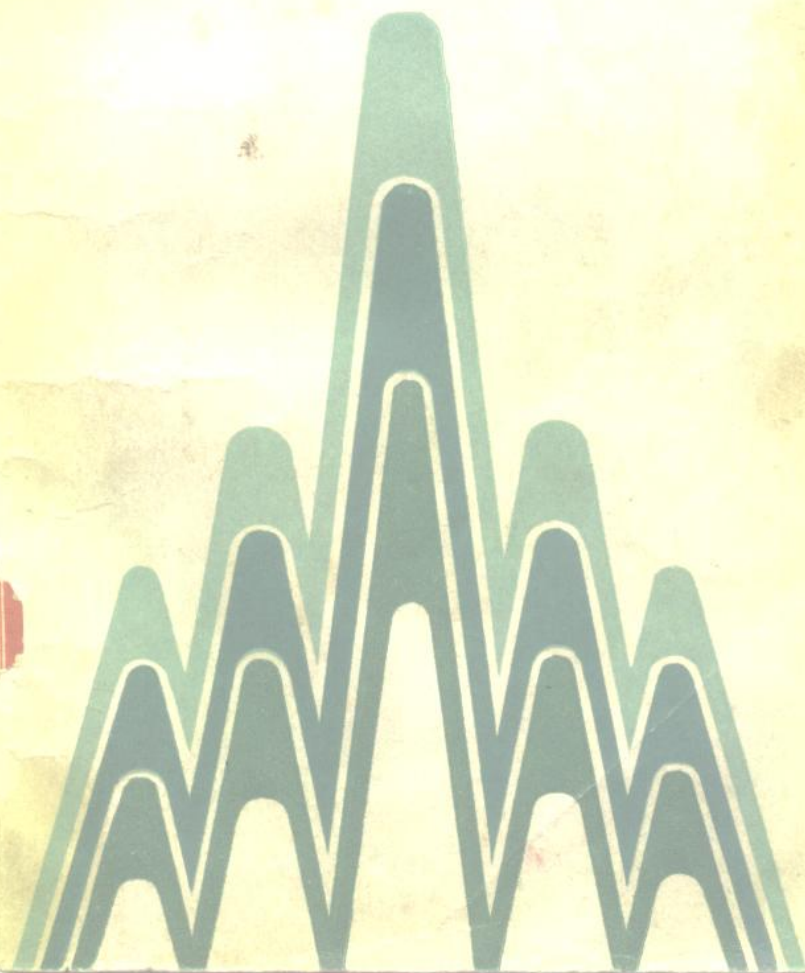


声表面波器件 及其应用

吴连法 编著



声表面波器件及其应用

吴 连 法 编 著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书是介绍声表面波技术的科普读物。书中通俗、生动地讲解了什么是声表面波和声表面波有哪些特性，重点介绍了声表面波延迟线、声表面波带通滤波器、声表面波色散滤波器和其它声表面波器件的结构、原理，以及它们在通信、电子对抗、电视等方面的应用。

本书可供从事声表面波器件研制、使用的有关人员作为入门向导，也可供广大无线电爱好者阅读。

声表面波器件及其应用

Shengbiaomianbo Qijian Ji Qi Yingyong

吴 连 法 编 著

责任编辑：高坦弟

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1983年12月 第 一 版
印数：5 8/32 册数：84 1983年12月河北第一次印刷
字数：119千字 印数：1—5,500册

统一书号：15045·总2802—无6265

定价：0.54元

概 述

习惯于人声喧闹、机器轰鸣的人们，早已熟悉自己所生活的这个“声”世界。倘若永远万籁俱寂，人也就无法生存了。

声世界犹如浩瀚无边的海洋，神奇莫测，引人探求。古今中外有多少科学家一生致力于研究其奥秘，开拓其用途，让它造福于人类。

我们这本书将向读者介绍声学的一个新分支——声表面波。尽管要说清楚它的全部内容需要较深的数学、物理知识，但我们努力以通俗的文字、浅显的道理由浅入深地剖析它的本质，使读者以自己了解的知识理解新的科学领域。

人们早已发现声表面波的存在，最早发现并从理论上证明它的存在的是一位名叫瑞利的科学家，那是1895年的事。后人为纪念他，就以瑞利的名字命名他发现的声表面波，叫瑞利波。此后的半个世纪中，尽管在某些地方人们利用了瑞利波，例如用它探测材料表面缺陷、测定地震中心位置等，但还没有形成一个独立的科学分支。

随着科学技术的发展，半导体制造工艺日渐成熟，并且计算机也日益获得广泛应用，它们为声表面波器件的诞生及发展铺平了道路。自从1965年有人提出用极简单的结构（叉指电极）激发声表面波以后，各类声表面波器件就如雨后春笋般地蓬勃发展起来。不到十年时间，科学家们就研究成功约五十种不同功能的新型声表面波器件，其中不少已付诸实用。现在，这类新型器件已成为当代三大固体微电子器件（大规模集成电

路、声表面波器件及电荷耦合器件)之一。在学术领域内,由于它的出现,吸引了众多的科学家,至少在超声学研究中,它几乎占去了半壁江山。

为什么声表面波器件会获得如此迅猛的发展,又这样受科技界垂青呢?这是因为这类器件作为电子设备中的一个独立部分就能完成很复杂的任务,并且有体积小、重量轻、耗能低、生产重复性好、无需调整及温度稳定性优良等特点。虽然某些功能用集成电路也同样能完成,但速度不理想。在现代战争往往不仅要分秒必争,有时甚至需千分之一秒必夺的情况下,只需万分之几秒就可处理复杂信号的声表面波器件,自然要比人们熟悉的微电子计算机优越了。

当前,声表面波器件不仅已大量应用于如雷达、电子对抗、导航、卫星、通信等军用设备中,而且渗透到民用电视、汽车对讲机、空中交通管理、超声无损探伤等各个领域,真有“无孔不入”之势。此类器件虽好,但目前成本尚高,人们正在努力寻求降低成本的途径。随着适于声表面波器件用的薄膜和陶瓷材料的出现,成本下降在望,其应用前景是不言而喻的。

展望未来,科学家们正致力于新的探索,试图把三大固体微电子器件的优点结合起来,组成新型的组合式器件。可以想到,它将会促进电子工业的发展,并带来新的飞跃。

前 言

声表面波技术自诞生至今十多年来，因用途广泛而得到迅速发展；不论国内国外，研究、生产及使用声表面波器件者日渐增多。可是，国内系统介绍这项技术的书籍极少，更没有这方面的科普读物。编者从所接触的工作中深感科普工作对新技术的发展以及推广应用有重要意义。因此，编者尽管缺乏编写科普读物的经验，为使声表面波技术在我国四个现代化建设中开花结果，仍然鼓起勇气编写了这本科普读物。

本书可供研究、生产或使用声表面波器件的有关人员作为入门向导，也可供具有高中文化程度的读者作为了解声表面波知识的参考书。

本书编写过程中得到吴连法教授的热情支持，仅此表示衷心感谢。

吴连法
八三年一月

目 录

概述

第一章 声表面波及声表面波换能器	(1)
第一节 声与声波	(1)
§ 1.1.1. 什么是声波.....	(1)
§ 1.1.2. 体声波——声纵波与声横波.....	(7)
§ 1.1.3. 声表面波——瑞利波.....	(14)
第二节 传播声表面波的基体材料	(17)
§ 1.2.1. 晶体与非晶体.....	(18)
§ 1.2.2. 压电现象与压电材料.....	(20)
§ 1.2.3. 压电体内的声表面波.....	(25)
第三节 声表面波的发生和接收“器官”——叉指形换能器	(29)
§ 1.3.1. 声表面波是怎样产生和接收的.....	(30)
§ 1.3.2. 叉指换能器的基本特性.....	(36)
§ 1.3.3. 名目繁多的叉指换能器.....	(43)
§ 1.3.4. 叉指换能器的制造过程简介.....	(54)
第二章 两种简单的声表面波器件	(64)
第一节 声表面波延迟线	(66)
§ 2.1.1. 信号延迟与固定延迟线.....	(66)
§ 2.1.2. 多抽头声表面波延迟线及应用举例... (71)	
§ 2.1.3. 可编码声表面波延迟线及应用举例... (74)	
第二节 声表面波带通滤波器	(80)

§ 2.2.1.	声表面波带通滤波器原理.....	(80)
§ 2.2.2.	电子战中的声表面波带通滤波器组...	(90)
§ 2.2.3.	声表面波电视中频滤波器简介.....	(95)
第三章	用途广泛的声表面波色散滤波器.....	(101)
第一节	色散滤波器原理与结构.....	(101)
§ 3.1.1.	线性调频叉指换能器特性.....	(101)
§ 3.1.2.	线性调频滤波器结构.....	(104)
第二节	声表面波色散滤波器应用实例.....	(111)
§ 3.2.1.	让千里眼戴上望远镜.....	(111)
§ 3.2.2.	一种新式的频谱分析器.....	(116)
第四章	其它声表面波器件.....	(122)
第一节	声表面波振荡器和谐振器.....	(122)
§ 4.1.1.	声表面波振荡器和水下听诊器.....	(122)
§ 4.1.2.	声表面波谐振器.....	(129)
第二节	一种新颖的声电器件.....	(133)
§ 4.2.1.	声与电的相互作用.....	(133)
§ 4.2.2.	什么是信号的卷积与相关.....	(135)
§ 4.2.3.	声表面波卷积/相关器原理简介	(139)
§ 4.2.4.	以逸待劳的千里眼.....	(141)
第五章	声表面波器件测量简介.....	(145)
第一节	材料及工艺参数测量.....	(145)
第二节	声表面波器件的电参数测量.....	(149)
第三节	声表面波传播特性的光学观察法.....	(153)
第六章	发展中的声表面波技术.....	(155)

第一章 声表面波及声表面波换能器

第一节 声 与 声 波

§ 1.1.1 什么是声波

“铃……”，一阵急促的闹铃声打破了沉寂，把你从梦里叫醒，一天的生活就此开始了。

一天中，声音这个亲密的朋友时刻伴随着你。不论是机器的轰鸣，老师亲切的教诲，同志间友好的交谈，还是从录音机里送来的悠扬动听的旋律，无不是“声”朋友在为你效劳。虽然你与声相识已久，但是你未必了解它的本性。例如，你知道“声”是怎样产生、又怎样传到你耳朵里来的吗？

下面就让我们一起重新认识一下这位“声”朋友吧！

其实，声音的产生并不神秘。只要你去摸一摸正在发声的物体，你就会发现：这个物体在不停地振动；声音愈大，振动得愈厉害。因此，我们说声音是由叫做声源的振动着的物体产生的，当振动幅度愈大时，声音也就愈响。图1-1就是最简单的振动发声的例子。

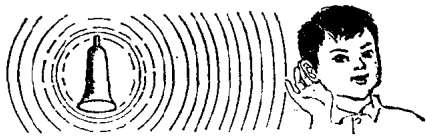


图 1-1 振动物体发声图

然而，并不能说只要物体振动你就一定能听到它发出的声

音。生活在明亮皎洁的月宫里的嫦娥是非常寂寞的，她既不闻鸟语虫鸣，也听不见人间优美的歌声；即使好心肠的登月者为这位神女送去最现代化的录音机，也不会给嫦娥带来丝毫消愁解闷的声音！为什么嫦娥在月宫里竟听不到任何声音呢？原来声音从声源传播出去还需要有个“媒人”——称为媒介或介质——的帮忙，所有固体、液体和气体都可充当“媒人”。可是，空空荡荡的广寒宫竟连半点空气也找不到，嫦娥自然什么

也听不见。真是“世间笙笛空好音，月里嫦娥实难闻”。

那么，声音在媒介里是怎样传播的呢？让我们看看图1-2。如果声源是一块被空气包围着的振动平板，并假定平板先振动到最左边位置，这时，它将压缩最邻近它的空气层（图中A区）。然后平板振动至最右边位置，A区的气

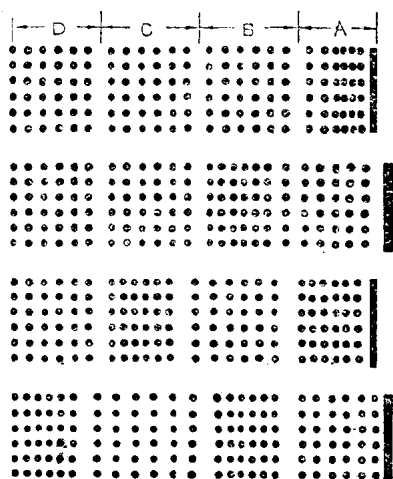


图 1-2 声波在媒介中传播过程

体向两边疏散，从而向邻近它的另一部分空气层（B区）压过去，致使B区变为稠密区，而原来的A区却成为疏松区了。接着，A区又被压缩……如此循环反复，空气层就密疏相间地向C、D方向传开，声音也就传播出去了。我们把如上所述在媒介内质点振动的传递称为声波。当声波传到人耳时，迫使耳膜振动，就听到了声音。

显然，声波传播方式很象是质点在进行“接力赛跑”。在

有声波传播时，媒介中的质点只在原地（平衡位置）附近振动，与打枪时子弹从枪膛中一直射出去不同。从质点平衡位置到最远端的距离叫振幅。每秒钟声波传播的距离叫声传播速度，简称声速。媒介不同声速也不一样。一般说声在固体里传播比在液体里快，而液体中的声速又比在空气中快。例如钢中的声速是5800米/秒，水中的声速是1400米/秒，空气中的声速却只有334米/秒。当远处有列火车向你驶来时，你若把一只耳朵紧贴在铁轨上（如图1-3），你会发现紧贴铁轨的耳朵比另

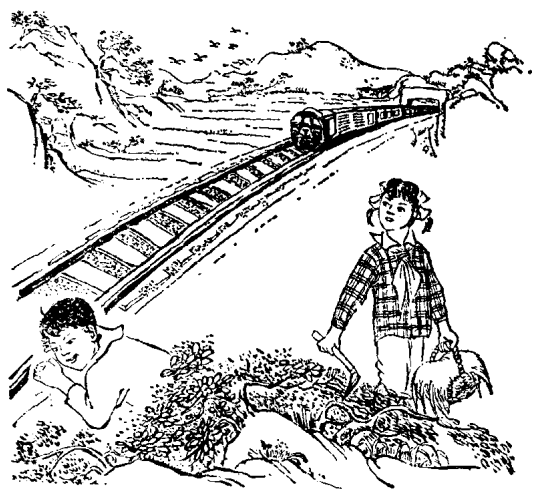


图 1-3 钢与空气中声速比较试验

一只耳朵更早地听见火车声音，就是因为声在钢内的传播速度比在空气中快。可是，声速比起光波及电波速度来却又慢得多了。光速从月亮到地球只需走1.25秒钟，而即使让月亮与地球间充满空气，声波从月球到地球也要走半天呢！

前面提到，声传播时，质点密疏相间地向前推进。此外，这种密疏状态还是周期出现的。物理学上把从密（或疏）至密

(或疏)的长度称为波长;从密(或疏)到密(或疏)所经过的传播时间称作周期。在同一种媒介中,一般说声速是一定的,但当媒介密度改变时,声速也会跟着改变。在声速一定的情况下,波长愈短周期也愈短,它们之间有如下的关系:

$$\lambda = v \cdot T \quad (1-1)$$

式中 v 代表声速,单位是米/秒; λ 代表声波长,单位为米(或更小的长度单位); T 代表周期,单位为秒。

如果在某一瞬间将声波的传播状态“拍摄”下来,我们会发现,在一个波长范围内的各质点都处于不同的振动状态。振动状态不同是指:质点离平衡位置距离不等;质点离平衡位置的方向不同;质点振动趋向不一致(或趋近、或远离平衡位置)。描述质点振动状态的物理量有两个:一个是振幅、一个是相位。相位是以角度(或弧度)表示的,一个周期内质点的相位角可从零度变到三百六十度。平常我们讨论的振动(声波或电波)都符合正弦振动规律,也就是说质点离平衡位置的距离(R)与振幅(A)和相位角(φ)有以下关系:

$$R = A \cdot \sin \varphi \quad (1-2)$$

由此可见,只要知道了质点的相位角,那么,质点的状态就随之决定了。在一个周期内,任何一个质点将有360度相位变化;在一个波长范围内的所有质点都将有不同的相位角。因此,我们说相位这个量是用来描述质点振动步调的。

声波前进过程中,如果将媒介中有相同振动步调(即同相位)的相邻质点连接起来组成一个曲面,这个曲面就叫波阵面(见图1-4)。处于声波传播方向上最前端的波阵面叫波前。波阵面是球面的波叫球面波,波阵面是平面的波就称平面波。当大钟敲响时,它所发出声波的就是球面波,但是在距钟很远的地方,因为球面的曲率半径很大,对于一小部分区域来说波

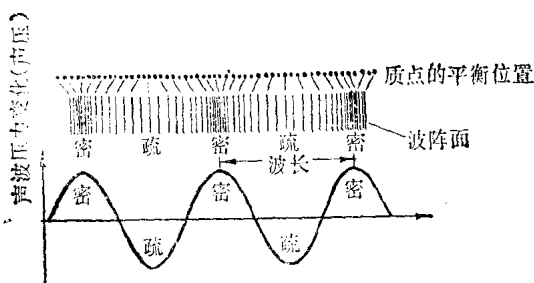


图 1-4 某一瞬间质点分布情况

阵面已很接近平面了，我们就可以近似地把它看成平面波。本书介绍的声波如果不加特别说明，都是指平面波。

不同物体发出的声音，其声调有高有低，这是大家很熟悉的。例如女高音比男低音的声音要尖得多。衡量声调高低的量是频率。频率的单位称为赫兹（简称赫）。赫兹是一位物理学家，以他的名字作单位是为了纪念这位科学家。频率为 1 赫兹的声波是指质点每秒振动一个来回（次）。一般人耳所能听到的声波频率在 20 到 2 万赫兹之间，20 赫兹声波在空气中的波长将有 17 米长。人耳所能听见的声波叫可听声波，高于或低于此频率的声波人耳都无法听见，高者为超声波，低者称次声波。频率与周期恰好成倒数关系，若以 F 表示频率，则 $F=1/T$ 。

表示质点相位的变化速度，即每秒钟相位变化的度（或弧度）数的量称为角频率，用希腊字母 ω 表示，它与频率的关系是：

$$\omega = 2\pi F \quad (1-3)$$

任何一个形状一定的物体，当敲击时都会发出一定频率的声波。这个频率称为物体的固有振动频率。不同物体有不同的固有频率，日常生活中人们常常利用这一特性。例如火车一到

站，乘务员马上就用小锤去敲打火车各个部件，用听声音的办法判别零件完好与否。还有，在购买瓷器时，人们总爱敲一敲、听一听，从声音清脆与否鉴别瓷器的优劣。

正因为每个物体都有各自的固有频率，所以还会产生奇特的共振现象。当外界有一个声波(振动)传到某一个物体上时，如果声波频率与物体的固有频率相等，那么，这个物体将会产生最大的振动，这就是共振。我国古代早已注意到并且掌握了共振现象。据明代“稗史汇编·审音类”中《曹绍夔(音逵)》一文记载：“洛阳有僧房中磬子(和尚敲的铜铁铸的钵状乐器)日夜辄自鸣，僧以为怪，惧而成疾。求术士百方禁之，终不能已。曹绍夔素与僧善，夔来问疾，僧具以告俄击斋钟(吃饭时敲的钟)，磬复作声。绍夔笑曰：‘明日设盛饌，余当为除之’。僧虽不信绍夔言，冀或有效，乃力置饌以待绍夔。食讫，出怀中错(锉刀)锉’(锉去)磬数处而去，其声遂绝。僧问其所以，绍夔曰：‘此磬与钟律合(即固有频率一致)，故击彼应此(发生共振)’。僧大喜，其疾便愈。”

其实，我国祖先对共振现象的研究至少还可以追溯到更远的汉朝。早年出土的汉制“鱼洗”就是举世罕见的声学宝物(见图1-5)。它是一个带有双耳的铜盆，盆底上雕刻着几条张

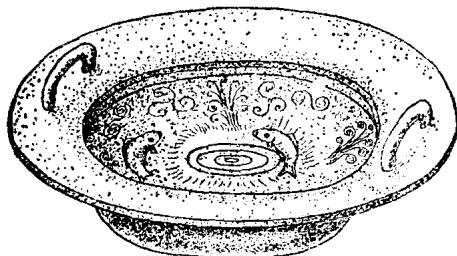


图 1-5 鱼洗

戏水的鱼，线条粗放，形态逼真。当盆内盛满水后，用手摩擦双耳，即可听见铮铮响声，同时水面生出片片鱼鳞状波纹，盆底的鱼这时如同活了一般。随着摩擦加剧，不仅铮铮声越来越响，而且会看到水从鱼嘴处奇迹般地喷射出来，形成一条细珠般的水柱，愈喷愈高。这件杰出的作品正是巧妙地利用了铜盆振动引起水的共振这一原理。

§ 1.1.2 体声波——声纵波与声横波

声波是一个大家族。在这个大家族里，我们最熟悉的莫过于体声波了。

什么是体声波呢？简单地说，声源振动时，若发出的声波能向四面八方传播的话，这种声波就叫体声波。北京大钟寺的大钟敲响之时，方圆四十里内都能听到，固然称得上是体声波；就是平常每时每刻传入你耳朵内的各种声音，如人语莺歌、虫鸣狮吼、马达轰响等等，都无一不是体声波。

声纵波和声横波又是体声波中最为人们常见的成员。本书要介绍的声表面波虽然不是体声波，但是它的性情许多方面酷似声纵波和声横波。为了容易理解，我们先介绍一下声纵波与声横波。

图1-2所示的声波，当传播时质点疏密相间向外推移，就是声纵波。因为这时媒介内的质点受到了压缩（或膨胀），所以也称声纵波为压缩波。它的最大特征，是质点的振动方向与声波的传播方向是严格地平行的。

声横波与声纵波不一样。当你抖动一端固定的绳子时，就可看到声横波是怎样的了，参看图1-6。这里，绳子上每个质点都在上下振动，而波动却在垂直于振动平面的方向传播。可见，声横波的特点是质点振动方向与声波传播方向严格地保持

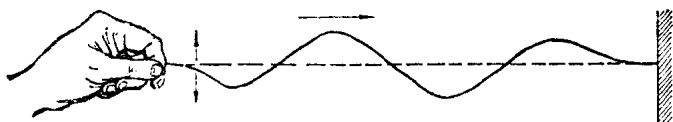


图 1-6 声横波传播形式

垂直。大家知道，在直角坐标内，三个轴（ x 、 y 、 z ）是互相垂直的。如果声波沿 z 轴传播，岂不是只要质点在 xoy 平面内振动都应叫声横波了吗（图1-7）？是的，情况正是如此。

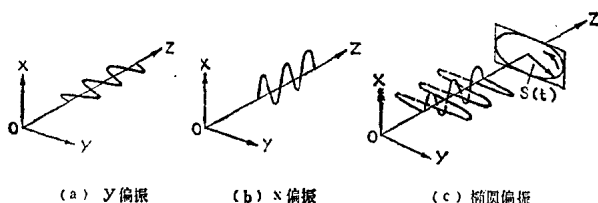


图 1-7 三种偏振声横波示意

只不过为了区别起见，将沿 x 轴振动的叫 x 偏振声横波；沿 y 轴振动的叫 y 偏振声横波。如果质点振动既有 x 方向又有 y 方向，而且振动轨迹呈一个椭圆形，我们就叫它为椭圆偏振声横波。声横波这种振动方式在固体媒介中传播，就会引起质点间位置切错。因为媒介局部的变形是由于这时质点受到了切向力的作用，所以声横波也叫切变波。固体内声纵波与声横波传播时质点位置相对变化情况如图1-8所示。

正因为声纵波与声横波的振动方式不同，两者在同一媒介内传播的速度也不一样。近似地说，声横波速度（ V_s ）约为声纵波速度（ V_l ）的一半，即：

$$V_s \approx 0.5V_l \quad (1-4)$$

例如，在不锈钢中，声纵波速度为5660米/秒，而声横波

速度为3120米/秒。

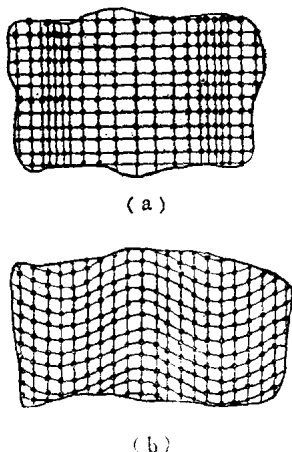


图 1-8 固体内声纵波(a)与声横波(b)传播时质点位置的变化

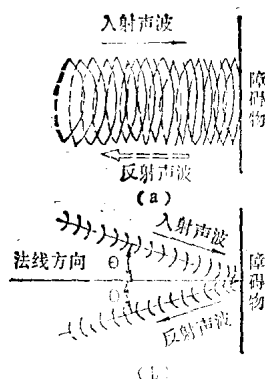


图 1-9 声波传播途中遇障碍物时的反射情况

不论是声纵波还是声横波，传播中都有一些共同的特性。这些共同特性有反射、折射、衍射等。

当立于四面环山的空谷呼喊时，可听到声声回响，这是声波反射现象引起的。声波传播途中遇有障碍物阻挡，声波就要从障碍物表面反射（图1-9）。声波反射的一个重要特性，是声波反射角（声传播方向与物体法线的夹角）与声波入射角相等。这就是著名的声波反射定律。如果反射物体与声传播方向垂直，声波便原路返回。

我国古代建筑师巧妙地利用声反射规律，设计了闻名中外的声学建筑——天坛。这里的三音石和回音壁历年来吸引着无数中外游客，谁都想在此领略一下声反射的奥秘。从天坛回音壁简图（图1-10）中你会看得出，为什么在相距百步开外的回