义…… 114
四、超声波检测混凝土缺陷基本方法…… 115
五、超声波检测混凝土缺陷的主要影响因素…… 116
第二节　混凝土裂缝深度检测…… 119
一、单面平测法…… 119
二、双面斜测法…… 126
三、钻孔对测法…… 128
四、裂缝深度检测实例…… 131
第三节　不密实区和孔洞检测…… 137
一、概念及适应范围…… 137
二、测试方法…… 138
三、数据处理及判断…… 142
四、检测实例…… 146
第四节　混凝土结合面质量检测…… 152
一、定义及检测前的准备…… 152
二、测试方法…… 153
三、数据处理及判断…… 154
四、检测实例…… 154
第五节　混凝土损伤层检测…… 157
一、概念和基本原理…… 157
二、测试方法…… 160
三、数据处理及判断…… 161
四、检测实例…… 162
第六节　钢管混凝土缺陷检测…… 165
一、概述…… 165
二、测试方法…… 166

三、数据分析与判断…… 170
四、检测实例…… 171
第七节　预应力混凝土预留孔道灌浆饱满情况检测…… 173
一、概述…… 173
二、孔道灌浆质量超声波检测的模拟试验…… 174
三、检测实例…… 176
第八节　混凝土匀质性检测…… 177
一、概念…… 177
二、测试方法…… 177
三、计算和分析…… 178
思考题…… 179
参考文献…… 180
**第六章　超声波检测混凝土灌注桩完整性**…… 181
一、基本情况…… 181
二、超声波检测灌注桩的方法…… 182
三、数据处理与异常值判断…… 188
思考题…… 209
参考文献…… 209
**第七章　检验报告**…… 210
第一节　混凝土强度检验报告…… 210
第二节　混凝土缺陷检验报告…… 212
附录一　混凝土强度检验报告示例…… 213
附录二　混凝土缺陷检验报告示例…… 218
思考题…… 222
参考文献…… 222

# 第一章 概述

## 第一节 混凝土超声波检测技术发展概况

混凝土质量超声检测技术是建设工程无损检测技术领域中的重要方面。超声脉冲技术用于结构混凝土质量检测的历史虽不如金属超声探伤长，但应工程建设的需求，发展速度相当迅速。1928 年世界上研制出了第一台连续波的超声波材料探测仪，20 世纪 30 年代初期有人开始用超声脉冲波进行金属探伤，也有学者用敲击产生振动，测量声波在混凝土中的传播情况，粗略评价混凝土质量。直到 40 年代末 50 年代初，加拿大、德国和英国一些学者首先将超声脉冲技术应用于混凝土质量检测，开创了超声波检测混凝土质量这一新领域。当时由于受仪器灵敏度低、分辨率差的限制，加上超声波检测混凝土的影响因素尚未弄清楚，因此难以普遍用于工程实测。自 70 年代末，随着电子技术迅速发展，超声波检测仪器不断改进和完善，测试技术不断提高，混凝土超声波检测技术发展很快。检测仪器由笨重的电子管单示波显示型发展到小巧轻便的集成化、智能化多功能型，测量参数由单一的声速发展到声速、波幅和频率等多参数。检测应用范围和技术深度不断扩大，从检测地面上部结构发展到地上地下结构都能检测，从一般构件的检测发展到各种结构和构件都检测；从单一检测强度发展到对混凝土强度、裂缝、孔洞、损伤层等全面检测。强度检测由定性地评估混凝土质量优劣发展到定量推定混凝土强度。缺陷检测由单一的大孔洞和浅裂缝检测发展到定量或半定量检测多种性质的缺陷。目前不少国家和国际学术组织先后制订了混凝土质量超声波检测的方法、规程或建议。

我国自 20 世纪 50 年代末 60 年代初开始这项技术的研究和应用。中国科学院水电研究所首先进行了应用超声脉冲波检测混凝土表面裂缝的尝试，全国也有不少单位先后开展了混凝土超声检测技术的研究和应用。尤其是 1976 年以来原国家建委组织了全国性课题协作组，对混凝土强度和缺陷超声检测技术进行了较

深入系统地研究，基本弄清了超声波检测混凝土质量的主要影响因素，协调统一了一些基本测试方法。到80年代初期，“超声波检测混凝土缺陷”、“超声波检测混凝土强度”、“超声回弹综合法检测混凝土强度”、“超声波检测灌注桩完整性”、“超声波检测钢管混凝土质量”等研究成果先后通过了技术鉴定。在检测技术深入研究的同时也推动了混凝土超声波检测仪器的开发和研制，从60年代末以来国内一些单位先后研制并批量生产的非金属超声波检测仪很多，如电子管式（CTS-10）；中小规模集成电路的单数字显示（JC-2）、示波数字双显示（SYC-2、SC-2、CTS-25）；数字式（CTS-35、2000A等）；智能式（NM系列、RS-STOIC、RSM-SY5等）。超声波换能器的研制开发也很快，从单一的平面式窄频带纵波换能器发展到能适应不同测试需要的多种类型换能器，如多种频率的平面振动式纵波、横波换能器、宽频带换能器和孔中测试的径向振动式换能器等。近十多年来，一些应用超声波检测混凝土质量的技术规程已先后颁布，使该项检测技术在建工、铁道、水电、交通、煤炭等系统得到广泛应用，其中《超声法检测混凝土缺陷技术规程》修订版已于2000年颁布，《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》修订版也于2005年颁布。这些检测规程的颁布实施，使该项技术实现规范化、标准化，进一步促进混凝土超声检测技术的发展。

## 第二节　超声波基础知识

### 一、振动与波

振动在物理学中的定义是：一个物理量的值在观测时间内不停地经过极大值和极小值而变化，这种变化状态称为振动。简单地说，振动就是媒质中的质点围绕其平衡位置做来回重复运动的过程。振动过程是自然界中十分普遍的一种现象，机械振动、电磁振荡、分子原子内部的振动等都是不同本质的振动现象。不同本质的振动过程有着不同的振动机理，电磁振荡是电场和磁场的相互作用，机械振动是一些机械力的作用。其中机械振动最直观，与人们生活最为密切，工程技术中应用最为广泛，用于混凝土质量检测的超声波就是机械振动在混凝土中传播的过程。

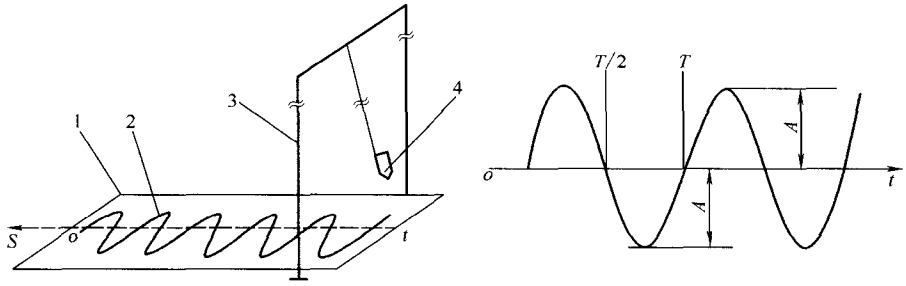
机械振动过程可以用数学函数的形式来表示，以 $y$ 代表振动量在任意时刻 $t$ 的数值，则 $y$ 为时间 $t$ 的函数：

$$y=f(t)$$

如果每间隔一个固定时间 $T$，振动量的变化就完全重复一次，这种振动称为

周期振动，而这段时间 $T$ 称为周期振动的周期。不同形式的周期函数，反映不同形式的周期振动，最简单的连续周期函数是正弦函数或余弦函数，按照这种函数而变化的振动，称为谐振动。

最直观的谐振动演示如图 1-1 所示。




(a) 单摆振动图线演示装置　　(b) 单摆振动随时间的位移曲线

图 1-1　简谐振动演示与振动位移曲线

1—硬纸板；2—绘出的曲线；3—支架；4—漏斗

图 1-1（a）是摆线长为 1.4m 的单摆振动位移随时间变化的演示装置。在支架 3 上吊着一个装有少许墨水的金属漏斗 4，在支架内侧平铺一张硬纸板 1，纸板上沿纵向画一中轴线 $o—t$，让漏斗沿支架平面（垂直于 $o—t$ 中轴线）作小角度摆动，并将墨水缓慢流下，同时拖动纸板沿箭头 $S$ 方向匀速移动，则漏斗流下的墨水在纸板上绘出一条曲线 2，该曲线便是简谐振动随时间变化的位移曲线，即正弦函数或余弦函数曲线［如图 1-1（b）所示］。虽然单摆的振动受到空气阻力和漏斗重力的影响，摆动幅度会逐渐减小，不过摆线较长且实验时间很短，幅度降低不明显。

由图 1-1（b）曲线看出，从平衡位置（$o—t$）向上振动至最大，然后回到平衡位置，所经历的时间为半个周期（$T/2$），继而向下振动至最大再回到 $o—t$ 位置，总共经历的时间即为一个振动周期（$T$），距离 $o—t$ 最大位置即为振幅（$A$），每秒振动的次数（或单位时间内的周期数）即为振动频率（$f$）。

一般多用余弦函数的形式来研究谐振动，其数学形式为：

$$y=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{1-1}$$

式中　$y$——振动位移；

$A$——振幅，是 $y$ 的最大值；

$\omega$——圆频率；

$\varphi$——初相位角。

由式（1-1）可以看出，一个谐振动完全由 $A$、$\omega$ 和 $\varphi$ 决定。圆频率 $\omega$ 与周期 $T$ 及振动频率 $f$ 存在如下关系：

$$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T} \tag{1-2}$$

因为（$\omega t+\varphi$）角决定了 $t$ 时刻的相位，所以称之为相位角，而 $\varphi$ 角是 $t=0$ 时的相位角，故称为初相位角。对于两个频率相同的谐振动来说，如果存在不同初相位角 $\varphi_1$、$\varphi_2$，它们就存在固定的相位差（$\varphi_1-\varphi_2$）/2π。对于两个不同频率（圆频率分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$）的谐振动，它们的相位差是：[($\omega_1-\omega_2$)$t$+($\varphi_1-\varphi_2$)]/2π，这个相位差并不固定，而是随时间 $t$ 在改变，表现为两个谐振动的步调时而同相、时而反相。

谐振动是很重要的一种振动，不但工程技术中经常遇到这种振动，而且所有的复杂振动都可以用谐振动作为基础来进行研究。

任何材料都是由众多质点组成，这些质点之间通过一定方式彼此联系着，在弹性材料中，这种联系具有弹性性质，在弹黏塑性材料中，这种联系则具有弹黏塑性性质。当材料中某一质点受到激励而产生振动时，必然将振动能量传递给周围质点，使其周围质点也产生振动。这种振动的传播过程称为波动。机械振动在媒质中的传播过程称为机械波或声波。

振动和波动是既有联系又有区别的运动形式，振动是波动产生的根源，波动是振动的传播过程。振动的质点，将其能量传递给相邻质点，引起相邻质点振动，如此由近及远地将振动能量传播出去，即为波动过程。就是说声波是质点振动能量的传播过程，并非质点本身的移动。

## 二、波的种类和形式

（1）根据质点振动方向与波的传播方向不同，可将机械波分为纵波、横波和表面波。

图 1-2 中的（a）、（b）、（c）分别为纵波、横波和表面波的质点振动与波的传播示意图。

① 纵波　质点振动方向与波的传播方向一致的波称为纵波。纵波的产生是由于媒质受到拉、压交变力的作用，其容积产生拉伸和压缩变形，使质点振动以疏密相间的形式向前传播，如图 1-2（a）所示。任何弹性媒质在其容积发生变化时，均能产生弹性力，在拉、压交变力作用下均能传播纵波。所以固体、液体和气体都能传播纵波。混凝土超声波检测中绝大多数用的是纵波，空气中传播的声波也都是纵波，最直观凭肉眼能观察到的纵波传播情况是，向大水池中丢一块石