



现代舞台工程设计与 调音调光技术

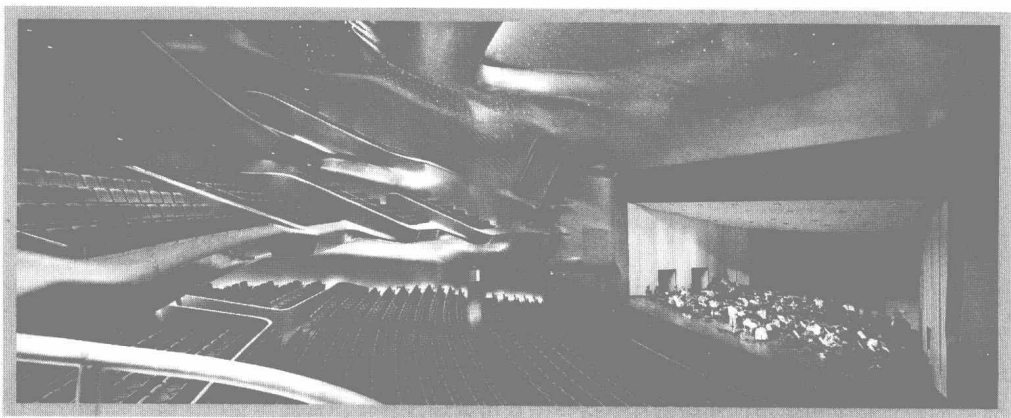
梁华 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



现代舞台工程设计与调音调光技术

梁华 编著

J8

342

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

现代舞台工程设计与调音调光技术 / 梁华编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2016.2
ISBN 978-7-115-40115-1

I. ①现… II. ①梁… III. ①舞台—音响效果—调试
方法②舞台灯光—调试方法 IV. ①J814

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第242354号

内 容 提 要

现代舞台工程(舞台工艺设计)技术主要包括舞台音响、舞台灯光和舞台机械三大系统。本书以音响技术为主,较为全面、系统地阐述现代舞台音响、舞台灯光、舞台机械三大系统的技术原理、设计方法和使用技巧,并介绍音响灯光技术的最新成就。

本书的特点是突出实用性和新颖性。适合于从事剧场、会堂、歌舞厅、电影院、演播厅、俱乐部等的音响灯光工程技术人员、舞台工艺设计人员及有关管理人员阅读,也适合于调音调光人员以及广大业余爱好者参考,还可作为大专院校有关专业和调音调光技术培训班的教材。

◆ 编 著 梁 华

责任编辑 张 鹏

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 40.75

2016年2月第1版

字数: 1 026 千字

2016年2月北京第1次印刷

定价: 98.00元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

现代舞台工程（舞台工艺设计）技术主要包括舞台音响、舞台灯光和舞台机械三大系统。本书在广获好评的《舞台音响灯光设计与调控技术》一书的基础上，根据现代舞台技术的最新发展和实际需要，对该书内容进行全面修改与扩充。本书以音响技术为主，较为全面、系统地阐述现代舞台音响、舞台灯光、舞台机械三大系统的技术原理、设计方法和使用技巧，并介绍音响灯光技术的最新成就。

本书在选材上力求新颖实用，在叙述上力求深入浅出。全书共分 14 章，包括声学基础、立体声原理、语言声与音乐声的特性、传声器与扬声器、线阵列音箱、音源设备、功放与 AV 放大器、调音台及周边设备、数字音频处理器、大屏幕显示与投影电视、剧场舞台设计与舞台机械、舞台音响与建筑声学设计、舞台灯光系统设计、歌舞厅与 KTV 包房系统、数字电影院与 3D 电影等。书中还列举了大量设计示例和实用资料。因此，本书适合于剧场、会堂、歌舞厅、电影院、演播厅、俱乐部等场所从事音响灯光的工程技术人员、舞台工艺设计人员及有关管理人员阅读，也适合于有关行业的调音调光人员以及广大业余爱好者参考，还可作为大专院校有关专业和调音调光技术培训班的教材。

在本书编写的过程中，参考了国内外许多书刊，还得到了游绿洲、郑正华、林健康、田宾、梁晨、林国英、叶寿平、周丹、曾品凝、梁亮、华锦敏、梁晶、冯雪梅、梁中云、林晓辉、梁巧、曾向伟、梁瑞钦、牛荣、梁中建、徐正森等同志的大力帮助，在此一并表示感谢。同时，也衷心希望广大读者对书中的不足或不当之处给予批评指正。

目 录

第1章 声学基础	1	三、听觉定位的辨别力	34
第1节 声音的基本性质	1	四、双声道立体声基础	35
一、声音的产生与传播	1	五、双声道立体声的正弦定律	37
二、频率、波长与声速	2	第2章 语言声与音乐声的特性	40
三、声波的反射与绕射	3	第1节 声音信号的分析	40
四、声波的透射与吸收	5	一、声音信号的分析方法	40
第2节 声音大小的量度	6	二、音程和倍频程	42
一、声压、声强和声功率	6	第2节 人声的特性	43
二、声压级、声强级和声功率级	7	一、语言声的特性	43
三、声波的叠加与分解	9	二、歌声的特性	45
第3节 人耳听觉特性	11	三、声部与声音类型	47
一、声音三要素	11	四、演唱类型	48
二、掩蔽效应	15	第3节 乐器声的特性及乐器分类	48
三、哈斯效应——回声感觉	16	一、乐器声及其特性	48
四、人耳对声音变化的分辨力	17	二、乐器及其分类	52
第4节 室内声音	19	三、乐队的组成与配置	62
一、直达声、早期反射声和混响声	20	第4节 歌声与乐器声的拾音	65
二、室内声压级的计算	21	一、基本拾音方法	65
三、临界距离 r_c	23	二、多声道录音	66
四、混响时间	23	三、歌声的拾音	68
五、房间共振与声染色	25	四、乐器声的拾音	69
第5节 立体声原理	29	第3章 传声器	81
一、立体声与立体声系统	29	第1节 传声器的种类与原理	81
二、人耳听觉定位特性	32	一、传声器的作用和种类	81

二、动圈式传声器的工作原理	81	二、扬声器的检测	127
三、电容式传声器的工作原理	82	三、音箱的常见故障与检修	129
四、幻象供电	83	第 5 节 线阵列扬声器系统	130
第 2 节 传声器的性能指标	84	一、点声源阵列和线声源	130
一、传声器的主要性能	84	二、线阵列音箱的近场与远场	134
二、传声器产品举例	89	三、弧线形阵列	135
第 3 节 若干特殊传声器	91	四、线阵列扬声器系统的特点	137
一、无线传声器	91	第 5 章 音频放大器与 AV 放大器	139
二、界面传声器	95	第 1 节 前置放大器与功率放大器	139
三、近讲效应与近讲传声器	97	一、前置放大器	139
第 4 节 传声器的选择、使用与维护	99	二、功放的种类	140
一、传声器的选择	99	三、功放的性能指标	142
二、传声器的使用与维护	101	四、功放的使用	145
第 4 章 扬声器与音箱	105	五、功放的选用与产品示例	148
第 1 节 扬声器及其特性	105	第 2 节 D 类功放	150
一、扬声器的种类	105	一、D 类功放的特点	150
二、电动式扬声器的工作原理	106	二、D 类功放的电路原理与产品 示例	151
三、扬声器的性能指标	108	第 3 节 AV 放大器	154
第 2 节 音 箱	111	一、AV 放大器的组成	154
一、音箱的作用和种类	111	二、Hi-Fi 放大器与 AV 放大器之 差异	155
二、封闭式音箱与倒相式音箱	113	三、环绕声解码器	156
三、分频网络	115	四、AV 放大器常见故障与检修	159
四、专业音箱产品示例	117	第 6 章 音频数字化原理与音源设备	162
第 3 节 超低音音箱	122	第 1 节 音频数字化原理	162
一、超低音及其重放的方法	122	一、音频数字化原理和系统构成	162
二、常用超低音音箱	123	二、纠错编码	166
第 4 节 音箱的选择与检修	126	三、数字音响系统的特点	169
一、音箱的选择	126		

第2节 CD 唱片、唱机·····	169	第4节 调音台示例·····	213
一、CD 唱片·····	169	一、声艺 Soundcraft LX7 型调音台·····	213
二、CD 唱机·····	170	二、声艺 Spirit LIVE4.2 型调音台·····	219
三、激光拾音器及其放音原理·····	171	第5节 数字调音台·····	226
第3节 压缩编码与 DVD·····	174	一、数字调音台的组成·····	226
一、数字压缩编码·····	174	二、数字调音台的特点·····	229
二、VCD 影碟机·····	176	第8章 数字信号处理设备·····	232
三、DVD 影碟机·····	177	第1节 频率均衡器·····	232
四、高清晰 DVD·····	181	一、概述·····	232
五、DVD 影碟机的视频和音频输出 信号与接口·····	182	二、频率均衡器的作用和类型·····	232
第4节 硬盘录音机与硬盘录像机·····	187	三、均衡器的主要技术指标·····	234
一、硬盘录音机·····	187	四、均衡器的使用·····	237
二、硬盘录像机·····	188	第2节 反馈抑制器·····	239
第7章 调音台及其分析·····	191	一、反馈抑制器的基本原理·····	240
第1节 调音台分类与作用·····	191	二、Sabine FBX 系列反馈抑制器·····	241
一、调音台分类·····	191	三、Sabine FBX-901 型反馈抑制器的 使用·····	243
二、调音台的基本功能·····	192	四、FBX-2020 Plus 型反馈抑制器的 调控·····	246
第2节 调音台的组成与性能指标·····	193	五、移频器·····	247
一、输入部分·····	193	第3节 延迟器、混响器、DSP 效果器·····	248
二、输出部分·····	195	一、延迟器·····	248
三、LED、VU 表和 PPM 表·····	195	二、利用延迟器反馈构成混响器·····	250
四、调音台的主要技术指标·····	198	三、延迟混响器的作用·····	251
第3节 调音台系统的接法与调控 技巧·····	199	四、YAMAHA REV100 型数字 混响器·····	252
一、调音台系统的基本接法·····	199	五、数字信号处理器 (DSP)·····	254
二、调音台与周边设备的接法·····	200	第4节 压缩器、限制器、噪声门·····	256
三、调音台的接法与操作要点·····	201		
四、调音台操作方法和分析实例·····	204		

一、压缩器和限制器的作用与特性	256	第4节 投影显示技术	301
二、压限器的特性参量	258	一、投影显示器分类	301
三、压限器的使用及示例	262	二、投影电视机的主要技术指标	303
四、噪声门	269	三、投影显示系统的分级与性能指标	306
五、噪声门的操作使用	270	四、投影机的技术选型	307
第5节 激励器	271	五、投影机的使用与维护	308
一、激励器的原理与应用	271	第5节 投影屏幕	310
二、Aphex C 型激励器	272	一、投影屏幕的性能参数	310
三、激励器的调控	273	二、投影屏幕的种类与屏幕尺寸	311
四、Aphex 104 型激励器及其使用	275	第6节 拼接显示技术	313
第6节 数字系统处理器	276	一、大屏拼接墙的分类与系统组成	314
一、数字系统处理器概述	276	二、大屏拼接墙的特点与示例	317
二、数字系统处理器产品示例	277	三、多投影机拼接显示	319
第9章 大屏幕显示与投影电视	285	第10章 剧场舞台设计与舞台机械	321
第1节 大屏幕显示器种类	285	第1节 剧场的分类与组成	321
一、显示器种类	285	一、剧场的分类	321
二、直视式显示器的特点	286	二、剧场的组成	324
第2节 LED 显示技术	288	三、舞台的组成与设计考虑	325
一、LED 显示屏的分类	288	第2节 剧场舞台设计	326
二、LED 显示屏的特点	291	一、主舞台基本设计	326
三、LED 显示屏系统组成	292	二、台唇与乐池	329
第3节 LED 显示屏系统的设计	294	第3节 剧场工艺设计的要求与规定	332
一、LED 显示屏系统的设计特点	294	一、舞台一般规定和要求	332
二、显示屏体大小与安装设计	295	二、舞台灯光	334
三、LED 显示屏的设计	297	三、舞台机械	338
四、使用 LED 显示屏的注意事项	299	四、舞台监督与内部通信系统	340
五、信息显示系统主要设备配置	300	五、演出技术用房(控制室、 功放室)	341
六、LED 显示系统的安装工艺与 供电	300		

六、供电与接地	341	第4节 剧场扩声系统的设计	389
第4节 舞台机械设计	342	一、剧场的扬声器布置	389
一、舞台机械的技术要求与设计 过程	342	二、延时的应用	393
二、舞台与机械设计	344	三、剧场舞台音响系统方式	395
第5节 台上机械设计	349	四、EASE 软件在声场分析中的 应用	399
一、舞台幕布	349	五、剧场音响系统设计举例	403
二、防火幕	351	第5节 网络化剧场舞台音响系统	408
三、假台口	353	一、音频网络的典型拓扑形式	408
四、吊杆	354	二、数字音频网络传输技术	408
第6节 台下机械设计	359	三、媒体矩阵	414
一、舞台下部的机械布局	359	四、YAMAHA (雅马哈) DME	417
二、升降台	360	第6节 网络化剧场舞台音响系统设计 举例	423
三、车台	363	一、扬声器的选型与布局	423
四、转台	363	二、数字化和网络化的设计	424
第7节 设计示例: 上海东方艺术中心 歌剧厅舞台机械	363	三、热备份设计	426
第11章 舞台音响与建筑声学设计	372	第7节 剧场的建筑声学设计	429
第1节 厅堂扩声系统的类型	372	一、厅堂建筑声学设计步骤	429
一、厅堂扩声概述	372	二、剧场的体形设计	430
二、基本音响系统类型	373	三、混响设计	434
第2节 剧场扩声系统的组成	375	第8节 吸声材料和吸声结构	436
一、剧场扩声系统的设计步骤	375	一、吸声材料种类	436
二、剧场扩声系统的组成	375	二、多孔吸声材料	437
第3节 厅堂扩声系统的要求和特性 指标	382	三、共振吸声结构	439
一、厅堂音质设计的一般要求	382	四、吸声材料的选择与布置	441
二、扩声系统特性指标	383	五、混响时间设计计算	442
三、声压级的计算	388	第9节 音响系统的配接与稳定性	444
		一、常用配接插头、插座和接线	444
		二、系统的配接考虑	446

三、音响调整	448	二、换色器的控制方式	497
四、扩声系统的声反馈抑制	449	三、直通（直放）回路	498
第 10 节 音质的主观评价	453	第 6 节 网络调光控制系统	499
一、主观听音的一般要求	453	一、网络化与 TCP/IP 协议	499
二、自然声的厅堂主观音质评价	454	二、灯光控制网络	500
三、扩声系统的主观评价方法	455	三、网络灯光控制系统的实现方案	503
四、音质的主观评价与技术指标的 关系	457	第 7 节 舞台灯光布光	505
第 12 章 舞台灯光及其工程设计	459	第 8 节 剧场舞台灯光系统的设计	512
第 1 节 光的基本性质	459	一、剧场舞台灯位布置	512
一、可见光	459	二、剧场舞台灯光系统设计示例	521
二、光的基本量	460	第 13 章 歌舞厅与 KTV 包房系统	537
三、色彩的视觉感受与联想	463	第 1 节 歌舞厅音响系统性能指标	537
第 2 节 舞台灯具	465	一、歌舞厅的声学特点	537
一、舞台灯具种类	465	二、歌舞厅音响系统的性能指标	537
二、电脑灯	474	三、歌舞厅建筑声学的一般要求	540
第 3 节 灯光控制与调光台	476	第 2 节 卡拉 OK 音响系统	541
一、电光源的种类与特性	476	一、卡拉 OK 及其特点	541
二、灯光控制的类型和方法	478	二、卡拉 OK 机及其系统	543
三、晶闸管调整	479	三、点歌器	546
四、调光控制系统	482	四、DJ 调音台	547
五、两种调光系统的接线方式	487	第 3 节 歌舞厅与包房系统的音箱 布置	549
六、数字调光台	490	一、立体声音箱的布置	549
第 4 节 电脑灯的控制	494	二、歌舞厅与包房音响系统的布置	552
一、电脑灯控制台	494	三、歌舞厅音响系统设计举例	555
二、电脑灯地址码的设置	494	第 4 节 歌舞厅灯光系统及其设计	559
三、电脑灯的连接	495	一、歌舞厅灯具	559
第 5 节 换色器工作原理与控制方式	496	二、歌舞厅灯光设计考虑	564
一、换色器的工作原理	496		

三、歌舞厅艺术照明等级的划分	568	一、IMAX 巨幕电影的技术要求	601
四、舞厅灯光设计	570	二、IMAX 影院示例	604
五、灯具编组和灯光控制台选用	573	第 4 节 数字电影院的视频放映系统	607
六、供配电及安装考虑	574	一、数字电影院的系统配置	607
七、抗干扰考虑	577	二、数字电影放映机及其产品举例	608
第 5 节 歌舞厅灯光系统设计示例	578	第 5 节 数字电影多声道环绕声技术	609
一、普通歌舞厅	578	一、数字电影多声道环绕声系统	609
二、迪斯科舞厅	581	二、杜比全景声和 Auro 3D 全景声	612
三、夜总会	582	三、中国巨幕 13.1 声道电影 立体声	620
第 14 章 数字电影院与 3D 电影	586	四、机柜内设备安装与连接	627
第 1 节 数字电影院	586	第 6 节 立体电影 (3D 电影)	628
一、数字电影院系统架构	586	一、立体显示的原理	628
二、数字电影院系统类型	588	二、3D 电影技术的发展	629
第 2 节 电影院的技术要求	589	三、影院 3D 放映系统	630
一、电影院的等级分类	589	第 7 节 立体显示技术	631
二、电影院观众厅的混响时间和 噪声控制要求	591	一、色分式立体显示	633
三、数字立体声电影的制式与技术 要求	592	二、时分式立体显示	634
四、数字立体声影院的扬声器布置	596	三、光分式立体显示	636
五、电影还音系统设计与示例	598	四、戴眼镜立体显示的优缺点	639
第 3 节 IMAX 巨幕电影	601	参考文献	641

第1章 声学基础

第1节 声音的基本性质

一、声音的产生与传播

声音产生于物体的振动。例如，讲话声音产生于喉管内声带的振动，扬声器（喇叭）发声产生于纸盆的振动，机械噪声产生于机械部件的振动等。我们把能够发出声音的物体称为声源。

声源发声后，还要经过一定的介质才能向外传播。例如扬声器发声，当外加信号使扬声器纸盆来回振动时，随之也使它邻近的空气振动起来。当纸盆向某个方向振动时，便压缩其邻近空气，使这部分空气变密；当纸盆向相反方向振动时，这部分空气变稀疏。邻近空气这样一疏一密地随着纸盆的振动而振动，同时又使较远的空气做同样的振动，空气这种一疏一密地振动传播的波叫做声波。声波的传播示意图如图 1-1 所示。声波以一定速度向四面八方传播，当声波传到入耳中时，会引起人耳鼓膜发生相应的振动，这种振动通过听觉神经，使我们产生声音的感觉。

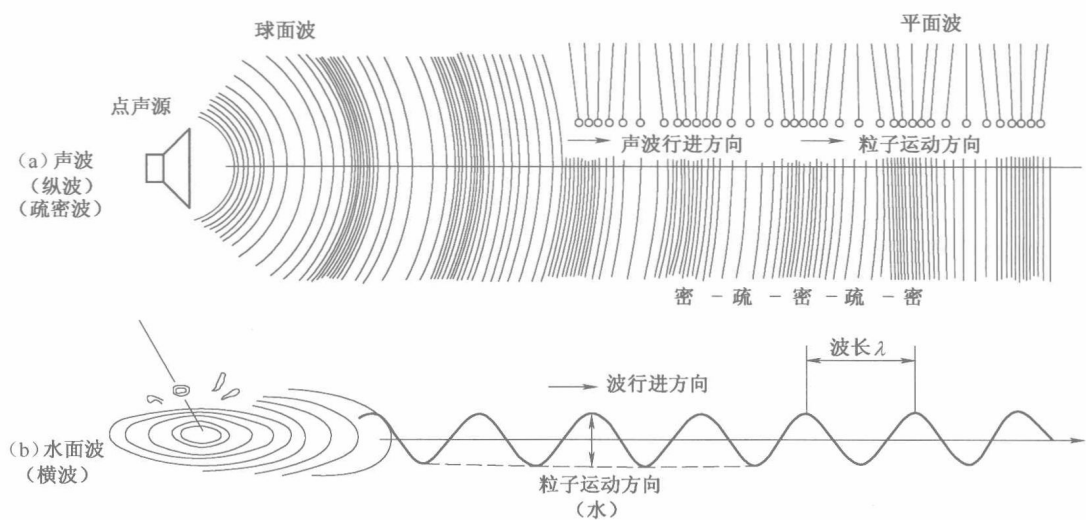


图 1-1 声波的传播示意图

由此可见，听到声音，要有三个基本条件。一是存在发声体或声源。二是要有传播过程中的弹性介质，例如空气，或者液体、固体的弹性介质；真空中没有弹性介质，所以真空不能传送声波；月球上没有空气，所以月球上是无声的世界。三是要通过人耳听觉才能感觉声

音产生。

声波的传播也可以用水面波作形象的比喻。把一石块投入平静的水中，水面上便可看到一圈圈的水面波，它由波峰和波谷这样高低起伏交替变化着向外传播。因为水面在波动，所以水面波带有能量。如果在水面上浮一很小的木块，就可以看到这一小木块随着水面波峰波谷做上下运动，待水面平静下来，木块则仍停留在它的原来位置。由此可见，水的质点本身并不沿着波动前进，而是水波动的能量从一部分水面到邻近的另一部分水面相继传递。这与声波在空气中传播时空气层并不跟随声音一块传播出去，而只是在平衡位置附近振动是相似的。所以说声波的传播，实际上是声波的能量随声波在传播。有声波存在的空间叫做声场。

但是，声波与水波也有不同，水面波的振动方向与波的传播方向相垂直，因此水波是一种横波。声波的传播方向与疏密相间振动方向是一致的，所以声波在空气中的表现形式是纵波。

由上述可见，振动和波动是互相密切联系的运动形式，振动是波动的产生根源，而波动是振动的传播过程。声音的本质是一种波动，因此声音也叫声波。为了清楚起见，通常把声的物理过程称为声波，而把与听觉有关的过程称为声音。

二、频率、波长与声速

声源完成一次振动所经历的时间称为周期，记作 T ，单位为秒（s）。1s 内振动的次数称为频率，记作 f ，单位为赫兹（Hz），它是周期的倒数，即 $f = \frac{1}{T}$ 。

声源的振动能产生声波，但不是所有振动产生的声波人们都能听得见，这是由于人耳特性决定的。只有当频率在 20~20000Hz 范围内的声波传到入耳，引起耳膜振动，才能产生声音的感觉。所以通常将频率在 20~20000Hz 范围内的声波叫做可听声。低于 20Hz 的声波叫做次声，高于 20000Hz 的声波称为超声。次声和超声都不能使人产生声音的感觉。

声波在介质中每秒传播的距离，叫做声波传播速度，简称声速，记作 c ，单位为米/秒（m/s）。声速不是质点振动的速度而是振动状态的传播速度，它的大小与振动的特性无关，而与介质的弹性、密度和温度有关。

声波的传播速度实质是介质分子向相邻分子作动量传递的快慢程度。显然，介质分子结构越紧密，内损耗特性越小，声速值就越大。例如，空气、水、钢铁的介质特性决定了它们的声速比值约为 1:4:12。由于温度与介质分子运动的活跃程度有密切的联系，所以当介质温度升高时，声速相应增大。以空气为例，声速 c 与温度 t 的关系可表示为

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (\text{m/s}) \quad (1-1)$$

式中， t 为空气温度（℃）； c_0 为 0℃ 时空气中的声速，等于 331.4m/s。对于通常的环境温度，即当 t 比 273 小得很多时，上式可简化为

$$c = 331.5 + 0.6t \quad (\text{m/s}) \quad (1-2)$$

由此可见，空气温度每增加 10℃，声速相应增加 6m/s。通常室温（15℃）下空气中的声速为 340m/s。

声源完成一周的振动，声波所传播的距离，或者说声波在传播途径上相位相同的两相邻

质点之间的距离叫做声波的波长，记作 λ ，单位为米（m）。因此，声速、频率和波长三者有如下的关系：

$$c = f\lambda \text{ 或 } c = \frac{\lambda}{T} \quad (1-3)$$

由于一定介质的声速为常数，故频率与波长为反比关系。例如，室温空气中频率 $f = 100\text{Hz}$ 的波长为 3.4m ， $f = 1000\text{Hz}$ 的波长为 0.34m 或 34cm 。

三、声波的反射与绕射

1. 几何声学

声波从声源出发，在同一个介质中按一定方向传播，在某一时刻波动所达到的各点包络面称为波阵面。波阵面为平面的波称为平面波，波阵面为球面的波称为球面波。由一点声波辐射的声波为球面波，但在离声源足够远的局部范围内，可以近似地把它看作平面波。

人们常用“声线”来表示声波传播的方向，声线的方向与波阵面垂直。用声线的观点来研究声波的传播称为几何声学。与之对应，用波动的观点来研究声学问题的称为物理声学。

2. 声波的反射

当声波在传播过程中遇到一块尺寸比波长大得多的墙面或障碍物时，声波将被反射。如声波发出的是球面波，经反射后仍是球面波。如图 1-2（a）所示，用虚线表示反射波，它像从声源 O 的映像——虚声源 O' 发出似的， O 和 O' 点是对称于反射平面的对称点。同一时刻反射波与入射波的波阵面半径相等。如用声线表示前进的方向，反射声线可以看作是从虚声源发出的。所以，利用声源与虚声源的对称关系，以几何声学作图法很容易确定反射波的方向。如同几何光学反射定律一样，声波反射的反射角等于入射角。

当反射面为曲面时，如图 1-2（b）、（c）所示，仍可利用声波反射定律求声波在曲面上的反射声线。例如，欲求曲面上某点的反射线，则以过该点的曲面的切面作为镜面，使其入射角等于反射角，即可确定反射声线。由图 1-2（c）可见，凸曲面对入射声波有明显的散射作用，它有助于声场的扩散均匀；而图 1-2（b）利用凹曲面反射的特点使声音会聚于某一区域或出现声焦点，从而造成声场分布的不均匀，这在室内音质设计中应注意防止。

3. 声波的绕射（衍射）

上述几何声学原理建立在与几何光学相似的基础上，即声音是沿直线传播的，但这种假设只限于反射面或障碍物以及孔洞的尺寸比声波波长大得多时才有效。当障碍物或孔洞的尺寸比声波波长小时，声波将产生绕射（又称衍射）或弯曲，即声波将绕过障碍物或通过孔洞改变前进方向，如图 1-3（a）所示。若孔洞尺寸（直径 d ）比声波波长 λ 小得多（ $d \ll \lambda$ ），声波通过孔洞则不像光线那样直线传播，而是能够绕到障板的背面改变原来的传播方向。这时小孔处的质点可近似看作一个新声源，产生新的球面波，而与原来的波形无关。平时我们在墙的一侧能听到另一侧的声音，也是声波绕射的结果。声源的频率越低，绕射的现象越明显；相反，频率越高，越不易产生绕射，因而传播也具有较强的方向性。

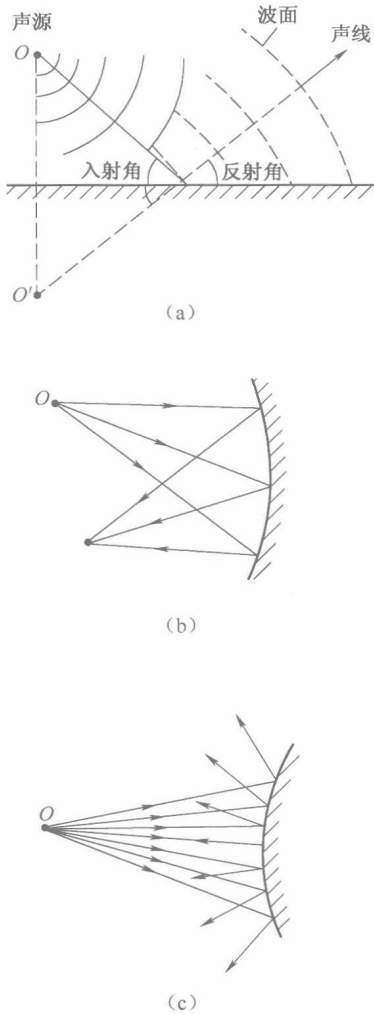


图 1-2 声波的反射

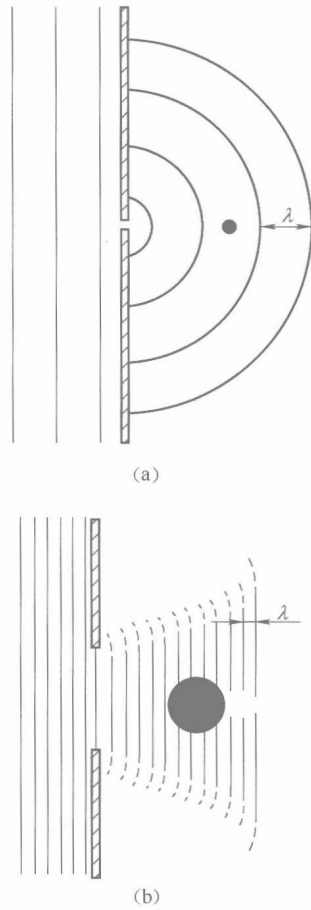


图 1-3 声波的绕射

4. 声波的折射

声波在传播途中遇到不同介质的分界面时，除了发生反射外，还会发生折射。声波折射后的传播方向将改变，如图 1-4 所示，相对于法线的入射角 θ_1 与折射角 θ_2 的关系如下：

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1-4)$$

式中， c_1 、 c_2 为两种介质的声速。

由式 (1-4) 可见，当 $c_1 > c_2$ 时， $\theta_1 > \theta_2$ ；当 $c_1 < c_2$ 时， $\theta_1 < \theta_2$ 。即声波从声速大的介质折射入声速小的介质中时，声波传播方向折向分界面的法线；反之，声波从声速小的介质折射入声速大的介质中时，声波传播方向折离法线。因此，声波的折射是由声速决定的，即使同一介质中如果存在着速度梯度（声速变化）时同样会产生折射。例如，户外广场演出时，大气中白天地面温度较高（暖空气），因而声速较大 [见式 (1-1)]，声速随离地面高度的增

加而降低,因而声传播方向向上弯曲,如图 1-5 (b) 所示,因此广场后面就不大有声音。反之,晚上地面温度较低(冷空气),因而声速较小,声速随高度的增加而增加,声传播方向就向下弯曲,如图 1-5 (a) 所示。这种现象可用来解释为什么声音在晚上要比白天传播得远些。

此外,风速也会影响声的传播方向,有风时实际声速是平均声速与风速的矢量相加。因此,当声波顺风传播时即从声速快向声速慢的方向折射,因此声传播方向向下弯曲,逆风时声传播方向则向上弯曲并产生声阴区(静区),如图 1-5 (c) 左边所示,这一现象可解释为什么从声源逆风传播的声音常常是难以听到的。

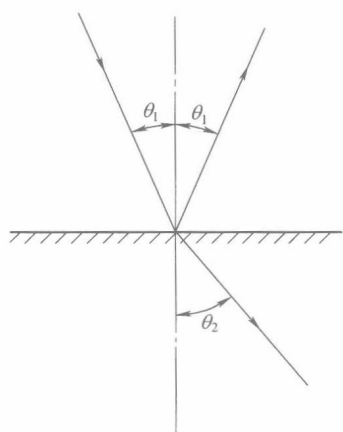


图 1-4 声波的折射

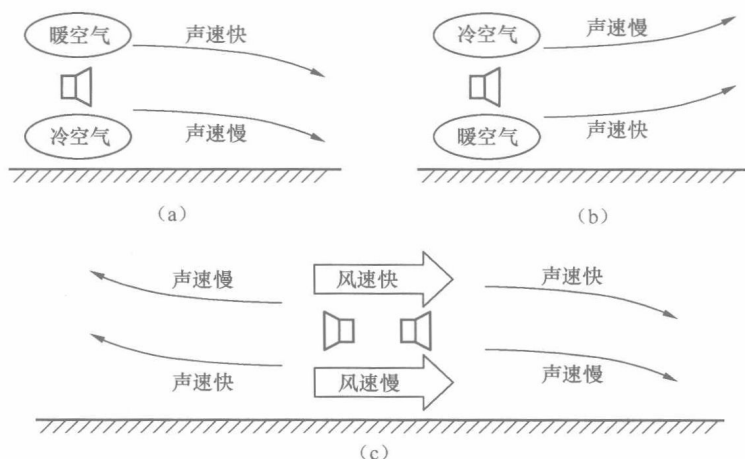


图 1-5 温度和风速对声传播的影响

四、声波的透射与吸收

当声波入射到墙壁等物体时,如图 1-6 所示,声能一部分被反射,一部分透过物体,还有一部分由于物体的振动或声音在物体内部传播时介质的摩擦或热传导而被损耗,这通常称为材料的吸收。

根据能量守恒定律,设单位时间内入射到物体上的总声能为 E_0 , 反射的声能为 E_r , 物体吸收的声能为 E_a , 透过物体的声能为 E_t , 则有

$$E_0 = E_r + E_a + E_t \quad (1-5)$$

透射声能与入射声能之比称为透射系数 τ , 即 $\tau = \frac{E_t}{E_0}$; 反射声

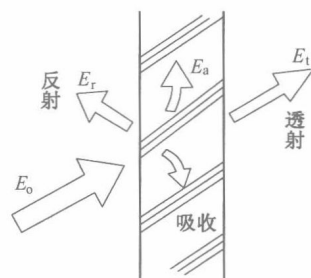


图 1-6 材料对声波的影响

能与入射声能之比称为反射系数 γ , 即 $\gamma = \frac{E_r}{E_0}$ 。通常将 τ 值小的材料称为隔声材料, 将 γ 值小

的材料称为吸声材料。实际上物体吸收的只是 E_a , 但从入射波与反射波所在的空间来考虑, 常用下式来定义材料的吸声系数 α :

$$\alpha = 1 - \gamma = 1 - \frac{E_r}{E_0} = \frac{E_a + E_t}{E_0} \quad (1-6)$$

$\alpha=0$ 时, 入射声能全部被反射; $\alpha=1$ 时, 入射声能全部被吸收。因此, α 值在 0~1 之间。如果说某材料的吸声系数 $\alpha=0.3$, 就是说 30% 的入射声能 E_0 被吸收了。 α 值越大, 吸声性能越好。吸声系数的大小除了与材料本身性质有关外, 还与声波的频率、入射方向等有关。一般来说, 坚实光滑的地面和墙面的吸声系数很小, 而多孔性 (通气) 的材料则是常用的高效吸声材料。通常, 多孔性材料吸声能力与材料厚度有关。厚度增加, 低频吸声增大; 但材料厚度对高频影响较小。从理论上说, 材料厚度相当于 $1/4$ 波长时, 在该频率下具有最大的吸声效果。但对低频来说, 这时材料厚度往往要在 10cm 以上, 故不经济。如果用较薄的多孔材料, 使它离开后背硬墙面一定距离, 则这时的吸声性能几乎与全部空腔内填满同类吸声材料的效果一样。

第 2 节 声音大小的量度

我们听到的声音大小, 除了与声源的频率有关外, 还与声音的强弱有关。声音的强弱可用声压、声压级、声强、声强级、声功率、声功率级等表示。

一、声压、声强和声功率

我们知道, 声波是由于空气分子的振动形成疏密波而传播的。若空气中没有声波, 空气中的压强即为大气压。当声波传播时, 某处的空气时疏时密地变化, 使压强在原来大气压附近上下变化, 相当于在原来大气压强上叠加了一个变化的压强, 这个叠加上去的压强就叫做声压, 记作 p 。声压采用帕 (Pa) 为单位, $1\text{Pa} = 10\mu\text{bar}$ (μbar 称微巴)。

由于声波是随时间疏密相间不断变化的。所以, 任一点的声压都是随时间而不断变化的, 亦即每一瞬时的声压 (称为瞬时声压) 可以是正值, 也可以是负值, 声压变化的平均值 (平均声压) 为零。通常所说的声压是指它的有效值, 它是指一段时间内瞬时声压的均方根值 (称为有效声压), 故它总是为正值。对于正弦形声波, 有效声压等于瞬间声压最大值 $p_{\max}$ 除以 $\sqrt{2}$, 即 $p = \frac{p_{\max}}{\sqrt{2}}$ 。

多大的声压能使人耳感觉到声音? 对于正常人耳, 当频率为 1000Hz、声压约为 0.0002Pa 时, 即可听到声音。这个刚刚能引起人耳听觉的声压叫做声音的可听阈。当频率为 1000Hz、声压约为 20Pa 时, 产生震耳欲聋的声音, 超过这一数值将使耳朵感到疼痛, 这个数值叫做痛阈。人们正常说话时的声压为 0.01~0.03Pa, 是大气压的千分之二三。

声波是能量传播的一种形式, 当然具有一定的能量。因此人们也常用能量的大小来表示声音的强弱。声源在单位时间内向外辐射的声能量叫做声功率, 记作 W , 单位为瓦 (W)。

声功率不应与声源的其他功率相混淆。例如, 电声系统中所用的放大器的电功率通常为几十瓦, 但扬声器的效率一般只有千分之几, 它辐射的声功率只有百分之几瓦。电功率是声源的输入功率, 而声功率则是声源的输出功率。

声功率与声压的区别在于, 一个是能量关系, 一个是压力关系。声功率与声压一样, 其范围很宽, 如轻声耳语的声功率只有 10^{-9}W , 一般人讲话的声功率也不过约 $20\mu\text{W}$, 而喷气