

The Perception  
and Design  
of Reverberation

# 混响的 感知与 设计

孟子厚 戴璐 著

中国建筑工业出版社

# 混响的感知与设计

孟子厚 戴璐 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

混响的感知与设计/孟子厚,戴璐著.—北京:中国建筑工业出版社,2018.1

ISBN 978-7-112-21508-9

I. ①混… II. ①孟… ②戴… III. ①建筑声学-混响-设计 IV. ①TU112.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 274719 号

本书讲述了作者在混响感知和设计领域的研究成果。从音乐听闻环境以及混响感的构成因素出发,研究了混响感知的多个方面的问题。涉及混响感的语意调查和分析,混响感差别阈限的实验测量,民乐最佳听闻的混响时间的测量分析,音乐信号的声学特征与最佳混响时间的关系的研究等。实验研究了混响感知与音乐情感、语音清晰度、声音基本要素、房间结构以及声音内容要素等之间的关系,在此基础上归纳导出了主观混响感与诸多要素之间函数关系。介绍了物理上实现可变混响的方法、可变混响音乐厅案例,以及以电声系统和信号处理手段虚拟可变混响的技术。本书适用于大专院校、研究所、设计院等从事室内声学研究和设计专业的人员阅读使用,也可供声频技术、录音制作、音响导演等与声音艺术创作有关的人员参考。

责任编辑:范业庶 张伯熙

责任校对:焦乐 李美娜

## 混响的感知与设计

孟子厚 戴璐 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

\*

开本:850×1168毫米 1/16 印张:17¼ 字数:495千字

2018年2月第一版 2018年2月第一次印刷

定价:75.00元

ISBN 978-7-112-21508-9

(31118)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

人们之间的交流和沟通除了视觉、触觉、嗅觉外，听觉其实是最重要的手段和方式，因为听觉是每时每刻都存在的。你可以视而不见，闭眼不看，但是你无法做到充耳不闻。听觉是双向的，人不但可以听声，同时也可以发声，可以根据自己所发声音的听感对外界进行感知。人对自然界的感知了解，以及和自然界中许多其他生命体的沟通也可以通过声音和听觉。自人类有了使用工具的意识 and 技能以来，人类也有了使用声音的意识，声音也具有了工具的属性，人类也不断地思考和研究声学现象及其规律。

人最基本的需求是衣、食、住、行，而“住”一定是在有界空间里的生存行为，也就是室内活动。混响是可听声（Audio）领域内最重要的物理现象和感知行为，它是和有界空间或室内活动伴随产生的。因此也可以说，混响和人的衣、食、住、行密不可分。混响不只是个学术术语或技术问题，也是人们在日常生活中天天都会遇到的现象。无论你是否意识到，无论你是否愿意，混响在人的生活中是无处不在的。

中古时期，人们对混响现象的认识往往带有一些神秘和宗教的色彩。在西方，宗教建筑大多是内部空间较大的石质建筑，缺乏声学处理，因此混响时间很长，混响感很浑浊或很厚重。在人们掌握了室内声学的规律和设计方法之前，混响被认为是高高在上的圣者的某种属性，是遥远和神秘的。而近距离和直达声所带来的亲切感，是具有世俗和平民属性的。中世纪的一些音乐厅为了控制混响时间，曾经有过在音乐厅里安装按比例关系设计的琴弦，以今天的科学眼光看此举是毫无道理的，但这确实也是当时人们基于艺术灵感和数学知识对声音科学的思考和探索。在很长的一段历史时期，人们对混响的感知是神秘和懵懂的，对厅堂混响的设计也无从下手。直到1900年前后，赛宾（W. C. Sabine）根据对哈佛大学礼堂的混响控制的实验研究，归纳出了混响时间与室内体积和吸声量的关系，对混响的认识和设计才进入了科学的阶段。室内声学从那个时候起也成了一门科学。

混响现象是有界空间里的物理过程，而人对混响的感知却是一个生理和心理过程，所以混响同时具有物理的、生理的、心理的，甚至还涉及艺术和文化方面的因素和属性。对混响的研究是一个非常复杂的课题，尽管自Sabine以来已经有一百多年的历史，人们对混响的感知和设计仍然还没有完全掌握，很多问题往往还要凭借艺术创意和依靠经验把握。几十年来中国国内的研究者对混响的研究也有了一定的积累，但从总体上看，中国国内在这个方面的工作还需要加强和推进，特别是混响感知涉及的生理、心理、文化艺术等具有地域和民族特点的问题。科学问题是无国界的，普遍存在的，但是科学现象所导致的结果和人的反应是有地域、民族和人文生态属性的。混响的感知是人们在现实生活中对声音感知的诸多要素中最重要的要素之一，也是最难以把握的要素。在室内音质设计、音频工程等领域，混响时间和混响感是最重要的客观参数和主观感知量。中国国内对混响的研究虽然也有了较长的历史，但是至今缺乏专门对混响感知和设计进行论述的专著。

本书是作者根据多年研究工作的积累整理而成，包括了作者在中国传媒大学传播声学研究所主持的两项国家自然科学基金项目：“中国民族音乐最佳听闻的室内声学研究”10474005、“主观混响感的因素分析及听觉心理研究”10874155和多项与混响设计有关的工程项目。书中梳理和总结了作者二十多年来对混响感知的科学问题的研究和混响设计的工程经验。

本书共有9章，因为是混响问题的不同方面的研究工作的总结和集成，因而各章在编写上有

一定的独立性，每一章都可以独立阅读和参考，各章最后也写明和此章内容相关的参考文献。第1章首先对混响时间和混响感的定义进行了阐述，从语意分析的角度研究了混响感的构成因素。第2章对混响感的差别阈限进行了测量研究，澄清了混响时间的差别阈限与混响感的差别阈限的区别。第3、4章研究了音乐的最佳听闻所需要的混响时间，特别是中国民族音乐听闻环境的最佳混响时间，给出了近百首各类民乐的最佳混响时间，分析了最佳混响时间与乐器、速度、风格等要素的关系。研究了音乐信号的声学特征与最佳混响时间的关系，提出了评价音乐信号时域特征的特征参数。第5章研究了音乐的情感感知与混响感的相互关系，包括不同的情感对混响感的关系，以及不同的混响条件对情感感知的影响等。第6章是本书的核心和重点。这一章比较全面地研究了混响感的影响因素，包括声音的基本要素、房间的结构因素、声音的内容因素等，在大量实验研究的基础上导出了主观混响感与诸多要素的函数关系，这对在工程应用中设计混响感具有非常重要的指导意义。第7章研究了混响对语音清晰度的影响，分析了混叠效应对汉语语音的声、韵、调的影响，导出了语音清晰度与混响时间的关系，以及混响对语言传输指数 STI-PA 的影响。第8章和第9章介绍了混响感设计的具体案例。包括作者所承担和参与过的采用物理措施的可变混响音乐厅的设计，以及采用电声设备和信号处理技术的虚拟可变混响环境。

本书第9章的内容是基于作者戴璐博士目前在宁波音王集团所主持的“多功能厅堂演出用虚拟可变混响系统”的研究工作进展所总结的，这项工作目前还在进行中，并采用了多项前期研究工作的积累和成果，设计研发出适合于多功能厅堂的基于电声设备的声场控制系统，并且这种控制系统与多功能厅堂的扩声和全景声电影音系统可以复用。

本书所论述的研究工作和成果大多是作者在中国传媒大学传播声学研究所指导的研究生们来参与和承担的，也可以说是这些研究生集体工作的总结，许多章节直接引自研究生的学位论文。自2003年以来，在中国传媒大学传播声学研究所，在传播环境声学研究方向上，涉及混响感知与设计的研究生论文选题有20多项。第7章的内容参考引用了作者所指导的博士生章斯宇的论文《基于言语知觉特性的普通话区别特征系统研究》中的第3章“混响环境下普通话听觉感知实验”的内容。其他直接相关和引用的研究生论文包括：

- 戴璐：混响感的因素分析（博士论文）
- 戴璐：场景声学参数库的建立及应用研究
- 赵凤杰：民族器乐主观混响感差别阈限的实验研究
- 何穆：民乐混响感主观偏爱度的实验测量和分析
- 石蓓：民乐自相关函数有效持续时间的影响因素分析
- 苏昱：民乐听闻环境参数与其信号特征参数之间的相关性分析
- 戴妮娜：民乐观演环境的声学设计
- 夏博雯：混响感与音乐情感感知的相互影响
- 牛欢：早期反射声虚拟空间感效果分析
- 陈一乾：混响效果频率特性实验分析

本书的读者对象为大专院校、研究所、设计院等机构中从事室内声学研究和设计的人员，也可以供声频技术、录音制作、音响导演等与声音艺术创作有关的人员参考。本书的撰写基本上都是以作者自己的研究积累为基础的，力争做到深入浅出，使得科研人员和工程技术人员都能从中获得启发和帮助。

因为基本上都是作者自己研究工作的总结，从混响感知和设计领域的整体性来看，本书所涉及的问题肯定是不全面的，具有局限性和片面性，遗漏和错误也在所难免，因此在使用和阅读本书时建议同时参考其他学者在这个领域的研究成果，对比参考，兼听则明。

最后，对多年来参与了作者所从事的混响感知与设计方向的科研和技术工作的研究生们致以

衷心的感谢。一个人的能力是有限的，但是一个团队就可以做一个人也许独自奋斗一辈子也难以完成的工作。本书不是作者的个人成果，是中国传媒大学传播声学研究所多年来在此方向上学术研究的结晶，是集体工作的智慧和贡献。

孟子厚  
2017年7月

# 目 录

第 1 章 混响时间与混响感	1
1.1 混响时间	1
1.1.1 室内稳态声场	1
1.1.2 室内声场的衰减与混响时间	3
1.2 混响感的研究进展	5
1.2.1 时间和空间因素	5
1.2.2 声源相关因素	8
1.2.3 其他因素	10
1.3 混响感的语意调查	11
1.3.1 混响感的理解	11
1.3.2 混响感的语意调查	13
1.3.3 主观混响感的语意分析	14
1.3.4 混响感与混响时间的关系	18
参考文献	20
第 2 章 混响感的差别阈限	24
2.1 研究现状	24
2.1.1 差别阈限的概念	24
2.1.2 研究现状	26
2.2 差别阈限的测量方法	28
2.2.1 实验要素	28
2.2.2 测量方法	31
2.2.3 信号处理与实验步骤	36
2.2.4 信度检验	38
2.2.5 数据统计	42
2.3 混响感差别阈限测量结果分析	42
2.3.1 实验结果及分析	42
2.3.2 性别对实验结果的影响	45
2.3.3 实验方法对结果影响的分析	46
2.4 效度检验与影响测量的因素	47
2.4.1 补充实验及其分析	47
2.4.2 白噪声时长的差别阈限	53
参考文献	55
第 3 章 音乐听闻的最佳混响	57
3.1 音乐听闻最佳混响感的研究	57
3.1.1 研究背景与现状	57
3.1.2 录音作品音质调查	58

3.2	音乐听闻最佳混响感的实验设计 .....	61
3.2.1	实验素材的选取 .....	61
3.2.2	混响感的控制参数 .....	62
3.2.3	混响感心理尺度的评定方法 .....	64
3.2.4	实验控制参数的优化 .....	66
3.2.5	听音人与听音方式 .....	69
3.2.6	听音实验程序 .....	71
3.3	音乐最佳混响感实验数据分析 .....	73
3.3.1	数据统计与检验 .....	73
3.3.2	按乐器分类分析 .....	79
3.3.3	乐曲演奏速度对混响感的影响 .....	82
3.3.4	乐曲情感表现对混响感的影响 .....	83
3.3.5	演奏技法和风格对混响感的影响 .....	84
	参考文献 .....	87
<b>第4章</b>	<b>音乐信号的分析与混响 .....</b>	<b>89</b>
4.1	音乐信号的有效持续时间 .....	89
4.1.1	音乐特征与音乐信号的有效持续时间 .....	89
4.1.2	有效持续时间的定义 .....	91
4.1.3	时窗的选择与包络线求解 .....	92
4.1.4	民乐曲目的有效持续时间 .....	93
4.2	有效持续时间的影响要素分析 .....	95
4.2.1	时窗长度的影响 .....	95
4.2.2	演奏速度的影响 .....	105
4.2.3	演奏技巧的影响 .....	108
4.3	音乐信号的特征参数与听感最佳混响时间的关系 .....	112
4.3.1	音乐信号的特征参数 .....	112
4.3.2	有效持续时间和最佳混响时间的关系 .....	115
4.3.3	特征参量与有效持续时间的关系 .....	117
	参考文献 .....	120
<b>第5章</b>	<b>混响与情感感知 .....</b>	<b>122</b>
5.1	音乐情感感知与描述 .....	122
5.1.1	音乐的情感感知 .....	122
5.1.2	音乐情感语意调查 .....	124
5.1.3	情感描述词提取 .....	126
5.2	音乐情感感知对混响感知的影响 .....	133
5.2.1	实验素材的选取 .....	133
5.2.2	实验方法与实验结果 .....	135
5.2.3	实验结果分析 .....	138
5.3	混响感对音乐情感感知的影响 .....	142
5.3.1	实验设计 .....	142
5.3.2	实验结果分析 .....	143

参考文献 .....	145
<b>第 6 章 混响感的因素分析</b> .....	148
6.1 混响感因素分析研究内容 .....	148
6.1.1 混响感因素分析的实验方法 .....	148
6.1.2 混响感数据分析 .....	149
6.2 声音感知要素与混响感 .....	151
6.2.1 混响感与主观时长的感知 .....	151
6.2.2 混响感与声压级的关系 .....	153
6.2.3 混响感与频率的关系 .....	154
6.3 混响感的空间因素 .....	156
6.3.1 房间体积与混响感的关系 .....	156
6.3.2 感知距离与混响感 .....	159
6.3.3 房间结构与混响感 .....	163
6.3.4 反射声方向与混响感的关系 .....	166
6.3.5 脉冲结构与混响感关系 .....	168
6.4 混响感与声音内容 .....	169
6.4.1 音乐与语音的混响感 .....	169
6.4.2 相同混响时间下民乐的混响感 .....	173
6.4.3 最佳混响时间下民乐的混响感 .....	177
6.5 混响感的评价 .....	179
6.5.1 各因素与混响感的因变关系 .....	179
6.5.2 混响感评价的应用 .....	180
参考文献 .....	183
<b>第 7 章 混响与语音清晰度</b> .....	185
7.1 混响环境下普通话听感实验 .....	185
7.1.1 实验语料 .....	186
7.1.2 声学传递条件 .....	186
7.1.3 清晰度主观评价 .....	187
7.2 混响影响下语音清晰度分析 .....	187
7.2.1 声母的清晰度 .....	188
7.2.2 韵母的清晰度 .....	191
7.2.3 声调的清晰度 .....	195
7.3 混响环境下语音知觉特征分析 .....	196
7.3.1 数据处理方法 .....	197
7.3.2 声母的知觉空间 .....	197
7.3.3 韵母的知觉空间 .....	200
7.3.4 声调的知觉空间 .....	202
7.4 混响对汉语听感清晰度的影响 .....	203
7.4.1 混响环境下清晰度听感实验 .....	203
7.4.2 混响环境中汉语清晰度感知特性 .....	204
7.5 混响影响下主观听感清晰度与 STI-PA 的比较分析 .....	206

7.5.1	清晰度主观评测标准 .....	207
7.5.2	混响作用的生成 .....	208
7.5.3	实验结果分析和讨论 .....	209
	参考文献 .....	211
<b>第8章</b>	<b>可变混响音乐厅的设计 .....</b>	<b>213</b>
8.1	用耦合空间调节混响的音乐厅 .....	213
8.1.1	具有耦合空间的音乐厅概述 .....	213
8.1.2	新加坡滨海艺术中心音乐厅 .....	220
8.1.3	耦合空间的使用和问题 .....	223
8.2	小型古乐厅的声学设计 .....	225
8.2.1	古乐厅声学环境的概念设计 .....	225
8.2.2	体形设计 .....	228
8.2.3	可变声学特性设计与仿真 .....	229
8.2.4	听感仿真试验 .....	231
8.3	可变混响音乐厅的改装 .....	232
8.3.1	结构现状与设计背景 .....	232
8.3.2	声学装修设计 .....	234
	参考文献 .....	239
<b>第9章</b>	<b>虚拟混响系统的设计 .....</b>	<b>241</b>
9.1	虚拟混响技术的发展 .....	241
9.2	多声道环绕声虚拟混响系统技术简介 .....	244
9.2.1	多通道环绕声虚拟混响的功能 .....	245
9.2.2	多通道环绕声虚拟混响系统的构成 .....	245
9.3	多声道环绕声虚拟混响系统控制参数的实验分析 .....	248
9.3.1	物理空间与虚拟空间的耦合 .....	248
9.3.2	时间能量重心 $T_s$ 与空间感 .....	249
9.3.3	低音增益与混响感的关系 .....	250
9.3.4	混响的频率特性的影响 .....	255
9.4	多声道环绕声虚拟混响系统的虚拟空间扩展 .....	259
9.4.1	虚拟空间扩展方法 .....	259
9.4.2	物理空间对虚拟空间的影响 .....	260
9.4.3	虚拟空间感和混响感 .....	262
	参考文献 .....	263

# 第 1 章 混响时间与混响感

## 1.1 混响时间

混响是有界空间的一个重要声学现象。室内混响是在房间中从声源发出的声波能量，在传播过程中由于不断被壁面吸收而逐渐衰减的现象<sup>[1]</sup>。百年之前建筑声学还是一门比较艺术的学科，主要靠人耳去听。1900 年 W. C. Sabine 在美国《建筑》杂志上发表了题为《混响》的著名论文，归纳出混响时间的计算公式，揭示出混响时间与空间的体积成正比，与吸声量成反比。此后的一百多年时间里，混响时间已成为描述室内音质评价的重要甚至是唯一的，被普遍认可和接受的参量<sup>[2]</sup>。但是随着对室内声学研究的深入，很多音乐厅在音质上失败的例子告诉我们，将混响时间作为单一的评价音质的参量是不可靠的，也是不完备的。许多厅堂按照“最佳”混响时间而设计，但是其音质却差强人意，并不能在音质上也达到“最佳”。

“厅堂音质与其说是科学，不如说是艺术 (architectural acoustics as an art)”。1966 年，德国哥廷根大学的 Schroeder 在其《建筑声学》一书中将音乐厅音质归结为三方面问题：物理的、心理的以及美学的或优选的问题。至今，众多的声学研究者围绕这三方面问题开展了很多研究并取得了一定的成果。20 世纪 50 年代后，主观听觉的研究方向逐渐受到重视，人们意识到，厅堂音质中存在的诸多问题并不是纯粹的物理学范畴内就能解决的，还需要借助生理和心理等领域的知识，客观声场与主观听感之间的关系成为研究的核心<sup>[3]</sup>。

### 1.1.1 室内稳态声场

当声源为脉冲声时，对房间内的任一点，其接收到的声场分为三部分：直达声、近次反射声及混响声，如图 1.1 所示。

**直达声：**由声源直接到达接收点的声音。在传播过程中，这部分声音不受室内界面的影响，直达声的声强基本上按照与声源距离的平方成反比而衰减。

**近次反射声：**一般是指在直达声之后相对延迟时间为 50ms 内到达的反射声，这些短延时的反射声主要是经由室内界面一次、二次以及少数三次反射后到达接收点的声音，称为近次反射声。人耳对延时为 50ms 内的反射声难以和直达声分开，故这些反射声会对直达声起到加强作用。此外，短延时反射声和侧向反射声对音质有很大影响。

**混响声：**在近次反射声后陆续到达的，经过多次反射的声音统称为混响声。在声场中，混响声的声强对于该接收点的声音强度起决定作用，而其衰减率的大小对音质有重要影响。

需要指出的是，如果到达听者的直达声与第一次反射声之间，或者相继到达的两个反射

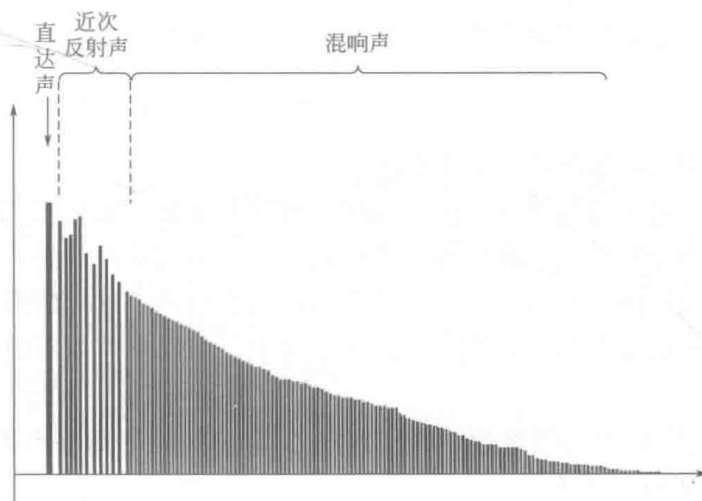


图 1.1 室内脉冲声的形成

声之间在时间上相差 50ms 以上，而反射声的强度又足够大，使听者能明显分辨出两个声音的存在，那么这种延迟的反射声叫作回声。回声的存在将严重破坏室内的听音效果，一般应力求排出。

如果在房间内，利用扬声器（或其他声源）发声，室内表面会产生许多的反射声，传声器首先接收到来自声源发出的直达声，然后依次接收到各个表面的反射声，传声器接收到的声压逐渐增加，而且室内表面反射声波的同时，还要吸收一部分声能。从能量角度来看，声源在房间内发声时，声能不断地从声源发出，同时也不断地为壁面和空气所吸收。当声源发出的声功率与在房间内被吸收掉的声功率相等时，房间内的声能保持一定。这时，在局部范围内声能密度可能有起伏，但从整体来看，房间内的声能密度达到了稳定状态，形成了稳定声场。

由于房间内各反射界面的存在使得声音的传播过程复杂化，由各个途径的反射波相互叠加形成复杂的声场。通常把房间内的声场分成两部分，一部分是由声源直接传到接收点的直达声所形成的声场，称为直达声场。另一部分是经过室内表面反射后到达接收点的反射声所形成的声场，称为混响声场。

直达声场是自由声场。设点声源的声功率是  $W$ ，在距声源声学中心距离为  $r$  处，与直达声相对应的声强  $I_D$  为：

$$I_D = \frac{QW}{4\pi r^2} \quad (1.1)$$

其中， $Q$  为指向性因子，取值如表 1.1 所示。

指向性因子  $Q$  的取值

表 1.1

Q 取值	声源情况
1	无指向性的点声源放在房间中央
2	点声源放在刚性反射面上，如地面上
4	点声源放在两个相互垂直的刚性反射墙面相交的边上
8	点声源放在三个相互垂直的刚性反射壁面组成的墙角上

设距点声源距离  $r$  处与直达声相对应的声压级为  $L_{PD}$ ，有

$$L_{PD} = L_w + 10\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \quad (1.2)$$

其中  $L_w$  为声源的声功率级。

对于混响声场，由于房间表面的不规则，而且房间内还有一些物体会产生散射声波，因此，从声源发出的声波以各种不同的方向入射到室内表面，经过不断反射，使得各个方向传播的概率大致相同，在房间内各处的声场也几乎相同。这样的声场称为扩散声场。一般情况下，可将混响声场近似看作是扩散声场。在空气中，与混响声场对应的声压级为  $L_{PR}$  为

$$L_{PR} = L_w + 10\lg(4/R) \quad (1.3)$$

式中， $R$  为房间常数，单位为  $m^2$ 。若房间的平均吸声系数为  $\bar{\alpha}$ ，房间总表面积为  $S$ ，则房间常数  $R$  可表示为

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (1.4)$$

若同时考虑空气吸收，单位时间内被吸收掉的混响声能将有所增加。这相当于壁面的平均吸声系数有所提高。壁面与空气同时吸声时的等效吸声系数为

$$\alpha_T = \bar{\alpha} + \frac{4mV}{S} \quad (1.5)$$

式中,  $m$  为声强衰减系数,  $V$  为房间的容积。

在通常情况下, 当频率不太高, 并且房间几何尺寸不很大时, 空气吸收可以忽略, 而当频率很高 ( $\geq 2\text{kHz}$ ), 且  $V/S$  也相当大时, 空气吸收的影响不容忽略。

把直达声与混响声场叠加在一起, 就得到实际的总声场, 在空气中, 总声场的声压级为

$$L_p = L_w + 10\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \quad (1.6)$$

由于声源声功率  $L_w$  是给定的, 因而房间中各处声压级的相对变化就由  $10\lg\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$  决定。

当房间壁面接近全反射时,  $\bar{\alpha} \approx 0$ ,  $R \approx 0$ , 房间内声场主要为混响声场, 这种房间叫混响室。当  $\bar{\alpha} \approx 1$ ,  $R \rightarrow \infty$  时, 房间内主要为直达声场, 这种房间叫消声室。一般房间,  $R \approx 10^2 \sim 10^4$ 。

离声源比较近时, 直达声占主要地位, 当离声源中心的距离逐渐增大时, 房间的影响相对增强; 当距离增加到一定程度时, 房间内的混响声场转化为占主要地位。由直达声场为主转化为以混响声场为主时, 这个转折点离声源中心的距离  $r_0$  叫作自由场半径, 或称为混响半径, 有时也叫作临界距离。当  $r < r_0$  时, 以直达声为主;  $r > r_0$  时, 以混响声为主; 当  $r = r_0$  时, 直达声场与混响声场相等, 因而

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4}{R} \quad (1.7)$$

即

$$r_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{RQ}{\pi}} = 0.14\sqrt{RQ} \quad (1.8)$$

可见, 混响半径与声源指向性因子  $Q$  和房间常数  $R$  的平方根成正比。在室内声学设计中, 混响半径与清晰度有关。混响半径内, 清晰度较高; 反之混响半径之外, 清晰度较低。因此要提高房间的清晰度, 一方面可以通过选用方向性较强即指向性因子  $Q$  值大的扬声器来增大房间的混响半径; 另一方面可以通过增加房间吸声即增加房间常数  $R$  的方法, 增大房间的混响半径, 从而提高清晰度。

### 1.1.2 室内声场的衰减与混响时间

声源在室内发声, 其声场的变化可分为三个过程。首先是声音逐渐增大的增长过程, 然后声音达到稳定状态, 当房间内声场达到稳态后, 突然关闭声源, 房间内的声源并不立即消失, 而要持续一段时间, 有一个逐渐减小的过程, 或叫声音的衰减过程。这种声音的延续现象叫混响。“余音绕梁, 三日不绝”这个成语, 实际上就是对室内混响现象的一种生动的描述。大家都有这样的经验, 在一个声音活跃的房间内听起来较“丰满”, 但有时则嫌“浑浊”; 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来表征。活跃的房间有较长的混响时间, 反之则混响时间较短。

通常采用房间中的声场的声能密度衰减到原来的百万分之一时所经过的时间来度量混响, 这段时间称为混响时间。记为  $T_{60}$  (s), 它对应声能密度衰减 60dB 所需的时间。一般情况下, 中等强度的声场衰减 60dB 后与环境噪声相接近。因此, 声源突然停止后, 实际听得见声音的延续时间与混响时间是相接近的。表 1.2 给出的是天津石家大院戏楼与广东会馆戏楼混响时间测量实例。其中天津的广东会馆戏楼作为中国传统会馆戏楼的代表之一, 而石家大院的戏楼就是一个在华北地区保存最完整的、规模最大的典型民宅戏楼。

实测混响时间

表 1.2

频率	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
广东会馆戏楼 $T_{60}$ [s]	2.22	2.42	2.42	2.34	2.22	2.14	1.86
石家大院戏楼 $T_{60}$ [s]	1.98	2.06	1.86	1.90	1.98	1.96	1.74

19 世纪末, 赛宾 (Sabine) 在进行大量吸声试验的基础上, 提出了室内混响理论。他首先从试验中获得了混响时间的计算公式<sup>[4]</sup>, 可以表示为

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A} \quad (1.9)$$

式中,  $V$  为房间的容积;  $A$  为房间的吸声量。

房间的吸声量一般是指室内表面的吸声量, 如果各个表面的吸声系数分别为  $\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_n$ , 其相应的面积分别为  $S_1, S_2 \cdots S_n$ , 则房间内的总吸声量  $A$  为

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i + \sum A_i \quad (1.10)$$

式中,  $A_i$  是非壁面物体及人体的吸声量, 相当于面积为  $A_i$  的开窗。

平均吸声系数可表示为:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1.11)$$

由 (1.9) 式可见, 混响时间与房间体积成正比, 与吸声量成反比。

混响时间的发现开始了由古典声学到近代声学的转变, 室内音质的设计和控制就从经验和艺术进入相对理性的阶段, 混响时间成为室内声学中的基本概念和决定室内音质最重要的参数。但是, 赛宾的混响时间公式也存在着很多不足, 并不能准确地描述厅堂内混响的时间衰变特性, 而且赛宾的公式忽略了厅堂体形的影响, 混响时间只与体积相关。很多学者对混响时间公式从不同角度进行了大量研究并提出了很多对混响时间的修正。

赛宾公式只适用于平均吸声系数较小时的混响时间计算, 许多科学家在其基础上进行了改进, 现在普遍采用的是伊林 (Eyring) 公式, 它可表示为:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (1.12)$$

上述的混响时间计算公式还要考虑两个重要修正: 一是空气对声波吸收所产生的影响, 二是实际声场并不是完全扩散声场所产生的影响。考虑二者的影响后, 公式可修改为

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \left(1 + \frac{S\lambda}{8V}\right) \quad (1.13)$$

其中,  $m$  表示空气的声强吸收系数。从 (1.13) 式可以看出, 考虑空气的吸声相当于吸声量增加了  $4mV$ ; 考虑不完全扩散声场的影响, 相当于房间的有效容积大了  $\frac{S\lambda}{8}$ 。

在实际问题中, 要使房间的声场较好地满足“完全扩散”的条件, 通常要求房间长、宽、高三方向的尺寸在同一数量级上。壁面的平均吸声系数为小值, 并且房间内各表面的吸声系数相差不多, 房间要有良好的扩散。一般来说, 若房间三维尺寸相差 10 倍以上, 或平均吸声系数  $\bar{\alpha}$  在 0.3 以上时, 在房间中就难以形成良好的扩散声场。

此后还有 G. Millington, Morse Gilbert, K. H. Kutturff, M. Schroeder 等学者对混响时间公式和混响时间的测量方法进行了改进或者提出了新的方法<sup>[5]</sup>。值得一提的是, 1938~1939 年, 马大猷先生对房间简正频率公式进行了修正, 并给出了均匀阻尼界面矩形房间的混响解<sup>[6-8]</sup>。

虽然经过了一百多年的发展, 室内声学取得了许多成果, 研究者发现混响时间固然是非常重

要的客观参数，但它并不能完全描述人所听到或者所感知到的声场。比如混响时间相同的两座音乐厅在听感上却可能大相径庭，因此可以套用“世界上没有完全相同的两片叶子”这样的话来形容音乐厅声学，即世界上不会有两座听感上完全一样的音乐厅。

## 1.2 混响感的研究进展

混响时间的经典定义是：声源停止发声后，声压级衰减 60dB 所需要的时间。但是在实际应用中人们渐渐发现混响时间并非决定室内音质的唯一参量。研究者们纷纷探索除混响时间之外决定室内音质的第二个评价量，并提出了“亲切感”、“明晰度”、“温暖感”、“活跃度”、“空间感”以及它们的评价方法。在研究混响时间及其他音质参量的同时，很多学者对混响的主观感知展开了研究，并取得了一定的成果<sup>[9]</sup>。

混响感是一种复杂的、综合的感觉，但是到目前为止对于“混响感”这一概念仍然没有一致的、明确的定义。但是几乎所有的研究者都认为单一的物理参数无法准确描述厅堂的音质，使用混响时间作为唯一的衡量厅堂音质好坏的参量是不够的，也是不准确的。从对厅堂音质研究的伊始，人们就已经开始关注混响这一物理现象以及由它产生的各种心理声学现象。无论是对混响的物理测量还是混响的主观感知，相关研究从未停止过。

### 1.2.1 时间和空间因素

早在 1965 年时，Atal<sup>[10]</sup> 就研究了非指数衰减的混响被指数衰减掩蔽的效应。他指出非指数衰减时，混响时间的定义并不适用，有时早期衰减对混响的主观感觉有重要影响。他们发现，声能衰变的前 160ms 或 15dB 的衰变率与主观感知的混响最为相关。由于音乐厅内混响过程的复杂性，单一的物理量的衰减是无法准确描述主观混响感知的。

Jordan<sup>[11]</sup> 指出仅用混响时间 RT 来评价声学质量是不够的，也不存在单一的最佳混响时间，很可能存在一个最佳范围，这个范围依赖于音乐类型而非厅堂的体积。他参照混响时间提出了早期衰变时间 EDT 的概念。

1994 年 Eckhard 和 Jean<sup>[12]</sup> 的研究指出有必要将对“混响时间”的客观测量与感知属性“混响感 (reverberance)”加以区别。真实厅堂中，客观参量 EDT 与早后期声能比有很强的相关性，若将早后期声能比解释为清晰度时，其与混响感较高的相关系数表明混响感与清晰度的主观概念发生了混淆。包围感和混响能量的关系也会导致侧向反射声的影响作用在混响的主观印象上 (subjective impression of reverberance)。在关于“混响感”的问卷调查中，被试人不可避免地会受到相关概念“清晰度”和“包围感”的影响。这些概念是混响感中内在的子效应还是各自独立的模糊因素尚不能确定。EDT<sub>15</sub> (衰减开始下降 15dB) 可以看作是解释混响时间和早后期声能比的各种效应中最佳的折中解释。

Sum 和 Pan<sup>[13]</sup> 采用手枪作为信号，通过在八角形剧院的主观试验发现，对非指数衰变来说，用衰变的前 10dB 得到的 EDT ( $T_{10dB}^{50ms}$ ) 比传统的混响时间更符合混响的主观感受。人耳听到的混响是无法计量的，但是可以描述感知到混响的程度，而听感则取决于人耳的感知阈限。在对混响感的分析中引入了人耳听觉感知。同时他们还指出许多其他研究者展开了对主观混响感的研究，包括非指数衰减的混响<sup>[10]</sup>，非指数衰减混响下的语言可懂度<sup>[14]</sup>，混响对主观偏爱度的影响<sup>[15]</sup>，掩蔽和响度<sup>[16-18]</sup> 以及声音的空间印象<sup>[19-23]</sup>。但这些文献主要关注了混响所产生的主观效应，而没有明确主观感觉与哪种物理参数之间有关联。应当注意时域阈限是否应当计入混响时间的计算之内，这种阈限对哪种声场的衰减的计算有显著的影响。但是他本人的实验不足在于使用的八角形的非典型厅堂，测量使用的信号为脉冲声信号。

Lars 和 Per<sup>[24]</sup> 设计了一套基于扬声器的室内声场调整系统, 来研究声场物理参数与心理声学之间联系的重要性。实验者通过一系列主观实验表明混响的主观感知 (subjective perception of reverberation) 主要与早期衰减时间 (EDT) 相关, 除此之外还有空间印象 (spatial impression) 和明晰度  $C_{80}$ , 他们认为反射声的时域分布和早期反射声的程度比混响时间更重要。

Barron<sup>[25]</sup> 测量了英国 17 座音乐演奏场所, 并讨论了后期侧向声压级 (late lateral sound level, GLL), 听众包围感 (listener envelopment, LEV), 后期侧向声能比 (late lateral energy fraction, LLF) 与空间感的关系, 他认为混响的感知有两种互补的方式——时间和空间, 前者也可称为“活跃度 (liveness)”, 可由单声道确定。空间特性相对时间情况更复杂, 在大的剧院里来自各方向的可听混响对音乐听感有很重要的关系。一些不考虑时域特性的空间特性可用连续噪声进行研究。

Morimoto<sup>[26]</sup> 则对混响感的时空特性进行了深入的分析, 他指出混响有时间和空间的特性, 其主观感觉也是, 并且二者对混响感的影响是独立的。利用扬声器重放实验研究了混响感的心理构成, 实验中只讨论了扬声器与耳朵轴线夹角  $\alpha$  为  $10^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $83^\circ$  的情况。使用一段小提琴独奏和 30ms, 1000Hz 纯音脉冲信号作为听感素材判断混响感的差别, 得到了连续混响和末端混响的多元回归方程:

$$R = 0.534 \cos(\alpha) + 0.790RT \text{ 连续混响} \quad (1.14)$$

$$R = 0.259 \cos(\alpha) + 0.944RT \text{ 末端混响} \quad (1.15)$$

Morimoto 又使用访谈和等级量表法来研究五个参数: “包围感 envelopment”、“距离 distance”、“长度 length”、“数量 quantity”和“清晰度 clarity”与混响感的关系。实验结果指出这些参数的感知不是独立的, 而且每一个都受到混响的时间和空间特性的影响。

John 和 Gibert<sup>[27]</sup> 讨论了厅堂的空间感, 或空间印象, 指出听者包围感和视在声源宽度分别与后期混响能量和侧向声能比 ( $LF_0^{80}$ ) 相关。厅堂设计时增大后期到达侧向声能 (later arriving lateral energy) 会提高包围感但也会使混响感增强, 同时也可能会增加早期侧向反射声和视在声源宽度。

Russell<sup>[28]</sup> 等人指出连续混响是音乐连续演奏时所感知到的混响, 主要受到 EDT 的影响, 末端混响指声音末端所听到的效果, 是“典型的”混响时间。每首音乐作品都需要特定的室内声学环境, 因此不存在“交响乐的最佳声学”, 只能使声环境更好地适应某种音乐作品。

Angelo<sup>[29]</sup> 研究了与歌剧院主观“声学舒适度”相关的声学参数。测量了 8 座剧场, 每个剧场 18 个位置的双耳脉冲, 并通过计算得到了混响时间 ( $T_{15}$  和  $T_{30}$ )、早期衰变时间 (EDT)、初始时延间隙 (ITDG)、清晰度和明晰度 ( $C_{50}$ 、 $C_{80}$ )、早后期声能比 ( $C_5$ )、声压级 (SPL)、等效反射振幅 ( $A_{eq}$ )、直混比  $R/D$ 、时间能量重心  $T_s$ , 快速语音传输指数 RASTI 和双耳互相关 IACC<sub>E</sub>, 这些客观参数都对左右耳的数据进行了平均。通过问卷调查来完成对各个剧场的主观音质评价, 采用线性拟合的方法对主观结果和客观参数之间进行了拟合, 但是由于客观参数与主观结果之间的相关性较低, 所以结果的有效性还有待考察。

Bonsi<sup>[30]</sup> 等人调查了 11 座文艺复兴时期的教堂与音乐间的关系, 涵盖了建筑学、音乐学和声学的内容。对这 11 座教堂进行了声学测量并对教堂内的音质进行了问卷调查, 所调查音乐大部分为 16 世纪宗教音乐。调查的主观音质主要为响度、混响感、背景噪声、节奏、亲切感、清晰度、明亮感、温暖感、包围感和总体印象。结果表明: 混响感与 EDT 和  $T_{30}$  具有相关性; 感知清晰度与  $C_{80}$  相关。对空间音质来说, EDT、 $T_{30}$  和  $C_{80}$  是很重要的参数。

Beranek<sup>[31]</sup> 对比了赛宾公式和伊林公式的吸声系数, 分析了 20 座厅堂的观众区与非观众区、厅堂容积和体形与观众吸声系数的关系, 给出了矩形和非矩形厅堂的体积公式:

$$V \approx 8.1(T_{60}S_T)\alpha_T \text{ (非矩形厅堂, 500Hz)} \quad (1.16)$$

$$V \approx 8.5(T_{60}S_T)\alpha_T \text{ (矩形厅堂, 500Hz)} \quad (1.17)$$

根据对 20 座厅堂的调查显示, 非矩形厅堂的观众区吸声系数要比其他体形的厅堂大。在观众区面积、混响时间和室内装修类型相同情况下, 非矩形厅堂的体积比矩形厅堂体积大 6%。在音乐厅中, 伊林与赛宾系数的比值约为 0.85, 混响时间稍短的房间内, 该比值约为 0.5。使用重型软椅时, 厅堂体积比使用轻型和中型软椅时大 10%。

Claudiu 和 Densil<sup>[32]</sup> 只依靠听觉提示, 让被试根据混响通过已知大小的参考房间来判断“刚才进入的房间有多大”, 参考房间面积为 19m<sup>2</sup>, 被试可以通过视觉观察, 测试房间有三种不同尺寸, 分别为 15m<sup>2</sup>、124m<sup>2</sup> 和 188m<sup>2</sup>, 被试无法看到房间的内部。通过测量得到待测房间的  $T_{30}$ 、EDT、 $C_{80}$ 、STI 和 IACC。结果给出了房间大小的估计公式:

$$RSR = 5.4 - 0.061L_A - 0.058C_{80} \quad (1.18)$$

RSR 为相对参考房间的房间尺寸等级,  $L_A$  为声音刺激的等效 A 声级,  $C_{80}$  为中频范围的明晰度。

Y. Jurkiewicz 和 E. Kahle<sup>[33]</sup> 指出适合的早期反射声可保证清晰度和声源的临场感, 使很大的厅堂具有合适的混响, 因此提出了新的声学参数: “early efficiency” 和两个客观参量“声学有效面”(acoustically efficient surfaces) 面积 SEE 和基于立体角的优化  $\Omega_{EF}$ 。

Robert<sup>[34]</sup> 利用了计算机模型和统计分析的方法对不同体型厅堂的听感进行了调查, 结果表明, 给定容积的矩形空间内混响感比其他体形的房间内混响感更大。

António<sup>[35]</sup> 等人调查了数个主观声学参数与教堂建筑物物理参数与之间的关系并给出了简单的拟合公式, 其中混响感可由下式给出:

$$REV = 1.179 - 8.2 \times 10^{-3} ANV + 0.179LNV + 0.220WAVG - 17.090CABS \quad (1.19)$$

上式中 REV 为混响感, ANV 为教堂中殿面积, LNV 为教堂中殿长度, WAVG 为平均宽度, CABS 为平均吸声系数。文章还给出了主观声学参数与客观声学参数之间的简单拟合公式:

$$REV = 1.709 + 2.417 \log RT \quad (1.20)$$

$$REV = 1.741 + 2.451 \log EDT \quad (1.21)$$

$$REV = 5.118 + 2.169 EDT - 7.666 D - 0.025 TS \quad (1.22)$$

研究表明建筑特点对教堂内的整体声学印象起着很重要的作用。相对于混响时间 RT 来说, EDT 更适合用来描述混响感。

Ando<sup>[36]</sup> 通过分析指出耳蜗到脑皮层的听觉表现以一种时域响应模式与声场主观偏爱度相关, 不同于能量频谱分析。再一次强调混响的主要感知分为时域和空间的感知。

Schroeder<sup>[37]</sup> 等人在 1974 年对欧洲音乐厅的偏爱度进行了主观实验调查, 希望能够建立主观与客观(声学 and 几何的)参量之间的关系。调查发现厅堂的体积是比较重要的参量, 当厅堂达到一定尺寸之后, 如果体积再增大的话, 声学效果会变差。

Gade<sup>[38]</sup> 在不同年代分别调查了 32 座音乐厅的声学 and 建筑数据以及位于哥本哈根的歌剧院和音乐厅等建筑内的声学状况。分析了平均声学参数与声学设计之间的关系。并给出了一系列主观参数与客观参数之间的关系式:

$$C = -0.4 + 0.9 \times 10 \log \left[ \exp\left(\frac{1.104}{RT}\right) - 1 \right] \quad (1.23)$$

$$L = -1.5 + 0.9 \times \left[ 10 \log\left(\frac{RT}{\text{volume}}\right) + 45 \right] \quad (1.24)$$

$$LEF = 0.47 - 0.0085 \text{width} \quad (1.25)$$

其中  $C$  为清晰度,  $L$  为强度,  $LEF$  为侧向声能比。

他发现传统的矩形和鞋盒型剧场因为较高的每座容积而具有较强的混响感和较强的空间感。