

环境工程案例教程丛书

室内声学设计与 噪声振动控制 案例教程

刘颖辉 主编 谢武 副主编 郭正 主审

SHINEI SHENGXUE SHEJI YU
ZAOSHENG ZHENDONG KONGZHI ANLI JIAOCHENG



化学工业出版社

室内声学设计与 噪声振动控制 案例教程

刘颖辉 主编 谢武 副主编 郭正 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共五章,第一章为声学及噪声振动控制概述,主要介绍声学基本理论,声的测量、噪声评价及标准,室内声学设计基本原理,噪声与振动控制基本原理及方法等;第二章为厅内声学设计案例,内容包括体型和容积的选择,最佳混响时间及其频率特性的选择和确定,吸声材料的组合布置和设计适当的反射面,以合理地组织近次反射声等;第三章为噪声与振动控制设计实例,重点介绍吸声、隔声、消声等技术的应用;第四章为典型设备噪声控制案例,重点介绍风机、空压机、冷却塔、发电机、水泵、球磨机等设备噪声的控制;第五章为声环境规划典型案例。本书所有案例皆有编者的综合评析。

本书可作为环境管理、环境工程设计、环境监测等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员的参考用书,也可作为高职院校环境类专业教学辅助用书及学生课程设计参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

室内声学设计与噪声振动控制案例教程/刘颖辉主编.

—北京:化学工业出版社,2014.1

(环境工程案例丛书)

ISBN 978-7-122-19163-2

I. ①室… II. ①刘… III. ①室内声学-设计-教材
②噪声控制-振动控制-教材 IV. ①TU112②TB53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 286495 号



责任编辑:刘兴春

责任校对:边涛

文字编辑:孙凤葵

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张17³/₄ 字数453千字 2014年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00 元

版权所有 违者必究

前言

噪声污染不同于水体、大气和固体废物污染,它属于物理性污染,其本质是振动形式及其能量的传播,不具有物质的累积性,噪声源停止运行污染立即消失,没有残余污染物。但是,由于声源和暴露人群的广泛存在,以及社会的快速发展,噪声已成为国内外影响最大的公害之一。其他物理性污染如振动污染等也越来越引起人类的重视。

噪声与振动控制行业作为环境保护相关产业的一个部分,得到了很大的发展。为适应环境保护事业发展的需要,鉴于近年来我国环境声学学科的发展,尤其是为了满足21世纪培养高职高专应用型人才的需要,多所高职院校的工作在教学和科研及工程设计第一线的专业教师,集多年教学、科研和工作实践经验,以及近年来的国内外最新研究成果编写成此书。编者注重噪声与振动污染控制技术的新发展、新应用。

本书根据社会及行业对人才的需求,按照环境工程任务构建课程体系,紧紧围绕完成工程任务的需要来选择内容,变知识本位为能力本位,以任务与职业能力分析为依据,设定职业能力培养目标;力求将环境科学体系与环境教育方法及环境工程实践有机结合起来。

本书改变传统教材平铺直叙的“课文”主题,以“案例”作为知识内容的载体,通过对案例的分析和活动,将有关的知识、技能、能力等融为一体,充分尊重教师的指导性和学生的主体性,教师将引导学生获取信息、指导阅读、评论文献、组织讨论、实施实验、解答疑难,在教学要求和教学内容上,本书具有开放性和弹性,教师可根据学生和学校的实际情况安排教学与课程设计。

本书涵盖厅内声学设计及噪声振动控制,充分地体现厅内声学设计及噪声振动控制的科学性、系统性、先进性和实用性。

本书内容丰富,体系结构完备。除了编入大量典型案例,还由编者对每个案例进行综合评析,全方位分析每一个案例的成功之处,也指出案例中可能存在的不足与改进方案等,为读者今后的工作实践提供丰富的经验,希望它们能够给读者的学习与工作带来真正有效的帮助。

书中列出了一些现行的声学标准及其他标准,是近年来国家颁发实施的标准,可供学习设计时参考,但标准是发展的,请读者在使用本书时注意核实标准是否已被更新。

本书由刘颖辉主编,各章的作者分别是(按编写章节次序):刘颖辉编写第一章、第五章;谢武编写第二章;李欢编写第三章;曾靓编写第四章。

我们要衷心感谢长沙环境保护职业技术学院郭正教授,他在百忙中审阅了编写大纲与全部书稿,并提出了许多建设性的意见与建议,使得本书更加严谨、更加贴近实际工作。

我们还要感谢钟文毅博士,他在本书的编写过程中为我们提供了大量工程实例,并给出

了一些宝贵的建议。

本书在编写过程中参考了国内外同行大量相关书籍，所参考书籍目录一并列在书后参考文献中，谨向这些作者致以诚挚的谢意！

由于编者水平有限，本书难免存在各种疏漏与不足，恳请广大读者及专家批评指正。

编者

2014 年 1 月

目 录

第一章 声学及噪声振动控制概述	1
第一节 声学基本理论	1
一、声波的基本特性	1
二、描述声波的物理量及计算	3
三、声波的传播	9
第二节 声的测量、噪声评价及标准	11
一、测量仪器	11
二、声强及声功率测量	12
三、噪声的评价	12
四、噪声的法规 and 标准	12
第三节 室内声学设计基本原理	16
一、室内声场简介	16
二、室内声场的相关计算	16
第四节 噪声控制基本原理与方法	18
一、吸声降噪	18
二、隔声技术	24
三、消声技术	32
第五节 振动控制基本原理与方法	44
一、振动概述	44
二、振动控制技术和方法	44
第二章 厅内声学设计	50
第一节 民用住宅室内声学设计典型案例	50
一、一个正圆形私人影院的室内声学设计	50
二、保利垄上家庭影院室内声学设计	53
第二节 歌剧院声学设计典型案例	57
一、保利剧院声学设计	57
二、国家大剧院建筑声学的创新应用	64
第三节 会议厅声学设计典型案例	71
一、工程概况及设计目标	71
二、声学设计	72

三、案例评析	81
第四节 体育馆声学设计典型案例	82
一、“水立方”比赛大厅室内声学设计	82
二、辽宁营口奥体中心综合性体育馆建声设计	88
第五节 录音室、演播室声学设计典型案例	95
一、语音录音室的声学设计	95
二、中型演播室的声学设计	100

第三章 噪声与振动控制设计实例	104
第一节 吸声技术应用实例	104
一、案例 1：某厂喷锌机降噪治理	104
二、案例 2：某厂冷却塔噪声污染控制工程	109
第二节 隔声技术应用实例	114
一、案例 1：某变电所噪声治理工程设计	114
二、案例 2：某污水厂罗茨鼓风机隔声罩设计	118
三、案例 3：某酒店厨房排风机噪声治理工程	125
第三节 消声技术应用实例	128
一、案例 1：某厂发电机房噪声治理工程设计	128
二、案例 2：某城市地铁×号线环控通风系统消声降噪工程设计	134
第四节 减振技术应用实例	141
一、案例 1：某城市轨道交通减振降噪工程设计	141
二、案例 2：某厂压缩机管道减振降噪工程	151
第五节 噪声与振动控制技术综合应用实例：某水泥厂噪声污染 控制工程设计	154

第四章 典型设备噪声控制案例	162
第一节 风机噪声及其控制案例	162
一、风机噪声源分析	162
二、风机噪声控制方法	165
三、风机噪声控制典型案例	169
第二节 空压机噪声及其控制案例	184
一、空压机噪声源分析	184
二、空压机噪声控制方法	186
三、空压机噪声控制典型案例	189
第三节 冷却塔噪声及其控制案例	209
一、冷却塔噪声源分析	209
二、冷却塔噪声处理方法	211
三、冷却塔噪声控制典型案例	212
第四节 发电机噪声及其控制案例	226
一、发电机噪声源分析	226
二、发电机噪声控制方法	228

三、发电机噪声控制典型案例.....	229
第五节 水泵噪声及其控制案例.....	242
一、水泵站噪声源分析.....	242
二、水泵站噪声控制方法.....	242
三、水泵噪声控制典型案例.....	244
第六节 球磨机噪声及其控制案例.....	260
一、球磨机噪声源分析.....	260
二、球磨机噪声控制方法.....	261
三、球磨机噪声控制典型案例.....	261

第五章 声环境规划典型案例	269
第一节 典型案例：甲市乙区东片交通噪声预测与控制规划.....	269
一、规划区基本情况.....	269
二、交通噪声质量现状评价.....	269
三、交通噪声污染预测.....	270
四、交通噪声控制措施与规划.....	271
第二节 案例评析.....	273

参考文献	275
------------	-----

第一节 声学基本理论

一、声波的基本特性

1. 声源

(1) 声源的概念 在人类生存的环境中存在着各种各样的声音, 尽管这些声音听起来音调不同, 但它们都有一个共同点, 即所有声音都来源于物体的振动。如讲话的声音来源于人的声带振动, 机器发出的声音来源于机器部件的振动, 笛子发出的声音来源于空气柱的振动。这些振动的物体通常被称为声源 (图 1-1)。声源不一定是固体, 液体和气体同样会由于振动而发声, 如海浪声、汽笛声就是由流体而发声的。物体的机械振动是声音产生的根源。

(2) 声源的类型

① 点声源。当声源尺寸远远小于声源至接收点的距离时, 可以看作点声源。

② 线声源。当许多点声源连续分布在一条线上时, 可认为该声源是线声源。

③ 面声源。通常是指尺寸为一个长方形的声源。

从理论上讲, 当一个声源的各方面尺寸相对于声源至接收点的距离都很大时, 我们也把该声源称为体声源。

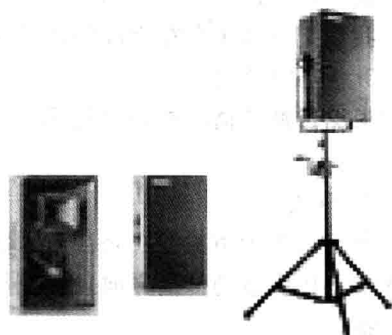


图 1-1 典型的声源

2. 声波的形成

声源发声后必须通过弹性介质才能向外传播。空气是人们最熟悉的传声媒质。例如, 在空气中人们可以听到声音, 而在真空中却听不到。声波正是依靠介质的分子振动向外传播声能, 所以声音是一种波动。介质分子的振动传到人耳时引起鼓膜的振动, 通过听觉机构“翻译”, 并发出信号, 刺激听觉神经而产生声音的感觉。以敲鼓时听到鼓声为例, 当敲打鼓面时, 鼓面在原来静止位置附近来回振动, 带动了与其相邻近的空气质点, 使空气质点产生压缩或膨胀运动。由于空气分子间有一定弹性, 这一局部区域的压缩或膨胀又会影响和促使下一邻近空气质点发生压缩运动或膨胀运动。这样, 由于声源的振动, 使得媒质中出现稠密和稀疏状态的交替变化, 声波的传播实际也就是这种疏密相间的状态的传播。如此, 由近及远相互影响, 就把鼓面的振动以一定的速度借助于媒质向各个方向传播出去 (图 1-2)。这种向前推进着的空气振动就是声波。

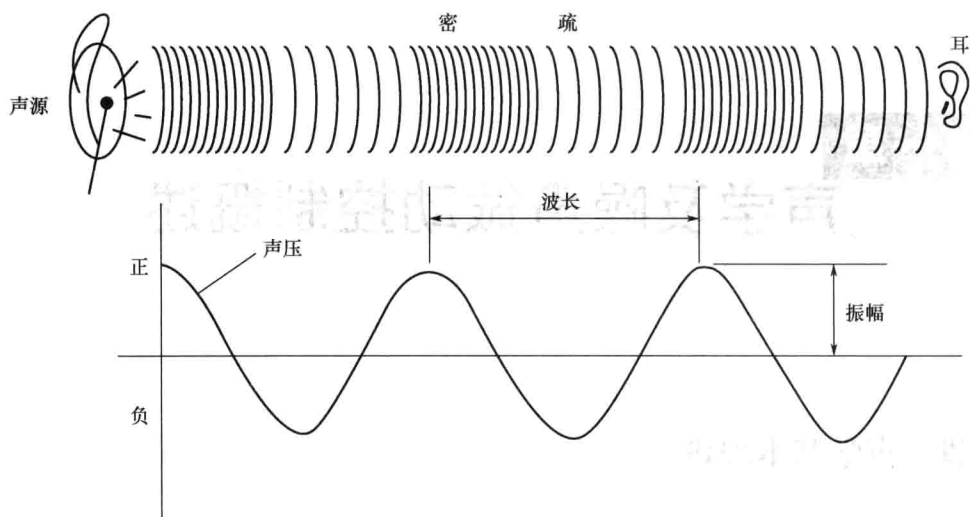


图 1-2 空气中声波的压缩和膨胀

当声源在媒质中振动时，必须依靠媒质的弹性和惯性才能将这种振动传播出去。因此，媒质的弹性和惯性是传播声音的必要条件。

声波不仅可以在空气中传播，在液体和固体等弹性媒质中也可以传播。声波在上述媒质中传播，相应地被称为空气声、液体声和固体声。应该注意，声音在媒质中的传播，只是媒质振动的传播过程，媒质本身并没有向前移动，它只是在平衡位置来回振动，传播出去的是物质的运动形式，这种运动形式称为波动。声音是振动的传播，这种传播过程是一种机械性质的波动，因此，声音也称为声波。

我们把空间中存在声波的区域称为声场。

3. 声波的类型

根据声波传播时波阵面的形状不同可以将声波分成平面声波、球面声波和柱面声波等类型。

4. 声线

声线也称为声射线，是自声源发出的代表能量传播方向的直线，在各向同性的媒质中，声线就是代表波的传播方向且处处与波阵面垂直的直线。声线和波阵面都可以用来描绘声波的传播。

平面声波的传播方向总保持一个恒定方向，声线为相互平行的一系列直线（图 1-3）。简单的球面声波的声线是由声源点发出的半径线（图 1-4）。柱面声波的声线是由线声源发出的径向线。



图 1-3 平面声波的声射线和波阵面

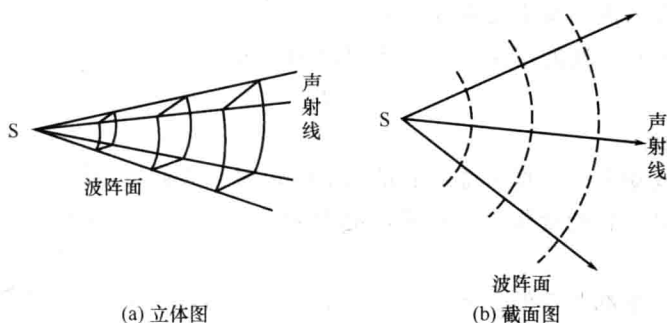


图 1-4 球面声波的声射线和波阵面

当声波频率较高，传播途径中遇到的物体的几何尺寸比声波波长大很多时，可以不计声波的波动特性，直接用声线来加以处理，其分析方法与几何光学中的光线法非常相似。

二、描述声波的物理量及计算

(一) 声波的描述与量度

1. 频率与周期

声音听起来有的低沉，有的尖锐，我们说它们的音调不同，发出低沉音的音调低，发出尖锐音的音调高。音调就是人耳对声音的主观感受。实验证明，音调的高低主要是由声源振动的频率决定的。由于振动的频率在传播过程是不变的，所以声波的频率指的就是声源振动的频率。

声源完成一次完整振动所经历的时间称为周期，用 T 表示，单位是秒 (s)。1 s 内完成的全振动的次数称为频率，用 f 表示，单位是赫兹 (Hz)，它与周期互为倒数，即：

$$f = 1/T \quad (1-1)$$

发声体每秒振动的次数越多，即频率越高，表现为声音的音调也越高，给人的感觉是声音较为尖锐。反之，频率低的声音，音调低，听起来较为低沉。

事实上所有发声体的振动都是比较复杂的，它除了一个基频外，还包括许多与基频成整数倍数的较高频率的泛音，也称为阶音或谐频音。

2. 波长与声速

物体或空气分子每完成一次往复运动或疏密相间运动所经过的距离称为波长，用符号 λ 表示，单位是米 (m)。波长是由声波的频率所决定的，频率高，波长短；频率低，波长长。例如，在常温的空气中，当频率为 125 Hz 时，波长约为 2.72m；当频率为 500 Hz 时，波长约为 0.68m；当频率为 2000 Hz 时，波长仅为 0.17m 左右。

振动每秒钟在媒质中传播的距离叫作声波传播速度，简称声速，用符号 c 表示，单位是 m/s。

声音在不同介质中的传播速度是不同的，在标准大气压下，0℃ 的空气中声音的速度是 331.4m/s。空气温度越高，声速越大，温度每增加 1℃，声速约增加 0.607m/s。

当空气温度 t 在 -30~30℃ 之间，声速与温度的关系一般可用下式表示：

$$c = c_0 + 0.607t \quad (1-2)$$

一般地，声音在固体中传播的速度最快，其次是在液体中，再次是在气体中。如水中的声速是 1450m/s；在钢铁中的声速约为 5000m/s，因此，将耳朵贴近铁轨能听到较远处开动着的火车声。但也有例外的，如橡胶中的声速可能约只有几十米每秒。可见声速大小取决于

传播介质的性质，而与声源频率及强度无关。

根据频率、波长和声速的定义，它们之间有如下关系：

$$c = f\lambda \quad (1-3)$$

3. 声功率和声强

声波作为一种波动形式，将声源的能量向空间辐射，人们可用能量来表示它的强弱。声源在单位时间内发射的总能量称为声功率，记为 W ，单位为瓦（W）。声源稳定发声时，其声功率是一个恒量。

一般声音的声功率都非常低，例如一个人平常讲话的声功率是 $40\mu\text{W}$ 。如果一个人使劲喊，可以喊到 1mW ，一个载重汽车，可能是 1 千瓦，一个喷气客机是 100 千瓦。

不过在另外一方面，有的机器的噪声又相当大。一个大型火箭在发射的时候，它的声功率是 1 亿瓦。就是说一个大型火箭所发出的噪声的能量可以用来开动一架喷气飞机。

应注意：声源的声功率与设备实际消耗功率是两个完全不同的概念。例如，一般大型鼓风机其实际消耗功率为 500kW ，而它发出的巨大的噪声的声功率一般还不到 100W ，只相当于鼓风机实际消耗功率的 $1/5000$ 。

声强是衡量声波在传播过程中声音强弱的物理量。声场中某一点的声强，即在单位时间内，垂直于声波传播方向的单位面积上所通过的声能，记为 I ，单位是 W/m^2 。

$$I = W/S \quad (1-4)$$

式中， W 为声功率，W； S 为声能所通过的面积， m^2 。

在无反射声波的自由声场中，点声源发出的球面波，均匀地向四周辐射声能。因此，距声源中心为 r 的球面上的声强为：

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1-5)$$

因此，对于球面波，声强与点声源的声功率成正比，而与到声源的距离平方成反比。对于平面波，声线互相平行，同一束声能通过声源距离不同的表面时，声能没有聚集或离散，即与距离无关，所以声强不变。例如指向性极强的大型扬声器就是利用这一原理进行设计的，其声音可传播几十米远。

4. 瞬时声压和有效声压

当声波在空气中传播时，会形成弹性媒质（空气）的疏密相间的状态，当媒质密集时，这部分的空气压强 P 会比平衡状态下的静态压强 P_0 大，当媒质稀疏时，这部分的空气压强 P 会比平衡状态下的静态压强 P_0 小，即在声波的传播过程中，空气压强随着声波作周期性变化。因此可以用声扰动在空气中所产生的逾量压强 p 来表述声波的状态： $p = P - P_0$ ，这个逾量压强 p 称为该点的瞬时声压，单位是帕斯卡（Pa）。

声音传播过程中媒质空间点的声压是时间的函数，即任一点的声压都是随时间不断变化的，每一瞬间的声压称为瞬时声压 p 。如果声源在理想媒质中，在单一频率下做简谐振动，那么媒质中各质点也随着做同一频率的简谐振动。物体在平衡位置附近做的往复运动叫做机械振动。我们把振动物体偏离平衡位置后所受到的总是指向平衡位置的力，叫作回复力。物体在受到大小跟位移成正比，而方向恒相反的合外力作用下的运动，叫作简谐振动。这种情况下，物体的运动参量，随时间按正弦或余弦规律变化。振动中最简单的就是简谐振动。

声音传入人耳时，由于声波频率较高，耳膜又具有惯性，人耳分辨不出声压的起伏，感觉到的是一个稳定的声压值，定义这个稳定的声压值为有效声压，用 p_e 表示。

由于人耳感觉到的以及声学仪器测量到的声压都是有效声压，在实际运用和以后章节中

若没有另加说明，声压 p 即指有效声压，通常省去脚注“e”。

正常人耳朵刚刚能够听到的声音的声压值是 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，称为听阈声压。使人耳产生疼痛感觉的声压是 20 Pa ，称为痛阈声压。

声压与声强有着密切的关系。在空气自由声场中，某处的声强与该处声压平方成正比，而与介质密度与声速的乘积成反比，即：

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \tag{1-6}$$

式中， p 为有效声压， Pa ； ρ_0 为空气密度， kg/m^3 ； c 为空气中的声速， m/s 。

(二) 声波的频谱特性

1. 频段

人们在日常生活中接触到各种各样的声音，如乐声、交通噪声、建筑施工噪声、机械设备噪声等，它们都是许多不同频率、不同强度的纯音复合而成的。为采取有效的噪声控制措施，了解分析噪声源所发出的噪声频率特性是十分必要的。

可听声频率为 $20 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ ，为研究和实用上的需要，在声学学科中，把声频范围划分为若干个小区间，称其为频段，也称为频带或频段。

当某一频段的下限频率用 f_1 表示，上限频率用 f_2 表示，彼此之间有如下关系：

$$f_2 / f_1 = 2^n \tag{1-7}$$

式中， n 为倍频段数，当 $n=1$ 时称为 1 倍频段，简称倍频段；当 $n=1/3$ 时，称为 1/3 倍频段。

由此可以看出，按倍频段均匀划分频率区间，相当于对频率按对数关系加以标度。由 f_1 到 f_2 称为一个频段，每频段用一个中心频率 f_0 表示， f_0 为各倍频段上、下限频率的几何平均值。

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \tag{1-8}$$

根据上述两式可得：

$$f_1 = f_0 / \sqrt{2^n} \tag{1-9}$$

$$f_2 = \sqrt{2^n} f_0 \tag{1-10}$$

如果定义 $\Delta f = f_2 - f_1$ 为绝对频段宽度，则：

$$\Delta f = \left(\sqrt{2^n} - \frac{1}{\sqrt{2^n}} \right) f_0 \tag{1-11}$$

对 1/3 倍频段也可参照上述方法推导出上、下限频率与其中心频率之间的关系，同样也可以得出频段宽度与中心频率之间关系的计算公式，这里不再列出。

1 倍频段和 1/3 倍频段的上、下限频率和中心频率列于表 1-1。这是国际标准化组织 (ISO) 规定的。另外注意：表中的上、下限频率是按照它们与中心频率之间的关系计算后略做修改得到的。

表 1-1 1 倍频段和 1/3 倍频段的上、下限频率和中心频率 单位：Hz

1 倍频段			1/3 倍频段		
下限频率	中心频率	上限频率	下限频率	中心频率	上限频率
11.2	16	22.4	11.2	12.5	14.1
			14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4

1 倍频程			1/3 倍频程		
下限频率	中心频率	上限频率	下限频率	中心频率	上限频率
22.4	31.5	44.7	22.4	25	28.2
			28.2	31.5	35.5
			35.5	40	44.7
44.7	63	89.1	44.7	50	56.2
			56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
89.1	125	178	89.1	100	112
			112	125	141
			141	160	178
178	250	355	178	200	224
			224	250	282
			282	315	355
355	500	708	355	400	447
			447	500	562
			562	630	708
708	1000	1410	708	800	891
			891	1000	1120
			1120	1250	1410
1410	2000	2820	1410	1600	1780
			1780	2000	2240
			2240	2500	2820
2820	4000	5620	2820	3150	3550
			3550	4000	4470
			4470	5000	5620
5620	8000	11200	5620	6300	7080
			7080	8000	8910
			8910	10000	11200
11200	16000	22400	11200	12600	14100
			14100	16000	17800
			17800	20000	22400

由于人耳对于 31.5Hz（接近次声）和 16Hz（靠近超声）这两个频带声音不敏感，因此，在实际噪声控制工程中一般可选用 63Hz~8kHz 这 8 个倍频程来进行分析。

2. 频谱与频谱分析

声音的频率成分常常是很复杂的，为了较详细地了解声音成分的分布范围和性质，通常

对一个噪声源发出的声音，将它的声压级、声强级或声功率级按频率顺序展开，使噪声的强度成为频率的函数，并考察其频谱形状与特点，这就是频谱分析，也称频率分析。通常以频率为横坐标，声压级、声强级或声功率级为纵坐标（实际工作中多采用声压级），绘制出用来描述频率与噪声强度的关系图，称为频谱图。

（三）级的概念与分贝的计算

1. 级的概念

现实生活中的声音强弱差异非常大，如人通常讲话声功率大约为 10^{-5} W ，火箭噪声的声功率则可高达 10^9 W ，两者相差 14 个数量级，对人的听觉来说，听阈声强为 10^{-12} W/m^2 ，痛阈声强为 1 W/m^2 ，两者相差 12 个数量级，如果用声压级来表示也有 6 个数量级的变化（即从 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 到 20 Pa 相差 100 万倍）。这样表示声波的强弱很不方便，再者，人对声音强弱的主观感觉也不是与声强或声压的值直接成正比，事实上，与它们的对数值成正比，故也没有必要用如此宽广的范围来度量声波的强弱。所以，人们采用了声波能量的对数标度来表示声音的大小，即用“级”来衡量声压、声强和声功率的强弱，相应称为声压级、声强级和声功率级。这与人们常用级来表示风、地震大小的意义有些相似。

（1）声压级 声压级的定义是：

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (1-12)$$

式中， L_p 为声压级，dB； p 为有效声压，Pa； p_0 为基准声压，Pa， $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

基准声压所取数值是正常人耳对 1000Hz 声音能够觉察到的最低声压，即 1000Hz 声音的可听阈。级在声学中的单位为“分贝”，用符号 dB 表示。dB 是一个相对单位，它没有量纲。这样人耳的听阈范围是从可听阈的 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 到痛阈的 20 Pa ，现在用声压级来表示该听阈范围则在 $0 \sim 120 \text{ dB}$ ，一般人耳对于声音强弱的分辨能力约为 0.5 dB 。可见声压级使声音的量度大大简化。

（2）声强级 声强级的单位也是分贝，定义为：

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-13)$$

式中， L_I 为声强级，dB； I 为声强， W/m^2 ； I_0 为基准声强， W/m^2 ， $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。

这样人耳的听阈范围的声强用声强级来表示也是在 $0 \sim 120 \text{ dB}$ 。

（3）声功率级 声功率级的单位也是分贝，定义为：

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1-14)$$

式中， L_W 为声功率级，dB； W 为声功率，W； W_0 为基准声功率，W， $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ 。

例如，1W 的声功率对应的声功率级为 120dB，可见 1W 的较小功率实际上是一个相当大的噪声源。

2. 声压级、声强级、声功率级之间的关系

声强级与声压级存在一定的关系。在自由声场中，经分析得到：

$$L_I = L_p + b \quad (1-15)$$

式中， b 为修正值，与媒质的声特性阻抗有关，也即与媒质即空气的温度、压强有关。

低海拔地区 b 的修正值可以忽略不计，声压级和声强级在数值上相等；在高原地区， $b > 1 \text{ dB}$ ，声压级与声强级的差别计算时应加以考虑。

声强级与声功率级之间也存在一定关系。

在自由声场中,对于均匀辐射的声源, $W=IS$, 代入到声功率级的定义表达式可得:

$$L_W = 10\lg \frac{W}{W_0} = 10\lg \frac{I}{I_0} + 10\lg \frac{S}{S_0} \quad (1-16)$$

式中, S 为垂直于声波传播方向的封闭面积, m^2 ; S_0 为基准声功率对应的基准面积, m^2 。

一般取 $S_0 = 1\text{m}^2$, 则上式可化为:

$$L_W = L_I + 10\lg S = L_p + b + 10\lg S \quad (1-17)$$

(四) 分贝的计算

前述的声压级、声强级、声功率级都是通过对数运算得来的。在实际工程,常遇到某些环境中有几个噪声源同时存在,假设人们可以单独测量每一个噪声的声压级,那么,当噪声源同时向外辐射噪声,它们总的声压级是多少呢?我们不能把两个声压级进行简单的代数相加,能进行相加运算的,只能是声的能量。类似地,当我们需要将声音“相减”时,也必须用能量进行相减,而不能将两个声压级直接进行代数相减。

1. 分贝的加法

在有几个噪声源的情况下,通常要计算声场中某点的总声压级,有时还需要计算一个噪声源发出的各种频率声波的总声压级、总声强级和总声功率级。上述这些计算都离不开分贝的相加。

一般情况下,噪声是由不同频率、无固定相位差的声波组成,因此不会发生干涉现象,也就是说,噪声一般属于不相干波。分贝相加,可运用不相干波的叠加原理来进行。

$$L_{pt} = 10\lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{pi}} \right) \quad (1-18)$$

如果 n 个声源的声压级相等,均为 L_p , 那么有:

$$L_{pt} = L_p + 10\lg n \quad (1-19)$$

不难看出,两个声压级相等的噪声叠加,其总声压级只比单个声源的声压级高 3dB; 如果有 10 个相同声源,它们的总声压级也只比单个声源的声压级高 10dB。

而且当两个声压级相差达到 10dB 以上时,由此产生的分贝附加值不大于 0.5dB,即对总声压级的影响较小,而且当两个声压级相差 15dB 以上时,其分贝附加值将在 0.1dB 以下,接近于 0,基本上可以不再考虑。这也启发我们,在噪声控制中抓住噪声源中主要的、有影响的噪声源,将这些主要的噪声源降下来才能取得良好的降噪效果。

2. 分贝的减法

在噪声测量过程中,经常会受到外界噪声的干扰,如某加工车间内的一台机床,在它开动时,一般情况下其辐射的声压级是无法单独测量到的,但是,机床未开动前的环境噪声(即背景噪声,也称本底噪声)是可以测量的,机床开动后,机床噪声与本底噪声的总声压级也是可以测量的,那么,计算机床本身的声压级就必须扣除背景噪声的影响,即采用声压级的减法来进行计算。

如果在有背景噪声存在的情况下测得某噪声的声压级为 L_{pt} , 声源停止发声后测得背景噪声的声压级为 L_{pb} , 则该噪声的真实声压级 L_{ps} 可以通过级的相减得到。由前面的分贝相加知识不难得出:

$$L_{ps} = 10\lg (10^{0.1L_{pt}} - 10^{0.1L_{pb}}) \quad (1-20)$$

注意:当 $\Delta L_{pb} = L_{pt} - L_{pb} < 3\text{dB}$ 时,虽然按分贝相减公式仍可计算出 L_{ps} 的值,但由

于噪声测量的误差通常可达 $\pm 0.5\text{dB}$ ，且噪声本身并非稳定，这样的计算值 L_{ps} 往往不可置信！

3. 分贝的平均

在噪声测量和控制中，常遇到需要对声压级进行平均的问题。如一车间的各操作点声压级不相同，或一台机器在不同时间内发出的声压级不同等，就可能要计算某空间的平均声压级或一段时间的平均声压级，此外，在计算声源的指向性指数时，也需要计算平均声压级；对于某一点的多次测量结果也需要计算平均声压级，这都涉及分贝平均的问题。分贝的平均是以分贝和的公式为基础来进行计算的，即依能量平均的方法。计算公式如下：

$$\bar{L}_p = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{pi}} \right) \quad (1-21)$$

在这一部分里，所有的关于分贝计算的问题都是用声压级推导出来的，由于推导公式时以能量叠加原理为基础，所以所有的关于分贝计算的公式与计算图表也都同样适用声强级和声功率级的运算。

三、声波的传播

(一) 声波传播的一般规律

1. 点声源的指向性

理想点声源在均匀媒质中辐射声波的声压、声强等量在各个方向上都是相同的，声源不具有指向性。一般声源实际上可以看做是许多声源的叠加，该声源辐射声波在各个方向上可能是不同的，这种声源被称为指向性声源，它们的波阵面不是以声源为圆心的球面，而是复杂的曲面。

声源的指向性对声波的传播特性有影响，缺乏声源指向性数据就无法准确预测声波实际传播情况。声源的指向性和声源的尺寸、形状以及发声机理有关，需要通过实际测试才能清楚。声源的指向性还和声波的频率有关，声波的频率越高，声源的指向性越强。

声源的指向性常用指向性因数和指向性指数来表示。声源的指向性因数是指声场中某点的声强与同一声功率声源在相同距离同心球辐射面上的平均声强之比，记为 Q ，由定义可知指向性因数与声强、声压的关系如下：

$$Q = \frac{I_\theta}{\bar{I}} = \frac{p_\theta^2}{\bar{p}^2} \quad (1-22)$$

式中， I_θ ， p_θ 为 θ 方向上距离声源 r （m）处的声强（ W/m^2 ）和声压（Pa）； $\bar{I}$ ， $\bar{p}$ 为半径为 r 的同心球面上的平均声强（ W/m^2 ）和平均声压（Pa）。

指向性指数DI与指向性因数 Q 的关系如下：

$$\text{DI} = 10 \lg Q = 10 \lg \frac{I_\theta}{\bar{I}} = 10 \lg \frac{p_\theta^2}{\bar{p}^2} \quad (1-23)$$

不难看出，对于无指向性声源， $Q=1$ ， $\text{DI}=0$ 。

指向性因数与点声源放在室内的位置有关，若点声源放置在房间中心，将均匀地向空间辐射声能， $Q=1$ ；如果声源放在地面或墙面中间，声能量只辐射入半个球面空间，同样距离的点，声能增加1倍， $Q=2$ ；声源放在两个墙面或墙面与地面的交线上，只能向 $1/4$ 空间辐射声能， $Q=4$ ；而声源若在三面的交点上（即墙角），只能向 $1/8$ 空间辐射声能，这时 $Q=8$ 。