



21世纪学科发展丛书·声学

丛书主编 周光召

神秘的 声音世界



山东教育出版社

前言

声音是人类接触最早、最多的自然现象之一。古代人类从研究乐器、乐律开始,发展了灿烂的古代声学。在17到19世纪,声学和经典物理学的其他学科同时发展起来。在现代物理学发展之前,一说物理学就是力、热、声、光、电。这几门学科在发展中互相促进、互相借鉴、形成了经典物理学的群体。

后来现代物理学发展了,电子学、电声换能器、计算机、集成电路出现了。物理学的面貌有很大改变,声学的面貌也有根本性的变化。声的范围大大超越了原来经常接触和了解的空气中可听声的范围,而成为频率范围极宽、在各种介质中都能传播的波动过程,声波无所不在。这样一来声学学科就与其他学科互相交叉,形成边缘学科。声学的应用范围也不断扩大,几乎没有一个领域没有声的应用,所以有人把声学比喻成为一个多触角的怪兽,不是没有道理的。声波在一方面可以深入海洋、地壳、大气,“上穷碧落下黄泉”,探测其中的奥秘。另一方面声又能深入微观世界,与许多场和粒子相互作用,成为观察微观世界的主要手段。声波对物质发生作用,出

前言

现许多重要的现在尚不能解释清楚的现象和不少让人惊奇的应用。语言、音乐又是人类交往的最重要的手段。人怎么说话,怎样能听懂,人和计算机怎样对话,不但牵涉到根本性的问题,而且也是当前信息时代的重要课题。声学不但不断发展新的应用而且不断出现新的现象、新的问题,不断开辟新的生长点。很多人对于这些是不甚了解但却充满兴趣的。

在这样广阔的领域中要写一本纵贯古今,从基础到应用,牵涉声学各个交叉领域的书,不是件容易的事。我们力图用通俗的语言,说明复杂的道理,介绍声学的基础原理和应用,介绍声学的发展过程和趋向,给读者一个清晰完整的图像。

由于水平限制,本书不免有挂一漏万,叙述不明或有错误之处,希望专家和读者不吝指教。在编写过程中曾向不少专家请教、讨论,在此一并致谢。

《21 世纪学科发展丛书》编辑委员会、 出版委员会名单

一、丛书主编、副主编

主 编:周光召

常务副主编:张玉台

副 主 编:徐善衍 常志海 张 泽 宋南平
宫本欣 马 阳

二、丛书编辑委员会

主 任:庄逢甘

副主任:闵桂荣 杨 乐 张 泽 宫本欣 马 阳

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 孙永大 刘 珩 朱道本 仲增墉
陈学振 张 鲁 汪稼明 李慧政 金明善
周 济 胡序威 赵 逊 相重扬 徐世典
谢荣岱 薛全福

各分册编审委员会主任(名单略)

三、丛书出版委员会

主 任:宫本欣

副主任:陈学振 张 鲁 李慧政

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 王昭顺 尹 铭 史 彬 刘传喜
张力军 宋德万 隋千存 董 正 韩 春
鲁颖淮

序

周光召

人类已跨进了新的千年,21世纪的曙光将给全球带来灿烂辉煌的新篇章。回顾过去的20世纪,科学技术的创新与进步引发了人类经济、社会的巨大变革,由此又带来了全球翻天覆地的变化。马克思曾在《资本论》中指出:“生产力的发展,归根结底总是来源于发挥着作用的劳动的社会性质,来源于社会内部的分工,来源于智力劳动特别是自然科学的发展”,人类社会实践有力地证实了这一精辟论断。

随着科学技术在近现代的蓬勃发展,新思维、新理念、新发现推动着新兴学科、交叉学科不断涌现。许多传统学科一方面派生出新的分支学科,另一方面又在与其他学科的融合中形成新的综合性学科。展望21世纪,信息科学技术、生物科学技术、纳米科学技术将成为发展迅速,带动社会经济科技快速进步的前沿学科。环境、能源、材料、航天、海洋等科学技术将继续发展,解决人类面临的持续发展课题。社会进步和经济发展的需求为人类今后如何驾驭科学技术的骏骑,如何继续攀登科技巅峰提出了新的课题。

一个国家的科技水平不仅体现在少数科学家的科技成就中,更要体现在广大群众对科学技术的理解、掌握和应用之中。“科技先行,以人为本”有赖于公众科技文化素质整体水平的提高。因此,弘扬科学精神、传播科学知识和科学方法

就成为科技工作者又一不可推卸的、任重而道远的职责。中国科学技术协会作为党领导下的科技群团组织，肩负着促进学科发展、推动科技进步和普及科学知识、提高全民科技文化素质的重要责任。编写《21世纪学科发展丛书》是使这种重要责任有机融合的一次新尝试。科学普及的对象可分为若干社会群体，其中青少年群体的科普教育尤为重要，因为他们是21世纪的后备人才，是攀登科技高峰的生力军。让广大青少年了解自然科学和技术科学的发展历程、卓越成就，对人类文化、社会、经济发展的巨大贡献，培养他们对科学技术的兴趣、爱好，以及为科技事业献身的精神，是老一辈科技工作者义不容辞的责任，也是我们编撰此套丛书的初衷所在。因此，专家学者们对编著此套丛书表现了极大的热情与关注。68个全国性学会参与了丛书的组织编写，很多院士、知名科学家在百忙中亲自挥笔，运用通俗的语言、生动的描绘、深入浅出的方式，将科学的奥秘揭示给读者。全套丛书介绍了60多个不同学科的起源、发展历程、著名科学家、重大科技成就，以及未来学科发展的态势，为广大读者特别是高中以上文化程度的各阶层读者提供了一套科学性、知识性、前瞻性、趣味性和可读性相统一的科普读物。希望通过浏览这套丛书，不仅能够帮助广大青少年读者拓宽知识领域，而且对于他们选择未来发展方向起到引导和参考作用。同时，此套丛书通俗易懂，也适合其他不同社会群体的干部与公众阅读。丛书将由山东省出版总社于2001年分两批出版发行。

跨入21世纪的中华民族将面临重新崛起的机遇和挑战，衷心地祝愿充满希望的一代丰获知识的硕果，为我国的繁荣富强贡献出才智和力量，作出无愧于伟大中华的重大业绩！

2001年1月16日

目 录

第一章 什么是声——无所不在的声波	(1)
第一节 什么是声	(2)
第二节 声音是怎样传播的	(9)
第二章 人们是怎样逐步掌握声学规律的	(27)
第一节 灿烂的古代声学	(28)
第二节 经典声学的建立——人们了解声学基本 规律的艰苦过程	(33)
第三节 现代声学——声学在 20 世纪的大发展	(39)
第四节 现代声学的基本内容、地位及与其他 学科的关系	(51)
第三章 环境声学——给人一个安静的环境	(53)
第一节 吵死人了——工业、交通的发展和噪声 污染	(54)
第二节 噪声有多响——分贝	(55)
第三节 噪声对人的影响	(61)
第四节 噪声是怎样产生的	(62)
第五节 怎样使噪声降低	(64)

目
录

第六节	噪声源的判定和机器振动监测·····	(77)
第七节	振动也是一种公害·····	(79)
第八节	以毒攻毒——有源噪声和振动控制·····	(81)
第四章	优美的厅堂音质·····	(85)
第一节	房间内声的传播与反射·····	(87)
第二节	混响时间——建筑声学的开始·····	(88)
第三节	直达声、反射声、混响声的综合效应·····	(93)
第四节	怎样吸声——吸声材料与结构·····	(95)
第五节	怎样设计音质良好的厅堂·····	(99)
第六节	用电声系统能控制音质吗——音质的有 源控制·····	(103)
第五章	电声系统·····	(107)
第一节	传声器·····	(109)
第二节	扬声器·····	(113)
第三节	录声系统·····	(117)
第四节	扩声系统·····	(122)
第五节	环绕立体声·····	(126)
第六章	话不讲不明——语言声学·····	(129)
第一节	语言是人类交往的最重要的工具·····	(130)
第二节	人是怎么说话的·····	(131)
第三节	语音有什么特点·····	(133)
第四节	人讲话的感知过程——人是怎样听懂 话的·····	(137)
第五节	芝麻开门·····	(138)
第六节	让机器讲话——文语转换·····	(149)
第七节	电话翻译——面向21世纪的新技术·····	(154)
第八节	语言通讯·····	(158)
第七章	人怎样听到声音的·····	(161)
第一节	奇妙的耳朵·····	(162)

第二节	听觉研究的历史	(163)
第三节	诺贝尔奖金获得者——冯·贝克西 ...	(164)
第四节	人的听觉器官及其功能——生理声学	(166)
第五节	人耳听声音的能力——心理声学	(173)
第六节	耳朵不好了怎么办	(185)
第八章	音乐之声	(187)
第一节	乐律	(189)
第二节	管乐器	(190)
第三节	弦乐器	(193)
第四节	打击乐器	(197)
第五节	电子音乐	(200)
第九章	海洋声学和地声学——海洋和地壳中的 声音	(205)
第一节	海洋声学的历史发展和作用	(206)
第二节	声在海洋中的传播——只有声波才能 在海洋中传得最远	(210)
第三节	水声在军事上的应用——水下战争的 耳目	(221)
第四节	水声在海洋研究与开发中的应用—— 海洋探测的多面手	(231)
第五节	穿透地层	(240)
第十章	大气声学和次声学——大气中的声音 ...	(247)
第一节	大气中声音研究的历史	(248)
第二节	人耳能听见的声音在大气中的传播 ...	(250)
第三节	次声——频率低到听不见的声音	(253)
第四节	次声为什么能传那么远	(260)
第五节	怎样接收次声——核爆炸监测	(262)
第六节	动物和次声	(268)

目
录

第十一章	超声——高得听不见的声音	(273)
第一节	人是怎么发现和产生超声的	(274)
第二节	透视机械部件的超声——超声检测 ..	(278)
第三节	用超声来测量	(284)
第四节	超声怎么会有许多神奇的作用	(288)
第五节	超声加工和处理	(290)
第六节	超声在医学和生物工程方面的应用 ..	(297)
第七节	声表面波器件——小小晶片能办大事	(303)
第十二章	声波深入物质结构——声与各种场和粒子的相互作用	(305)
第一节	声与光的相互作用	(307)
第二节	声波进入分子领域——分子声学	(311)
第三节	声子——进入微观世界的声波	(312)
第四节	声和热	(315)
第五节	声对化学反应的作用——声化学	(316)
第六节	低温下的奇异现象	(316)
第十三章	动物和声音	(319)
第一节	声音在动物生活中的作用	(320)
第二节	哺乳动物、鱼类、两栖类、鸟类、爬虫类听 得见声音吗——脊椎动物的听觉	(322)
第三节	鸟的鸣声	(325)
第四节	虫鸣	(329)
第五节	蝙蝠是怎样捉虫子的	(330)
第六节	海豚是怎样捉鱼的——海豚声呐	(333)
第十四章	声学展望——畅想曲	(341)

第 1 章

21 世纪学科发展丛书

什么是声——无所不在的声波

第一节 什么是声

一、我们周围的声音

我们生活在声音的世界里。声音无所不在。在城市里，一早醒来就会听见路上的汽车声、邻居的谈话声、走路声、放水的声音、广播的声音。在乡村，也会听见鸡鸣犬吠、拖拉机的声音。即使住在山里，也会听到松涛的声音、鸟鸣的声音、知了和蟋蟀的叫声、丁丁的伐木声。王维的诗说“月出惊山鸟，时鸣春涧中”就是说山中夜静时月亮出来，还会惊醒鸟儿，飞出鸣叫。庙里的老和尚在睡觉时还会听到“僧敲月下门”的敲门声。声音大概有几种，一种是非生物的自然界的声音，风声、雨声、雷声、海浪声、流水声等等，自然界总在不断的运动，伴随着运动就有各种声音。生物界特别是动物界要靠声音来求偶、觅食，发出表示愤怒、警告的声音和报警的声音。在行走捕捉食物和吃东西时，虽然努力悄悄活动，但总是会发出声音。有些动物如蝙蝠和海豚，则是靠发出声波，接收

回声来捕捉小动物的。

声音对人类社会也是极为重要的。人作为动物，在活动时发出声音。人在发明了机器之后，机器的运转发出更多的声音。声音更是社会信息交往的工具。在人类社会发展的漫长的历程中，人们从单靠发出各种简单的声音传递信息和表达感情的阶段慢慢发展成为固定的语言。语言的形成乃是人类社会区别于动物世界的一个重要标志。轻声耳语、促膝谈心、谈情说爱、讨论问题、通知事情、电话联系等都是信息交换的方式。除讲话之外，音乐演奏、唱歌、演剧都是人们的艺术享受。除直接演出之外，还通过广播、电视、电影、录音放音设备，家庭影院等来再现。讲话的要求是听得清楚，没有干扰，而艺术享受除不受干扰外，还要求音质优美，有强烈的感染力。这就要求有很好的电声系统，很好的厅堂音质。人类发展工业技术以后，机器声、汽车声、飞机声使人不得安宁。怎样降低这些噪声，创造一个安静的环境，使人能舒服地生活，也提到日程上来了。声音对人类社会，对于文明的发展，有着极为重要的意义。为了解决这些问题，首先要了解声音是什么，声音有哪些性质，声音是怎样传播的。还要了解人是如何说话的，耳朵是怎么听到声音的。这样人才能更好的利用声音，使声音为人类造福。

二、从水面波浪说起

什么是声音，苏东坡在赤壁赋中说“耳得之而为声”。就是说耳朵听见的是声音。但声学发展了，除了耳朵听得见的声音之外，还牵涉到耳朵听不见的声音。频率特别高的声音，人耳听不见，叫做超声，频率特别低的声音，人耳也听不见，叫做次声。此外，除在空气里传播

的声之外,还有在水中、金属中、木材中、地壳中传播的声,耳朵也不能直接听到。所以声的范围扩大了,不能光说空气里传来的耳朵听得见的才是声了。从物理学来说,声就是介质中的机械波。不论是在水里、空气里、金属里,也不论频率是多少,只要是机械波(或叫弹性波),就是声。

可是,什么是机械波或弹性波呢?首先要说一下什么是波。

水面的波浪是人最常见的波。水面本来很平静,如果在水中投一块石头,就可以看见在石头入水处的周围发生一个个高低相间的圆圈,逐渐向外扩展,愈远圆圈愈大,凸起来的地方高度愈来愈小,整个水面呈现波纹形状。凸出的地方叫波峰,凹进的地方叫波谷。如果在水面放一个小木块,就可以看见它只是上下运动,并不向外漂开,而波却向四周传播开来。风吹过麦田时,麦子也会起伏运动,呈现波浪的形状,人们管它叫麦浪。我们都知道,麦浪不断向前运动,麦子却不会向前运动,它只是在原地摆来摆去,把振动传给旁边的麦子。实际上各种波都有这种情况,介质只是在自己的周围往复运动,并把这运动传给邻近的介质,这种往复运动愈传愈远。

纵波和横波 像水面波浪这种波,水质点做椭圆运动,既有上下运动,也有前后的运动,波是向周围运动,质点的运动与波传播方向有垂直的成分,也有一致的部分,既有横波,也有纵波。

设想在一个极光滑的玻璃板上,用同样的弹簧和球连在一起,隔一个弹簧放一个球,组成弹簧——球——弹簧——球——弹簧——球……这样一长串。如果使第一个球沿长串方向移动一个小距离,然后放开手,就会看到第一个球会在原来位置上沿长串方向往复振动,第二个

球也跟着往复振动,接着第三个球,第四个球……都接着往复振动。各个球都在自己原来的位置上振动,而振动却不断地传出去,这也是波。质点运动的方向和波传播的方向一致,这叫纵波。

介质中的弹性波 我们上面讨论的波都是明显的,眼睛能看得见的波。现在我们要讨论的是空气中的波。它虽然看不见,但道理和弹簧与球组成的链的运动方式很类似。空气和其他气体、固体、液体一样,都具有弹性,也就是具有施加压力时会收缩,施加张力时会膨胀,压力和张力去掉以后会恢复原状的性质。人们在生活中都会感到空气、橡皮等是有弹性的。你用力压一个皮球,它就会变扁,你一放手,它又变成圆的了。经过科学测量可以知道,各种气体、液体、固体都有一定的弹性。大家都知道,这些物质都有质量,也就都有惯性。如果对一个物体施加一个力量,使物体发生运动。那么,在外力停止以后,物体还会继续运动,这就是惯性的作用。在弹性介质中,我们首先考虑气体和液体,如果有一个物体向右运动,紧贴振动体右边的空气就会被压缩,被压缩的气体由于有弹性,它会产生向左向右的推力。而自身由于有惯性,也继续向右运动,向右的推力将使它右边的气体压缩,成为压缩层。由于振动体在这时又向左运动,原来的压缩层的位置变成稀薄层。这时压缩层已转移到更右方了……如此类推,压缩层和稀疏层会相间的向右传播,不断传向远方。这就是弹性波,也就是声波。在液体和气体中,介质质点运动方向是一致的,所以是纵波。在固体介质中由于有切变弹性,在里面传播的波既有纵波,也有横波,比在气体和液体中复杂得多,我们以后再讲。

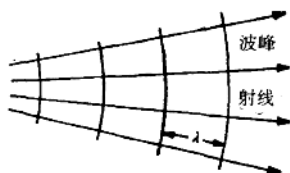
三、声波的参数

上面说的是笼统的定性的概念,要说具体了,就首先要考虑声波的频率、波速和波长。

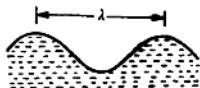
物体每秒振动的次数叫频率,单位是赫。这是为纪念证明电磁波存在的德国科学家赫兹而起的名字。耳朵只能听见频率在 20 赫到 20000 赫之间的声音。比 20 赫低的声音,人听不见,叫做次声。比 20000 赫高的声音人也听不见,叫做超声。现在我们研究的声,频率最低可以到 0.0001 赫,最高可以到 10^{13} 赫。频率从 0.0001 赫到 20 赫,以及从 20000 赫到 10^{13} 赫之间的声,还有在液体,固体传播的各种频率的弹性波,虽然人耳听不见,但在某些方面说来它们的重要性比听得见的声音还要大呢!

声波在各种介质中传播速度不同,有的快,有的慢,这都和介质的特性有关,特别是与它们的密度和弹性有关。声速一般与弹性和密度之比的平方根成正比,还要受温度、压力等的影响。这些问题我们以后再详细讨论。我们这里先要让大家有个简单的概念,声在空气中在室温下传播的速度是 340 米/秒,在海水中的声速是 1500 米/秒,在金属中声速一般是 3000—5000 米/秒。

水面波浪传播时,在空间是凸起来的波峰,和凹下去的波谷相间,两个相邻波峰之间或两个相邻波谷之间的距离称为波浪的波长。同样在声波中,两个相邻的压缩峰或两个相邻的稀疏峰之间的距离就是声波的波长。波长与频率的乘积就是声速。在同一介质中,声速是一样的,所以声的频率愈高,波长愈短,声的频率愈低,波长愈长。空气中频率到 0.0001 赫的次声,波长可以到 3400 公里,而频率在 10^{13} 赫的最高频率的超声波长为 0.05 微米,在晶格尺寸范围。



(a) 一系列波峰和表示传播方向的射线



(b) 水波



(c) 弹性波

声压、声强、声功率 声压 P 是声波存在时作用在单位面积上的压力,单位是帕。相对于大气压力而言,一般说来,声压是很小的。

声波的强度是由它携带的能量决定的。在与声传播方向垂直的面上,画一个 1 平方厘米的小方框,每一秒钟通过这小框框的能量就是声波的声强。声波在传播的时候,介质中有压力扰动,在静压力之上的多变的压力就是声压。声压的单位是帕,也就是一个大气压的十万分之一。对平面波来说声压 P 与声强 I 的关系是 $I = P^2 / \rho c$, 式中 ρ 是空气的密度(正常情况下 $\rho = 1.2$ 千克/米³), c 是声速,在常温下为 340 米/秒。

声强 I 原来只能通过声压 P 的测量,然后换算。最近出现了声强计,可以直接测量声强。

声源向外辐射声能,它在单位时间内辐射的总能量叫做声源的功率。如果有一个点声源,在它外面画一个半径为 r 的球,球面上的声强为 I ,则这个声源的功率就是 $4\pi r^2 I$ 。

一般声源声功率实际上是很小的,如轻声耳语,声功率是 0.01 微瓦,客厅中小声交谈大约是 1 微瓦,正常谈

图 1-1
弹性波和水波