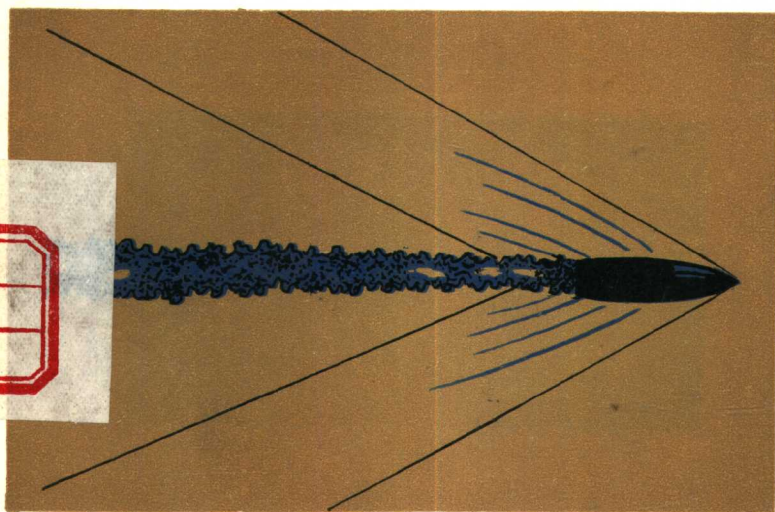


现代声学漫谈

〔苏〕B.N.雷德尼克



科学普及出版社

现代声学漫谈

[苏] В.И.雷德尼克 著

沈 一 龙 译

科学普及出版社

内 容 提 要

本书介绍近代声学的基础理论,有近代物理与建筑声学的基本知识、音乐声学、物理原理、次声与超声波应用、电声系统及其仪器等各个方面。特点是:涉及的范围、程度比较广深;介绍了近代物理的许多新内容,如电子音乐、立体声、声子量子、地震波、信息信号等;注重物理概念与理论的阐明;表达形式较活泼、风趣。适合中学高年级学生、有关的技术人员和技术工人阅读,也可供大专院校和科研单位有关人员参考。

В. И. Рыдник

О современной акустике

Москва <Просвещение> 1979

*

*

*

现代声学漫谈

[苏] В. И. 雷德尼克 著

沈一龙 译

责任编辑:纪思

封面设计:窦桂芳

*

科学普及出版社出版(北京白石桥紫竹院公园内)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防科委印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 2 3/4。 字数: 47 千字

1982年9月第1版 1982年9月第1次印刷

印数: 1—9000 册 定价: 0.28 元

统一书号: 13051·1247 本社书号: 0380

前 言

不久前,声学还是本世纪物理学中不受重视的一门学科。

原子结构和基本粒子的发现,导致电子学蓬勃发展的固体物理学的辉煌成就,微波激励器和激光器的产生,宇宙物理学的迅速崛起,相对论和量子力学的出现所引起的对世界看法的彻底改变,以及电子学和光学引起技术上很大的革命变革——所有这些都比初看起来相当平凡的声学成就要大得多。根据牛顿经典物理学的传统理论发展起来的声学,既不能使人们对于世界的认识有什么根本变化,也算不上技术上的惊人发现。

但是普普通通的声学在科学技术和生活中的运用范围正日益扩大。有声电影、留声机唱片、磁带录音机和电子乐器已不知不觉地进入人们的日常生活,成了必需品。

借助声波能清晰地看到看不见的东西,比如探测鱼群和水下船只,发现金属及其它不透明物体内部的各种疵病,人们对这些事物一点也不觉得奇怪了。

时代在前进,人们似乎已忘却表示惊叹了。第一批 X 光照片曾引起过人们无比的惊奇,而现在利用声波透视物质却引不起多大的惊讶。

城市街道上汽车的急剧增加以及喷气式飞机的出现,使得城市噪声远远超过容许的范围。噪声不仅影响听力,而且还造成神经衰弱和内脏病变。噪声成了环境污染的可怕根源。

防止噪声，保护人们健康已经是当代急需解决的一个问题。

声学正渗入那些不久前还认为与其无关的领域。现在科学工作者利用超声波研究分子结构，借助更高频率的声音——特超声波——研究固体的原子结构。业已探明固体中的电子会与声音相互作用。这种发现，导致新科学以及新的技术领域的诞生——**声电子学**。

据估计，人们关于周围世界的全部知识中，90%几乎是通过肉眼观察取得的，5%是通过听觉取得的，还有5%是通过其它感觉器官取得的。然而正是通过耳朵所得的5%信息是极端重要的。任何一种手势语言，任何一类目视信号，都不能代替用言语跟别人进行交谈，不能代替欣赏乐曲和倾听波涛带来的欢乐。

在我们这个电子时代里，必须用人类通常的语言跟电子计算机——我们的得力助手和参谋——进行联系。但是语言的人工模拟和感受是件难以想象的复杂事情。为了使其成为可能，学者们不得不重新回到基础的基础《人类声学》上来，研究人是怎样听声的和怎样发音的。在这些研究基础上再前进一步，就可达到诸如“绘画音乐”、“彩色音乐”等最耐人寻味的艺术享受的可能性，这一切向我们展示出无限创造力，认识无穷尽的各种新天地。

本书将要介绍近代声学的某些成就。声学方面的成就实在太多，要想在这样一本小册子内完全谈到是不可能的。因此只能就其中的某一些进行探讨而已。

不过，首先我们必须向读者介绍一下有关声音的基本知识，并阐明某些表征声音特性的有关定义。为此作者在本书开头写了一节简介。

13A092/1270

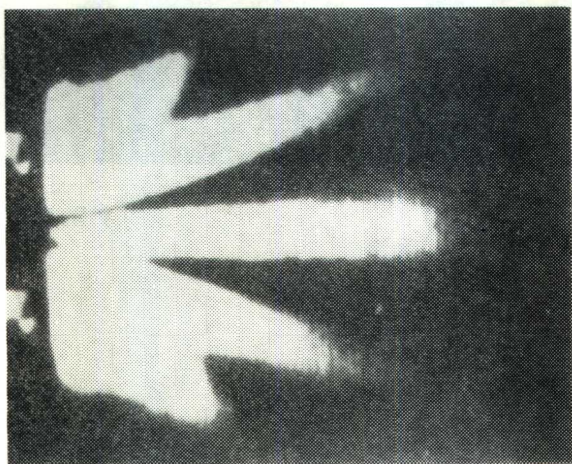


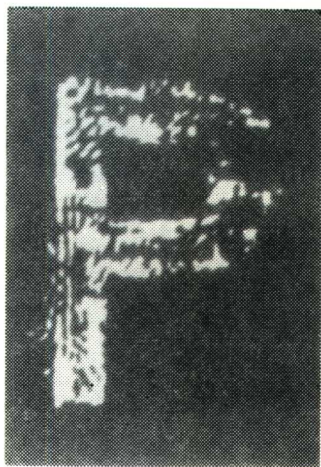
图 I



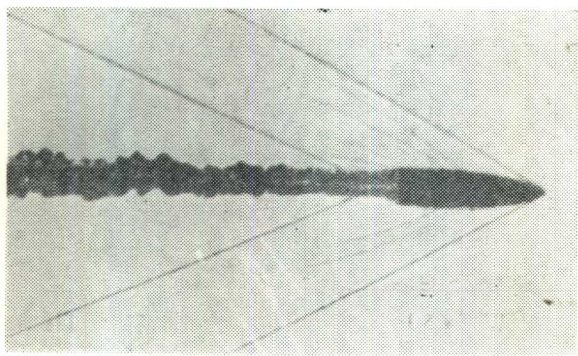
图 II



图Ⅲ



图Ⅳ



图Ⅴ

目 录

前 言

声音是什么.....	1
怎样测量声音.....	6
我们是怎样听和说的.....	11
在音乐厅里.....	20
音乐与物理.....	26
留声机的命运.....	37
风暴声.....	45
超声波世界.....	51
声音和电子.....	61
噪声控制.....	66
图 I II	封二
图 III IV V	封三

声音是什么

许多有生命物体（包括高级动物和人）利用各种波来传递、接收信息。眼睛感受光波，耳朵接受声波。这两种波的性质完全不同，但还是有着许多共同点。波是振动的传播，如果把它画在纸上，在最简单的情况下，就是为大家熟悉的正弦波(图 1, a)。但是这样的波还不是信息，仅仅是信息载体。信息本身是正规正弦波的变形(图 1, б)。因而正规的、“无生命的”（不载信息的）正弦波，可逐渐变为充满传递信息的不正规曲线。在接收器里这种信息脱离自己的载体，载体本身被抛弃，而信息分离出来供判读。

声波传播时整个媒质并不运动，仅仅是组成媒质的质点——空气和水的分子、固体中的原子——前后振动。振动的传递象接力赛——从一些质点传到另一些质点(图 2)。前后振动就是质点离开振源又移向振源，即沿波传播的方向振动。

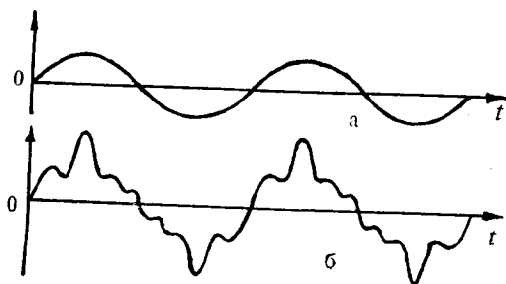


图 1

这样的波叫做纵波(质点沿波传播方向振动)。

空气中只能有纵波。这时相邻质点间的距离，与波不存在时质点之间的平均距离相比，忽减忽增。媒质中一些区域形成压缩，另一些区域出现稀疏；在质点位移过程中，这一情况不断交替进行，所以纵波又叫做压缩波或疏密波。

为了对波传播时质点如何产生振动有个概念，假定我们把小孩玩的气球吹气吹得过足而爆破了，这时气球里压缩着的空气就一冲而出，挤压周围的空气层，而这些气层又挤压前面的空气层，从而好象从气球中“飞奔”出了压缩脉冲。但是在气球破了的那个地方的空气却因膨胀而稀薄了。过了不多一会儿，周围的空气便冲向这个区域，而在这个地方同样地形成压缩，随后，重复出现上面这种现象。

媒质里交替着产生压缩和稀疏脉冲——声波——是由空气的两种性质决定的：弹性和惯性。靠着弹性，空气力图回到未压缩和未稀疏的起始状态；而由于惯性作用，空气不是瞬息就恢复到起始的未受干扰的状态的，并且还因膨胀后的过密或压缩后的过稀情况而“跳过”起始状态。

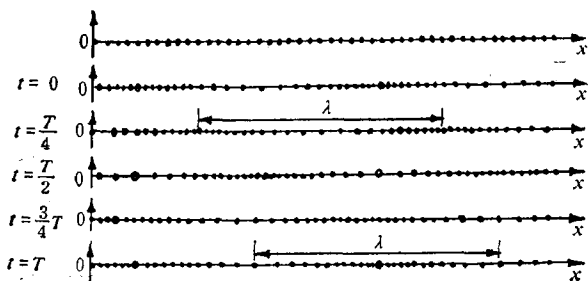


图 2

但是，如果这些振动并不持续，那么这些“跳过”动作

便随着每一次新的振动而变得愈小——空气密度使波动减弱。这种衰减现象与空气粘滞性有关。粘滞性是空气分子互撞而交换动量的结果。较快的分子这时减慢自己的速度，较慢的分子加快自己的速度，所以它们的速度很快达到均匀，其平均速度等于波到达以前的速度。

声源通常是振动物体，例如音叉脚、声带、六弦琴弦。

波的最重要特征是振幅和波长。声音接收器通常反应声音强度——一个与位移振幅平方成比例的量。听觉器官感受声音以音调的高低和声音的大小来表示。音调的高低决定于振动频率 ν ，它与波长 λ 的关系是：

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

式中的 c 是声速。

空气中的声速取决于温度，在室温时约为 340 米/秒。在同样温度的水里声速约为 1500 米/秒，而在固体中由于固体的弹性，声速可达 3000—6000 米/秒。

正常人的耳朵感觉到的声音是一种振动的声音，其频率范围从 16 赫到大约 20000 赫，它与室温时声音在空气中传播的波长相吻合，该波长是 20 米到 1.7 厘米。频率低于 16 赫的声的振动，通常叫做次声波；频率从 2×10^4 到 10^9 赫的振动叫做超声波；频率超出 10^9 赫的称为特超声波。

声音的响度取决于声波的强度，但其相互关系是非常特殊的。

首先决定听阈，即人的耳朵还能感受到的最轻的声音强度 $I_{\text{听}}$ 。专门测量表明，听阈与声音的频率密切相关，在约 1000 至 10000 赫的中等频率范围内接近常数，约 10^{-12} 瓦特/厘米²，

把这声波强度 I 除以这个数值已在接近耳朵痛阈的最响的声音时，波强度可达 1 瓦特/厘米²，此时 $I/I_{\text{阈}}$ 之比是 10^{12} 。声

音响度 K 与上述 $I/I_{\text{阈}}$ 比的 对数成正比：

$$K = \lg I/I_{\text{阈}}$$

响度单位是贝〔尔〕，但实际上用分贝来表示比较方便，那式子就写成：

$$K = 10 \lg I/I_{\text{阈}}$$

这个公式表示上世纪两名德国学者韦伯和费希纳建立的一个有名的神经生物学定律。这一定律的内容是：生物对声、光或其它“刺激物”的灵敏度不是与刺激物本身的强度，而是与其对数成比例，即声强改变了 10^{12} 倍，而响度改变只是原来的 12 倍。可以说，这里体现出天然的合理性——评价响度 12 倍的变化，我们的脑子是可以的，但要评价响度 10^{12} 倍的变化，当然不可能。

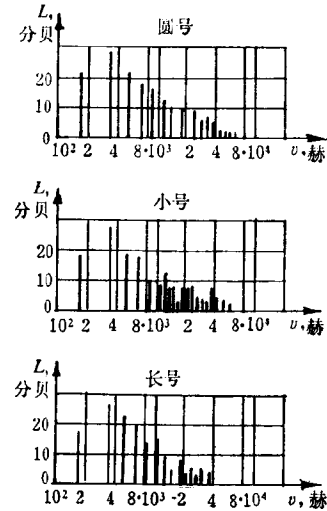


图 3

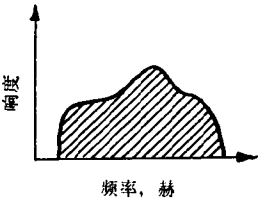


图 4

引起耳朵疼痛的大雷击的响度约 120 分贝。金工机床声响度通常为 90—100 分贝。热闹的大马路上的噪声响度约 80 分贝（一辆汽车的噪声等于 70 分贝）。大声谈话为 60 分贝，低声耳语为 30 分贝。上述数据当

然是近似数，因为我们听到声音的情况很不一样：离声源有近有远，在露天还是在室内，等等。

声音的很重要的一个特征是它的频谱。频谱可以理解为波的能量按振动频率的分布。不同的声源有着不同的频谱。

最简单的频谱相当于所谓的**纯音**，它只有单一的频率。更为有趣的是**乐音**，其频谱由基本频率和几个所谓**泛音**（“最高音调”）的“混合”频率组成。“混合”频率是基音频率的倍数。

音品的不同，视泛音的强度分布而定。图 3 所示的是各种乐器的同一个音域的声音的频谱。不同乐器有不同的音品。

叫做和音的几种乐音**合成**的频谱更为复杂。果然，在这种频谱中若干基频与相应的泛音同时出现。

图 4 所示是一种**噪声**频谱，它的特点在于某个频带中的音频是连续分布的。

怎样测量声音

耳朵是相当完善的声音接收器：自然界“花了”数百万年才使其对判断声音响度与频率高低变得很敏感。受过训练的耳朵能觉察出声音强度与频率高低的极其微小的变化。

为了获得声音的客观的特征，而不是单凭耳朵主观的评价，那显然需要专门仪器。这类仪器可以测量声音的强度及其频率。而且还有着许多用来测量在指定频率下的声音强度的仪器，它们可以用来研究声音的频谱成分。

几乎所有用来研究声音和测定其特性的现代化仪器，都要先把力学上的声音振动转换成电子学的振荡。

随着传声器的发明，这种转换已成为可能。

在最简单的所谓**炭粒传声器**里，声波造成的空气压力的振动被膜片感受，再从膜片传给布满在两个电极间的炭粒。在这两个电极上加上电压，炭粒成为控制电流通过的电阻，炭粒密实，电阻变小；反之，炭粒松散，电阻变大，从而电路里的电流强度正好和作用在膜片上的声音强度同样地变动。

另一种是**电动式传声器**，结构相当简单，但灵敏度不及炭粒式传声器。它的膜片上连接着一个小的放在特制磁铁的磁场里的金属线圈。在这种传声器里，利用电磁感应效应：当线圈和膜片一起振动时，线圈切割磁力线，在其中便感应起电动势，这种感应电动势重复着声强度的振动。我们立刻会发

现电动式扬声器基本上具有同样的构造，不过它的作用方式相反。随声频而振荡的电流流入固定在扬声器纸盆上的线圈，磁场对它施加一种力，此力随着线圈里电流振荡的节拍而变化，线圈和纸盆一起进入振动状态，这时扬声器就发出声波。

虽然电动式传声器的灵敏度低于炭粒式传声器，但声音的重现性较好，质量大，也就是说线圈的惯性比炭粒惯性大，使电动式传声器的灵敏度降低，但是反过来却使它具有准确地重现声音的优点。当炭粒传声器上没有声音作用时，流过的电流并不是完全不变的，因为炭粒的位置不规则地（虽然是微小的）变化着，所以它的电阻也随着变化。这些微小的电振荡，由于其不规则性而使得传声器产生了“噪声”。电动式传声器的固有噪声则低得多。

此外还有**电容式传声器**，膜片起到一块电容器板的效用，它的振动将引起电容器的电容量的变化。在电路中会出现交变的电流分量。因为这时电振荡很弱，要使用放大器才能达到必要的电平。用这样的传声器记录声波振动的精确性是很高的。

分析声音的频谱成分，往往利用振荡电路——电子谐振器。正如已经提到的，在乐音的频谱里包含着若干个单频，而且一种频率占主要地位，其余都是“混频”。在噪声的频谱里频率是以连续频带的形式分布的。

在声学里，机械谐振器也起着很大的作用，这就是耳朵里的谐振器“组”、弦管谐振器等。其形式可能是各式各样的，有时甚至是出乎意料之多的。机械谐振器的尺寸决定了其固有振频，谐振器尺寸愈大，频率愈低。我们知道，声波拥有低至几十赫的频率，对它进行分析就要求有几米长的机械谐

振器，而这是很不方便的。

同样的电学谐振器（振荡电路）的尺寸不太大，其固有频率由下面的公式决定：

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

取有足够大的 L 和 C 的电容器与线圈，就可使振荡电路在声频上振荡。

声音看不见，但采用特殊方法可使研究声音的许多过程变成可见的。例如，如果要研究声强度在空间中的分布，可利用简单的装置——与小的惰性氖灯相接的传声器。小灯泡

的亮度取决于声场中该点的声音强度。为了得到空间声强分布图，上述指示器沿着覆盖于待研究区域的网格线移动；此时快门开着的固定摄影机在软片上记录下灯泡的位置及亮度。黑点在软片上的分布密度也就是声音强度分布的图象（见封二图 I）。

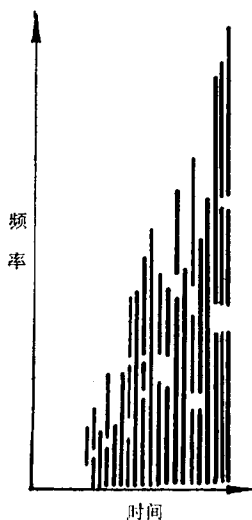


图 5

如果声谱随时间变化着，要使声谱成分变为可见，就要复杂些，但是这恰好是最有意义的：正是声谱随时间变化的特性决定着各种声音非重复的特点，仿佛是各种乐器声音、人与动物声音、自然与人为噪声的“名字卡片”。用获得并分析

所谓声谱图的方法来研究声谱与时间的依赖关系。声谱图上

的横坐标表示时间,纵坐标表示频率。在某个瞬时,任何频率声音的强度用黑点密度来描绘,后者与这个坐标平面中的点相对应。声谱图由与频率轴平行的线条组成,每一条这样的线的音调密度是变化的,它也就表示在该瞬时各种频率声音强度的分布(图5)。

为了摄取声谱,利用机械的或者电学的整套谐振器轮流接入。有时为了这个目的,不得不采用由几十台谐振器组成的仪器,以便能充分详尽地掌握所需的全部频带。为了在纸上记下声音,例如利用一枚轮流接到每个谐振器的针,使针对纸的压力与每个谐振器的声强度(如果是电谐振器则为电流强度)成比例。为了在示波器荧光屏上再现声强,人们把每一电路的输出端和示波器电子枪的灯丝电路连通起来,使电子束的电流强度与电路里的信号强度成比例关系。

如果必须研究声谱随时间的变化,问题将更为复杂,因为它关系到必须记录很相近的频率。但是为了分别记下相近频率,谐振器响应的频带宽度应当尽可能窄,即谐振器的选择性应该是高的(锐调谐)。我们经常会碰到类似的问题:当我们要调谐到所需的无线电台,但在它旁边还有几个其它的电台在广播干扰。不过谐振器的选择性愈高,信号——该频率下声强度的信息——在其中成形得愈慢,此信息随后被送至自动记录器指针或示波器的电子枪上。

这就产生为从事通讯工作的专家们熟悉的设备性能的精确性与速度之间的选择问题。一方面,设备(就是那个谐振器)每个仪器单元的**通频带**(响应频带)越窄,频率分析就越精确,而振幅分析则越差,因为建立输出信号过程过长,使被分析的原来声音信号中的振幅分布失真。要避免这种情