

全立体声音响系统技术

陆伟良 邱正选 赵连强 编著



安徽科学技术出版社

全立体声音响系统技术

陆伟良 邱正选 赵连强 编著



安徽科学技术出版社

责任编辑：何宗华 丁小鹏

封面设计：徐 放

全立体声音响系统技术

陆伟良 邱正选 赵连强 编著

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路1号新闻出版大厦 邮政编码:230063)

新华书店经销 合肥商中印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:31 字数:730千

2001年7月第2次印刷

ISBN 7-5337-1613-2/TN·22 定价:15.00元

(本书如有倒装、缺页等问题请向本社发行科调换)

前 言

随着音响技术的发展和普及,全立体声音响设计的理论正在形成和深化,为此,作者根据近十年来对立体声音响技术的研究成果,结合多年的教学经验和工程实践,编写了本书,将它作为一本完整的教材,奉献给国内有关专业的教师和学生选用,同时也献给广大立体声音响工作者和爱好者。

本书内容分五个部分,共十三章。第一部分(第一、二章)叙述声学基础、立体声技术和厅堂音质设计基础;第二部分(第三、四章)讨论高频立体声(调频和调幅立体声)发送、接收的理论和技術;第三部分(第五~八章)详细阐述立体声音响系统的音源、中间级和末级设备功能及工作原理;第四部分(第九~十三章)则结合具体实际,说明厅堂工艺、扩声音响、电影院及卡拉OK歌舞厅音频/视频系统设计的原则和方法;第五部分(附录1)介绍厅堂立体声音响系统的测量方法。

本书取材精炼,内容新颖。其中,数字音响设备、电影立体声系统、卡拉OK音频/视频系统设计、调幅立体声广播与接收等方面的内容,反映了当前音响技术发展的水平。本书既重视基本概念,又重视工程实际应用,书中简要叙述基本理论知识,给出必要的计算公式,列举了有典型意义的实例和设计方案,各章后均附有习题,另外还收集了工程设计常用的参考数据。

作者编写本书的目的,希望它能有助于本专业学生进一步开拓思路,扩大知识面;能更牢固地掌握所学的理论知识和正确运用工程设计方法;也希望它能有助于从事音响设计的工程技术人员进行系统学习和技术更新;同时还希望能以本书作为引玉之砖,增强“全立体声音响设计”这门学科在系统和设备方面的概念,以促进该学科的发展。

本书由南京建工学院陆伟良教授与邱正选高级工程师共同主编,提出本书的宗旨,拟定编写大纲,周详地考虑各部分内容的衔接与材料的取舍,成稿后又认真地对全稿进行审定。本书第一章由赵连强编写,第二、七、八、九、十、十一、十二章由邱正选编写,第三、四、五、六、十三章及附录由陆伟良编写。

在本书编写过程中,得到国家教委电工教学指导委员会、东南大学无线电系谢嘉奎教授的指导和帮助。胡维德、戎树华高级工程师和李峰、宋永江、丁玉林、沈正华、王玲、陆昀璟等同志为本书的出版做了大量工作。同时还得到东南大学无线电系、南京建工学院机电系、南京音霸专业音响有限公司许多同志的帮助,在此一并致谢。

限于作者水平,书中错谬之处在所难免,敬希学者同仁和广大读者不吝指正。

作 者

1997年5月

目 录

第一章 声学基础和立体声技术	1
第一节 声音的产生和传播.....	1
第二节 声音的量度.....	7
第三节 人耳的听觉特性	11
第四节 人耳声音定位机理	16
第五节 方向性听声实验	19
第六节 立体声信号的传送	22
第七节 立体声技术	24
第八节 电声系统的技术指标和音质的主观评价	32
第二章 厅堂音质设计基础	43
第一节 厅堂声学原理与特征	43
第二节 厅堂音质设计要求	51
第三节 吸声材料及其应用	58
第四节 音质设计与改造	77
第三章 调频立体声广播与接收	88
第一节 调频广播	88
第二节 调频立体声广播	91
第三节 导频制调频立体声发射机	92
第四节 导频制调频立体声接收机	94
第五节 微处理机控制锁相环调频调幅收音机	96
第四章 调幅立体声广播与接收	105
第一节 调幅广播.....	105
第二节 调幅立体声广播.....	106
第三节 摩托罗拉制调幅立体声发射机.....	108
第四节 摩托罗拉制调幅立体声接收机.....	111
第五章 立体声音响系统概论	121
第一节 立体声音响系统的组成.....	121
第二节 立体声音响系统的作用.....	122
第三节 立体声音响系统的声学要求.....	123
第四节 扩声音响系统的类型.....	126
第五节 立体声音响系统的技术要求.....	128
第六章 立体声音响系统音源设备	130
第一节 立体声录音机.....	130
第二节 传声器.....	139

第三节	立体声电唱机·····	158
第四节	激光唱机·····	162
第五节	数字录音机·····	170
第六节	激光影碟机·····	176
第七章	立体声音响系统中间级设备·····	181
第一节	均衡器·····	181
第二节	延时器·····	188
第三节	混响器·····	191
第四节	调音控制台·····	198
第五节	移频器·····	212
第六节	压缩/限幅器·····	214
第七节	降噪器·····	217
第八节	电影立体声信息处理器·····	226
第八章	立体声音响系统的末级设备·····	231
第一节	声频功率放大器·····	231
第二节	扬声器·····	256
第三节	耳机·····	284
第九章	立体声音响系统的工艺设计·····	292
第一节	供电·····	292
第二节	接地·····	294
第三节	信号馈接·····	297
第四节	机房与机柜·····	325
第十章	扩声音响系统设计·····	330
第一节	系统的设计与选型·····	330
第二节	扬声器声场的布置·····	338
第三节	传声器的正确使用·····	364
第四节	声反馈的抑制·····	375
第五节	立体声扩声音响系统·····	381
第十一章	电影立体声系统设计·····	394
第一节	道尔贝光学立体声·····	394
第二节	系统设计·····	399
第三节	声场设计与调整·····	402
第四节	新形式电影系统·····	412
第五节	数字光学立体声在电影上的应用·····	418
第十二章	辅助电声系统的设计·····	425
第一节	厅堂音质的电声控制·····	425
第二节	背景音乐系统·····	433
第三节	同声传译系统·····	437
第四节	有线广播系统·····	442
第十三章	卡拉 OK 音频/视频设备的应用·····	446

第一节 卡拉 OK 伴唱机的功能与类型..... 446

第二节 卡拉 OK 伴唱录像系统功能与组成..... 448

第三节 卡拉 OK 激光影碟、彩色投影系统功能与组成..... 448

第四节 视频摄像系统在卡拉 OK 歌舞厅中的应用..... 449

第五节 专业卡拉 OK 歌舞厅音频/视频设备应用实例 449

第六节 卡拉 OK 设备的今后发展..... 450

附录 1 厅堂扩声特性测量方法 (GB4959—85) 454

附录 2 厅堂扩声汉语清晰度测量方法——打圈法 (参考件) 466

附录 3 厅堂扩声汉语清晰度测量方法——记音法 (参考件) 472

附录 4 常用吸声材料吸声系数 (自编) 480

参考文献..... 485

第一章 声学基础和立体声技术

全立体声厅堂音响原理包括声—电转换、电信号处理、电—声转换等三个环节。在研究有关的理论和设计技术时，不仅要讨论电声设备本身的性能，还要涉及到许多声学知识。为此，本章在扼要介绍声学基本知识的基础上，着重阐述声音的各种效应和立体声技术。

第一节 声音的产生和传播

一、声音和声波

通常，发声的物体，亦即声源，在做机械振动时产生了声音，并在空气中形成声波。例如，在图 1-1 中，音叉是声源。当它的叉股向右侧运动时，会压缩邻近的空气，使这部分空气变疏；叉股向左侧运动时，邻近空气又会变疏。这种疏密相间的状态由声源向外传播，形成声波。声波传入人耳后使鼓膜振动，引起人们对声音的感觉。

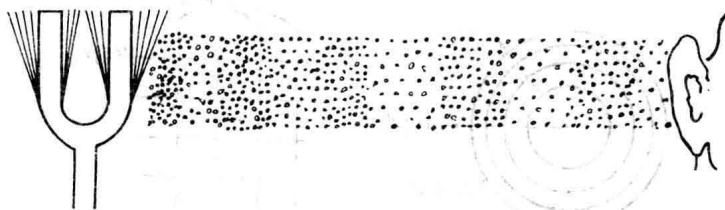


图 1-1 空气中的声波

声波在空气中传播时，空气质点只是在其本身的平衡位置附近振动，并不传播到远方，传播的只是声源的能量。由于空气质点的振动方向与声波传播的方向平行，所以，在空气中，声波是纵波。声波传播时所涉及的空间，称为声场。

一般情况下，声场是平面或立体空间，例如，在图 1-2 中，声源 A 的声场就是一个立体空间。图中的曲线 a 和曲线 a' ，表示在同一时刻，声波沿射线 l_1 、 l_2 的传播情况。曲线上 a 和 a' 点， b 和 b' 点的相位始终是相同的。为了能形象地描绘声波的传播情况，就把这些相位相同的点连在一起，所形成的轨迹面就称做波阵面或波面。离声源最远，即位于最前沿的波阵面称为波前。

在图 1-2 中，射线 l_1 、 l_2 在各点的切线，都与该点声波的传播方向一致，因而称之为声射线或声线。能量沿着声射线传递。在各向同性的介质中，声射线垂直于波阵面，如图 1-3 所示。在各向异性的介质中，两者未必互相垂直。

工程上，常用声波频率和声波的功率或声压来表征声波的特性。

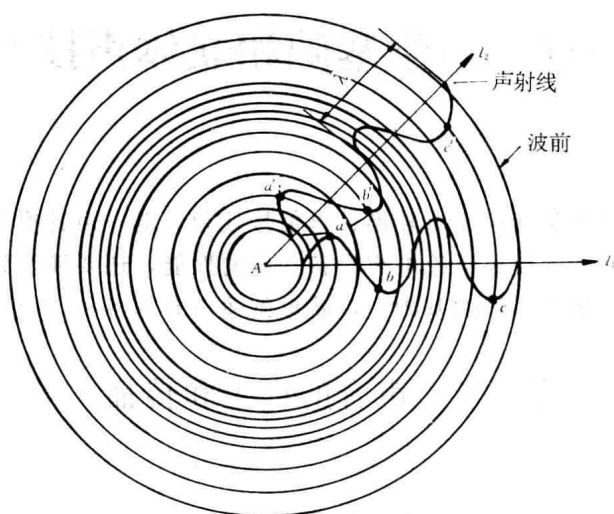


图 1-2 波阵面、波前和波射线

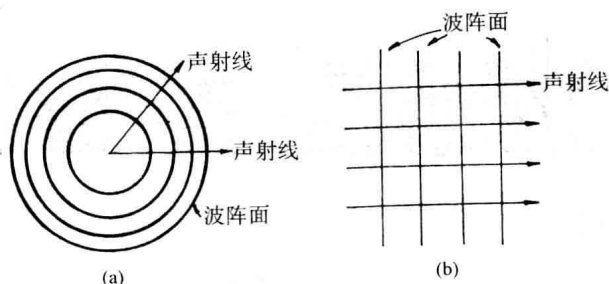


图 1-3 波阵面和声射线的关系

(a) 球面波 (b) 平面波

1. 声音的频率

声音的频率是一个重要的参数，它决定了声音的音调。在人耳的听觉范围内，即在 20～20 000Hz 的频段内，声音的频率越高，音调越高；频率越低，音调越低。习惯上将 20～40Hz 之间的频率称为超低音，50～100Hz 的称为低音，200～500Hz 的称为中低音，1 000～5 000Hz 的称为中高音，10 000～20 000Hz 的称为高音。表 1-1 列出声音频率、波长同音调间的关系。

另一种划分频段的方法，是按频率每升高一倍作为一个倍频程或频带，这样就有：

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

式中： f_1 为参考频率； f_2 为与参考频率相比较的声音频率。 n 为倍频程的数值。当 $n=1$ 时，称为 1 倍频程； $n=1/3$ 时，称为 1/3 倍频程。其余类推。表 1-2 给出按一倍频程和 1/3 倍频程划分的频段。表中的中心频率是上截止频率和下截止频率的几何平均值。图 1-4 采用对数坐标将频率划分为若干个倍频程。这种做法，既方便了数学运算，又符合人耳辨别音调的特点。

表 1-1 声波波长频率对照

频率 (Hz)	波长	1/2 波长	音域分段
20	17.20m	8.60m	超低音
40	8.60m	4.30m	
50	6.88m	3.44m	低音
100	3.44m	1.72m	
200	1.72m	0.68m	中低音
400	86cm	43cm	
500	68.8cm	34.4cm	
1 000	34.4cm	17.2cm	中高音
5 000	6.88cm	3.44cm	
10 000	3.44cm	1.72cm	高音
20 000	1.72cm	0.86cm	

表 1-2 倍频带和 1/3 倍频带的划分(Hz)

倍 频 带		1/3 倍频带	
中心频率	截止频率	中心频率	截止频率
16	11.2~22.4	12.5	11.2~14.1
		16	14.1~17.8
		20	17.8~22.4
31.5	22.4~45	25	22.2~28
		31.5	28~35.5
		40	35.5~45
63	45~90	50	45~56
		63	56~71
		80	71~90
125	90~180	100	90~112
		125	112~140
		160	140~180
250	180~355	200	180~224
		250	224~280
		315	280~355
500	355~710	400	355~450
		500	450~560
		630	560~710
1 000	710~1 400	800	710~900
		1 000	900~1 120
		1 250	1 120~1 400
2 000	1 400~2 800	1 600	1 400~1 800
		2 000	1 800~2 240
		2 500	2 240~2 800
4 000	2 800~5 600	3 150	2 800~3 550
		4 000	3 550~4 500
		5 000	4 500~5 600
8 000	5 600~11 200	6 300	5 600~7 100
		8 000	7 100~9 000
		10 000	9 000~11 200
16 000	11 200~	12 500	11 200~14 100
		16 000	14 100~17 800
		20 000	17 800~22 400

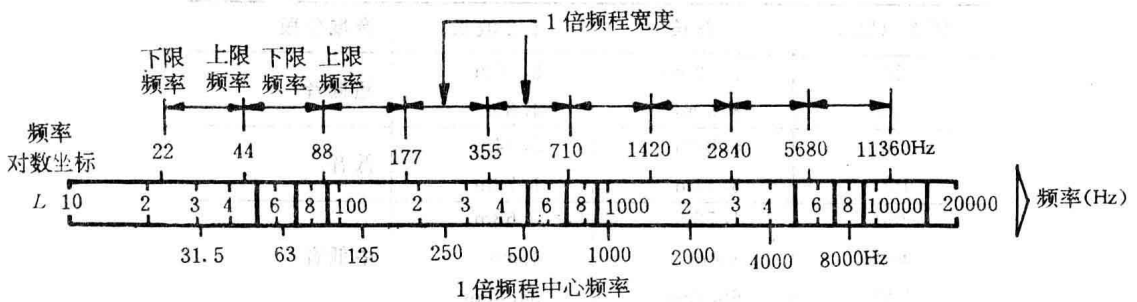


图 1-4 按对数坐标划分频段

2. 声功率、声强和声压

1) 声功率

声源的声功率是指声源在单位时间内辐射的总能量，单位为瓦(W)或毫瓦(mW)、微瓦(μ W)。表 1-3 给出几种不同声源的声功率。

工程中，常将声源在可听频率范围或指定频段内的声功率，称为频带声功率，使用时应注意它和声源声功率的区别。

2) 声强

声强是指波阵面上单位面积在单位时间内通过的平均声功率，记作 I ，单位为瓦/米² (W/m²)，即

$$I = \frac{W}{S} \quad (1-2)$$

式中： W 为声功率； S 为波阵面上的面积。

平面波的波阵面面积处处相等，根据上式可知，它的声强也处处相等。球面波的波阵面面积为 $4\pi r^2$ ， r 为离开声源的距离。所以，它的声强与 r 的平方成反比，亦即与声源的距离加倍时，声强 I 减至原来的 $1/4$ 。声强与距声源距离平方成反比的关系，就叫做“平方反比关系”。

3) 声压

如前所述，声波在空气中传播时，会使空气质点层的压强在大气静压强附近起伏变化，如图 1-5 (a) 所示。某处有声波时的总压强与没有声波时的静压强之间的差值，定义为该处的声压，记作 P ，单位为帕斯卡，简称帕(Pa)，1 帕=1 牛/米²；工程上也常以微巴(μ b)为单位。声压是标量，具体描述声波特性时，引入瞬时声压、峰值声压和有效声压。

瞬时声压是某点在某一时刻的瞬时总压强与大气压之差。峰值声压为某一时间间隔内最大的瞬时声压。有效声压为瞬时声压对时间的均方根值。对于正弦波形的声波，峰值声压就是声压的幅值，有效声压为峰值声压的 $1/\sqrt{2}$ 倍，如图 1-5 (b) 所示。由于人耳对声音强弱的感觉直接与有效声压有关，所以，如未加说明，所提及的声压一般是指有效声压。

表 1-3 几种不同声源的声功率

声 源 种 类	声 功 率
喷气飞机	10kW
气 锤	1W
汽 车	0.1W
钢 琴	2mW
女 高 音	1 000 μ W~7 200 μ W
对 话	20 μ W

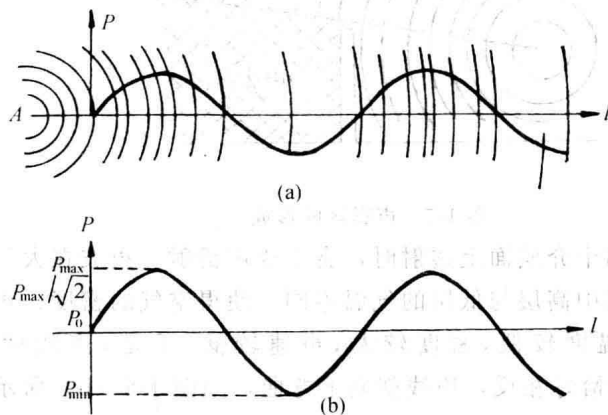


图 1-5 瞬时声压和有效声压

(a) 声压沿声射线的分布 (b) 瞬时声压和有效声压

二、声波的反射、折射和衍射

前面简要介绍了声波在无限空间里自由传播的情况。然而，声波在传播过程中常会遇到各种障碍物。当障碍物的尺寸比声波波长大得多时，将有一部分声波被反射回去，另一部分声波会透射过去。这两种现象分别称为声反射和声透射。它们都是在两种介质的界面上发生的。一般用声射线表示声波的入射、反射和透射。

类似于光的反射现象，声反射也遵循如下三条定律：

1. 入射线、反射线和反射面(界面)的法线在同一平面内；
2. 入射线与反射线分别位于法线的两侧；
3. 入射角和反射角相等。

这样，就可运用几何方法，确定障碍物对声波的反射情况。图 1-6 (a)、(b)、(c) 分别为声波在光滑的平面、凸球面、凹球面上的反射。图中，反射波的波阵面是入射线段和反射线段之和相等的点的轨迹。显然，凸面的反射使声波扩散；凹面的反射使声波汇集，这就易于引起声音的聚焦和回声。

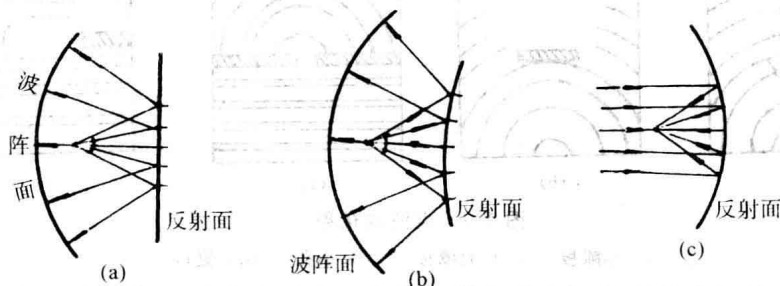


图 1-6 声波在不同形状界面上的反射

(a) 平面 (b) 凸面 (c) 凹面

由于障碍物的反射作用，其后将会出现“声影区”，亦即声波不能通过直线传播到达的地区，如图 1-7 所示。这种现象又称做“遮蔽效应”。

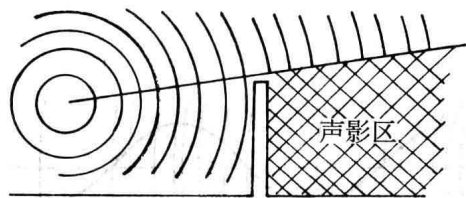


图 1-7 声影区的形成

类似于光波、声波在两个介质面上透射时，会形成声折射。声波在大气中传播时也会发生声折射，这是由于大气层中高层与底层的气温不同，使得空气的密度、声速发生相应的变化所致。日间，上层空气温度较低，密度较大，声速较低，于是，声线就向上弯曲，如图 1-8 (a) 所示；夜间，情况恰好相反，声线就向下弯曲，如图 1-8 (b) 所示。

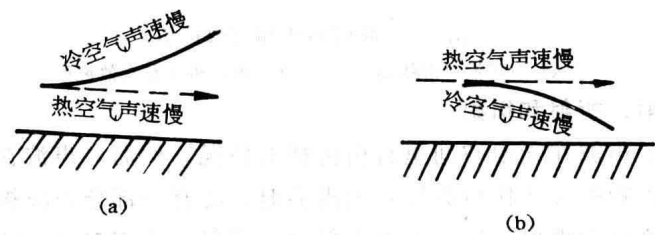


图 1-8 声波在大气层中的折射

(a) 白天 (b) 夜间

声波遇到障碍物后，改变了传播方向并绕过障碍物的现象，称为声衍射或声绕射。声波在遇到不同障碍物时的衍射现象，如图 1-9 所示。由此可以看出：开口的长度远大于声波波长时，衍射现象并不明显；当开口的长度与声波波长相近或远小于声波波长时，衍射现象显著。由于声波波长以“米”计，所以，声波常绕过许多障碍物，进入声影区。

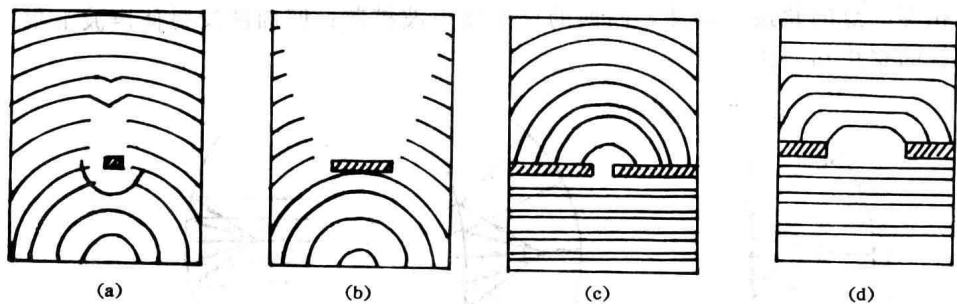


图 1-9 声波的衍射

(a) 小障板 (b) 大障板 (c) 小孔 (d) 宽口

有时，将遮蔽效应和衍射效应合称为声障效应。在厅堂的建声设计中，设计师充分考虑了声障效应。因此，当座无虚席时，观众能较好地欣赏音乐；但如果观众较少时，则会觉得音质不佳。产生这种现象的主要原因就是声障效应。

三、声波的干涉

若干个声源的声波在同一种均匀的介质中传播时,各列声波保持自己原有的特性不变,合成声场中某处质点的振动,将是各个声波分振动的合成振动。该质点的总位移,就是各个分位移的矢量和。

理论分析证明:在两列具有相同频率、固定相位差的声波所构成的合成声场中,质点以同一频率振动,而且,某些点的振动始终得到加强,某些点的振动始终被减弱,甚至被完全抵消。这种现象,称为声波的干涉现象。产生干涉现象的声源叫做相干声源,相干声源产生的波叫相干声波。

频率不同或频率虽同,但没有固定相位差的两列声波,亦即非相干波,它们使得合成声场中质点的振动时而得到加强,时而受到削弱。换言之,就是不会发生干涉现象。非相干声源在声场某处合成声波的瞬时声压将随时间无规则地变化,但该点的总的有效声压等于各列声波在该点的有效声压之和。

第二节 声音的量度

一、声压级、声强级和声功率级

现讨论声压、声强和声功率的量度。因为声振动的能量变化范围极其之大,比如,人们讲话的声功率约为 10^{-5}W ,强力火箭的噪声功率可达 10^9W ,两者相差十多个数量级。故若采用线性标度来量度它们是十分不便的。另外,人耳在产生声音的感觉时,对声音大小的主观感觉大致和声强的对数值成正比。基于这两个原因,声学中普遍采用对数坐标来度量声压、声强和声功率,所得的对数值分别称为声压级、声强级和声功率级,以贝尔(BL)或分贝(dB)为单位。

1) 声压级

声压级以符号 L_P 表示,定义为待测有效声压 P_e 与基准声压 P_{ref} 比值的常用对数值,即:

$$L_P = \lg \frac{P_e}{P_{\text{ref}}} (\text{BL}) \quad (1-3)$$

式中: P_{ref} 常取 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 。此值是空气中人耳对 1kHz 的声音,刚能觉察到其存在时的声压值。因此, P_{ref} 又称为 1kHz 声音的可听阈声压。一般情况下,低于这一声压值,人耳就难于听到这个声音。若以分贝为单位,则有:

$$L_P = 20 \lg \frac{P_e}{P_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-4)$$

2) 声强级

声强级用符号 L_I 表示,定义为待测声强 I 与基准声强 I_{ref} 比值的常用对数值(单位为 BL),或乘以 10(单位为 dB),即:

$$L_I = \lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} (\text{BL}) \quad (1-5)$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-6)$$

式中: I_{ref} 取 10^{-12}W/m^2 ,它是与式 (1-3) 中 P_{ref} 相对应的声强,也是 1kHz 声音的可听阈声强。

以同样方法,也可定义声功率级,即:

$$L_w = \lg \frac{W}{W_0} (\text{BL}) \quad (1-7)$$

或

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_{\text{ref}}} (\text{dB})$$

式中：\$W\$ 为待测声功率；\$W_{\text{ref}}\$ 为基准声功率，取 \$10^{-12} \text{W}\$，它是与式(1-3)中 \$P_{\text{ref}}\$ 相对应的声功率。

表 1-4 给出几种声学环境中声压、声强和声功率以及对应的声压级、声强级和声功率级。

当几个非相干源同时存在时，它们在声场某处的总功率为各列波在该处声功率的代数和，总声强也为各声强的代数和，总声压为各声压的均方根值，即：

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2} \quad (1-8)$$

因此，总声压级为：

$$L_P = 20 \lg \frac{\sqrt{P}}{P_{\text{ref}}} = 20 \lg \frac{\sqrt{P_1^2 + \dots + P_n^2}}{P_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-9)$$

总声强级为

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} = 10 \lg \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{I_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-10)$$

总功率级为

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_{\text{ref}}} = 10 \lg \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_n}{W_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-11)$$

表 1-4 声强、声功率、声压与对应的声强级、声功率级、声压级和相应环境

声强 (W/m ²)	声功率 (W)	声压 (μb)	声强 声功率级 (dB) 声压	相应环境
10 ²	10 ²	2×10 ³	140	飞机发动机(3m)
1	1	2×10 ²	120	疼痛阈
10 ⁻²	10 ⁻²	2×10	100	织布机房
10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	2	80	汽车喇叭
10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	2×10 ⁻¹	60	相距 1m 交谈
10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	2×10 ⁻²	40	安静室内
10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	2×10 ⁻³	20	手表摆动(0.1m)
10 ⁻¹²	10 ⁻¹²	2×10 ⁻⁴	0	最低可听阈

【例 1-1】 已知两列非相干波在某处的声级相等，且：\$L_{P_1} = L_{P_2} = 100 \text{dB}\$，试求合声场中该点的声压级。

解 $P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} = \sqrt{2} P_1$

$$L_P = 20 \lg \frac{\sqrt{2} P_1}{P_{\text{ref}}} = 20 \lg \frac{P_1}{P_{\text{ref}}} + 10 \lg 2 = L_{P_1} + 3 = 103 (\text{dB})$$

可见，声压级相同的两列非相干波叠加后，声压级只增加了 3dB。

【例 1-2】 已知某点的声功率级为 \$L_{w_1}\$，试问：当声源功率加倍后，该点的声功率级有何

变化?

解 声源功率加倍后, 辐射到该点的声功率也将加倍, 因此有:

$$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_{\text{ref}}} = 10 \lg \frac{2W_1}{W_{\text{ref}}} = 10 \lg \frac{W_1}{W_{\text{ref}}} + 10 \lg 2 = L_{W_1} + 3 \text{ (dB)}$$

可见, 声源功率加倍后, 声场中各点的声压级增加 3dB。

[例 1-3] 试问: 在点声源声场中, 某点至声源距离加倍后, 声压级有何变化?

$$\begin{aligned} \text{解 } \Delta L_P &= L_{P_2} - L_{P_1} = 20 \lg \frac{P_2}{P_{\text{ref}}} - 20 \lg \frac{P_1}{P_{\text{ref}}} \\ &= 20 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg \frac{r_1^2}{r_2^2} = 20 \lg \frac{r_1^2}{(2r_1)^2} = 40 \lg \frac{1}{4} \\ &= 20 \lg \frac{1}{2} = -6 \text{ (dB)} \end{aligned}$$

所以, 在点声源声场中, 至声源的距离加倍后, 声压级下降 6dB。

二、响度级

实验表明, 人耳对声音“响”或“不响”的主观感觉, 不但与声压级有关, 而且还与声音的频率有关。例如, 对频率为 100Hz、声压为 0.025Pa 和频率为 1 000Hz、声压为 0.002Pa 的这样两个纯音, 人耳在响度上的感觉几乎是一样的。人耳感到高、低频的声音要比相同声压级的中频声音低, 而且, 这种现象随着声音强度的减少更为明显。上述的现象, 就称为弗莱彻—芒森效应。

为了定量地度量声音“轻”或“响”的程度, 就把待测声音与标准声音(通常取 1 000Hz 的纯音)相比较, 调节 1 000Hz 纯音的声压级, 使两者听起来同样地响, 这时, 1 000Hz 纯音的声压级就被定义为待测声音的响度级, 响度级的单位称为“方”(phon)。例如, 当 1 000Hz 纯音的声压级为 60dB 时, 有一声音听起来同它一样地响, 那么, 无论该声音的声压级为多少, 其响度级都被认为是 60 方。按照上述规定, 对于 1 000Hz 的纯音, 以分贝表示的声强级和以“方”表示的响度级, 在数值上是相等的。

实验得出的响度级同声音频率、声压级的关系曲线如图 1-10 所示, 该曲线就是著名的弗莱彻—芒森等响度曲线, 简称等响度曲线。图中, 以响度级为参变量的各条曲线, 反映人耳为了获得相同响度时, 声压同声音频率间的关系。位于图中最下方的曲线是人耳刚刚能听到声音的界限, 其响度级为零, 因此, 它也就被称为零响度级曲线。一般说来, 低于此曲线的声音就不能听到。所以, 又称之为可听阈。位于图中最上方的曲线是人耳产生疼痛的界限, 声压高于此界限的声音, 就会使人耳产生疼痛, 因此, 该曲线又被称为痛觉阈。人耳能正常感受的声压级在可听阈和痛觉阈所包含的范围内。人耳能够感受的声压可相差 120dB, 即 10^6 倍。

图中各不同响度的等响度曲线形状是不相同的。零响度曲线中部下凹明显, 80 方响度曲线就比较平坦。另外, 从图中还可看出, 人耳对 2 000~5 000Hz 的声音特别敏感。

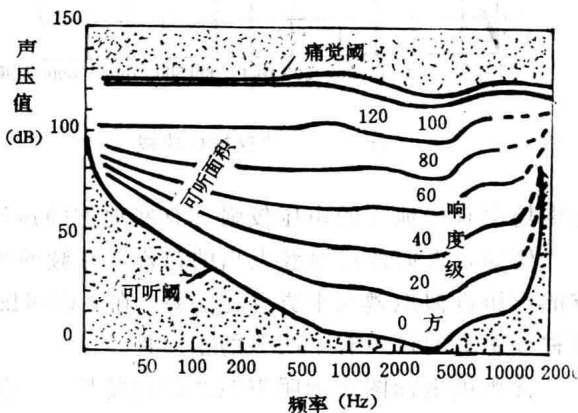


图 1-10 弗莱彻—芒森等响度曲线

从弗莱彻-芒森等响度曲线还可看出：当一个复合声（即含有多个频率纯音的声音）的各个频率分量的声压都提高或下降相同的数值，会使声音的音色改变。例如，一个乐队在演奏，而且是在低频分量与高频分量都在声压级为 100dB 的条件下录音，由于 100 分的等响度曲线几乎是水平的，所以，低频声和高频声听起来也就差不多响。但是，如果放音是在声压级为 60dB 的条件下进行，这时，1 000Hz 的声音听起来是 60 分响，可频率在 100Hz 以下和 5 000Hz 以上的声音已难听到。其它频率的声音也有不同的响度级。结果，听起来就缺少了低频分量和高频分量，音色发生了变化。为了在还原声音时保持原有的音色，就要按图 1-10 所示的等响度曲线对不同频率的声音作不同的补偿。在高保真技术（Hi-Fi）中，为了防止高、低频的声音响度下跌，人们设计了响度控制器。当音量调小时，电路会按等响度曲线的形状自动提升高、低频。

在用仪器直接测量声音的响度级时，必须按等响度曲线模拟人耳的听觉特性。为了简化测量设备，国际电工委员会推荐使用图 1-11 所示的计权曲线。其中，A 计权曲线是参考 40 分左右的等响度曲线得到的，它的形状和 40 分等响度曲线的倒置形状大致相同，对 500Hz 以下的声音有较大衰减，用以模拟人耳对低频声音不敏感的特性。C 曲线是模拟人耳对 85 分以上纯音的响应，用而比较平坦。B 曲线居于 A、C 曲线之间，模拟人耳对 70 分纯音的接收情况。D 计权特性曲线，是为了模拟飞机噪声在听觉上的反映。

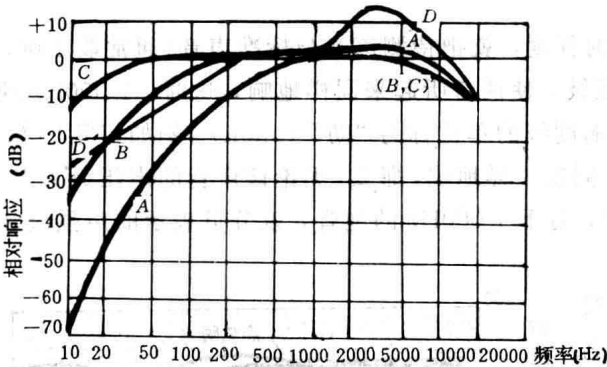


图 1-11 计权特性曲线

在声压计中加上具有不同计权特性的网络，即 A 计权网络、B 计权网络、C 计权网络等，所得到声压级的数值，分别记为 dB (A)、dB (B)、dB (C) 等。

三、声源的指向特性

点声源的线度远小于声波波长，它向各方向辐射的声强是相同的，也就是没有方向性。但是，当声源振动面的线度与声波波长差不多或大于声波波长时，这种声源就可看成是一组点声源的组合，总声场是各个点声源共同作用的结果，而这些声源，又是相干的。结果，

总声场中有些地方的声压较强，有些地方的声压很小，使得这种声源具有明显的指向性。

例如，人们通过口腔发出的口声，在频率为 500Hz 以下时，因声波波长较大，讲话者前方的声压近似地遵从平方反比关系。在 4 000Hz 频率以上，口唇的线度可与声波波长相比拟，这种频率上的口声有了明显的指向性。

常用极坐标图来标明声源的指向特性。不同频率口声的指向特性如图 1-12 所示，其中，(a) 图和 (b) 图分别为水平面和垂直面内的指向特性。图中，以同心圆注明相对声压级，参考声压是口唇正前方的声压值。由图 1-12 可以很方便地知道不同方位角上口声的声压值。图 1-12 还表明，频率为 125~250Hz 的低频口声，几乎没有指向性，但频率为 1 400~2 000Hz 的口声，已出现了明显的指向性。特别是在讲话者的背后，高频分量急剧下降，使得语言不清晰。

除口声外，各种乐器的乐声也具有明显的指向特性。声源的指向性是一项很重要的声学指标，在进行音响设计时，必须根据声源的指向性来合理布局。