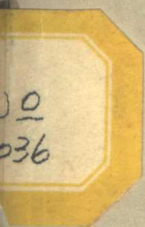
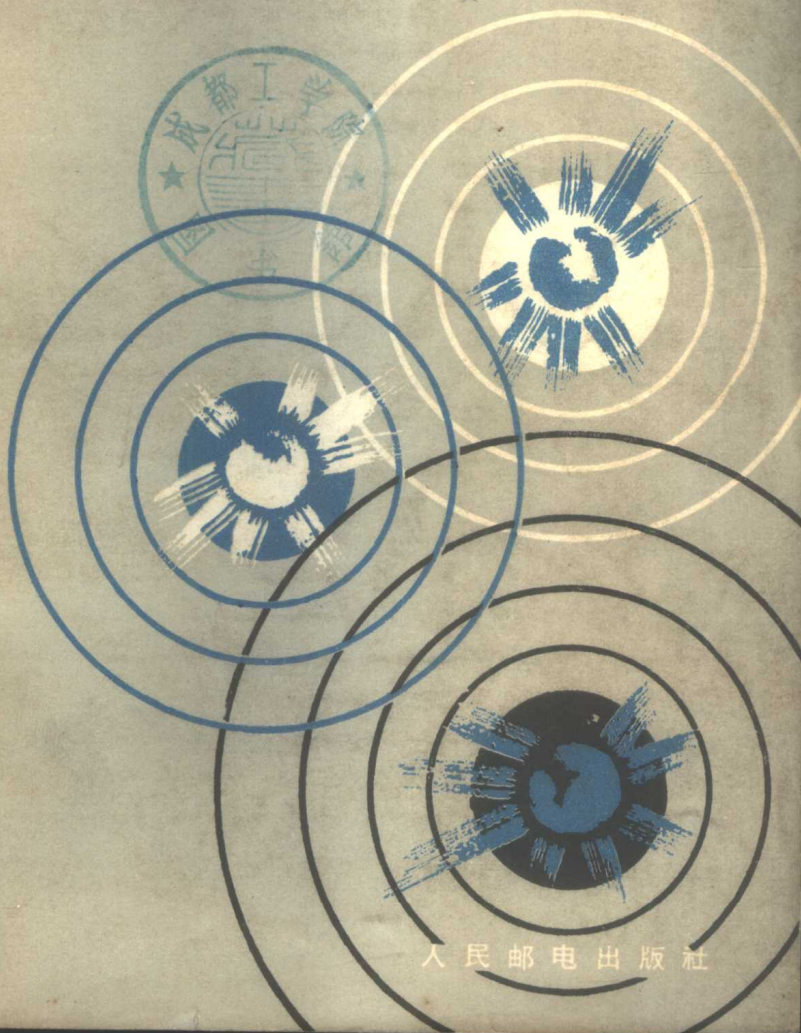


345905

超声波及其应用

成都工学院图书馆
基本馆藏

苏
周



人民邮电出版社

Л. Д. РОЗЕНБЕРГ
РАССКАЗ
О НЕСЛЫШИМОМ
ЗВУКЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1961

内 容 提 要

这是一本关于超声波——人耳不能听到的声波的书。书中叙述了超声波的若干物理性能以及它在各部门中广泛的应用：例如，铝的焊接或衣服的洗濯、海中鱼群的探查或钟表机构的清洗、药物的制备或机器零件中损伤的找寻、海洋深度的测量或癌肿的显示等等。这本书写得很通俗，并且饶有趣味，是一本十分良好的科学普及读物。

超 声 波 及 其 应 用

著 者：苏联 Л. Д. 罗津别尔格
译 者：周 元 培
出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂
发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1963 年 10 月北京第一版

印张 4 14/32 页数 71

1963 年 10 月北京第一次印刷

印刷字数 101,000 字

印数 1—3,250 册

统一书号：15045·总1362—无370

定价：(9) 0.50 元

概 說

洗衣服，焊鋁，搜索魚群，清洗鐘表齒輪，蜂蜜防腐，焊接金屬箔和極細的導線，染皮毛，消除機場上大霧，尋找金屬零件中的暗傷，制取藥物懸浮液，玻璃鍍錫，確定礦井筒截面，預測豬的脂肪含量，測量海洋深度，觀察癌腫……，這些很需要的但卻彼此完全不同的實際問題之間有什麼共同之點呢？為什麼在這裡把這些工作一起提出來呢？

這是因為上面列舉的一些工作以及很多其它的工作都可以借助於超聲波——一種聽不到的聲波獲得解決。

超聲波科學現在正經歷着它的青春時代：每天都會帶來在這方面的新發現和新發明的消息。當然，對這些發現與發明還遠沒有搞得很清楚和了解，對於在實際應用領域中的一些發現與發明來說，尤其是這樣。在這裡科學常常落後於技術所提出的要求。可是人們從上面所羅列的各種工作中卻可以很容易地相信，用超聲波來解決的技術課題是多種多樣的。

為了將這些大量的各種性質的問題聯繫和綜合起來，本書是按照下面的方式編寫的：一開始敘述了現象的物理實質以及超聲效應的一些特性，這些特性使其很多的實際應用成為可能。然後描述超聲波的最有意思和最具有前途的一些應用。

本書是在 1957 年蘇聯科學院出版社出版的、作者的《超聲波的应用》（《Применения ультразвука》）一書的基礎上加以修訂的。

目 录

概 說

第一章 听不到的声音	1
§ 1.1 超声	3
§ 1.2 声束	5
§ 1.3 超声波的强度	9
§ 1.4 二次效应	10
§ 1.5 超声空化	17
§ 1.6 自然界中的超声波	22
第二章 超声波的获得	24
§ 2.1 机械型的辐射器（哨子和旋笛）	24
§ 2.2 电—机械型辐射器	28
§ 2.3 超声波的聚焦	34
§ 2.4 极高强度超声波的获得	38
§ 2.5 低频超声波的聚焦	42
§ 2.6 超声波的检示	43
第三章 超声波——观察者和检查者	48
§ 3.1 检查过程的进行	49
§ 3.2 测量流速	53
§ 3.3 记录宇宙空间中的流星	54
§ 3.4 测量液体的粘滞度	55
§ 3.5 超声波定位	56
§ 3.6 测量距离与确定位移	63
§ 3.7 显示内伤	66
§ 3.8 超声波在医学诊断中的应用	73
第四章 超声波照相	78
§ 4.1 光象和声象	78

§ 4.2 声透镜	80
§ 4.3 声象的获得	83
第五章 超声波对于物质的作用	93
§ 5.1 清洁气体	93
§ 5.2 加速干燥	96
§ 5.3 使液体去气	98
§ 5.4 悬浮液和乳浊液的获得	100
§ 5.5 均匀化	102
§ 5.6 气溶胶的制备	104
§ 5.7 破坏分界层	106
§ 5.8 加速扩散过程	111
§ 5.9 超声波清洗零件	114
§ 5.10 超声波焊接和镀锡	119
§ 5.11 超声波在冶金工业中的应用	122
§ 5.12 切割硬脆材料	125
§ 5.13 冷焊金属	131
§ 5.14 超声工艺学的发展前途	135
参考文献	137

第一章 听不到的声音

声波——这是在任何的介质、气体、液体和固体中都可以传播的一种弹性波。声波传播的示意图如图 1。

为了简单起见，我们用一个周期地膨胀和收缩着的球来代替实际的声源。这样的—个球在膨胀时要压缩直接与其毗邻的一层介质，这层介质又将这个压缩传给与它相邻的下一层介质，因而这个压缩将会及于全部介质。在下一个时刻，球收缩了，因而与球相邻的曾被压缩的那一部分介质就稀疏。稀疏同样也要通过整个空间。向所有的方向传播出去的交替着的压缩与稀疏便是声波。

在传播着的声波的两个相邻的压缩或两个相邻的稀疏之间的距离叫做声波的波长。

声波本身携带着能量。在单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位平面的能量就是声的强度——声强。声强的单位通常是 1 瓦/厘米²。

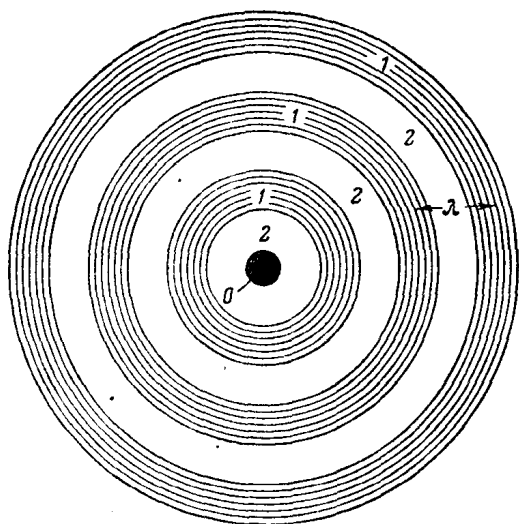


图 1 球面波传播的示意图
0—声源；1—压缩区；2—稀疏区； λ —声波的波长

声波传播着的空間叫做声場。

我們把一个声音接收器（譬如，这种接收器可以是观察者的耳朵）放到发散的声波的場內的某一点上，然后使接收器逐渐地远离声源。可以发现，接收器离开声源越远，声源辐射出的全部功率中落到接收器上的那一部分便越小，也即声强越小。可以算得，在理想的点声源的情况里，声强按距声源的距离的平方成反比的規律而衰减。但是实际上声强随着与声源的远离而減小的現象不仅仅和声源至接收器之間的距离有关，而且还与另一个原因有关。这是由于，在介质压縮和稀疏的过程中，声波的能量里总有某一小部分消耗在使介质发热上，这个过程叫做声吸收。

声波传播的速度决定于介质的性质：在密度較大的介质中

表 1 在不同的介质中声波传播的速度

介 质	温 度 (°C)	弹性波的速度 (米/秒)
空 气	0	331
空 气	20	343
二氧化碳	0	259
氫 气	0	1280
淡 水	17	1430
海 水	17	1500
三氯甲烷	20	1000
水 銀	20	1450
乙 醇	20	1170
燧石玻璃	20	3760
光学玻璃	20	5260
鋼	20	5800
鋁	20	6400
人体組織	20	1490—1610

声波的传播要比在密度較小的介质中快；在弹性較大的介质中的传播要比在弹性較小的介质中快（声波在空气中的传播速度近似地等于 340 米/秒；在更密一些、弹性更大一些的介质——水中的传播速度为 1500 米/秒；在鋼里的传播速度是 5800 米/秒）。此外，声波在介质中的传播速度还随着温度、压强以及哪怕是少量的各种杂质的存在而有所改变。例如，声波在空气中的速度便与空气中水蒸汽和二氧化碳的含量有关；声波在海水中的速度随着海水的含盐量和其它因素的不同也有所变化。在表 1 中列出了在不同介质中声波传播的速度。

在一秒钟內交替地出現的压缩和稀疏的频率是声音的一个特征。压缩和稀疏合起来形成一次完全的振动。取一秒钟振动一次作为频率的单位。为了紀念著名的德国物理学家 H. 赫兹，这个单位叫做赫（或赫兹）^①。

§ 1.1 超 声

不同频率的振动传到入耳中形成音调高低不同的感觉。低的声音（如大鼓和低音号的声音）相应于較低的频率（100—300 赫），高的声音（如笛子和哨子的声音）相应于較高的频率（3—6 千赫）。比 30 赫还低的声音以及比 15 千赫还高的声音一般地说我們的耳朵是感觉不到的（频率的可聞范围会随着每个人的个人特点和年龄上的不同稍有改变）。我們可以用专门的仪器确定这种声音的存在。

能听到的声音和听不到的声音的总频谱从其总体结构来看，与太阳的光谱有些相象。我們知道，在太阳光谱中有一个可見的部分——从紅色光到紫色光和一个不可見的部分——紅

①：为了简单起見，1000 赫叫做千赫，1000000 赫叫做兆赫。

外綫和紫外綫。和这相似，我們也把人耳不能感觉到的、頻率低于 30 赫的声音叫做**次声**；人耳不能感觉到的、頻率高于 15 千赫的声音叫做**超声**。因為我們耳朵所能感觉到的頻率的范围并不是严格确定的，所以能听到的声音与超声之間的划分在某种程度上也是有条件的。頻率为 1 兆赫的声波到底是属于超声的范围还是属于能听到的声音的范围的問題無論对于誰都不会产生疑問，但是解决頻率为 10—15 千赫乃至 20 千赫的声波的所屬問題却完全不是那么簡單了。但是沒有必要去解决这个問題。



彼得·尼古拉耶維奇·列別捷夫
(1866—1912)

因为从能听到的声音到超声是沒有一个明确的界限的，所以可以采用某一个一定条件下的界限。各人可以选取 10 千赫到 20 千赫之間的某一数字作为这个界限。

但是很有意思的是，尽管象頻率为 40—50 千赫这样的超声无疑地已經不能为人的听觉器官所接收，可是不久前却发现，人的机体还是能感觉到这种声音。

这种感觉显然不同于通常的听觉：頻率的改变不能引起音調改变的感觉。

于是很自然地要产生一个問題：超声的上限到底在哪儿？也即最高的超声波的頻率是多少？如果从下述的一些想法出发

是可以对这个問題作出回答的。在声波传播时，声波能量的一部分被借以传播的介质所吸收。被吸收的这部分能量的大小与介质的性质有关。照例，在气体中被吸收的能量最多，在液体中被吸收的能量次之，在固体中、特别是在金属、石英晶体等这些固体中被吸收的能量最小。同时吸收永远随着振动频率的增加、也即音调的增高而增加。一个正在渐渐走远的乐队所发出的声音便是这个結論的一个良好的例証：随着距离的增加，开始时是笛子和黑管的高音消失了，然后消失的是銅号和其它中音乐器的中音，最后，当距离很大时，便只能听到大鼓的声音了。最低的声音传播的距离也最远。

事实上超声也服从这个規律。著名的俄国物理学家 П. Н. 列別捷夫最先注意到了这一点，他的学生們还在 1906 年便拟出了一些获得超声波的方法，并进行了一系列关于超声的有趣的实验。可以期望，在吸收很小的物质里超声波的上限能达到 1 千亿赫。频率再高的超声则要受到极强烈的吸收，以致在超声辐射器的表面上它便已经完全衰减了。暂时还没有得到这个频率的超声。现在已经获得的最高的超声的频率为 250 亿赫。这样高频的超声只能在接近绝对零度的极低温度下在晶体（例如石英晶体）中传播很小的距离。

· 对于超声波在这样条件下的传播进行研究使我們可以明了有关固体的晶体结构的某些重要的問題。

§ 1.2 声 束

我們对于声波从声源向四面八方传播的情况已经司空見慣了。譬如，当一个人說話时，在这个人的前面、侧面甚至后面听起来都是一样的，或几乎没有什么不同。又譬如，汽車警笛的声音也是完全相同地散到各个方向去的。因此可以說，可聞

声波的声源是非定向的。如果声波通过一个較小的孔后，它依然向所有的方向传播，而不象光綫通过不透明的屏幕上的一小洞那样，呈定向的一束前进。譬如，街上的噪声通过开着的小窗传到房內时，实际上在房里的所有地点听起来都是一样的，并不是仅仅在对着窗子的方向上才能听到这个噪声。

众所熟知，处在光綫行程上的不透明的物体会形成一个影子。可是在障碍物的尺寸不很大的所有情况里，声波却不形成这种“影子”。声波彷彿“繞”过了障碍物。譬如，在音乐会上我們可以很好地听到所有乐器发出的声音，尽管其中的很多乐器被别的乐器所挡住，使我們看不到它們。用什么来解释在本质上都具有波动性质的声和光却具有正好相反的性质呢？为了能明了这个問題，讓我們还是回到波长这个概念上来吧。

前已指出，波长是声波在一次完全振动的時間內所通过的距离。

由波长的这个定义出发可以得到一个将声波的頻率 f 和波长 λ 与声音在某一介质中的传播速度联系起来的 基本关系式：

$$C = \lambda f.$$

如果在一次完全振动的時間內声波通过的路程等于波长 λ ，那么在一秒钟內它所通过的路程便要大 f 倍，也即 λf ，因为在一秒的時間內完成了 f 次完全的振动。但是声波在一秒钟的期間內在給定的介质中所通过的路程不是别的，正是声音在給定的介质中的传播速度 C 。

由这个关系式可見，頻率愈高，在給定的介质中的波长愈短。因为超声的頻率大大高过可聞声音的頻率，因此超声波的波长也相应地短得多。在表 2 中給出了在几种最常用的物质中相应于不同頻率的波长的数值。

表 2 在不同的頻率下在几种介质中的波长

頻 率	波 长		
	在空气中(20°C)	在海水中(17°C)	在鋁中(20°C)
50 赫	6.9 米	30 米	128 米
500 赫	69 厘米	3 米	12.8 米
5 千赫	6.9 厘米	30 厘米	1.28 米
50 千赫	6.9 毫米	3 厘米	12.8 厘米
500 千赫	0.69 毫米	3 毫米	12.8 毫米
5 兆赫	0.069 毫米	0.3毫米	1.28 毫米

事实上声波在障碍物处传播的性质主要决定于障碍物的綫度与波长之間的比例关系。如果障碍物的綫度比波长小，或与波长相差无几，那么声波便可以繞过这个障碍物而不留下“影子”。这样，声波在通过綫度比其波长小的障碍物时仍然可以向四面八方传播。可是如果障碍物比波长大，那么声波便再不能繞过这个障碍物，而在障碍物的后面形成一个“影子”。

可聞声波的波长的数量級为几十厘米，甚至1—2米，因此我們周围的那些綫度不超过1—2米的物体对于可聞声波便不是障碍，声波可以繞过这些物体而不会形成声影。但是光波的波长却要用毫米的数万分之一来度量，因此我們周围所有的物体自然都要留下清晰的影子了。

超声波与普通声波的区别在于它具有短得多的波长，因此它与光綫类似，可以給出声影，我們可以以窄束的形式获得它，和光束相似，我們把这种窄束叫做超声束。

現在我們来看看，如果超声束落到了两个不同的介质，譬如空气和水、石英和鋁等等的分界面上时会发生些什么現象呢。在这种情况下里一部分声能以同样的声束的形式进入第二种介质内，只不过声强要小一些而已；另一部分声能則反射回

来。超声束从固体到固体、从液体到液体、从气体到气体的传播情况最好；当它从液体到固体以及相应地从固体到液体时便大为恶化；当它从气体到液体或反过来从液体到气体时，完全变坏。

实验表明，声波实际上不能从水进入空气或相反地从空气进入水中。每个潜水者都知道，在水中听不到充斥在海滨浴场上的各种音调的噪声，但是却能听到新出现的一些噪声，例如在附近经过的电动船的螺旋桨所发出的噪声。

超声从铝进入石英时几乎没有一点儿衰减，尽管就其物理性质而言石英完全不同于铝。

需要指出的一个特别重要的情况是：水中的一块金属也象空气泡一样为声束提出了一个待克服的障碍；在一块金属中传播着的声音没有能力通过截断它的行程的裂缝，不管在这个裂缝中的空气层有多么薄。

以后可以看到，超声之所以可以被用来探查金属制品中的气泡和裂缝等等暗伤正是基于声束的这些性质。

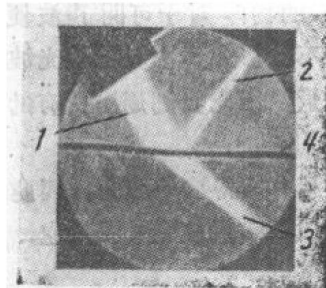


图 2 超声束通过两种介质的分界面
1—入射束；2—反射束；3—折射束；4—煤油和水分的界面

在图 2 上示出了超声束入射到煤油和水的分界面上的过程。从图上可以看到入射束、反射束以及进入第二种介质的折射束。还可以看出，反射和折射过程本身是按照几何光学的规律发生的。

超声波的很小的波长以及与此相关的形成超声束的可能性不仅允许人们将超声的全部能量集中到所需要的方向上，而且使人们可以对超声束进行聚焦，也即将超声辐射器的全部能量

都集中到一个不大的范围内。声透镜在形式上和普通的光学透镜很相象。

超声束的很多性质类似于光线的性质的这个结论是正确的。但是超声束却可以在那些不透明的介质中传播，这一点可以使我們利用超声束来研究不透光的物体。

由于应用了超声，找寻海底沉船，勘探地壳中有用矿产的储量，探查金属制品中内部的裂缝和气泡等项工作可以进行得迅速而简单；船长可以深信他无论如何也不会使自己的船搁浅；医生可以立即在病人体内发现癌的所在。超声还可以向渔船的指挥员提示怎样布网才能获得最大的捕鱼量；当锅炉壁由于钢的锈蚀已处于到面临爆炸危险的程度时，它也可以用信号向工厂的值班工程师提出修理锅炉的必要性。

人是不能直接感觉到超声的，正象人不能感觉到紫外线、红外线和无电线电波一样。

但是能够接收超声的仪器可以帮助人们，在这些仪器里有很多类似于光学器件。譬如，这里有超声“照明”辐射器、超声物镜甚至还有“感声”层。这种“感声层”在声音的作用下可以变暗，就好像照相底片或印相纸的感光层在光的作用下变暗一样。

§ 1.3 超声波的强度

人耳能够感觉到的普通的声音的强度是很小的。譬如，高声谈话的声约等于十亿分之一瓦/厘米²。但是因为我們耳朵的两个听道的总面积约只等于1厘米²，所以十亿分之一瓦的功率在我們听起来便已经是足够响的声音了。如果我們想利用由讲话的声能无损耗地转变而来的热能使一茶壶的水完全烧开，那么为此需要莫斯科全体居民不停地高声谈话一昼夜，可是在电

炊炉上这壶水在 20 分钟內就可以沸騰了。又譬如，地球上所有的人同时高喊时所获得的功率比“胜利”牌小轎車的馬达所发出的功率还要小两倍。

超声的情况則完全不同。由人造的超声源所获得的超声的功率可以高达数十瓦、数百瓦甚至数千瓦，声强可达每平方厘米数十瓦和数百瓦。

因此超声可以使人們向物质介质內部輸入很大的机械振动能量，在这种情况下在介质中，特别是在液体中将会发生一些新的有趣的現象，这些現象在实际上可以获得广泛的应用。

为了說清楚这一点，譬如我們可以来看看声压現象。如果声波在空气中传播，那么“声压”这个术语指的是除了大气压强以外多出来的那个压强，或是指在声波通过时在空气中所减小的那部分压力。

声压的大小直接与声强相联系。对于能听到的声音來說，这个压强很小。譬如，对于与中等音量的讲话相应的声音來說，这个压强仅約为 0.001 克/厘米²，落在水上漂流的树叶上的小蚊子便能給出这样小的压强。但是对于强度为 $3-5$ 瓦/厘米² 的超声波來說，它在水中的声压却等于几个大气压，也即比讲话的声压要大几百万倍。还需要考虑到，声压要改变自己的符号，也即介质会由压缩状态轉变到稀疏状态，而且这个轉变过程在一秒钟內要发生几千次。

§ 1.4 二次效应

在解释声波在連續介质中的传播过程时，人們通常都強調指出这样一个情况：介质的质点是在它平衡位置两边来回振动着，可是质点的平均位置却是不变的。換句話說，人們指出的是，在空間中移动的仅仅是波，仅仅是声能，而介质本身是不

移动的。作为说明这个論断的例子，通常可以举出一个在水面上颠簸的小木片，由它掀起的水波却沿着水面传播开去。可以发现，尽管人眼可以清晰地看到水波的运动，可是小木片却只上下地振动着，而不随水波一起移动。但是如果我們談到的是高强度的声波时，那么这个解释却是完全不对的了，可是在各个技术部門中获得应用的正是这种声波。高强度的声波由一系列与上面所討論过的低强度声波的传播过程不同的特点所表征，这便是所謂的“二次效应”。这些二次效应中的某一些在弱的声波中誠然也存在，但是却如此微弱，以致很难被人們观察到。至于另一些二次效应，在弱的声波中根本不存在，只有在声强超过产生这些效应所必需的临界数值时，它們才会出現。

但并不是所有的二次效应現在都有了确切的物理解释。但是因为这些效应不可避免地要伴随着高强度和中等强度的声波出現，所以还得对它們作一些解释。

这些效应之一是由杰出的奠定現代声学基础的英国物理学家 D. 瑞利发现的。瑞利指出，如果在声波的行程中，用一条有弹性的綫悬挂一个与声波的传播方向成某一角度的平的圓盘，那么这个圓盘将要受到来自声波的一个力偶的作用。这个力偶的力矩力图使圓盘轉到与声波传播的方向相垂直的方向上去（图 3）。这个使圓盘轉动的力与声波的强度成正比，所以瑞利圓盘可以被用作测量声强的仪器。

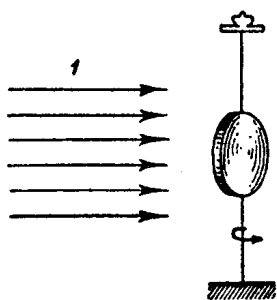


图 3 瑞利圓盘
1—入射的声波

这种测量方法的缺点在于圓盘对于恒定的空气流很灵敏，而由于空气溫度的不均匀性，这种空气流又不可避免地存在

着，它們任何時刻都要作用到圓盤上，使圓盤向各個方向轉動。但是在20—30年以前，在沒有更好的測量聲強的方法的時候，瑞利圓盤還是獲得了應用。人們把這個圓盤放在一間單獨的尽可能密封的小室內，實驗者通過玻璃窗口在室外觀察圓盤的偏轉。實驗前要從小室中取出所有的能發熱的儀器以及其它可能使空氣受到局部加熱的熱源。甚至在這些條件下，也只有將儀器安置好了的實驗者走出小室并隨之把門緊緊地關住以後再過好多小時，圓盤才能靜止不動。

現在，瑞利圓盤實際上已經不用了。但是這個效應本身却還在一個傳播得很廣的觀察聲象的方法中得到應用。

與聲波的傳播相聯系着的不僅僅是瑞利效應。例如，聲波對於處在它的行程上的障礙物還會給它一個恒定的壓力，也即所謂的輻射壓力。需要指出，絕對不應當將這個輻射壓力與成為聲波存在的基本標志的交變聲壓混為一談。

我們已經說過，交變聲壓是壓縮與稀疏的交替，並且壓縮的幅度永遠等於稀疏的幅度。交變聲壓對於處在聲場內的障礙物的作用是這樣的：在這個障礙物的表面上產生一個按照聲波振動的頻率改變着自己方向的力。譬如，如果在聲波傳播的行程上放一塊薄板，那么在壓縮的時刻，作用到這塊薄板上的力將力圖使薄板順着聲波傳播的方向移動，而在稀疏的時刻，力的方向則相反。因為這兩個力大小相等，並且它們在一秒鐘內要相互取代數百次或數千次，結果薄板便是不動的了。所以交變聲壓在障礙物的表面上並不產生（方向）恒定的力。

與交變聲壓^①并存的還有輻射壓力。這種輻射壓力表現為，障礙物的表面要經受一個大小和方向都恒定的壓力，這個

① 為了簡單起見，常常略去“交變”二字而僅稱聲壓。