

中学生课外读物

现代科学技术丛书



奇妙的听不见的声音

施仲坚 著



人民教育出版社

奇妙的听不见的声音

中学生课外读物
现代科学技术丛书

奇妙的听不见的声音

施仲坚 著

人民教育出版社

简 介

奇妙的听不见的声音

不论在地下、在海洋、还是在空气中，到处都存在着听不见的声音。本书将介绍这种奇妙的声音及其种种应用。声学虽然有几千年的历史，但人们发现听不见的声音却是近百年的事。它是近代科学技术的进步和各学科互相渗透的产物。本书包含着从超声处理到台风预报、从电视广播到心脏病的早期诊断、从材料科学到能源的节约、从地震到晶格振动等等各个方面的内容。这一百年来，人们利用了一种听不见的声音，逐渐地认识了自然，并且进而利用自然为人类谋福利。

黄 楚 哲 编

中学生课外读物
现代科学技术丛书

奇妙的听不见的声音

施仲坚 著

*

人民教育出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京东光印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张2.625 字数52,000
1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数 1—1,300
ISBN 7-107-10392-X

G·1486 定价0.93元

编 委 序

本书是中学生课外读物现代科学技术丛书中声学方面的第二本，内容与第一本《现代生活中的声音》是紧密衔接的。第一本介绍各种人耳能听到的声音，本书则讨论听不到的声音的各种现象和应用。本书中用到的声学专业名词如声压、声强、声速等没有详细说明，可参看第一本的第一章。

本书是施仲坚同志撰写的。读者可以从本书中看到，施仲坚同志为编写本书收集了大量丰富有趣的资料。但没有想到，施仲坚同志在完成初稿后不久，还未曾看到本书的校样，就被肺癌夺去了生命。噩耗传来，我们都十分惊惜和悲痛。施仲坚同志的去世，不仅使声学界失去了一位在晶体生长、超声换能和特超声研究方面颇有造就的中年科学家，而且也失去了一位关心中学生成长的热心的科普作家。因此，本书的出版也是对施仲坚同志的一种悼念。

施仲坚同志在完成初稿后，曾托付我负责修订和审校，我觉得这是一种义务，也是我对施仲坚同志悼念之情的一点表示。本书中所述的丰富内容是施仲坚同志收集的，读者如果能从中获得启发，从而对声学产生兴趣，那是施仲坚同志的功绩。如果本书中有某些遗漏或差错，则本人当负审核不周之咎。

编委：吕如榆

1986.11.15

目 录

编委序	1
一、自然的启示	1
(一) 自然的启示——蝙蝠与声呐	1
(二) 听不见的声音	5
二、声纳、海战与海洋开发	8
(一) 居里兄弟发现发声的宝石	8
(二) 声纳之父的三明治	12
(三) 声纳	14
(四) 盲人的福音	12
三、超声在工业上的应用	21
(一) 材料与工件的非破坏性探伤	21
(二) 硬脆材料的机械加工	27
(三) 超声清洗	29
(四) 超声节能	31
四、超声在医学和农业上的应用	36
(一) 心脏病的早期诊断	36
(二) 无血的手术刀	37
(三) 超声全息术	40
(四) 超声治癌的尝试	42
(五) 超声与农业	44
五、微波声学	48
(一) 声表面波与现代电子技术	48

(二) 高频换能器件	54
(三) 超声显微镜	55
(四) 声子	60
六、从分子声学到量子声学	62
(一) 分子声学	62
(二) 等离子体中的声音	64
(三) 液氦中的声音——低温声学	66
七、次声与地声	67
(一) 次声	67
(二) 声发射与声疲劳	71
(三) 从张衡的地动仪谈起	74
封面图像：利用超声拍出的叶片尖端的声学像	

一、自然的启示

(一) 自然的启示一

蝙蝠、蚱蜢与白暨豚

蝙蝠是一种哺乳动物，夜间在空中飞翔，捕食飞行中的蚊子和飞蛾等飞虫（图1）。蝙蝠在城市里，虽然少见，但是蝙蝠衫却是一种流行的时装。穿着这种衣服的人举起手来，衣袖和衣身合成一体，犹如蝙蝠的翅膀。其实，蝙蝠长得并不好看，身上长着象老鼠一样的黑灰色的毛，它的嘴、牙齿也象老鼠。但是，蝙蝠有一对令人喜爱的翅膀。它使用这对翅膀进行着它独特的飞行。它能在漆黑的夜晚自由地飞翔。在飞行过程中还能翻转、急转弯、贴近草地飞行不会擦地、在丛林中飞行不会撞树，在屋里飞行也不会撞墙。

蝙蝠高超的飞行技术引起人们的注意。大约在280年前，意大利有一位科学家猜想，蝙蝠有高超的飞技是由于它的眼力特别好，他首先把蝙蝠的眼睛蒙住，让它在悬绷了许多绳子，绳子上又绷了一些铃铛的屋子里飞行，结果蝙蝠能绕过绳子自由地飞翔。实验结果证明他的猜想是不对的。他为了找到蝙蝠高超飞技的原由，又把蝙蝠的鼻子堵住进行飞行实验；再把它舌头割掉，进行飞行实验；又用油漆涂满它的全身，发现蝙蝠都能自由飞翔。最后他把蝙蝠的耳朵塞住让它飞行，屋里的小铃铛便叮叮铛铛地响起来了。这位科学家十分高兴地发现蝙蝠能避开障碍物飞行是靠耳朵，或者说是

靠听觉，而不是靠视觉、味觉和嗅觉。但是问题并没有解决，如果说蚊子因嗡嗡叫给蝙蝠听到被跟踪捕捉，那末静悄悄的墙壁、绷紧的绳子的存在是怎么被蝙蝠的耳朵听到的呢？这个问题经过了一两个世纪后才弄明白。

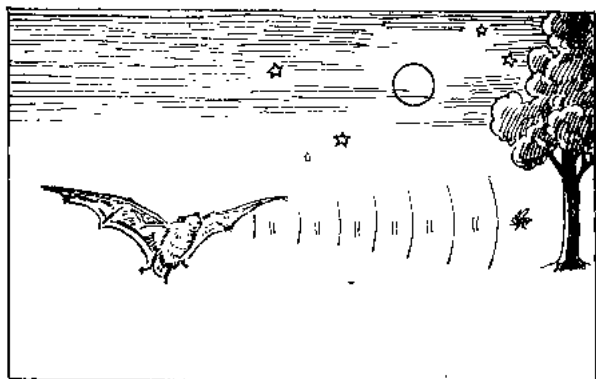


图 1 飞行的能手——蝙蝠

原来蝙蝠会发射一种人耳听不见的声音，它的耳朵能听见这种声音。蝙蝠飞行时，一边飞一边发射这种听不见的声音。当这种声音遇到障碍物时，就被反射回来。由于声波的速度比蝙蝠的飞行速度快得多，在蝙蝠未到达障碍物之前就可以听到它发出的被障碍物反射回来的声音。当蝙蝠听到反射声时，就知道前方有障碍物了。蝙蝠起飞时每秒发出 5 至 10 个这种短促的人耳听不见的声音（可称为声脉冲）。飞行过程中每秒发射 30 个左右这种声脉冲。一旦发现障碍物便加快搜索，越靠近障碍物每秒发出的声脉冲次数越多。蝙蝠发出的声脉冲频率既可高达 70 千赫，又可低到 12 赫。它们都是人

耳听不到的声音。前者叫超声，后者叫次声。

随着人们对听不见的声音特性了解的增多，就可以设计一个捉拿蝙蝠的游戏。如果让一个人瞄准飞行中的蝙蝠发射出一束人工超声，蝙蝠听到这个超声，会误认为它是自己发出的超声的回声，而错误地判定前方有障碍物，就会立刻转弯去躲避那个它心中的障碍物。现在，如果让几个人在多个方位上，发射出多束超声，蝙蝠便无路可逃，只好被迫降落，难捕的蝙蝠只好俯首就擒了。实际上人们并不会经常这样去捉弄蝙蝠的，而是从蝙蝠对超声的感觉得到启示，研制了盲人眼镜来谋福于人类。

在自然界里，能发射和接收人耳听不见的声音的动物还有很多。象飞蛾和作为蝙蝠的食饵的其他昆虫也能听到人耳听不到的声音，曾有人对准飞蛾发射蝙蝠所发出的声音，发现飞蛾顿时紧张起来，收起两只翅膀，落在地上装死，以逃避袭击。还有，普通草地里的蚱蜢能发射和接收20千赫的声音，一种小蚱蜢能发射和接收25千赫的声音。老鼠也靠超声来偷吃食物，曾有人把老鼠的眼睛蒙住，并把它放在一个三岔路口上，在离三岔路口不远的地方放一个食物箱，便会看到老鼠稍作犹豫后，就朝着通向食物箱的岔道溜去。如果把食物箱倾斜放置（图2），老鼠就不能正确判断食物箱的位置了。不但空中、地上有一些动物能听到超声或次声，在水中也有。需要特别指出的是豚类，尤其是海豚，人们对它们研究得比较多。就目前所知，海豚的声定位器*要比蝙蝠复杂、

* 声定位器是能接收声音并确定出声源位置的器官。目前人们利用声学和电子技术已能部分模拟海豚的声定位器。

高明得多。我们已经知道，海豚是海上的游泳冠军，它能在险恶的航道上为船舶导航，能帮助人们打捞水下物体，能救护落水的妇女和儿童，还能表演精彩的杂技，传递种种信息等等。还有它的探测和定位能力，它对环境的适应性，抗干扰能力，是现代科学技术装置无法比拟的。所有这些，引起很多科技工作者的关注，从而对海豚开展了艰苦的仿生学研究工作。

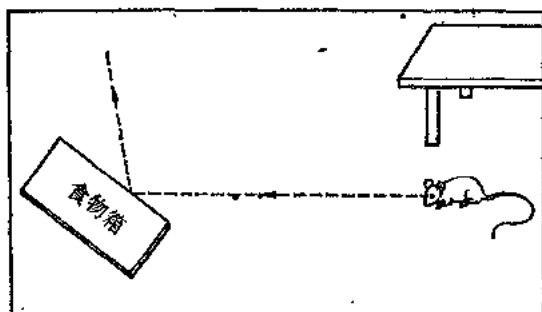


图 2 让老鼠偷不着吃的。

除了海豚以外，世界上现存的还有四种淡水豚。在这里特别要说一说白暨豚。因为它仅生存于我国的长江，为数很少，可能仅有百来头，实属应加保护的珍贵动物。1980年，中国科学院声学研究所有关单位的配合下曾对白暨豚的信号特性进行过研究，初步探明白暨豚的回声定位信号，处于20千赫到160千赫之间。这是人耳听不见的超声。白暨豚能发射作为各种用途的花样繁多的声音，我们期望能从对它的深入了解中受到启发，开阔我们的思路。鉴于它的奇特声定位功能，中国科学院声学研究所的所标（图3）就采用了



图3 中国科学院声学所所标

它的形象。

在自然界里存在着的为人耳所听不到的各种声音，不仅是由某些动物发出的，许多自然现象，如地震、台风、海浪、雷电等等也都产生这种声音。从声学的角度对它们加以研究，社会经济效益将是无可估量的。关于这方面，下面我们还要介绍。

(二) 听不见的声音

物体振动发出声音。声音的产生有三个要素：一是要有客观存在的物体，二是该物体要作某种振动，三是对这种振动的接收。当然前两者是本质的，一个人绝不会因为自己的耳朵被堵住听不到声音而认为世界是寂静的。第三个要素一般是指那些通过听觉所产生的印象。所谓听不见的声音是指正常人的耳朵无法听到的物体的振动所发出的声音，它应与另外一个含义加以区别，即日常生活中所说的：“你说话声音太小，我听不见”。

一根琴弦，用手拨动使它振动，便会发出声音。每秒钟振动的次数称为频率，单位为赫。根据现代声学的研究结果，物体振动的频率最低的为 10^{-4} 赫，即约2.8小时才振动一次，最高的约为 10^{14} 赫。遗憾的是人耳所能感知的仅是有限的一小段，约从20赫至20000赫（图4）。比这个频段高（超声）或比这个频段低（次声）的频率，人耳均听不见。

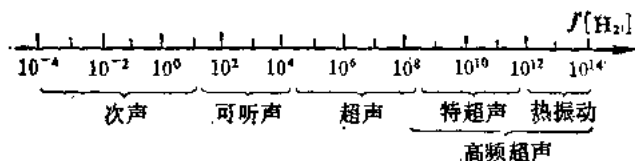


图 4 听不见的声音要比听得见的声音多

人们说话发出的声音，频段约在100赫至3000赫之间。

人耳听不见的声音与听得见的声音相比，有共同性又有特殊性。先看超声，第一个特性是定向发射，或叫成束的效应。在人群中有人讲话，周围的人都可以听到，我们说其定向性不好。超声因其频率高波长短具有成束的效应，频率 f 与波长 λ 的关系，和其他声音一样，均为

$$\lambda = \frac{v}{f}。 \quad (1)$$

其中 v 为声音在物质中传播的速度。经研究知道，波长越短成束的效应越强、发出超声的物体尺寸越大则成束的效应也越强，成束的效应强弱可用一个圆锥形的顶角来描述，已经确知存在如下关系：

$$\sin \alpha = \frac{1.2\lambda}{D}。 \quad (2)$$

其中 α 为圆锥形顶角之半， D 为发声体的直径。蝙蝠正是利用定向发射的超声而准确无误地追捕飞虫的。超声的第二个特性是声强度很大，原因在于它的频率很高，容易聚焦。

再来看看次声的特点，最突出的是次声可以传播得很远。次声和其他声一样，在传播的过程中一路上消耗能量，或者说声音的能量被传播的媒质吸收。经研究得知。被吸收

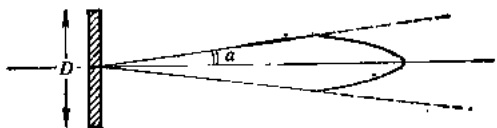


图 5 超声是定向发射的

的能量与声音的频率的平方成正比。因次声的频率低，故被吸收得少。1 赫的次声与 10000 赫的可听声在空气中传播时，被吸收的声能前者仅为后者的一亿分之一。次声传得远的原因还有别的因素，如大气中有“声波导”的作用。关于次声更多的情节，以后还作介绍。这里要提醒的是超声因频率高而强度大，次声因频率低而传得远，并不矛盾，因为这是从两个角度来说明两个问题，而且都是相对而言的。如果次声源本身的能量小，传播的距离也不会太远，一个几公斤的炮弹爆炸时，除发出可听声外还发出次声，这次声可传几十公里，而一颗氢弹在地面爆炸时，除发出可听声外也发出次声，这个次声就可传十几万公里；如果两个声源其他条件都相同，只是一个以次声频振动一个以超声频振动，那么当传播了较短距离后，超声的强度有可能比次声的强度大得多。

关于听不见声音的历史背景与更多的性质和用途，将在下面的各节中介绍。

* 由于大气中温度和密度的不均匀性而引起使声波折射到某一狭层中形成声束传播，这种狭层就称为声波导。

二、声纳、海战与海洋开发

(一) 居里兄弟发现发声的宝石

十七世纪，随着航海业与商业的发展，荷兰商人远渡重洋从印度、锡兰（即现在的斯里兰卡）贩来许多宝石到欧洲。有位有心人无意中观察到，有些宝石能吸住烟灰一类的灰烬。科学家们对此现象发生了兴趣，经过反复试验得知，宝石能吸引灰烬在于灰烬是热的，假若把这种宝石烘烤一下，它还能吸住冷的灰末。古希腊时代在发现毛织物与琥珀相摩擦，琥珀能吸引某些轻物体的现象之后，把经过摩擦后能吸引轻小物体的物体命名为“琥珀化”的物体，而且目前英文中的“电”字用的就是希腊文“琥珀”一字。联想到这些，科学家们就把那些因受热而能吸住灰末的现象，称为热琥珀化现象，为方便起见也可叫热电现象。

到了1880年，法国有一对叫居里的年轻兄弟，对热电现象发生了兴趣。他们作了许多实验，又经过许多分析推理之后，产生了这么一个思想，物体受热要膨胀，遇冷要收缩，热电现象是否会同物体体积变化或形变有关呢？。为了检验这一思想是否正确，他们采用了其他的手段来使物体变形，并观察是否有带电现象产生。他们取了一块宝石，并用导线把它们与检流计相接，再把一个质量约1公斤的砝码压在宝石上，顿时发现检流计动了起来（图6）。这个实验说明，物体因为受到压力，可以产生电，从而发现了一个非常重要

的物理现象。按因果关系命名法，就把这个现象称为压电现象。

事隔一年后的1881年，理论物理学家李普曼，从理论上预言，如果一种物体因受压力变形而产生电，那末反之，当输电给它时它就会变形。果然于同年，居里兄弟从实验证实了这个预言。前一现象称为正压电效应，后一种现象称为逆压电效应。

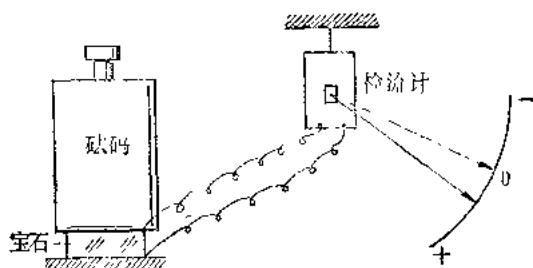


图 6 居里兄弟的重大发现

对压电效应进行深入地研究后，又发现当改变加力的方向，如把压力换为张力，检流计会往相反的方向偏转；如果输电的正负极性倒过来，原来伸长的形变会变为缩短的形变；当输给石英交流电时，石英就按交流电的节奏一伸一缩地振动起来。若交流电的频率是在可听声的频段中，石英便会发出这个频段的可听声。

石英是怎样被压出电来的呢？我们知道，石英的分子式是 SiO_2 ，它是由带正电的硅原子和带负电的氧原子按一定的规律堆积而成的。它的结构，或者说原子间排列的相对位置，在一般情况下恰好使其电性中和。当石英受力变形时，原子

间的相对位置就发生变化，它的电性中和也就随着被破坏了。于是在某个方位上出现带正电的性质，在另外一个方位上出现带负电的性质（图7）。

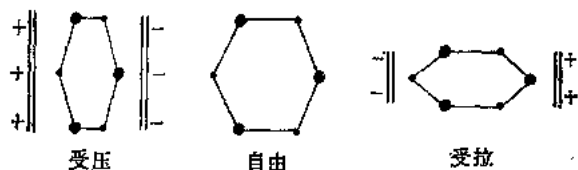


图7 压电效应的机理

具有压电效应的材料称为压电材料，或者说具有压电效应的物体称为压电体。在讨论物体压电性时，我们已经知道，一个物体受外力作用将变形，形变的大小与外力的大小成正比，其比例系数称为弹性常数，这个比例关系称为胡克定律。在研究物体的逆压电效应时，发现压电体在电场作用下产生形变，形变的大小与电场的大小亦成正比，其比例系数称为压电常数。于是较完整地来描述一个压电体的形变，应同时考虑施加于它上面的外力和它所处的电场，把这些关系写在一起即成

$$S = sT + dE. \quad (3)$$

式中 S 为描述形变的量、 T 为描述外力的量、 E 为描述电场的量、 s 为弹性常数、 d 为压电常数。这个方程称为压电方程。如果某种材料没有压电性，压电方程就变成胡克定律的形式。要注意的是，压电方程只有对于确定的压电材料，确定的方位，才有这样简单的形式，否则它将是一个复杂的方

程组。

经过一百年的研究，现在已经知道，若把世界上的宝石分成32种，其中20种将是压电体，不同压电体的压电性表现在不同的方位上，不同压电体的压电常数亦不同。比如水晶在其X方向的压电常数为 2.31×10^{-12} 米/伏。这就表示取一块1毫米厚的石英，两面做上电极，加上100伏的电压，那末石英的厚度将变化0.000231毫米。这个变化看来非常之小，但作用很大。石英作为压电体被发现至今的100多年中，把石英作成实用的电子器件已有成千上万了，戴在人们手上的每块电子手表里，就都有一块石英。在电子手表里利用的就是石英的逆压电效应。至今发现的压电材料中，压电常数最大的比石英的大几百倍。

由于天然压电宝石很少，不能满足人们的需要，现在人们已研制出大量的合成宝石，另外又研制了陶瓷质的压电陶瓷、压电半导体、压电有机物等等来代替它。

表1 一些压电材料

品名	代号	分子式	质地	压电方位	压电常数(米/伏)
石英	Q	SiO ₂	单晶	X	2.31×10^{-12}
铌酸锂	LN	LiNbO ₃	单晶	Z	6.60×10^{-12}
钛酸钡	BT	BaTiO ₃	陶瓷	Z	190×10^{-12}
锆钛酸铅	PZT	—	陶瓷	Z	593×10^{-12}
聚二氟乙烯	PVF ₂	—	有机物	—	6.70×10^{-11}

最后附带提一下，弟弟居里结婚后，对妻子的工作既支持又感兴趣。他的妻子就是赫赫有名的，世界上第一位两次获得诺贝尔奖金的居里夫人。