

建筑厅堂音质设计

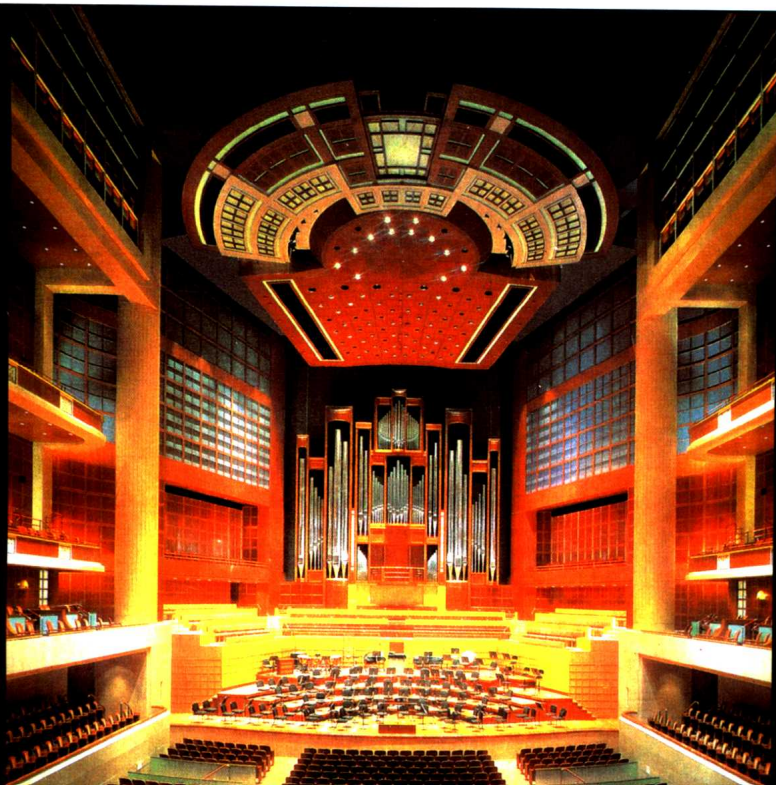
王季卿 著

21

迈向 21 世纪建筑技术丛书

TOWARDS THE 21ST ARCHITECTURAL TECHNIQUE

2.4



● 迈向 21 世纪建筑技术丛书

建筑厅堂音质设计

天津科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑厅堂音质设计 / 王季卿著. — 天津: 天津科学技术出版社, 2001. 1

(迈向 21 世纪建筑技术丛书)

ISBN 7-5308-2787-1

I. 建… II. 王… III. 建筑-音质-声学设计

IV. TU112.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 20479 号

责任编辑: 丁文红

版式设计: 雒桂芬

责任印制: 王 莹

天津科学技术出版社出版

出版人: 王树泽

天津市张自忠路 189 号 邮编 300020 电话 (022) 27306314

天津新华印刷二厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.5 字数 227 000

2001 年 1 月第 1 版

2001 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1-1 000

定价: 25.00 元

丛 书 前 言

21 世纪的中国新建筑,不仅要求在造型艺术上具有创新的时代气息,还应在功能上提供更舒适方便、美观协调和身心健康的生活和工作环境。这一切都应以人为本,充分地体现出对人的深切关怀。建筑技术科学便是为这方面服务而发展起来的,其作用日益显著。例如,人们在建筑中的活动和行为,乃至一桌一椅的尺度都离不开人体工效学的研究;生活和工作中处处存在着与听觉、视觉和体觉等有关的声学、光学和热学环境问题,并涉及一系列环境心理学和工程技术课题需要处理和解决。建筑技术科学是提高建筑现代化程度和水平的基本内容和重要方面。

建筑技术科学还很年轻,在国内更是起步较晚。在建筑现代化进程中开始受到业主和设计师们的重视,但是这种认识还远远不够普及和深化。建设部窦以德高级工程师有感于此,组织我校建筑技术科学专业教师编写这一丛书,并推荐天津科学技术出版社编辑出版。在该社责任编辑丁文红女士的积极支持和配合下,丛书将于近期陆续出版,也算是同仁们对跨入新世纪建筑事业的献礼。希望此丛书能对建筑师和从事室内设计、规划设计等工程技术人员的 design 工作有所参考和帮助,也可为建筑和城规专业的大学生、研究生进修提供参考读物。

王季卿 于同济大学建筑城规学院

1999 年 9 月

序

提起建筑声学,大家便会联想到那个简单明了的混响公式:大厅的混响时间与它的容积成正比,与厅内总吸声量成反比。混响时间被用来作为评价大厅音质的重要参量已有上百年的历史,它与人们的主观感受有密切联系,这是19世纪末赛宾在建筑声学上的重大贡献,至今仍然是音质设计的主要依据。

近数十年来,建筑声学不仅在理论和实验技术方面进步很快,而且在工程实践上也积累了大量正反两个方面的经验。在不断总结经验的基础上,人们认识到除了混响时间作为评价室内声场衰变过程总趋势之外,还需要考察衰变过程中的结构细节。例如,在相同室内混响时间情况下,直达声以后的早期衰变阶段中,为数有限的反射声的强度和到达时间所组成的序列如有不同,或是这部分早期反射声能在整个接收声能中所占的比率不同(或者说它与后期声能之比值不同),都会影响到室内的听音效果,于是也成为评价室内音质的重要参量。20世纪60年代以后,人们还发现在音乐厅中,这些早期反射声到达听者的方向不同,会造成两耳间听觉上的差异,对于听音的“环绕感”以及展宽声源(大型乐队的“视在宽度”)息息相关,这正是音乐厅能赋予现场听众的一种特有感受,也是当今音乐厅设计中的又一项重要品质要求。正因为早期反射声与大厅形体、室内吸声和反射表面的分布方式、以及声源和听者所在位置等均有

关系,因此建筑设计在许多方面会直接影响到大厅音质,其相互关系甚为密切。

20世纪50年代以后,厅堂音质设计已从单一参量发展到多项参量,因此考核厅堂设计的声学效果要从多方面来考量。这些参量既有独立的方面,也有相互影响的方面。而且由于实现这些指标可有不同的设计措施,这就赋予建筑设计者以丰富的创作余地。因此建筑师们如能充分掌握声学设计的一些基本原则,便可应付裕如,有根有据地刻意创造设计新颖的厅堂。世界上已有不少这方面成功的实例,充分体现了建筑和声学、技术和艺术达到很高水平的结合。

有时为了满足声学上所提出的新的特殊要求,建筑设计者则利用其丰富的想象力,创造出一个又一个新颖别致的设计,从而产生卓越的建筑造型与音质效果。另有一种情况是,出于建筑上某种需要而采用了一些原本声学上不利的方案,如能通过声学家的努力而突破困境,也会促使声学技术上的进步。可见两者有着相辅相成的关系。

声学 and 建筑设计固然都应该在科学的基础上不断地发展,但也要认识到厅堂音质设计还有艺术创作的任务。不能因袭守旧。希望本书介绍的内容,能有助于启发设计者的创作能力。

马大猷院士最近说得好:一座厅堂要达到良好音质要求,“需要水平最高的建筑师与声学家的密切合作,创造性地发挥最高水平。建筑师要懂一些声学并尊重声学家,声学家要懂一些建筑并尊重建筑师。”“我国建筑设计是很有水平的,只是过去把音质设计看得太容易了,不需要或不欢迎高水平的声学家参与。这种情况在西方也有。并造成了不少损失。只是在我国更突出罢了。”这些话非常中肯。(见“声学和生活质量”一文,载《声学技术》1999年3期,98~102页。)

我们应该看到室内音质还有许多未被认识的问题。例如我

们常常说到厅堂音质中声扩散的重要性,但是迄今还不知道用什么参量去说明,也不知道在不同声扩散条件下主观感受上的差别,故目前只能停留在定性的描述和要求。在某些方面说,厅堂音质设计还是年轻的科学,不少理论和实际问题有待进一步探索和研究。

本书许多插图由莫方朔和祝培生两位协助绘制,书稿由钱慧敏和陈洁文两位协助整理打印,作者对他们的辛勤工作和配合表示衷心感谢。

王季卿识于同济大学声学研究所

1999年9月

目 录

第一章 室内音质设计评价参量	(1)
1.1 混响时间	(1)
一、定义	(2)
二、主观和客观混响时间	(3)
三、早期衰变时间 <i>EDT</i>	(5)
四、最佳混响时间	(6)
1.2 早期反射声	(10)
一、单个早期反射声的作用	(10)
二、早期声场的增涨过程	(13)
三、早后期声能比	(15)
1.3 响度和相对强感	(19)
1.4 噪声限值	(27)
1.5 音质综合评价	(29)
1.6 评价方法的探讨	(33)
第二章 形体设计	(38)
2.1 声线作图原理及应用	(38)
2.2 平面设计	(41)
一、侧墙形状	(42)

二、梯田式平面	(43)
三、圆形平面	(45)
2.3 剖面设计	(49)
一、地面升起	(49)
二、台口	(51)
三、顶棚形状	(53)
四、弧形顶棚	(55)
2.4 侧墙	(58)
2.5 后墙	(59)
2.6 眺台	(60)
2.7 浮云式吊顶	(63)
2.8 形体的综合定量分析	(66)
2.9 小厅室的比例和形状	(74)
第三章 吸声处理	(76)
3.1 多孔性吸声材料	(77)
3.2 饰面装修	(80)
3.3 特种吸声材料和结构	(85)
一、薄板共振吸声体	(85)
二、腔式共振吸声体	(88)
三、微孔板	(90)
四、泡沫玻璃	(94)
五、金属烧结吸声薄板	(94)
3.4 空间吸声体	(95)
3.5 空间吸声体应用实例	(99)
3.6 可变吸声装置	(103)
3.7 听众和座椅的吸声	(108)
附录：厅堂中常用材料吸声性能资料	(115)

第四章 扩散处理	(117)
4.1 几何状扩散体	(118)
4.2 墙面展斜	(125)
4.3 分散式布置吸声材料	(125)
4.4 特种扩散体	(126)
第五章 讲堂、礼堂和剧场	(136)
5.1 言语的声学特征	(136)
一、语声的组成	(136)
二、语声的频率范围	(137)
三、语声的功率和声级	(138)
四、言语清晰度	(139)
5.2 影响言语清晰度的因素	(140)
5.3 报告厅的音质设计	(145)
一、直达声	(145)
二、早期反射声	(146)
三、声源指向性	(146)
四、混响时间	(147)
五、语言声级动态	(147)
5.4 话剧和戏曲剧场音质设计	(149)
5.5 剧场和礼堂实例介绍	(152)
一、上海戏剧学院实验剧场	(152)
二、上海中兴剧场	(154)
三、合肥市安徽剧院	(155)
四、济南市八一礼堂	(156)
五、郑州市河南人民会堂	(157)
六、上海文化广场	(159)

第六章 音乐厅	(161)
6.1 音质的主观因素	(163)
6.2 客观音质参量	(165)
6.3 尺寸、规模和形状	(167)
6.4 早期反射声	(169)
6.5 眺台	(174)
6.6 表演区设计	(174)
一、演奏台的布置	(175)
二、地面材料	(176)
三、演奏台的侧墙和后墙	(176)
四、顶部反射板	(176)
五、扩散和吸收	(177)
六、乐罩设计	(177)
6.7 古典式矩形音乐厅	(181)
6.8 梯田式音乐厅	(185)
一、柏林爱乐音乐厅	(186)
二、美国加州桔县演艺中心大厅	(189)
6.9 加强侧向反射型音乐厅	(191)
6.10 可变耦合空间音乐厅	(195)
6.11 两座日本新建音乐厅	(198)
一、日本雾岛国际音乐厅	(198)
二、日本东京国立演艺中心音乐厅	(201)
第七章 歌剧院	(204)
7.1 设计基本情况	(204)
一、歌声特征	(204)
二、乐池	(206)

三、音质的主观要求	(207)
四、平面	(208)
五、顶棚	(209)
六、眺台	(211)
七、混响时间	(213)
7.2 舞台和乐池	(214)
7.3 歌剧院实例分析	(217)
一、米兰斯卡拉歌剧院	(217)
二、德国拜罗伊特节日歌剧院	(219)
三、柏林国家歌剧院	(221)
四、纽约大都会歌剧院	(222)
五、悉尼歌剧院剧场	(223)
六、台北歌剧院	(226)
七、上海老剧场和新建大剧院	(228)
第八章 电影院	(231)
8.1 直达声和反射声	(232)
8.2 混响时间	(234)
8.3 扬声器位置	(237)
8.4 噪声控制	(242)
8.5 实例介绍	(245)
一、上海影城	(245)
二、上海儿童球幕电影厅	(248)
第九章 可变混响设计	(251)
9.1 可调容积	(251)
9.2 可调吸声	(257)
9.3 电声措施	(262)

一、加强混响系统	(263)
二、重建混响系统	(265)
三、加强早期反射声	(266)
第十章 厅堂中扬声器系统的布局	(267)
10.1 扬声器的特性	(268)
10.2 集中式扬声器布局	(275)
10.3 分散式扬声器布局	(279)
10.4 立体扩声系统	(284)
10.5 几种扬声器布局的比较	(286)
10.6 扩声控制室	(288)

第一章 室内音质设计评价参量

厅堂音质设计的效果主要是在完工后由使用者来评价,但在设计过程中则要依靠一些室内音质评价参量来预计、控制和处理,以达到一定的设计指标。

音质评价来自听众的听感判断,是主观上的反应。但作为工程设计,便要找出一些与之相应的技术参量,它们不仅要有明确的物理意义和可测的数据,同时还要具体地与工程设计相联系,使能遵循一定的规律进行。

室内音质的一些基本要求是:足够的响度,满意的清晰度;全场有比较均匀的效果,无回声干扰等。要使大厅达到上述良好音质的效果,首先要弄清与它们相应的技术参量,这就是本章所要阐述的内容。

至于音乐表演的音乐厅,还有进一步要求,例如丰满度和亲切感等。在演奏交响音乐时更要求大厅具有一种环绕感,给听众的感受犹如处于大型乐队声包围之中。这些特殊内容将留在第六章中讨论。

1.1 混响时间

大家有这样的经验,在一个声音活跃的房间内听起来较“丰满”,但有时则嫌“混浊”;一个死寂的房间内听起来“干涩”,但可能很“清晰”。这一主观评价量可以用混响时间参量来表征。活

跃的房间有较长混响时间,反之则混响时间较短。

一、定义

19世纪末,赛宾在研究改进哈佛大学的一座大讲堂的音质时,提出了混响时间的定义和计算公式。认为当声源停止发声后,室内声场逐渐减弱直至听不到所延续的时间,是衡量室内音质的一个主要参量。在当时的测量条件下,能听测到的声音最大衰变范围大致上是 60dB(见图 1.1),这就是沿用至今的混响时间定义。它的符号便写成 T_{60} (以 s 计)。赛宾的重大发现是:混响时间与房间容积 V 成正比,与室内总吸声量 A 成反比,再乘上一个系数($K=0.163$)便成为一个非常简单而实用的计算公式如下:

$$T_{60} = \frac{0.163 V}{A} \quad (\text{s}) \quad (1-1)$$

式中 A 为房间表面积 S (以 m^2 计)和室内各表面的平均吸声系数 $\bar{\alpha}$ 的乘积,即

$$T_{60} = \frac{0.163 V}{S \bar{\alpha}} \quad (\text{s}) \quad (1-1a)$$

后来艾林发现在吸收较大的房间中(平均吸声系数大于 0.20 时),这个公式需要修正如下:

$$T_{60} = \frac{0.163 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (\text{s}) \quad (1-1b)$$

赛宾在一座大讲堂中做实验时,讲台上放了四支风琴管,各自发出相同频率和音量(由电动气泵的吹气量控制)。可使一管、二管、三管或四管同时发声和同时关闭。于是分别测得它们降至刚听不到的时间。其相应的可听持续时间分别为 $t_1 = 8.69\text{s}$, $t_2 = 9.14\text{s}$, $t_3 = 9.36\text{s}$, $t_4 = 9.55\text{s}$ 。其时间差如下:

$$t_2 - t_1 = 0.45\text{s}$$

$$t_3 - t_1 = 0.67\text{s}$$

$$t_4 - t_1 = 0.86s$$

根据这些时间差得出声强的指数式衰变时间。最后导出著名的混响公式：

$$T_{60} = KV/A \quad (1-2)$$

式中 K 为常数,与声速有关,通常取 0.163。赛宾的这一重大发现,部分归功于他的巧妙实验技术。

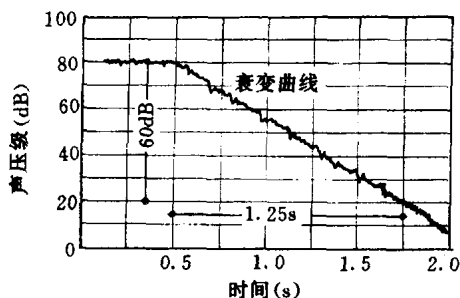


图 1.1 室内混响时间 T_{60} 的定义

当初规定 60dB 作为评价量的衰减范围,是有一定任意性的。例如我们说某大厅的混响时间为 1.3s,实际上并非每发一个音都能听到那么长的“余音”,而且言语和音乐都是连续发声的,当前面一个音刚衰减几个 dB,后面的一个音又接着来了。即使在两音之间有较长的间隙,也可能由于声音本身并不太强,或是背景噪声较高,实际听到的“余音”时间不会有 1.3s。所以通常所谓的混响时间,实际上只是相当于衰减 60dB 所需的时间,是一个评价室内音质的规范化指标。如果我们测量到衰减 30dB 的时间为 0.65s,我们便说相当的混响时间 T_{60} 为 $0.65 \times 2 = 1.3s$ 。同理,如果测量到衰减 20dB 的时间为 0.4s,则相当的混响时间 T_{60} 为 $0.4 \times 3 = 1.2s$ 。这又称为客观的(物理)混响时间。

二、主观和客观混响时间

如果简单地把上述可听的“余音”时间作为“主观”混响时

间,便会出现一些矛盾现象。即这种“主观”混响时间 T_s 和客观混响时间 T_p 在衰变的动态范围不同时,会出现不一致。例如图 1.2 中所列的三种情况:(a)衰变范围正好 60dB, $T_p = T_s$,两者一致。(b)衰变范围很小,或是背景噪声较高,则 $T_p > T_s$,是否主观混响时间变小了?(c)衰变范围大于 60dB, $T_p < T_s$,主观混响时间是否又会变长了呢?这种主客观混响时间的不一致性,会使人怀疑到混响时间这一技术参量是否实用,尤其是最常见的图 1.2(b)情况,即 $T_p > T_s$ 。事实上混响感主要与衰变斜率有关,这样就容易解释清楚了。

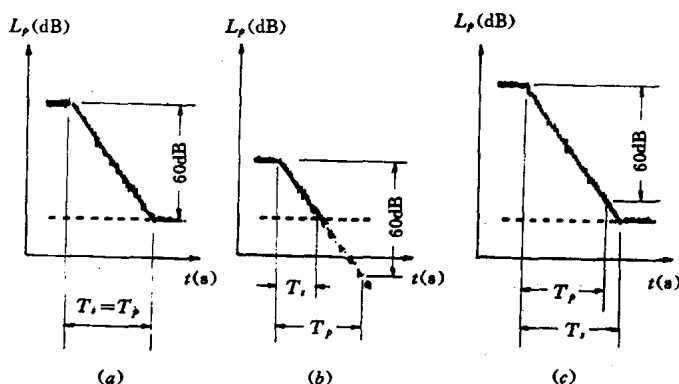


图 1.2 不同衰变范围下的客观(物理)混响时间 T_p 和主观混响时间 T_s 。虚线表示背景噪声

图 1.3 中所示的两种情况是:图(a)中曲线 1 和 2 虽然它们的动态范围不同, T_{s1} 和 T_{s2} 不等,但如果从衰变斜率来看, $T_{p1} = T_{p2}$ 。因此人们区分不出两者的混响感有差别。图(b)中曲线 1 和 2 的 T_{s1} 和 T_{s2} 可能是相同的,但人们会听出两者的混响感不同。这样就解释了为什么按定义规定的混响时间 T_{60} 可以作为评价参量,因为它们的客观衰变率与主观听感是一致的。