

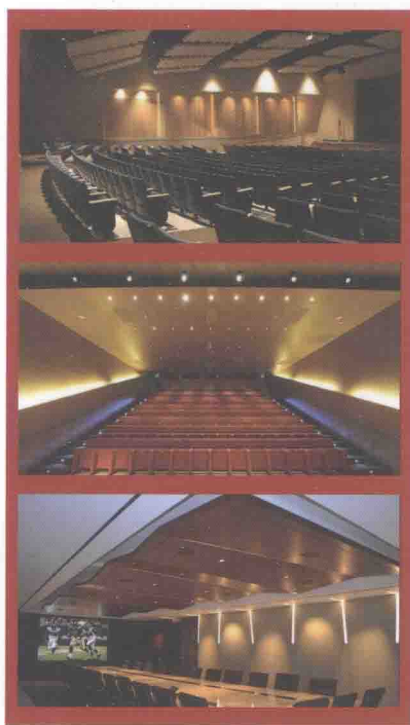
# 小房间声学设计及 建筑声学处理

高玉龙 编著

XIAOFANGJIAN SHENGXUE SHEJI  
JI JIANZHU SHENGXUE CHULI



随书附光盘一张



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 小房间声学设计及建筑声学处理

高玉龙 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书全面介绍小房间的声学设计,它集新颖性、基础性、资料性和实用性于一身。首先讨论大、小房间各自所涉及的声学问题,继而介绍大、小房间设计中常用的一些计算机应用程序等,为提高小房间建筑声学设计效率提供有力工具。然后介绍房间建筑声学处理措施,包括吸声、扩散和隔声等。最后重点讨论小房间声学设计的思路、技术标准以及相关方方面面的设计考虑,并给出若干设计和实际工程案例。

本书配套光盘含有部分章节所涉及的视频演示资料以及其他文件资料,作为本书正文内容的一种补充,可帮助读者加深对本书内容的理解。

本书可供小房间建筑声学设计师、装修工程设计师和相关专业科研单位、声学技术公司的工程技术人员、从事吸声材料和扩散结构产品的厂商以及建筑专业、声学相关专业大专院校师生参考,也可作为电声工程师技术培训参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

小房间声学设计及建筑声学处理 / 高玉龙编著. —  
北京:国防工业出版社,2014. 10  
ISBN 978 - 7 - 118 - 09586 - 9

I. ①小... II. ①高... III. ①建筑声学 - 声学设计  
IV. ①TU112.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 198014 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 31 $\frac{3}{4}$  字数 793 千字

2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 118.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

关于小房间声学设计的相关图书资料国内比较少见。还是在几年前笔者曾经读过一本由美国 F. 爱尔顿·埃弗莱斯特著、孟昭晨先生翻译的《家庭和播音室声学技术》一书(1984年12月出版)。它反映了30多年前小房间声学设计的技术处理方法,其中关于驻波理论的一些经典论述至今仍为国内小房间声学文献所引用,该书对我国的深远影响可见一斑。

30年来,建筑声学处理技术有了长足的发展,吸声材料产品、声扩散产品和建筑隔声产品已今非昔比。房间音质设计正从传统的经典声学设计模式向声学计算机辅助设计模式转变,这是计算机硬件、声场模拟软件、各类声学计算软件与房间音质设计相结合技术发展的必然趋势。这一趋势首先反映到国内一些声学技术公司的建筑声学设计中和一些声学网站的(发帖)文章中。笔者相信,反映时代特征的声学计算机辅助设计逐渐取代传统的声学设计方法,向室内(大、小房间)声学设计更大范围的普及只是时间问题。

小房间声学工程有着广阔的市场前景。广播电台、电视台原有双声道试听室升级改造成5.1声道环绕声系统;录制大量视听节目声像公司的录声室、监控室的建设;公共娱乐设施KTV房间音质的提升;随着人们生活质量的提高,家庭听声室、视听室(家庭影院)、钢琴房的逐步普及并走向寻常百姓家;甚至靠近交通干线(包括地铁和轨道交通)的民居为了营造一个安静的居住、休闲、娱乐环境,也都需要进行建筑物隔声处理。凡此种种,都离不开小房间声学设计和相应的建筑声学处理。

本书是继《声学设计软件 EASE 及其应用》、《厅堂建筑音质计算机辅助设计——EASE4.1 使用详解》两书之后,笔者编著的第三本涉及房间建筑声学设计的图书,它注重小房间建筑声学设计本身所涉及的方方面面,在本书中所介绍的计算机声学应用程序只是反映时代背景、方便声学设计的工具而已。

所谓小房间声学设计是指对于小尺度房间所做的声学设计。小尺度房间的容积范围从几十立方米到几百立方米。小尺度房间与大尺度房间在声学设计上有何不同呢?其不同之处在于它们各自处于房间声场稳态响应不同的频率区段。大尺度房间处在临界频率 $f_c$ 以上的声场扩散区、镜像反射区;而小尺度房间既处在临界频率 $f_c$ 以上的声场扩散区、镜像反射区,也处在临界频率 $f_c$ 以下的简正模式区。相比之下,小尺度房间声学设计要考虑更多的影响房间音质的因素,并作出相应的建筑声学处理。记得在一次由 CA001 网站主办的年度声学交流会上,声博士(广州)声学技术有限公司殷艺敏先生介绍一座  $200\text{m}^3$  的小房间声学工程状况。业主先后分别找了两家公司进行声学设计和施工,吸声材料用了不少,然而最终还是低频效果欠佳,以致不能按期开业。究其原因,声学设计没有针对小房间的特点采取相应技术措施,而是一味地套用大尺度房间设计模式。由此可见,仅仅掌握了大尺度房间的

声学设计方法,未必能处理和解决好小尺度房间的建筑声学问题;反过来,如果掌握了小尺度房间的声学设计,大尺度房间的建筑声学问题也就容易解决了。

国内有一些声学技术公司,特别是从事家庭影院等小房间声学工程的公司,已经在针对小房间的声学特点进行了某种程度的计算机辅助设计,并收到了一定的实际效果。在小房间声学设计中迈出了可喜的一步。但也有一些公司认为只要采用“黄金比例”进行小房间声学设计,就能万无一失。有的忽视吸声设计,认为随便摆放点吸声材料就能搞定。笔者查阅了国内不少涉及录音室、监听控制室、试听室等小房间声学设计的参考文献,大多采用经典的设计方法。在业界小房间声学设计特别是采用计算机辅助设计方法,其普及程度还远远无法和 EASE 软件的普及程度相比。

对于小房间声学设计在互联网上也有不少很不错的论述资料,但是这中间对于如何降低小房间声染色也出现一些似是而非的论点。从竣工图片看到个别家庭影院的帖子中,房间容积不大,却大量采用 QRD 扩散体。这些都很容易误导初学者。

声扩散问题涉及国内声学科研机构、声学工作者对声扩散在室内声学中作用的重视程度以及研究资金投入和力度都远远不如对吸声产品那样大。人们对吸声产品的研究和应用已经有 100 多年的历史,而声扩散产品从问世到现在也不过 30 多年的历史,并且国际声学界对扩散产品特性的评价与测量还没有像吸声材料那样有一个统一的认识,因而造成声扩散两大评价体系共存的局面。

有鉴于此,国内介绍声扩散的技术资料相对较少,对于如何正确使用声扩散产品的资料就更少。这样一来,虽有品种单一的声扩散产品,使用不当也不能收到预期效果。因此在第 7 章“房间建筑声学处理措施”一章,将把国外声扩散研究的最新进展作为一个重点内容加以介绍。

由于某种机缘,笔者对一些从事家庭影院工程的声学技术公司做了调研和走访,也从相关的网站做了技术了解。总的来看,与国外相比还存在不小的技术差距。特别是体现在建声处理措施方面,在 100Hz 以下的声吸收产品方面国外已经实现产品系列化、模块化,而我们还停留在“低频陷阱”阶段;我们的声扩散产品品种还比较单一,且缺乏实测数据。因此本书第 7 章将把国外吸声产品和声扩散产品以及隔声产品介绍给读者,特别是声学技术公司和声学产品公司、生产厂家的读者朋友。

在本书第 8 章“小房间声学设计”中讨论了在临界频率以下,矩形房间长、宽、高尺寸比例对简正模式频率分布均匀性存在关联性,进而影响房间的音质。为此国内、外组织机构和声学工作者推荐了 30 多种房间尺寸“合适比例”。面对如此众多的比例,声学设计者有些无所适从。因此,如何定量评估这些“合适比例”对房间音质的实际影响,一直是声学工作者比较关注的一个问题。另外,如何科学地定义房间简正模式频率的“简并”现象,声学界也有不同说法。近年来笔者对这些问题进行了大量研究和深入探讨,提出了广义“简并”的概念,据此从众多“合适比例”中优选出 2 种最值得推荐的房间长、宽、高尺寸“合适比例”,它们适用于一定的房间容积范围。

在本章内容中还介绍若干涉及小房间声学设计相关国内、国外技术标准资料和发表在

声学期刊中的有关试听室、录声室、家庭视听室、琴房等方面的宝贵声学工程设计、工程实施资料,这些资料对于进行小房间声学设计的读者而言能够起到“他山之石,可以攻玉”的借鉴作用。

本书第9章列举了若干具有代表性的声学工程案例,它在一定程度上反映了国内当前声学设计、施工和声学参量测试等方面的技术水平。它们是根据几家声学技术公司朋友提供的资料写成的,是一份十分宝贵的参考资料,用来与读者分享。相信业界的朋友会从中得到启发和帮助。

本书收入的内容力图反映近年来在大、小房间声学设计中常见的应用软件情况,并加以介绍。其中包括:声学大房间设计软件 EASE,家庭听声室房间声学仿真和优化软件 CARA,房间简正模式各类计算软件,小房间长、宽、高尺寸(比例)优化软件 Room Sizer,QRD 扩散体设计软件和小房间声场测量软件 ETF 等。

综上所述,笔者把近年来所收集到的涉及小房间声学设计的相关资料介绍给读者,在一定程度上顺应了当前小房间声学设计的技术需求,为声学工作者和小房间声学工程设计者提供了技术参考。本书具有新颖性、基础性、资料性和实用性,可以作为小房间声学设计参考手册,提供相关的参考内容。也为从事吸声材料、声扩散结构及隔声结构生产厂商提供技术参考和借鉴,以便为小房间建声处理提供更多的适用产品,缩小与国外同类产品之间的技术差距。

本书正文中涉及到的原理说明、声频效果、彩色效果图片、软件操作演示等均收录到配套光盘“视频演示文件”中,涉及技术资料的进一步说明则收录到配套光盘“延伸阅读资料”文件中。它们是本书的重要组成部分,发挥了光盘介质的独特功能。

全国声学科学技术名词审定委员会委员,北京邮电大学、我的老师管善群教授在本书编写过程中给予不少技术上的支持和帮助,在百忙中对本书第2章、第8章进行了仔细审阅,提出了宝贵的修改意见;天津市声学学会理事长、天津大学建筑学院马蕙教授对本书第7章进行了认真审阅,笔者对他(她)们的支持和帮助表示诚挚的感谢。

笔者还要感谢下列单位、专家为本书第9章提供翔实的工程案例资料,他们分别是成都广艺建筑声学工程有限公司李应华先生、北京索兰时尚影音科技有限公司丁海涛先生、声博士(广州)声学技术有限公司侯明君先生。

在本书编写过程中得到了业界许多朋友的帮助,他们是王以真先生、冯松云先生、殷艺敏先生、陈建利先生、谢勇先生、帅文先生、许树檀先生、杨杰先生、高华清先生等。国防工业出版社编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动。笔者在这里向他(她)们表示衷心的感谢。本书编写过程中参阅许多声学专著、期刊和网站中的参考文献,在此向文献作者表示由衷的谢意。

在这里笔者还要特别感谢我在声学界的一位朋友罗大进先生以及他所在的深圳市合众联盟投资发展有限公司,由于他的盛情邀请使我有幸在2010年年初参加该公司由李华宾先生、陈宇天先生、陈汉钰先生一起主持召开的KTV房间声学设计研讨会,并对深圳一些有代表性的KTV房间的声学装修和音质效果情况进行了实地考察。这次深圳之行使笔者看到

了投资界有识之士的前瞻性意识,他们把改善 KTV 房间的音质作为提高服务质量的一个切入点十分难能可贵。这次研讨会提出了一个重要题目:小房间如何科学有效地进行声学设计。此行激发了笔者对小尺度房间声学设计诸多方面的强烈关注,几年过去了,本书就是为当年题目交出的一份答卷。

当今时代是一个新技术不断创新、发展的时代,是一个计算机硬件、应用软件技术不断进步的时代,在声学设计技术手段上,在建筑声学处理措施方面都在不断推陈出新,为满足小房间声学设计提供了有效的技术支持。由于笔者所掌握的资料和技术水平有限,不当之处在所难免,恳请广大读者指正。

高玉龙

2014年2月于天津

# 目 录

|   |    |                            |    |
|---|----|----------------------------|----|
| 第 1 章 概论                                | 1  | 2.2.1 声学基本概念回顾             | 14 |
| 1.1 声环境与声学用房                            | 1  | 2.2.2 房间的声学用途              | 17 |
| 1.2 小房间声学设计的经典方法                        | 1  | 2.2.3 大、小房间的界定             | 18 |
| 1.3 小房间声学设计技术的进展                        | 5  | 2.2.4 房间稳态响应频率<br>区段特征     | 20 |
| 1.3.1 设计软件                              | 5  | 2.3 大房间声学                  | 21 |
| 1.3.2 硬件支持                              | 5  | 2.3.1 声场概念                 | 21 |
| 1.4 小房间声学设计内容                           | 6  | 2.3.2 厅堂建筑声缺陷              | 22 |
| 1.4.1 确定声学大、小房间的<br>分界频率                | 6  | 2.3.3 梳状滤波器效应              | 23 |
| 1.4.2 房间简正模式计算                          | 6  | 2.3.4 混响时间及“合适<br>混响时间”    | 25 |
| 1.4.3 小房间模式简并现象<br>的对策                  | 6  | 2.3.5 房间常数                 | 29 |
| 1.4.4 大房间声学处理                           | 6  | 2.3.6 临界距离与混响<br>半径        | 29 |
| 1.4.5 其他声学处理                            | 6  | 2.3.7 声能比                  | 36 |
| 第 2 章 室内声学                              | 7  | 2.3.8 平均自由程                | 40 |
| 2.1 声学名词术语国家标准                          | 8  | 2.4 小房间声学                  | 40 |
| 2.1.1 国际标准与国家标准                         | 8  | 2.4.1 建筑物谐振现象              | 40 |
| 2.1.2 声学名词术语国家<br>标准                    | 9  | 2.4.2 房间简正模式的<br>定义        | 41 |
| 2.1.3 “声”与“音”的含义                        | 10 | 2.4.3 房间简正模式计算<br>公式       | 45 |
| 2.1.4 关于“音响”一词的<br>含义及由来                | 12 | 2.4.4 房间长、宽、高尺寸<br>合适比例的讨论 | 45 |
| 2.1.5 国标 GB/T 3947—1996<br>执行现状         | 13 | 2.4.5 非矩形房间内的简正<br>模式      | 48 |
| 2.1.6 规范“可听声”简称<br>“声”意味着一系列<br>词汇的连锁延伸 | 13 | 2.4.6 小房间混响时间<br>问题        | 50 |
| 2.2 声学房间大小的界定                           | 14 | 2.4.7 小房间声音品质——<br>声染色     | 59 |



|                        |                          |    |        |                        |     |
|------------------------|--------------------------|----|--------|------------------------|-----|
| 2.4.8                  | 降低声染色的措施                 | 61 | 3.7.1  | 概述                     | 80  |
| 2.4.9                  | 关于 LEDE 概念               | 64 | 3.7.2  | 标准运算模块                 | 80  |
| <b>第3章 声学大房间声场模拟软件</b> |                          |    | 3.7.3  | 计入反射的标准运算<br>模块        | 80  |
|                        | <b>EASE</b>              | 66 | 3.7.4  | AURA 运算模块              | 81  |
| 3.1                    | 声场模拟软件概述                 | 66 | 3.7.5  | 运算模块的实测<br>验证          | 81  |
| 3.1.1                  | ISO3382 标准               | 66 | 3.7.6  | 小结                     | 82  |
| 3.1.2                  | 室内声学测量                   | 66 | 3.8    | EASE 软件可听化功能           | 82  |
| 3.1.3                  | 声场模拟软件                   | 67 | 3.8.1  | 可听化原理                  | 83  |
| 3.2                    | EASE 软件的版本               | 67 | 3.8.2  | EASE 软件低端配置<br>的完全版可听化 | 85  |
| 3.2.1                  | EASE 不同功能配置<br>版本比较      | 67 | 3.8.3  | EASE 软件高端配置<br>的完全版可听化 | 85  |
| 3.2.2                  | EASE 程序文件<br>构成          | 68 | 3.9    | EASE 软件吸声材料数据库<br>的运用  | 86  |
| 3.3                    | EASE 正版软件的升级             | 69 | 3.9.1  | EASE 软件自带的<br>吸声材料数据库  | 86  |
| 3.4                    | EASE 软件的安装与注册            | 69 | 3.9.2  | 建立国产吸声材料<br>数据库的必要性    | 86  |
| 3.4.1                  | EASE 软件的注册<br>原理         | 70 | 3.9.3  | 建立国产吸声材料<br>数据库的可能性    | 87  |
| 3.4.2                  | EASE 正版软件的<br>授权使用       | 71 | 3.9.4  | 建立国产吸声材料<br>数据库        | 87  |
| 3.5                    | 声学模拟软件在行业中的<br>应用        | 71 | 3.10   | EASE 软件扬声器数据库<br>的运用   | 87  |
| 3.5.1                  | 高端完全版产品                  | 72 | 3.10.1 | 软件自带的扬声器<br>数据库介绍      | 88  |
| 3.5.2                  | 低端完全版产品                  | 72 | 3.10.2 | EASE 软件中扬声器<br>数据库功能分析 | 88  |
| 3.5.3                  | 初级版产品                    | 72 | 3.10.3 | 其他声学模拟软件中<br>的扬声器声源    | 96  |
| 3.5.4                  | EASE 软件在厅堂扩声<br>系统工程中的应用 | 72 | 3.10.4 | 软件国际巡回对比<br>测试         | 101 |
| 3.6                    | EASE 软件通用功能              | 73 | 3.10.5 | 小结                     | 101 |
| 3.6.1                  | 建模功能                     | 73 | 3.11   | EASE 软件适用性讨论           | 102 |
| 3.6.2                  | 建立模型的一般<br>方法            | 73 |        |                        |     |
| 3.6.3                  | 导入三维模型方法                 | 73 |        |                        |     |
| 3.6.4                  | 房间混响时间的控制                | 78 |        |                        |     |
| 3.6.5                  | 扬声器的摆放                   | 79 |        |                        |     |
| 3.7                    | EASE 软件声学参量预测<br>功能      | 80 |        |                        |     |

|              |                          |            |              |                    |            |
|--------------|--------------------------|------------|--------------|--------------------|------------|
| 3.11.1       | 软件适用房间大小                 | 102        | 5.6          | CARA 房间设计模块        | 122        |
| 3.11.2       | 软件适用声场环境                 | 102        | 5.7          | CARA 声学计算模块        | 122        |
| 3.11.3       | 声学参量预测有效频率范围             | 103        | 5.8          | CARA 二维查看模块        | 122        |
| 3.12         | 正确使用 EASE 软件             | 103        | 5.9          | CARA 三维查看模块        | 123        |
| 3.12.1       | 正版 EASE 软件的版本配置          | 103        | 5.10         | 对 CARA 软件的评价       | 123        |
| 3.12.2       | EASE 软件适用房间              | 103        | <b>第 6 章</b> | <b>小尺度房间声学测量简介</b> | <b>125</b> |
| 3.12.3       | 吸声材料的设置问题                | 104        | 6.1          | 概述                 | 125        |
| 3.12.4       | 关于声源设置问题                 | 105        | 6.1.1        | 声学大房间声学测量          | 125        |
| 3.12.5       | 小结                       | 105        | 6.1.2        | 声学小房间声学测量          | 125        |
| 3.13         | 结束语                      | 106        | 6.2          | 声学测量处理——窗函数        | 126        |
| <b>第 4 章</b> | <b>小房间简正模式计算软件</b>       | <b>108</b> | 6.2.1        | 在数字测量中信号的取样        | 126        |
| 4.1          | 概述                       | 108        | 6.2.2        | 窗函数的类型             | 126        |
| 4.2          | 房间模式—图形计算器               | 108        | 6.2.3        | 窗函数的选择             | 126        |
| 4.3          | 鲍勃·金在线房间模式计算器            | 110        | 6.3          | ETF 声学测量仪          | 127        |
| 4.4          | 安迪·梅尔彻在线房间模式计算器          | 113        | 6.3.1        | 测量原理               | 127        |
| 4.5          | 房间尺寸优化软件 Room Sizer      | 115        | 6.3.2        | 仪器构成及特点            | 129        |
| <b>第 5 章</b> | <b>家庭听声室设计软件 CARA 简介</b> | <b>117</b> | 6.3.3        | ETF 软件安装           | 129        |
| 5.1          | CARA 软件概述                | 117        | 6.3.4        | 软件界面               | 131        |
| 5.2          | CARA 培训 CD 光盘            | 117        | 6.3.5        | 测量仪功能              | 132        |
| 5.3          | CARA 测试 CD 光盘            | 118        | 6.4          | 打开一个 ETF 声学测量文件    | 133        |
| 5.4          | CARA2.2Plus 软件           | 119        | 6.4.1        | 打开一个 ETF 测量文件      | 133        |
| 5.5          | CARA 软件的安装及程序文件组成        | 120        | 6.4.2        | 查看频率特性、低频三维频谱衰减图   | 134        |
|              |                          |            | 6.4.3        | 查看混响时间、语言清晰度、音乐明晰度 | 137        |
|              |                          |            | 6.4.4        | 声能时间衰减             | 138        |
|              |                          |            | 6.4.5        | 传声器—扬声器距离          | 138        |
|              |                          |            | 6.4.6        | 查看其他特性曲线           | 139        |

|       |                    |     |       |                   |     |
|-------|--------------------|-----|-------|-------------------|-----|
| 6.5   | 新建一个 ETF 声学测量文件    | 140 | 7.3.5 | 扩散体赋形优化软件         | 190 |
| 6.5.1 | 测量方法               | 140 | 7.4   | 施罗德扩散体工作原理        | 193 |
| 6.5.2 | 关于传声器校准文件          | 141 | 7.4.1 | MLS 扩散体           | 193 |
| 6.6   | 声学器件设计师            | 141 | 7.4.2 | 一维 QRD 扩散体单元      | 194 |
| 6.6.1 | 亥姆霍兹共振吸声器          | 141 | 7.4.3 | QRD 扩散体嵌套使用       | 198 |
| 6.6.2 | 二次余数序列扩散体          | 143 | 7.4.4 | 二维 QRD 扩散体        | 200 |
| 第 7 章 | 房间建筑声学处理措施         | 144 | 7.4.5 | 扩散体设计软件 QRDude    | 201 |
| 7.1   | 概述                 | 144 | 7.4.6 | 周期性调制和非周期性调制扩散体阵列 | 212 |
| 7.1.1 | 营造房间良好听声环境的技术手段    | 144 | 7.5   | RPG 吸声与扩散产品介绍     | 215 |
| 7.1.2 | 声音吸收和扩散的研究应用       | 144 | 7.5.1 | 低频吸声结构            | 215 |
| 7.1.3 | 介绍国外吸声和扩散产品        | 145 | 7.5.2 | 透明吸声结构            | 221 |
| 7.2   | 吸声的基本原理            | 146 | 7.5.3 | 硬质吸声板             | 226 |
| 7.2.1 | 亥姆霍兹共振吸声器          | 147 | 7.5.4 | 扩散砌块              | 230 |
| 7.2.2 | 穿孔板共振吸声结构          | 151 | 7.5.5 | 二进制振幅扩散板          | 234 |
| 7.2.3 | 薄板共振吸声结构           | 153 | 7.5.6 | QRD 扩散体系列         | 236 |
| 7.2.4 | 低频吸声结构模块化          | 154 | 7.5.7 | 模压声扩散板条           | 243 |
| 7.3   | 声扩散的基本原理           | 155 | 7.5.8 | 全向扩散体             | 248 |
| 7.3.1 | 声扩散成因              | 155 | 7.5.9 | 波浪形扩散体            | 252 |
| 7.3.2 | 声扩散测量系统            | 160 | 7.6   | 吸声和扩散产品安装         | 264 |
| 7.3.3 | 声扩散评价体系——扩散系数与散射系数 | 167 | 7.6.1 | A 型安装             | 264 |
| 7.3.4 | 声扩散在房间音质设计中的作用     | 182 | 7.6.2 | C 型安装             | 264 |
|       |                    |     | 7.6.3 | D 型安装             | 265 |
|       |                    |     | 7.6.4 | 其他形式安装            | 268 |
|       |                    |     | 7.7   | 建筑隔声与减振           | 270 |
|       |                    |     | 7.7.1 | 概述                | 270 |
|       |                    |     | 7.7.2 | 隔声术语及隔声性能的评价      | 273 |
|       |                    |     | 7.7.3 | 隔声材料、阻尼材料及弹性构件    | 278 |
|       |                    |     | 7.7.4 | 单层墙体隔声处理          | 286 |
|       |                    |     | 7.7.5 | 双层墙体隔声处理          | 286 |

|            |                      |            |            |                   |            |
|------------|----------------------|------------|------------|-------------------|------------|
| 7.7.6      | 地板隔声与减振处理            | 291        | 8.3.4      | 小房间吸声处理           | 343        |
| 7.7.7      | 天花板隔声与减振处理           | 297        | 8.3.5      | 小房间声扩散处理          | 345        |
| 7.7.8      | 门、窗隔声处理              | 302        | 8.3.6      | 小房间隔声处理           | 349        |
| 7.7.9      | 房中房隔声处理              | 302        | 8.3.7      | 扬声器的布局            | 353        |
| <b>第8章</b> | <b>小房间声学设计</b>       | <b>304</b> | 8.4        | 各类小房间声学设计         | 363        |
| 8.1        | 房间容积与临界频率关系          | 304        | 8.4.1      | 专业试听室             | 363        |
| 8.1.1      | 不同容积房间简正模式分析         | 304        | 8.4.2      | 录声室               | 374        |
| 8.1.2      | 临界频率与声学大房间的下限工作频率    | 304        | 8.4.3      | 家庭视听室             | 387        |
| 8.2        | 声学设计所考虑的因素           | 306        | 8.4.4      | 数字立体声电影院          | 390        |
| 8.2.1      | 小房间声学设计思路            | 306        | 8.4.5      | 琴房                | 399        |
| 8.2.2      | 简正频率分布均匀度的统计         | 307        | 8.4.6      | KTV娱乐房间           | 407        |
| 8.2.3      | 对房间驻波“简并”现象的深入探讨     | 309        | 8.4.7      | 小结                | 410        |
| 8.2.4      | 对房间长、宽、高尺寸合适比例推荐值的评估 | 312        | 8.5        | 本章重要内容摘要          | 412        |
| 8.2.5      | 房间长、宽、高尺寸比例的优化       | 321        | <b>第9章</b> | <b>声学工程案例</b>     | <b>417</b> |
| 8.2.6      | 扬声器边界干扰              | 326        | 9.1        | 天津某部队疗养院数字电影放映厅工程 | 417        |
| 8.2.7      | 梳状滤波器效应              | 331        | 9.1.1      | 工程甲方提供的原始资料及要求    | 417        |
| 8.2.8      | 声扩散问题                | 332        | 9.1.2      | 关于更改放映厅布局的建议      | 418        |
| 8.3        | 小房间声学设计综述            | 332        | 9.1.3      | 影院房间尺寸优化计算与分析     | 418        |
| 8.3.1      | 扬声器声与真实声有何不同         | 332        | 9.1.4      | 建立计算机模型           | 419        |
| 8.3.2      | 小房间简正模式处理            | 337        | 9.1.5      | 吸声材料设置            | 420        |
| 8.3.3      | 小房间声环境的营造——混响时间参考标准  | 340        | 9.1.6      | 混响时间特性            | 422        |
|            |                      |            | 9.1.7      | 扬声器的设置            | 423        |
|            |                      |            | 9.1.8      | 声学参量模拟            | 424        |
|            |                      |            | 9.1.9      | 竣工现场图片            | 425        |
|            |                      |            | 9.1.10     | 甲方评价              | 425        |
|            |                      |            | 9.1.11     | 本节案例点评            | 425        |
|            |                      |            | 9.2        | 四川音乐学院录声室声学工程     | 426        |
|            |                      |            | 9.2.1      | 概述                | 426        |
|            |                      |            | 9.2.2      | 声学设计内容和依据         | 426        |

|       |                       |     |       |                      |     |
|-------|-----------------------|-----|-------|----------------------|-----|
| 9.2.3 | 录声室声学设计               | 427 | 9.5.1 | 对展厅隔声效果的初步评估         | 473 |
| 9.2.4 | 控制室声学设计               | 432 | 9.5.2 | 在现有装修条件下声学特性分析       | 475 |
| 9.2.5 | 录声室声学装修施工             | 435 | 9.5.3 | 原本展厅声学设计可以做得更好       | 475 |
| 9.2.6 | 控制室声学装修施工             | 442 | 9.5.4 | 在现有装修条件下声学设计补救方案     | 477 |
| 9.2.7 | 声学测量                  | 446 | 9.5.5 | 在现有装修条件下所采用的最终声学设计方案 | 480 |
| 9.2.8 | 本节案例点评                | 452 | 9.5.6 | 本节案例点评               | 482 |
| 9.3   | 湖北、北京三个家庭影院声学工程       | 454 | 附录    |                      | 483 |
| 9.3.1 | 湖北宜昌视听室工程             | 454 | 附录1   | 厅堂建筑合适混响时间的参考曲线      | 483 |
| 9.3.2 | 蒋府庄园家庭影院工程            | 458 | 附录2   | 钢琴键盘对应频率分布           | 483 |
| 9.3.3 | 龙湾别墅超现代风格的家庭影院工程      | 461 | 附录3   | 亥姆霍兹共振吸声器构建材料列表      | 486 |
| 9.3.4 | 本节案例点评                | 464 | 附录4   | 不同频率间隔表示方式对照表        | 490 |
| 9.4   | 东莞“音乐大师”音箱公司家庭影院试听室工程 | 467 | 附录5   | 30种比例筛选示意图           | 493 |
| 9.4.1 | 建筑声学设计                | 467 | 附录6   | 光盘内容                 | 493 |
| 9.4.2 | 声学装修工程实施              | 469 | 参考文献  |                      | 494 |
| 9.4.3 | 混响时间测试                | 471 |       |                      |     |
| 9.4.4 | 本节案例点评                | 471 |       |                      |     |
| 9.5   | 某公司扬声器产品北京展示厅兼试听室工程   | 473 |       |                      |     |

# 第1章 概 论

我们每天起床后就会听到各种声音,室内的说话声,室外的汽车鸣笛,马路车辆的行驶声,等等,声音无所不在。因此,在某种意义上可以说,人类生活在一个声音的世界。声音可以分为语言声、音乐声、自然声和噪声几个类别。对于我们所需要听到的语言声和音乐声,应该做到听得清楚,需要满足一定的音质指标要求。

## 1.1 声环境与声学用房

有许多房间对于声学环境具有一定要求,我们称之为声学用房。声学用房小到录声室、家庭影院、音乐听声室、琴房、会议室等,大到剧场、音乐厅、体育馆、火车旅客候车室等。它们对音质的要求各有不同,有的只要能够听得清楚就可以(例如会议室、体育馆、旅客候车室等),有的不仅要听得清楚,还要具有一定的临场氛围和环绕感(例如剧场、音乐厅、家庭影院)。但是在室内完全做到这一点,并非是一件容易的事情。需要声学工作者进行科学的设计和严格的工程实施,才能营造一个良好的声环境,实现这一目标。

上述声学用房的容积有大有小。如何对这些房间的大小进行界定我们将在第2章有关章节进行介绍。但是粗略地进行分类可以分为小尺度(容积比较小)房间和大尺度(容积比较大)房间。小尺度房间容积从几十立方米到数百立方米;而大尺度房间容积则从 $1000\text{m}^3$ 起向上扩展到二三十万立方米。

关于大尺度房间的声学设计问题,在一般声学书籍里都有介绍。包括传统声学设计方法和计算机辅助设计方法。涉及大尺度房间(严格地讲,应该是声学意义上的大房间)声学设计的计算机辅助设计软件,如 EASE、Odeon、CATT 等在国内均有用户使用,在室内声学设计中发挥了一定作用。

随着计算机辅助设计技术的发展,作为一种流行趋势,人们对(声学意义上的)大房间声场模拟软件 EASE 软件在业界使用日益增多,但大多还停留在相信软件能帮我们做许多事情的必然王国阶段,对于软件的深层次的工作原理了解不多,对于软件所适用的各种先决条件知之甚少,对于使用中存在的种种误区无法有效摆脱。因此本书第3章将对这些问题加以论述。

## 1.2 小房间声学设计的经典方法

### 1. 现状

关于小尺度房间声学设计问题虽然在声学书籍里“驻波的生成及相应公式”均有介绍,但大都停留在原理方面,具体可操作性尚需条理化、规范化。

目前,对于小房间设计也存在一些误区,有人完全仿照大房间的设计方法,对房间界面设置不同吸声材料,结果音质效果欠佳。有的一直以来还停留在使用驻波公式计算几个轴向模式,大致选定矩形房间长、宽、高合适(比例)尺寸的初级设计阶段。国内有一些声学技

术公司,特别是从事家庭影院、KTV 等小房间工程的公司,已经在针对小房间的声学特点进行了某种程度的计算机辅助设计,并收到了一定的实际效果。然而目前在业界普及程度上存在一定的局限性,远远无法和 EASE 软件的普及程度相比。

本书第 2 章将讨论声学大、小房间容积界限。可以看出,对于小尺度房间按其工作频率考虑可以表现为两种情况:当工作频率低于临界频率(声学大房间低频下限频率)称为声学意义上的小房间;当工作频率高于临界频率称为声学意义上的大房间。所以小尺度房间的声学设计需要考虑整个工作频段的声学设计。

声学意义上的小房间声场不同于声学意义上的大房间声场。前者处于声场的简正(驻波)模式区段;而后者处于声场扩散区及声场镜像反射区。声场不同则进行声学处理所采取的措施也就有所不同。

有鉴于此,如何科学地、系统地进行小房间声学设计,国内尚无反映当代设计技术进展的相关专门声学著作。

## 2. 经典设计方法

笔者几年前曾经见过一本由美国 F·爱尔顿·埃弗莱斯特著,孟昭晨译的书名为《家庭和播音室声学技术》的图书<sup>[1]</sup>,由电子工业出版社 1984 年出版。该书介绍了室内谐振现象、监听室和小播声室中的驻波、声音在小房间中的扩散、吸声及混响计算、播声室的声学设计、声学效果的调整和鉴定等内容。其中播声室声学设计是本书的核心内容。

播声室是由主播声室、语言播声室和控制室 3 个独立的小房间组成,分别进行设计。

主要设计思路是:

(1) 计算房间轴向简正模式频率排列即查看其频率间隔,以便确定是否存在简正频率简并而引起的声染色现象;

(2) 根据房间容积确定房间最佳(合适)混响时间,作为设计目标值;

(3) 根据混响时间设计目标值考虑房间地板、天花板、四面墙壁的声学处理(列出相应的吸声材料),并计算相应的混响时间。

(4) 分别绘制出房间地板、天花板、四面墙壁的吸声材料布置细节图,以便指导声学装修工程实施。

下面我们给出“播声室声学设计”中主播声室设计相关图表,供读者参考。

### 1) 播声室布置图

考虑到播声室附近具有比较高的环境噪声,所以隔声门采用声闸结构,提高隔声效果如图 1-1 所示。

### 2) 简正频率排列

主播声室轴向简正频率排列列于表 1-1 中。

从表 1-1 可知,轴向简正模式频率较低时,频率间隔更密些。该书作者认为,300Hz 以下的轴向简正模式频率间隔最大为 19Hz,没有超过 20Hz,所以主播声室似乎不受轴向简正模式声染色现象的影响。

### 3) 混响时间

图 1-2 给出小播声室和监听室最佳混响时间与房间容积关系,作为考虑播声室混响时间设计目标值。

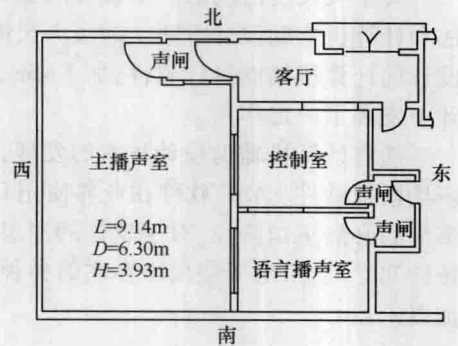


图 1-1 播声室平面布置图

表 1-1 主播声室简正模式频率排列

| 轴向简正模式<br>频率排列/Hz | 频率间隔/Hz | 轴向简正模式<br>频率排列/Hz | 频率间隔/Hz | 轴向简正模式<br>频率排列/Hz | 频率间隔/Hz |
|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| 19                | 8       | 132               | 1       | 228               | 15      |
| 27                | 11      | 133               | 2       | 243               | 4       |
| 38                | 6       | 135               | 17      | 247               | 17      |
| 44                | 10      | 152               | 10      | 264               | 2       |
| 54                | 3       | 162               | 9       | 266               | 4       |
| 57                | 19      | 171               | 5       | 270               | 15      |
| 76                | 5       | 176               | 13      | 285               | 12      |
| 81                | 7       | 189               | 1       | 287               | 7       |
| 88                | 7       | 190               | 19      | 304               | 4       |
| 95                | 13      | 209               | 17      | 308               |         |
| 108               | 6       | 216               | 4       |                   |         |
| 114               | 18      | 220               | 8       |                   |         |

主播声室容积为  $226\text{m}^3$ , 用于音乐最佳混响时间约为  $0.75\text{s}$ , 用于语言最佳混响时间约为  $0.53\text{s}$ 。由于这间播声室既用于音乐, 又用于语言, 兼顾二者应用因此选择  $0.64\text{s}$  作为设计目标值。

4) 吸声处理

(1) 地面处理。在  $54.1\text{m}^2$  的地面铺设地毯, 在其下面铺一层泡沫橡胶。

(2) 天花板处理。采用水泥屋顶, 并按照图 1-3 中  $3\text{ft}$  见方 ( $900\text{mm} \times 900\text{mm}$ ) 的方格布置横截面为  $200\text{mm} \times 50\text{mm}$  的木支撑。凡标有 LF 字样的方块都安装有低频峰值 ( $125\text{Hz}$ ) 吸声板, 其中穿孔吸声罩板的穿孔率为  $0.5\%$ 。孔径为  $4.4\text{mm}$ , 孔中心距为  $6 \sim 25\text{mm}$  均可。具有一定硬度的玻璃纤维板仅贴在罩板后面, 如图 1-3 中标注所示。吸声板与水泥屋顶之间的空腔需要有较好的密封性, 为此采用树脂胶把木撑紧紧贴在水泥屋顶上, 并在方框内加一圈填缝料。没有标注 LF 字样的方块则直接露出水泥屋顶。

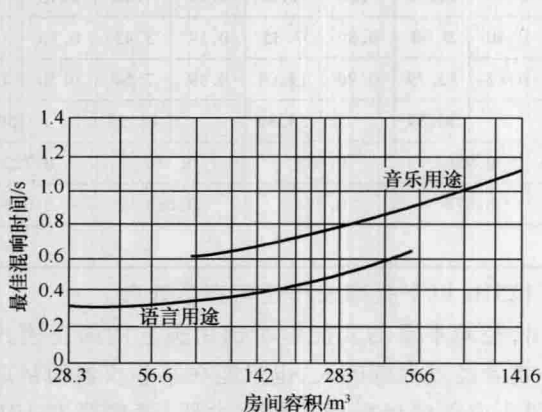


图 1-2 小播声室和监听室最佳混响时间与房间容积关系



图 1-3 天花板低频吸声布局



(3) 墙壁处理。图 1-4 是主播声室墙壁展开图,图中标有 54 个尺寸为 610mm × 1220mm 的吸声板的位置。标有 LF 字样的为低频峰值(125Hz)吸声板,穿孔率与天花板一样为 0.5%,共计 33 块。而标有 MF 字样的为中频峰值(250Hz)吸声板,穿孔率为 5%,共计 21 块。

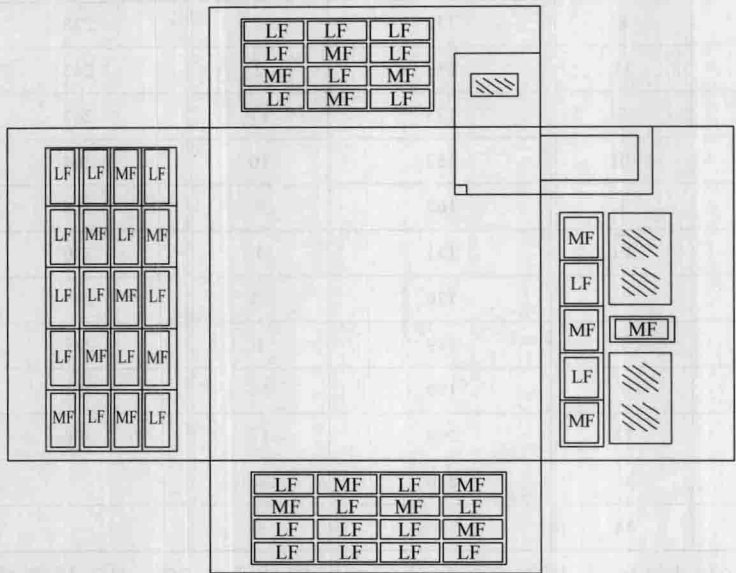


图 1-4 主播声室墙壁吸声材料布置图

(4) 混响时间计算。依照相应的吸声材料计算房间的混响时间(从 125 ~ 4000Hz 按倍频程计算共 6 个频率点),以便和设计目标值进行对比。这里除了采用表 1-2 的吸声材料之外,墙壁、水泥屋顶、玻璃窗、隔声门由于吸声量比较小,因此在混响时间计算中忽略之。如果考虑这些因素,则计算的混响时间值还会略有下降。

表 1-2 主播声室混响时间计算表

| 吸声材料                   | 面积/m <sup>2</sup> | 125Hz    |          | 250Hz    |          | 500Hz    |          | 1000Hz   |          | 2000Hz   |          | 4000Hz   |          |
|------------------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                        |                   | <i>a</i> | <i>A</i> | <i>a</i> | <i>A</i> | <i>a</i> | <i>A</i> | <i>a</i> | <i>A</i> | <i>a</i> | <i>A</i> | <i>a</i> | <i>A</i> |
| 地毯                     | 55.0              | 0.00     | 0.00     | 0.05     | 2.75     | 0.26     | 14.30    | 0.40     | 22.00    | 0.60     | 33.00    | 0.65     | 35.80    |
| 天花板 LF                 | 35.0              | 0.74     | 25.90    | 0.53     | 18.60    | 0.40     | 14.00    | 0.30     | 10.50    | 0.14     | 4.90     | 0.16     | 5.60     |
| 墙壁 LF                  | 24.5              | 0.74     | 18.10    | 0.53     | 12.99    | 0.40     | 9.80     | 0.30     | 7.35     | 0.14     | 3.43     | 0.16     | 3.92     |
| 墙壁 MF                  | 15.6              | 0.60     | 9.36     | 0.98     | 15.29    | 0.82     | 12.79    | 0.90     | 14.04    | 0.49     | 7.64     | 0.30     | 4.68     |
| 总吸声量(赛宾)               |                   |          | 53.36    |          | 49.63    |          | 50.89    |          | 53.89    |          | 48.97    |          | 50.00    |
| 赛宾 RT <sub>60</sub> /s |                   | 0.675    |          | 0.728    |          | 0.756    |          | 0.658    |          | 0.736    |          | 0.722    |          |
| 艾润 RT <sub>60</sub> /s |                   | 0.595    |          | 0.615    |          | 0.678    |          | 0.578    |          | 0.658    |          | 0.645    |          |

① 表中 *a* 为吸声系数; *A* 为吸声量

虽然简正模式计算从 30 ~ 300Hz,但是 125Hz 以下频率未作任何声学处理。

(5) 声染色现象的识别方法。该书指出,经验丰富的人能够听出由孤立的简正模式引起的声染色现象,但是即使是具有鉴别能力或者经过训练的人,也只能在某些仪器的帮助下才能识别和评价声染色现象。英国广播公司研究部曾经采用选频放大器(通频带宽 10Hz)将选频频谱高于未选频谱电平 25dB,并将其输出以很小的比例混入原始声音,由扬声器进行重放。调整它们之间的比例,直到我们听不出选频放大器的输出对整个输出的影响为止。