

第六届建筑物理学术会议 · 论文选集

中国建筑学会建筑物理学术委员会编
中国科学技术出版社



第六届建筑物理学术会议论文选集

中国建筑学会建筑物理学术委员会 编

中国科学技术出版社

(京) 新登字 175 号

内 容 提 要

本文集共选录 90 篇论文, 包括建筑声学、建筑光学、建筑热工学和建筑物理教学四大部分。内容涉及建筑声学的音质评价与分析、厅堂音质设计、电影院音质设计、演播室音质设计、噪声评价与分析、噪声综合治理; 建筑光学的光气候和建筑物的天然采光、光源与灯具、建筑物的光环境与视觉、建筑照明技术、建筑光学测试技术; 建筑热工的建筑气候、建筑节能和热湿绝缘技术、热湿计算的分析方法、建筑热环境、建筑门窗、建筑热工测试方法; 建筑物理教学与综合性论文。

本文集基本上反映了近年来我国建筑物理科学技术的研究成果和发展情况, 对建筑设计人员、建筑物理科研人员及大专院校有关专业师生的科研、工作、教学与学习具有重要的参考价值。

第六届建筑物理学术会议论文选集

中国建筑学会建筑物理学术委员会 编

责任编辑: 张晓林

封面设计: 王 显

技术设计: 范小芳

*

中国科学技术出版社出版 (北京海淀区魏公村白石桥路 32 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米/16 印张: 36.25 字数: 866 千字

1993 年 10 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—1,200 册 定价: 37.50 元

ISBN 7-5046-0894-7/TU·12

前 言

第六届全国建筑物理学术会议于1990年11月26日至29日在四川重庆建筑工程学院召开。来自全国23个省、市、自治区的科研、设计、高等院校及有关生产厂家代表162人出席了会议。

在会上,代表们就我国最近4年来在发展建筑物理科学技术,提高建筑设计质量,推广建筑物理新技术,改善建筑物理环境等方面所取得的新成果进行了广泛的学术交流。整个会议交流的论文摘要为186篇,在会上宣读的论文113篇,其中建筑声学41篇,建筑光学31篇,建筑热工38篇,建筑物理教学3篇。所交流的学术论文内容丰富,涉及建筑物理的各个领域。在建筑声学方面:有音质评价与分析;厅堂音质设计;影剧院音质设计;演播室音质设计;噪声评价与分析;噪声综合治理;噪声控制的隔声、隔振、消声和吸声处理。在建筑光学方面:有光气候和建筑物的天然采光;照明光源与灯具;建筑物的光环境与视觉;建筑物室内外照明技术;建筑光学测试技术。在建筑热工方面:有建筑气候的区划;建筑节能和热湿绝缘技术;建筑热湿计算的分析方法;改善建筑热环境技术;建筑门窗热工技术;建筑热工测试方法等。

为了及时了解国际上在建筑物理方面的学术动向,大会按声、光、热专业分别组织了“近年来建筑热工发展综述”、“建筑声学发展的回顾与展望”和“从建筑光学谈照明工程的若干新进展”三个综合性学术报告。在专业学组会上,代表们还围绕目前建筑物理科技发展的若干重点问题进行了专题讨论。与会各高等院校的代表还就建筑物理的教学及人才培养问题进行了广泛的座谈。整个会议开得圆满成功,达到了预期的目的。

为了向国内外介绍本次会议交流的学术成果,以促进建筑物理科技事业的发展,更好地为建筑现代化服务的需要,会议决定编辑出版《第六届建筑物理学术会议论文选集》,并推选以下17位委员组成论文选集编委会,负责论文的审查、选编和联系出版工作。
《第六届建筑物理学术会议论文选集》编委会:

主编:陈启高、肖辉乾、王季卿

编委:陈启高、肖辉乾、王季卿、李根华、秦佑国、项端祈、柳孝图、王明枢、章奎生、沈天行、詹庆旋、李景色、王景云、黄福其、杨新民、许文发、王淑芝

编委会根据“关于编辑出版《第六届建筑物理学术会议论文选集》的意见”,按评选条件和对入选论文的出版要求,经过了半年多的工作,最后从会议交流的186篇论文中,选出90篇(声学23篇,光学24篇,热工41篇,建筑物理教学和综合方面2篇)编辑成本论文选集。我们衷心希望,这一论文选集的出版,不仅是本届大会的历史记录,也应成为推动建筑物理科学技术进步的新起点。

鉴于会议交流的论文较多,内容也很丰富,而编者受水平和时间所限,在选编与审查工作中难免有疏漏或不当之处,祈请读者和作者批评指正。

中国建筑学会建筑物理学术委员会 1991年10月

目 录

前言

建筑声学部分

建筑声学发展的 10 年回顾	王季卿 (1)
厅堂音质物理评价的进展	孙广荣 (15)
北京音乐厅音质分析	施锦华 李晋奎 (21)
济南军区八一礼堂音质设计	王季卿 (28)
深圳艺术学校音乐厅的音质设计	李松金 (33)
太原市湖滨会堂改建工程观众厅建声设计	李晋奎 康 健 施锦华 (37)
北京市五道口工人俱乐部声学改建设计	陈金京 王 峥 项端祈 刘发臣 (45)
亚运会体育馆声学设计的新进展	项端祈 王 峥 陈金京 葛砚刚 (52)
立体声电影院最佳容积和最佳混响时间的探讨	高 翊 (65)
多厅电影院的声学设计	章奎生 (73)
重庆山城六声道立体声电影院声学处理	陈延训 (81)
放映宽胶片电影的电影院声学特点及设计原则	朱茂林 朱根华 黄炳国 (89)
35 毫米道尔贝立体声电影院改建中的音质设计探讨	周兆驹 (96)
具有良好通风的精密半消声室设计	陆世雄 刘呈莺 (102)
用半消声室测量机器声功率级的理论误差的分析	蔡 彪 王季卿 (111)
平面为圆内接正十六边形厅堂声聚焦规律探讨	郑明坤 (117)
室内装饰纺织材料的吸声性能	钟祥璋 (121)
微孔吸声片及其应用研究	董涵皋 张洪济 (127)
防水吸声材料——针刺型化纤土工布吸声性能的研究	王 峥 (138)
埃及开罗国际会议中心空调噪声的调试	徐之江 戴建国 (147)
轨道活动隔声墙的设计与应用	林先军 (153)
交通噪声对中小学影响的研究	王季卿 施琦华 钟祥璋 (160)
关于厅堂音质评价指标的几个问题	王炳麟 (165)

建筑光学部分

从建筑光学谈照明工程的若干新进展	肖辉乾 (171)
平均天空模型和采光计算	陈仲林 肖辉乾 冷御寒 高广华 (177)
用日照百分率等表示四类天空出现概率	陈仲林 吴其勋 刘耀宗 (183)

用数据库管理系统处理昼光观测资料	刘耀宗 徐华民 朱滨唯 陈仲林 (190)
晴天采光方向系数的确定	杨光璇 (196)
寒冷地区建筑的顶光设计	赵明耀 (201)
珠江隧道入口区照明研究——黄沙口遮光棚的模型试验	蔡传顿 邬茂超 汤国华 应汝才 (208)
DJ 系列减振灯具及其钢丝绳干摩擦阻尼减振器	胡振锡 朱惠康 (216)
灯具的寿命	章海聪 (222)
电子镇流器初探	王建初 王建农 刘 进 (226)
关于物体的视度	陈启高 (231)
建筑色环境黑白定量摄取的彩色再现	马 剑 沈天行 (235)
青岛体育馆主场的照明设计	解先友 (240)
浅谈体育馆建筑光环境——国家奥林匹克中心综合馆照明的设计与研究	王宏宇 阎文魁 (248)
室内照明目标效能值的研究	李恭慰 赵振民 赵建平 杜坤霖等 (256)
住宅照明现状与改进	郑明坤 (263)
高杆灯发展述评	李景色 李铁楠 (269)
国外隧道照明综述	刘南山 (274)
高速公路链式照明及系统的研制	李铁楠 李景色 徐 宁 (278)
窗户透光系数检测装置的光学设计	张耀根 张建平 (283)
摄影——图像处理法测量天空亮度分布	高广华 范晋华 张青文 (288)
用自动控制系统复现坎德拉	高执中 易庆祥 马 燕 (294)
烘托空间气氛的人工光——兼谈歌舞厅灯光设计的艺术效果	潘云宋 (300)
平时长期使用的防空地下室照明标准的确定	彭明元 张耀根 徐 和 (303)

建筑热工学部分 ▲

建筑热工技术发展综述	陈启高 (308)
建筑气候区划的原则与指标	谢守穆 胡 璘 马天健 (311)
我国热带和亚热带地区的气候特征, 建筑特色及设计原则	林其标 (316)
《建筑气候区划标准》简介	谢守穆 胡 璘 (320)
岩棉外保温复合墙体的研制与应用	石曼萍 金卫东 肖卫平 (324)
空气层防潮技术的应用	陈启高 (331)
建筑外保温及其材料的研究	朱盈豹 唐宗虹 (336)
现有采暖住宅建筑节能改造措施的研究	周景德 石曼萍 王铁铮 钱美丽 (341)
采暖建筑最佳保温热阻初步研究	王千翔 (350)
空气层的热湿性态	陈启高 (356)
房式粮仓温度场的计算机模拟方法	王美昌 林海燕 (361)
倒铺蓄水屋面的传热计算与隔热设计	陈忠山 (368)
关于热桥温度计算参数的研究	张清明 王景云 (375)

窗口处墙体附加热损失和热阻的研究.....	张清明 王景云 肖景文 (383)
传热、传湿和空气渗透下房屋围护结构的热工状况.....	陈启高 (386)
关于湿与多孔材料连接的模型.....	陈启高 (391)
人防地下室长期正常使用的热湿负荷设计方法	
.....	林海燕 张家猷 王美昌 魏铁群 (397)
通风屋面的传热计算与隔热设计.....	陈忠山 (403)
围护结构总衰减倍数与内表面衰减倍数的简化计算.....	李建成 (412)
再论密闭地面库的库温预测	惠西鲁 王建瑚 (420)
佛山东华里清代民居热环境研究.....	黎 明 (428)
南京地区住宅建筑朝向的选择.....	甘 桢 (433)
江苏省海安县被动式太阳房住宅夏季实测分析	甘 桢 管荔君 (441)
深圳国贸大厦中庭热环境实测分析与研究	袁光宗 吴纪昌 (450)
华南地区多层住宅小区的布局与自然通风.....	王准勤 (455)
地冷空调房屋的热环境研究.....	黎 明 (462)
建筑围护结构辐射散热量的测量及其与人体辐射换热量的计算	
.....	戴自祝 苏晓虎 张希仲 (469)
“一颗印”的热环境.....	李兴发 (474)
对天津市砖混住宅建筑采暖能耗现状的评估与对策.....	陈永祥 (482)
湖南地区地面防潮性能的现状与改善.....	杨新民 (486)
太阳房现代技术与室内热环境.....	李家泉 马庶平 汪万林 (488)
现代沼气利用技术的新发展——沼气农房.....	李家泉 汪万林 马庶平 (496)
封闭阳台的热特性研究	蔡君馥 周 红 (501)
南方厂房高侧窗形式浅析.....	张廷全 (507)
外围护结构及供暖制度对室温波动的影响.....	郑茂余 (510)
电子计算机在温度测试中的应用	黄夏东 赵士怀 (514)
大体积混凝土施工中的温度监测和控制.....	赵士怀 李光旭 黄夏东 (520)
铜梁县罐头厂冷库复合围护结构热性能测试分析报告	
.....	陈启高 王 进 王凯旋 庄仪生 宋 九 汪汝忠 (527)
便携式建筑热工数据采集和处理系统	林海燕 谢守穆 (532)
寒冷地区建筑墙体含湿对热耗影响的初步探讨	
.....	季 杰 许文发 廉乐明 郭 骏 陈际阳 (535)
三层窗的有效传热系数及窗尺寸开度建议	
.....	朱业樵 孙广龙 徐江兴 郭 骏 廉乐明 (541)

教学和综合部分

物理环境的规划与设计.....	柳孝图 (546)
建筑物理环境——现代建筑创作的一个有机组成部分.....	黄 鸥 (556)

建筑声学发展的 10 年回顾

同济大学声学研究所 王季卿

80 年代初,一位国际著名的声学家来同济大学讲学,国内许多单位亦前来参加学术交流活动。大家相聚在一起探讨建筑声学,特别是厅堂音质方面的新进展,当时那位声学家认为:30 多年来(指 50 年代到 70 年代),建筑声学并没有什么突破性的变化,如果能够遵照 50 年代初就确立的一些声学设计原则,大部分建筑中声学问题都能得到妥善处理。从我们今天所用的建筑声学教科书对照来看,大致上也确实如此。

但是也应该看到,虽然一些基本设计原则没有根本性变化,但并不能因此而忽视这些年来对不少问题在认识上和处理上的深化和提高,厅堂音质方面尤为突出。一些传统的做法正在突破(部分地由于建筑上的需要),在一些创新的声学设计中也出现了不少失败事例,人们又从寻究失败原因中获得了进步。在此时期内,受其它有关学科发展的促进,又极大地丰富了建筑声学的内容,甚至使某些设计原则成为过时。又由于声学测量和设计手段的现代化,一些原先停留在定性分析水平的措施实现了定量化。总之,我们要看到建筑声学近年来的巨大发展,也就能认识到这一学科领域中有不少工作可做。

这几年来我在不同场合作过一系列报告^[1-5],介绍和探讨了建筑声学发展中的一些问题。故本文拟从另一个侧面来阐明这方面的成就(当然不免挂一漏万),为下步开展工作提供启示。抱住一些老经验而固步自封是不对的,一味追求“新”的做法也不可取。广泛而积极地吸收一些科学技术进步所带来的最新知识,才是使学科能够迅速而健康成长的道路。

一、建筑声学的发展概况

1. 厅堂音质

人们对声场衰变过程中的精细结构有了较充分的研究,并可从人工合成结果的评价中来考虑比较理想的音质设计。对早期反射声重要作用的认识是 50 年代以后的事,大厅中为满足这一要求的种种措施,也使室内设计面貌一新。酝酿了近 40 年的厅堂音质第二参量已渐成熟,声能比(从时间域或空间域来衡量)已广泛地应用于评价厅堂内语言和音乐的音质(例如对语言用“明晰度” D ,对音乐用清澈度 C_{80} 和“侧向成分” $L.F.$ 都属常用的不同定义的声能比)。当然,现场的资料还积累得不够多。

双耳听闻效应属心理和生理声学研究范畴,但是它提示了音乐厅中侧向反射的重要性。这样既使人了解到鞋匣形音乐厅音质良好的原因,同时也掌握了鞋匣形以外的其它有效的声学设计造型。80 年代中期美国加州拈县新建的一座音乐厅(Segerstrom Hall),可谓这方面杰出的代表之作(后面将作一简介)。

2. 声学材料

除常用的传统多孔性吸声材料外, 各种共振型吸声体纷纷出现, 扩大了可选用的品种。例如金属箔共振器用在管道消声中可达到高效而无纤维漂散之弊, 塑料薄片匣式共振器不仅清洁卫生和美观高效 (平均吸声系数在 0.5 以上), 而且重量仅 $1\text{kg}/\text{m}^2$! 对于微穿孔板之研究、生产和应用, 我国更是有较大贡献的。狭缝空心吸声砖已开始在国内生产, 填补了这方面的空白。

一种打破传统以弧形为主的二次剩余扩散体 (QRD) 的问世, 不仅在造型上别开生面, 而且它的有效扩散带宽也可由设计者控制。这种新型扩散体已在音乐厅、播音录音室中应用, 而且已成为商品化产品。

3. 房屋隔声

构造复杂的隔声构件如利用传统隔声理论是难以预计的, 但是利用统计能量分析方法 (SEA) 则使之成为可能。同样, 对于侧向传声这一向来认为难以入手的问题也得到了有力的帮助, 特别是结构声在固体中传播时会出现多种波形式, 它们各自在传播过程中的衰减和辐射又不相同, 加上侧向传声途径往往远不止一个, 问题的复杂性可想而知。

40~50 年代建立的房屋隔声评价曲线, 仅仅由代表一砖墙的隔声效果而来, 现在被人用更科学的方法重新检验, 有必要加以修订。一个有意思的实验结果表明, 用各频率下隔声量的平均结果是一种衡量墙体隔声效果的最好参量, 使人怀疑那种用参考曲线定出隔声指数的方法是否还有必要。半个多世纪以前沿用的平均隔声量又重新引起注意。

外墙隔声问题因环境噪声严重而受到更多的关注, 其复杂性比户内隔墙更大。不仅构造形式上复杂得多 (如有阳台、窗户等), 而且面对的噪声源和声波入射角均有很多变化, 同时外墙还要满足通风、采光等功能要求。所以考虑问题的方法和措施也有很大不同, 建筑隔声研究之重点有向外墙转移之倾向。

4. 测量技术

这是影响建筑声学发展很重要的一个方面。例如混响时间由于测量方法的进步, 使人们得知最初一段的衰减时间对听音至关重要, 而不是传统定义的衰减 60dB 所得出的平均衰减时间。计算机的广泛应用, 不仅提供了快速的结果, 而且是更精确可靠的结果。在隔声、吸声方面同样如此。

测试用声源走过了多重音、啁音的道路, 50 年代后期趋向于使用白噪声 (有些场合使用计权白噪声, 或称粉红噪声), 但是它仍然存在着信号不够稳定, 需要多次重复取平均, 而更大的问题是常常感到信号噪声比不够, 对现场工作尤其突出。60 年代末提出使用最大长度序列 (又称 M 序列或伪随机噪声) 调制的信号源, 大大地克服了上述缺点而受到普遍应用。其它如利用声强法测量房屋中的直接透射和间接透射, 使隔声研究走上了新的道路; 快速语言传递指数 (RASTI) 方法采用了调制测试信号频谱以模拟 500Hz 和 2000Hz 的语言, 使室内语言清晰度可用电子方法来作客观评价等。

70~80 年代, 国际标准化协会 (ISO) 完成了一系列建筑声学测量标准, 对于积累和交流数据方面起了很好作用。但是大量实践又提出了不少修改意见, 例如隔声测量规范

(ISO140) 和厅堂混响测量规范 (ISO3382) 都已纷纷在修订之中。

5. 环境声学

建筑声学中的大环境处理涉及许多户外传播问题, 同时也衍生出涉及面很广的社会化环境声学大课题, 它所面临的许多问题, 带动了城市规划、交通运输、土地利用、建筑总体等方面都对此重视起来。而它所面对的对象变化和群体范围又如此之广, 加上地形和气候变化等因素, 使问题的解决非常复杂。因此数据库和专家系统的建立使工作有了头绪。五花八门的环境噪声评价量的不断提出, 会使人眼花缭乱, 也正说明问题不那么简单和单一。

6. 住宅噪声

住宅建设已成为我国当前非常突出的问题, 其中住宅噪声也日益受到人们关注。这里涉及建筑声学的许多方面。诸如居民对噪声的反应和要求, 空气声和撞击声隔声评价方法标准, 轻结构的隔声, 外墙隔声受到普遍重视, 侧向传声的预计及控制, 对更低频率的考虑等等。有关这个专题我将在第四届西太平洋地区声学会议 (1991 年 11 月于澳大利亚) 上作一题名 “Noise Abatement in Dwellings” 的大会特邀报告 (将刊于会议论文集), 在此就不再展开讨论了。

二、新技术在建筑声学中的应用

1. 室内声场的计算机模拟

在大厅声学设计中, 人们常利用缩尺模型试验来预测建成后的音质效果。但是它在技术上存在着一些困难, 如各表面声学性能的模拟难以在各频率完全相符, 而且模型制作费时费钱, 也跟不上建筑师设计构思变化的要求。所以利用计算机模拟来研究大厅内的声场和音质, 就显得特别引人注目。在 80 年代它有很大发展^[7], 也成为建筑声学中的一个热门课题。

室内声场的数字模拟是以几何声学为基础的, 因此它对音频中的中、高频段较为有效。该工作主要是声线跟踪法和虚声源 (又称声像) 法。前者是将室内点声源发出的球面波设想为许多声束组成。每一声束的能量假定由一粒子携带, 该“粒能”以直线形式遵循几何声学规律传播, 遇到墙面时作镜面反射, 同进也损耗部分能量。计算机在对所有“能粒”传播跟踪描述的基础上, 合成接收点处的声场。该方法的准确度及所能模拟的有效动态范围与初始声线密度密切相关, 主要用于模拟声场某处的回声图及与声能有关的声学性质。

虚声源法则将声波在墙面处的反射效应用声源对该墙面所成镜像声源等效, 室内的所有反射声都有相应的虚声源等效。该方法能完善地复现声从声源传播到接收点的所有可能途径, 声源与所有虚声源发出的声波在接收点合成总的声场。虚声源法主要用于模拟运算与声压有关的声场性质, 亦可用于声能参量的运算, 尤其适合于有对称几何形状的房间。

声线法和虚声源法各有利弊。如果考虑多次反射, 而且房间形状复杂, 墙面数量较多, 虚声源法的计算时间要比声线法长得多, 几乎无法比拟。图 1 所示为声线法和虚声源法与反射次数以及间接地与照射声级的精度 (dB) 之关系^[8]。此例中, 用一点声源, 有

50 个墙面，考虑 100 个接收点。房间比例约为 1: 2: 4，室内平均吸声系数 $\bar{\alpha}=0.15$ 。用的是新式 PC 计算机。

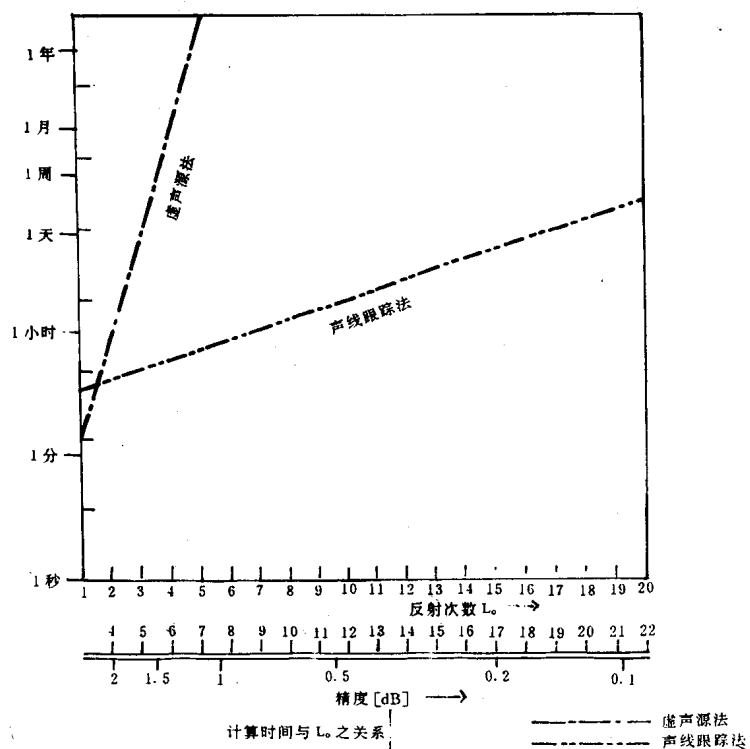


图 1 声线法和虚声源法与反射次数以及间接地与照射声级的精度 (dB) 之间的关系

室内声场数字模拟工作的早期重点是以计算机实验的形式，通过模拟各种室内形状和吸声材料分布下的声场，配合对混响理论的研究，探讨室内声传播的规律。目前则主要着重于对方法进行种种改进，并直接应用于厅堂音质设计工作。将待建厅堂的设计图经量化后输入计算机，通过运算可在屏幕上展示厅内任一位置从任一角度观察到的厅堂几何内景，并能预计该点的声学性能。如将这一模拟结果作用于“干”（即无反射条件下）的语言或音乐录音信号，便可通过电声设备预演出该厅堂的音质并进行主观评价。这样可在短时间内对数个方案进行模拟、评价和比较，有利于从中眩莖音质最佳方案。

由于计算机和程序的发展，计算时间有了很大的缩减，使之更为实用化了。有人以一座厅堂为例，作过一个比较^[8]。设该厅有 63 个墙面，100 个接收点，单个声源，考虑四次反射，用通常吸声系数的材料布置，计算精度在 1~2dB。计算时间从 1982 年的 100 小时 (PDP11-34 计算机，BASIC 语言) 缩短至 1989 年的半小时 (HP300 系列计算机，用信息处理机和 BASIC 汇编语言)。图 2 示明上述计算时间缩减过程的一例。

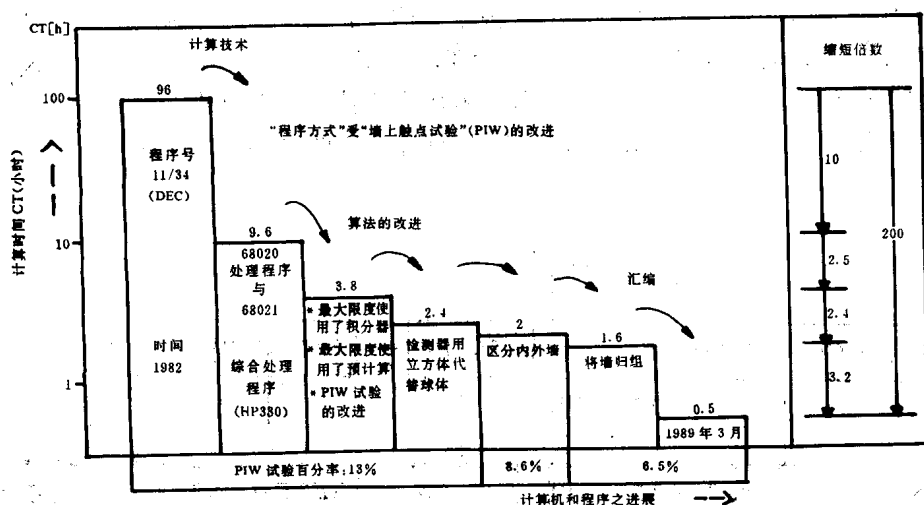


图 2 缩减计算时间的过程

在模拟技术方面，新的设想也是层出不穷。例如 Vian 等人^{[9][10]}提出圆锥束方法，它是以声线跟踪法原理为基础而扩展出来的。设想每一声束的声能在“声束锥”底平面上呈“—”分布，而不是集中在一点上，各声束锥允许边缘重叠，其合成结果与真实无指向性球面波能量分布极为接近。接收点位于“声锥”范围内就可接收到声能。这样模拟的准确度大为提高。

Forsberg^[11]提出了另一种新颖方法称之为“完全离散性的声线跟踪法”，将房间和声线都用离散点表示。具体说就是在运行程序时，将声场空间与边界墙面都用三维矩阵来表示。矩阵的每个元素都相应于房间的一个位置，而每个元素都是由 3 个量组成的一个矢量，它代表通过该位置附近可能存在的边界表面信息，每个实际墙面都用 3 个极点的座标表示，并标明它的形状。声线以步进方式传播，每走一步都由该空间点的矩阵元素携带信息决定声线下一步的运动，原来的位置信息就可删去。这样做使得模拟运算时间不再与墙面数目有关，室内几何形状复杂程度增加也不会使运算时间大量增加。

又如在声线法中引入面积积分^[12]时，能非常准确地模拟有限平面（镜面的或扩散的反射）声反射的实际行为，大大提高了声线法的准确程度。其基本思想是，一般在模拟声场时，都假定声场是扩散的，而模拟中到达接收点的声线却是离散而非扩散的。为此考虑了有限硬墙上声反射效应，在理论上将反射面分为许多微元，每个微元辐射出一个波函数，所有微元辐射的波在接收点处的贡献叠加起来便是接收到的反射声。具体实施在声线跟踪法中，就是每根声线在反射后都能被接收点接收到声能，不过对于那些不能直接到达接收点的反射声线，代表了到达接收点的声能须有一个 q (Q) 因子相乘。该方法很好地描述了接收点“看到”的声反射情况。用于封闭空间内声脉冲响应的模拟时，就能大大改善头几次反射声的精细度，因为这样做相当于考虑了波动效应。

近年来一项很吸引人的成就乃是进入到了室内声场双耳模拟阶段^{[13][14]}，而且利用卷积过程来将模拟出的声学性能与“干”信号源结合产生可听声。也就是说将厅堂设计图输入

计算机后所作的声场模拟过程中，模拟双耳的模块利用储存的外耳道传递函数的数据库资料算出双耳脉冲响应来。最后将“干”音乐或语言信号卷积在耳脉冲响应上，便可通过耳机来听厅内任意位置上具有双耳效应的音质效果。为了达到这一目的，有两个问题要解决。首先要获得空间的真实响应，即以幅值脉冲响应来代替过去常用的能量脉冲响应；其次是模拟双耳听闻，使听者有一种房间内真实的空间印象。图3所示为实现上述设想的系统方框图。

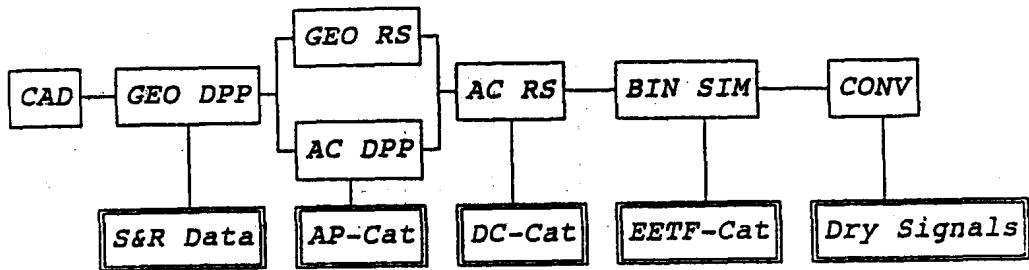


图3 双耳听闻的室内模拟系统方框图

单线框代表程序，双线框代表外存数据库

对方框图解释如下：

CAD 房间资料由一普通CAD系统送入

GEO DPP 几何数据预编程模块是从CAD外存储器中抽出所有有关资料，并从

S&R Data¹ 的声源和接收点资料中定出系统的图形来

AC DPP 声学数据预编程模块从

AP-Cat 声学特性资料目录中对每一个墙面定出一个指数。各虚声源位置由

GEO RS 几何室内模拟模块算出。在此系统中，可采用镜像法或不同种类的声线跟踪技术。整个声传播途径（包括所有反射声）与所有虚声源一起储存起来。在这些资料基础上

AC RS 声学的房间模拟模块算出每个虚声源的信号，也包括声源的指向特性在内，它是储存在

DC-Cat 指向特性目录中的。如上所述，

BIN SIM 双耳听闻模拟模块用储存在

EETF-Cat 外耳转移函数目录中的资料算出双耳脉冲响应来。最后一步是

CONV 卷积

干音乐 干双耳脉冲响应上，并由耳机将此演示给听者。

对待第一个问题的一种方法是对界面上来的反射声线要作进一步细致的考虑^[15]，即墙面的声学性能不是用 $(1-\alpha)$ 这一系数来计算，因为它只说明声强的降低，而是要用到具有复数的，并与频率有关的反射系数 R 来计算。因此，由声线传递的声信号的每次反射要以 $r(t)$ 函数（即反射系数 R 的富里哀变换）来卷积。显然这一步骤需要相当额外

的计算时间。较简单的方法是将能量脉冲响应的方根通过一个频带滤波器，例如通过一个倍频带滤波器。声频范围的所有频带均要重复这一在时间域上进行数字式演算的步骤，每次按相应吸声系数算出的能量脉冲响应来考虑。最后，将所有倍频带滤波器的输出综合得出幅值脉冲响应^[16]。

要把音乐样本片段提供双耳听闻效果，这个包含着房间音质的脉冲响应就要为听者提供双耳听闻条件。为此，必须把听者个人耳朵的转移函数考虑在内。由于这些转移函数与人射声方向有关，因此对每个脉冲响应的分量必须分开来考虑。最后的结果是两个脉冲响应，分别用听者的两个耳朵来听。为了对这样复杂的人耳传输函数进行快速测量，采用 m 序列（下面将介绍）结合快速 Hadamard 变换的方法已证明极为有用^[17]。

2. 用 m- 序列测量脉冲响应及混响衰减

室内音质最基本的物理描述可用声源和接收点之间的脉冲响应来说明，因为所有反映室内主观评价的声学参量（包括混响时间）均可从脉冲响应中导出。由于微机 and 数字信号处理的发展，更精确和高效地测量脉冲响应已成为现实。其中以利用 m- 序列（即最长序列 Maximum 之简写，又称周期性伪随机序列）作为信号源的技术是当前最为得用的方法，通过快速 Hadamard 变换为基础的互相关法得出了脉冲响应。由于这种技术有效地利用了非常大量的脉冲，其唯一限制是所选序列的长度，这样便对提高信噪比 (S/N) 起到明显作用。互相关处理大大减少了背景噪声的影响。经过适当平均，有可能采用比背景噪声低得多的信号声级。这就使这项技术在厅堂音质、隔声和声传播中衰减等测量中都非常有用。目前为完成上述测量技术的计算机插板和软件亦已商品化，使用更是方便。

一个房间的脉冲响应平方由 m- 序列相关法测出。于是根据混响测量中常用的脉冲积分法，混响衰减过程便可由互相关函数（平方的脉冲响应）的积分求出。所用 m- 序列至少要与混响时间一样长以能覆盖 60dB 衰减范围。

下面简要介绍一下其计算过程

图 4 中 $h(t)$ 代表房间和各种测量装置如带通滤波器等在内的系统的脉冲响应函数。当声源为经 m- 序列信号调制的脉冲声信号时，其输入信号 $x(t)$ 见图 5 及式 (1)，其输出信号 $y(t)$ 便以卷积形式出现，见式 (2)。

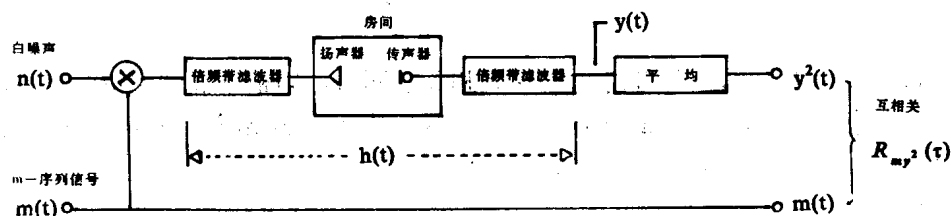


图 4

$$\text{输入信号 } x(t) = \frac{1}{2} [m(t) + 1] \cdot n(t) \quad (1)$$

$$\text{输出信号 } y(t) = \int_0^\infty x(t - \tau_1) \cdot h(\tau_1) d\tau_1 \quad (2)$$

于是求出 m - 序列信号 $m(t)$ 和输出信号 $y^2(t)$ 之间的互相关函数为:

$$\begin{aligned} R_{my^2}(\tau) &= \overline{m(t)y(t+\tau)} \\ &= \frac{N}{2} \int_0^\infty R_m(t - \tau_1) \cdot h^2(\tau_1) d\tau_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $R_m(\tau)$ 为 $m(t)$ 的自相关函数, N 为每单频率下 $n(t)$ 的次方数。此式意味着互相关函数 $R_{my^2}(\tau)$ 相当于能量脉冲响应。

这里如果有一个与输入信号 $x(t)$ 不相干的噪声混入 $y(t)$, 互相关函数不受其作用的影响, 仍然如式 (3) 所示结果。于是用此技术后, 可在很差信噪比 (S/N) 条件下进行脉冲响应测量。这正是互相关技术优点之所在。

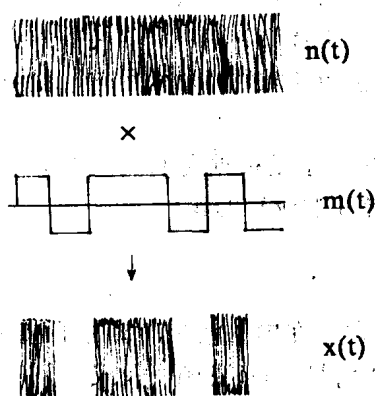


图 5

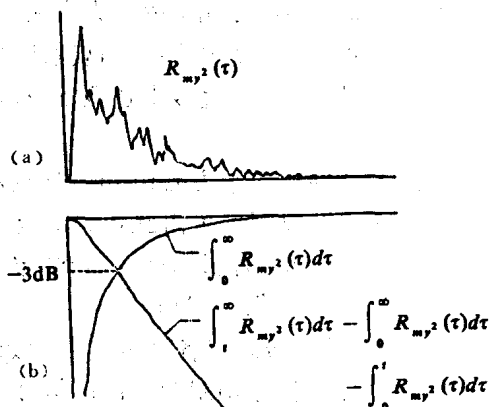


图 6 a 用 m - 序列相关法测得房间的平方脉冲响应

b 混响衰减过程的计算经过

房间的平方脉冲响应既可用 m - 序列相关法测得, 则根据混响测量常用的脉冲积分法, 由互相关函数 (平方的脉冲响应) $R_{my^2}(\tau)$ 从 $\tau = t$ 到无穷大来求得混响衰减过程, 见下式:

$$\int_0^\infty R_{my^2}(\tau) d\tau \quad (4)$$

图 6 所示为用此法求出混响衰减过程之一例。

通常的混响衰减测量要求在信号比环境噪声高出 50dB 时进行较为有效, 而这样大的信号比不大容易实现, 尤其对一些现场大厅的满常坑量更是难以做到。但如采用本技术以后, 这一问题基本可以得到圆满解决。有这样的实验结果报导^[18], 即信号比背景音乐还低 9dB 的情况下, 用此新技术测量可以得到良好的初始衰减 27dB 的过程 (取 100 次平均) (见图 7), 与常规方法之误差在 1dB 之内。如果取平均的时间加长, 动态范围还可以改善。

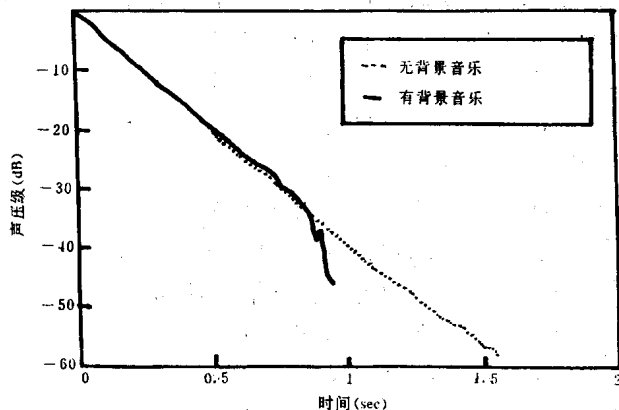


图 7 由脉冲响应算出宽频衰减曲线的比较

3. 声强法测量隔声^{[19][20]}

近 10 年前, 声强法就引入到建筑隔声测量中来。其结果与常规 (或称传统的) 双混响室法较为符合。这种新方法在测定组合墙的不同部分传透声能方面特别有用。它可以诊断出哪部分墙体是组合墙隔声的薄弱环节, 例如确定声桥位置或出现漏声缝的情况等, 同时也可算出总的隔声量。而常规方法只能测得总隔声效果。因此国际上正在

酝酿这种新测量方法的国际标准。

此外, 声强法也可在现场找出各个侧向传声途径的成分, 即确定向接收室辐射声音的各个表面的作用。在实验室测量时, 新方法只需一间混响室作为发声室, 以测出入射于试件上的声功率。在接收室一侧贴近试件表面测出它所辐射的声功率。这样既省去一间接收空间的混响室, 又省去接收室混响时间测量以求出为校正用的接收室总吸声量, 简化和缩短了测量时间。有人还提出这样的设想, 造一间大混响室作为发声室, 然后在各表面上开有许多“窗口”以装置不同试件, 使透过各试件的声功率向另一侧自由场辐射时, 故可同时进行测量。为了提高测量精度, 它们可以是一间消声室, 或者利用一间吸声较大的工作室。

经过一段时间的巡回测试比较, 认为此新方法是可行的, 但是很难定出其精度。例如对窗玻璃的各实验室巡回测试结果表明, 在 1000Hz 的标准偏差约 1dB, 100~3150Hz 频率范围则在 1~2dB 之间, 在更低频段如 100Hz 可大至 3dB。

新方法中对声强探头的校正也是有待解决的问题, 而国际上对声强测试设备的校正标准迄今未制定出来。测试工作中探头离试件的距离也会影响所得隔声量结果。实验表明, 在窗玻璃试件垂直线上的声强级斜率, 当不同频率时可有很大不同。要对选择多少距离为宜作出统一规定非常困难, 但又十分需要。看来在主要测试频率范围 (100~4000Hz) 不可能只规定用一个固定距离。

另外, 探头布点的面积大小对测试结果也有很大关系。在低频时测量结果出现很大离散性也是一个未解决的问题。有些研究结果表明这是由于未考虑 Waterhouse 校正 (即对靠近房间界面处有较高声能密度而需要进行的校正) 所致, 这在传统式双混响室法中也存在。但是新方法中在究竟对发声室声级还是对接收的声强级要校正这一问题上尚无定论。

最近的一些研究则认为 Waterhouse 校正不是出现离散性较大的真正原因, 至少可以说不是唯一影响差异的原因, 这就需要进行研究了。

4. 统计能量分析 (SEA) 法与侧向传声估计

60 年代发展起来的统计能量分析 (SEA), 本是为研究航空和宇航结构对端流噪声和喷射噪声的响应而出现的。这种方法不是去求解复杂的数理方程, 而是用统计的方法研究多元系统间能量的传递和平衡。隔声问题正是声能在结构和声场间传递的问题。对一个复杂系统, 可以把它划分成一些储存能量的振动模式群, 称为子系统。其基本原理是耦合系统间的功率流正比于两个子系统的平均模态能量之差, 且总是从具有高模态能量的子系统流向低模态能量的子系统。早期的应用集中在计算墙的隔声方面, 例如有人^[21]根据 SEA 模型, 把各种墙 (包括有龙骨的双层墙) 的隔声计算变成求解线性代数方程组, 并对方程组系数, 即 SEA 参数的赋值进行了讨论, 同时也对影响墙隔声的几个因素作了分析。

侧向传声是房屋隔声中的另一重要问题。如两室之间有一公共墙, 侧向传声就成为一室传声至另一室的一个途径; 如果两室之间没有公共墙 (即不相邻), 声音只能通过侧向传递而传声。不论那一种情况, 侧向传声有时会成为两室间噪声干扰的一个重要方面。

统计能量分析方法不仅是分析研究侧向传声的最合适工具, 而且也是分析研究建筑物中任何房间之间传声的方法^{[22][23]}。

近年对早期建立的 SEA 模型有了很大发展, 已可研究除弯曲波之外的纵波和横波的作用, 并定出总传声的效果。鉴于模型中考虑 3 种波的重要性, 便希望有 3 种波更确切的模型, 使预计房屋内的实测响应更精确。对每个构件都要求有 3 个子系统而使模型更为复杂, 因为每个墙或接板都支持弯曲波、纵波和横波, 而 3 类波的能级不同, 因此必须分开为 3 个子系统来考虑。

此外, 更复杂的模型还要考虑有许多个结构节点, 又大大增加了复杂性。因此从实用角度出发, 模型要保持越简单越好。

有两种不同模型要考虑。一种是考虑在结构构件中只出现弯曲波。每个墙和每个楼板看作为单个子系统。构件之间节点假定是销住的, 入射至节点的弯曲波只会在每块板上产生弯曲波。这是对结构声侧向传递建立起来的最简单模型。

第二种就比较复杂。在结构节点上除弯曲波之外, 假定还要产生纵波和横波。于是每个墙和每个楼板就要考虑到 3 个子系统。在该节点处就假定要出现所有类型波的耦合。入射到节点处每一个波会在所有各板上产生所有各类波。全部计算传递系数中都用薄板弯曲理论。但在第二种模型, 考虑把传递系数换为耦合损失因子时要用到厚板弯曲理论以得出群体速度。

实验表明, 估计离声源稍远处的响应时如忽略了纵波和横波将会产生很大误差。在近声源处, 两种模型估计结果的误差都较小。

三、一个突破传统的厅堂音质设计^{[24][25]}

建筑声学的理论成就如何反映到建筑工程中去, 为建筑服务, 接受实践的考验, 这一过程也是一种创造性工作。1986 年在美国建成的一座 3000 个座位的音乐厅 (在加州桔县