

音

李允武 丁 东 编著

科学出版社

声 音

李允武 丁 东 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 1

内 容 简 介

本书系统、通俗地介绍了声学的基本知识及应用,包括声音是什么,声波传播的基本特征,声的发生、记录和分析,乐器和人的发声,人的听觉,以及声学在各方面的广泛应用。本书可供具有中等文化程度的读者阅读。

声 音

李允武 丁 东 编著

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 8 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1981 年 8 月第一次印刷 印张: 5

印数: 0001—7,000 字数: 111,000

统一书号: 13031 · 1653

本社书号: 2269 · 13—3

定价: 0.55 元

序 言

我们生活在声音的世界里,没有声音就没有生命。

研究声音及其规律的声学是一门古老的学科。人们很早就已从事听觉心理和乐器制造的研究。从商代以来,我国古代科学家就已对声学作出了不少贡献。在近代,由于科学技术,特别是电子学技术的发展,进一步开拓了声学的应用范围。目前声学已渗透到工业、农业、国防、交通、文化、卫生、科研等各个领域。因此,声学在我国四个现代化的事业中必将发挥它的作用。

然而,声学毕竟没有力学、电学那么为人们所熟悉,国内也没有出版过比较系统通俗地介绍声学的科普读物。鉴于声学在各方面日益起着重要作用,为了介绍这方面的知识,我们编写了本书,力图用通俗易懂的语言,介绍声学的基本理论,声的发生、记录和分析,乐器和人的发声,人的听觉以及声学的应用,例如建筑声学、噪声控制、超声、水声和语言声学等,以供读者参考。在编写本书过程中,曾得到中国科学院声学研究所汪德昭所长和马大猷副所长的鼓励和指导;吕如榆同志审阅了全稿;倪瑞霖、于宗瀚同志审阅了音乐声学和生理声学部分,谨致谢忱。由于我们水平有限,书中难免还有错误和缺点,欢迎读者批评指正。

李允武 丁 东

目 录

1. 无所不在的声音	1
1.1 我们生活在声音的世界里	1
1.2 声音是什么?	1
1.3 纵波与横波	3
1.4 用什么来描述波动	5
1.5 声音的计量	7
1.6 反平方定律	9
1.7 衰减得比反平方定律还要厉害	10
1.8 声波传播的速度	12
1.9 次声、声频和超声	16
1.10 大振幅声波与普通声波的不同	17
2. 声波传播的特征	19
2.1 声波碰到障碍物的时候	19
2.2 从一个介质到另一个介质	26
2.3 大气中的声波	28
2.4 拍	32
2.5 干涉	35
2.6 驻波	37
2.7 声音有影子吗	41
2.8 声音也有“透镜”	44
2.9 多普勒效应	45
3. 声音的记录和分析	49
3.1 怎样把声音记录下来	49
3.2 什么叫频谱	51
3.3 实际的声音的频谱	55

3.4	怎样分析频谱	58
4.	声音在海洋中的传播	62
4.1	为什么要研究海洋中的声音	62
4.2	海水中的声速	64
4.3	声在海洋中是怎样传播的	66
4.4	浅海中声传播的特征	71
4.5	几千海里以外也能收到告警信号	74
4.6	海洋中的混响	77
4.7	起伏不定的声波	80
4.8	不安静的海洋	81
5.	声音是怎样发生的	85
5.1	自由振动与阻尼振动	85
5.2	强迫振动、共振、自持振动	86
5.3	管的发声	88
5.4	弦的振动	91
5.5	电动扬声器与传声器	93
5.6	压电换能器	95
5.7	磁致伸缩换能器	98
5.8	声音也有指向性	99
5.9	空化	101
6.	乐音、噪声、语言	102
6.1	悦耳的乐音和刺耳的噪声	102
6.2	音程、音阶	102
6.3	音调与音色	108
6.4	响度	110
6.5	人是怎么会说话的	112
7.	耳朵是怎样听得见声音的	116
7.1	耳朵的分辨能力	116
7.2	掩蔽现象	117
7.3	耳朵的构造	121

7.4	天然的传声器	126
7.5	听觉的部位理论	128
7.6	声音信息通过听神经传到大脑	129
7.7	听觉系统也能用电子线路来表示	135
8.	为人类服务的声音	137
8.1	蝙蝠和海豚的启示	137
8.2	声音的记录	138
8.3	怎样改善建筑物内的音质	141
8.4	怎样消除讨厌的噪声	145
8.5	多面手超声	146
8.6	海洋中的千里眼、顺风耳	148
8.7	语言声学问题	151

1. 无所不在的声音

1.1 我们生活在声音的世界里

声音无所不在,我们生活在声音的世界里。

人类要用声音来表达思想、感情。不少动物要靠声音来寻找食物。如猫头鹰翱翔在寂静的夜空,听到田鼠在草丛中窸窣作响,就会迅雷不及掩耳地猛扑上去。蝙蝠会发出人耳听不见的声音,这种声音碰到障碍物或者小虫产生回声,蝙蝠就是靠这种本领能在漆黑的夜里捕获它的食物,却不会撞到树枝上。我们小时候捉过蟋蟀,雄蟋蟀会振翅长鸣,用声音来召唤雌蟋蟀。很多鱼也会发出求偶和警告的声音。

可以毫不夸张地说,没有声音就不会有生命。我们无法设想没有声音的世界。

人类不仅能分辨各种声音,用语言交谈,欣赏优雅的音乐,随着科学技术的发展,还能用声音为人类造福。我们研究声音,首先要知道声音是什么?声音有哪些性质?声音是怎么产生的?怎样传播开来的?然后,还得弄清楚人是怎么会说话的,耳朵是怎么听得见声音的。最后,才能更好地利用声音。

1.2 声音是什么?

物体围绕它的平均位置的往复运动叫做振动,物体振动时就会发出声音。现在我们先做几个简单实验。例如,我们轻轻地敲一下玻璃杯,它就响了。玻璃杯的振动小得我们用肉眼是看不见的。如果用一根细线,在它的一端拴上一个小

球,并慢慢靠近杯子[图 1(a)],当它接触到玻璃杯的边缘时,就会被弹回来。又例如,轻轻敲一下音叉,它就会发出声音。如在音叉的尖端装上一根细针,然后敲一下音叉,再把音叉与烟熏玻璃板作比较快的相对运动,细针就会在烟熏板上划下一条曲线[图 1(b)]。这充分证明,玻璃杯和音叉受到外力敲击后即产生振动,同时发出声音。振动的物体叫做声源。

如果只有声源而没有传播介质,声音还是不能被听到。例如我们把电铃放在玻璃钟罩子里面,用橡皮把电铃挂在罩子上,使它不直接接触罩子[图 1(c)]。当罩子里有空气时,电铃通电后,电铃振动发出的声音通过罩子里的空气传到罩子壁上,再传到罩子外面的空气中,通过这些空气,人们就听见铃声了;当用真空泵把罩子里的空气抽空后,铃声就听不见了。可见传播声音还必须有一种物质,这种物质叫做介质。振动物体把振动能量传给介质,使介质产生波动,人才能感受它。所以说声音是一种波动。

声源振动的幅度很小,在介质中引起的扰动也很小。在

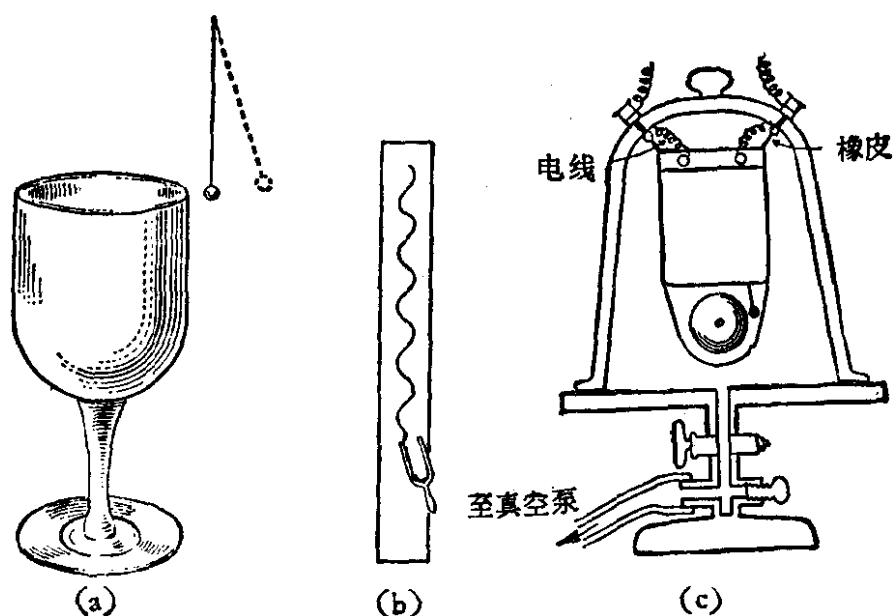


图 1 声音是波动的证据

繁华的大街上,我们听到的声音已经够响了,可是空气粒子的振动速度不过 0.24 厘米/秒。如果在水介质中产生同样强的声音,水中声波的振动速度只有 6.66×10^{-5} 厘米/秒!跟一般的机械振动相比,声波只是一种微扰。

1.3 纵波与横波

我们往平静的池塘里扔一块小石头,水面就被激起波动,形成一个个的同心圆,越传越远,圆的直径也越来越大。这种运动着的波动叫做行波。声波也是从声源通过介质向外传播的,所以也是行波。

行波有纵波和横波两种。介质质点的振动方向与波动传播方向平行的波叫纵波。介质质点的振动方向与波动传播方向垂直的波叫横波。

那么声波是属于哪一种波呢! 假设把一片薄钢片 AB 的 B 端夹住,如图 2(a),把 A 端向一边弯,再把它放开,由于钢片有弹性,它就会围绕它原来的位置向两边振动。当 A 端到达原来位置右边的 x 点时,钢片右边 C_1 点的空气被压缩,密度增加,这时它对它右边 C_2 点的空气施加压力,于是,经过一段时间间隔, C_2 点的空气也跟着被压缩,形成一个压缩脉冲。这个压缩脉冲由 A 点开始,以一定速度向右传播。当钢片从 x 向左,往 y 方向运动时,在钢片右面的 C_1 点的空气质点向左运动,使压缩减弱,压力下降,密度减小,于是形成稀疏脉冲。这个稀疏脉冲跟在压缩脉冲后面,由 A 点向右传播。 A 左右振动时,在 C_1 点一个压缩接着一个稀疏。钢片振动产生声波,因此,声波是疏密波。图 2(b) 中,符号 $\boxtimes$ 表示各个不同时间钢片 A 端的位置,各行之间的时间间隔是相等的,从上到下,一行行连起来,就得到一个时间过程;竖线的位置表示那个时候质点的位置,竖线的粗细表示压力大小,粗竖表示压

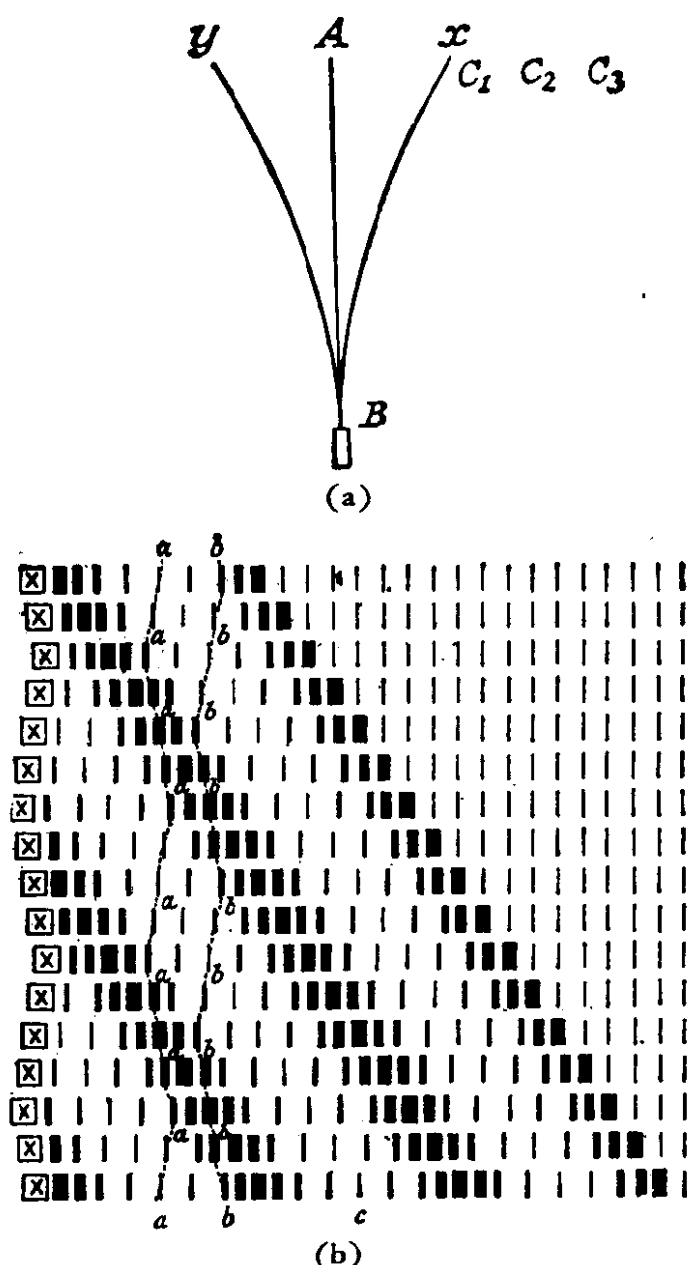


图 2 纵行波

缩，细竖表示稀疏。从这个图可以很清楚地看出：当疏密波向右传播时，每个质点(a, b 等)并不随着波动传播，而只是在平衡位置附近振动，重复它左边的质点在上一瞬间的运动状态，到了极限位置就向反方向运动。振动的方向是左右方向，跟波动传播方向平行，这种波叫做纵波。声波是一种纵波。

水波的情况就不一样了，如果我們在水面上放几个软木

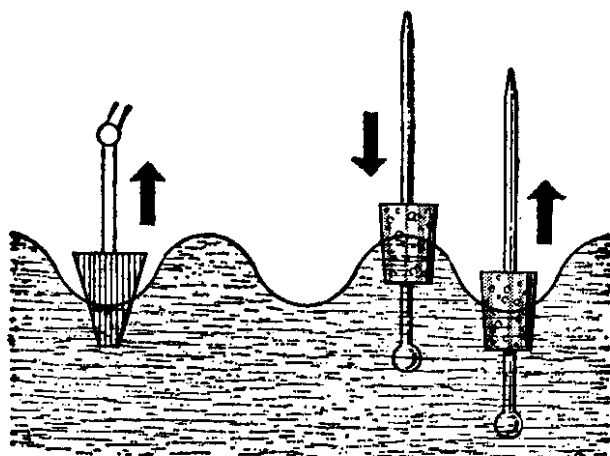


图 3 横行波

塞,如图 3 所示,随着水面质点运动,就会发现,扰动是向右传播的,而质点却是上下运动的,与波动传播方向垂直,这叫做横波。水波是一种横波。

除了声波、水波,还有很多其他波动。例如光波和电磁波都是横波。还得说明一下,上面说的声波只是指在气体和液体介质中的声波。声音在固体中传播时,既有纵波,又有横波,还有沿固体表面传播的表面波,因此是很复杂的。

1.4 用来描述波动

图 4 形象地画出了声波。黑点密的地方表示压缩,压力是正的(比平衡压力,也就是压力的平均值高),质点运动方向与波动方向一样,都向右,也认为是正的;黑点稀的地方表示稀疏,压力是负的(比平衡压力,也就是压力的平均值低),质点运动方向与波动方向相反,向左,所以是负的。

质点振动时,与平均位置(也是平衡位置)距离最大时的距离叫做振幅,常用字母 A 表示。

单位时间(1 秒)内介质质点振动的次数叫做频率,用 f 表示。完成一次振动所需要的时间叫做周期。很显然,周期 T 是频率 f 的倒数,即 $T = 1 / f$ 。

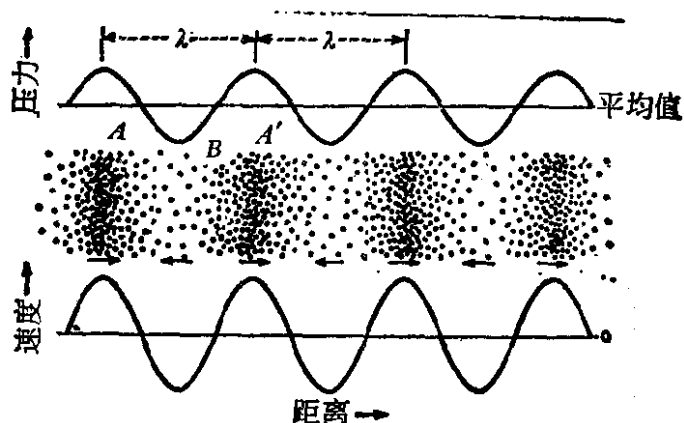


图4 压力和质点运动速度的分布

在同一时间,沿着波动传播的方向,运动状态完全相同的两个相继振动的质点之间的距离叫做波长,用希腊字母 λ 表示。例如图4中的A点和A'点,都向右运动到离平均位置最远的状态,于是从A到A'的距离就是一个波长。上面提到的运动状态称为振动的相位,运动状态完全相同称为同相;运动状态完全相反,例如图4中的A和B,称为反相。运动状态不完全相同,但也不相反时,两种状态间有相位差。

如果一个波动,同相的质点位于一个平面内,平行地向一个方向传播,这个波动就叫做平面波。

最简单的微扰产生的振动是正弦式的,叫简谐运动。在数学上,可以用正弦函数来描写介质质点位置随着时间变化的规律。如果 y 是在距离固定点O点 x 远的质点的位移,则

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

波动传播的速度常用 c 表示,在周期 T 时间内,传播了波长 λ 距离,所以

$$\text{速度 } c \times \text{周期 } T = \text{波长 } \lambda,$$

或者

$$\text{速度 } c = \text{频率 } f \times \text{波长 } \lambda.$$

波动也可以写作

$$y = A \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

图5为两个球A与B都围绕O点旋转，右面画出A、B在垂直轴上的投影随着时间变化的曲线。 $\angle AOB$ 等于 90° ，A在最高点时，B在平衡位置，经过 $T/4$ 时间后，A、B转过 90° ，A到达平衡位置，B上升到最高点。所以 $1/4$ 个周期相当于 90° 的相位差，一个周期 T 相当于 360° 的相位差。

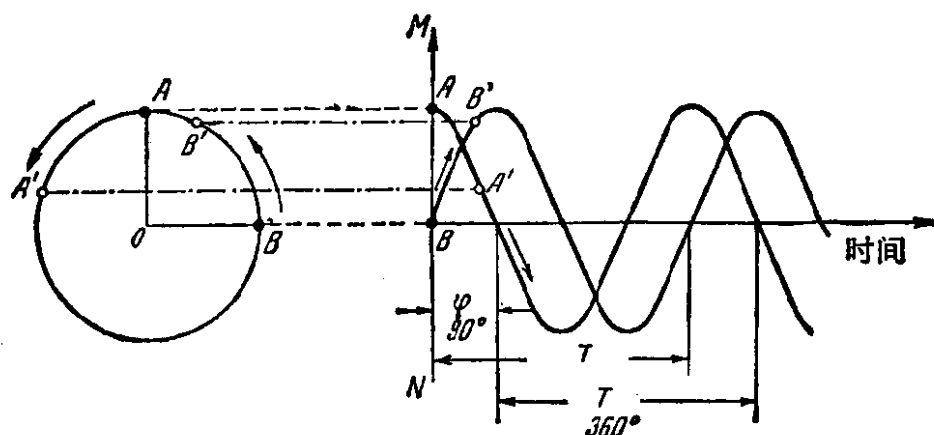


图5 相位

1.5 声音的计量

物体有大小的区别，声音是不是也有大小呢？当然有。不过它不是用长短或轻重来衡量的。

介质中有声波时，产生介质的紧密与稀疏，压力围绕平均压力（原始压力，也就是平衡压力）周期性地变化，这部分附加上去的交变压力是由声波波动引起的，称为声压，用 p 表示。压力是作用在单位面积上的力。我们都很熟悉，力的单位是牛顿，面积的单位是米²，所以声压的单位是牛顿/米²，也叫帕。一个大气压力大致等于 10^5 帕¹⁾。

1) 过去国际上多采用厘米·克·秒制单位，力的单位为达因，面积单位为厘米²，声压单位为达因/厘米²，也叫微巴。1帕=10微巴。现在有些人还沿用这种单位。

平面波的声压 p 和质点运动速度 v 成正比，它们之间的比例常数是介质的密度 ρ 乘上声波传播速度 c ，即

$$p = \rho c v.$$

这个式子跟电学里的欧姆定律 $U = RI$ (电压等于电阻乘电流)形式一样，所以也叫做声学欧姆定律。声压 p 类比于电压 U ，质点运动速度 v 类比于电流 I ，而密度 ρ 和声波传播速度 c 的乘积类比于电阻 R ，它是由传播介质的性质决定的。因为有这个类比关系，常把 ρc 叫做声阻率。

在电学中，电功率 $P = U^2/R$ ，表示单位时间内通过电阻为 R 的介质的能量。在声学中，同样也把单位时间内通过介质单位面积的能量叫做声强，即

$$I = p^2/\rho c,$$

它和声压 p 的平方成正比，和声阻率 ρc 成反比。声强也可以表示为声压乘质点运动速度：

$$I = pv;$$

或者表示为质点运动速度的平方乘上声阻率：

$$I = \rho c v^2.$$

空气的声阻率为 $420 \text{ 公斤/米}^2 \cdot \text{秒}$ ，水的声阻率要大得多，为 $1.5 \cdot 10^6 \text{ 公斤/米}^2 \cdot \text{秒}$ 。 I 的单位为瓦/米²。

我们很难想象到声音的变化范围有多么大。在空气中，人类刚刚可以听得见的声音的声强只有 10^{-12} 瓦/米²，与此相应的声压有效值 $p = 2 \cdot 10^{-5}$ 帕；在声学中叫做“听阈”，也就是听得见的最弱的声音极限。这个声强是健康人的听阈的平均值。每个人的听觉不完全一样，随着年龄的增长，听阈也有所提高。最强的声音震得人的耳膜发痛，它的声强大约为 10^2 瓦/米²，在声学中叫做“痛阈”。一般的声音都在听阈与痛阈之间。最强的声音是最弱的声音的 10^{14} 倍！为了书写方便，我们可以换一种表示方法。取听阈的声强，也就是 10^{-12} 瓦/米²

• • •

作为参考,记作 I_0 。假如我们要表示 I_1 ,先求出 I_1 是参考声强 I_0 的 I_1/I_0 倍,把这倍数取以 10 为底的对数,再乘以 10,就可以得出用分贝数表示的声强 L_1 :

$$L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}.$$

虽然倍数很大,但写成分贝数后并不十分大,这样就方便得多了。比如,一个声强比参考声强 I_0 大 1000 倍,若用真数表示,就是 10^{-9} 瓦/米²,用对数表示,1000 的对数是 3,3 乘 10 等于 30,那么这个声强就是 30 分贝。

因为声强和声压的平方成正比, $I_1/I_0 = p_1^2/p_0^2$,所以由声压的倍数求分贝数时,就得把倍数取对数后乘以 20。在空气中进行声学测量时,通常用听阈声压,即有效声压值 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ 帕做为参考标准。

下表表示分贝数与声强、声压倍数的关系。

$L(\text{分贝})$	1	2	3	5	10	20	40	60	100	140
I_1/I_0	1.26	1.59	2	3.16	10	10^2	10^4	10^6	10^{10}	10^{14}
p_1/p_0	1.12	1.26	1.41	1.78	3.16	10	10^2	10^3	10^5	10^7

1.6 反平方定律

声波向前传播的时候,声强按什么规律变化呢? 一个电铃发出的声音,在近处听很响,到远处再听就不那么响了,距离越远,声音也越弱,最后就听不见了;或者说,质点的振动越来越弱。这种现象叫做声的衰减。声音衰减的原因很多。

在各种各样情况中,先看一种最简单的情况。声波从一个点声源发出,向所有的方向均匀传播。从图 6 可以看出,在每一瞬间,声波到达的面叫做波阵面,也就是振动相位相同的面。波阵面应该与传播方向垂直。因为声源是一个点,介质

又是均匀的，振动的传播应该是对称的，所以波阵面应该是球面。这种形式的波与前面所说的平面波不同，叫做球面波。声波波动不断传播，这些球面也随之扩展，面积增大，球面波

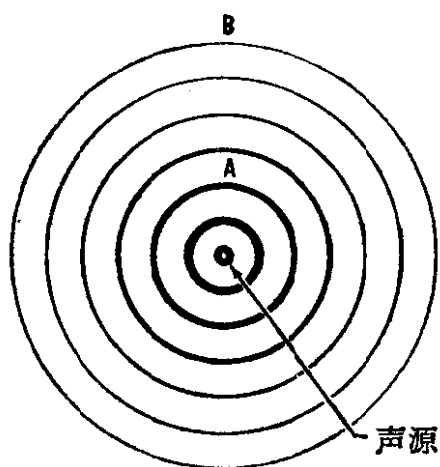


图 6 球面波的扩展

阵面的面积等于由波阵面到声源的距离（也就是半径 r ）的平方的 4π 倍，即 $S = 4\pi r^2$ 。声源辐射出的总能量 P 均匀分布在这个 $4\pi r^2$ 面积上，于是，距离声源 r 处的声强等于单位面积上所通过的能量，所以

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}.$$

如果声波所携带的能量不变成其他运动形式，在传播过程中保持不变，那么随着距离 r 的增加，声强就按距离平方规律衰减。这就叫做球面扩展的反平方定律。

如果我们研究的不是声强，而是声压，那么，因为声压与声强的平方根成正比，所以声压应该与距离 r 成反比。

图 6 形象化地用圆周的粗细表示声音的强弱。圆心附近的同心圆很粗，离圆心很远的同心圆很细，表示离开声源越远，声音越弱。前面说过，因为每个球形波阵面上的总能量不变，声能在球面上均匀分布，面积越大，通过单位面积的声能也就越小。

1.7 衰减得比反平方定律还要厉害

在声波传播过程中，随着与声源间的距离增加，声强的衰减不仅是由于能量均匀扩展到更大的空间内这一纯粹几何原因引起的。在一般情况下，声波的衰减比反平方定律还要厉