

建筑声学与音响工程

—— 现代建筑中的 声学设计

JIANZHU SHENGXUE YU YINXIANG GONGCHENG

——XIANDAI JIANZHUGHONG DE

SHENGXUE SHEJI

王峰 陈金京 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

建筑声学与音响工程—— 现代建筑中的声学设计

王峥 陈金京 编著



机械工业出版社

本书的第1章介绍了声音的传播特性、人的听觉特性、声源特性和电声学原理,这对于声学设计人员是必备的基础知识。第2、3章分别对常用的建筑声学材料和电声器材进行了较为系统的介绍。第4章对各种声学指标及其测量方法进行了介绍。第5、6、7章分别介绍了三种比较典型的观演建筑,即剧院建筑、音乐厅建筑和体育建筑。在第8章中,对两种声学模拟技术进行了简要的介绍。

书中给出了一些近年来国内已经建成或正在建设的大型观演建筑工程实例,并对这些工程的声学设计,包括建声设计和电声设计,进行了分析和介绍。本书可作为建筑声学及音响行业技术人员的专业参考书,也可作为高等院校声学及音响专业的教学辅助用书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑声学及音响工程——现代建筑中的声学设计/王峥,陈金京编著. —北京:机械工业出版社,2007

ISBN 978-7-111-22137-1

I. 建… II. ①王… ②陈… III. 建筑声学 IV. TU112

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第124288号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王黎庆 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

三河市宏达印刷有限公司印刷

2007年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm ·18.75印张·460千字

标准书号:ISBN 978-7-111-22137-1

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着国力的增强、经济的发展和精神文明的需要，以观演为主要功能的大型现代建筑，包括剧院、音乐厅、体育场馆等，越来越受到重视，并在许多地方成为标志性建筑。在这些建筑中，“听”是一个重要的功能，能否提供一个良好的听闻效果，是关系到这类建筑成败的关键。在观演建筑中进行声学设计，就是为了保证其良好的听闻效果。

在一个大的空间中，声波从声源到观众一般经过两种不同形式的传播过程：一种形式是声波在空间声场中的传播过程，对于使用电声系统的建筑，这一形式的过程包括声波从声源传播到传声器以及声波从扬声器传播到观众的过程，对于自然声演出，整个声音的传播都采用这种形式；另一种形式是电信号在电路系统中的传播过程，这一形式的过程包括传声器将声信号转变为电信号，经过电声系统进行加工和放大，再由扬声器转换为声信号。建筑声学（简称建声）设计负责前一种形式传播过程，电声设计负责后一种形式传播过程。只有同时保证两种不同形式传播过程的设计质量，才能确保整体声学设计的完美，二者相辅相成，缺一不可。作为一个声学设计工作者，无论是建声设计人员，还是电声设计人员，都应该对这两方面的知识有比较充分的了解，对任何一方面知识的缺失，都有可能影响到整体声学设计的质量。

目前单独介绍建筑声学设计或单独介绍电声设计的专著较多，但对二者进行综合介绍的专著则较为少见。基于这个考虑，作者在编著本书时将建声设计和电声设计综合起来，进行比较系统的介绍，或许对于观演建筑的声学设计，具有更大的参考价值。

本书的第1章介绍了声音的传播特性、人的听觉特性、声源特性和电声学原理，这对于声学设计人员是必备的基础知识。

建声设计是通过建筑声学材料的运用来完成的，电声设计是通过电声器材的搭配来实现的，因此声学材料和电声器材是建筑中声学设计的最基本元素，本书的第2、3章分别对常用的建筑声学材料和电声器材进行了较为系统的介绍。

在声学设计中，合理的声学指标是保证声学设计质量的重要前提，准确的声学测量是判定声学效果优劣的必要手段，本书的第4章对各种声学指标及其测量方法进行了介绍。

本书的第5、6、7章分别介绍了三种比较典型的观演建筑，即剧院建筑、音乐厅建筑和体育建筑。由于使用功能的不同，这三种不同形式的观演建筑在建声与电声的相互关系上也是不同的。

一般剧院建筑是多功能的，既要进行自然声演出，又要进行通过扩声系统的演出，声学设计时应建声与电声并重，在保证建声效果的同时，还必须考虑电声的效果。

音乐厅建筑主要功能是自然声音乐演出，声学设计应以保证建声效果为主，电声处于辅助的地位，为自然声服务，不应该喧宾夺主，最理想的效果是虽有电声的辅助，却让观众感觉不到电声的存在。

在体育建筑中，所有的声音功能都必须通过扩声系统来实现，声学设计应以保证电声效果为主，建声设计的目的也是为了满足电声系统的要求，使电声系统能够达到最佳的状态。

能够在设计阶段就对声学设计的效果有一个比较精确的了解,对保证声学设计质量是十分重要的,而声学模拟技术,包括计算机声学模拟计算技术和实体声学缩尺模型技术,就是实现这个目的的重要手段。在第8章中,对这两种声学模拟技术进行了简要的介绍。

为了使本书更具实用性,在书中给出了一些近年来国内已经建成或正在建设的大型观演建筑工程实例,并对这些工程的声学设计,包括建声设计和电声设计,进行了分析和介绍。

由于作者的水平有限,书中难免会有不当和错误之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

于北京市建筑设计研究院

目 录

前言	
第 1 章 声学基础	1
1.1 声音的基本特性	1
1.1.1 声波的产生	1
1.1.2 声波的速度、波长与频率、 波阵面	2
1.1.3 声压、声强、声功率与声压级、 声强级、声功率级	5
1.1.4 声波的反射、衍射与干涉	8
1.1.5 声波的吸收与透射	10
1.1.6 声波在室内的传播	10
1.1.7 声波在室外的传播	14
1.2 接收—人的听觉特性与主观感受	15
1.2.1 响度	16
1.2.2 音色	17
1.2.3 音调	18
1.2.4 双耳听闻效应	18
1.2.5 时间差与回声	19
1.2.6 哈斯效应	19
1.2.7 掩蔽效应	20
1.3 声源—语言声与音乐声的特性	21
1.3.1 语言声与音乐声的声功率	21
1.3.2 语言声与音乐声的动态范围	23
1.3.3 语言声与音乐声的频率范围	23
1.3.4 语言声与音乐声的方向性	24
1.4 电声学基础	25
1.4.1 功率与阻抗	25
1.4.2 扬声器负载的串联和并联	26
1.4.3 信号的峰值、平均值和有效值	26
1.4.4 功率传输的线路损失	26
第 2 章 常用建筑声学材料与构造	28
2.1 吸声材料与构造	28
2.1.1 多孔吸声材料	28
2.1.2 薄板共振吸声材料	42
2.1.3 穿孔共振吸声材料	43
2.1.4 微穿孔吸声结构	50
2.1.5 空间吸声体	51
2.2 反射与扩散构造	53
2.2.1 定向反射结构	53
2.2.2 几何形体的扩散结构	55
2.2.3 数论扩散结构	58
2.3 混响调节构造	60
2.3.1 帘幕式混响调节构造	60
2.3.2 百叶式混响调节构造	60
2.3.3 旋转式混响调节构造	61
2.3.4 升降式混响调节构造	62
2.4 隔声材料与构造	63
2.4.1 单层墙体的隔声	64
2.4.2 双层墙体的隔声	64
2.4.3 轻质隔声材料与构造	65
2.4.4 隔声性能的评价	69
第 3 章 常用音响设备与器材	72
3.1 扬声器	72
3.1.1 扬声器的分类	72
3.1.2 扬声器的主要技术指标	72
3.1.3 号筒式扬声器	73
3.1.4 低音扬声器箱	74
3.1.5 全频扬声器箱	75
3.1.6 音柱	75
3.1.7 线性阵列扬声器	76
3.2 传声器	77
3.2.1 传声器的分类	77
3.2.2 传声器的主要技术指标	77
3.2.3 动圈传声器	78
3.2.4 电容传声器	79
3.2.5 驻极体电容传声器	79
3.2.6 无线传声器	79
3.3 调音设备	79

3.3.1	调音设备的分类	79	5.1.2	温暖感	112
3.3.2	调音设备的主要技术指标	80	5.1.3	响度	112
3.3.3	模拟调音设备	81	5.1.4	明晰度	113
3.3.4	DJ 调音设备	82	5.2	剧院建筑的电声系统指标	113
3.3.5	数字调音设备	82	5.2.1	最大声压级	113
3.4	功率放大器	83	5.2.2	传输频率特性	114
3.4.1	功率放大器的分类	83	5.2.3	传声增益	114
3.4.2	功率放大器的主要技术指标	84	5.2.4	声场不均匀度	114
3.4.3	功率放大器的选用	85	5.2.5	早后期声能比	114
3.5	信号处理设备	86	5.3	剧院建筑的建筑声学设计	115
3.5.1	均衡器	86	5.3.1	观众厅的平面设计	116
3.5.2	压缩限幅器	88	5.3.2	观众厅的剖面设计	117
3.5.3	分频器	88	5.3.3	剧院的包厢设计	118
3.5.4	反馈抑制器	90	5.3.4	剧院的挑台设计	118
3.5.5	多功能数字音频处理器	90	5.3.5	剧院建筑装修材料的选择和布置	119
第 4 章	声学指标的测量与主观评价	92	5.4	剧院建筑扩声系统设计	120
4.1	常用声学测量仪器	92	5.4.1	扩声系统的扬声器布置	120
4.1.1	发声设备	92	5.4.2	效果声系统的扬声器布置	121
4.1.2	滤波设备	93	5.4.3	传声器接口的布置	122
4.1.3	接收设备	94	5.4.4	电子混响调节系统	122
4.1.4	记录设备	96	5.5	剧院建筑的工程实例	123
4.1.5	计算机软件控制的综合测量设备	96	5.5.1	悉尼歌剧院	123
4.2	建筑声学指标的测量	99	5.5.2	东莞玉兰大剧院	126
4.2.1	混响时间	99	5.5.3	顺德演艺中心大剧院	136
4.2.2	反射声序列	100	5.5.4	大连经济开发区文化中心大剧院	143
4.2.3	清晰度指标 C_{80} 、 C_{50}	100	5.5.5	北京保利剧院	155
4.2.4	响度因子 G	101	5.5.6	上海东方艺术中心歌剧厅	160
4.3	音响系统声学指标的测量	101	5.5.7	武汉琴台文化艺术中心大剧院	166
4.3.1	最大声压级	101	5.5.8	深圳保利文化广场大剧院	173
4.3.2	传输频率特性	103	第 6 章	音乐厅建筑声学设计概要	181
4.3.3	传声增益	103	6.1	音乐厅的建筑声学指标	181
4.3.4	声场不均匀度	104	6.1.1	混响时间 RT 和早期衰变时间 EDT	181
4.4	音质与电声效果的主观评价	104	6.1.2	温暖感 BR	182
4.4.1	主观评价的主要指标	104	6.1.3	强度因子 G	182
4.4.2	自然声音质效果的主观评价方法	105	6.1.4	明晰度 C_{80}	183
4.4.3	扩声系统的主观评价方法	107	6.1.5	亲切感 t_1	183
第 5 章	剧院建筑声学设计概要	110	6.1.6	侧向声能百分比 LF	184
5.1	剧院建筑的建筑声学指标	110	6.1.7	双耳听觉互相关系数 $IACC$	185
5.1.1	混响时间	110	6.2	音乐厅建筑的电声系统指标	185

6.3 音乐厅建筑的建筑声学设计	186	7.4.1 基本声学要求	244
6.3.1 音乐厅体积和容量的确定	187	7.4.2 扬声器的布置方式	245
6.3.2 音乐厅平面设计	188	7.4.3 音频信号的传输方式	247
6.3.3 音乐厅剖面设计	192	7.4.4 扩声设备的选型	248
6.3.4 演奏台的设计	194	7.4.5 音频信号的拾取与交换	249
6.3.5 反射构件的设计	196	7.4.6 大型场馆主扩声系统设计应注意的 问题	249
6.4 音乐厅扩声系统设计	200	7.5 工程实例	250
6.4.1 固定安装语言扩声系统	201	7.5.1 安徽合肥体育中心综合体育馆	250
6.4.2 活动安装音乐扩声系统	201	7.5.2 新疆体育中心体育馆	254
6.5 音乐厅建筑的工程实例	203	7.5.3 奥运会国家体育馆	259
6.5.1 上海东方艺术中心音乐厅	203	7.5.4 奥体中心英东游泳馆	265
6.5.2 河北省艺术中心音乐厅	209	7.5.5 奥体中心体育场	272
6.5.3 深圳市文化中心音乐厅	214		
6.5.4 中央民族大学音乐厅	219		
6.5.5 国家大剧院音乐厅	224		
第7章 体育建筑声学设计概要	231	第8章 模拟技术在声学设计中 的应用	275
7.1 我国体育馆声学设计的回顾	231	8.1 计算机声学模拟	275
7.1.1 综合性体育馆	231	8.1.1 计算机声学模拟技术的发展与 现状	275
7.1.2 单项运动馆	234	8.1.2 计算机声学模拟基本原理	275
7.2 体育馆的类别与声学设计指标	236	8.1.3 计算机声学模拟的局限	276
7.2.1 体育馆的分类	236	8.1.4 计算机声学模拟的可靠性	276
7.2.2 体育馆的建声设计指标	237	8.2 声学缩尺模型	278
7.2.3 体育建筑的扩声设计指标	238	8.2.1 声学缩尺模型实验的发展	278
7.3 体育建筑的建筑声学设计	239	8.2.2 声学缩尺模型实验的基本原理	279
7.3.1 吸声材料(或结构)的选择	239	8.2.3 声学缩尺模型的制作	279
7.3.2 空间吸声体的应用	240	8.2.4 声学缩尺模型的测量	283
7.3.3 可调吸声结构的应用	241	8.2.5 声学缩尺模型测试数据的修正	285
7.3.4 体育馆内观众的吸声增量	242	8.2.6 声学缩尺模型试验结果与实际厅堂 实测的数据比较	285
7.3.5 体育馆音质缺陷的控制	243		
7.3.6 体育馆的噪声控制	244		
7.4 体育建筑的扩声系统设计	244	参考文献	289

第1章 声学基础

1.1 声音的基本特性

1.1.1 声波的产生

声音虽然看不见、触不到，但却是人们感知外部世界的重要因素。与通过视觉和触觉所感知的物体不同，声音并不是一种实实在在的物质。声音源头为物体的振动，如人的讲话声来源于人喉管内声带的振动，扬声器发出的声音来源于扬声器膜片的振动，钢琴发出的声音来源于琴锤击打琴弦产生的振动。物体产生振动后激发周围空气也随之产生振动，并且以波动的形式向四周传播，当空气中的波动传到入耳时，将引起耳膜产生振动，最后通过听觉神经产生声音的感觉。另外声音也可以在其他媒质中传播，如水、固体等。声音的本质就是媒质中介质的振动。声音的产生有两个必要的条件，一个条件是振动源，没有振动物体作为振动源，声音就无从产生；另一个条件是传播介质，没有介质，声音就无法传播，例如在真空中就没有声音，因为没有声音赖以传播的介质。

本书所介绍的建筑声学 and 音响工程中，主要考虑声音在空气中传播的情况。在空气中，声音就是振动在空气中的传播，我们可以称之为声波。为分析振动在空气中的传播过程，现以活塞的振动为例。设在一无限长圆管内置一直径与圆管内径相同的活塞，并假设活塞与管壁的摩擦可以忽略，以外力作用于活塞使之产生振动。现分析活塞两侧空气质点层的运动状况（见图1-1）。

当活塞受力离开静止位置向右方作一小位移时，紧靠活塞右面的空气质点层被压缩而变得密集，具有一定的势能，同时运动的质点具有一定的动能。接着它就向右膨胀，挤压邻近的质点层，使之亦变得密集，由于质点的弹性碰撞，动能也随之传递过去。这样，邻近质点的运动又依次传向较远的质点，密集状态即逐层向右传播，以致离开振源较远的质点也相继运动。与此同时，紧靠活塞左侧的质点层由于活塞向右移动而变得稀疏。同样，这一稀疏层也逐层向左传播，见图1-1a和图1-1b。下一时刻，当活塞作反向运动时，它的左侧出现密集质点层，右侧则出现稀疏层，见图1-1c和图1-1d。这样，随着活塞不断地来回振动，它的两侧就相继形成疏密相间的质点层并向远处传播，此即为声波。

必须指出，空气质点只是在其平衡位置（即没有扰动时的位置）附近振动，并没有随疏密度一直向外移动下去。

波具有横波和纵波两种形式，在波的传播过程中，如果质点的振动方向和波的传播方向相垂直，称为横波，如水中波纹的传播；如果质点的振动方向和波的传播方向相平行，则称为纵波。和活塞振动相同，在空气中传播的声波就属于纵波。

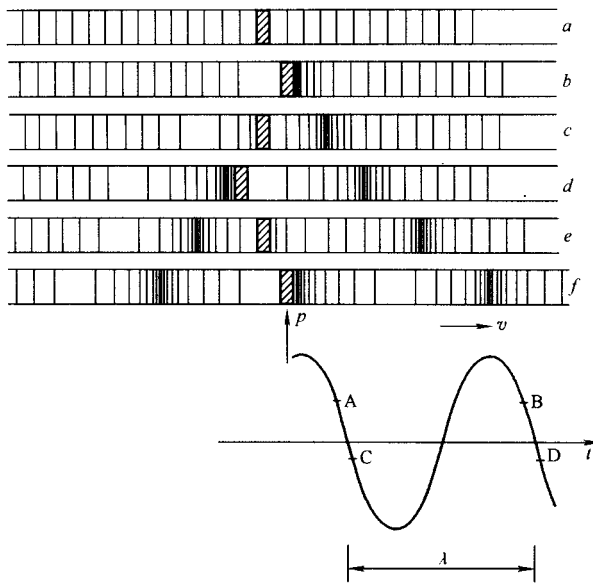


图 1-1 声波的产生

1.1.2 声波的速度、波长与频率、波阵面

1. 声速 声波在弹性媒质中的传播速度称为声速，记作 c ，单位是 m/s 。声速不是质点的振动速度而是振动传播的速度，它的大小与振源的特性无关，而与介质的弹性、密度以及温度有关。当温度为 0°C 时，声波在不同介质中的传播速度见表 1-1。

表 1-1 在不同介质中的声速

介质	声速/ (m/s)
钢	5000
松木	3320
水	1450
软木	500

空气中声速与温度有关，在标准大气压下，声速与温度有如下关系：

$$c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} \quad (1-1)$$

在常温下，空气中的声速一般按 340m/s 计算。声音的速度与光速相比要慢得多。与通常可以忽略光的速度不同，在建筑声学和音响工程中，声速是必须考虑的因素，在实际设计中既可以利用声速较慢的特点提高声音的质量，如立体声和声音的方向感，也可能因为这个特点而产生声学缺陷，如回声等。

2. 波长与频率 在波动过程中有一些质点的位移和方向总是相同的，它们的相位相同。图 1-1 中的 A 和 B 的相位相同，C 和 D 的相位相同。在传播路径上，两相邻同相位质点之

间的距离称为波长，记作 λ ，单位为 m。声波传播了一个波长，也表明一个质点振动了一个周期 T ，单位为 s，而质点在单位时间内振动的周期数，称为频率，用 f 表示，单位为 Hz。在一定的介质中声速是确定的，因此频率越高，波长就越短。频率、波长、周期和声速有如下关系：

$$c = f\lambda \text{ 或 } c = \frac{\lambda}{T} \quad (1-2)$$

通常室温下空气中的声速约为 340m/s，100 ~ 4000Hz 的声音波长范围大致在 340 ~ 8.5cm 之间。

人耳所能感觉到的具有一定强度的声波的频率范围大约在 20 ~ 20000Hz 之间。低于 20Hz 的声波称为次声，高于 20000Hz 的称为超声。次声和超声不能使人耳产生听觉。在声学测量中，不可能测量这个范围中的每一个频率，而总是在某一频率区间取特定值进行测量。这个频率区间称为频带。频带由上限频率 f_2 和下限频率 f_1 确定， f_1 、 f_2 又称为截止频率。 f_1 、 f_2 间隔可以用频率比或以 2 为底的对数表示，称为频程。若一个频带中，上限频率为下限频率的两倍，即 $f_2 = 2f_1$ ，则称其频带宽为倍频带或倍频程。如果测量精度要求高，频带可以窄些，例如，在图示均衡器上常用到 1/3 倍频程、2/3 倍频程。

上限和下限截止频率的一般关系为

$$f_2 = 2^n f_1 \quad (1-3)$$

式中， n 是倍频程的系数，或称倍频程数，它可以是分数或整数。

例如： $n = 1/3$ 是指 1/3 倍频程； $n = 1$ 即指倍频程。可根据上下限频率按下式求出倍频程数 n ：

$$n = \log_2 \frac{f_2}{f_1} = 3.321 \lg \frac{f_2}{f_1} \quad (1-4)$$

可见，按倍频程均匀划分频率区间时，相当于将频率按对数关系加以标度。频带的中心频率 f_c 是上、下截止频率的几何平均，即

$$f_c = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1-5)$$

相应于某一中心频率 f_c 的上、下限截止频率 f_2 、 f_1 分别为

$$f_2 = 2^{\frac{n}{2}} f_c, \quad f_1 = 2^{-\frac{n}{2}} f_c \quad (1-6)$$

相应的带宽 Δf 为

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \left(\sqrt{2^n} - \frac{1}{\sqrt{2^n}} \right) f_c = \beta f_c \quad (1-7)$$

式中， β 是常数，因此 n 倍频程的带宽是一恒定的百分率带宽。

对于 1/3 倍频程， $n = 1/3$ ， $\beta = 0.231$ ；对于倍频程， $n = 1$ ， $\beta = 0.707$ 。频带的带宽比是常数，随中心频率增加，带宽也按一定的比例增加。我国参照有关的国际标准，制定了国标“声学测量中的常用频率”和“声和振动分析用的 1/1 和 1/3 倍频程滤波器”，对 1/1 和 1/3 倍频程滤波器的中心频率和带宽进行了标准化，见表 1-2。

表 1-2 1/1 和 1/3 倍频程滤波器的中心频率和带宽

频带号	中心频率标称值/Hz	1/3 倍频程带宽/Hz	1/1 倍频程带宽/Hz
1	1.25	1.12 ~ 1.41	
2	1.6	1.41 ~ 1.78	
3	2	1.78 ~ 2.24	1.41 ~ 2.82
4	2.5	2.24 ~ 2.82	
5	3.15	2.82 ~ 3.55	
6	4	3.55 ~ 4.47	2.82 ~ 5.62
7	5	4.47 ~ 5.62	
8	6.3	5.62 ~ 7.08	
9	8	7.08 ~ 8.91	5.62 ~ 11.2
10	10	8.91 ~ 11.2	
11	12.5	11.2 ~ 14.1	
12	16	14.1 ~ 17.8	11.2 ~ 22.4
13	20	17.8 ~ 22.4	
14	25	22.4 ~ 28.2	
15	31.5	28.2 ~ 35.5	22.4 ~ 44.7
16	40	35.5 ~ 44.7	
17	50	44.7 ~ 56.2	
18	63	56.2 ~ 70.8	44.7 ~ 89.1
19	80	70.8 ~ 89.1	
20	100	89.1 ~ 112	
21	125	112 ~ 141	89.1 ~ 178
22	160	141 ~ 178	
23	200	178 ~ 224	
24	250	224 ~ 282	178 ~ 355
25	315	282 ~ 355	
26	400	355 ~ 447	
27	500	447 ~ 562	355 ~ 708
28	630	562 ~ 708	
29	800	708 ~ 891	
30	1000	891 ~ 1120	708 ~ 1410
31	1250	1120 ~ 1410	
32	1600	1410 ~ 1780	
33	2000	1780 ~ 2240	1410 ~ 2820
34	2500	2240 ~ 2820	
35	3150	2820 ~ 3550	
36	4000	3550 ~ 4470	2820 ~ 5620
37	5000	4470 ~ 5620	

(续)

频带号	中心频率标称值/Hz	1/3 倍频程带宽/Hz	1/1 倍频程带宽/Hz
38	6300	5620 ~ 7080	5620 ~ 11200
39	8000	7080 ~ 8910	
40	10000	8910 ~ 11200	
41	12500	11200 ~ 14100	11200 ~ 22400
42	16000	14100 ~ 17800	
43	20000	17800 ~ 22400	

3. 波阵面与惠更斯原理 从声源出发, 在同一介质中按一定方向传播, 在某一时刻, 波动所达到的各点的包络面称波阵面。波阵面为平面的称为平面波, 波阵面为球面的称为球面波。由一点声源辐射的声波就是球面波, 但在离声源足够远的局部范围内可近似地把它看作平面波。人们常用声线表示声波的传播路径。在各向同性的媒质中, 声线与波阵面相垂直。例如, 平面波的声线是垂直于波阵面的平行线, 球面波的声线是以声源为中心的径向射线。

我们知道, 波源的振动引起波动, 波动的传播是由于介质中质点间的相互作用。在连续介质中任何一点的振动将直接引起邻近质点的振动。根据惠更斯原理, 在任意时刻, 波阵面上的各点都可以看作一个发射子波的新波源, 在下一时刻, 这些子波的包络面就是实际波源在此刻的新的波阵面。

图 1-2 表示应用惠更斯原理求新的波阵面的例子。已知点声源 O , 声速为 c , 在 t 时刻的波阵面是以 O 为圆心, ct 为半径的球面 S_1 。再以 S_1 上的各点为波源, 以 $c\Delta t$ 为半径作出许多球面子波, 这些子波的包络面 S_2 就是声源 O 在 $(c + \Delta t)$ 时刻的新的波阵面, 见图 1-2a。若已知平面波在某时刻的波阵面 S_1 , 利用惠更斯原理同样可以求出经 Δt 的另一时刻的波阵面 S_2 , 见图 1-2b。

利用惠更斯原理可以解释声波的绕射、反射等现象。

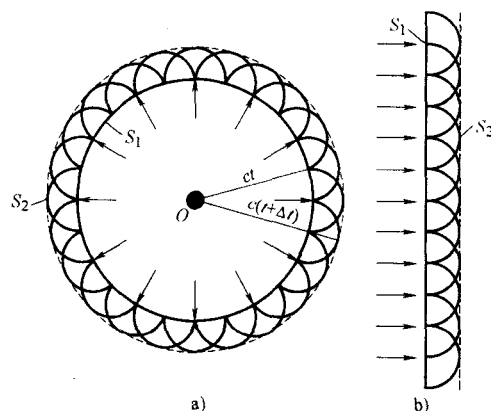


图 1-2 根据惠更斯原理求波阵面
a) 球面波 b) 平面波

1.1.3 声压、声强、声功率与声压级、声强级、声功率级

1. 声强 媒质单位体积里所具有的声能量称为声能密度。如果将它对一个振动周期取平均值, 则得到声能量的时间平均值。单位体积内的平均声能量称为平均声能密度。单位时间内通过垂直于声传播方向的面积 S (m^2) 的平均声能量称为平均声能量流或平均声能通量。单位面积上的平均声能通量就称为声强, 记为 I (W/m^2):

$$I = \frac{\overline{W}}{S} \quad (1-8)$$

式中 \overline{W} ——平均声能通量 (W)。

在自由声场中，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 r 的球面上的声强 I (W/m^2) 为

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1-9)$$

式中 W ——声源声功率 (W)。

2. 声压 声波在媒质中传播时，媒质某点（体积元）由于受声波扰动后压强超过原先静压力的值，称为声压。任何一点的声压都是随时间不断变化的，每一瞬时的声压称为瞬时声压，如果对一定时间间隔的瞬时声压取均方根，则该值称为有效声压。为了使用方便，我们通常简称有效声压为声压。声压（有效声压）与瞬时声压的关系如下式：

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1-10)$$

式中 $p(t)$ ——瞬时声压 (Pa)；

T ——平均时间间隔 (s)。

3. 声功率 声源的声功率是单位时间内声源辐射的总声能量，单位是瓦 (W)。一个声源所辐射的声功率 W ，应当流过包围声源的所有表面。总的声功率应是所有面积元 ΔS 与其声强 I_s 的乘积的总和，或等于总表面积与该表面积上的平均声强的乘积，即

$$W = \sum I_s \Delta S = I_{av} \sum \Delta S \quad (1-11)$$

式中 I_{av} ——平均声强 (W/m^2)。

通常测量声强比较复杂，而测量声压比较简单，在远场，一般是通过测量声压来求出声源的声功率。例如在自由场中，一个声源的声功率可以用下式求出：

$$W = \frac{4\pi r^2 p_{av}^2}{\rho c} \quad (1-12)$$

式中 p_{av} ——以声源为中心，半径为 r 的球面上的平均声压级 (dB)。

4. 声强级、声压级和声功率级 对于频率为 1000Hz 的声音，人耳刚能听得的下限声强为 $10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ ，相应声压为 $2 \times 10^{-5}\text{N}/\text{m}^2$ ，使人产生疼痛感的上限声强为 $1\text{W}/\text{m}^2$ ，相应声压为 $20\text{N}/\text{m}^2$ 。所以在可听范围内，声强和声压的差值巨大，使用起来极不方便。另外人耳对声音强弱的感觉，也并不与声强和声压数值的大小成正比，而近似与他们对数的数值成正比，因此通常用对数的标度来表示。如果以 10 倍（即相对比值 10）为一“级”，这样，声强级的定义便是这声音的强度 I 和基准声强 I_0 之比值的常用对数值，单位为贝尔 (Bel)，声强级表示为

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

但一般不用贝尔，而是取它的 1/10 作单位，即分贝尔，简称分贝 (dB)，即

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-14)$$

式中 I_0 ——基准声强， $I_0 = 10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ 。基准声强即人耳对 1000Hz 声音的可听下限，相应的声强级为 0dB 。

利用“级”的概念就可大大压缩量程的数量级，从而提高计算的简明程度。

同样可以用分贝 (dB) 单位定义声压级，由于声强与声压的平方成正比，因此以分贝

为单位的声压级 $L_{p(\text{dB})}$ 可以用下式表示:

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} \quad (1-15)$$

式中 P_0 ——基准声压, $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ ($2 \times 10^{-5} \text{Pa}$)。

表 1-3 列举了声强、声压和它们所对应的声强级、声压级, 以及相应的声环境。

表 1-3 声强、声压与对应的声强级、声压级以及相应的环境

声强/ (W/m^2)	声压/ (N/m^2) 或 Pa	声强级或声压级 /dB	相应的环境
10^2	200	140	喷气飞机起飞时
10^0	20	120	锅炉车间、钢铁厂(疼痛阈)
10^{-1}	$2 \times \sqrt{10}$	110	风动铆钉机旁
10^{-2}	2	100	织布机旁
10^{-4}	2×10^{-1}	80	城市干道旁、公共汽车内
10^{-6}	2×10^{-2}	60	相距 1m 处交谈
10^{-8}	2×10^{-3}	40	安静的室内
10^{-10}	2×10^{-4}	20	轻声耳语
10^{-12}	2×10^{-5}	0	人耳最低可闻阈

同理, 声功率以级的形式所表示的声功率级 L_w (dB) 如下式所示:

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1-16)$$

式中 W_0 ——基准声功率级, $W_0 = 10^{-12} \text{W}$ 。

应该指出: 声强级、声压级和声功率级与声强、声压和声功率是不同的概念, 以分贝为单位的各种“级”, 只有相对的意义, 它们量纲为 1, 其数值的大小与所规定的基准值有关。因此, 用分贝为单位的各种“级”, 都应同时标明所用的基准值。

5. 声压级的叠加 当几个性质相同的声音叠加时, 它的总声压仍是各个声压的均方根值, 即

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \cdots + P_n^2} \quad (1-17)$$

声压级的叠加不是简单的算术值相加, 须按照对数运算的规律进行。例如, n 个声压相等的声音, 每个声压级为 $20 \lg \frac{P}{P_0}$, 总声压则为 $\sqrt{nP^2}$, 其总声压级 L_p (dB) 为

$$L_p = 20 \lg \frac{\sqrt{nP^2}}{P_0} = 20 \lg \frac{P}{P_0} + 10 \lg n \quad (1-18)$$

根据式 (1-18), 两个声压级相同的声音相加, 其总声压级增加约 3dB。

几个声压级不同的声音叠加在一起, 其总声压级 L_p (dB) 为

$$L_p = 10 \lg \sum 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \quad (1-19)$$

式中 L_{pi} ——第 i 个声音的声压级。

如果一个声音的声压级比另一个声音的声压级小 10dB 以上, 则其对总声压级基本没有

贡献。例如，两个声压级分别为 70.0dB 和 60.0dB 的声音叠加在一起，根据式 (1-19)，其总声压级为 70.4dB。

1.1.4 声波的反射、衍射与干涉

1. 声波的反射与衍射 声波在传播过程中，遇到障碍物，就会出现反射、衍射和散射的现象。这同光波是相似的，是波所共有的性质，差别只是可听声的波长比光波的波长要长得多。可见光的波长约为 0.4~0.7 微米 (μm) 的数量级，而可听声的波长约在 1.7cm~17m 之间 (20~20000Hz)。因此，光波波长与建筑物的界面相比总是小得多，但声波波长则有可能大于或小于和接近界面 (障碍物) 的尺寸。所以，声波有时表现出明显的波动性；有时可看作几何声线；有时又不得不认为两者兼而有之。这对建筑声学设计是一个很重要的问题。判别的关键在于障碍物 (建筑界面) 的尺寸 l 与波长 λ 的比值：

(1) $l \gg \lambda$ ：障碍物的尺寸比波长大很多，障碍物可看作很大的声反射板，声波完全看成几何声线。入射到反射板上的声线，按反射规律反射，声的波动性 (衍射) 除边缘局部区域外，可忽略不计。反射板后部呈现出明显的声影区，见图 1-3a。

(2) $l > \lambda$ ：即障碍物尺寸稍大于波长时，按反射规律反射的区域缩小到只在板前方的中央区，板前的两边表现出各方向的散射，而边缘区出现相当明显的衍射，障碍物后部的声影区相应地压缩，见图 1-3b。

(3) $l \approx \lambda$ ：有规则的声反射消失，障碍物的前部只表现出散射，而在其后部是衍射波，声影区消失，见图 1-3c。

(4) 当 $l < \lambda$ 时，衍射和散射已无法区分，障碍物对声波产生均匀的散射，见图 1-3d。

(5) 当 $l \ll \lambda$ 时，障碍物尺寸远比波长小，声波可以无视障碍物的存在，按照原来方向传播，也即障碍物对声波完全失去作用，没有任何影响，见图 1-3e。

由此可见，所谓物体的大小、长短等，都是而且必须是与波长的比较相对而言的。这对声学装修设计中确定反射面、扩散体的尺寸是非常重要的依据。

2. 声波的干涉 声波在传播过程中常常会发生两个“相干”的、有一固定延时的宽频带音频信号合成的情况，如图 1-4 所示的一个直达声与一个反射声合成，或离听众不同距离的两个扬声器声源 (由于距离不同，因此存在有延时) 发出的直达声合成，如果这两个声波满足下列条件：①两个声波是相干的 (Coherent)，即它们的频率 (或谐波) 是相同的，是由一个音频信号源提供的；②两个声波之间存在着固定的时间差 (延时)；③相遇的两个声波是宽频带信号 (不是单音或纯正弦波)，则合成后的声波就会

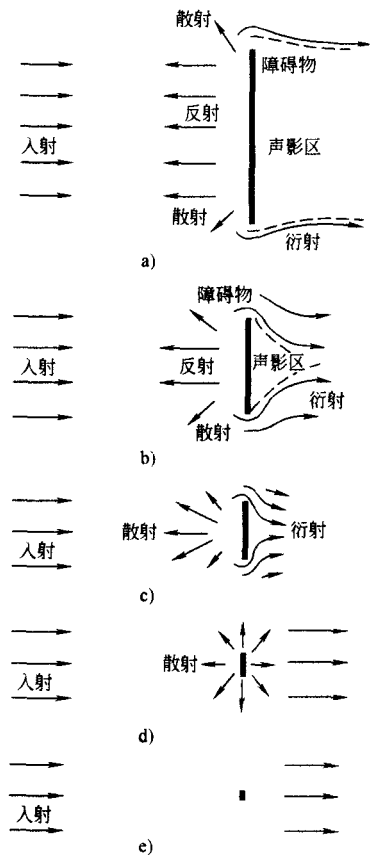


图 1-3 障碍物对法向入射的平行波在不同情况下表现出的不同影响

a) $l \gg \lambda$ b) $l > \lambda$ c) $l \approx \lambda$
d) $l < \lambda$ e) $l \ll \lambda$

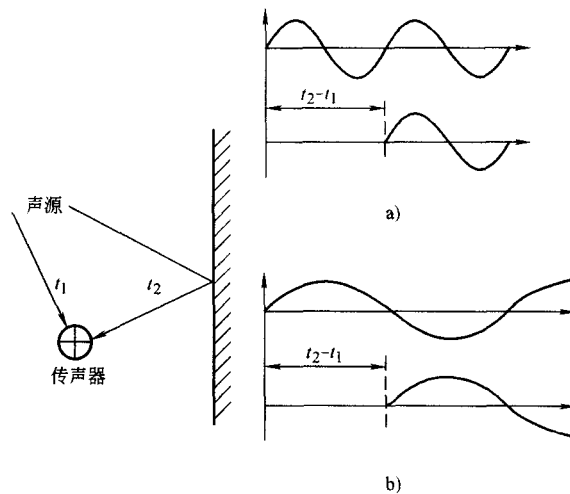


图 1-4 两个延时正弦波的合成

a) 时间差 $\Delta t = T$ (或其整数倍) 时两个信号振幅相加b) 时间差 $\Delta t = T/2$ (或其整数倍) 时两个信号振幅相加

出现在一些频率的振幅加强，而在另一些频率的振幅将减弱，甚至抵消的现象，这种现象我们称为声波的干涉。

从图 1-4 中可以看到，两个相遇的单音声波，如果它们的振幅相同，而它们之间的时间差 $\Delta t = t_2 - t_1$ 等于 $1/2$ 个周期 (或其整数倍) 时，那么合成的结果是相互抵消。如果 $\Delta t = t_2 - t_1$ 等于 1 个周期 (或其整数倍) 时，合成的结果是振幅增加一倍。在声学工程中，传送的声音是 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 的宽频带信号，如果时间差 Δt 等于 2ms ，那么对于 250Hz 的频率来说，它的周期 $T = 1/f = 1/250\text{Hz} = 4\text{ms}$ ， 2ms 的时间差刚好等于其 $1/2$ 个周期，因此振幅相减 (或抵消)；同理，对于 750Hz 的频率，它的周期是 $1/750\text{Hz} = 1.334\text{ms}$ ， 2ms 的时间差是它的 1.5 周期，也发生振幅相减 (或抵消) 的情况；其他在 1250Hz 、 $1750\text{Hz} \cdots 4250\text{Hz}$ 等频率上也发生振幅相减 (或抵消) 的情况。

对于 500Hz 的频率，它的周期是 2ms 。 2ms 的时间差刚好是它的 1 个周期，因此两个声波的振幅相加 (或加倍)，其他在 1000Hz 、 $1500\text{Hz} \cdots 4500\text{Hz}$ 等频率也发生相加的情况。

声波干涉的结果造成频率响应特性出现“峰”和“谷”的波动，其形状像“梳子”，因此又称为梳状滤波器特性 (效应)。图 1-5 是以线性频率刻度 (X 轴) 标注的频响特性，垂直轴为振幅的相对值 (dB)。

上面主要是在频域上的声干涉现象，而在空间也会出现声干涉现象。例如，从声源发出的直射声波和来自壁面或平顶的反射声波在空间各点要相互干涉。如果是单频声 (即纯音)，这种干涉现象必然引起空间各点声场之间的很大差异，有些地方声波会加强，有些地方声波会减弱，甚至抵消而成“死点”。然而，由于语言和音乐是由许多频率组成的复合声，可以有“此起彼伏”、“填平补齐”的效果，使干涉效应不太明显。

在一般情况下，大型观演建筑，如剧场的观众厅的尺寸 (长、宽、高) 比低频波长大几倍或十几倍，形状也不完全是规则的矩形，厅内有凸凹的栏板、包厢、耳光和面光槽等，这些都会“打乱”和“破坏”引起空间干涉的条件。因此，在大型观众厅内，空间干涉现象就