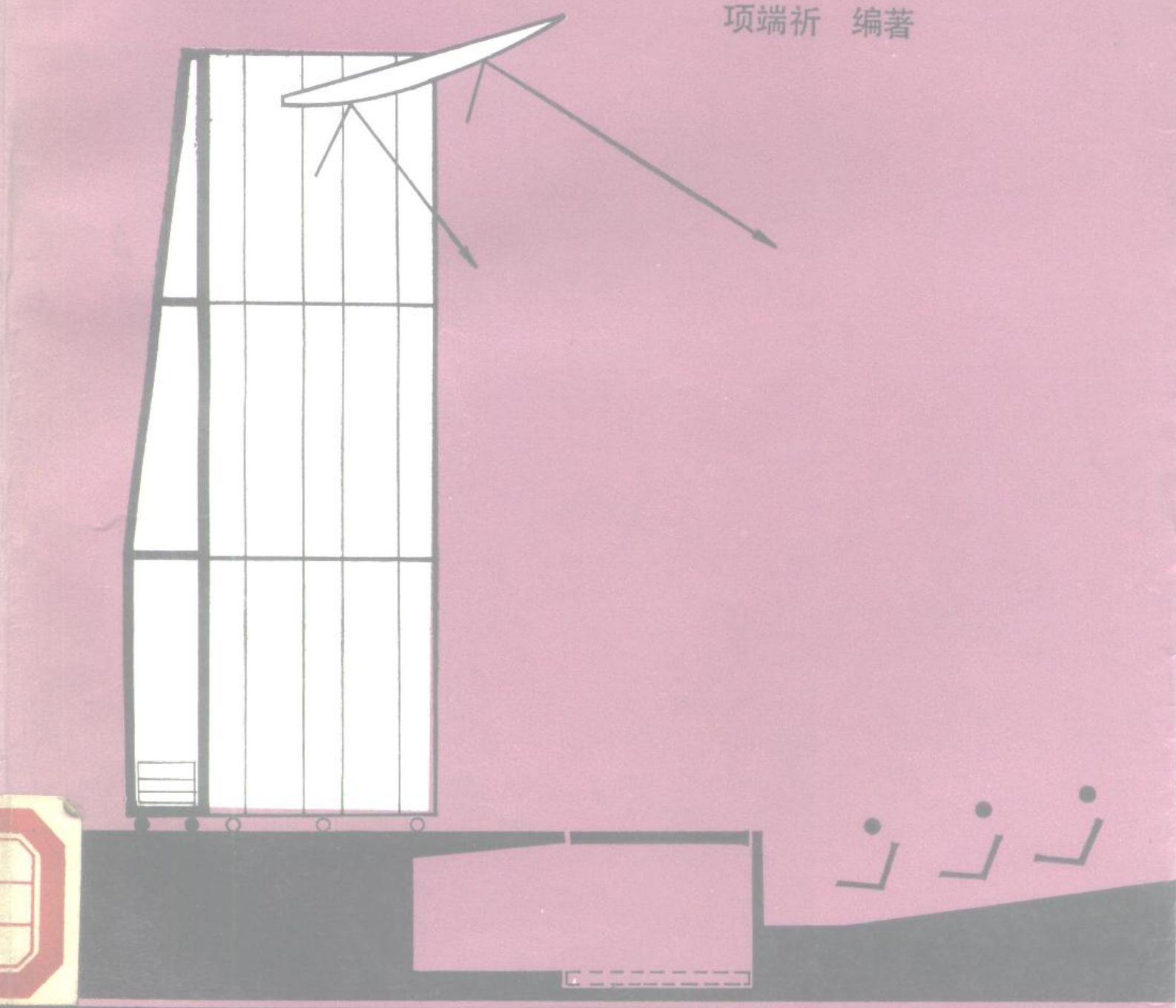


剧场建筑 声学设计实践

项端祈 编著



北京大学出版社

剧场建筑声学设计实践

项端祈 编著

北京大学出版社

内 容 简 介

本书是现代剧场声学设计实践活动的资料集。目的在于介绍近年来国内外剧场声学设计的现状和今后的发展趋势，以及为达到完美音质和提高经济、社会效益所采取的手段。此外，如何把声学设计与建筑艺术相结合，也是建筑师们最关心的问题。为此，本书仅对剧场声学设计的基本原理作概要的描述，而重点则是介绍各类剧场声学设计的实践活动。通过工程设计实例使设计人员在了解声学设计基本原理的同时，掌握为获得良好音质所运用的技术措施。

本书共设十章。第一、二章简述了剧场声学设计的基本知识和设计原理；第三、四、五章详尽地阐述了专业剧场和多功能剧场的声学设计和实践，介绍了102个剧场工程声学设计实例，其中包括话剧院、歌剧院、地方戏剧院、多功能剧场和可变声学条件的各类剧场，这是本书的重点；第六、七、八、九章简述了剧场建筑中的扩声设计、吸声材料的应用、噪声控制和声学测量。这些章节也是全面阐述剧场声学设计所不可缺少的组成部分，其中列举了18个工程设计实例。第十章概述了剧场改建中的声学设计准则。

本书对象为建筑设计人员、影剧场声控和舞台管理人员，以及文化艺术部门和演出公司的有关领导，对大专院校建筑系的师生也有参考价值。

剧场建筑声学设计实践

项端祈 编著

责任编辑：李采华

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092毫米 16开本 27.5印张 650千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷

印数：0001—4500册

ISBN 7-301-01340-X/TU·3

定价：17.75元

序

一

随着人民生活水平的提高，对丰富文化生活的需求更加迫切。近年来，无论在城市或村镇，建造各类剧场建筑的逐年增多。在村镇兴建较大容量的剧场屡见不鲜。但在剧场建筑大量建造过程中，由于缺乏切合国情的声学设计资料，而国内外已经取得的经验又未能系统地加以介绍，致使多数剧场普遍存在音质不良的状况，长期影响使用。

建国以来，建筑声学无论在理论和实践方面都有了很大的发展，有关建筑声学方面的书刊也很多，但多数是综合性的，目的在于全面地介绍建筑声学各个领域的基础知识，其中国外资料又占较大的比重。至今还没有一本能够充分反映我国几十年来剧场声学设计实践活动的专著。对此，根据我国的实际情况，在总结剧场声学设计实践经验的基础上，收集有关国外资料，编写一本剧场声学的书是十分急需的。

考虑到目前已经出版的声学书刊，基础知识已占有较大比重，而结合工程设计的内容太少。因此，本书将声学基础部分压缩至最低限度，侧重于剧场声学设计的实际工作，并列入大量的工程设计实例，供设计参考。

剧场声学设计，目前偏重于观众厅，忽视了舞台的声学效果，这是一种错误倾向，在实践中已经造成很多不良后果。众所周知，演与听是一致的，只有演得好，才能听得好，而演员（声源）处于舞台位置，如果舞台声学条件不佳，就会直接影响演员演出（自我感觉，掌握力度和平衡）和观众听闻效果。对此，本书将列入舞台声学设计一章，同样以大量实例加以阐明。

二

剧场建筑的类别很多，分类的方法也各不相同，但归纳起来不外乎有如下几种类别：

按剧场的用途和剧目，可分为专业剧场和多功能剧场两大类，前者包括话剧院、歌剧院和地方戏剧院等三类；后者则以某种主要用途而命名，如以音乐演出为主的多功能剧场，或以语言清晰度为主的多功能剧场等。

按剧场舞台的形式，可分为镜框式舞台剧场和伸出式舞台剧场两类；

按剧目演出的方式又可分为自然声演出和采用扩声演出两类；

如果从声学设计的要求分类，则各类剧场可分为以语言清晰和以音乐（唱词）丰满的音质要求两类。

由于剧场类别和演出方式不同，在声学设计的要求和建筑处理上也有较大的差别，本书将分别加以叙述。

考虑到我国剧场建筑绝大多数为多功能剧场，特别是从剧场经营中的经济效益出发，多功能剧场更有它的生命力。对此，本书将重点介绍笔者在多功能剧场声学设计方面的实践活动，以及国内、外有关的声学设计经验和发展趋向。

三

剧场建筑，它作为建筑技术与艺术的结合体，是由各专业共同协作完成的，建筑声学仅是其中的一个专业。因此，要使剧场达到完美的声学效果，必须通过各专业的密切结合，其中特别是与建筑师的协作是成败的关键。因此，声学工程师必须熟悉声学设计的各个环节、各种要求与专业的关系，并深入到工程设计的各个阶段中去（方案设计、初步设计、技术设计和施工图），并应在方案阶段就进入角色。

考虑到建筑声学设计至今还不能通过计算结果确保最后的音质效果，经验还占有相当的比重。因此，重视在施工过程中的调试和修正是必不可少的。实践证明：音质要求较高的厅堂，在施工（内装修）即将完工前进行声学测试和主观评价，然后进行修正是十分必须的。对此，本书将提示声学设计与各专业的关系，以及如何保证获得良好音质的各种实际手段。

四

在剧场声学设计中，至今对音质指标和主观评价标准还有争议。笔者通过几十年来在剧场声学设计中的实践活动阐述了自己的观点，但声学工程师们通常都强调自己的意图，这在本书所列举的大量实例中可以看到。对此，读者在运用这些资料时，应作出自己的抉择并根据用途、环境、要求创造性地进行剧场设计。

本书主要取材于北京市建筑设计院剧场声学设计的成果和国内外考察资料。而多数工程设计实例则是国内外同行们所做的工作，在国内的剧场调查中，本院王峰、陈金京和葛砚刚三位青年工程师协助笔者作了很多测定和调查工作；本书承同济大学王季卿教授、中科院声学研究所吕如榆教授审阅了部分章节，全书又蒙中科院学部委员、声学研究所马大猷教授的审阅，并提出了很多宝贵意见；王豫生同志整理和抄写了全部文稿，笔者谨此致谢。

由于时间和能力所限，本书难免有不当之处，望读者批评指正。

项端祈

1990年4月于北京市建筑设计研究院

目 录

第一章 剧场声学的基础知识	(1)
1.1 声的传播	(1)
1.1.1 声波.....	(1)
1.1.2 声速、波长和频率.....	(2)
1.1.3 声压.....	(3)
1.1.4 声强与声功率.....	(3)
1.1.5 反射与绕射.....	(4)
1.1.6 声波的干涉作用.....	(5)
1.2 级和分贝	(5)
1.2.1 声强级、声压级与声功率级.....	(6)
1.2.2 声强级、声压级、声功率级的叠加.....	(7)
1.2.3 电平.....	(7)
1.3 听觉特性	(8)
1.3.1 响度.....	(8)
1.3.2 音色.....	(9)
1.3.3 音调.....	(10)
1.3.4 双耳听闻效应(方位感).....	(11)
1.3.5 时间差和回声.....	(11)
1.3.6 掩蔽作用.....	(11)
1.4 语言和音乐	(12)
1.4.1 语言.....	(12)
1.4.1.1 语言清晰度.....	(12)
1.4.1.2 语言功率.....	(12)
1.4.1.3 典型的语言声级和演员对白时的声功率级.....	(13)
1.4.1.4 语言的频率范围.....	(14)
1.4.1.5 语言的方向性.....	(14)
1.4.2 音乐.....	(15)
1.4.2.1 音乐的物理特性.....	(15)
1.4.2.2 乐器和演唱的声压级.....	(15)
1.4.2.3 乐器和演唱声级的动态范围.....	(17)
1.4.2.4 演员演唱和乐器演奏时的声功率.....	(18)
第二章 剧场观众厅声学设计概述	(19)
2.1 音质评价标准	(19)
2.1.1 主观听音要求.....	(19)
2.1.2 客观的声学技术指标.....	(20)
2.2 观众厅有效容积的确定	(21)
2.2.1 保证足够的响度.....	(21)

2.2.2	确定合适的混响时间	(22)
2.2.3	室内声压级的计算	(23)
2.3	观众厅的体型设计	(23)
2.3.1	充分利用直达声	(23)
2.3.2	早期反射声的控制	(25)
2.3.3	消除厅内声学缺陷	(28)
2.4	观众厅的混响时间	(29)
2.4.1	最佳混响时间和混响频率特性的确定	(29)
2.4.2	混响时间的计算	(30)
2.4.3	混响时间的调试	(31)
第三章	专业剧场的声学设计与实践	(33)
3.1	专业剧场的声学设计概况	(33)
3.2	话剧院的声学设计	(33)
3.2.1	话剧院的规模(容量)	(34)
3.2.2	话剧院观众厅的体型	(34)
3.2.3	话剧院观众厅的混响时间及其频率特性	(39)
3.2.4	混响时间的控制	(39)
3.2.5	音质缺陷的防止	(42)
3.3	歌剧院的声学设计	(42)
3.3.1	歌剧院的规模(容量)	(42)
3.3.2	歌剧院观众厅的体型	(43)
3.3.3	歌剧院观众厅的混响时间及其频率特性	(45)
3.3.4	混响时间和音质缺陷的控制	(47)
3.3.5	乐池和伴唱队的声学处理	(47)
3.4	地方戏剧院的声学设计	(49)
3.4.1	地方戏剧院观众厅的规模	(49)
3.4.2	地方戏剧院观众厅的体型	(50)
3.4.3	地方戏剧院观众厅的混响时间及其频率特性	(50)
3.4.3.1	京剧院的混响时间及其频率特性	(50)
3.4.3.2	地方戏剧院的混响时间及其频率特性	(51)
3.4.4	混响时间和音质缺陷的控制	(52)
3.4.5	舞台声学的考虑	(52)
3.5	专业剧院声学设计实例	(53)
[3-1]	中央戏剧学院实验剧场 (北京)	(53)
[3-2]	上海戏剧学院实验剧场 (上海)	(55)
[3-3]	米尔沃基话剧院 (美国)	(57)
[3-4]	奥列维剧场 (英国)	(63)
[3-5]	北京歌剧院 (北京)	(63)
[3-6]	都灵歌剧院 (意大利)	(66)
[3-7]	肯尼迪艺术中心歌剧院 (美国)	(68)
[3-8]	悉尼歌剧院 (澳大利亚)	(70)
[3-9]	汉堡歌剧院 (德国)	(72)
[3-10]	林肯中心大都会歌剧院 (美国)	(75)

[3-11] 山东京剧院	(济南)	(78)
[3-12] 瑞金剧场	(上海)	(81)
[3-13] 山西晋剧院	(太原)	(83)
[3-14] 四川省川剧学校剧场	(成都)	(84)
[3-15] 大众剧场	(北京)	(88)
[3-16] 易俗社	(西安)	(89)
第四章 多功能剧场		(92)
4.1 概述		(92)
4.2 多功能剧场观众厅最佳混响时间及其频率特性的确定		(92)
4.3 剧场观众厅的听众吸声量		(94)
4.4 每座容积的确定		(96)
4.5 观众厅的体型设计		(98)
4.6 观众厅的声扩散		(102)
4.7 早期反射声		(106)
4.8 舞台声学设计		(107)
4.9 多功能剧场声学设计实例		(108)
4.9.1 以音乐演奏、歌舞剧演出为主的多功能剧场		(109)
[4-1] 红塔礼堂	(北京)	(109)
[4-2] 锦城剧场	(成都)	(109)
[4-3] 海淀影剧院	(北京)	(115)
[4-4] 民族文化宫礼堂	(北京)	(118)
[4-5] 安徽剧场	(合肥)	(121)
[4-6] 北方剧场	(哈尔滨)	(124)
[4-7] 北京音乐堂	(北京)	(125)
[4-8] 群众艺术宫剧场	(郑州)	(130)
[4-9] 杭州剧场	(杭州)	(133)
[4-10] 工人文化宫剧场	(哈尔滨)	(137)
[4-11] 台北文化中心剧院	(台湾)	(139)
[4-12] 农村公园“狼井”剧场	(美国)	(142)
[4-13] 阿拉斯加演艺中心大剧场	(美国)	(142)
[4-14] 东京文化馆剧场	(日本)	(144)
[4-15] 阿拉·马格挪剧场	(委内瑞拉)	(150)
[4-16] 荷兰舞剧院	(荷兰)	(152)
[4-17] 佩尔蒂埃剧场	(加拿大)	(152)
[4-18] NHK大厅	(日本)	(156)
[4-19] 伯尔尼大厅	(瑞士)	(157)
[4-20] 皇后剧院	(加拿大)	(159)
4.9.2 以会议、话剧和电影为主的多功能剧场		(161)
[4-21] 人大大会堂大礼堂	(北京)	(162)
[4-22] 河南大会堂	(郑州)	(164)
[4-23] 湖滨会堂	(太原)	(167)
[4-24] 军大礼堂	(北京)	(170)
[4-25] 教委礼堂	(北京)	(173)
[4-26] 青岛市大礼堂	(青岛)	(176)

[4-27] 友谊会堂	(苏州)	(176)
[4-28] 黑天鹅影剧院	(哈尔滨)	(176)
[4-29] 朝阳区文化馆剧场	(北京)	(182)
[4-30] 荔香剧场	(广州)	(183)
[4-31] 南湖影剧场	(沈阳)	(189)
[4-32] 二机厂文化宫礼堂	(包头)	(190)
[4-33] 辽阳剧场	(辽阳)	(190)
[4-34] 教工俱乐部	(天津)	(194)
[4-35] 新兴影剧场	(天津)	(196)
[4-36] 西湖影剧院	(福州)	(197)
[4-37] 新疆人民会堂大礼堂	(新疆)	(202)
[4-38] 二招礼堂	(成都)	(204)
[4-39] 山东高级法院审判厅	(济南)	(206)
[4-40] 铁路局俱乐部剧场	(哈尔滨)	(207)
[4-41] 全国总工会会议厅	(北京)	(209)
[4-42] 中华剧场	(沈阳)	(210)
[4-43] 东郊宾馆礼堂	(济南)	(210)
[4-44] 历山剧场	(济南)	(218)
4.9.3 以地方戏演出为主和无明确主要用途的多功能剧场		(218)
[4-45] 台湾大戏院	(福州)	(221)
[4-46] 中兴剧场	(上海)	(224)
[4-47] 开明大戏院	(苏州)	(227)
[4-48] 中州剧场	(郑州)	(230)
[4-49] 南市剧场	(上海)	(233)
[4-50] 滨海影剧院	(上海)	(236)
[4-51] 郫县剧场	(成都)	(239)
[4-52] 青少年宫影剧院	(郑州)	(242)
[4-53] 漓江剧场	(桂林)	(245)
[4-54] 展览馆剧场	(哈尔滨)	(247)
[4-55] 铁路局俱乐部礼堂	(南昌)	(249)
[4-56] 东风剧场	(西安)	(249)
4.9.4 可变声学条件的多功能剧场		(254)
[4-57] 良乡剧场	(北京)	(255)
[4-58] 松本市音乐文化厅	(日本)	(258)
[4-59] 基奇纳市多功能大厅	(加拿大)	(258)
[4-60] 国立年会中央会馆剧场	(日本)	(263)
[4-61] 札幌教育和文化中心大厅	(日本)	(266)
[4-62] 奥尔胡斯·斯卡拉剧场	(丹麦)	(266)
[4-63] 东京调频广播台大厅	(日本)	(270)
[4-64] 北京市工人俱乐部(新)	(北京)	(273)
[4-65] 中新田町文化馆大厅	(日本)	(277)
[4-66] 香港演艺学院大剧场	(香港)	(278)
[4-67] 中国大百科编译楼报告厅	(北京)	(282)
[4-68] 埃森剧场	(德国)	(286)
[4-69] 浦和市文化馆大厅	(日本)	(286)
[4-70] 巴塞尔国家剧院	(瑞士)	(290)

[4-71] 高知县文化馆剧场	(日本)	.....	(291)
[4-72] 埃德温·托马斯艺术厅	(美国)	.....	(294)
[4-73] 阿拉斯加演艺中心“发现剧场”	(美国)	.....	(298)
[4-74] 奥兰治县表演艺术中心剧场	(美国)	.....	(299)
第五章 多功能剧场舞台音乐罩		.....	(302)
5.1 舞台音乐罩的声学功效		.....	(302)
5.2 舞台音乐罩的沿革		.....	(303)
5.3 舞台音乐罩的类型		.....	(305)
5.3.1 固定转动式音乐罩		.....	(306)
5.3.2 折叠式音乐罩		.....	(307)
5.3.3 立柜式、塔式音乐罩		.....	(307)
5.3.4 顶部反射板		.....	(308)
5.3.5 轻便式拼装单元音乐罩		.....	(308)
5.4 我国多功能剧场舞台音乐罩的设计概况		.....	(310)
5.5 舞台音乐罩的声学设计准则		.....	(315)
5.6 舞台音乐罩与升降乐池		.....	(316)
5.7 舞台音乐罩设计实例		.....	(319)
[5-1] 民族文化宫礼堂音乐罩	(北京)	.....	(320)
[5-2] 红塔礼堂音乐罩	(北京)	.....	(322)
[5-3] 海淀影剧院音乐罩	(北京)	.....	(322)
[5-4] 锦城剧场音乐罩	(成都)	.....	(327)
[5-5] 江东公会堂音乐罩	(日本)	.....	(329)
[5-6] 固本江大厅音乐罩	(葡萄牙)	.....	(330)
[5-7] 尤林大厅音乐罩	(美国)	.....	(331)
[5-8] 东京NHK大厅音乐罩	(日本)	.....	(332)
[5-9] 卡尔·马克思城市大厅音乐罩	(德国)	.....	(333)
[5-10] 耶尔特尼斯大厅音乐罩	(挪威)	.....	(334)
[5-11] 尼札华尔柯特厅音乐罩	(墨西哥)	.....	(335)
[5-12] 纽约长岛大学音乐剧场音乐罩	(美国)	.....	(337)
[5-13] 北京体育馆音乐演奏声屏障	(北京)	.....	(338)
第六章 剧场观众厅的扩声设计		.....	(340)
6.1 传声器的选择和使用		.....	(340)
6.1.1 灵敏度		.....	(341)
6.1.2 电噪声		.....	(341)
6.1.3 频率响应		.....	(341)
6.1.4 指向特性		.....	(342)
6.1.5 失真		.....	(344)
6.1.6 传声器的布置和使用		.....	(346)
6.2 扬声器和声柱		.....	(346)
6.2.1 扬声器的技术特性		.....	(347)
6.2.2 扬声器的指向性和布置		.....	(349)
6.2.3 声柱		.....	(352)
6.2.4 声柱的使用		.....	(357)

6.3	扬声器布置实例	(358)
6.3.1	无楼座中小型厅堂	(358)
6.3.2	有楼座的大型厅堂	(359)
6.4	扬声器和放大器电功率的确定	(361)
6.5	电声扩声系统的基本要求	(362)
第七章	剧场建筑中吸声材料(结构)的应用	(363)
7.1	概述	(363)
7.2	多孔性吸声材料	(363)
7.3	共振吸声结构	(372)
7.3.1	薄板共振吸声结构	(372)
7.3.2	亥姆霍兹(Helmholtz)共振吸声器	(373)
7.3.3	穿孔板共振吸声结构	(374)
7.3.4	开缝板共振吸声结构	(374)
7.3.5	微穿孔板共振吸声结构	(379)
7.4	空间吸声体	(380)
7.5	各类吸声材料(结构)的吸声系数	(385)
7.5.1	常用饰面材料和听众、座椅的吸声系数	(385)
7.5.2	多孔吸声材料	(386)
7.5.3	共振吸声结构	(389)
7.5.4	穿孔吸声结构	(390)
7.5.5	开缝板吸声结构	(391)
7.5.6	半圆切柱吸声结构	(392)
7.5.7	玻璃棉板空间吸声体	(394)
第八章	剧场建筑中的噪声控制	(398)
8.1	概述	(398)
8.2	剧场建筑各用房的允许噪声标准	(398)
8.3	剧场建筑中的噪声控制	(400)
8.3.1	总平面配置	(401)
8.3.2	毗连房间的噪声	(401)
8.3.3	围护结构的隔声	(402)
8.3.4	空调制冷设备的消声与隔振	(404)
8.4	噪声控制资料	(405)
8.4.1	围护结构的隔声资料	(405)
8.4.2	“声闸”隔声资料	(411)
第九章	剧场观众厅的声学测量	(413)
9.1	概述	(413)
9.2	剧场观众厅的声学测量	(413)
9.2.1	混响时间测量	(413)
9.2.2	声场分布测定	(413)
9.2.3	脉冲响应测量	(414)
9.2.4	声扩散测量	(414)

9.2.5	频率响应测量	(415)
9.2.6	噪声测量	(416)
9.3	厅堂音质的缩尺模型试验	(416)
9.3.1	缩尺模型试验的目的和内容	(416)
9.3.2	模拟条件	(416)
9.3.3	使用仪器和测量记录	(417)
9.4	中国实验话剧院观众厅的缩尺声学模拟试验	(418)
9.4.1	概述	(418)
9.4.2	观众厅缩尺模型的设计和制作	(419)
9.4.3	实验话剧院观众厅的缩尺模型试验	(419)
9.4.4	缩尺模型测量结果的分析和对施工图的修正	(421)
第十章	剧场改建工程中的声学设计	(423)
10.1	概述	(423)
10.2	剧场改建中声学设计的几种类型	(423)
10.3	北京地区剧场改建的现状	(424)
10.4	剧场改建中声学设计准则	(425)
参考文献		(426)
剧场实例的设计单位和建筑图纸来源		(427)

第一章 剧场声学的基础知识

无论是从事厅堂的声学设计，或是为了与声学工作者进行合作，首先应了解声的传播、计量、人的听觉特性以及主观评价等方面的知识。

1.1 声的传播

1.1.1 声波

声音来源于物体的振动。例如人的发声是由声带振动引起，扬声器发声则产生于扬声器膜片的振动。通常把正在发出声音的发声体称为声源。声源在空气中振动时，使邻近的空气随之产生振动并以波动的方式向四周传播，当传至人耳时，将引起耳膜振动，最后通过听觉神经产生声音的感觉。

声波，振动在空气中的传播。为分析振动在空气中的传播过程，可以活塞的振动为例。设在一无限长的圆管内配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。

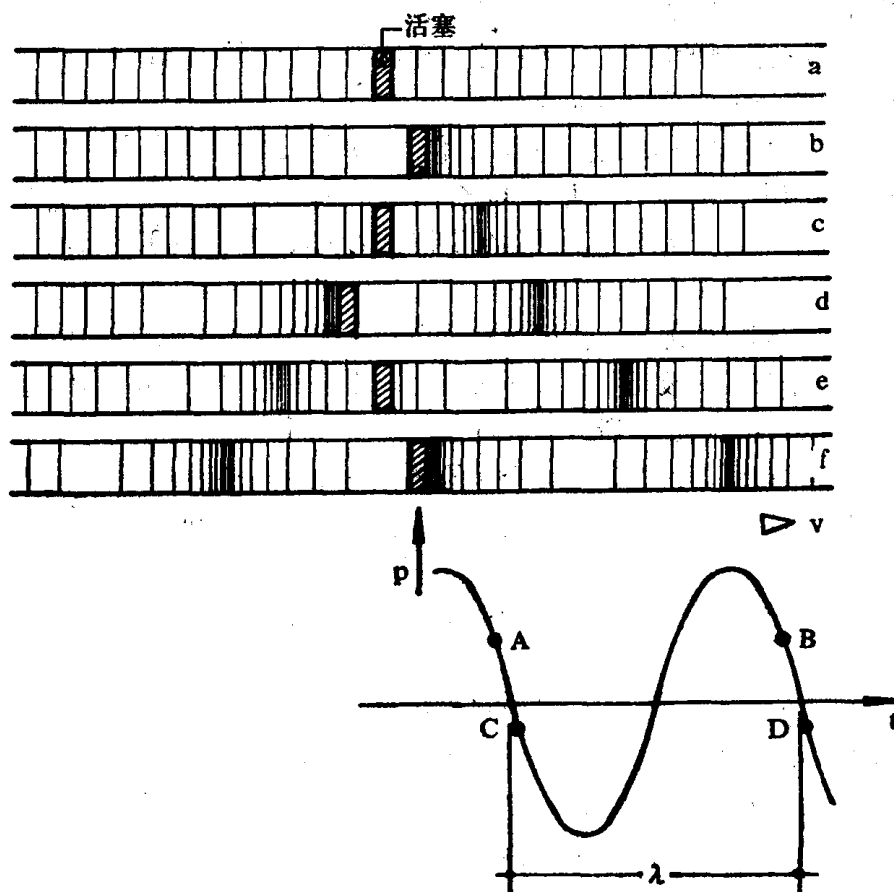


图1.1 - 声波的产生

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，具有一定的位能，而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，紧挨活塞左侧的质点层由于活塞向右移动而变得稀疏。同样，这一稀疏层也逐渐向左传播，见图1-1a、b；下一时刻，当活塞作相反方向运动时，它的左侧出现密集质点层，右侧则出现稀疏层，见图1-1c、d。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。

应该指出，空气质点只是在其平衡位置附近振动，并非随疏密波一直向外移动。

声波在空气中的传播属于纵波，即空气质点的振动方向和波的传播方向平行。

1.1.2 声速、波长和频率

● 声速：声波在弹性介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、密度和温度有关。

在空气中，声速与温度的关系如下：

$$c = 331.4 \left(1 + \frac{Q}{273} \right)^{1/2} \quad (1-1)$$

式中 Q 为空气温度 ($^{\circ}C$)。在常温下，空气中的声速约为 $340m/s$ 。

● 波长：声波在传播的路径上，两相邻同相位质点之间的距离或相邻两波峰（谷）之间的距离称为波长，记作 λ ，单位是 m 。

● 频率：每秒内振动的次数称频率，记作 f ，单位是 Hz ，1周/秒即为 $1Hz$ 。

人耳可听到的频率范围很广，从 $20Hz$ 至 $20000Hz$ ，但一般都小于上述范围。随着年龄的增加，上限频率下降得更为明显，例如40岁以上的人能听到 $16000Hz$ 以上的声音就很少。此外，它还与人的健康状况有关。

声音可以是单个频率的纯音，但绝大多数声音是由多个频率组合的复音。日常生活中遇到的音乐、语言或噪声大多数是复音。而任何复杂的声音都可以看作是几个或许多个频率和振幅都不相同的简谐波的叠加，所以复音可以用仪器进行分解。

声音的频率范围很宽，但在剧场观众厅的声学设计中，一般仅考虑从 $63Hz$ 至 $6300Hz$ 的覆盖频率，在以语言清晰度为主的大厅内只考虑从 $125Hz$ 至 $4000Hz$ 的六个倍频带的中心频率。

习惯上把 $200 \sim 300Hz$ 以下的频率称作低频， $500 \sim 1000Hz$ 为中频； 2000 或 $4000Hz$ 称为高频。

目前通用的一种划分频段的方法是按频率每加一倍作为一个频程或频带，这和音乐中的八度音有相同的意思。当然，也可以根据需要划分得更细一点，图1-2即为国际上统一的每倍频程的上限和下限频率。为了简便起见，常用它们的中心频率来代表某一频段范围。

声速 c ，波长 λ 和频率 f 有以下关系：

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

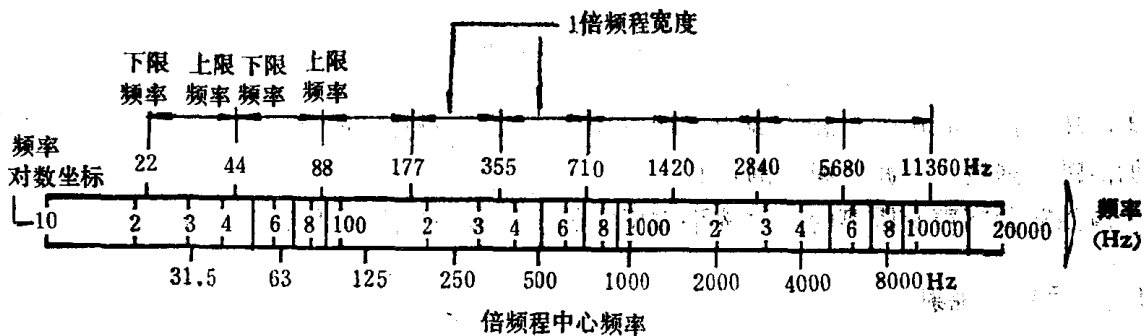


图1-2 频率的对数坐标和倍频程划分

式中 T 为周期，它是频率 f 的倒数，即 $T = 1/f$ ，也即振动一次所需的时间。

一些典型频率的波长列于表1-1。

表1-1 一些典型频率的波长

频率 f (Hz)	说明	波长 λ (m)
63 (或 100)	声学工程中的一般低频频率	5.4 ~ 3.4
440	音乐中的标准音调	0.77
1000	声学工程中的标准参考频率	0.34
4000	钢琴的最高音阶	0.085

1.1.3 声压

由声波引起的压强变化称为声压，记作 p ，单位是帕 (Pa, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$) 或微巴 (μb , $1\mu\text{b} = 1\text{dy}/\text{cm}^2$, $1\text{N}/\text{m}^2 = 10\text{dy}/\text{cm}^2 = 10$ 微巴)。声压的大小决定声音的强弱。声压 p 实际上是随时间而迅速起伏变化的，但人耳感觉不出声压的这种起伏。声音强弱只同迅速变化的声压 (又称瞬时声压) 的某种时间平均值有关，这种声压的平均值称之为有效声压。通常说的声压即指有效声压而言。

声压与大气压相比，一般是很小的，例如200微巴的声压，几乎是听觉的最高极限，但它仅是大气压的万分之二左右。人们正常说话时，离开嘴唇0.5米处的声压大约是1微巴，它只有大气压的百万分之一左右。声压低至0.0002微巴是人耳所能听到的最低限度了。这一最低极限常称为可听阈。由此可见，人耳能听到的声压范围很广，从0.0002微巴至200微巴，其间相差一百万倍。

1.1.4 声强与声功率

声源在单位时间内向外辐射出的总声能称为声功率，记作 W ，单位是瓦、毫瓦或微瓦 ($1\text{瓦} = 1000\text{毫瓦} = 1,000,000\text{微瓦}$)。

声强是指垂直于传播方向每单位面积上所通过的平均声功率，记作 I ，单位是 W/m^2 ，声源均匀地向四周辐射声能时，称球面辐射，围绕声源半径 r (m) 处的球面上 (球面积 $S = 4\pi r^2$) 的声强 I 为

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} (\text{W/m}^2) \quad (1-3)$$

因此，球面声源的声强 I 和声源的声功率 W 成正比，而与离开声源的距离平方成反比，即距离加倍时，强度 I 就减至原来的 $1/4$ 。

声强随着离声源距离的增加按平方反比的规律减小称之为“平方反比定律”。

1.1.5 反射与绕射

声波在传播过程中遇到墙等不同介质时，波速将发生突变，在波速突变的分界面上，入射波的一部分被反射而形成反射波，这种现象称波的反射。按几何声学原理，它遵守如下法则：

1. 声音在同一介质内按直线方向前进；
2. 两条声线相交后，各自仍按原来方向前进；
3. 当反射面尺寸比波长大得多时，声线的反射按入射角等于反射角的方向前进。

声波从平坦的表面反射时，它的反射波仍为球面波，如图1-3(a)所示，图1-3(b)、(c)分别为声波在凹形、凸形球面上的反射，很明显凸面的反射使声波扩散；凹面的反射使声波集中，它容易引起声的聚焦和回声。

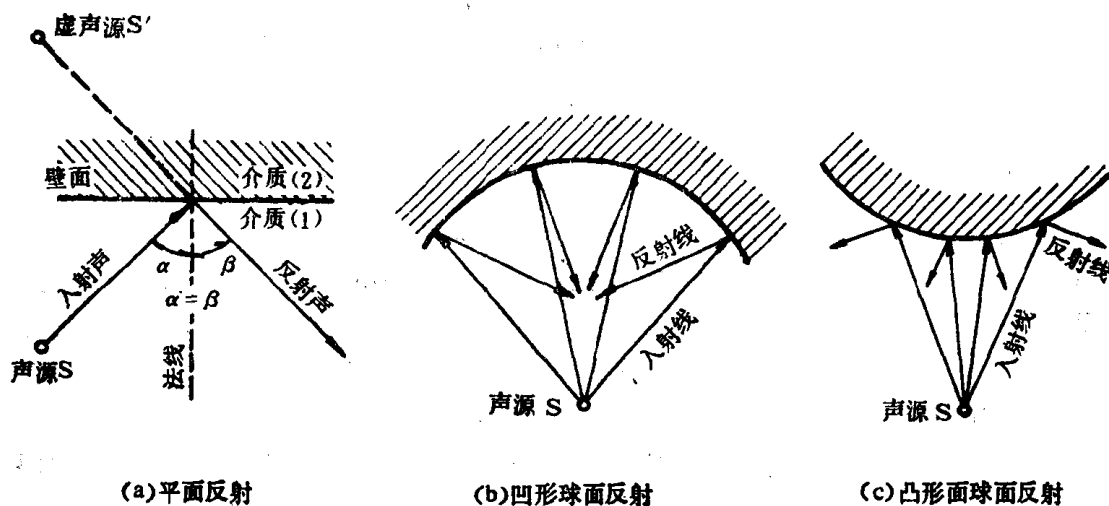


图1-3 声波的反射

回声是反射声中的一个特殊现象。凡是人耳可以清晰地分辨出反射声是原来声音的重现称为回声，厅堂设计中出现回声将成为严重的音质缺陷。

出现回声的第一个条件是直达声与反射声之间的声程差大于 17m ，相应的时差大于 50ms ($1\text{s} = 1000\text{ms}$)；另一个条件是强度差，即反射声的声压级大于厅堂内其它反射面的声压级。

当声波遇到障碍物或孔洞，其大小比声波波长大得多时，可认为声波仍沿直线传播，由于障碍物的反射作用，在障碍物后面形成一个“声影区”，见图1-4所示。障碍物或孔洞的大小比声波波长小得多时，则声波不是沿直线传播，而是绕过障碍物或孔洞，达到按直线传播时要成为“阴影”的地方，这种现象称为波的绕射或衍射。

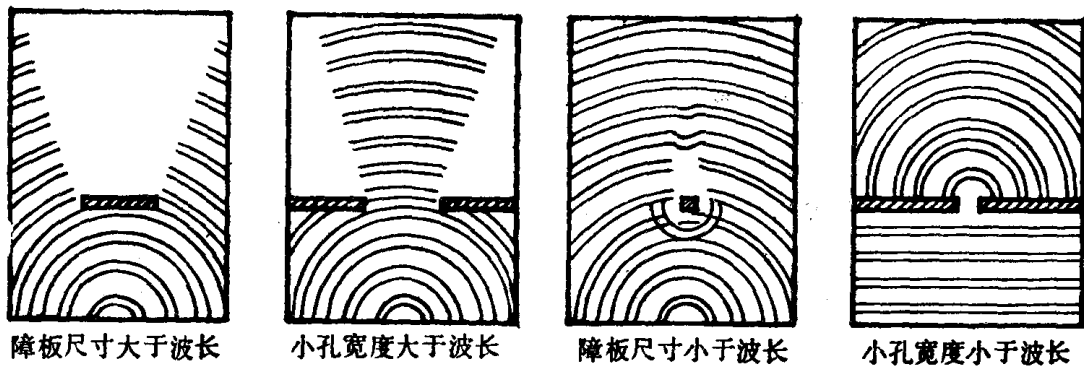


图1-4 声波的绕射现象

1.1.6 声波的干涉作用

当具有相同频率、相同相位的两个波源所发出的波相遇叠加时，在波重叠的区域内某些点处，振动始终彼此加强，而在另一些位置，振动始终互相削弱或抵消，这种现象称为波的干涉，见图1-5所示。

在观众厅内通常会出现声干涉现象。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，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，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”引起干涉的条件。因此，在大型观众厅内，干涉现象就不那么严重。只有在小室内，如录音、播音、监听和琴室等小房间需特别注意这一问题。

1.2 级和分贝

在声学工程中，通信和广播技术中，有一个常用单位——分贝（dB），用它来表示声音和电信号的相对强弱，例如声压和电压、声功率和电功率的放大（增益）或减小（衰减）的倍数等，以使运算变得更方便一些。在特定条

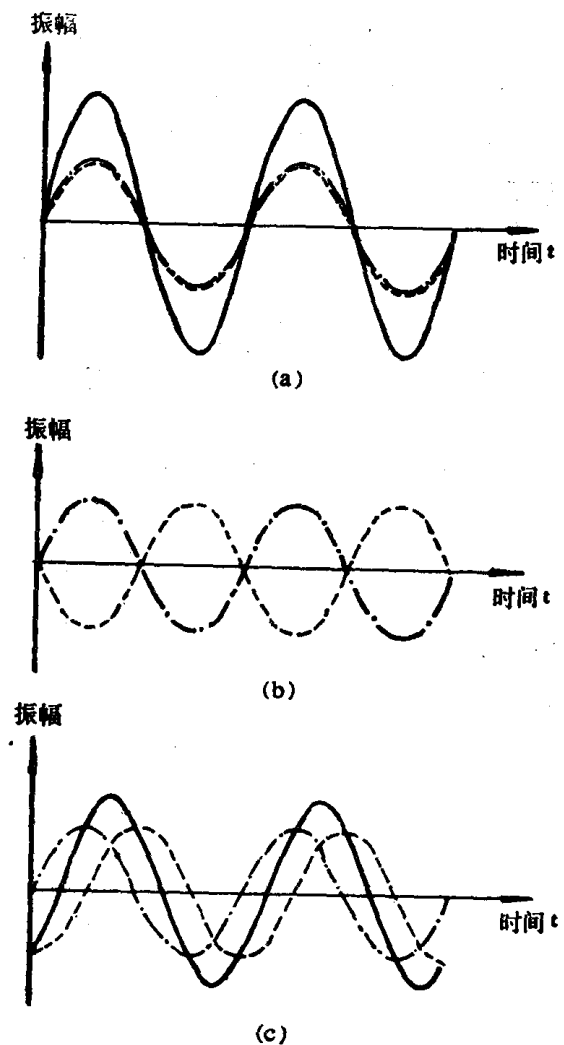


图1-5 声波的干涉
(a) 同相位的叠加 (b) 反相位的减弱或抵消
(c) 不同相位时既有加强又有减弱