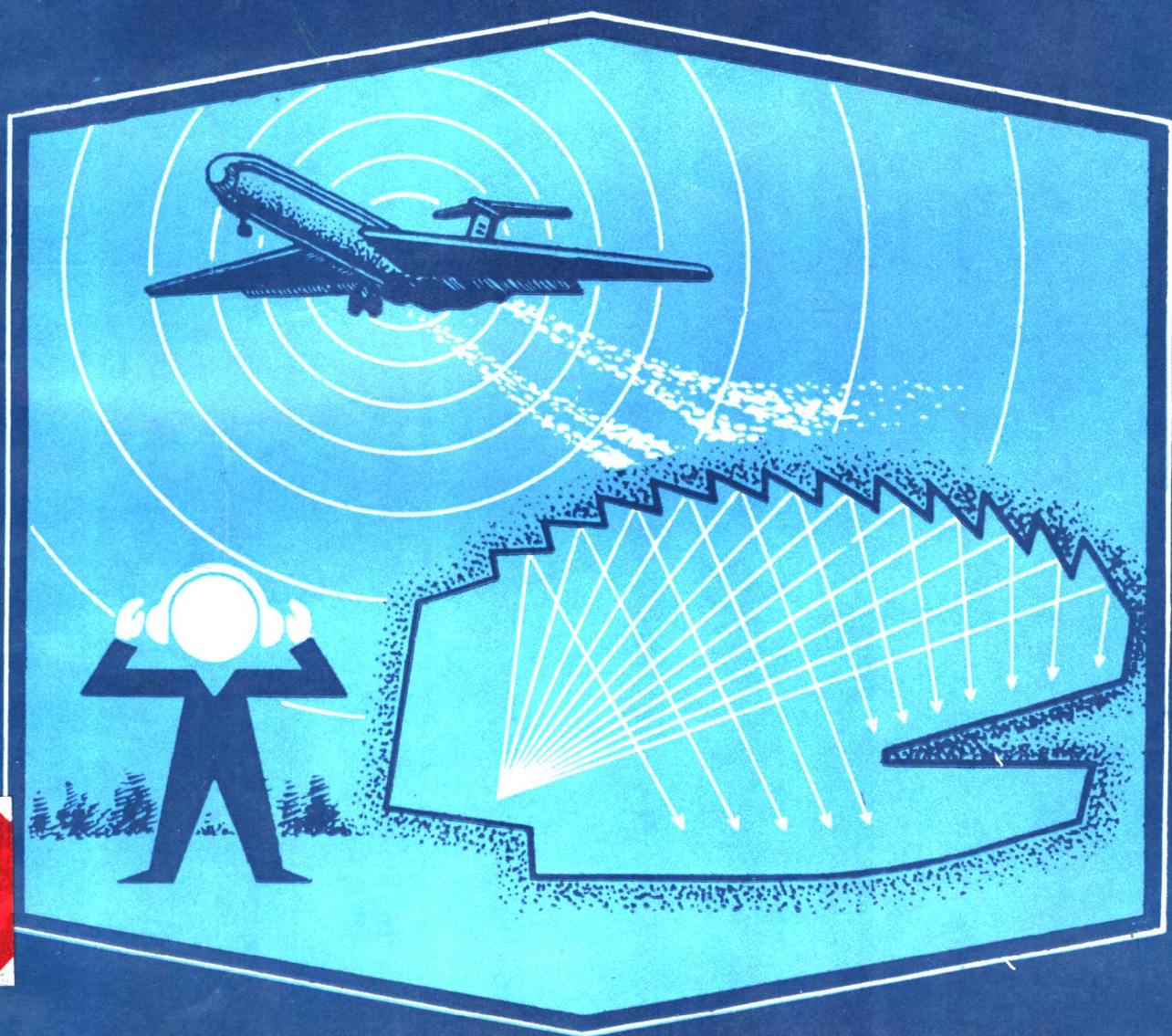


环境声学基础

HUAN JING SHENG XUE JI CHU

孙广荣 吴启学 编著



南京大学出版社

环境声学基础

孙广荣 吴启学 编著

南京大学出版社

1995·南京

(苏)新登字 011 号

内 容 提 要

本书着重于环境声学的原理和应用技术基础,深入浅出地阐述声波传播的物理规律和人对声音的主观感受,在此基础上专门介绍大环境(户外声)和小环境(室内声)的声学评价和设计、噪声控制和测量技术。

本书可作为声学、建筑物理、环境物理和工业噪声控制、音响工程等专业不同层次的教学用书和有关工程技术人员的参考书。

环 境 声 学 基 础

孙广荣 吴启学 编著

南京大学出版社出版

(南京大学校内 邮政编码: 210093)

江苏省新华书店发行 丹阳市新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.125 字数 353 千

1996年3月第1版 1996年3月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-305-02765-0/O·194

定价 10.80 元

目 录

绪 论 从建筑声学到环境声学	(1)
第一章 声的传播	(4)
1.1 描述声波的物理量	(4)
1.1.1 声波的概念	(4)
1.1.2 频率、波长、声速	(4)
1.1.3 平面波、球面波、柱面波	(7)
1.1.4 质点振动速度、声压、声强、声能密度	(8)
1.1.5 声源辐射功率	(10)
1.1.6 声源辐射的近场区和远场区	(10)
1.1.7 级和分贝	(11)
1.1.8 声信号的频率特性和时间特性	(11)
1.2 户外声的传播	(15)
1.2.1 户外声传播的发散规律	(15)
1.2.2 空气吸收的附加衰减	(19)
1.2.3 地面不同情况的声吸收	(21)
1.2.4 气象条件对声波传播的影响	(21)
1.3 声波遇到边界面和障碍物时的传播	(23)
1.3.1 反射与吸收	(23)
1.3.2 透射与隔声	(24)
1.3.3 散射与绕射	(24)
1.3.4 干涉与叠加	(25)
1.4 声波在封闭空间中的传播	(28)
1.4.1 简正模式和简正频率	(28)
1.4.2 稳态频率响应	(31)
1.4.3 稳态声压级	(34)
1.4.4 混响时间	(36)
1.4.5 脉冲声响应	(41)
第二章 人对声音和振动的响应	(44)
2.1 听觉机构简介	(44)
2.2 声音的主观感受	(45)
2.2.1 听阈与痛阈	(45)
2.2.2 最小可辨阈	(46)
2.2.3 等响曲线与响度级	(46)
2.2.4 响度	(48)

2.2.5	感觉噪度与感觉噪声级	(50)
2.2.6	脉冲声的响度感觉	(51)
2.3	掩蔽效应和临界带宽	(51)
2.4	方位感	(53)
2.5	噪声暴露对听觉和健康的影响	(55)
2.5.1	年龄对听阈的影响	(55)
2.5.2	噪声引起的听力损失	(55)
2.5.3	噪声的其他生理效应	(56)
2.6	振动对人的影响	(57)
2.6.1	振动在人体中的传递	(57)
2.6.2	人对振动的感受	(57)
2.6.3	振动的危害	(58)
第三章 噪声基本评价量和环境噪声评价		(60)
3.1	噪声基本评价量	(60)
3.1.1	A 声级 L_A 和其它计权声级	(60)
3.1.2	等效连续 A 计权声压级 $L_{Aeq,T}$	(62)
3.1.3	声暴露级 L_{AE}	(62)
3.1.4	噪声暴露量 $E_{A,T}$	(63)
3.1.5	统计声级 L_{AN}	(63)
3.1.6	语言干扰级 SIL	(66)
3.1.7	噪声评价曲线 NC、NR、NCB	(66)
3.2	城市区域环境噪声评价	(70)
3.2.1	评价量	(70)
3.2.2	限值标准和评价方法	(72)
3.3	交通噪声评价	(73)
3.3.1	城市交通干道噪声	(73)
3.3.2	铁路噪声	(75)
3.3.3	航空噪声	(76)
3.4	工厂噪声评价	(79)
3.5	振动的评价	(80)
3.5.1	全身性振动暴露的评价	(80)
3.5.2	居住区域环境振动的的评价	(82)
3.5.3	手传振动的的评价	(84)
3.6	环境噪声影响评价	(86)
第四章 厅堂音质评价和音质设计		(88)
4.1	音质的主观听感评价	(88)
4.1.1	语言易懂度和清晰度	(88)
4.1.2	清晰度指数	(91)
4.1.3	快速语言传递指数	(94)
4.1.4	音乐的听感评价	(96)

4.2	评价厅堂音质的客观物理量	(97)
4.2.1	声压级	(97)
4.2.2	本底噪声	(97)
4.2.3	传输频率特性和声场均匀性	(99)
4.2.4	最佳混响时间	(99)
4.2.5	与反射声时空分布有关的物理量	(101)
4.3	厅堂音质设计	(105)
4.3.1	厅堂音质设计的一般步骤	(105)
4.3.2	声压级的计算	(107)
4.3.3	混响时间的计算	(108)
4.3.4	反射面的处理	(112)
4.3.5	各类建筑物的注意问题	(115)
4.4	厅堂扩声系统设计	(117)
4.4.1	扩声系统概述	(117)
4.4.2	传声器	(119)
4.4.3	扬声器	(120)
4.4.4	扩声设备	(124)
4.4.5	总体设计	(127)
4.4.6	反馈啸叫的抑止	(129)
第五章	噪声控制基础	(130)
5.1	概述	(130)
5.2	吸声降噪	(131)
5.2.1	吸声降噪量的估算	(131)
5.2.2	多孔性吸声材料	(133)
5.2.3	共振吸声结构	(135)
5.2.4	空间吸声体	(139)
5.2.5	多共振塑料空腔吸声体	(139)
5.3	隔声	(140)
5.3.1	单层隔层的传声损失	(140)
5.3.2	双层隔声结构	(145)
5.3.3	隔声设计的几个实际问题	(147)
5.4	声屏障	(151)
5.5	振动控制	(153)
5.5.1	振动的隔离	(153)
5.5.2	阻尼减振	(157)
5.5.3	楼板撞击声的控制	(155)
5.6	消声器	(160)
5.6.1	消声器的设计要点	(160)
5.6.2	阻性消声器	(161)
5.6.3	抗性消声器	(165)
5.6.4	有源消声减振	(168)
5.6.5	排气消声器	(170)

第六章 声的测量	(175)
6.1 声场条件	(175)
6.1.1 自由声场和消声室.....	(175)
6.1.2 扩散声场和混响室.....	(176)
6.1.3 正确选用消声室与混响室.....	(176)
6.2 测试信号	(177)
6.2.1 纯音信号.....	(177)
6.2.2 噪声信号.....	(177)
6.2.3 脉冲声和猝发声.....	(177)
6.3 声和振动测量系统的基本设备	(178)
6.3.1 接收器.....	(179)
6.3.2 分析设备.....	(183)
6.3.3 读出设备.....	(185)
6.3.4 声级计.....	(185)
6.4 建筑声学测试	(189)
6.4.1 吸声材料吸声系数及声阻抗率的测量.....	(189)
6.4.2 隔声测量.....	(194)
6.4.3 厅堂音质测试.....	(198)
6.5 声源声功率级的测定	(201)
6.5.1 消声室和半消声室精密法.....	(203)
6.5.2 反射面上方自由声场条件的工程法.....	(204)
6.5.3 简易法.....	(208)
6.5.4 混响室精密法.....	(208)
6.5.5 混响室工程法.....	(209)
6.5.6 声强的测量.....	(210)
6.6 环境噪声测量	(214)
6.6.1 城市交通噪声的测量.....	(214)
6.6.2 机动车辆噪声测量.....	(215)
6.6.3 城市区域环境噪声测量.....	(215)
6.6.4 航空噪声测量.....	(217)
6.6.5 生产环境的噪声测量.....	(218)
6.6.6 噪声降噪效果的测量.....	(219)
6.6.7 消声器消声特性的测量.....	(219)

绪论 从建筑声学到环境声学

人类生活在充满着声音的世界上：语言用于交流思想、表达情感；音乐丰富了精神生活，给人以美的享受；各种噪声干扰了人们工作和生活的安静环境。如何使需要听到的声音听得好，将不需要的声音控制到不受影响的程度，这一直是近百年来声学研究的一个重要方向。

1900年，W. O. Sabine发表了题为“混响”的著名论文，开创了建筑声学的研究史。Sabine的混响时间参量，一直是评价厅堂音质的主要物理量，并且是迄今为止还能作定量设计的物理参量。继Sabine之后，许多人对混响时间进行了理论和实验的深入研究，以及关于隔声和吸声的研究。1932年V. O. Knudsen出版了《建筑声学》。当时建筑声学主要包括室内音质和隔声两大部分，前者的核心是最佳混响时间，后者是以“质量定律”为基础的隔声理论。1936年，P. M. Morse出版了《振动与声》，从波动声学观点系统论述了声波的产生与传播，以封闭空间中的简正振动模式，解释了低频段室内声场的不均匀性和随时间衰减的不规则性。至此，建筑声学在30年代从理论(以波动声学、几何声学、统计声学来研究和说明室内音质问题和隔声原理)到实际(各类厅堂的设计要求和各种材料的吸声、隔声参数测量)已初步形成一门系统的学科。

二次大战后的建设，促进了建筑声学的应用和发展。上述的《振动与声》在1948年出了第二版；1950年，V. O. Knudsen和O. M. Harris出版了《建筑中的声学设计》；1954年L. L. Beranek出版了《声学》；在1949、1950和1961年，西德的L. Cremer先后出版了室内声学的“几何声学”部分、“波动声学”部分和“统计声学”部分，并在1978年和H. A. Müller共同修改再版，书名为《室内声学的原理和应用》。建筑声学和扩声系统知识开始普及，声学家直接承担了建筑中的声学设计任务。

1951年，英国皇家节日音乐厅竣工，由P. H. Parkin等人负责声学设计，竣工后专门进行了系统的测量，对混响时间偏短的缺点，还用“辅助共鸣”的电声系统给以补偿。经过精心设计、施工、调整的英国皇家节日音乐厅，音乐效果达到了空前的水平，这是音乐厅声学的里程碑，标志着建筑声学理论在实践应用中取得了很大的成功。

然后，进一步实践表明，更多的情况是设计效果往往与所期待的并不一致；即使达到了“最佳混响时间”的要求，主观听感仍可能有较大差别。因而在50年代掀起了室内声学研究的新高潮——寻找除混响时间以外的对室内音质也起重要作用的“第二参量”。当时流行的一种观点认为房间的形状应使室内声场的“扩散”要好，提出了若干种关于扩散的描述以至定量计算。其实当时对厅堂音质所要求的所谓“扩散”，其概念是模糊的，因为它并不等同于与“自由声场”相对的“扩散声场”所定义的物理条件。所以那些新参量，有的并不能很好地说明问题，有的被证明并不独立于混响时间，有的可以定性地说明问题，但离定量评价和设计还相去甚远。然而在这一进程中，有一个被共同接受的观点：混响时间概念源于稳态声

的衰减,然而实际的语言或音乐信号则更多地是具有脉冲特性的非稳态声源。必须指出的是“Haas 效应”具有重要意义。1951 年 H. Haas 发表了“单个回声对语言感知的影响”的论文,他发现 30 毫秒以内的延迟声加强直达声的响度感,间隔 50 毫秒以上的延迟声就有回声感。这一结论成为音质设计处理反射面时所需遵循的一个原则。有关延迟声的时延、强度和方位感的实验结果还对立体声放声系统设计有重要指导意义。

为了设计好纽约林肯中心的 Philharmonic 音乐厅,L. L. Beranek 在 50 年代末调查了 20 多个国家的 54 个音乐厅,于 1962 年出版了《音乐、声学 and 建筑》的长篇专著,他认为要有好的音质,除对混响时间、直接声强度、混响声响度等参数有一定要求外,特别提出了对直接声与第一次反射声之间的“初始时间延迟隙”应小的要求。这一观点至今还没有人持异议,然而在 1962 年 Philharmonic 音乐厅落成时的效果却令人失望,遭到一片批评声。这一典型例子说明,到这一时期,已有的建筑声学知识可被用以设计一个好的以传播语言为主的厅堂和没有严重缺陷的具有一般音乐要求的厅堂,但对有最高水平的音乐厅来说,还有重要的物理条件和生理、心理因素未被掌握,而这是一项更深层次的复杂难题。在 60 年代以后,只有少数室内声学专家持续地进行音质理论研究。

近 20 年来对音质研究的重要特点,是突破了只用单只传声器接受反射声系列来寻找物理参量,而是从人的“双耳听闻”特点出发,开展了各种双耳测听的物理测量和主观听感的研究。1968 年 A. H. Marshall 提出了“早期侧向反射声”对音质起重要作用的观点。Y. Ando 在 70 年代做了一系列模拟双耳接受的“内双耳相关”的实验研究,说明音质与反射声的水平方向分布有关。M. R. Schroeder 也指出古典剧场高而窄,并有包厢和大的装饰建筑,产生较多的侧向反射声,所以音质好;现代剧场多为扁平状,缺乏早期侧向反射声,音乐演出效果差。M. Barron 近 20 年来一直从事于对不同方向、不同强度、不同时延的反射声的主观效应进行研究,得出结论为:过短时延和过高声级的反射声有声像漂移或染色效应,过长的时延有回声的感觉;只有大约 5~80 毫秒之内的反射声并且有足够多的侧向反射声能量,才会有称之为“空间印象”的好的音乐效果。这些研究大体上有相近的定性的结论,但还未达到像混响时间那样可以进行定量设计的程度。

音乐是艺术,厅堂建筑也往往是艺术占首位。建筑声学,特别是室内声学中的厅堂音质问题,是科学为艺术服务的学科。艺术欣赏具有强烈的主观色彩。大半个世纪以来音质的主客观评价研究一直没有达到完善的境地,这一方面是厅堂的物理参量复杂,还有未被掌握的因素存在,另一方面更因主观评价参量也难于统一,因为音质好坏是与节目内容、民族特点、观众习惯甚至个人爱好有关,故而音质评价这一高深课题的研究似乎是永无止境的。

建筑声学的另一方面内容是保证有足够低的本底噪声。最早发展的是隔声理论,到 1942 年,L. Cremer 考虑了隔层的弯曲振动,得出了无限大单层隔声的全面的理论解释。50 年代发展了轻结构多层隔声,并且从隔声扩展到包括隔振、吸声、消声在内的较全面的噪声控制技术。

正当室内声学处于高层次的艰难历程,现代工业和交通飞速发展,却伴随着出现大量的噪声问题。噪声妨碍人的健康,影响人们的工作和休息,干扰精密机械、仪器的运转,高强度噪声还会损坏房屋和建筑……。因此 60 年代前后,“噪声控制”作为一门独立学科从建筑声学中分离出来,得到迅速发展。不少建筑声学专家也把研究方向转为噪声及其控制。反映这一变化的是美国建筑声学大师 L. L. Beranek 主编了《噪声与振动控制》,而

C. M. Harris 则主编了《噪声控制手册》。1971 年开始,每年召开一次“国际噪声会议”,内容包括噪声源的分析 and 识别,噪声在各种情况下的传播规律,噪声(包括次声和振动)对人的效应,环境噪声的测量、评价以及允许标准,噪声振动的治理技术,还有有关政策、法规、教育等问题。虽然也包括传统上建筑声学中的问题,但更多的是从建筑物内部的声学问题扩展到人们生活和工作的大环境内的所有声学问题,从而在 1974 年第八届国际声学会议上正式使用“环境声学”这一学科术语。

因为噪声源的分析 and 噪声治理涉及到工业部门各行各业的技术知识,环境噪声的防治联系到环境保护政策和大量的社会问题,所以对环境声学感兴趣的除了声学家外,还有各行各业的工程技术人员和行政部门。所需解决的有科学问题、技术问题以及政策、法规问题。因而需要几方面人员联合起来,为创造一个美好的声学环境而共同努力。

第一章 声的传播

1.1 描述声波的物理量

1.1.1 声波的概念

根据人对信号的感知,人耳听觉系统所能感受到的信号称为声。人类生存的环境,到处充满着各种各样的声音:人们用于交流思想、表达感情的语言声,丰富人们精神生活的音乐声,各种机器和车辆发出的噪声,鸟兽鱼虫的鸣叫声,自然界的风雨声,寂静环境中可以感觉到心脏器官跳动的节律声,还有人耳感知不到的“听不见的声音”——次声和超声。

从物理学的观点来说,声音是一种机械波,是机械振动在弹性媒质中的传播。例如人讲话发出的语言信号,是从肺中呼出一股气流,经过声带进行调制成为振荡的气流,再经过咽腔、口腔、鼻腔等的共鸣作用,从口和鼻向周围空气传播复杂的振动信号。又如扬声器发出的声音,是当扬声器被接通电信号后,音圈在磁场中产生与电信号相关的运动,然后推动振膜或纸锥产生振动,从而带动邻近的空气随之振动,并向周围传播。

声波可以在气体、液体、固体等不同物质形态的媒质中传播。通常人们听到的声音是在空气中传播的声波。同样,人在水下游泳时可以听到在水中演奏的音乐。当耳朵贴在铁轨上时,可以听到远处火车在轨道上运行而沿着轨道传播的声音。

应该认识到声波传播的物理过程是振动能量在媒质中的传递,这要严格区别于媒质宏观位置的移动。包括人讲话、吹奏乐器或其它气流声源在内,不同类型的声源都是以某种形式使声源位置邻近的媒质的分子(或质点)产生振动,由于分子之间的相互作用,振动逐渐波及到周围的分子,使它们也在平衡位置附近作几乎相同的振动,但在时间上要有一点延迟。例如丢一石子到平静的水面上,可以看到一圈圈水波向周围传播。如果水面上有一小木块,则可以见到小木块随传来的水波只在原平衡位置附近作上下振动(如仔细观察,小木块作上下左右的椭圆形振动),而不会因水波的传播使木块朝水波传播方向流动。

对于流体(气体和液体),当受到压力时,只能产生体积形变,即单纯的压缩与膨胀的形变,因此振动的传递方向,即声波的传播方向只能平行于质点振动的方向,这一类声波称为纵波。在固体中,除了有体积形变外,在受到剪切力作用时,还会产生切形变,即除了有体弹性外还有切变弹性。如果剪切振动的方向是与质点振动方向垂直的,称之为横波。对于棒或板,还可能产生扭转、弯曲等不同形式的切形变,存在着不同类型的波,所以固体中的声波要比流体中的声波复杂得多。除此之外,在固体与空气接触的表面以及液体与气体接触的表面,还会产生振幅随离表面深度而减弱的表面声波。上述的水波就是一种颇为复杂的水表面波。

本书以空气中传播的声波为主要内容。某些章节也将述及到固体中传播的声波,那里将另作专门介绍。

1.1.2 频率、波长、声速

先从一种简单的声波传播情况,来说明几个基本物理量。

参看图 1.1, 在一根均匀长管的一端, 有一个活塞作振动, 右端延伸至无限长。

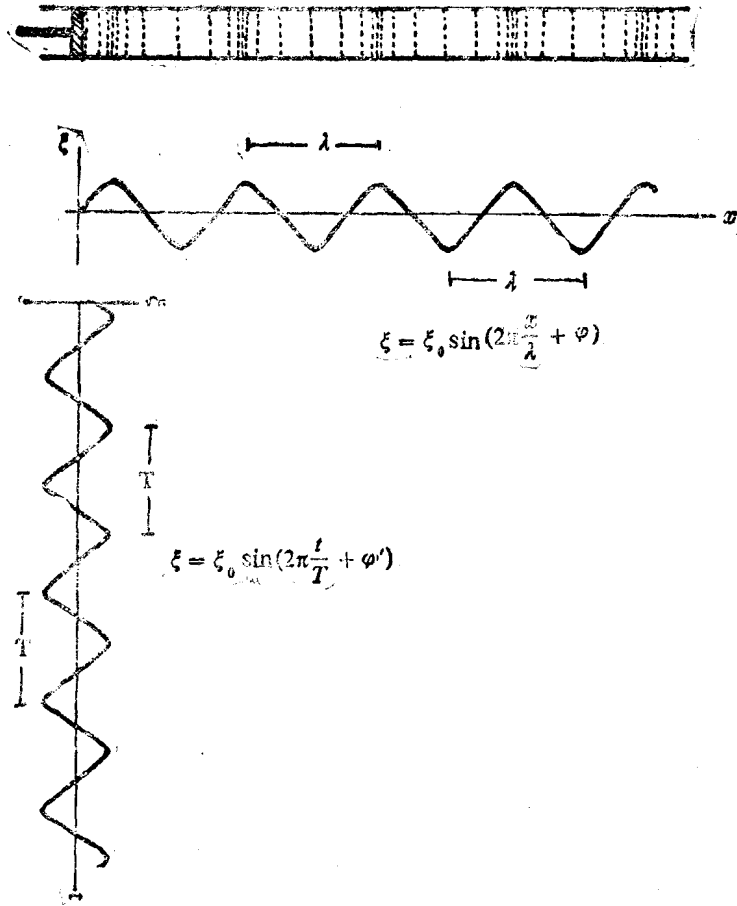


图 1.1 振动在均匀半无限长管中的传播

当活塞向右运动时, 活塞右边的空气受到压缩, 并且这一压缩向右一层层依次传递; 活塞向左运动时, 使活塞右边空气产生膨胀, 这一膨胀也依次向右传递。当活塞作往复振动时, 使活塞右边的空气产生交替的压缩与膨胀, 并向右传播, 这就是声波。

如果把活塞的简谐振动写成为如下的形式:

$$\xi = \xi_0 \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi'\right) \quad (1.1)$$

式中 ξ 是活塞离开平衡位置的位移, 单位为米; ξ_0 是最大位移, 称振幅; T 是往复振动一次所需的时间, 称周期, 单位为秒; t 表示时间; φ' 称初始位相, 即开始计算时间时 ($t=0$), 活塞运动状态位置与运动趋向相对于在一个周期中所处位置的参数。例如活塞在平衡位置正在向右运动的时刻作为 $t=0$, 则可得到 $\varphi'=0$; 如以活塞在平衡位置正在向左运动的时刻作为 $t=0$, 则有 $\varphi'=\pi$ 。式(1.1)的时间图形表示在图 1.1 的下部。图中表示的周期 T , 说明可以从活塞振动的任何一个状态开始, 往复振动一次后回到原来状态所需的时间。周期 T 的倒数是一秒内的振动次数, 称频率, 以符号 f 表示, 单位为赫兹(Hz), f 乘上 2π 称角频率或圆频率 ω , $\omega = 2\pi f$ 。式(1.1)也可写作:

$$\xi = \xi_0 \sin(2\pi ft + \varphi') = \xi_0 \sin(\omega t + \varphi') \quad (1.2)$$

式(1.1)或(1.2)表示活塞的振动形式,也表示了管内任一截面上空气质点的振动形式,即振动的频率相同,如果管壁和空气引起的衰减都可忽略,则振幅也相同。但是,因为振动从活塞处向右传播,所以每个截面的振动状态向右依次有个时间延迟,因而不同截面的初始位相不同。

如果在同一时刻考察管内各截面上的振动状态,把各个截面上空气分子离开平衡位置的位移 ξ 对离开活塞的距离 x 作图,便得到图 1.1 上部的图形。可以见到,振动向右传递时,各截面上的振动状态随距离也呈周期性变化,每隔 λ 长度,出现相同的振动状态,即具有相同的位相。这个 λ 就称波长,单位为米。数学形式为:

$$\xi = \xi_0 \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (1.3)$$

这里 φ 也是初位相,它是某个时刻在活塞表面处(即 $x=0$ 处)空气分子振动所处状态的参数。

以 $k=2\pi/\lambda$, k 是波数,则有

$$\xi = \xi_0 \sin(kx + \varphi) \quad (1.4)$$

如果把式(1.2)和(1.4)结合起来,即管内各个截面上空气质点位移随时间的变化与同一时刻管内不同截面上空气质点位移随距离的变化结合起来,便得到表征管中波动特性的表示式:

$$\xi = \xi_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1.5)$$

式中 kx 前的负号表示声波沿正 x 方向传播时,距离增大,位相要落后。(若是沿负 x 方向传播,则 kx 前为正号。)式(1.5)表示了:在某一 x 截面上,空气分子以频率 f 或角频率 ω 随时间作简谐振动;在同一时刻 t ,不同距离上的空气分子的位移以波长为 λ 作正弦周期性的分布。符合这种振动传播规律的波称为正弦波,也称单频率声波或纯音。

从图 1.1 的声波传播情况,还可得到声波传播速度的物理量:活塞每振动一次,在此时间内振动的传播距离为一个波长。现每秒振动若干次即频率为 f ,故振动或声波在一秒内的传播距离为 $f \cdot \lambda$,这就是声波的传播速度,简称为声速,以 c 表示,单位为米/秒。

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.6)$$

在波动方程的理论推导过程中,得到声速与媒质的参数和状态有关:

$$c^2 = \gamma P_0 / \rho_0 \quad (1.7)$$

式中 γ 是媒质的比热之比,对于空气,可以取 $\gamma = 1.4$ 。 P_0 和 ρ_0 分别为媒质中的静态压强和静态密度。显然,声波传播速度与媒质中的压强和温度有关。温度主要影响密度。在一个大气压左右室温条件下,一般空气中声速可以近似地以 340 米每秒进行计算。如果需要精确值时,可以根据式(1.7)计算。压强的变化与压强引起密度的变化互相抵消,所以,声速主要与温度有关。空气中声速 c_0 随温度变化可简单表示为:

$$c_0(t^\circ\text{C}) = 331.6 + 0.6t \quad (1.8)$$

式中 t 是摄氏温度。

在压强和温度一定时,媒质中声波传播速度是一个常数。从而根据式(1.6),我们可以知道,波长与频率成反比关系。频率低,声波的波长长,频率高,声波的波长短。例如在空气中,100 赫兹声波的波长为 3.4 米,10000 赫兹声波的波长为 0.034 米。波长的大小与许多

物理原理现象有关。

人耳听得见的声波的频率范围约为 20~20000 赫兹,称为声频声。进入中年以后,听力开始减弱,高频(人耳听力范围内的较高频段)声的听力更易减弱。

低于声频的声波称次声,高于声频的声波称超声。不同频率范围的声波和大致相应的声学研究领域粗略地列于图 1.2 中。

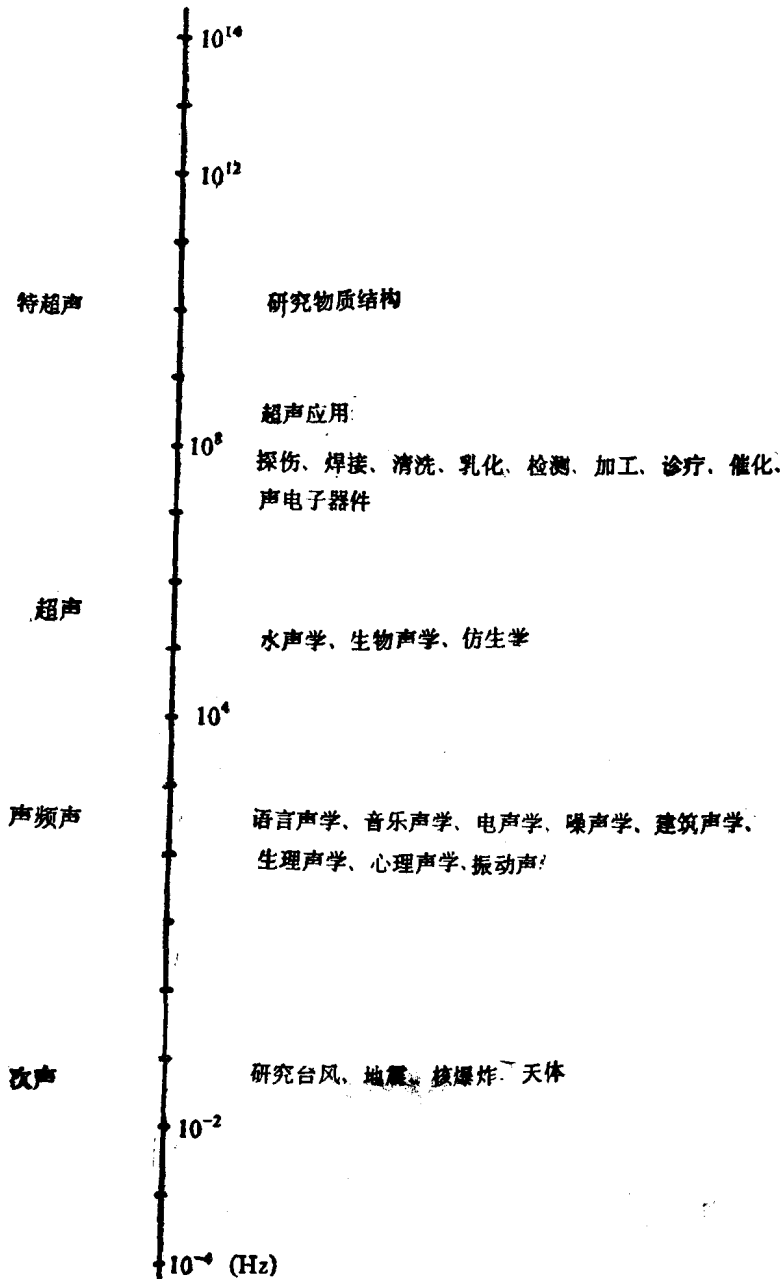


图 1.2 不同频率范围的声学研究内容

1.1.3 平面波、球面波、柱面波

在声波传播的过程中,如果将同位相的点相联,得到的是一系列平行的平面,则称之为谓

平面波。显然平面波的波阵面与传播方向是垂直的。上一节中所述的在均匀直管中传播的声波,在一定频率以下,声波沿管长方向传播,波阵面就是与管子垂直的平行平面,这是一种典型的平面波。

这种一维平面波的波动方程:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9)$$

这一波动方程有很多种解,式(1.5)是其中的一个特解。更常用的为指数解:

$$\xi = \xi_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.10)$$

上式中取其虚部就是式(1.5)的正弦函数部分。平面声波的一个重要特点是,它的振幅不随传播距离而变化(假定媒质没有吸收)。

如果将同位相的点相联,得到的是一系列同心球面,这种声波称球面波,其波阵面(球面)也与传播方向(径向)垂直。如果声源的尺寸比所辐射声波的波长小得多,则可近似地看作辐射球面波,此声源可被看作“点声源”。

球面波的波动方程:

$$\frac{\partial^2 (r\xi)}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (r\xi)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.11)$$

一个特解为

$$(r\xi) = (\xi_0) \sin(\omega t - kr)$$

或

$$\xi = \frac{\xi_0}{r} \sin(\omega t - kr)$$

指数形式的解为

$$\xi = \xi_0 \frac{1}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.12)$$

球面声波的一个重要特点是,它的振幅与传播距离成反比关系。

如果同位相的点相联得到的是平行的柱面,就称为柱面波,其声源一般可视为“线声源”。柱面波的振幅与传播距离的平方根成反比。

平面波、球面波、柱面波虽然是理想的波的传播类型,但在实际情况下经常可以找到近似为某种类型波的条件。例如一列火车或公路上一个车队,往往可被近似为线声源,当声波传播距离比该线声源的长度为小的范围内,可以认为它遵循柱面波的传播规律;当声波传播距离甚大于该线声源的长度时,则在某个方向上的传播,又可当作球面波的一部分来考虑;如果考虑在远小于传播距离的某个小区域内的传播问题,则又可简化为平面波的传播,正好像在一个很大的圆上截取一小段弧,可被近似为一小段直线一样。

1.1.4 质点振动速度、声压、声强、声能密度、声能通量

式(1.5)是以媒质中质点振动的位移来表示的在均匀管中声波的表示式。其中 ξ_0 是振幅,可表征该声波的大小。对位移求一次导数便得到质点振动速度 v 。

$$v = \frac{d\xi}{dt} = \omega \xi_0 \cos(\omega t - kx) \quad (1.13)$$

式(1.13)与式(1.5)相比,可以知道:(1)质点振动速度与质点振动位移有 $\pi/2$ 的位相差,这关系与力学中简谐振动一样。(2)不同频率但振幅相同的声波,频率高,振动速度的幅值($\omega \xi_0$)就大。如果抛开质点振动速度与位移之间的联系,将管中声波直接用质点振动速度表示,选择适当的初始条件,也可得到如下的形式:

$$v = v_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1.14)$$

与此相似,质点振动加速度也具有这种形式。

在声波传播的过程中,媒质中各处存在着稀疏和稠密的交替变化,因而各处的压强也相应变化。所不同的只是当没有声波时,媒质中有个静压强 P_0 , 见图 1.3。当有声波传播时,压强随声波频率产生周期性变化,其变化部分,即有声波时的压强 P 与静压强 P_0 之差,称声压,用 p 表示。对于上述在均匀管中传播的纯音,声压 p 也具有如下的表示形式:

$$p = p_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1.15)$$

一般听到的声音,其声压大小与静压相比是很小的。如果声压大到可与静压相比拟,则就是高强度的声波,进入非线性声学的范围,有一系列不同的物理特征。本书主要讨论声压与静压相比为很小,质点振动速度与声波传播速度相比为很小的线性声学的范围。

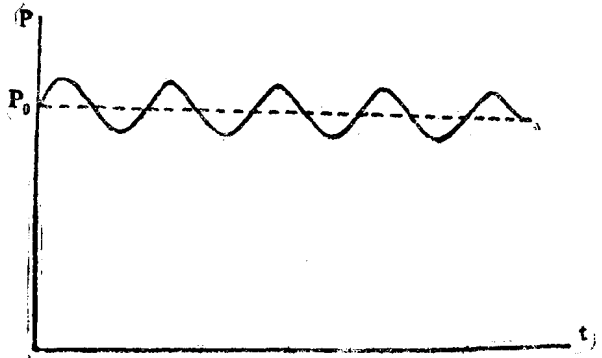


图 1.3 有声波时媒质中的总压强变化

声压的单位就是压强的单位,即牛顿每平方米,或“帕”(帕斯卡),符号为 Pa。一个大气压约为 10^5 帕。

某点的声压是该点压强随时间变化的交变量,与交流电中的量值表示相似,在不作说明时,一般声压的量值是指它的有效值,即方均根值。

人耳是很灵敏的,对于 1000 Hz 纯音,人耳刚能听辨的声压大小为 2×10^{-5} Pa。两人面对面交谈时的平均声压大约为 2×10^{-2} Pa。纺织厂织布车间噪声的声压可超过 2 Pa。

声波的大小或强弱也可用声强表示,声强的定义为:在单位时间内通过垂直于传播方向上的单位面积内的平均声能量。声强用符号 I 表示,单位为瓦每平方米(W/m^2)。必须注意的是,声强具有方向的概念,是矢量。因此当考虑声强时,特别要注意传播方向。如果所考虑面积与传播方向平行,则通过此面积的声强就为“零”。在平面波和球面波的条件下,声强的数值(在传播方向上)与声压的关系为:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c_0} \quad (1.16)$$

式中 ρ_0 为空气的静态密度, c_0 为自由空气中的声波传播速度。乘积 $\rho_0 c_0$ 为空气媒质的特性阻抗,即在自由媒质中向前传播的(与坐标轴方向相同)平面声波的声压 p 与质点振动速度 v 的比值。

在声场中,单位体积内具有的声能量称声能密度,用符号 ϵ 表示,单位为焦耳每立方米(J/m^3)。某点的平均声能密度与声压的关系为:

$$\epsilon = \frac{p^2}{\rho_0 c_0^2} \quad (1.17)$$

单位时间内通过某一面积的声能量称声能通量,符号为 Φ ,单位为瓦(W)即焦耳每秒。对于平面波或球面波,如果面积 S 与声波传播方向垂直,面积 S 上各处声强 I 相等,则通过

面积 S 的声能通量与声强有简单关系:

$$\Phi = IS \quad (1.18)$$

如果面积 S 上各处声强不一定相等, 声强方向(声波传播方向)与面积也不一定垂直, 则通过面积 S 的声能通量应为:

$$\Phi = \int_S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} = \sum_i I_i \cdot \Delta S_i \quad (1.19)$$

1.1.5 声源辐射功率

声源在单位时间内辐射的总的声能称声源辐射功率, 简称声功率, 用符号 W 表示, 单位与声能通量相同, 为瓦(W)。

声源辐射的声功率, 应与声源向周围辐射时通过包围声源的封闭曲面的声能通量相同。如果声源是一理想的球面声源, 则在与声源中心相同距离 r 的球面上任一点的声强 I 相同, 这时声源的声功率 W 与声强 I 同样有简单关系:

$$W = I \cdot 4\pi r^2 \quad (1.20)$$

如果不是理想的球面声源, 或者任意形状的封闭曲面, 这时声源声功率也具有式(1.19)的形式:

$$W = \int_S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} = \sum_i I_i \cdot \Delta S_i \quad (1.21)$$

在运用式(1.20)和(1.21)时, 只考虑声源向外辐射的声波, 没有或不应考虑周围其它声源传播过来通过曲面的声波, 也不考虑周围边界或障碍物的影响。

1.1.6 声源辐射的近场区和远场区

媒质中有声波存在的区域称声场。

如果媒质是均匀、各向同性的, 并且范围足够大, 以至于边界的影响可以忽略不计, 也没有任何障碍物的影响, 这样的声场称自由声场。

声源是某种类型的振动源。当声源在自由声场中向周围媒质辐射声波时, 声场中任何一点的声压是声源表面各点的振动辐射对这一点叠加的结果。在离开声源表面很近的区域, 表面各点的振动传播到某点的声压的振幅和位相有很大的差别, 接收点的位置稍差一点, 叠加的声压可能有较大不同。最重要的一个特点, 是在很靠近振动表面的区域内, 声压的瞬时值与质点振动的瞬时速度之间的相位不同。这个区域称为声源辐射的近场区。在离声源较远的区域, 瞬时声压与质点振动瞬时速度的位相相同, 称为远场区。

远场区与近场区的声场特性有很大的不同, 很重要的问题是如何判断近场区与远场区的分界? 这是比较复杂的, 对不同形状的声源, 有不同的辐射特性。对于形状最为简单的平面圆形活塞声源, 假定活塞直径为 d , 安装在无限大的平面上, 经过计算, 当传播距离 r 满足下面条件时:

$$\begin{cases} r \gg d \\ r \gg d^2/\lambda \end{cases} \quad (1.22)$$

可近似为远场区。式中 λ 是声波波长。对于其它形状的声源, 远场条件的表示式要复杂些, 但大致上都可按式(1.22)来估计。式中 d 可理解为声源的线度, 即要传播距离甚大于声源线度, 实际上只要 $r > d$ 即可近似满足; $r \gg d^2/\lambda$ 的条件说明远场条件与频率有关, 频率高即波长短的声波, 在更远距离处才满足远场条件。一般声学测量都在远场条件下进行, 因为在近场区声压随位置变化很大, 变化规律也很复杂, 并且声压与质点振动速度不同相, 难以从