

专著 西北工业大学
出版基金 ZIZHU XIAOYANG MU

ZHUANZHU

声场视听一体化原理及应用

曾向阳 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

声场视听一体化原理及应用

曾向阳 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍了封闭空间声场视听一体化的原理、实现及应用中的一系列问题。全书共分七章,内容包括声场模拟技术的研究背景、国内外的 processes; 封闭声场可听化、可视化和视听一体化的概念和原理; 以自行研制的声场视听一体化系统 CAVS 为例给出可听化、双耳可听化以及视听一体化的实现方法; 声线跟踪法、虚声源法、有限元法、波导网格法、统计能量分析法等声场数值模拟方法; 关于复杂声场模拟的一系列算法; 通过实例对声场音质的客观评价和主观评价方法系统的阐述; 散射系数、吸声系数、头相关传递函数等与声场模拟有关的参数的实验测量原理与方法; 声场视听一体化的应用领域和典型应用实例。

本书反映了声场计算机模拟研究的最新进展,立足于基础理论,涉及面广,综合性强,对从事建筑音质设计、结构噪声预测、虚拟现实系统设计和空间听觉仿真等工作的专业人员、高等院校教师和研究生有较高的学术参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

声场视听一体化原理及应用/曾向阳著. —西安:西北工业大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-5612-2191-4

I. 声… II. 曾… III. ①音频设备 ②家庭影院
IV. TN912.271 TN946.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 030828 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:029-88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印刷者:陕西友盛印务有限责任公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:9.625

字 数:233 千字

版 次:2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

版 次:1~2 000 册

定 价:18.00 元



曾向阳，1974年4月生于湖北省，工学博士；副教授，硕士研究生导师。中国声学学会会员，欧洲声学学会通讯会员。先后于1997年、2000年和2002年获得西北工业大学学士、硕士和博士学位。现为西北工业大学航海学院环境工程系副主任。

主要从事封闭声场计算机模拟和声学目标识别方面的教学与研究工作。先后主持国家自然科学基金、国防预研基金等课题5项，参加其他类课题8项；在《Journal of Sound & Vibration》、《Applied Acoustics》、《声学学报》等重要刊物和国内外学术会议上发表论文50余篇，其中被SCI、EI等检索30余篇；博士学位论文获得全国百篇优秀博士学位论文提名；获省部级科研成果奖励3项。2003年入选西北工业大学英才培养计划；2004年4月破格晋升为副教授；2004—2005年在丹麦技术大学奥斯特学院声学系从事访问学者工作。

前 言

现实生活里,人们总是不可避免地处于各种声环境之中,其中又以封闭声环境居多,包括居室、办公室等日常场所,飞机、舰艇、汽车舱室等特殊结构,音乐厅、剧院等声学建筑,教堂、教室、地铁站等专用场所,等等。由于种种原因,这些场所内部的声学设计一直都是建筑或制造领域的一项技术难题。

以建筑声学设计为例,在过去很长的时期内,要么以建筑设计人员(许多不太懂声学)的主观经验为主,要么偏信于少数权威声学专家(有的不懂建筑设计),这经常造成一些建筑完工后达不到预期的音质要求,以至于曾有“聋子设计师”和“瞎子声学家”的说法。所幸的是,从20世纪50年代以来,声学缩尺模型方法得到了快速发展,在实际建筑音质设计中发挥了重要的作用,很大程度上改变了前述的尴尬境况。缩尺模型技术对于其他封闭结构的声学设计也同样适用,但由于这类方法所需要的技术水平和经济成本较高,其应用往往局限于一些大型项目,而难以向更大的范围推广。

近年来,声场数值计算理论、计算机软硬件技术和信号处理理论都发展得十分迅速,为研究新的数字式的声场模拟技术创造了良好的条件。同时,人们对生活质量(声环境质量也是其重要内涵)要求的全面提高也为数字式声场模拟技术的发展提供了机遇和动力。如今,利用数字式方法对封闭结构内部的声环境进行模拟或虚拟仿真已经成为了现代声学研究领域中的一个热点方向。

国外在声场计算机模拟方面的研究始于20世纪60年代,最先在德国、日本、丹麦、瑞典、挪威等少数发达国家受到重视,并在

20 世纪 90 年代前后一度达到研究的高潮时期。现在,已有许多国家的研究机构在开展这方面的工作,其应用领域也在不断拓宽。近年来,相继诞生的一批商品化软件已在不少声学设计工程实践中得到了应用,这表明声场计算机模拟已开始步入实用化阶段。国内的研究始于 20 世纪 90 年代,由于起步较晚,加上应用需求不足和经费投入不够等原因,总体研究规模较小,多属于跟踪研究或利用国外的软件进行仿真研究,成功的应用案例也相对较少。

90 年代中后期,笔者及合作者开始从事声场模拟研究工作。针对当时国内外的的发展状况,将热点技术——声场可听化和可视化——结合,提出了声场视听一体化的概念,并在此后的近 10 年里一直坚持该方向的研究工作。2004—2005 年,笔者在丹麦技术大学奥斯特学院声学技术系(Acoustic Technology, Ørsted-DTU)从事访问学者工作期间,直接参与了著名的建筑声学模拟软件 ODEON 的升级算法研究工作,并与该软件的主管 Jens Holger Rindel 和研制者 Claus Lynge Christensen 等一起利用该软件对多个实际建筑结构进行了模拟计算,从而对声场模拟理论和应用有了更深入的了解,也感到国内在基础理论研究、应用软件开发及推广等方面与国外还存在着较大的差距。

要尽快缩小这种差距,急需一些基础性强、内容全面的论著,但是目前国内还没有一本这方面的专著。近 10 年来,国际上关于可听化和可视化的学术论文大量涌现,并呈逐年增加的趋势。但是,这些论文大都针对专门的应用领域,如结构声学设计、建筑音质设计、音频处理等,对基础理论和相关应用的阐述往往不够系统和全面,更鲜有综合介绍声学指标预测、可听化、可视化及其应用的著作。实际上,无论是结构声学设计、建筑音质设计、音频处理,还是虚拟现实等领域,在基础理论方面都存在着一个重要的交集——声场模拟理论。因此,笔者萌发了编写一本关于声场可听化和可视化模拟的专著的想法。经过近两年的筹备,本书终于得

以完成。

本书是国内第一本专门介绍封闭空间声场计算机模拟的专著,书中包括了笔者及合作者近 10 年来的研究成果,也对国内外有代表性的同行的研究工作进行了介绍。全书共分七章,第一章阐述了声场模拟技术的研究背景、国内外的研究状况以及应用前景。第二章重点探讨了声场视听一体化的原理,包括封闭声场的基本理论、声场可听化、可视化和视听一体化的概念和原理,并以自行研制的声场视听一体化系统 CAVS 为例详细介绍了可听化、双耳可听化以及视听一体化的实现方法与具体过程。第三、四章详细阐述了各种声场数值模拟方法,包括声线跟踪法、虚声源法、声束跟踪法等中高频几何声学方法,有限元法、波导网格法等低频波动声学方法,以及辐射度法、统计能量分析法等能量分析方法,其中也包括笔者建立的一些算法,如改进的声线跟踪算法、考虑相位的虚声源法、声场神经网络预测方法、多种复杂声场条件的模拟算法等。第五章区分客观声学指标评价和主观可听化评价,通过实例对声场音质评价方法进行了系统的阐述。第六章简要介绍了与声场模拟有关的实验测量技术,包括脉冲响应、散射系数、吸声系数、头相关传递函数的测量方法。在最后一章中,列举了声场视听一体化的应用领域,对于建筑音质设计等已经获得成功应用的领域,给出了一些典型的应用实例,对那些潜在的应用领域作了分析和展望,最后指出了声场视听一体化的发展方向。

本书的主要内容来源于笔者及合作者近年来从事声场模拟研究工作而撰写的学术论文。这些研究工作得到过方方面面的支持,包括“小尺度封闭空间声场视听一体化理论研究”和“舱室噪声场音质预测新方法”2 项国家自然科学基金以及“舱室声场视听虚拟现实理论研究”等 3 项西北工业大学研究基金的资助。在研究过程中得到过许多专家的指导,包括西北工业大学环境工程研究所陈克安教授和孙进才教授、西北工业大学声学工程研究所马远

良院士、华南理工大学建筑系吴硕贤院士、丹麦技术大学声学系 Jens Hogler Rindel 教授、英国 Salford 大学 Yui Wai Lam 教授等声学专家,以及那些未署名的论文评审专家们,在此向他们表示深深的感谢。也要感谢参加过有关研究工作的本科生、研究生以及为研究工作提供过帮助的同行们。还要感谢国家留学基金委、丹麦政府奖学金和丹麦技术大学,为笔者提供了在本领域著名研究机构从事学术交流的宝贵机会。感谢英国谢菲尔德大学建筑系的 Kang Jian 教授对笔者工作的肯定及向笔者发出访问邀请。另外,本书的出版由西北工业大学专著出版基金资助,特此表示感谢。

最后需要指出的是,本书在构思和撰写时,刻意淡化了笔者研究声场视听一体化的初衷(舱室声场预测),力图不将研究思想、方法 and 应用局限于某一两个领域,以便于有更多的国内研究人员可以对这方面的工作有所了解。如果本书能够为舱室噪声场预测与控制、建筑音质设计、虚拟现实、心理声学、音频处理或其他与声学相关领域的研究人员提供一定的参考,笔者将深感荣幸和欣慰。

尽管笔者已竭尽所能,力图做到尽善尽美,但由于水平所限,必定存在错漏之处,望读者不吝指正。

作 者

2006 年 10 月

目 录

第一章 声场模拟概论.....	1
1.1 引言	1
1.2 声场模拟概论	4
1.2.1 国内外发展状况	4
1.2.2 分支研究方向.....	12
1.2.3 应用前景.....	15
参考文献	17
第二章 封闭声场视听一体化原理及实现	20
2.1 封闭声场中的典型声学现象.....	20
2.1.1 基本声学现象.....	20
2.1.2 扩散.....	22
2.1.3 混响.....	25
2.2 数字式声场模拟基本原理.....	28
2.3 声场可听化.....	31
2.3.1 可听化的概念.....	31
2.3.2 基于缩尺模型的可听化.....	32
2.3.3 数字式可听化.....	33
2.4 双耳可听化.....	38
2.4.1 HRTF 的概念	38
2.4.2 HRTF 的获取方法	40
2.4.3 基于神经网络法的 HRTF 预测	44

2.4.4 双耳可听化模拟实例	49
2.5 声场可视化	54
2.5.1 可视化的概念	54
2.5.2 可视化设计方法与工具	57
2.6 声场视听一体化	60
2.6.1 视听一体化原理	60
2.6.2 视听一体化系统开发实例	62
2.7 本章小结	73
参考文献	73
第三章 声场视听一体化中的数值模拟方法	77
3.1 基于几何声学的声场模拟方法	78
3.1.1 声线跟踪法	79
3.1.2 虚声源法	92
3.1.3 混合法	100
3.1.4 声束跟踪法	106
3.1.5 几种几何声学方法的比较	109
3.2 基于波动声学的声场模拟方法	112
3.2.1 有限元法	112
3.2.2 波导网格法	119
3.2.3 其他常用的波动声学方法	124
3.2.4 几种波动声学方法的比较	126
3.3 基于能量分析的声场模拟方法	127
3.3.1 辐射度法	128
3.3.2 统计能量分析法	132
3.4 本章小结	135
参考文献	136

第四章 复杂声场模拟中的改进算法	141
4.1 复杂声学现象的模拟方法	141
4.1.1 声散射的模拟	141
4.1.2 声衍射的模拟	147
4.2 复杂声场的数值模拟方法	152
4.2.1 复杂声源	153
4.2.2 复杂声障碍物	164
4.2.3 复杂界面	172
4.2.4 声接收方法的改进	179
4.3 本章小结	186
参考文献	187
第五章 声场视听一体化中的音质评价方法	191
5.1 声学指标及其数值模拟方法	191
5.1.1 常用的封闭声场评价指标	191
5.1.2 声学指标的计算机模拟	198
5.1.3 基于神经网络的声学指标预测	205
5.1.4 声学指标算例	207
5.2 声学指标的相关性分析	213
5.2.1 相关性分析方法	213
5.2.2 常用声学指标的相关性分析	214
5.3 声学指标模拟精度的影响因素分析	216
5.3.1 模型精细程度与声学指标模拟精度的关系	217
5.3.2 外部参数对声学指标模拟精度的影响	223
5.4 可听化的主观评价方法	227
5.4.1 音质主观评价词汇集	227
5.4.2 可听化音质的定量评价方法	229

5.4.3 可听化音质的统计评价方法	232
5.4.4 基于波形相似度分析的可听化效度评价 ...	236
5.5 本章小结	238
参考文献	238
第六章 声场视听一体化中的测量技术	240
6.1 声学指标的测量	240
6.1.1 测量原理	240
6.1.2 测量设备与测量过程	241
6.2 HRTF 的测量	244
6.3 吸声系数的测量	246
6.4 散射系数的测量	259
6.5 本章小结	261
参考文献	262
第七章 声场视听一体化的应用及发展前景	263
7.1 声场视听一体化的应用	263
7.1.1 建筑音质设计与评价	264
7.1.2 机动体舱室结构声学设计	271
7.1.3 工业噪声预测和评估	275
7.1.4 虚拟现实系统设计	278
7.1.5 其他相关领域的应用	280
7.2 声场视听一体化的发展前景	283
参考文献	286
附录	289
附录 1 驻波管法测量吸声系数中的参数关系表	289
附录 2 名词术语中英文对照	291

第一章 声场模拟概论

1.1 引言

声学是一门既古老又年轻的学科,具有很强的外延性和广阔的应用前景,也因此而在物理学中独树一帜。自 1877 年瑞利的《声学理论》一书出版至今,现代声学已经经过了 120 多年的发展,形成了水声学、电声学、建筑声学、心理声学、语言声学等 10 多个分支学科。从本质上看,这些分支学科研究的问题都是围绕声波的产生、传播与接收(三者构成一个完整的声场系统)而展开,只是研究的侧重点或应用条件不尽相同。因此,声场系统的研究可以作为上述各个分支学科的基础。

本书的研究对象是各种封闭结构(如舱室、厅堂)或半封闭结构(如无顶剧院)内部的声场系统,研究重点是这些声场系统的模拟方法,研究内容属于建筑声学、电声学、心理声学、信号处理和计算机科学的交叉领域。

众所周知,普通人的一生中绝大部分时间是在各种封闭结构(如房间)内度过的,而听觉又是人类仅次于视觉的获取外界信息的重要工具,也是人体最灵敏的感觉功能,因此,研究封闭空间中的听音环境是一项具有重要意义的工作。除了普通居室环境外,现实中还有许多特殊的封闭声场,一类是音乐厅、歌剧院等大型观演场所。由于音质好坏是决定演出成功与否的关键因素之一,因而这类建筑的设计中对音质设计的要求很严格,可以上升到艺术的高度。另一类是飞机、舰船、火车等机动体的内部舱室,它们大

多是人机共存的特殊环境。在设计这些机械结构时,声学设计同样不可忽视。其中,最基本的要求是降低噪声。从长远来看,飞机、舰船等除了必须有安全性、稳定性方面的保障外,还应当尽可能满足使用者的个性化需求,一个很重要的方面就是改善内部的听觉舒适度。在军事领域,机动体舱室内部声场的预测与控制不仅是增加操作人员舒适程度的需要,也是隐蔽己方战备,从而提高整机作战能力的要求。因此,研究各类封闭结构内部的声场具有重要的理论价值和广阔的工程应用前景。

对封闭声场进行研究的主要目标是保证身处其内的人具有满意的听闻效果。这里用的是“满意”一词,而非通常音质设计中提到的“良好”,区别在于,后者仅强调了以听闻效果好为目的,而前者含义更加广泛,它既包括大多数情况下所需要的好的音质,也包括那些听闻效果可能并不理想,但却恰好符合预期要求的特殊情况(例如,声聚焦现象是各类型声学建筑设计中应该避免的,但在一些声景观设计,它却可能正是设计者的目标)。

为了获得满意的听闻效果,对封闭或半封闭结构内部声场的研究通常集中于三个方面:评价、控制、模拟(或预测)。它们既有区别,又有着紧密的联系。过去很长的时期内,声场控制和评价更受重视,国际上早已出现了关于它们的系列标准。作为基础环节的声场模拟或预测在实际应用中却没有发挥关键性的作用,原因在于:过去要么只是依靠简单的估算或统计分析来进行声场预计,缺乏可靠性;要么通过建立物理模型进行试验,经济成本较高。近年来,随着各种条件的日益成熟,声场模拟技术越来越受到青睐,并似乎已开始逐渐在三者的关系中占据中心地位。经过评价的声场往往要进行某种控制,经过控制的声场的效果反过来又需要加以评价,而评价的依据就是声场中的音质指标和主观听闻效果。通过声场模拟,特别是数字式的模拟方法,能够快速获得声场内部的客观音质评价指标或主观听闻效果,因而无论是对于声场评

价还是声场控制,都具有重要的作用。

其实,早在 2000 多年前,古人就已开始尝试建立一些特殊结构的声场以达到某种声学效果。例如,公元前一世纪,在罗马建筑师维特鲁威所写的《建筑十书》中就记述了古希腊剧场中的音响调节方法,如利用共鸣缸和反射面增加演出的音量等;在中世纪,欧洲一些教堂采用巨大的内部空间和吸声性能弱的墙面,以产生较长的混响声,有助于形成神秘的宗教气氛;中国北京天坛的回音壁作为一种设计独到、保存完好的典型声学景观,至今也已经有 400 多年的历史。不过,那时的人们由于并没有完全掌握声音产生和传播的基本物理规律,也就谈不上对声场的研究,所以往往只能对封闭声场作一些局部调节,而难以对整个声场进行模拟和控制,更谈不上评价。

这种状况在近 100 年来已经逐渐得到改观,随着不断的研究和探索,现代声学理论已日趋完善,人们有足够的理论依据来按照预想的目标设计出各种声学结构,其他相关学科的发展,特别是计算机和电声测量技术的发展,也为实现这种预想目标创造了良好的条件。

20 世纪初,随着缩尺模型(Scale Model)技术的出现,人们能在实验室中建立待建造结构的按比例缩小的物理模型,当使其符合一定的声学要求后,再依比例建造出实物结构。尽管这种方法有一定的局限性,但迄今为止,它仍然是一种可选择的声场模拟手段,而且在其发展过程中也建立起了一系列理论或方法,如声场系统理论、声场评价指标体系等,它们对今天的声场模拟研究工作仍然具有重要的指导意义。

近 20 年来,计算机软硬件技术得到了迅猛的发展,为人们提供了更为便捷的声场模拟途径,即数字式声场模拟方法,简单地說就是利用计算机模拟声场。现在,这方面的研究已经由早期的二维模型发展为三维模型,计算精度和计算速度也都有了很大的提

高。作为一种全新的声场研究思路,数字式声场模拟已经进入蓬勃发展阶段,并已开始在国内生产和军事科研领域发挥重要的作用。

在不久的将来,声学工作者完全有可能实现这样的梦想:头戴耳机,面对计算机显示屏,随着手指的轻轻移动,即可构思和设计任意形状的封闭结构,并可以跟随鼠标的指示,实时听到其中任何位置的3D真实感音质效果。这不仅是声学研究者的理想,也是建筑设计师、飞机和汽车设计师等设计人员以及虚拟现实(Virtual Reality)研究人员的共同愿望。

1.2 声场模拟概论

首先给声场模拟下一个定义,即利用物理的或数学的方法建立(存在的或虚拟的)声场的模型,并以电子测量、计算机和信号处理等技术作为工具,对声场内的声学行为、现象和特性进行模拟的一种研究方法。

由上述定义不难看出,声场模拟是一个涉及物理声学、数学、计算机技术、测量技术和信号处理理论的多学科交叉的研究方向,这意味着它是一项难度大、综合性强的研究工作,同时也决定了它必然具有广阔的应用前景。

以下对声场模拟技术的发展状况加以概述。

1.2.1 国内外发展状况

严格地讲,声场模拟研究始于建筑声学领域。1900年,美国的赛宾(Sabine)正式发表了题为《混响(Reverberation)》的著名论文,标志着建筑声学的开端^[1]。赛宾在该文中提出了混响时间的概念,并给出了相应的混响时间计算公式(赛宾公式)。尽管后来依林(Eyring)和诺里斯(Norris)又对该公式作了修改,但混响时

间一直是建筑声学的一个最为重要的评价指标。

仅仅利用混响时间这一个客观指标来对复杂的主观听闻效果进行评判,显然存在着局限性。于是,在 20 世纪 30 年代初,德国的 Spändock^[2] 提出了声学缩尺模型方法和可听化技术,为建筑声学研究提供了新的思路。声学缩尺模型方法在后来的半个多世纪中得到了快速发展,并被成功地应用于建筑音质设计工作。直到今天,仍有不少学者热衷于利用该方法进行建筑声学研究。不过,该方法对实验条件和经济成本的要求较高,一定程度上制约了它的应用。从 20 世纪 60 年代开始,封闭结构内部声场的计算机模拟开始发展起来。这种数字式技术因具有方便、快速、经济、用途广泛等优点,吸引了越来越多的研究者的注意,并在近 10 年有了长足的进步。

以下将声场模拟的研究过程大致分为四个阶段,分别加以叙述。

1. 20 世纪 30~50 年代:声学缩尺模型技术诞生和初步发展^[3,4]

从赛宾时代起,缩尺模型技术就已开始在建筑声学中获得应用。早期的水波模型和光学模型只能研究一些简单的几何声学现象,不足以描述声场的主要特征,这促使研究者们开始探索声学缩尺模型。

所谓声学缩尺模型,就是将待设计的结构的尺度缩小一定的倍数,再借助特定的声源,通过对声信号的测量、分析和计算来对结构内部的音质进行分析与评价的一种物理模型方法。

1934 年,Spändock 在论文中证明了缩尺模型在厅堂音质设计中应用的可能性和可行性,标志着建筑声学缩尺模型技术的开始。在其后的 10 多年间,由于二次世界大战的影响,研究进展非常缓慢。

20 世纪 50 年代,关于声学缩尺模型的研究迅速增多。1950