

21 世纪高等院校教材

声学测量

陈克安 曾向阳 李海英 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先介绍了与声学测量有关的声学基础理论知识,给出了噪声的评价方法和标准,然后就声学测量仪器和相关专门技术分别加以介绍,包括测量传声器、声学仪器和设施、噪声源测量、声学材料和声学结构的声学性能测量等,并侧重于空气中可听声的测量.本书内容广泛、系统性强,内容新颖,反映了声学测量技术及仪器的最新进展.

本书重点面向噪声控制、建筑声学和环境声学方向的本科专业学生,同时也可作为有关专业的研究生教材和广大声学工作者的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

声学测量 / 陈克安,曾向阳,李海英编著. —北京:科学出版社,2005
21世纪高等院校教材
ISBN 7-03-015950-0

I. 声… II. ①陈…②曾…③李… III. 声学测量-高等学校-教材
IV. TB52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 081102 号

责任编辑:胡华强 昌 盛 姚庆爽 / 责任校对:刘小梅
责任印制:安春生 / 封面设计:陈 敬

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年8月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—2 500 字数:250 000

定价:20.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

声学是一门古老又充满生机的学科,它研究各种介质中声波的产生、传播、接收和重放.按频率划分,声波分为次声、可听声和超声.传播声波的介质有气体、固体和液体.因此,声学的分支学科众多,涉及的基本理论、研究方法和技术手段范围非常广泛.

声学测量是声学学科重要的分支之一,是声学理论研究和声学技术发展的基石.熟练掌握各种声学测量方法和测量仪器的使用是加深声学基础知识、锻炼实践动手能力、掌握科学实验方法的重要手段.目前,国外有关声学测量的书籍非常有限,而国内仅有的两本出版于20年前,其内容已落后于声学测量技术的快速发展.另外,到目前为止,国内还没有一本专门的声学测量方面的教科书.为此,我们着手编写了这样一本以本科教学为目的的教材.

本书侧重于空气中可听声的测量,重点面向噪声控制、建筑声学和环境声学方向的本科专业,同时也可作为有关专业的研究生教材和广大声学工作者的参考书.本书正文分为8章,另有3个附录.首先介绍了与声学测量有关的声学基础理论知识,给出了噪声的评价方法和标准,然后就声学测量仪器和相关专门技术分别加以介绍,包括测量传声器、声学仪器和设施、噪声源测量、声学材料和声学结构的声学性能测量等.鉴于噪声污染问题日益突出,本书第8章介绍了主要的环境噪声的测量方法,最后,就测量误差及其分析进行了阐述.

本书的主要特色表现在:①内容广泛、系统性强.既介绍了有关声学测量的基础知识,如声学基础、测量基础、基本的声学仪器、设备和设施,又针对环境声学、噪声与振动控制,讲述了噪声源测量、声学材料与声学结构的测量、环境噪声测量的各种知识.另外,在附录中,给出了有关噪声污染与控制的国家法律和标准,对树立学生环境保护的全局观念大有帮助.②内容新颖、反映学科发展的最新动向.近20年来,声学测量技术的发展突飞猛进,新的测量方法和测量仪器不断涌现.本书尽量反映这种变化,增强了声强技术及其在声学测量中的应用、数字化声学测量仪器和系统的功能和使用、数字信号处理技术在声学测量中的应用等.

编著者虽竭尽全力,但错误仍在所难免,希望读者指正,并对进一步的修改和完善提出宝贵意见.

作 者
2004年12月

目 录

前言

第 1 章 声音的基本特性	(1)
1.1 声波的产生与波动方程	(1)
1.1.1 声波的产生	(1)
1.1.2 波动方程	(2)
1.2 声波的基本特性	(3)
1.2.1 声波的分类	(3)
1.2.2 声波的反射、折射与透射	(4)
1.2.3 声波的干涉	(5)
1.3 声场基本特性	(6)
1.3.1 声场的分类	(6)
1.3.2 声波导管理论	(7)
1.3.3 室内声场	(8)
1.4 基本声学参量	(11)
1.4.1 声压、声强与声功率	(11)
1.4.2 声学参量的级与运算	(13)
1.4.3 噪声评价参量	(18)
第 2 章 声信号采集与分析	(32)
2.1 声信号及其基本特性	(32)
2.1.1 声信号及其分类	(32)
2.1.2 随机信号分析	(33)
2.2 声信号采集	(37)
2.2.1 数据采样	(37)
2.2.2 模数转换	(39)
2.3 傅里叶变换及其实现	(42)
2.3.1 离散傅里叶变换	(43)
2.3.2 快速傅里叶变换	(45)
2.4 声信号的频率分析	(48)
2.4.1 倍频程分析	(48)
2.4.2 临界带宽	(50)

第 3 章 声波的接收	(52)
3.1 声波接收的基本原理	(52)
3.2 传声器概述	(53)
3.2.1 传声器的分类及工作原理	(53)
3.2.2 传声器的主要性能	(56)
3.3 测量传声器	(57)
3.3.1 测量传声器工作原理	(58)
3.3.2 测量传声器的特性	(59)
3.3.3 测量传声器的选择	(64)
3.4 测量传声器的校准	(66)
3.4.1 声压灵敏度校准	(66)
3.4.2 自由场灵敏度校准	(68)
3.4.3 活塞发生器校准	(69)
3.4.4 其他校准方法	(70)
3.5 测量传声器的附件	(71)
第 4 章 声学仪器与声学设施	(72)
4.1 声级计	(72)
4.1.1 概述	(72)
4.1.2 基本组成	(73)
4.2 声强测量系统	(78)
4.2.1 P-U 和 P-P 技术	(79)
4.2.2 声强表达式	(82)
4.2.3 声强探头的校准	(86)
4.3 数字式声学仪器	(88)
4.3.1 数字式声级计	(88)
4.3.2 实时信号分析仪	(90)
4.4 声学设施	(95)
4.4.1 消声室	(95)
4.4.2 混响室	(96)
第 5 章 测量规范	(99)
5.1 测量的事前准备	(99)
5.1.1 测量流程设计	(99)
5.1.2 环境因素对测量的影响	(102)
5.2 测量误差	(105)
5.2.1 测量误差及其分类	(105)

5.2.2	测量误差理论	(109)
5.2.3	测量数据的统计分析与检验	(111)
5.3	噪声标准	(115)
5.3.1	声学测量基础标准	(115)
5.3.2	噪声限值标准	(116)
5.3.3	噪声测量标准	(118)
第 6 章	噪声源测量	(122)
6.1	噪声级测量	(122)
6.1.1	稳态噪声测量	(123)
6.1.2	非稳态噪声测量	(124)
6.1.3	噪声剂量测量	(126)
6.2	声功率测量	(127)
6.2.1	声压法	(128)
6.2.2	声强法	(132)
6.2.3	标准声源法	(134)
6.2.4	振速法	(135)
6.3	噪声源识别与定位	(136)
6.3.1	声学测量法	(137)
6.3.2	信号分析法	(140)
第 7 章	声学材料与声学结构的测量	(141)
7.1	吸声系数和声阻抗率测量	(141)
7.1.1	驻波管法	(142)
7.1.2	声波导中的双传声器法	(148)
7.1.3	声波斜入射时吸声材料特性测量	(152)
7.1.4	混响室法	(157)
7.2	隔声测量	(159)
7.2.1	隔声量	(160)
7.2.2	混响室法	(160)
7.2.3	现场测量方法	(163)
7.3	消声器声学性能测量	(165)
第 8 章	环境噪声测量	(168)
8.1	区域环境噪声测量	(168)
8.1.1	城市环境噪声测量	(168)
8.1.2	飞机环境噪声测量	(173)
8.1.3	铁路环境噪声测量	(179)

8.2 工业企业噪声测量	(180)
8.2.1 车间内噪声的测量方法	(181)
8.2.2 边界噪声测量方法	(181)
8.3 常用交通工具噪声测量	(183)
8.3.1 机动车辆噪声测量	(183)
8.3.2 铁路机车车辆噪声测量	(185)
8.3.3 船舶辐射噪声测量	(186)
参考文献	(189)
附录 A 中华人民共和国环境噪声污染防治法	(190)
附录 B 重要的噪声限值标准	(197)
B.1 城市区域环境噪声标准	(197)
B.2 建筑施工场界噪声限值标准	(198)
B.3 工业企业厂界噪声标准	(199)
附录 C 声学量与声学单位	(201)
C.1 声学量与单位的名称和符号	(201)
C.2 CGS 制与 SI 制单位换算系数表	(204)

第 1 章 声音的基本特性

我们的周围存在着各种各样的声音,总体上可分为语言声、音乐声、自然声和噪声等四大类.如人们的讲话声,乐器的演奏声,林中的鸟鸣声,山涧的流水声和松涛声,机器的轰鸣声,火车、汽车、飞机等交通工具发出的噪声等.要对这些声音及相关声学现象进行测量和定量研究,必须对声音的基本特性有深入了解.

本章分为 4 节.首先介绍声音的产生机理和描述声波运动规律的数学方程——波动方程,然后分别阐述声波的分类及声学测量中需要关注的典型声学现象,如声波的反射、折射与透射,声波的干涉等,随后就各类声场的基本特性进行详细叙述,最后逐一介绍各类基本声学量,它们是声学测量的对象,必须对其基本概念和基本性质有准确无误的认识.

1.1 声波的产生与波动方程

1.1.1 声波的产生

日常生活中的绝大部分声音来源于物体的振动.如讲话的声音来源于喉内声带的振动,扬声器发声来源于纸盆的振动,机械噪声来源于机器部件的振动.凡是发出声音的物体都可称为声源.声源不一定是固体,液体和气体同样会由于振动而发声,如浪涛声和汽笛声就是由流体诱发引起的.

声音是听觉系统对声波的主观反映,而声波的产生来源于声源诱发的振动在介质中的传播.因此,产生声波的必要条件是声源和介质(空气、水等等).真空中没有介质存在,因而在真空中不能传播声音.需要注意的是,声波在介质中的传播,只是介质振动状态的传播,介质本身并没有向前运动.它只是在其平衡位置附近来回地振动,所传播出去的是物质的运动形态,这种运动形式叫波动.声音是机械振动状态的传播,这种传播过程是一种机械性质的波动,故而称为声波.

在气体、液体等理想流体介质中,声振动传播的方向与介质质点振动方向是一致的,此类声波是纵波.描述声波的最常见的基本物理量是声压,它是介质受扰动后产生的逾量压强,其单位是压强的单位:Pa(帕). $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$.

描述声压的基本参量包括幅度、相位、频率和波长等.例如,一列纯音声波,在数学上表示为 $p = p_a \sin(\omega t + \phi)$,则 p_a 是该声波的幅度, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, ω 为角频率, f 为频率, T 为周期, ϕ 为相位.一个周期内声波的长度称为波长,它与频率成反比,有 $\lambda = c_0/f$,其中 c_0 是声波传播的速度.

频率在 20Hz~20kHz 的声音称为音频声,也称为可听声,它是具有正常听力的人能够听得到的声音;小于 20Hz 的声音称为次声;大于 20kHz 的声音称为超声.如无特别声明,本书所指的声音是音频声.

1.1.2 波动方程

声波所及的空间称为声场.在声场中,描述声场时间、空间变化规律和相互联系的数学方程叫做声波的波动方程,它是一切声学理论研究的基础.为了使研究的问题得到简化,本书仅讨论理想流体介质中小振幅声波的情况,相应的波动方程称为线性声波波动方程.

1. 理想流体介质的三个基本方程

所谓的理想流体介质是指:介质中不存在黏滞性;介质在宏观上是均匀的、静止的;声波在介质中的传播为绝热过程.在理想流体介质中,声波扰动的传播必然满足三个基本物理定律:牛顿第二定律、质量守恒定律和热力学定律由此得到的三个基本方程为:运动方程、连续性方程和物态方程.在一维空间(如 x 方向),这三个方程可分别表示为

$$\rho \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1.1)$$

$$- \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$dP = c^2 d\rho \quad (1.1.3)$$

其中 p, v, ρ 分别为声场中某一点由于声扰动引起的声压、质点振速和介质密度; P 为介质总的声压,有 $P = P_0 + p$; c 为声波的传播速度.

2. 小振幅声波的一维波动方程

所谓的小振幅声波,指的是该声波满足如下条件:①声压远小于介质中的静态压强;②介质质点振速远小于声波的传播速度;③质点位移远小于声波波长;④介质密度增量远小于静态密度.自然界中的绝大多数声波可归为小振幅声波,它是线性声学研究的对象.

在一维空间中,对于小振幅声波,方程(1.1.1)~(1.1.3)分别可以进一步简化为如下形式:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.1.4)$$

$$- \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \rho'}{\partial t} \quad (1.1.5)$$

$$p = c_0^2 \rho' \quad (1.1.6)$$

其中 ρ_0, c_0 为没有声扰动时介质的密度和声波的传播速度. 消去式(1.1.4)~(1.1.6)中的任意两个变量, 如质点振速和介质密度变量, 剩下的两个式子分别对 x 和 t 求导, 综合整理后可以得到

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1.7)$$

这就是一维声场中的波动方程.

3. 三维波动方程

在三维空间中, 式(1.1.4)~(1.1.6)可以推广表示为如下形式:

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\text{grad } p \quad (1.1.8)$$

$$-\text{div}(\rho_0 \mathbf{v}) = \frac{\partial \rho'}{\partial t} \quad (1.1.9)$$

$$p = c_0^2 \rho' \quad (1.1.10)$$

其中

$$\text{grad } p = \frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}, \quad \text{div}(\rho_0 \mathbf{v}) = \frac{\partial(\rho_0 v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_0 v_z)}{\partial z}$$

由此可以导出三维波动方程为

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1.11)$$

其中 ∇^2 为拉普拉斯算子, 在直角坐标系中为

$$\nabla^2 = \text{div}(\text{grad } p) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

1.2 声波的基本特性

1.2.1 声波的分类

声波在传播过程中, 振动相位相同的质点所构成的曲面称为波阵面. 按波阵面的不同, 声波可分为球面波、柱面波和平面波三类. 如果声波的波阵面为一系列同心球面, 这样的声波就是球面声波; 球形声源产生的声波是球面波, 它是实际环境下最常见的一种声波形式. 如果脉动球形声源的直径远小于所辐射声波的波长, 此声源则近似为点声源. 在无界空间中(也称为自由空间), 点声源辐射产生的声波为各向均匀的球面波, 其声压表达式为

$$p = \frac{j k \rho_0 c_0 q_0}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.2.1)$$

其中 $k = \omega / c_0$ 为声波波数, q_0 为声源强度, 由球源半径和球面振动幅度确定.

平面波指的是声波沿一个方向(如 x 方向)传播, 在其余方向上所有质点的振幅和相位均相同的声波, 它的波动方程为一维声波方程[式(1.1.7)]. 通常条件下并不会产生真正意义上的平面波, 不过在声学领域中, 平面波却是主要的研究对象. 原因有三: ①在辐射声场的远场, 各种类型的声波均可近似为平面波; ②在管道中或利用特殊的声学装置(如驻波管)可以产生理想的平面波; ③平面波具有其他类型声波主要的物理特性, 但其理论分析又相对简单. 平面波的声压表达式为

$$p(x) = p_a e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.2.2)$$

其中 p_a 为声压振幅, 对平面波而言, 它是一个常数.

1.2.2 声波的反射、折射与透射

前面讨论了声波在无界空间中的传播规律, 然而在实际中真正的无界空间并不多见, 常会遇到各种各样的“障碍物”, 例如, 声波从一种介质进入另一种介质就属于这种情况.

1. 声学边界条件

声波在两种介质的分界面上会发生反射、透射(对垂直入射声波)和折射(对斜入射声波)现象. 要获得入射波、反射波、透射波(或折射波)之间的定量关系, 需要用到边界条件.

在无限大的分界面上, 有两种声学边界条件, 它们是声压连续条件和法向质点振速连续条件, 其数学表达式为

$$p_1 = p_2 \quad (1.2.3)$$

$$v_1 = v_2 \quad (1.2.4)$$

其中 p, v 分别为分界面上的声压和质点振速, 下标 1 和 2 分别表示介质 1 和介质 2.

2. 折射定律

对于一维斜入射平面波问题, 入射波声压和质点振速为

$$p_i = p_{ia} e^{j(\omega t - k_1 x \cos \theta_i - k_1 y \sin \theta_i)} \quad (1.2.5)$$

$$v_{ix} = -\frac{\cos \theta_i}{\rho_1 c_1} p_i \quad (1.2.6)$$

反射波声压和质点振速为

$$p_r = p_{ra} e^{j(\omega t + k_1 x \cos \theta_r - k_1 y \sin \theta_r)} \quad (1.2.7)$$

$$v_{rx} = -\frac{\cos \theta_r}{\rho_1 c_1} p_r \quad (1.2.8)$$

在介质的另一侧的透射波声压和质点振速为

$$p_t = p_{ta} e^{j(\omega t - k_2 x \cos \theta_i - k_2 y \sin \theta_i)} \quad (1.2.9)$$

$$v_{tx} = -\frac{\cos \theta_i}{\rho_2 c_2} p_t \quad (1.2.10)$$

在分界面上,有以下边界条件

$$p_i + p_r = p_t \quad (1.2.11)$$

$$v_{ix} + v_{rx} = v_{tx} \quad (1.2.12)$$

由此可以获得声波反射与折射定律

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.2.13)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.2.14)$$

1.2.3 声波的干涉

如果空间中存在多个声源,则会产生不止一系列的声波,这在声学测量领域是常见现象.先不考虑各声源的相互作用,下面研究各列声波叠加后的声压和声能密度的情况.

1. 声波的相干性

设有两列同频率、相差固定的平面波,分别为

$$p_1 = p_{1a} \cos(\omega t - \varphi_1), \quad p_2 = p_{2a} \cos(\omega t - \varphi_2) \quad (1.2.15)$$

合成声场的声压为

$$p = p_a \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.2.16)$$

其中

$$p_a^2 = p_{1a}^2 + p_{2a}^2 + 2 p_{1a} p_{2a} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.2.17)$$

$$\varphi = \arctan \frac{p_{1a} \sin \varphi_1 + p_{2a} \sin \varphi_2}{p_{1a} \cos \varphi_1 + p_{2a} \cos \varphi_2} \quad (1.2.18)$$

合成声场的平均声能密度为

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_1 + \bar{\epsilon}_2 + \frac{p_{1a} p_{2a}}{\rho_0 c_0^2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.2.19)$$

由式(1.2.19)可以看出,两列声波叠加后的声波平均声能密度会出现极大、极小相互交错的现象,这就是声波的干涉现象.对于不同频率的两列固定相差声波,有

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_1 + \bar{\epsilon}_2 \quad (1.2.20)$$

2. 无规相位声波的叠加

对于具有相同频率的两列相位随机变化的声波,有

$$p_1 = p_{1a} \cos(\omega t - \varphi_1), \quad p_2 = p_{2a} \cos(\omega t - \varphi_2) \quad (1.2.21)$$

合成声场的声压为

$$p = p_a \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.2.22)$$

其中

$$p_a^2 = p_{1a}^2 + p_{2a}^2 + 2 p_{1a} p_{2a} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.2.23)$$

$$\varphi = \arctan \frac{p_{1a} \sin \varphi_1 + p_{2a} \sin \varphi_2}{p_{1a} \cos \varphi_1 + p_{2a} \cos \varphi_2} \quad (1.2.24)$$

合成声场的平均声能密度为

$$\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_1 + \bar{\epsilon}_2 \quad (1.2.25)$$

对于多列这样的声波,有

$$p_e^2 = p_{1e}^2 + p_{2e}^2 + \cdots + p_{ne}^2 \quad (1.2.26)$$

在实际场合中,多人讲话发出的声音,多台机器发出的噪声,不同车辆发出的交通噪声的叠加都可以看作无规相位声波的叠加。

1.3 声场基本特性

1.3.1 声场的分类

声场是指声波到达的空间.声空间总体上分为自由空间和有界空间两大类.理想的自由空间是指无限大的、没有障碍物的空间.有界空间指的是空间部分或全部被边界所包围,又分为两类:一类指那些有部分开口的闭合空间,如通风管道、输液输气管道、消声器等,由此形成的声场称为管道声场;另一类指完全封闭的闭合空间,如生产车间、办公室、音乐厅、会议室等,由此形成的声场为封闭空间声场.

纯粹的自由空间并不多见,如果空间边界和空间内物体对声传播方式的影响很小,则该空间中的声场可近似为自由声场.如旷野中的变压器噪声声场、空中航行的飞机辐射噪声声场、封闭空间中机械设备所在位置附近区域直达声形成的声场等.

在自由声场中,声波只是从声源向四周辐射出去,而不受边界和其他物体的阻碍,同时也没有另外的声波干扰,声场中只传播自由行波.

对于一维管道,如果管道无限长,则在管道方向上的声传播与自由空间无异,所传播的声波为行波.在管道横截面上声波则形成特定形式的驻波或简正波.任意

声源都可以激发出许多阶简正波,当声源的振动频率小于管道截止频率时,管道中的高次波将沿管道方向逐步衰减,最后只能传播均匀平面波。

封闭空间中,当声源发出声波向四周传播,在碰到边界产生反射之前的声波称为直达声;一次以上的反射声波将在空间中产生驻波,形成混响声.按声源频率的高低,混响声场又分为驻波声场和扩散声场.在低频段,声波在空间的传播会形成明显的驻波分布,每一个具有驻波形式的声场分布又称为声模态,相应的声场分析采用简正波理论或波动声学理论;当声源频率逐渐升到所谓的 Schroeder 频率后,一个声模态特征频率的半功率带宽内存在三个以上的声模态时,声场中各点的声能密度从统计的观点来看表现出大致均匀的倾向,此时的声场称为扩散声场。

1.3.2 声波导管理论

1. 矩形声波导管

假设有一矩形管道,长度方向用 Z 坐标表示,管口取在 $z=0$ 处,另一端延伸到无限远处.管道截面在 XY 平面,长度分别为 l_x, l_y .在管道内,声场用直角坐标系表示,其声波方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.3.1)$$

令 $p(x, y, z, t) = p_a(x, y, z) e^{j\omega t}$, $p_a(x, y, z) = X(x) Y(y) Z(z)$,代入式(1.3.1),在 X, Y, Z 三个方向即可获得三个独立坐标的常微分方程.以 X 坐标为例,有

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + k_x^2 X(x) = 0 \quad (1.3.2)$$

Y, Z 坐标的两个方程与此类似.式(1.3.2)中, k_x 为待定常数,称为 X 方向的波数,各方向波数之间满足如下关系:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (1.3.3)$$

因为管道在 X, Y 方向有界,声波入射到边界上产生反射波,入射波与反射波叠加后产生驻波; Z 方向没有边界,传播自由行波,因而设

$$X(x) = A_x \cos k_x x + B_x \sin k_x x \quad (1.3.4a)$$

$$Y(y) = A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y \quad (1.3.4b)$$

$$Z(z) = A_z e^{-j k_z z} \quad (1.3.4c)$$

根据运动方程,可以求得 X, Y 方向的质点振速 v_x 和 v_y .假设管道内壁为刚性边界,则边界条件为

$$v|_{x=0} = v|_{x=l_x} = 0, v|_{y=0} = v|_{y=l_y} = 0 \quad (1.3.5)$$

将式(1.3.5)代入 v_x 和 v_y 的表达式中即可求得待定系数 B_x 和 B_y .最后可求得

$$p(x, y, z, t) = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} p_{n_x n_y} = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} A_{n_x n_y} \cos k_x x \cos k_y y e^{j(\omega t - k_z z)} \quad (1.3.6)$$

其中

$$k_z = \sqrt{k^2 - (k_x^2 + k_y^2)} = \sqrt{k^2 - \beta_{n_x n_y}^2} \quad (1.3.7)$$

$$\beta_{n_x n_y}^2 = \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 \right] \pi^2 \quad (1.3.8)$$

式(1.3.6)中的 $p_{n_x n_y}$ 为 (n_x, n_y) 次简正波的声压表达式. 以上求解声波方程的方法称为分离变量法.

2. 波导中的平面波和高次波

式(1.3.7)中, 如果 $k^2 < \beta_{n_x n_y}^2$, 则 $k_z = -j\alpha$, $\alpha_{n_x n_y} = \sqrt{\beta_{n_x n_y}^2 - k^2}$, 于是, $p_{n_x n_y}$ 可改写为

$$p_{n_x n_y} = A_{n_x n_y} \cos \frac{n_x \pi}{l_x} x \cos \frac{n_y \pi}{l_y} y e^{-\alpha_{n_x n_y} z} e^{j\omega t} \quad (1.3.9)$$

式(1.3.9)中 $A_{n_x n_y}$ 为待定常数. 这表明沿 Z 方向传播的行波将会以指数方式逐渐衰减. 反过来说, 沿 Z 方向声波不衰减的条件是 $k^2 > \beta_{n_x n_y}^2$, 也就是要求

$$f > f_{n_x n_y} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2} \quad (1.3.10)$$

$f_{n_x n_y}$ 就是与 (n_x, n_y) 次波相对应的波导管的简正频率.

取 $(n_x, n_y) = (0, 0)$, 则该次波对应的声压为

$$p_{00} = A_{00} e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.3.11)$$

其中 A_{00} 在 X 、 Y 方向不同位置都是均匀的, 这说明 $(0, 0)$ 次波是沿 Z 方向传播的均匀平面波. $(0, 0)$ 次波以外的声波称为高次波. 定义除零以外最低的一个简正频率为管道的截止频率, 那么如果声源频率低于管道截止频率, 则管中只能传播 $(0, 0)$ 次均匀平面波. 反之, 当声源频率比某个简正频率高时, 管道中就激发出 (n_x, n_y) 高次波, 其声压表达式为

$$p_{n_x n_y} = A_{n_x n_y} \cos \frac{n_x \pi}{l_x} x \cos \frac{n_y \pi}{l_y} y e^{j\left[\omega t - \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 - \left[\left(\frac{n_x \pi}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y \pi}{l_y} \right)^2} z \right]} \quad (1.3.12)$$

1.3.3 室内声场

在管道中, 如果管道是有限长的, 两端封闭, 那么声场成为封闭空间声场(在建

筑声学里称为室内声场)。在三维封闭空间中,由于声波的传播在各方向均受到限制,形成驻波或简正波。当各次简正波的特征频率(简正频率)相隔较远时,不同驻波的波腹和波节在声场中表现十分明显,此时的声场称为驻波声场;如果各次简正波的特征频率相隔较近,使得一定频带内的驻波数目急剧增加,大量驻波的叠加使声场中的驻波效应被平均,使声场中各处的声能趋于一致,此时的声场就称为扩散声场。驻波声场和扩散声场的分析方法截然不同,形成了不同的声学分支——波动声学和统计声学,下面分别予以讨论。

1. 驻波声场

矩形封闭空间声场内的声压满足如下声波方程:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.3.13)$$

设有一矩形封闭空间,其长、宽、高分别为 l_x 、 l_y 、 l_z ,空间内壁面全部是刚性的。将坐标原点取在空间的一个角上,则刚性壁面的声学边界条件可以写为

$$v_x |_{x=0, x=l_x} = 0, v_y |_{y=0, y=l_y} = 0, v_z |_{z=0, z=l_z} = 0 \quad (1.3.14)$$

其中 v_x , v_y , v_z 分别为质点振速在 X 、 Y 、 Z 三个方向的分量。与管道声场求解声压表达式的过程类似,由边界条件(1.3.14)可以求得声波方程(1.3.13)的特解为

$$p_n(x, y, z) = A_{n_x n_y n_z} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z \quad (1.3.15)$$

其中 $n = (n_x, n_y, n_z)$, k_x , k_y , k_z 分别为 X 、 Y 、 Z 方向上的波数,由此可以得到封闭空间声场中第 n 次驻波的特征频率为

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \sqrt{f_{n_x}^2 + f_{n_y}^2 + f_{n_z}^2} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1.3.16)$$

顺便指出,上面所说的驻波有时也称为声模态,而 n 则为该声模态的序数。

声波方程(1.3.13)的一般解是所有特解的线性叠加,因而声场内某一点的总声压为

$$p(x, y, z, t) = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} \sum_{n_z=0}^{\infty} A_{n_x n_y n_z} \cos \frac{n_x \pi}{l_x} x \cos \frac{n_y \pi}{l_y} y \cos \frac{n_z \pi}{l_z} z e^{j\omega t} \quad (1.3.17)$$

式(1.3.17)说明,由于空间边界对声传播的限制,声场中存在大量的驻波。从理论上说,空间任一点的声压是无限多个驻波声压的线性叠加,然而,当声源频率等于或接近于某次驻波的特征频率时,空间内驻波主要包括该次驻波及其附近的几个驻波,这些驻波被称为主导驻波或主导声模态。

封闭空间内的驻波分为三类:轴向波、切向波和斜向波。轴向波指的是在驻波

序数 (n_x, n_y, n_z) 中有两个序数为零的驻波,如 $(n_x, 0, 0)$ 次驻波,其行进方向与 x 轴平行;切向波指的是驻波序数中有一个序数为零的驻波;斜向波则是指驻波序数中三个序数均不为零的驻波.经过统计计算,可以得到声源频率 f 以下各类驻波平均总数为

$$N = \frac{4\pi f^3 V}{3c_0^3} + \frac{\pi f^2 S}{4c_0^2} + \frac{fL}{8c_0} \quad (1.3.18)$$

其中 V 、 S 、 L 分别为封闭空间体积、壁面总面积和边线总长.需要指出的是,以上分析是以矩形空间为例,但式(1.3.18)所得结论却并不仅仅限于矩形空间.

如果声源的激发频率不是单一频率,而是具有一定的频带宽度,并且其中心频率比较高,空间的体积也比较大,那么由式(1.3.18)可以看出,此时空间中将被激发出大量驻波.各驻波彼此叠加后,将驻波效应“抹平”,声场能量在各方向趋于一致,则此时的声场性质就会发生很大变化.

2. 扩散声场

当声源频率大于

$$f_{sch} = 2000 \sqrt{T_{60}/V} \quad (1.3.19)$$

其中 T_{60} 为混响时间, V 为空间体积.此时声场成为扩散声场.在统计声学中,扩散声场要求满足如下要求:①声以声线方式以声速 c_0 传播,所携带的声能向各方向的传递概率相同;②各声线互不相干地实现叠加时,其相位的变化是无规的;③封闭空间内各处平均声能密度相等.

在封闭空间中,任一位置的声音均包括直达声和混响声.直达声是声源直接到达接收点的声音;混响声则是经过边界一次或多次反射后到达接收点的声音.描述封闭空间混响强弱的参量是混响时间,它被定义为:在扩散声场中,当声源停止发声后从初始的声压级降低 60dB 所需要的时间,用符号 T_{60} 表示,有

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (1.3.20)$$

其中 S 为壁面总面积, $\bar{\alpha}$ 为壁面的平均吸声系数.如果空间中有 I 个吸声系数不同的壁面,则

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^I \alpha_i S_i \quad (1.3.21)$$

其中 α_i 为第 i 个面积为 S_i 的壁面的吸声系数,它等于第 i 个壁面所吸收的能量与入射能量之比.如果封闭空间内的平均吸声系数小于 0.2,则式(1.3.20)可进一步简化为

$$T_{60} \approx 0.161 \frac{V}{S \bar{\alpha}} \quad (1.3.22)$$

式(1.3.22)最早由美国声学家赛宾提出,因此也被称为赛宾公式.

如果声源一直不停地向封闭空间中辐射声能,那么混响声场中的平均声能密度将不断地增长,直到声源每秒钟提供给混响声场的能量正好等于壁面和介质吸收的能量.此时空间中混响声的平均声能密度达到动态平衡,这一平均声能密度称为稳态混响平均声能密度,其计算公式为

$$\bar{\epsilon}_R = \frac{4W}{Rc_0} \quad (1.3.23)$$

其中 W 为声源的平均辐射功率, R 为房间常数,单位为 m^2 ,它与壁面总面积和平均吸声系数的关系是

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \quad (1.3.24)$$

如果声源是无指向的,将封闭空间内直达声和混响声一并考虑,可以推知声场总的平均能量密度为

$$\bar{\epsilon} = \frac{W}{4\pi r^2 c_0} + \frac{4W}{Rc_0} \quad (1.3.25)$$

其中 r 为接收点至声源的距离.由式(1.3.25)可以求出混响声与直达声相等的临界距离为

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{R}{\pi}} \quad (1.3.26)$$

因此,在封闭空间声场中,以声源为中心,在临界距离以内,直达声起主要作用,而在临界距离以外,混响声起主要作用.

1.4 基本声学参量

1.4.1 声压、声强与声功率

1. 声压与质点振速

正像本章开始叙述的那样,声压是定量描述声波的最基本的物理量,它是由于声扰动产生的逾量压强,是空间位置和时间的函数.由于声压的测量比较易于实现,而且通过声压的测量也可以间接求得质点振速等其他声学参量,因此,声压已成为人们最为普遍采用的定量描述声波性质的物理量.

声场中某一瞬时的声压值称为瞬时声压,在一定时间间隔内最大的瞬时声压为峰值声压.一定时间间隔内,瞬时声压对时间取均方根值称为有效声压,即

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (1.4.1)$$

其中 T 代表平均的时间间隔.

介质质点速度是求声能量所必需的一个参量,它是有方向的,是一个矢量.已知声压,通过运动方程可以求出质点速度,即

$$\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho_0} \int \text{grad } p \, dt \quad (1.4.2)$$

在 x 方向有

$$v_x = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} \, dt \quad (1.4.3)$$

2. 声能量与声能量密度

在一足够小的体积元内,其体积、压强和密度分别记为 V_0 、 p_0 、 ρ_0 ,则声扰动的能量表示为声动能和声势能之和,有

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{V_0}{2} \rho_0 \left(v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2 \right) \quad (1.4.4)$$

单位体积里的声能量称为声能量密度,其表达式为

$$\epsilon = \frac{\Delta E}{V_0} = \frac{1}{2} \rho_0 \left(v^2 + \frac{1}{\rho_0^2 c_0^2} p^2 \right) \quad (1.4.5)$$

方程(1.4.4)、(1.4.5)对所有形式的声波都成立,具有普遍意义.对于平面波,有

$$\Delta E = V_0 \frac{p_a^2}{\rho_0 c_0^2} \cos^2(\omega t - kx) \quad (1.4.6)$$

单位体积里的平均声能量为平均声能密度,有

$$\bar{\epsilon} = \frac{\overline{\Delta E}}{V_0} = \frac{p_a^2}{2 \rho_0 c_0^2} = \frac{p_e^2}{\rho_0 c_0^2} \quad (1.4.7)$$

3. 声功率与声强

单位时间内通过垂直于声传播方向面积 S 的平均声能量称为平均声功率或平均声能量流,它与平均声能密度的关系是

$$\overline{W} = \bar{\epsilon} c_0 S \quad (1.4.8)$$

单位面积上的平均声功率称为声强,有

$$I = \frac{\overline{W}}{S} = \bar{\epsilon} c_0 \quad (1.4.9)$$

实际中求声强的另一种办法是

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re}(p) \text{Re}(v) \, dt \quad (1.4.10)$$

声强的单位为 W/m^2 . 需要特别注意的是, 在三维空间中, 声强是有方向的, 是一个矢量, 它表示声场中声能流的运动方向.

1.4.2 声学参量的级与运算

1. 声压级、声强级和声功率级

实际生活中, 我们常会遇到强度变化范围很宽的各种声音, 例如, 人耳可以感受到的最弱的声音和能够忍受的最强的声音, 如果直接使用声压数值表示, 其变化范围可达到 10^6 量级, 使用起来极不方便, 而用对数标度以突出其数量级的变化则相对明了些. 另一方面, 人耳对声音的接收, 并不是正比于强度的绝对值, 而更近于正比其对数值. 由于这两方面的原因, 在声学中普遍使用对数标度来量度声压、声强、声功率等声学参量, 分别称为声压级、声强级和声功率级, 单位用分贝 (dB) 表示.

声压级的符号为 L_p , 其定义为: 将待测声压的有效值 p_e 与参考声压 p_0 的比值取以 10 为底的常用对数, 再乘以 20, 即

$$L_p = 20 \lg \frac{p_e}{p_0} \quad (1.4.11)$$

在空气中, 参考声压 $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 这个数值是具有正常听力的人对 1kHz 声音刚刚能够觉察到的最低声压值. 也就是说, 1kHz 声音是最低的可听声压, 低于这一声压值, 一般人就不能觉察到此声音的存在了, 亦即可听阈声压级为 0dB. 式 (1.4.11) 也可以写为

$$L_p = 20 \lg p_e + 94 \quad (1.4.12)$$

人耳的感觉特性, 从可听阈的 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 的声压到痛阈的 20Pa, 两者相差 100 万倍, 而用声压级来表示则变化为 0~120dB 的范围, 使声音的量度大为简明. 由此可以看出, 声压值变化 10 倍相当于声压级增加 20dB, 声压值变化 100 倍, 相当于声压级增加 40dB.

一般说来, 微风轻轻吹拂树叶的声音约 14dB, 在房间中高声谈话 (相距 1m 处) 约 68~74dB, 飞机强力发动机的声音 (5m 远) 约 140dB. 一个声音比另一声音的声压大一倍时, 声压级增加 6dB, 一般人耳对于声音强弱的分辨能力约为 0.5dB.

声强级 L_I 的定义为: 待测声强 I 与参考声强 I_0 的比值取常用对数再乘以 10, 即

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1.4.13)$$

在空气中, 参考声强 I_0 取为 $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$, 它是空气中参考声压 $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 相对应的声强值. 这样, 式 (1.4.13) 又可写成

$$L_I = 10 \lg I + 120 \quad (1.4.14)$$

声强 I 的单位为 W/m^2 . 由于

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c_0} \quad (1.4.15)$$

在计算参考声强时, 空气的特性阻抗率取值为 $\rho_0 c_0 = 400 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$, 代入式 (1.4.13), 有

$$\begin{aligned} L_I &= 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left(\frac{p^2}{\rho_0 c_0} \times \frac{400}{p_0^2} \right) \\ &= L_p + 10 \lg \frac{400}{\rho_0 c_0} = L_p + \Delta L_p \end{aligned} \quad (1.4.16)$$

一般情况下, $\Delta L_p = 10 \lg(400/\rho_0 c_0)$ 的值很小, 因此声压级 L_p 近似等于声强级 L_I . 例如, 空气中在一个大气压下, 温度为 0°C 时, $\rho_0 c_0 = 428 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$, $\Delta L_p = -0.29 \text{dB}$; 温度为 20°C 时, $\rho_0 c_0 = 415 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$, $\Delta L = -0.16 \text{dB}$, 都可以认为 $L_p \approx L_I$.

声功率也可用“级”来表示, 成为声功率级 L_W , 其定义为

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1.4.17)$$

这里 W 是指声功率的平均值 W , 在空气中, 参考声功率 $W_0 = 10^{-12} \text{W}$, 这样式 (1.4.17) 可写为

$$L_W = 10 \lg W + 120 \quad (1.4.18)$$

利用式 (1.4.9) 中声强与声功率的关系, 以及空气中声强级近似地等于声压级的关系, 可得

$$L_p \approx L_I = 10 \lg \left[\frac{W}{S} \cdot \frac{1}{I_0} \right]$$

将 $I_0 = 10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$ 代入, 便得到

$$L_p \approx L_I = L_W - 10 \lg S \quad (1.4.19)$$

这就是空气中声强级、声压级与声功率级之间的关系. 必须注意的是, 式 (1.4.19) 成立的条件必须是自由声场, 即除了声源发声外, 其他声源的声音和反射声的影响均小到可以忽略不计的程度. 自由场和半自由场中测量机器噪声声功率的方法就利用了上述原理.

有几点要注意的是: ①声强级、声功率级的定义中, 在对数前面的常数都是 10, 而声压级前面的对数为 20, 这是因为声能量正比于声强和声功率的一次方, 所以在以分贝为单位取“级”时, “能量”级和“幅度”级参量, 其对数前面的常数分别是 10 和 20, 这是不应混淆的. 如声压增加 1 倍, 声压级和声强级增加 6dB; 而声强增

加一倍,声压级和声强级仅增加 3dB.②对于一个确定的声源,其声功率级是不变的,而声压级、声强级都随着测点的不同而变化,如自由声场(无反射声场)中的点声源,其声压级和声强级随着 r 的增加而减小.

2. 基准级

除了上述声压级、声强级和声功率级采用对数级以外,在声学测量中,还有许多其他相关测量的动态范围也很大,直接用绝对值记录数据很不方便.为简便起见,仍然以“级”的形式表达.声学测量中常用的“级”与基准值如表 1.4.1 所示.

表 1.4.1 常用声学量的级和基准值

名称	定义式	基准值
声压级	$20\lg(p/p_0)$	$p_0 = 20\mu\text{Pa}$
振动加速度级	$20\lg(a/a_0)$	$a_0 = 1\mu\text{ms}^{-2}$
振动速度级	$20\lg(u/u_0)$	$u_0 = 1\text{nm s}^{-1}$
振动位移级	$20\lg(\eta/\eta_0)$	$\eta_0 = 1\text{pm}$
力级	$20\lg(F/F_0)$	$F_0 = 1\mu\text{N}$
功率级	$10\lg(W/W_0)$	$W_0 = 1\text{pW}$
声强级	$10\lg(I/I_0)$	$I_0 = 1\text{pW m}^{-2}$
能量级	$10\lg(E/E_0)$	$E_0 = 1\text{pJ}$
能量密度级	$10\lg(\epsilon/\epsilon_0)$	$\epsilon_0 = 1\text{pJ m}^{-3}$
传感器灵敏度级	$20\lg(\alpha/\alpha_0)$	$\alpha_0 = 1\text{V Pa}^{-1}$
声源发送灵敏度级	$20\lg(s/s_0)$	$s_0 = 1\text{Pa V}^{-1}$

3. 分贝的运算

如果已知一台机器在某点产生的声压级为 80dB,另一台机器为 85dB,那么该点的总声压级是否可将两声压级的数值直接作算术相加呢?要回答这一问题,必须注意到分贝的含义.

一般情况下,两个以上的噪声源产生的声波是不相干的,因此可以用声能量叠加的概念.因此,两个声源在该点产生的总声压 P_T 应有

$$p_T^2 = p_1^2 + p_2^2 \quad (1.4.20)$$

其中 p_1 和 p_2 分别为两个声源单独在测点产生的声压.如果第一个声源在测点处产生的声压级为 L_{p1} ,则由声压级的定义得

$$p_1 = p_0 \times 10^{\frac{L_{p1}}{20}} \quad (1.4.21a)$$

或

$$p_1^2 = p_0^2 \times 10^{0.1 L_{p1}} \quad (1.4.21b)$$

对第二个声源也是如此.于是,根据式(1.4.20),有

$$10^{0.1 L_{pT}} = 10^{0.1 L_{p1}} + 10^{0.1 L_{p2}} \quad (1.4.22)$$

对于 N 个噪声源的情况,有

$$10^{0.1 L_{pT}} = \sum_{n=1}^N 10^{0.1 L_{pn}} \quad (1.4.23a)$$

这样,总的声压级为

$$L_{pT} = 10 \lg \left(\sum_{n=1}^N 10^{0.1 L_{pn}} \right) \quad (1.4.23b)$$

对于仅有 2 个声压级相叠加的情况,总声压级为

$$L_{pT} = 10 \lg (10^{0.1 L_{p1}} + 10^{0.1 L_{p2}}) \quad (1.4.24)$$

如果 $L_{p1} = 80\text{dB}$, $L_{p2} = 80\text{dB}$,由式(1.4.24)可得 $L_{pT} = 83\text{dB}$;如果 $L_{p1} = 80\text{dB}$, $L_{p2} = 85\text{dB}$,则 $L_{pT} = 86.2\text{dB}$.这就是所谓的“分贝相加”,在工程实际中被广泛应用.

式(1.4.24)也可以利用两个声压级 L_{p1} 和 L_{p2} 的差值 $\Delta L_p = L_{p1} - L_{p2}$ (假定 $L_{p1} \geq L_{p2}$) 求出合成的声压级为

$$L_{pT} = 10 \lg [10^{0.1 L_{p1}} + 10^{0.1(L_{p1} - \Delta L_p)}]$$

由对数和指数运算法则得出

$$L_{pT} = L_{p1} + 10 \lg (1 + 10^{-0.1 \Delta L_p}) = L_{p1} + \Delta L'_p \quad (1.4.25)$$

其中

$$\Delta L'_p = 10 \lg (1 + 10^{-0.1 \Delta L_p}) \quad (1.4.26)$$

$\Delta L'_p$ 与 ΔL_p 的关系可以绘成图 1.4.1 所示的曲线,这里假定 $L_{p1} \geq L_{p2}$,具体的数值关系列于表 1.4.2.用图 1.4.1 不经过对数和指数运算可以很快查出两个声压级叠加后的总声压级.

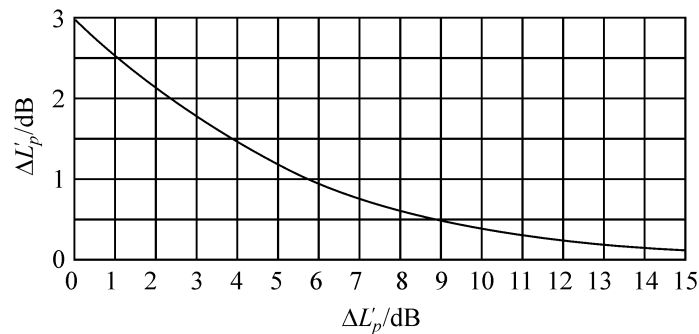


图 1.4.1 分贝相加曲线

表 1.4.2 $\Delta L'_p$ 与 ΔL_p 关系

$\Delta L_p / \text{dB}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\Delta L'_p / \text{dB}$	3.0	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1

例如,已知一声压级比另一声压级高出 2.5dB,即 $\Delta L_p = L_{p1} - L_{p2} = 2.5\text{dB}$,从图中横坐标 2.5dB 处向上作垂直线与曲线交于一点,该点的纵坐标为 1.9dB,则得到 $\Delta L'_p = 1.9\text{dB}$,即总声压级比第一个声压级 L_{p1} 高出 1.9dB.

从图 1.4.1 中曲线可以看出:两声压级相差越大,即 ΔL_p 越大,则相加后的总声压级比其中大的一个声压级增加得越小,即 $\Delta L'_p$ 越小.当两个声压级相差达 10dB 以上时,增加值就可以忽略不计.对于多于两个的声压级相加,除用式 (1.4.23a) 计算外,也可以利用两个声压级相加方法求得,就是把其中两个声压级先相加,将相加结果再与第三个声压级相加,如此一直相加到最后一个声压级.为简便起见常常从其中较大的声压级开始,这样在相加过程中当相加到声压级大于后面尚未相加的声压级 10dB 以上时,如果未相加的声压级数目不多,则后面的这些声压级就可略去不计了.

分贝的“相加”不仅仅局限用于两个声源或更多的声源发出的声音,对同一个声源发声也有“分贝相加”问题.一般声源发声所包含的不只是单一频率的成分,它发出的是各种频率合成的声波,而频率不同的声波是不相干的,它们之间的相加也遵循能量相加的原则,所以,如果已知声源所发出的声波各频率成分的声压级,则可按“分贝相加”原理得出其总声压级.

在测量噪声的过程中,往往会受到其他外界噪声的干扰,此种噪声称为背景噪声(或本底噪声).如果所测得车间内某机器运行时包括背景噪声在内的总声压级为 L_{pT} ,在机器停止时,测得背景噪声声压级为 L_{pB} ,那么如何从这一测量结果中得出这一机器的真实声压级? 这一问题实际上是求 L_{pT} 中扣去因 L_{pB} 所引起的增加值等于多少,也就是所谓的“分贝相减”问题.

由式(1.4.26)可以得到被测机器的声压级为

$$L_{pS} = 10\lg(10^{0.1L_{pT}} - 10^{0.1L_{pB}}) \quad (1.4.27)$$

如果令总声压级 L_{pT} 与背景噪声级 L_{pB} 的差值为 $\Delta L_{TB} = L_{pT} - L_{pB}$,则总声压级 L_{pT} 与被测机器声压级 L_{pS} 的差值表示为

$$L_{pS} = L_{pT} + 10\lg(1 - 10^{-0.1\Delta L_{TB}}) = L_{pT} - \Delta L_{TS}$$

也就是

$$\Delta L_{TS} = L_{pT} - L_{pS} = -10\lg(1 - 10^{-0.1\Delta L_{TB}}) \quad (1.4.28)$$

式(1.4.28)也可类似图 1.4.1 那样绘制成 ΔL_{TS} 与 ΔL_{TB} 的关系曲线,如图 1.4.2 所示,称为“分贝相减”曲线.从图中虽然可以查到 $\Delta L_{TB} = 1\text{dB}$ 的修正值 ΔL_{TS} ,但背景噪声和所测量的噪声通常都有一定的涨落,所以实际上当测得的总声压级 L_{pT} 高出背景噪声声压级 L_{pB} 不到 3dB 时,所测得的结果是不可靠的.

在实际测量中,通常对“分贝相减”做近似处理(大多数国家标准就是如此规定的),如表 1.4.3 所示.

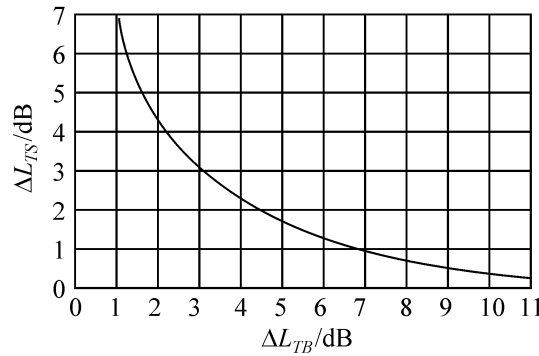


图 1.4.2 分贝相减曲线

表 1.4.3 分贝相减的近似处理

$\Delta L_{TB}/\text{dB}$	≥ 10	6~9	4~5	3	≤ 2
$\Delta L_{TS}/\text{dB}$	0	1	2	3	测量无效

如果测量的是多频率复合噪声的声压级,则在测量背景噪声和机器噪声时,应分别按各个频带进行测量,对每一频带声压级需逐一加以修正。

上面所讲的都是以声压级来推导公式和举例的,但其本质是不相干波的能量相加,所以这里所列的这些关于分贝“相加”和“相减”的公式也都适用于声强级和声功率级。

1.4.3 噪声评价参量

噪声对人的危害和影响是多方面的.多年来,各国研究者对噪声的危害和影响进行了大量研究,提出了各种评价方法和评价指标,期望得出与主观响应相一致的客观评价量和计算方法.这些客观评价量大致可概括为:与人耳听觉特性有关的评价量、与心理感受有关的评价量、与人体健康有关的评价量,以及与室内活动有关的评价量等几个方面.这些不同的评价量分别适用于不同的环境、时间、噪声源特性和评价对象.下面按上述分类介绍一些基本的噪声评价参量。

1. 响度与计权声级

(1) 响度

研究表明,人耳对于不同频率的声音的响度感觉是不一样的,它不纯粹是一个物理问题.大体上说来,人耳接收到的声振动,主观上产生的关于“响”的主观感觉(响度)近似地与声音强度的对数成正比.对于不同频率的声音,即使其声强级相同(声能量相同),人耳听起来却不一样响.例如,同为 60dB 的两个声音,若第一个声音频率为 100Hz,第二个为 1kHz,人耳听起来会感觉到前者比后者要轻得多.要使 100Hz 的纯音听起来和 60dB、1kHz 的纯音同样响,则它的声压级要调高到 67dB。

为了使人耳对频率的响应与客观量(声压级)联系起来,人们采用响度级来定量描述这种关系.响度级是以 1kHz 纯音为基准,对听觉正常的人进行大量比较试听后定出的.具体说来就是,对于 1kHz 的纯音,它的响度级就是这个声音的声压级,对频率不是 1kHz 的纯音,则用 1kHz 纯音与这一待定的纯音进行试听比较,调节 1kHz 纯音的声压级,使它和待定的纯音听起来一样响,这时 1kHz 纯音的声压级就被定义为这一纯音的响度级.

响度级记为 L_N ,单位是方(phon).如上述的 60dB、1kHz 纯音的响度级就是 60 方,而 100Hz 的纯音其声压级要达 67dB 才是 60 方,两者听起来才一样响.对各个频率的声音都作这样的试听比较,把听起来同样响的各相应声压级按频率连成一条条曲线,这些曲线就称为等响曲线,如图 1.4.3 所示.同一条曲线上的每个频率的声音在感觉上都一样响,它们的响度级就是这条曲线上 1kHz 处的声压级值.

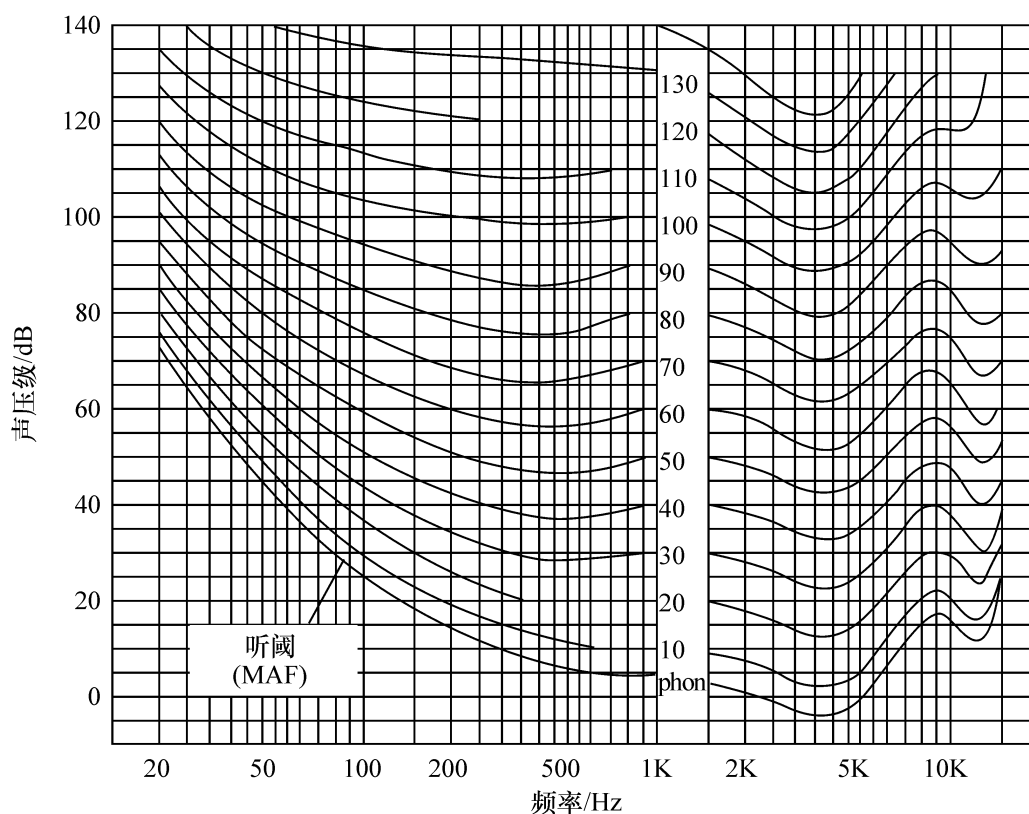


图 1.4.3 等响曲线

由等响曲线可以得出各个频率的声音在不同的声压级时,人们主观感觉出的响度级是多少.从频率上看,人耳能听到的声音在 20Hz~20kHz 的频率范围内,低于 20Hz 的次声和高于 20kHz 的超声人耳都听不到;另一方面,即使在 20Hz~20kHz 的声频范围内也不是任意大小的声音都能被人耳所听到.图 1.4.3 中最下面的一根虚曲线表示人耳刚刚能听到的声音的强弱,其响度级为零方,称为可听

阈,低于这根曲线的声音入耳是听不到的;图中最上面的曲线是痛觉的界限,叫痛阈,超过此曲线的声音人耳也听不到,感觉到的是痛觉.介于听阈和痛阈之间的声音为人耳可听声.从曲线中可看出,人耳能感受为声音的声能量范围达 10^{12} 倍,相当于 120dB 的变化范围.

响度级是一种对数标度的单位.不同响度级的声音不能直接进行比较,如响度级由 40 方增加到 80 方,并不意味着 80 方的声音听起来是 40 方的加倍响.声音“响”的程度,叫响度,它与正常听力对声音的主观感受量成正比,也就是说,响度加倍时,声音听起来也加倍的响.

响度记为 N ,单位是宋(sones).规定响度级为 40 方时响度为 1 宋,经实验得出响度级增加 10 方则响度增加一倍,如响度级 L_N 由 40 方增加到 50 方时,响度 N 加倍,由 1 宋增加为 2 宋,当 L_N 由 50 方变到 60 方时,响度再加倍由 2 宋增加至 4 宋,等等.由此可得响度级 L_N 与响度 N 的关系为

$$N = 2^{0.1 \times (L_N - 40)} \tag{1.4.29}$$

$$L_N = 40 + 10 \lg N \tag{1.4.30}$$

值得注意的是,响度涉及人的主观评价,所以两个声音相加时不能简单地将其响度作代数相加,必须借助于实验得出的频率修正才能得到总响度,这是一个复杂的问题.

上面所考虑的主要是建立测量到的声压级与纯音或窄带信号的主观感觉响度之间的关系,然而大多数实际噪声源产生的声音频率范围都是很宽的,为了计算这一复杂噪声的响度,斯蒂文斯在对大量听力正常人的主观测试基础上提出了等响度指数曲线,如图 1.4.4 所示.

这一方法是假定在一扩散声场内,它的响度指数由对应于该中心频率和频带声压级的响度指数曲线来确定.这一响度指数代表该频带对总响度的作用,但各频带的响度指数中以最大的响度指数对总响度的作用比其他频带指数作用为大.因此,计算总响度时最大响度指数的计权数为 1,而其他响度指数的计权数小于 1,其值随频带的宽度而异.具体情况如表 1.4.4 所示.

表 1.4.4 带宽修正因子的取值

倍频带宽	1/1	1/2	1/3
带宽修正因子 F	0.30	0.20	0.15

响度的计算方法为:首先在图 1.4.4 中,根据各中心频率和频带声压级分别确定各频带的响度指数.在各指数中找出最大的一个指数 S_m ,然后将各指数总和中除去最大的指数,乘以计权数 F ,最后与 S_m 相加,即

$$S_l = S_m + F(S - S_m) \tag{1.4.31}$$

其中 $S = \sum_{i=1}^n S_i$ 是各频带响度指数的总和(包括 S_m 在内), n 为频带数, F 为带宽修正因子. 有了总响度(宋), 就可由式(1.4.30) 或用图 1.4.4 中右边的列线图求得响度级(方).

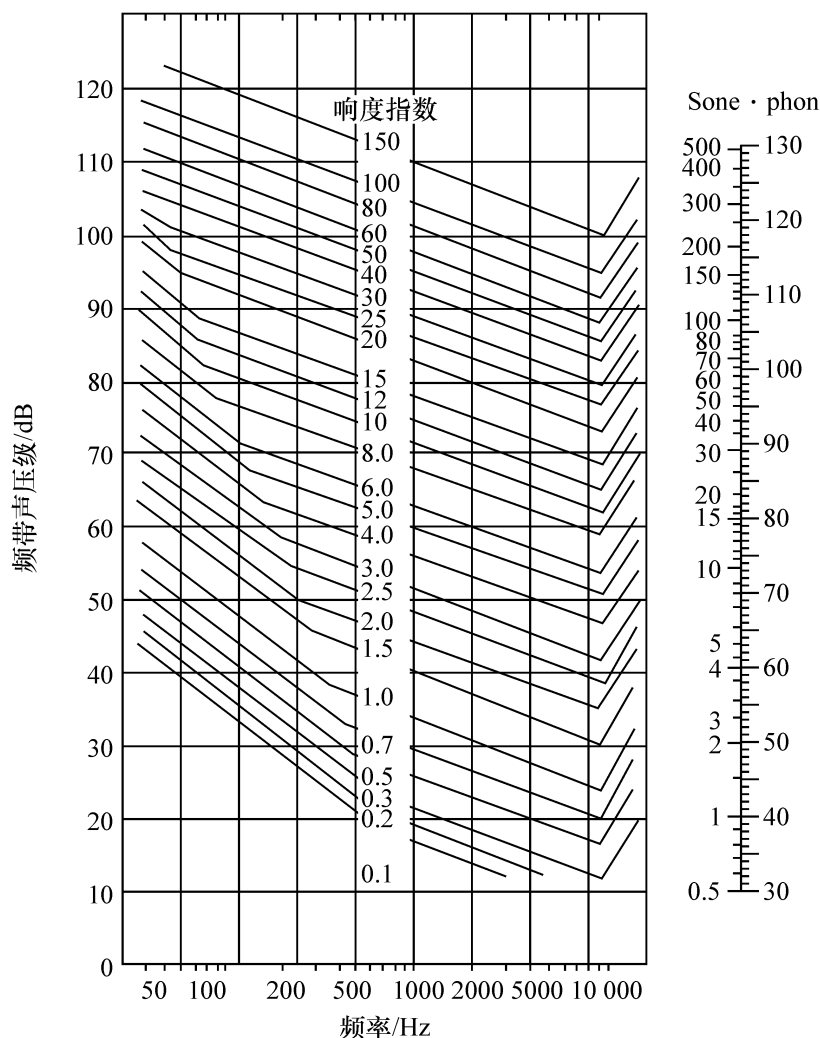


图 1.4.4 斯蒂文斯等响度指数曲线

(2) 计权声级

由等响曲线可以看出, 人耳对于高频声音, 特别是对于 $1 \sim 5\text{kHz}$ 的声音比较敏感, 而对低频声音, 特别是对 100Hz 以下的可听声不敏感, 且频率越低越不敏感. 也就是说, 声压级相同的声音由于频率不同所产生的主观感觉不一样. 为了使声音的客观量度和人耳听觉主观感受近似取得一致, 在测量声音的仪器(如声级计)上一般都装置了对频率的计权网络. 计权网络本质上是一个滤波器, 它对所接受到的声音按频带设一定的衰减来模拟人耳的听觉特性. 主要的计权网络有 A、B、C、D 四种, 其频率特性如图 1.4.5 所示. 用计权网络测得的结果叫计权声级, 在书写时单位 dB 的后面写出所用的计权网络的标称, 如 dBA、dBB、dBC 等. 对声强级、

声功率级也类似。

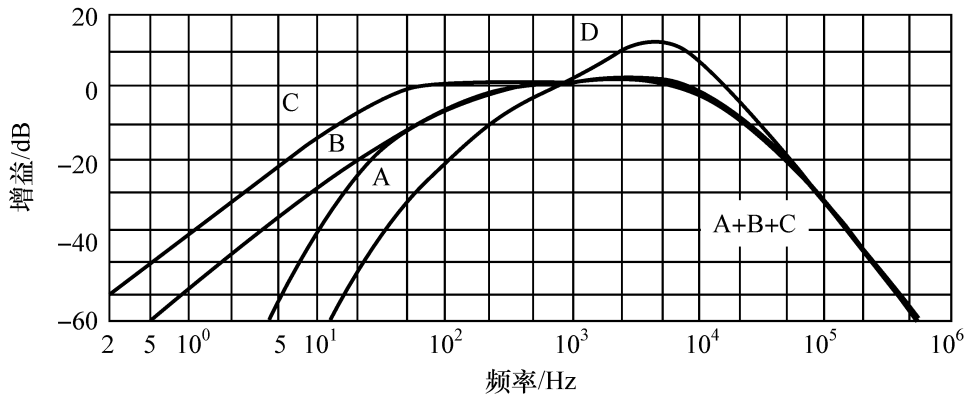


图 1.4.5 计权网络频率特性

2. 声级的时间特性

(1) 等效连续声级

A 计权声级对于稳定的宽频带噪声是一种较好的评价方法,但对于一个声级起伏不定或不连续的噪声,A 计权声级就显得不合适了.对于室外环境噪声,如交通噪声,噪声级是随时间而变化的,当有汽车通过时,噪声可能是 85~90dBA,但当没有车辆时可能是 50~55dBA,这时就很难说这个地方的交通噪声到底是多少分贝.又如,一台机器虽其声级是稳定的,但它是间歇地工作,而另一台机器噪声级虽与之相同,但一直连续地工作,那么这两台机器对人的影响就不一样.因为在相同时间内作用于人的噪声能量不相同.于是,人们提出了用噪声能量按时间平均的方法来评价噪声对人的影响,即等能量声级,又称等效连续声级,用符号 L_{Aeq} 表示.也就是说,用一个在相同时间内声能与之相等的连续稳定的 A 声级来表示该时段内不稳定噪声的声级.

例如,两台车床的噪声同为 80dBA,一台连续工作 8h,一台每小时中停半小时地工作 8h,显然后者发出的噪声平均能量只有前者的一半,即比前者小 3dBA,也就是相当于 8h 连续发出 77dBA 的噪声级,即等效连续声级为 77dBA.可见,等效连续声级能反映在声级不稳定的场合人们实际所接受的噪声能量的大小.

等效连续声级可由下式计算

$$\begin{aligned}
 L_{Aeq} &= 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (p^2 / p_0^2) dt \right] \\
 &= 10 \lg \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_{pA}/10} dt \right) \quad (1.4.32)
 \end{aligned}$$

其中 L_{pA} 为在 t 时刻测量到的 A 计权声级. p_0 为参考声压,等于 $20\mu\text{Pa}$.

显然,对于稳定的连续噪声,等效连续声级即等于所测得的噪声级. L_{eq} 的计

算有时不一定用 A 计权声级,也可以是等效声压级,此时式(1.4.32)中 L_{pA} 换成 L_p .

(2) 噪声剂量

噪声剂量多用于劳动保护,是衡量劳动者所接收的噪声是否超过安全标准的一种客观参量,其定义为

$$D = T_a / T_p \quad (1.4.33)$$

其中 T_a 为实际的噪声暴露时间, T_p 为容许的噪声暴露,它们的单位均为小时.

各国对于容许的噪声暴露时间的规定不一样,我国 1986 年颁布的《工业企业噪声控制设计规范》(GBJ87—85)规定在生产车间及作业场所连续工作 8h 的容许噪声为 90dBA,时间减半容许噪声可提高 3dBA.

如果噪声剂量超过 1 或 100%,则现场工作人员所接受的噪声就超过安全标准.举例说来,如果某工人操作一台机器,8h 生产部件 160 个,每个部件的加工噪声为 93dBA(允),均持续 2min.则该工人实际的总暴露时间 $T_a = 2\text{min} \times 160 = 320\text{min} = 5.33\text{h}$.93 分贝(A)的容许暴露时间 $T_p = 4\text{h}$.于是, $D = 5.33/4 = 1.33$.这说明该工人所在的噪声环境已超过噪声安全标准.

通常,人们每天所接收的噪声往往不是某一固定声级,这时噪声剂量应按具体的声级和相应的暴露时间进行计算.对于 I 个时段,有

$$D = \sum_{i=1}^I T_{ai} / T_{pi} \quad (1.4.34)$$

(3) 累积百分声级

现实生活中,许多环境噪声是属于非稳态的.对于这类噪声前面已有叙述,可用等效连续声级 L_{eq} 表达其大小,但是对噪声随机的起伏程度却没有表达出来.因而,需要用统计方法,以噪声级出现的时间概率或者累积概率来表示.目前,主要采用累积概率的统计方法,也就是用累积百分声级 L_x 表示.

L_x 是表示在整个测量时间内, $x\%$ 的时间所超过的噪声级.例如, $L_{10} = 70\text{dBA}$,是表示在整个测量时间内有 10%的时间,其噪声级超过 70dBA,其余 90%的时间则噪声级低于 70dBA;同理, $L_{50} = 60\text{dBA}$ 是表示有 50%的时间噪声级低于 60dBA, $L_{90} = 50\text{dBA}$ 表示有 90%的时间噪声级超过 50dBA,只有 10%的时间噪声级低于 50dBA.因此 L_{90} 相当于本底噪声级, L_{50} 相当于中值噪声级, L_{10} 相当于峰值噪声级.具体关系有: $L_{10} > L_{50} > L_{90}$.

如果某声级的统计特性符合正态分布,那么等效声级也可用下式累积百分声级近似得出为

$$L_{Aeq} \approx L_{50} + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60} \quad (1.4.35)$$