

超声原理与应用

范百刚 编著

江苏科学技术出版社

超声原理与应用

范百刚 编著

出版：江苏科学技术出版社

发行：江苏省新华书店

印刷：江苏宜兴印刷厂

开本787×1092毫米 1/32 插页2 印张15.25 字数337,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数1—3,500册

书号：15196·153 定价：3.30元

责任编辑：高志一

序

超声技术发轫于本世纪初。随着材料科学、电子技术、信息科学及计算机科学的发展，它以一门崭新的技术出现于工业、农业、军事、医疗卫生以及自然科学的各个领域中，起着独特的作用，为人们所愈来愈重视。

大家都知道，超声是指频率高于人耳能听得见的频率范围(称为音频或声频)的声波(现在有人将虽在声频范围但其应用与人耳听觉无关的声波亦列入超声范畴)。声波是一种弹性波，在许多物质中均能传播，因此声波就成为传递物质内部信息的一种重要手段，且有许多独到之处。这一类应用又发展成为超声技术中的一个分支——检测超声。声波同时也是一种传递能量的重要途径，因此又可以作为工农业生产中进行加工处理以及医疗中临床诊断与治疗的有效手段。这一类应用技术称为功率超声。

虽然超声技术已获得广泛应用且卓著成效，但通俗而系统地介绍这方面知识的书籍却不多见，国内自己编写的则更少。这使人们不易了解这门新技术的重要性，也影响了它的推广和发展。因此，这本书的出版，是很必要、很及时的。作者从事声学研究工作多年，在声学及电子技术方面有着深厚

的基础与丰富的经验。他收集的材料十分丰富，而且反映了最近的发展，有些则是作者自己的心得。全书内容深入浅出，图文并茂，既便于初学者入门，亦有助于已从事这方面工作的同志继续深入，开阔眼界。

我相信，本书的问世，对发展我国超声技术的应用，使之成为四化作出贡献，一定会有所裨益。

吴文虬

1984年春节写于南京大学声学研究所

前 言

超声技术的应用,目前已推广到了科学技术的众多领域,希望对此有所了解的人也日益增多,因此有必要对这门技术的原理及众多应用择要作一比较浅近的介绍,本书即为此而作。

超声技术分大功率超声应用(利用其能量作清洗、乳化等工作)及小功率超声检测两部分,两者采用的技术有所不同。本书介绍小功率超声技术,包括超声传播和检测的基本原理、超声换能的原理、结构和测试,以及许多小功率超声的应用。

本书在叙述上力求突出现象的物理本质,必要时通过少量的运算得出明确的结论,对疑难处作重点阐述。选材以实用为主,对新技术也给予了应有的注意。

由于篇幅所限,许多较次的或不够成熟的应用项目没有列入本书,但他们的基本原理和实施技术与书中介绍的大体相同,故读者在了解本书内容以后,不难举一反三,触类旁通。

本书在写作过程中得到有关单位和同志的热情支持。南京市第二化工机械厂、无锡市超声波仪器厂、汕头超声电子仪器研究所、北京医用超声仪器厂、江苏省工人医院、江苏省中医院和南京市妇幼保健医院等单位给予了宝贵的帮助。冯若、曹水轩、张淑仪、章肖融和干昌明等同志分别审查了本书各章节。吴文虬所长为本书执笔作序。在此谨向他们致以忱挚的感谢。

范百刚

1984年2月写于南京大学声学研究所

目 录

第一章 超声波的性质和它的参数的测量

§1.1	引言	1
§1.2	振动与波	2
§1.3	超声波的类型	3
§1.4	位相、波阵面、相速度和群速度	7
§1.5	各种波的传播速度	11
§1.6	波的干涉	16
§1.7	超声场	22
§1.8	介质粒子的速度和加速度	27
§1.9	超声波的能量密度、强度、声强级、 声压级和声阻抗率	28
§1.10	声波在界面上的反射、折射和波型转换	33
§1.11	超声波的衍射	55
§1.12	超声波的散射	62
§1.13	超声波的衰减	64
§1.14	脉冲波	75
§1.15	多普勒效应	85
§1.16	超声空化	89
§1.17	超声波在流体中引起的流动	89
§1.18	声辐射压	91
§1.19	超声波参量的测定	93

第二章 超声波的发生

§2.1	压电式超声发生器	118
------	----------	-----

§2.2	磁致伸缩式超声发生器	190
§2.3	压电式和磁致伸缩式超声换能器 的电激励源和接收器	203
§2.4	流体超声发生器	214
§2.5	电磁感应方式超声发生装置	221

第三章 超声的应用

§3.1	概论	223
§3.2	超声探伤	224
§3.3	超声频谱法	294
§3.4	脉冲压缩技术	309
§3.5	相关技术	316
§3.6	声发射技术	334
§3.7	超声成像	358
§3.8	超声诊断	383
§3.9	超声测量物理量	432
§3.10	超声在江河湖海中的应用	460
附录	468

第一章 超声波的性质和它的 参数的测量

§1.1 引 言

我们生活在世界上，时时刻刻都有声音相伴随。一个人出世时哇哇坠地，一两岁时牙牙学语，上学了朗朗读书，参加工作了则更要与各种各样的声响打交道。

声音对于我们了解世界、改造世界是十分重要的。所以，从很古的时候起人们就开始研究声音了。在我国二千多年前战国时期鲁国人墨翟及其学派的著作《墨经》中，记载了声音沿地面传播的情形及利用共鸣现象探测地音的装置。这是世界上最早的有关“双耳效应”的记载。音律的产生和研究也很早，西周编钟的出土说明了我国是世界上最早采用十二音律的国家。

上述的声音都是人耳听得的声音。这种可闻声的振动频率大约在每秒16周到2万周之间。低于16周/秒的声波称为次声波，高于2万周/秒的称为超声波，有时还把十亿周/秒以上的声波称为特超声或微波超声。次声和超声人耳听不见，但却有许多动物能听见。如海洋风暴中含有次声，很多海洋动物能感受。狗能听见超声波，蝙蝠能发出超声再接收其回声，借以探路和捕食。深海中一片漆黑，鲸鱼、海豚等也用超声波来指路……等等。可见，次声波和超声波也是客观存在的自然现象。

由于人耳不能听到超声，所以人们研究它比较晚。直到本世纪生产和科学技术有了相当发展，对超声的研究和应用有了可能和需要之后，超声学才发展起来。超声具有许多独特的性质和优点，所以超声学的发展很迅速，现在超声的应用已遍及众多科技领域，并有广阔的发展前景。

§1.2 振动与波

有些机械运动每隔相等的时间间隔就重复一次，这就是周期运动。钟摆的运动、锣面的振动、心脏的跳动等都是周期运动的例子。它们的共同特征是物体的质点相对其平衡位置作来回位移，即振动。最大的位移称为振幅。每秒振动次数称为频率(f)，单位为周/秒即赫芝(Hz)。每振动一次所需时间称为周期(T)，单位为秒。显然

$$T = \frac{1}{f}$$

振动着的物体处在弹性介质中时，它的振动将传到介质中去。例如锣面受击发振，振向前时将空气分子挤紧，由于弹性和运动惯性，挤紧区内的分子会向前运动而将更前面的空气分子挤紧，所以稠密区会向前传播。当锣面振向后时，锣面前形成稀疏区，稀疏区前分子会向稀疏区膨胀而自身变稀，所以稀疏区也会向前传播。这样一来，当锣面振动时，在它周围空气中会产生疏密相间的区域并不断向外传播，这就形成了声波。参阅图1.2.1。这个例子的声波是纵波，一切介质中的纵波都是以类似方式形成的。纵波的特点是质点振动方向和波传播方向一致。图1.2.2为纵波示意图。两个相邻密区(或疏区)中心之间的距离称为波长，符号为 λ 。声速 c 与波长 λ 和频

率 f 之间的关系为 $c = \lambda f$

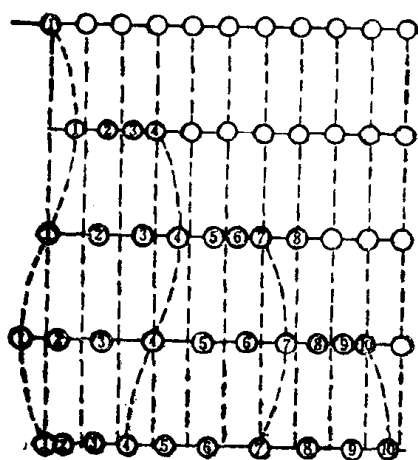


图1.2.1 纵波的传播过程

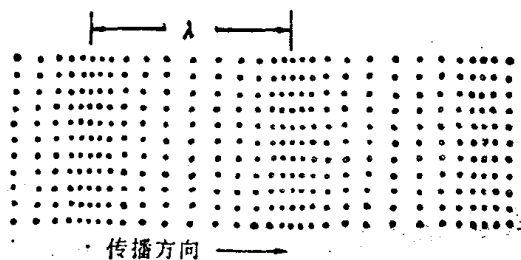


图1.2.2 纵 波

§1.3 超声波的类型

1. 纵波 已如上述。

2. 横波 质点振动方向和波的传播方向垂直,如图1.3.1所示。横波又名切变波。一般说来它只能在固体中传播。

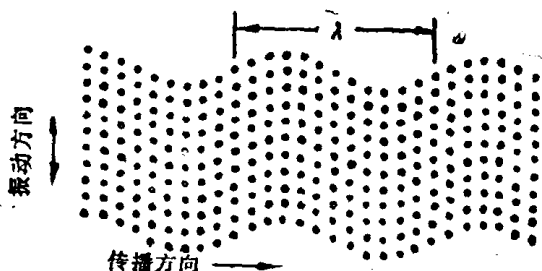


图1.3.1 横 波

有很多液体在高频周期性切变应力下表现有切变弹性。特别是高分子液体，它们在不太高的频率时就能表现出切变弹性，这是因为长链状分子在低频时尚能移动，高频时却只能在原地振动，因而具有切变弹性了。对一般液体，表现出切变弹性的频率如此之高，远远超出一般使用的超声频段，所以通常总是说液体中只能传播纵波（液体中衰减极快的切变粘滞波在§3.9之六中叙述）。

3. 表面波 亦称瑞利波，它沿固体表面传播，振幅随着深度的增加而迅速衰减，波的能量几乎集中在物体表层一个波长的深度内。表面波质点振动的轨迹是椭圆，椭圆的长轴垂直于波的传播方向，短轴平行于传播方向，如图1.3.2所示。

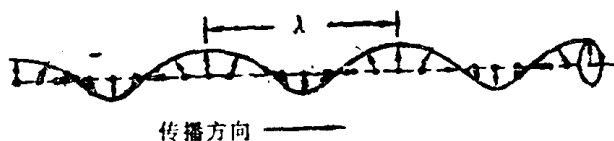


图1.3.2 表面波(瑞利波)

表面波可用于探伤及制作表面波器件（滤波器、延迟线……）等。表面波能量与深度的关系如图1.3.3所示。

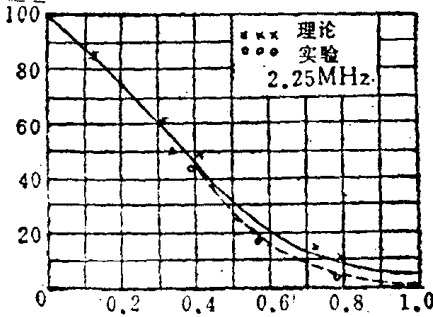


图1.3.3 表面波在铝中的衰减

4. 兰姆波 兰姆波只产生在厚度大约为一个声波波长的薄板内，在板的两表面和中心部都有质点的振动。波沿板的两表面和中部传播。薄板两表面的质点振动是纵波和横波分量之和，运动轨迹为椭圆，长轴与短轴之比取决于材料的性质。兰姆波可用于测量厚度、探测复合材料的粘合质量、探伤以及探测晶粒结构与材料热处理情况等。兰姆波根据两表面

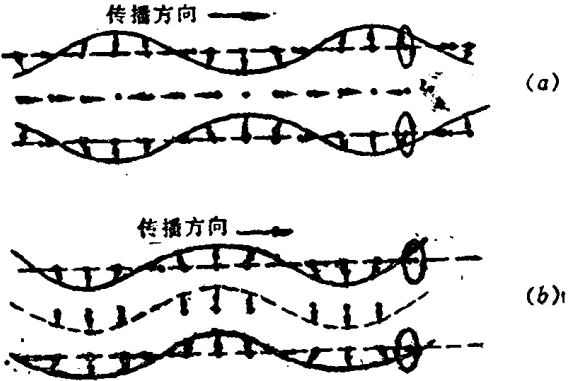


图1.3.4 兰姆波

质点的振动对板的中部是不是对称，分为对称型及非对称型两种，对称型兰姆波中，薄板两表面质点振动的位相相反(位相的概念以后要比较深入地讲，现在由图先知其大意)，在薄板的中部质点的振动方式和在纵波中时相同，见图1.3.4(a)；非对称型兰姆波中，薄板两表面质点的振动位相相同，在板的中部，质点的振动方式和在横波中一样，见图1.3.4(b)。对称型兰姆波又有零次阶(S_0)、一次阶(S_1)、二次阶(S_2)、... n次阶(S_n)之分。非对称型兰姆波也有零次阶(A_0)、一次阶(A_1)、二次阶(A_2)、...、n次阶(A_n)之分，图1.3.5表示 S_0 、

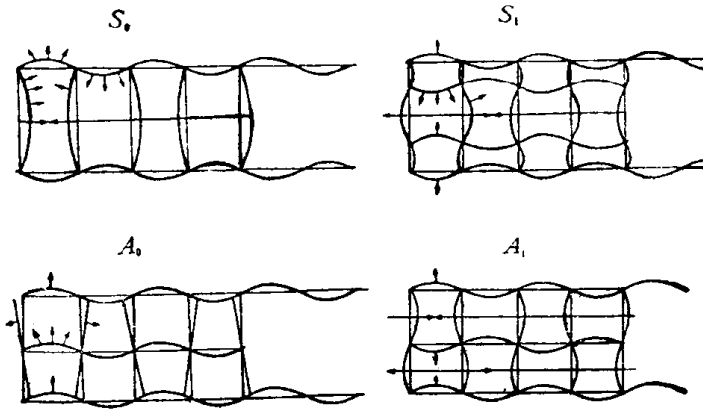


图1.3.5 板中对称(S)和非对称(A)兰姆波
振幅夸大显示

S_1 、 A_0 、 A_1 次阶兰姆波的相互关系。除了零阶波 A_0 外，其它模式都可用 S_0 模式化出。如 A_1 模式可认为是两个 S_0 模式叠加，相互间水平方向错开半波长， S_1 模式是三个 S_0 模式叠加等等。

5. 扭转波 扭转振动在介质中传播便为扭转波，质点的扭转振动所围绕的轴就是波的传播方向。沿此轴在介质中切

出一段圆柱，便可描绘出某一半径上介质质点作扭转振动的情况和振动的传播方式，见图1.3.6。传播扭转波的介质必须具有切变弹性，所以一般来说，扭转波只能在固体中传播。

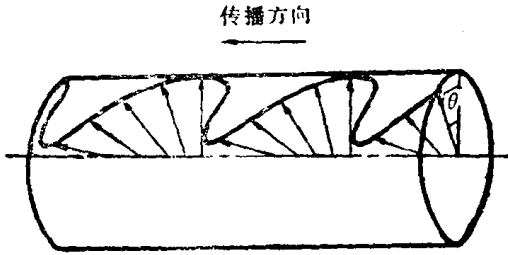


图1.3.6 扭转振动及传播方式示意

§1.4 位相、波阵面、相速度和群速度

位相这个概念，在讨论振动与波时是十分重要的，现用图1.3.1的横波来定性加以说明。由图可知沿波传播的方向上各个质点偏离其平衡位置的位移有所不同，呈周期性的变化，即位移 y 与最大位移即振幅 A 之比(y/A)值每隔一个周期重复变化一次，在一个周期之内此值由 $0 \rightarrow +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1 \rightarrow 0$ 循环一次，这个比值的变化反映所谓位相的变化，不同的比值对应于不同的位相。比值变化一周，我们就说振动的位相变化一周。介质的此一比值相同的相邻各质点的集合组成一个振动位相相同的面，称为波阵面。波阵面为平面的称为平面波；波阵面为柱面、球面的称为柱面波、球面波。

定量地描述我们常用正弦曲线来表示一种最简单的振动方式——简谐振动；

$$y = A \sin \phi$$

式中 A 为振幅, ϕ 就是位相角。它的图示见图 1.4.1。位相 ϕ 每

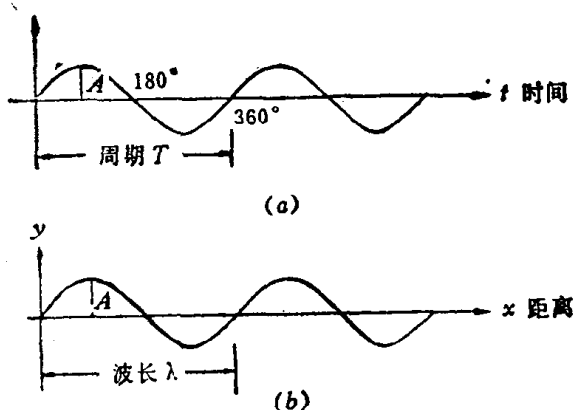


图 1.4.1 简谐振动与正弦波

经过 360° , y 就恢复到开始振动的状态。在某一定点, 例如 $x = 0$ 处, y 随时间变化的图解即图 1.4.1(a)。在某一瞬时 t , y 随传播距离而变化的图解即图 1.4.1(b)。由此可知 ϕ 随时间和距离作周期变化, 时间变化一个周期 T 或距离变化一个波长 λ , ϕ 都相应变化一周 (即 360° , 或 2π 弧度), 所以有

$$y = A \sin 2\pi(t/T - x/\lambda)$$

位相 $\phi = 2\pi(t/T - x/\lambda)$

这种波称为行波。简谐行波的波阵面传播速度, 称为相速度。

对于在某介质中传播的一定的波来说, T 和 λ 是一定的, 所以振幅和位相这两个量就概要地表征了波的特点。 $f = 1/T$ 为频率; $\omega = 2\pi f$ 称为角频率或圆频率。如图 1.4.2 所示, 以半径 $R = A$ 作圆, 半径 OA' 直线与圆周交于 A' 点, OA' 线与 x 轴夹角作为 ϕ , $A'B$ 垂线作为 y , 则 OA' 的旋转

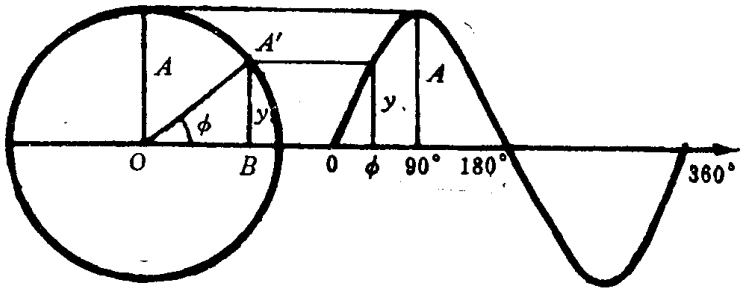


图1.4.2 位相对应于转角

角速度(在 Δt 时间内平均) $\Delta\phi/\Delta t$,可代表一振动的平均角频率。相应的振动绘于图1.4.2右半面, $A'B$ 为某瞬时的振动位移值 y ,角 ϕ 对应于振动位相角,圆半径 A 等于振幅,瞬时角速度对应于瞬时角频率为

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{d\phi}{dt}$$

振动的周而复始与半径 OA' 线旋转一周又一周相对应,振动一次对应于旋转一周。这样用圆周运动与周期振动相对应,有助于加强对振动、特别是位相这一概念的理解。

现在来看看群速度的意义。当声波传播速度与频率无关时,群速度与相速度一致。如果介质中质点简谐振动的传播速度与频率有关(这种现象称为频散或速变现象),则群速度与相速度不一致。

当几个波同时传播到介质中某一点时,该点的振动为各个波分别引起的振动的合成。若各振动在一直线上,取代数和;否则取矢量和。

脉冲波是由许多不同频率的简谐波叠加而成的波包。为简单起见，以两个不同频率的简谐波的合成来分析，见图1.4.3所示， b 波的频率低于 a 波。开始时两波 a 与 b 相对位置如图1.4.3上方所示，合成波包曲线在 a_1 、 b_1 重合处有最大值。设 b 的相速度大于 a 波，于是在稍后时刻， b_1 超过 a_1 而前移，而 b_2 趋向 a_2 ，终于互相重合，包络曲线的最大值便移到 a_2 处(图1.4.3中部)。再稍后时刻， b_3 赶上 a_3 ，两者重合，包络曲线的峰值便移到 a_3 处(图1.4.3下方)。显然，这种情况(波长较长者速度较快)下，包络峰值比 a 、 b 波走得慢。

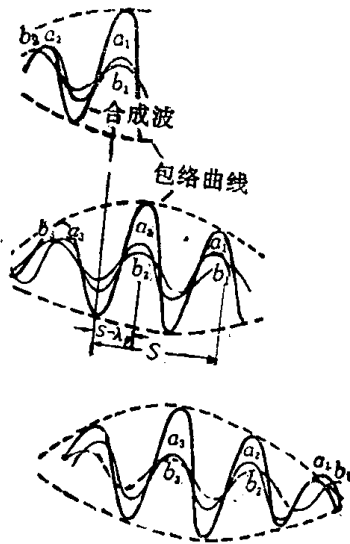


图1.4.3 群速度与相速度之间的关系

包络线移动速度即群速度，所以脉冲波是以群速度传播的。

现由图1.4.3求群速度与相速度间关系。由图知 b 波前进距离为 s 时，波包峰值前进距离为 $s - \lambda_p$ 。在前进此距离所费时间 t 内， b 波赶上 a 波的相对距离为 $\Delta\lambda_p$ ，而 b 波相对于 a 波的速度为 Δc_p ，所以

$$t = \frac{\Delta\lambda_p}{\Delta c_p}$$

b 波的相速度为

$$c_p = \frac{s}{t}$$