

# 现代声学评述\*

沈 喙

(中国科学院声学研究所)

本文介绍了声学发展的概况和它与其它学科的关系,阐述了在经典声学基础上发展起来的现代声学体系,讨论了现代声学中主要分支学科的内容和80年代现代声学的进展,最后指出了由于数字技术和微处理机的应用,声学中的理论工作,实验测量技术,以及为改善听闻条件的高保真录音、放声技术,已出现一个新的飞跃。

## 一、声学发展的概况

声学是物理学的一个分支,但与工程技术密切相关,它是研究声的产生、传播、接收和效应等问题的科学,起源于有关听觉和语言现象的解释。从狭义上说,声是指人耳能听到的声音。一般说来,声是弹性媒质中传播的机械扰动,例如压力、密度、质点位移、质点速度等的变化。为了明确起见,前者称为声音,后者称为声波。在17世纪以前,声学的内容主要是对音乐和乐器的研究。17—19世纪,已经对物体振动和声波的产生原理作了详尽的研究。从那时起,人们通常把声波理解为“可听声”的同义词。1878年,瑞利在《声学理论》一书中用统一的观点系统地讨论了声学的内容,例如弦、膜和板的振动,声波的传播和辐射,驻波和反射、衍射等现象。该书是经典声学的总结。在经典声学中,声、音和乐都是指可以听到的现象。声是指声波,但也指由声波作用到人耳引起的感觉。应该注意声和音是有区别的,不能混淆,音是有调的声。直到19世纪末,声源仅限于人声、乐器、哨子和音叉,而能接收声波的仪器只有人耳。从20世纪20年代以来,随着电子学的出现和放大器的应用,声学获得了迅速发展。按照声波的频率可以把声分为次声、可听声和超声。可听声的频率范围为20—20000Hz,从20Hz向下延伸到 $10^{-4}$ Hz为次声,而由20kHz

向上延伸到 $5 \times 10^8$ Hz为超声,再向上延伸到 $10^{12}$ Hz为特超声。按照传播声波的媒质和其应用可以划分为空气声,超声和水声等。由于现代声学涉及很宽的频率范围( $10^{-4}$ — $10^{12}$ Hz)和不同媒质(气体、固体和液体),一般说来在不同频率范围和不同媒质中,虽然物理原理基本相同,但技术和设备差别很大,因此形成了应用于各个范围的分支学科,几乎涉及人类活动的每一方面。

现代声学是在声学研究中应用电子技术而发展起来的,实验基础是电声测量技术。电声学对现代声学的发展起了决定性作用。目前由于数字技术和大规模集成电路的发展,采用微处理机的测量技术使声学测量的速度和精度都得到提高,并且实现了过去不能采用的许多新的测量方法,例如频谱实时分析,声强测量、相干测量、声源鉴别、信号处理技术等。现代数字技术和实验手段将使现代声学获得进一步的发展。

## 二、声学和其它学科的关系

声学几乎触及人类活动的每一方面。人们是生活在声的环境中。因此,医学、心理学、生理学、生物学、语言和音乐、通信和广播、计算科

\* 根据作者在中国科学技术大学研究生院开设的“近代声学”课程的讲稿整理而成。

学、机械工程学、海洋学、电工学等在不同程度上都和声学发生联系。现代声学不但渗透到物理学的各个分支，而且也广泛地渗透到其它科学技术领域。现代声学的交叉学科性质十分明显，一些分支学科的名称就反映了两种不同的学科结合形成的新分支学科，例如声学 and 电子学形成电声学，声学和建筑学形成建筑声学，其它如音乐声学，心理声学，生物声学等都是交叉分支学科。声学可由许多新的发现而不断改变其研究方向，从而产生了新的研究课题。但随着研究工作的深入一些新研究领域逐渐脱离了声学，变成独立的分支学科或其他学科的一部分。因此现代声学的发展，一方面包含了许多其他学科领域内的工作，另一方面又不断把研究内容转交给其它科学技术领域。现代声学的范围不十分明确，可以很大，也可以不太大。从研究人员的构成也反映出学科的特点，从事声学工作的队伍越来越大，但基本科研人员的数量变化不大。

各扇形面积是声学的各个分支学科，外环中各扇形面积是声学各分支的应用范围，最外面是分属各学科的五大类。

### 三、现代声学体系

声学是一门古老的科学，它对技术的发展有过许多贡献。技术的发展又促进了声学的进展，从而形成了现代声学。电声学就是这种相互影响的典型例子之一。电声学主要研究电声换能原理，有时也泛指用电子器件来产生、探测和控制声音的技术。包括利用电子技术来产生各种频率、波形和强度的声音，有关声音的接收、放大、传输、测量、分析和记录等技术，但从频率范围来看主要在可听声的频段。因此它与人类社会的政治和文化生活密切相关，并且一直影响着其它分支学科的发展。建筑声学是现代声学中最早发展起来的分支学科。它研究建筑中的声学问题，处理厅、堂、楼、馆等的声学设计。它不但研究建筑对声波传播的影响，而且探讨建筑材料的声学特性和噪声防止问题。50年代以来，为了重建被战火毁坏了的大型厅堂、剧院、音乐厅等，室内音质问题的研究受到重视，从而发展了室内声学。它研究房间的音质控制技术，主要包含关闭空间内声波传播和音质问题。由于工业交通业的巨大发展，产生了以噪声控制为主的技术，研究获得容许噪声环境的声学 and 评价技术，也包含有关噪声环境法令、政策、噪声防止和减噪技术。噪声控制技术主要采用吸声、隔声、减振、阻尼和防护等手段。从噪声源、传播途径、防护三方面将各种环境下噪声降低到容许的最高噪声级标准。在强噪声方面，主要研究喷气噪声、冲击波和附面噪声的产生和估算方法，金属板的声疲劳和精密电子仪器的声失效的理论和实验，强噪声对人的非听觉器官效应等。上述各方面的研究工作汇合成环境声学，它是研究噪声的发生、测试、评价、作用和控制等技术问题，特别是人类活动与声环境有关的问题。利用并发展了建筑声学、室内

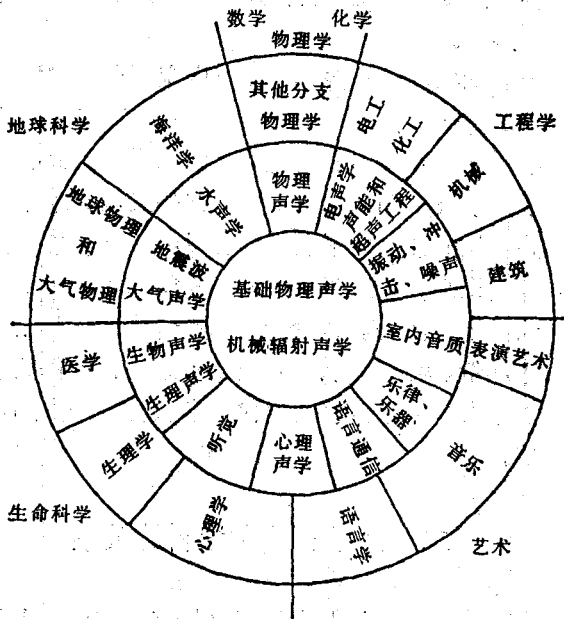


图1 声学分支和它们与科学技术及文化艺术的关系

图1表示现代声学的各个分支学科和它们的基础理论和其它科学技术和文化艺术之间的关系。图中中心圆内是现代声学的基础，在圆外有两个同心环并分成若干扇形面积。内环中

声学 and 噪声控制技术,目的是要减少环境污染,创造适合于人们生活的环境。例如,安静的休息环境、清晰的谈话环境、音质优美的欣赏音乐的环境。超声学研究频率大约高于 20kHz 的科学技术,显然它超出了经典声学的范围,但是却在十分广泛的领域中获得应用。例如超声检测、超声处理和超声诊断等。特超声研究频率 500MHz 以上声波的产生和利用。特超声的频率已接近热骚动的频率,它可以直接和声子发生相互作用,也能和电子、空穴和铁磁材料中的自旋波发生相互作用,形成了分子声学。在第一次世界大战中,把超声应用于水下,并研究了声波在海水中的特性和应用,形成一门独立的分支学科,称为水声学。水声学研究海水中声波的产生、传播和接收的科学,它是以经典声场理论和近代信息理论作为基础,采用数字信号处理技术而发展起来的。其中大部分理论和空气中声波理论相同,但实验设备和技术完全不同。这种差别主要由于水的特性阻抗大约是空气特性阻抗的 3600 倍所引起,它意味着水中的声波的位移小、压力大。水声学已广泛用于国民经济建设和国防建设中。其研究内容主要包括水声传播理论用分层介质模型来说明水中声波传播过程中最本质的特性,以解释海水中声影区和会聚区等现象,对探测目标有影响的回声,海洋混响以及海洋环境噪声等,它还研究水声换能器及水声材料,水下声信号的检测和识别技术。

对听觉和发音器官的研究发展了生理声学和心理声学。由于语言通信和广播的需要发展了语言声学。声波是人们传递思想感情的重要手段。声波传递信息的过程还涉及到把人们的思想活动编码为发音器官的运动过程,以及声波形态在听声音时听觉系统中的识别和理解过程。生理声学研究听觉和发音器官所涉及的生理学问题,例如发音过程和听觉机理等。心理声学研究空气中声波刺激听觉器官引起的心理学效应,主要研究声音的主观感觉和客观参数之间的关系。语言声学研究语音的声学特性,语音的感觉,语言通信质量,语音处理等问题。

物理

最近开展了语音分析合成以及语言辨认和识别的研究。此外还有非线性声学、音乐声学、生物声学、大气声学、湍流声学、等离子体声学、宇航声学等分支学科。非线性声学研究大振幅波传播的非线性现象和强噪声的效应。音乐声学是研究乐音和乐器的科学。最近电子乐器的研究工作进展很快,例如研制了多音色、多功能的电子钢琴等。生物声学是研究动物产生声音和它们的行为(例如动物间的通信和有关定位能力)的科学。大气声学研究声波和冲击波在大气中产生、传播、接收、衰减等问题。次声波在大气中传播时吸收甚小,因此大气声学的主要内容是研究次声的产生、传播和接收等问题。湍流声学研究高速度气流或水流中所发生声波和已生成的湍流构造的科学。等离子体声学等研究等离子体运动受外加磁场和电场的影响。宇航声学研究喷气发动机和火箭喷管在飞行时由于燃烧过程所产生的噪声以及宇航飞行的有关声学问题。上述各个方面的分支学科组成了现代声学体系。

#### 四、现代声学的特点

在经典声学基础上发展起来的现代声学具有下述几个特点:(1) 现代声学中基础理论问题的研究较少,大部分基础理论已比较成熟并在经典声学中有比较充分的发展;(2) 声学技术的应用非常广泛,一些应用基础理论在不同范围内的应用研究得较多;(3) 声学的媒质范围越来越广泛,包含一切气体、液体和固体,媒质所处的环境也向高温或低温,高压或低压等极端条件伸展;(4) 目前现代声学已广泛渗透到物理学其它分支学科和其它科学技术领域以及文化艺术领域中,形成许多边缘分支学科,各分支学科有相对的独立性,但分支学科之间有交叉,有渗透;(5) 现代声学研究工作涉及声子运动,声子和物质的相互作用,可用来研究物质内部结构,所以现代声学既有经典性质,也有量子性质;(6) 现代声学的实验条件基于电声测量技术,但由于数字技术和微计算机的应用,

使研究工作不断深入并开拓新的内容，因此使学科有新的发展。

## 五、现代声学的主要内容和进展

现代声学可以说内容丰富，发展迅速。下面就目前发展较快的几个重要分支学科的内容和成就以及它们在国民经济中的作用概要地作一介绍。

### 1. 电声学

电声学是研究声能和电能相互转换的原理、技术和应用的科学。过去主要研究电声换能器，利用炭粒之间的电阻，极板之间的电容，电磁作用，电动原理，压电效应，驻极体效应，磁致伸缩效应等来设计各种不同的换能器，使用的频率范围低到毫赫以下，高达京赫以上。换能器的设计方法不断得到改进，在可听声频率范围内力求开发宽频带、低失真的高保真器件。电声设备的发展涉及声音的记录和重发，特别是磁带录音机和密纹唱片已相当普及。在电声学中，近年来应用研究较多，电声换能器的新结构、新工艺、新材料都有进展，研制的气流扬声器的声功率已可达 10kW。电声器件的设计早期采用动力类比法，最近利用有限元法和激光全息测量详尽地分析了膜片的振动。新的换能器件还不断地发展着，其方向是宽频带、高效率、高灵敏度和大功率。此外电声器件和设备研制已转向医疗诊断方面的应用，例如听力计、助听器、中耳阻抗仪、听诊器等。最近磁带录音设备有较大的进展，降噪系统的使用解决了宽频带与低磁带速度的矛盾。人工混响、延时系统、高保真系统和立体声的开发改进了声音重发的音质。因而高保真立体声 (Hi-Fi Stereo) 的开发使家用电声设备日益受到欢迎。由于双通路立体声盒式磁带机的普及，电声系统进入了千家万户，不但可以听广播、录音，而且作为电化教育工具，推动了电化教育。电声学可以直接用于通信和广播。由于高质量多通路放声系统的发展和集成电路的使用，电声设备向着宽频带、高效率、低畸变方向发展。一

些电声设备中已采用数字技术和大规模集成电路，促进了设备的小型化、数字化和自动化。随着数字技术和大规模集成电路的发展，开创了数字声频技术，其中脉码调制录音机、激光声频唱片、数字式盒带录音机和激光磁性唱片已经使声音的记录和重发达到了完美的程度。数字广播的实现无疑将会进一步提高广播质量。

### 2. 超声学

超声学的主要内容是超声换能器设计和它的应用。早期使用哨和旋笛式超声发声器。机电型超声发声器的出现革新了超声波技术。在机电超声发声器中主要利用磁致伸缩、压电效应、电致伸缩三种物理现象。超声波应用于水下形成了水声学。但是超声波在工农业生产中有极其广泛的应用，包括超声检测、超声探伤、功率超声、超声处理、超声诊断、超声治疗等。超声在工业中可用来对材料进行检测和探伤，可以测量气体、液体和固体的物理参数，可以测量厚度、液面高度、流量、粘度和硬度等，还可以对材料的焊缝、粘接等进行检查。超声清洗和加工处理可以应用于切割、焊接、喷雾、乳化、电镀等工艺过程中。超声清洗是一种高效率的方法，已经用于尖端和精密工业。大功率超声可用于机械加工，使超声在拉管、拉丝、挤压和铆接等工艺中得到应用。应用在医学中的超声诊断发展甚快，已经成为医学上三大影象诊断方法之一，与X线、同位素分别应用于不同场合，例如超声理疗、超声诊断、肿瘤治疗和结石粉碎等。在农业中，可应用超声对有机体细胞的杀伤的特性来进行消毒灭菌，对作物种子进行超声处理，有利于种子发芽和作物增产。此外超声的液体处理和净化可应用于环境保护中，例如超声水处理、燃油乳化、大气除尘等。微波超声的重点放在微波电子器件，已经制成了超声延迟线、声电放大器、声电滤波器、脉冲压缩滤波器等。在超声探伤方面发展了声发射技术和超声全息技术等。

### 3. 水声学

水声学在军事上可用来侦察潜水艇，在经济建设中可用水声技术开发和利用海洋资源。

例如对水下目标的探测、跟踪和识别,实现水下信息的超距离传播,探查海洋和海底资源,勘探海底石油和矿藏。为了有效地实现水下探测,人们研究了声波在海洋中的传播规律,建立了正确的水声信道模型,揭示了海洋环境因素对声场的影响。海水中声场研究的内容包括:声场的空间结构和声波的衰减规律,波形在传输过程中的畸变,从环境噪声中提取有用信号的技术。此外,水声技术还可用于绘制海底地貌,清理航道,进行水下导航和定位,探测鱼群等。核潜艇出现后,作为反潜防潜的各类声纳系统已成为近代海军不可缺少的设备。水声学的研究已经取得了很大的进展,开发了大型声纳工程及交通运输中民用水声设备,并且已经应用于海洋资源开发。在水声物理中,浅海声场理论的研究具有符合我国海岸实际的特色。

#### 4. 环境声学

环境污染的产生与发展同人类的生产活动和社会制度密切相关。由于人们认识事物的能力和科学技术水平的限制,在生产发展过程中也带来了环境污染。应该注意,环境污染和防治不但是科学技术问题,也是社会和政治问题。根据美国的调查,大约有 8000 万人受到噪声的有害影响,4000 万人面临听力损失较严重的威胁,而在居民区大约有 1300 万人居住在 70dB 以上地区,有 1 亿人在 55dB 以上的地区居住,受到噪声干扰。噪声污染是环境保护中主要问题之一,它不仅损害人们的生活和工作环境,影响人们的健康,还妨碍工业的发展。强烈的噪声影响人们的工作和休息,产生职业性耳聋,影响加工精度。而在特高强度噪声的作用下,金属结构可能产生疲劳和损伤,精密仪器可能失效,对航空航天飞行影响严重。目前对金属板材的声疲劳已作了大量研究工作,理论和分析得出的 SN 曲线可用来设计抗疲劳金属结构。对声源发声机理、发声部件以及振动体和声场的分析及计算,无论在理论上或实验技术方面都有进展。国际噪声会议于 1978 年提出 80 年代是“从噪声源控制噪声”的年代。在应用基础

理论方面,对喷气噪声和撞击噪声的产生机理,大振幅声波的非线性现象,音质评价,噪声的主观评价,强噪声的物理和生物效应等都有进展,它有力地改善了噪声环境。

#### 5. 语言声学

语言声学的研究内容包括人类产生语音的机理,言语分析和合成,言语识别。为了描述语音声波的信息要素,提出了频谱、共振峰、跨零点、自相关系数、线性预测系数等概念。对语言信号提出了清晰度、可懂度、清晰度指数、自然度等音质评价概念。清晰度试验是在给定条件下为测量语言可懂度而广泛用于心理声学的方法,既包括语言又包括听觉的直接方法。语言分析是从信号中提取语言信息成分并将其编码,而语言合成则是利用编码信号来产生语言的过程。语言分析和合成的目的是压缩频带传送语言信号,以节省传输信道。最近人们提出了调制转移函数概念,由测得的调制转移函数可以计算语言传输指数,它与清晰度试验获得的语言可懂度有高度的相关性,从而可以将客观量与主观评价结果联系起来,简化了对厅堂和扩声系统语言可懂度的评价。语音识别可以允许用口令控制机器,自动速记(语言打字机,语言排版机)和不同语言的转换(语言翻译机)等。近 10 年来,语言声学越来越多地使用电子计算机。80 年代语言声学的主要进展是研制了各种语言机器,进一步的研究工作是设法使电子计算机接受语言口令,识别讲话人并用语音回答问题。这些工作将使电子计算机的信息输入和输出方式发展到一个新的水平。

- [1] H. H. 安德列耶夫著,冯秉铨译,声·声学(苏联百科全书),高等教育出版社(1957),1—29.
- [2] 马大猷、沈 曦著,声学手册,科学出版社,(1986),1—25.
- [3] H. 弗莱彻尔著,沈 曦译,声学(科学技术百科全书—4),科学出版社(1984),44.
- [4] 沈曦编,物理学词典(声学分册),科学出版社(1986),1—3.
- [5] 马大猷,声学(中国大百科全书——物理学),中国大百科全书出版社(1987),947—952.