

环境工程
手册

环境噪声控制卷

高等教育出版社

环境工程手册

——环境噪声控制卷

主 编 郑长聚

主 审 任文堂

副主编 洪宗辉

高等教育出版社

(京)112号

内容提要

本卷内容丰富、翔实,从声学原理到区域规划,囊括了噪声控制的各个方面。全书共分十章,第一、二、三章是噪声的基本知识,对噪声的性质、传播以及衰减等规律作了简明的分析;第四章给出了控制噪声的常用材料和构件的大量数据及应用范例;第五章论述了噪声的振动和振动对环境的影响;第六章为工业噪声控制;第七、八、九章为交通噪声,分别对道路、铁路和航空噪声提供相应的预测与各种可能控制噪声的途径和措施;第十章是城市区域噪声控制的合理规划、布局和管理。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程手册:环境噪声控制卷/郑长聚主编. —北京:高等教育出版社,2000
ISBN 7-04-007363-3

I. 环… II. 郑… III. ①环境工程手册②环境噪声控制-手册 IV. X5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 30209 号

环境工程手册——环境噪声控制卷
郑长聚 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
电 话 010-64054588
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100009
传 真 010-64014048

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京外文印刷厂

开 本 ~~787×1092~~ 1/16
印 张 ~~34.25~~
字 数 840 000
插 页 5

版 次 2000年2月第1版
印 次 2000年2月第1次印刷
定 价 52.70元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

《环境工程手册》

编辑委员会名单

主任：顾夏声 胡家骏

副主任：张坤民 井文涌 顾国维 王宝贞 钱 易 郝吉明 李国建

编委(以姓氏笔划为序)：

马广大 井文涌 王宝贞 叶昌仁 龙腾锐 李国建 李国鼎

李献文 宋炳煊 朱联锡 任文堂 祁佩时 吴天宝 张月娥

张自杰 张世森 张忠祥 张坤民 张崇华 陈毓龄 郑长聚

林肇信 周思毅 赵有才 胡家骏 陆雍森 姜安玺 俞 珂

郝吉明 姜旦立 徐传宁 钱 易 顾国维 顾夏声 高忠爱

章非娟 蒋展鹏 傅国伟 蔡不忒

常务编委(以姓氏笔划为序)：

李国建 宋炳煊 祁佩时 张月娥 张世森 张忠祥 周思毅

郝吉明 徐传宁

《环境噪声控制卷》

主 编：郑长聚

主 审：任文堂

副主编：洪宗辉

参加编写人员：郑长聚 陶锦圣 王谟贤 沈荣瀛 梁其和 洪宗辉 吴嘉禄

《环境噪声控制》前言

环境噪声是一门与物理学有关，而又涉及生理与心理声学的学科。环境噪声的污染与其他污染不同，当声源停止发声，声音便立即消失，不存在任何残留的有害物质，而且它的污染仅局限于一定范围内而不会蔓延很远。但是在生活环境中，声音此起彼伏，无时无处不存在着噪声，严重影响人们的生活和工作，有的甚至危害人们的身心健康。因此环境噪声已成为公众和有关部门所关切的环境污染问题之一。

环境噪声控制是防治环境噪声污染的综合性的工程技术科学，应用性很强。由于噪声随时随地而变化，并与噪声性质以及人们的主观感觉有关，所以必须因地制宜进行控制，才能达到既经济而又有效的目的。

环境噪声控制卷是环境工程手册的一分卷。全书以实用为主，因此收集了大量可资应用的图表和典型实例。为了使读者对噪声的性质有所认识，能在不同条件下灵活地应用本手册的控制措施解决复杂的实际问题，书中对噪声源的发声机理及其噪声的特征作了简单扼要的分析，便于在错综复杂的声场中识别噪声源，作出更有效的降噪措施。由于环境噪声控制发展迅速，资料很多，内容广泛，本卷因限于篇幅，只汲取其中具有普遍实用意义的内容。

本卷共十章。第一、二、三章是噪声的基本知识，对噪声性质、传播以及衰减等规律作简明的分析，并提供许多有用资料；对各种场合的噪声提出了各种评价量；并对测量噪声的方法和使用的必要仪器，以及数据分析作了较详细的介绍。第四章给出控制噪声的常用材料和构件的大量数据以及应用范例。第五章对引起噪声的振动和振动对环境的影响给以必要的理论分析，并提供了大量可供选择的控制元件和措施。第六章为工业噪声控制，对各类具有普遍性的高噪声机器设备或部件，分门别类进行了深入分析，并提出具体的降噪措施及其效果。第七、八、九章为交通噪声，分别对道路、铁路和航空噪声提供相应的预测与各种可能控制噪声的途径和措施。第十章是为城市区域噪声控制的合理规划、布局和管理而编写的，在新建、改建或扩建的城市规划中，对降低城市环境噪声，建立安静的生活环境有很好的实用价值。

本卷各章作者是：郑长聚（第一、三章），陶锦圣（第二、八章），王谔贤（第四、十章），沈荣瀛（第五章），梁其和（第六章），洪宗辉（第七章），吴嘉禄（第九章）。本卷主编郑长聚，主审任文堂，副主编洪宗辉。

本卷的编写承倪乃琛、孙广荣、刘启龙、章奎生和夏德荣等专家提供了宝贵意见，中国科学院声学研究所程明昆研究员审阅全书，谨在此向他们致谢。

序 言

1992年6月联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开，100多个国家的元首、政府首脑和一万五千多名代表参加了这次规模空前的全球盛会，标志着全球环境保护已进入一个新的历史时期，这次大会通过了“里约环境与发展宣言”、“21世纪行动议程”和一些有关全球环境问题的重要公约，大会号召全世界人民“共同处理环境和发展问题，为全人类创造一条新的道路通向21世纪”，这就是“可持续发展”的道路，这要求全体人民不仅要关心自己，关心当今的环境问题，还应该关心社会经济的持续发展，为子孙后代留下一个清洁、美丽、舒适的生存环境。

环境问题之所以能成为当今世界的热点，主要是由于严重的环境问题已构成了对人类的现实威胁，人们已开始认识到，经济发展和环境保护是不可分割的整体，只有切实地保护环境，才能确保持续发展。从全球环境看，水体、大气和土壤环境的污染仍很严重，地球变暖和臭氧层破坏两大问题又引起了普遍的关注。

我国早在70年代就对环境问题的严重性和迫切性有所认识，政府把环境保护列为一项基本国策，作了大量工作努力防治环境污染。但应该清醒地看到，我国环境形势的现状是：局部有所改善，整体仍在恶化，前景令人担忧。随着改革开放政策的实施，我国经济正在腾飞，而发展却仍沿袭了大量消耗资源和不顾环境承受能力的传统模式，正在对环境产生更大的损害，也使自然资源受到破坏，必须引起警觉。例如，我国水环境污染十分严重，全国七大水系中有近一半的河段污染严重，流经城市的河段污染更加突出。我国大气污染日益加剧，大气质量符合国家一级标准的城市很少。我国城市垃圾尚未得到妥善处置，工业排放的有毒有害固体废物排放量逐年增长，大部分都未经安全处置，城市噪声也十分严重，成为城市一大公害。

上述情况说明，我国环境工程的任务还十分艰巨，环境工程是防治环境污染，提高环境质量的重要手段，其内容十分广泛，包括：水污染防治工程、大气污染防治工程、固体废弃物的安全处置、噪声污染防治工程、环境规划与管理以及环境监测等方面。为了总结国内外环境工程领域的新技术、新工艺、新设备和新材料，总结国内外环境工程成套设施的经验及成功的范例，促进我国环境工程的发展，高等教育出版社组织编辑了这套“环境工程手册”，以供从事环境工程事业的工程技术人员，有关高等学校的师生、科研人员和管理人员参考。这是一件极有意义的大事，必将对我国的环境保护及经济持续发展起积极的推动作用。参加本套手册编写工作的，多为在环境工程领域从事工作多年，既有理论修养，又有实践经验的教授，专家，也有一些脱颖而出的青年教师和科技人员。全书内容丰富，材料翔实，图文并茂，参考性强，既有对基本概念的阐述，又有对设计方法的介绍，希望能对各类读者都有帮助。

“环境噪声控制”卷是这套手册中的一卷。本书共分十章，内容有噪声控制必要的基本知识；噪声的评价和测量；控制噪声的材料和构件；振动对环境的影响；道路、铁路和航空的交通噪

声；工业噪声和城市区域噪声的控制。这本书提供的资料和噪声的控制措施，对降低噪声，改善人民的生活环境，保护心理和生理健康，具有实际意义。

顾夏声 胡家骏

1993年12月

责任编辑	张月娥	靳剑辉
封面设计	张楠	
责任绘图	孟庆祥	
版式设计	史新薇	
责任校对	陈荣	
责任印制	陈伟光	

第一章 噪声控制基本知识

一切具有质量的弹性媒质受到扰动，都会产生波动。空气是具有密度和体弹性（压缩弹性）的媒质，当受到扰动时所产生向四周传播的波动，便成为空气中的声波。但是只有频率在 $20 \sim 20\,000$ Hz 范围内，并具有声强在 10^{-12} W/m² 以上的声波，才能为我们听觉感受到，这部分声波便称为可听（或可闻）声波，即平常所称的声音。频率低于 20 Hz 和高于 20 000 Hz 的声波，分别称为次声波和超声波。可见声音来源于空气的振动，并与人的听觉有关。

凡是人们不需要的声音，即对生活、工作和学习有干扰的声音，统称作噪声。

§ 1.1 声音的基本性质

弹性媒质质点振动的传播过程，称为波动。当振动能量传播到人耳，引起听觉器官的相应振动，便感受为声音。因此振动是声波的基础。

1.1.1 简谐振动与简谐声波

1. 简谐振动

(1) 位移：物体或质点在其平衡位置附近往返的重复性运动，称为振动。当一质点 Q 沿圆的圆周以均匀角速度 ω 运动时 [如图 1-1 (a) 所示]，则该质点在圆的直径 $P'OP'$ 直线上的投影

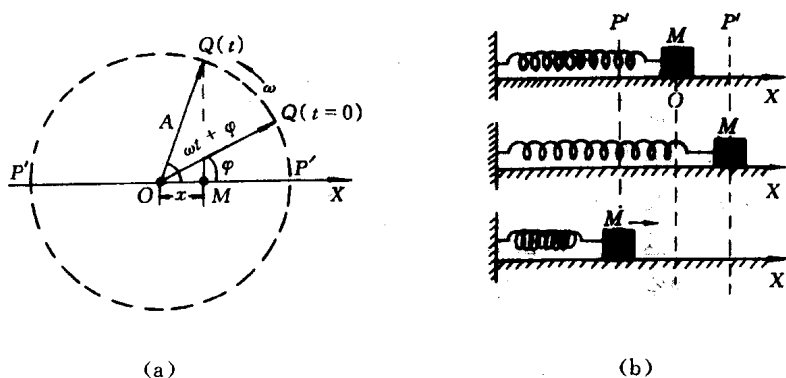


图 1-1 简谐振动

(a) 作圆周运动的质点 Q 的投影 M 的振动

(b) 相应于 (a) 中 M 点的实际振动系统

影点 M 的运动，便称为简谐振动。如以 $P'OP'$ 直径为 x 轴， O 为原点，则其位移为

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式中： φ ——初相位，rad；

A ——振动的振幅，m。

(2) 相位与周期： $(\omega t + \varphi)$ 是描述物体运动状态的参量，称为相位。它随时间而变化， $t = 0$ 时，位移 $x = A \cos \varphi$ ，表明物体 M 开始运动所在位置，称 φ 为初相位；当相位为 $\pi/2$ 、 π 和 2π 时，表明 M 所处位置分别为 0 、 $-A$ 和 A ；相位 $(\omega t + \varphi)$ 为 $(2\pi + \varphi)$ 时， M 的运动位置为 $x = A \cos \varphi$ ，回到了原来开始运动地点，即 M 在 x 轴线上已来回运动一次， Q 在圆周上运动了一周，这一经历的时间

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-2)$$

称为 M 振动的周期，单位为 s (秒)。

(3) 频率：振动体 M 每秒振动的次数，称为振动频率 f ，单位名称为赫 [兹]，简称为赫，符号为 Hz，1Hz 为周期 1s 的周期现象的频率。它与周期的关系为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

简谐振动是一种最简单而又最基本的振动。一根弹簧系一质量为 M 的物体所形成的振动系统，没有任何阻力影响时的自由振动，就是这一简谐振动的实例，如图 1-1 (b) 所示。

2. 声波的形成过程

具有均匀连续分布静止空气的分子按统计观点可视为均匀分布的静止质点。在一很长的充满空气的刚性管壁的管中，当一端装有刚性的活塞沿管轴作简谐振动时，便在管中形成一简谐声波，其形成过程如图 1-2 所示。管中点线表示每个过程的空气密度变化，其相应的压强变化表示于坐标轴上，纵坐标为压强，横坐标表示管中轴线位置。图示的变化历程为

(1) $0 - T/4$ ：为活塞开始从平衡位置向右方向的运动，这时近活塞面的空气层分子则受到压缩，密度增加，压强相应增大。在活塞运动经历 $T/4$ 达到最大位移时，活塞附近空气层压强最大。同时这一压缩逐渐向右扩展，使离活塞 A_1 处的空气层开始受到压缩 [见图 1-2 (a)]。

(2) $T/4 - T/2$ ：活塞经过 $T/4$ 后，其运动方向开始折向左方平衡位置，此时活塞附近空气由密变疏 (密度由大变小)，当活塞

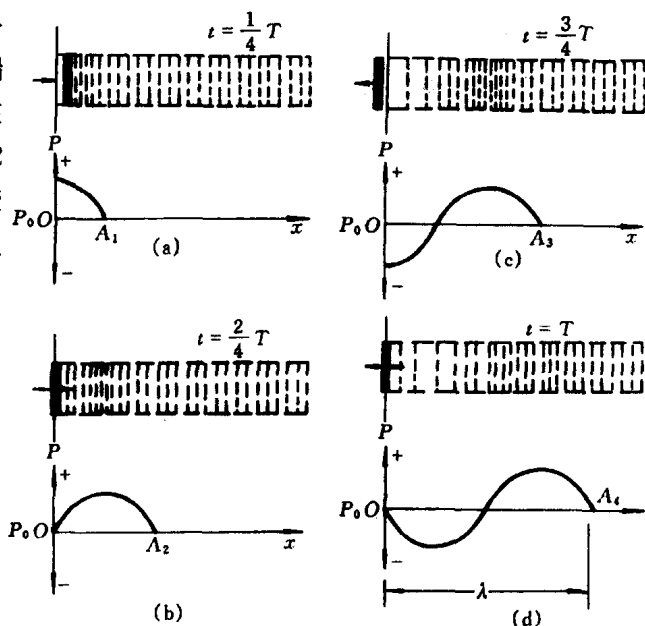


图 1-2 声波的产生

P_0 表示大气压强；(a) — (d) 为在不同时间的声波传播； T 为周期

运动经历 $T/2$ ，回到平衡位置时，活塞面空气层的压强恢复到原来的大气压强。同时原来密集的空气层由于空气的弹性和惯性作用，继续向右压缩，到达 $T/2$ 时，这一压缩作用到达活塞 A_2 处的空气 [如图 1-2 (b) 所示]。

(3) $T/2-3T/4$ ：当活塞通过平衡位置继续向左运动时，活塞附近空气变为稀疏，它的压强低于大气压，同时密集的空气层经历 $3T/4$ 开始影响到 A_3 处的空气 [如图 1-2 (c) 所示]。

(4) $3T/4-T$ ：在活塞运动经历一个周期 T 又回到平衡位置便形成了继稠密层之后的稀疏层，此时 A_4 处的空气开始振动 [如图 1-2 (d) 所示]。

活塞不停地振动，便形成空气稠密与稀疏相间向右传播的声波。可见声波的传播只是活塞的振动能量的传递，而空气质点则各在其平衡位置按活塞振动方式而振动，振动的相位则随距离增加相继落后。由于声波的传播方向与质点振动方向一致，故声波为纵波。

1.1.2 描述声波特征的量

1. 频率与周期

在声波存在的介质中，介质质点每秒完成来回振动的次数为声波的频率，单位为 Hz (赫兹)，简称赫，常用 f 表示。每振动一次所需的时间为周期，单位为秒 (s)，以 T 表示，两者的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

2. 声波的相位

在后面的 (1-9) 式中的 $(\omega t - kx)$ 是描述介质传播声波时沿传播方向 x 的质点运动状态的量，称为声波的相位。其中 $-kx$ 表示在 x 处的质点振动初相位 $-\varphi_0$ ，这一初相位随距离 x 逐渐增大而相对地连续滞后 (因 φ_0 是负值)。由这些质点在所处位置上以各自初相位的振动，便形成沿 x 方向传播的声波。

3. 声波波长

在声波传播的方向上，相位差 2π 的两处质点间的距离，也就是振动状态相同的相邻质点间的距离，为声波波长，单位为 m (米)。常以 λ 表示 [如图 1-2(d) 所示]。

4. 声速

声速为声波在介质中每秒传播的距离，单位为 m/s (米每秒)。声速与介质的温度有关，而与大气压介质的压强关系不大。在标准大气压下，空气中声速与温度之间的数值关系为

$$c = 331.5 \sqrt{\frac{T}{273}} \approx 331.5 + 0.6t \quad (1-5)$$

式中： c ——声速，m/s；

T ——热力学温度，K，为 $273+t$ C；

t ——摄氏温度，C。

5. 频率、波长与声速的关系

按声波频率和波长的定义，它们之间的关系为

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1-6)$$

频率越高, 波长越短, 频率或波长对人的主观感觉和噪声控制都起重要作用。

6. 声压

(1) 瞬时声压: 媒质因声波存在而引起的压强变化量, 即有声波时的大气压强 $P(t)$ 与无声波时的大气静止压强 P_0 之差 $p(t)$, 单位为帕[斯卡](Pa) 其表达式为

$$p(t) = P(t) - P_0$$

这一声压是时间的变化量, 称瞬时声压, 它有时为正, 有时为负。

(2) 有效声压: 在实际应用上, 常取瞬时声压在一周期或更长时间内的平方平均值, 再取其平方根值, 称为均方根声压, 又称有效声压。习惯上所指的声压, 均指有效声压 p_r 。有效声压 p_r 与瞬时声压 $p(t)$ 的关系, 按上述的定义为

$$p_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} p^2(t) dt} \quad (\text{单位: Pa}) \quad (1-7)$$

对于简谐声波见 (1-11) 和 (1-14) 式, 其有效声压为

$$p_r = P / \sqrt{2} \quad (\text{单位: Pa}) \quad (1-8)$$

式中: P ——声压幅值, Pa。

1.1.3 声源、声场

1. 声源

凡激发声波的振动源, 称为声源, 如振动的活塞等。但也有的声源不一定是固体的振动, 气体和液体等也可激发声波而成为声源, 如汽笛和波涛等。声源辐射声音与声源的大小 a 和辐射声波波长 λ 有关, 当 $a \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ 时, 这一声源为点声源。在噪声控制工程中, 对于许多声源集中于一体而不须或不可能一一分辨时, 则常笼统视作一个声源, 如行驶的汽车、运转的整体机器等。对于这种声源, 当其最大尺寸 a 远小于至观察点距离 d ($a < \frac{d}{\pi}$) 时, 常可作为点声源来处理。

2. 声场

凡有声波存在的媒质区域, 均称声场。

(1) 自由声场: 在各向同性的均匀媒质中, 界面影响可以忽略的声场, 如六个壁面均有强吸声的消声室内的声场。

(2) 混响声场: 在大的室内, 如厅堂和车间等, 由各壁面多次强反射所形成的混响声的声场。

(3) 扩散声场: 声能密度分布均匀, 由各方面(墙面等)反射而来的声音其传播方向为无规律分布的声场。混响声越多的混响声场越接近扩散声场。

(4) 远场: 在自由声场中, 至声源距离每增加一倍声压降低一半的区域。远场内的媒质瞬时质点速度与声压的相位一致。

(5) 近场: 声源与远场之间的区域为近场。近场内的媒质瞬时质点速度与声压的相位不相同。

1.1.4 平面简谐声波

垂直于声波传播方向的任何平面, 在同一平面上的所有质点均以同相位作简谐振动的声波,

称为平面简谐声波。

1. 平面简谐声波方程

(1) 质点位移方程：沿 x 方向传播的平面简谐声波，在 x 处平面的质点振动时间比在 $x=0$ 处的质点落后 $t=\frac{x}{c}$ 时间，其相位应为 $\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)$ ，由 (1-1) 式（使初相位 $\varphi=0$ ），便得到位移方程为

$$y=A\cos(\omega t-kx) \quad (\text{单位: m}) \quad (1-9)$$

式中： A ——恒量，幅值，m；

k —— $\frac{\omega}{c}$ ，为圆波数。

(2) 质点速度方程：沿 x 方向传播的平面简谐声波的质点速度方程

$$u=U\sin(\omega t-kx) \quad (1-10)$$

式中： U —— ωA ，为质点速度幅值，m/s。

(3) 声压：沿 x 方向传播的平面简谐声波的瞬时声压为

$$p=P\sin(\omega t-kx) \quad (\text{单位: Pa}) \quad (1-11)$$

式中： P ——声压幅值，Pa；

$$P=\rho_0 c U;$$

ρ_0 ——空气密度；

c ——为声速。

这一声波因其声压幅值 P 为一个不随距离而变化的恒量，称为平面声波，又因其瞬时声压 p 是时间和距离的正弦（或余弦）函数，故又称平面简谐声波。

平面简谐声波是最简单而又最基本的声波形式，但在实际中除图 1-2 所示的活塞作简谐振动所产生的声波外，平常却很少有，距点声源很远处的球面简谐声波的小部分球面，可以近似地视为平面简谐声波。

2. 声特性阻抗率

媒质中某一点的声压与其相应质点速度的复数比，称为该点声阻抗率 Z_s ，单位为帕 [斯卡] 秒每米 ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$)。对于沿 x 正方向传播的平面行波的声阻抗率，其表达式为

$$Z_s = \frac{p}{u} = \frac{p}{v} = \rho_0 c \quad (1-12)$$

平面简谐声波的声阻抗率值是实数 $\rho_0 c$ 。此值决定于媒质的性质，在研究平面声波的传播过程中经常要用到 $\rho_0 c$ 。用 $\rho_0 c$ 比单独用媒质的 ρ_0 或 c 更能反映媒质的传波特性，故 $\rho_0 c$ 又称媒质的声特性阻抗率。

在声电类比中，常将声压比拟电压，质点速度比拟电流，因此 $\rho_0 c$ 相当于传输电路中的纯电阻向媒质辐射声能。如果媒质不均匀，或球面声波，它们的声阻抗率并不一定是实数的纯电阻部分，还会出现不辐射声能的虚数的声抗部分。

1.1.5 球面声波

理想球面声波为一个尺寸比声波波长小得多的脉动球沿径向向外辐射的声波。对这样的脉动球常称之为点声源。在以点声源为中心的相同半径的球面上媒质质点振动均有相同相位，振

幅则随球面半径 r 的增大而减小。球面简谐声波的瞬时声压为

$$p = \frac{P_0}{r} \sin(\omega t - kr) = P \sin(\omega t - kr) \quad (\text{单位: Pa}) \quad (1-13)$$

式中: P_0 ——恒量, N/m;

P —— P_0/r , Pa。

球面声波的某点有效声压, 即均方根声压为

$$P_e = \frac{P}{\sqrt{2}} = \frac{1}{r} \frac{P_0}{\sqrt{2}} \quad (\text{单位: Pa}) \quad (1-14)$$

离声源越远, 均方根声压越低。实际的真正点声源很少见, 只有当声波波长 λ 比声源尺寸 a 大得多 ($a \ll \frac{\lambda}{2\pi}$), 并离声源较远处的声波才近似为球面声波。球面声波的声阻抗率是比较复杂的复数。

1.1.6 声波波阵面和声射线

声波的传播是很复杂的问题, 为便于处理这一问题, 常借几何图象来描述声波的一些传播规律, 这些图象使声波形象化, 可帮助对声波传播的理解, 并可应用它们解决许多较为复杂的问题。

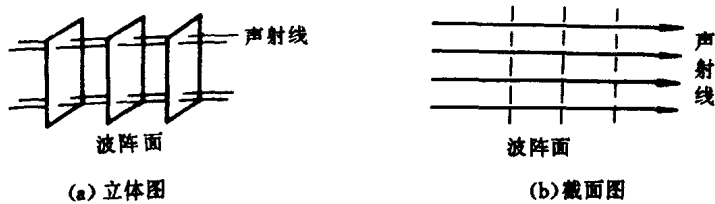


图 1-3 平面声波的声射线和波阵面

在声波行波中, 同一时刻相位相同的各毗邻质点形成的面, 称为波阵面; 与波阵面相垂直, 代表声波传播方向的线, 称为声射线。平面声波的波阵面显然是一系列平行的平面, 声射线为垂直这些平面的平行直线, 如图 1-3 所示。球面声波的波阵面为以声源为中心的一系列同心球面, 它的声射线是这些同心球面的半径线, 如图 1-4 所示。

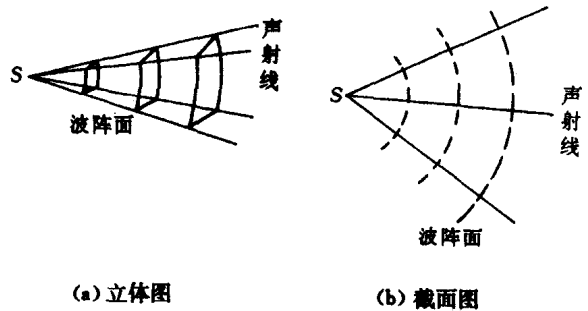


图 1-4 球面声波的声射线和波阵面

1.1.7 纯音和复声

瞬时声压为正弦或余弦时间函数的声波, 称为简谐声波; 它在听觉上感到仅为单一音调的声音, 称为纯音。除一些仪器能发出近似纯音外, 一般很少听到。平常所听到的都是一些复杂的复声。周期性复合声波可以分解为许多简谐声波, 即不同复声可视为由许多不同纯音所形成, 其中最低频率的纯音称为基波; 频率为基波频率整数倍的波, 称为谐波; 频率为基频两倍的称第二谐波; 三倍的称第三谐波等等, 如图 1-5 所示:

- (a) 粗线 C 为基波 A 与第二谐波 B 合成的波形；
- (b) 粗线 E 为基波 A 与第二谐波 B 以及第三谐波 D 合成的波形；

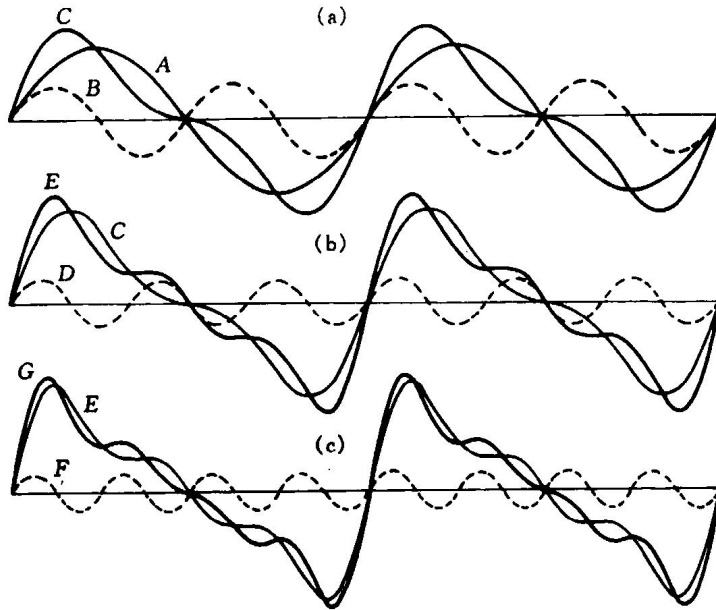


图 1-5 纯音频率相加成复波

A 为基音；B 为第二谐音；C 为基音加第二谐音；
 D 为第三谐音；E 为基音加第二和第三谐音；
 F 为第四谐音；G 为基音加第二、第三和第四谐音

(c) 粗线 G 为再加上第四谐波 F 合成的波形。

1.1.8 频谱

图 1-5 为构成复声的谐波成分(频率)的分析,复声的波形越复杂,它的构成的频率越多。

描述复声某量(声强、声功率,或声压级等)在其各频率的分布,称为这一复声的某量频谱,例如声功率(频)谱、声压级(频)谱等。不同的复声有其各自的频谱。

按组成频谱的频率分布,可划分为:

(1) 线状频谱:它由分离频率所组成,如图 1-6 (a) 所示。

(2) 连续频谱:它由连续频率所组成,如图 1-6 (b) 所示。

(3) 混合频谱:这是连续频谱中附加有突出纯音频率成分的频谱,如图 1-6 (c) 所示。

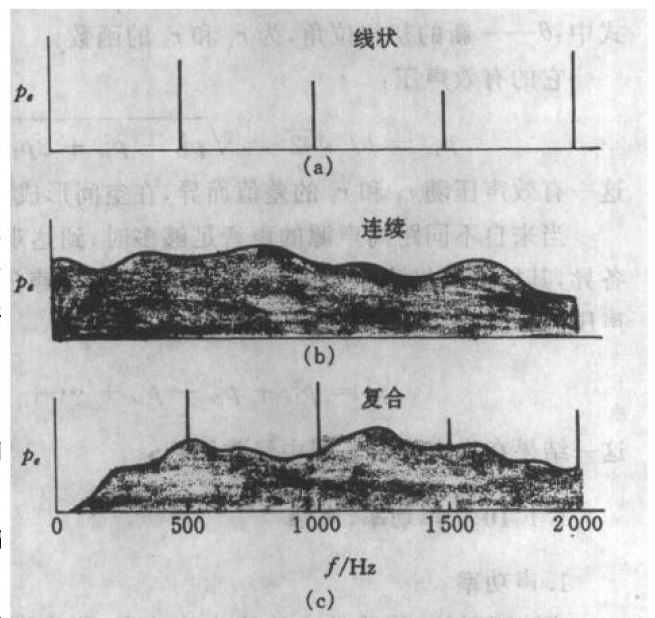


图 1-6 线状、连续和复合声频谱

频谱是一通用名词,在光波和电磁波等研究中也常用。用于声学,常以声压或声压级为纵坐标,频率为横坐标表示声波特性,称为声谱图,图 1-6 表示的是在声学中常见的三种声压谱图。

1.1.9 声压的叠加

来自各个独立声波的瞬时声压 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在某点叠加的瞬时总声压为

$$p_T(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad (1-15)$$

对于两个瞬时声压为

$$p_1(t) = p_1 \sin(\omega_1 t - kr_1)$$

$$p_2(t) = p_2 \sin(\omega_2 t - kr_2)$$

相加的平方:

$$p_T^2(t) = \frac{p_1^2 + p_2^2}{2} - \frac{p_1^2 \cos 2(\omega_1 t - kr_1)}{2} - \frac{p_2^2 \cos 2(\omega_2 t - kr_2)}{2} + 2p_1 p_2 \sin(\omega_1 t - kr_1) \sin(\omega_2 t - kr_2) \quad (1-16)$$

当 $\omega_1 \neq \omega_2$ 时,对(1-16)式的一周期平均,含有时间 t 的各项为零,可得总的有效声压平方

$$p_{Te}^2 = \frac{p_1^2 + p_2^2}{2} = p_{1e}^2 + p_{2e}^2 \quad (\text{单位:Pa}) \quad (1-17)$$

式中: p_{1e}, p_{2e} —— 各为瞬时声压 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ 的有效声压, Pa。

当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 时, (1-16) 式为

$$p_T(t) = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 \cos k(r_1 - r_2) \cdot \cos(\omega t - \theta)} \\ = p \cos(\omega t - \theta)$$

式中: θ —— 新的初相位角, 为 r_1 和 r_2 的函数。

它的有效声压:

$$p_{Te} = p / \sqrt{2} = \sqrt{p_{1e}^2 + p_{2e}^2 + 2p_{1e} p_{2e} \cos k(r_1 - r_2)} \quad (\text{单位:Pa}) \quad (1-18)$$

这一有效声压随 r_1 和 r_2 的差值而异,在空间形成声压的极大和极小值(详见后面 1.3.2 节)。

当来自不同距离声源的声音足够多时,到达观察点的声压叠加的总声压,因各声音的初相位各异,其极大和极小值则差别很小。因此,多个声压,例如一般环境噪声,在某一观察点的总有效声压的平方,不论其频率如何均为

$$p^2 = p_{1e}^2 + p_{2e}^2 + p_{3e}^2 + \dots + p_{ne}^2 = \sum_{i=1}^n p_{ie}^2 \quad (\text{单位:Pa}) \quad (1-19)$$

这一结果在噪声控制工程中经常用到。

1.1.10 声功率、声强

1. 声功率

声波辐射的、传输的或被接收的功率,称为声功率,一般指的是平均声功率,单位名称为瓦[特],符号为 W。

在声场中,声压 p 作用在媒质面积 S 上的力为 Sp ,当引起垂直面积 S 的媒质质点速度为 u 时,根据力学的功率定义,瞬时声功率应为

$$W(t) = Spu \quad (1-20)$$

它的平均声功率为

$$W = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} Spu dt \quad (\text{单位: W}) \quad (1-21)$$

式中: T ——一周期或更长的时间, s。

面积为 S 的平面简谐声波辐射的平均或有效声功率,从 (1-10) 和 (1-11) 可得

$$W = Sp_c u_c = S \frac{p_c^2}{\rho_0 c} \quad (\text{单位: W}) \quad (1-22)$$

式中: p_c —— $p_0/\sqrt{2}$ 为有效声压, Pa;

u_c —— $u_0/\sqrt{2}$ 为有效质点速度, m/s。

根据 1.1.4 节引用的声电类比概念, (1-22) 式辐射到媒质中单位面积的声功率,相应为电路中电阻消耗的电功率。

2. 声强

在声场中某点指定方向的声强,定义为在单位时间内垂直于流经该点指定方向的单位面积的平均声能量;或通过一与传播方向垂直的表面的声功率除以该表面的面积。单位名称为瓦[特]每平方米,符号为 W/m^2 。

(1) 平面声波的声强

①平面声波在传播方向上的声强为

$$I = \frac{W}{S} = \frac{p_c^2}{\rho_0 c} \quad (\text{单位: } W/m^2) \quad (1-23)$$

②当指定的声强方向与传播方向成 φ 角时,这一方向的声强为声功率除以垂直该方向的面积 S_φ :

$$I_\varphi = \frac{W}{S_\varphi} = \frac{p_c^2}{\rho_0 c} \cos \varphi \quad (\text{单位: } W/m^2) \quad (1-24)$$

式 (1-23) 和 (1-24) 也适用于球面声波的远场(参见 1.1.2 中的声场),只是 p_c 为 r 的函数。

(2) 球面声波的声强

①一点声源在无耗损的媒质中向各方向均匀地辐射声能时,因以点声源为中心,离点声源的距离为 r 的球面面积 $S = 4\pi r^2$,由 (1-23) 式 r 处沿径向的声强为

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (\text{单位: } W/m^2) \quad (1-25)$$

这是自由空间中的声强与声功率的关系式。

②半球面自由空间中离点声源的距离为 r 处径向声强为

$$I = \frac{W}{2\pi r^2} \quad (\text{单位: } W/m^2) \quad (1-26)$$

在噪声控制中,对贴近坚实地面的声源,当其体积不太大(相对声波波长)而又距离观察点很远时,常可近似作为这一情况来处理。