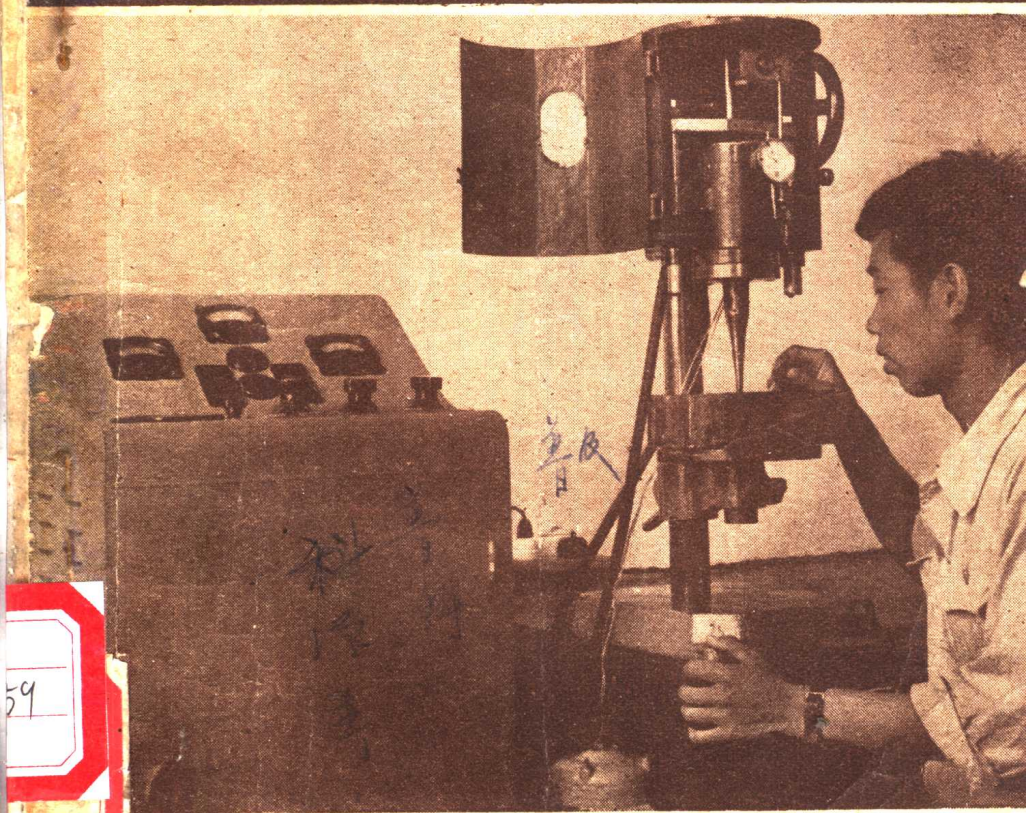


超声原理及其应用

应崇福等



科学普及出版社



超声原理及其应用

应崇福等著

科学普及出版社
1959年·北京

为庆祝中华人民共和国成立九周年

迎接技术革命和文化革命高潮

献 给

我们伟大光荣正确的党

应崇福	向 明	施能锋
胡申奇	查济璇	徐唯义
侯立琪	黄启圣	陈勋华

序

在党和毛主席的英明领导下，在社会主义建设总路线的光辉照耀下，全国人民正以冲天的干劲，万马奔腾之势建设着我们伟大的社会主义祖国，出现了人类从未有的，一天等于二十年的革命飞跃。我们党所预言的技术革命和文化革命高潮已经来临，学科学，做研究已提上我们每一个人的日程。

就在这种形势下，我们写出了这本小册子。我们希望它能对大家学科学有所帮助，对生产起一些促进作用。

我们将它作为一分礼物，献给我们的党。礼品虽是菲薄的，但表达我们一片热诚的心。

編者

1958年10月1日

目 次

序

第十章	什么是超声.....	(1)
第二章	超声的特殊性质.....	(4)
第三章	超声的产生、测量和显示.....	(11)
第四章	超声在重工业上的应用.....	(28)
第五章	超声在国防、海洋航行和渔业上的应用.....	(41)
第六章	超声在轻工业、纺织工业、食品工业上的应用.....	(46)
第七章	超声在农业、医药和化学上的应用.....	(47)
第八章	超声在检测和自动控制方面的应用.....	(52)
第九章	超声在研究物质中的应用.....	(57)
总结	(60)

第一章 什么是超声

近几十年来，特别是近十几年来，超声的研究工作是大步地向前进展着。随着超声在国防、工业、医药等各方面应用的不断增长，超声这名称也逐渐地传播开来了。谈到超声，很自然地人们首先要问：究竟什么是超声呢？

为了要知道什么是超声，请让我们先重述一下什么是声音。声音可是我们的老朋友了。不仅我们会发声，会听声，而且我们之中的很多人，还很明了声的原理。我们知道通常听见的声音都起源于物体的振动，经过空气的传送，带动了我们的耳膜，最后刺激了我们的听觉神经，从而产生出声音的感觉。空气所以能传送，是因为受了物体来回振动的影响，空气一部分接着一部分地振动起来了。先是紧接着振动物体的那部分空气随着物体振动起来，随后是较远部分的空气，再随后是离开物体更远的一些空气振动起来，就是这样，一部分空气带动了另一部分空气，终于把振动传送到很远的地方。就是因



图1.1 声音是人们的老朋友

响，空气一部分接着一部分地振动起来了。先是紧接着振动物体的那部分空气随着物体振动起来，随后是较远部分的空气，再随后是离开物体更远的一些空气振动起来，就是这样，一部分空气带动了另一部分空气，终于把振动传送到很远的地方。就是因

为这个原故，我們可以和声源隔开相当距离而仍然能听到声源在发声。

上面說到，当物体振动而它的周围的空气随着传送这振动的时候，人們就会听到声音，这种說法在一般情况下是正确的，但并不够全面。原来并不是无论物体怎样振动，都会刺激我們，讓我們听出声音来的。物体振动有各种特性，比如，有的振动的程度大，有的振动的程度小，有的振动得快，有的振动得慢；此外，还有其他的不同点。我們在这里只注意振动快慢的問題，这里所說振动的快慢，显然不只是物体振动的快慢，也是空气振动的快慢，也是耳膜等振动的快慢，因为这些是相联的。由于听觉神經的性質，振动得太慢了，我們不会有声音的感觉；如果振动太快了，我們也不会有声音的感觉。平时物体振动要使我们能够听见，除了其他条件要适合外，振动的快慢要有一定的限度。一般說来，如果振动得慢了，一秒鐘里还振动不到十四、五次，人們是听不見什么的；如果振动得快到一秒鐘里大約有16,000次以上，人們也不会听见什么。拿振动太快这方面來說，16,000这个数字只是从許多人中得出来的平均数，并不是每个人都这样。換句話說，有人可

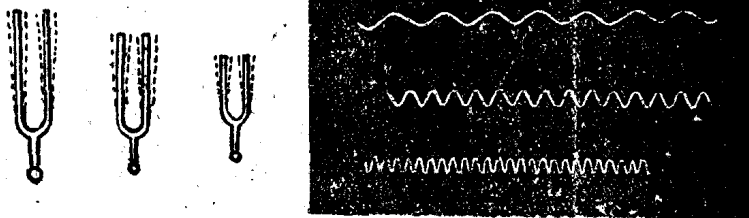


图1.2 大小不同的音叉振动有慢有快

以听到每秒18,000次的振动，但有人也許連每秒12,000次的

振动都听不见。而且，同一个人所能听到的振动快慢范围，也会随年龄等情况而改变。但把许多人的听觉范围来平均，一般地说，人们能听到最快的振动，大约是每秒16,000次。如果振动得更快些，一般说，人们不会听到声音。这是不是说空气不振动了呢？当然不是，空气还是在振动的，只是这时人脑里没有通常叫做声音的这种感觉罢了。据研究结果，人们听不到的快振动，在相当范围内，狗还听得到。此外还有其他一些生物也能听得到较快的振动，如蝙蝠、蟋蟀等。

这种振动快慢超过每秒16,000次，因而一般人听不见的“声音”，便是超声。振动的快慢这个特性就叫做频率。因为振动是个往复运动，就是周期运动，因而每秒振动多少次，一般说就是每秒多少周。物理学上把每秒多少周，简称为多少赫芝或多少赫。因此可以说超声是频率在16,000赫以上的超听的声，但为了方便，我们将这数凑成整数，不拿16,000赫作区分线，而拿20,000赫做区分线。这样超声便是频率在20,000赫以上的声。我们采用后一个定义。

上面讲的是超声的频率下限。超声有没有频率上限呢？换句话说，超过了多高的频率，便不算超声呢？这当然没有什么绝对的标准，只是有人把频率约在百亿赫以上的声叫做特超声，这就等于说，百亿赫可算超声的最高频率了。这里还得重说一下，这种分法还不是完全肯定的。

前面提到，声音从振动着的声源被空气传送到远方。超声也完全一样。现在让我们看看在空气传送声或超声的时候的情况和什么可以类比。很多人看见过，在平静的水面轻轻地投下一块石子后，就会有一圈圈波纹从石子落水的地方扩散开来。按照以前的描述，在传送声或超声的时候，围绕着振动物体的空气里也有类似的情况，当然并不全同。部分空气的前后振动，象水

紋的上下凸凹一樣，離開聲源而散播出去。因此在振動經空氣傳送的時候，可以說在空氣里有一個會傳播的波。這波依振動的



圖1.3 投石引起水波；搖鈴引起聲波

頻率或者是可聽聲的波，或者是超聲的波。因此，除超聲這個比較總括的名詞外，我們還用“超聲波”這個名詞。

上面講傳送聲或超聲，全講到空氣。其實除空氣外，別的气体、液体和固体一般也能傳送聲或超聲。在可聽聲的情況，應用液体或固体的实例不多；但在超聲的情況下，下面會看到，除了用气体外，用液体或固体做傳送媒質的实例却是很多的。超聲不僅可由气体、液体或固体來傳送，而且，有時還反過來用它對气体、液体或固体進行分析，有時還用它來改變液体或固体的性質。所以當我們談到超聲時，不能象談到可聽聲時候那樣，常常只想到空氣。

第二章 超聲的特殊性質

現在讓我們看看，為什麼超聲能夠應用得這麼廣。是不是超聲有一些特殊的性質，足以用在許多適宜的場合呢？這問題的答案是肯定的。下面跟着來的問題是超聲究竟有那些特點，以致我們需要使用超聲？

讓我們从最直接的角度来看。超声的性質是振动頻率高，
振动頻率高有什么直接效果呢？

一个直接效果是振动頻率高了，从声源发出的超声，会局限在很小的方向范围里，而不会向四面散开。举个例子說，假使我們讓一块小的平板在它的厚度方面来回振动，象我們前面所說的，板四周的空气，会随着来回振动，也就是会发出声波。在通常的情况下，不仅平板的前后有声波，平板的側面也有声波。但当来回振动的頻率足够高时，那就只有在平板的正前面和正后面才会有声波，而在其他方面是不会有声波的。拿发光来作比較，当我们扭开电灯时候，电灯泡的四周围都有光，但我们撤手电筒时，那却只在手电筒的前面有个光束。上面提到的由平板发生的声波也有类似的情况。在通常的情况，也就是振动頻率不太高时，平板四周差不多都有声波。但如果振动頻率足够高，那就只在平板前后才有个声束。

平时我們說話，不仅前面的人听得見，我們旁边和我們后面的人也听得見。說話时振动着的声带是声源，从这声源发出的声波并不局限在声带的正前方，原因是，說話声音的頻率相对的不算高。也幸亏这样，說話才方便。否則我們同身旁或身后的人說話，必需每次都扭过头去，朝着他的脸，那可有些整扭呢。但在超声的情况可就不一样了。当然我們的声带不会来回振动得快到比如說每秒鐘一亿次，要是能够这样做，那就会只在談話人的正前方，才有声波，或者說得正确些，才有超声波。

声波的这类性質，就是不向四周发散而只向狹窄的方向范围发射的性質，叫做方向性。发射的方向范围愈狹窄，我們便說方向性愈好，反之，我們便說方向性差。按照上面所講的情况，我們可以說超声具有方向性。

有方向性有什么用处呢？这个问题讓我們等一等再討論。

可是讓我們先談談這樣一個問題，聲波的頻率究竟要多低，才會象電燈泡發出的光一樣向四周圍發射？聲波的頻率又究竟要多高才會象手電筒發出的光那樣只向前照射呢？

要回答頻率和方向性的關係這個問題，我們得先了解一個名詞，便是波長。我們前面說過，物體的振動有一些特性，比方曾經說過有的振動的程大，有的振動的程小，有的振動得快，有的振動得慢。物體的振動帶動物體四周的媒質（空氣是通常的媒質）振動，這媒質也會振動得程大，或程小；振得快或振得慢。所以由振動物體帶動的媒質振動，也就是聲波，也有振動程和頻率這一些特性。但是聲波還有其他的特性，上面談的波長便是一個。波長是什麼呢？我們前面曾提過，把小石頭扔到水里，落水處的四周會有圓的波紋，會形成許多圓圈，這是一個大家都熟悉的情景。那些圓圈和圓圈之間的距離看來是一樣的。圓圈的形是為水面的有規則的高低起伏。從任一個高峰到緊接着的另一個高峰，或者從任一個

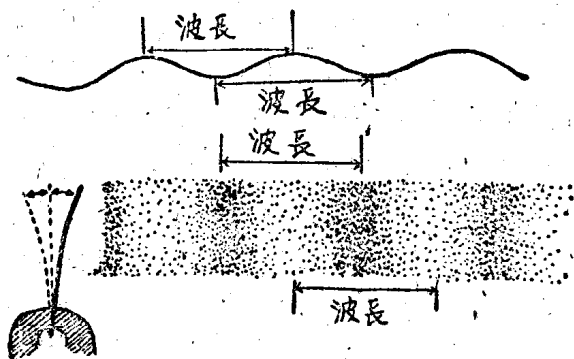


图21. 水波和声波的波長

低谷到紧接着的另一个低谷，这些距离都是一般大小。这样的一个距离，我们就叫做水波的波长。在声波里也有类似的情况。拿空气里的声波做例，它当然没有象水面的高低部分，但是却有相当于高低部分的稀疏和稠密部分。假如在空气中，有一个时大时小的作胀缩振动的圆球，那么圆球四周的空气，就将是规则地稀疏和稠密顺序相继，就象水面有规则地高起和起伏顺序相继那样。空气最稀疏的任一个圆圈到紧接着的另一个空气最稀疏的圆圈，或者空气最稠密的圆圈到紧接着的另一个空气最稠密的圆圈所相隔的距离，便是声波的波长。

声波的频率可高可低，它的波长也可长可短。但是声波的频率和波长之间有着非常密切的关系。频率低波长就大，频率高波长就小。这两个量之间的定量的关系也很简单，用公式写出来便是：

$$\text{频率} \times \text{波长} = \text{声速}$$

我们前面曾经说过，媒质的振动是由振动的物体一层层向周围传开出去的。这传动的快慢便是声速。我们大家知道，闪电打雷时是先看见闪电后听到雷声，其实雷声和闪电是同时发生的，所以会后听到雷声，那是因为雷声走得慢。由此可知声波是有一定的传播速度的。

声波的频率就是这样决定着它的波长，而波长的大小比起频率的高低来，对方向性有着更直接的关系。原来从一个声源发出的声波，究竟会聚集到什么程度，要看声源本身的大小同声波波长的比是多大。可听声并不是注定非向四周散开不可的，问题是在要想得到一个方向性好的可听声，那就必须有一个非常大的声源，要比我们通常用的（比如声带）要大好多倍，这因为可听声的波长很大，比如说有几十厘米。用这么大的声源是极不方便的，所以要得到不散开的可听声，是不大实际的。可是超声

的情况就不同了。高频率超声的波长是很小的。即使声源不大，比如说最窄处只有二、三厘米宽，那比起高频率超声波的波长来仍然可以很大，这种声源发出的超声，便可能形成一个声束，而不是向左右前后地四面散开。

上面提的是声波从声源发出的情况。此外，还有一种情况，这时声波的波长也起了决定性作用，这就是当声波在向前进行途中碰着障碍物时的情况。坐在柱子的后面，我们虽看不见演员，但却能听见演员的歌唱，可见一般的柱子并不能完全挡住声音。但这是指一般的可听声说的。如果演员用超声歌唱，我们就有能听超声的耳朵，也不一定听见超声的歌。因为这里又发生了物体的大小和声波波长比的问题。不过这里的物体，不是前面所提的声源，而是障碍物。障碍物比声波波长小许多时，就挡不住声音。超声波长小，所以比较小的障碍物也可以挡住它，并且把它反射回去。

从上面所说，我们可看出超声频率高的一个直接效果，就是它的波长短，而波长短一方面是声波能紧束在一个较小的方向范围内，另一方面是容易受障碍物的阻挡和反射。这是超声的特殊性质之一。这个特殊性质是非常有用的。我们在很多方面，就利用超声的这个特点来做工作。在国防方面，超声可以用来测量潜水艇，在航运方面，超声可以用来测量河深，在机械和建筑方面，超声可以用来探查金属和混凝土内部的孔缝；在医学方面，超声可以用来检查胆石等，这些应用都利用了超声频率高波长小这个特殊性质。

这里应当提一下和频率没有关系的超声的一个特殊性质，便是它在某些物质里可以穿透得比较深，也就是说它在这些物质里的进行途中损耗比较小。这里所谓比较是指和旁的种类的波来比较的，比方在水里，声波比雷达用的电磁波要穿透得深

許多。

現在再回到超声由于頻率高而引起的，与一般声不同的特点。讓我們来看看振动頻率高的另一个直接效果。这个效果是：超声所經過的媒質的質点，有大的加速度和大的能量。

我們前面說过，声的传播是由于一个物体(声源)在振动，引起了物体周围的媒質(比如空气)一部分一部分地由近而远地順序振动。声波里的媒質的每个質点，都以原来的位置为中心来回摆动。这种来回摆动的頻率和声源的振动頻率一样，这也就是声波的頻率。媒質質点振动时离开原来位置的最远的距离，通常叫做振幅。这个振幅也就是声波的振幅。現在假定有同样振幅的两个声波，而它們的頻率相差比方說是十万倍。在两个声波里的媒質的質点，都会在原来位置的左右来回摆动同样的距离，好象两个游泳員在同一游泳池的两端間来回游泳一样。但是高频声波里的媒質質点在同样時間里的来回摆动要比低频声波里的媒質質点高十万倍的次数，这就是說，两个游泳員虽然一样地在游泳池两端間来回游泳，但一个游泳員需要在同样時間里比另一个来回次数多到十万倍。很显然第一个游泳員的游泳速度必須比第二个大十万倍，高频声波里媒質質点的振动速度也必須比低频的大十万倍。因此，如果我們能够产生同样振幅的高频超声波，我們就能讓媒質的質点摆动得非常快，快的倍数同頻率的倍数相同。

从力学的基本知識知道，同速度相关联系的还有一个加速度的概念。加速度就是速度变化的快慢。大家知道，物体在空中下落时，由于受地球的引力作用，它有一定的加速度，这个加速度我們称做重力加速度，用 g 来表示，下落物体在一秒鐘內速度約参加 980 厘米秒，以所 g 一般也就是每秒每秒 980 厘米。声波里媒質質点在振动中有速度也有加速度，而这加速度随声波頻

变得非常之大。在一般情况下，最大加速度是和频率成正比的。这样，高频率超声波里媒质质点的加速度可的几万倍、几十万倍或更大的倍数。这是一个极大的飞机飞行时，有几倍g的加速度时，飞行员就可能晕过去。

媒质质点的振动速度和质点的能量有着直接的关系。从力学里我们知道，一个振动着的质点的能量和它的最大速度的平方成正比。前面说过，媒质质点的振动速度和经过媒质的声波的频率成正比，因此超声经过的媒质里有着相当大的能量。一般我们就说超声带有相当大的能量。这里必需说明，一般声音的能量是异常小的。把全中国六亿人民说话一分钟的能量全部收集起来，也才只能烧开一小壶水。但超声的能量可以比可听声的能量大许多许多倍。频率比可听声的高一千倍的超声是很容易产生的。当它们的振幅相同时，超声的能量就比可听声的大一百万倍。如果大家都用这么高的频率说话，那烧开一小壶水，只要六百人说一分钟的话便行了。

这里可以顺便提到，在超声技术里已经有方法可以相当容易地把超声聚焦到一个小点上，好象我们用光透镜或其他方法能够把光聚焦到一个小点上一样，这样，在这个小点上的声能，便非常之大，这个小点媒质振动的加速度，也相应地非常大。

从上面所说，我们可以看出，超声的另一个特殊性质是大的能量，也就是能给媒质质点以大的速度和加速度。这个特性也是很平常的。超声所以能用来治疗许多疾病，主要是由于它的能量。在一些其他的应用里，象某些情况下的清洗，是用媒质质点的巨大的加速度来破坏媒质的结构。

在液体里，大的超声能量，还能引起从应用角度来看是一个异常重要的现象，由于这现象更增大了超声的破坏力。这个现象就是空化现象，它是由于大能量超声的作用，液体发生局部断

裂，在液体里产生了许多小空腔的现象。这些小空腔在突然闭合的时候，有猛烈的瞬时冲击，从空化中心向外发出压力到几百大气压或更大一些的駭波，同时又可能在空腔里引起极高的瞬时温度。这两个作用，特别是那巨大的瞬时压力这项作用，使得超声能做许多重要的工作。

第三章 超声的产生、测量和显示

一、超声的产生

前面已经谈过什么是超声和它的特点了。现在谈谈超声是怎样产生的。蝙蝠的喉头能够产生超声，还有其它些动物也能发生超声。很清楚，这样的超声发生器在工农业各方面是不能实用的。现在我们来介绍一些能够在工农业各方面实用的超声发生器，我们要介绍的有：1. 压电式发生器；2. 磁致伸缩式发生器；3. 电动式发生器；4. 喷注式发生器。

前面三种是属于电声型，就是把振荡的电能变换为声能；最后一种是属于机械型，它是直接用机械方法来产生超声的。

1. 压电式发生器

压电式发生器是把电能通过一种叫做压电体的材料来变换成声能的。它首先需要一台能产生高频率电压的电发生器，当把这高频率电压用导线引到压电体上面，压电体随着振荡的电压而伸缩着，这样压电体就会把电能转变为声能了。象压电体这类能够把电能转换成声能的器材，我们一概叫做换能器。下面将要提到的磁致伸缩器材也是换能器的一种。

常用的压电体是水晶，不过一定要是从所谓单晶体上切下来的水晶。水晶的单晶体是六角棱柱形，两端却形成菱面形，两侧棱之间的连线叫X轴；通常就用垂直于这根轴切割下来的水晶来做压电体，高频率的电压就加在它的两面上。

水晶换能器的优点是：它的机械性能相当稳定，同时它本身的能量消耗很少，因此换能效率比较高。但是使用水晶换能器时需要较高的电压，达到几千甚至几万伏特，因此比较不方便，多半需要浸在绝缘性能良好的油里。

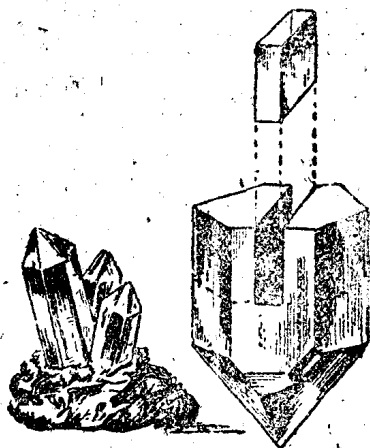


图3.1 从六角棱柱形的水晶单晶体上取下可作压电体的水晶片

另一种常用而极有前途的压电材料是钛酸钡。这里用的钛酸钡陶瓷，由钛酸钡粉在高温下烧结而成，钛酸钡在烧结以后，还要经过极化，才能变成换能器。所谓极化就是把钛酸钡块放在直流电场中一段时间（例如20千伏/厘米的电场中放一小时）。和钢经过磁化后保留的磁化一样，钛酸钡就极化，即保有一个电场了。以后再要加上交流电压，就会产生超声。

因为钛酸钡换能器是烧结而成的，它的体积形状和大小可随意设计，形状可以做成平板、圆筒、圆球、半圆球等；作成

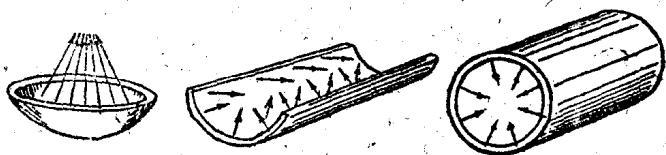


图3.2 甲