

从建筑声学到环境声学

孙广荣

(近代声学国家重点实验室 南京 210093)

2001 年 11 月 19 日收到

摘要 本文简述环境声学的发展过程以及在厅堂音质、环境噪声和噪声控制方面的新世纪展望。

关键词 环境声学, 环境噪声, 厅堂音质, 噪声控制

From architectural acoustics to environmental acoustics

SUN Guangrong

(National Key Lab. of Modern Acoustics, Nanjing, 210093)

Abstract This paper presents briefly the developing process of environmental acoustics and then the prospects on auditorium acoustics, environmental noise and noise control for the new century.

Key words Environmental acoustics, Environmental noise, Auditorium acoustics, Noise control.

1 建筑声学的发展

W.C.Sabine 于 1900 年发表了“混响”的著名论文^[1], 给出了混响时间的实验公式, 开辟了建筑声学, 也是近代声学研究的新时代。1929 年创刊的美国声学学会会刊 (J.Acous.Soc.Am) 其初期的论文是以建筑声学为主要内容。1929 年 C.F.Eyring 等人基于统计声学原理, 分别推导了混响时间的理论公式。W.A.MacNair 研究了厅堂的最佳混响时间。1932 年 V.O.Kmdsen 出版了《建筑声学》专著, 主要内容是以最佳混响时间为核心的室内声学原理和以质量定律为基础的隔声理论。1936 年 P.M.Morse 出版了《振动与声》, 从波动声学观点系统论述了室内声学原理, 以封闭空间中的简正振动模式解释了低频段室内声场的不均匀性和随时间衰

减的不规则性。与此同时, 为厅堂音质处理所需的建筑材料的吸声、隔声性能的测试和研究也逐渐展开。至此, 建筑声学从理论到实际, 初步形成了一门系统的学科。

二次大战以后, 建筑声学理论走向实际应用。1950 年 V.O.Knudsen 和 C.M.Harris 出版了《建筑中的声学设计》, 将声学原理应用于音质设计和噪声控制。1954 年 L.L.Bermek 出版了《声学》, 除了室内声场和噪声控制内容外, 还有较多篇幅介绍了传声器和扬声器, 反映了厅堂中使用扩声系统的要求。1951 年由 R.H.Parkin^[2] 负责声学设计的英国皇家节日音乐厅竣工, 这是音质设计理论应用于实际的里程碑。

在进一步的音质设计实践中, 发现“最佳混响时间”并非是决定室内音质的唯一参量,

因此在 20 世纪 50 年代掀起了寻找决定厅堂音质的“第二参量”的研究热潮。但当时除了 H.Haas 的“单个回声对语言感知的影响”^[3] 这一篇论文,说明反射声的强度和延迟时间对语言清晰度的关系外,没有取得重要进展。直到 1968 年, A.H.Marshall^[4] 提出了“早期侧向反射声”对音质起重要作用的观点。M.Barron^[5] 进行了对不同方向、不同强度、不同延迟的反射声的主观效应的长期研究,得出结论为: 过短的时延和高声级的反射声有声象漂移或染色效应,过长的时延有回声的感觉,只有大约 5–80ms 之间的反射声并且有足够多的侧向反射声能量才会有称之为“空间印象”的良好音乐效果。1993 年 M.Barron 出版了《厅堂音质和建筑设计》, 1996 年 L.L.Beranek 出版了《音乐厅和剧院的音质》, 这两本书大体上包涵了直到上世纪末的一些研究和实践结果。

2 环境噪声 —— 从室内小环境走向社会大环境

为保证有良好的音质,必须使室内本底噪声降低到一定水平,由此发展了吸声、隔声、管道消声、隔振、振动阻尼等噪声控制原理和技术。

二次大战后,科技、工业、交通迅速发展,噪声污染问题随着突显出来,成为社会公害之一,从而促使噪声控制技术应用于改善社会大环境的各种场合。但噪声在室外空间的传播,包括振动沿固体结构或地层中的传播,使噪声和振动对人的影响成为一个很大的社会问题。上世纪 60 年代,正当室内音质研究难以取得突破性进展,噪声控制却成为社会上许多部门的迫切需要,所以那时许多建筑声学专家转而致力于噪声控制研究。L.L.Beranek 主编了《噪声与振动控制》和 C.M.Harris 主编了《噪声控制手册》就说明了这一学科发展的动向。

控制噪声,最根本的一点是从噪声源来降低噪声的辐射强度。为此,各种机器设备的生

产行业从设计和工艺上来研究降低噪声的方法和措施; 另一方面机器噪声的发射值本身也是产品的一项综合质量指标。所以各行各业——动力机械、加工设备、交通工具、排气管道、家用电器……的工程师也参与到噪声控制的研究工作中。

噪声对人的生理和心理的影响是多方面的,从影响睡眠、休息、学习、工作到引起各种疾病,故而对人们的居室内部、办公室、工厂车间、公共场所、交通工具内部以及城市环境不同区域,都制订了噪声的限值标准,所以环境噪声和噪声控制跳出了建筑声学的范畴,成为具有社会性和工程性的新兴学科。1971 年开始,“国际噪声会议”每年举办一次,内容包括了与噪声有关的所有方面。与会人员除了声学家外,还有各行业的工程技术人员以及政府机构的环境保护方面的官员和工作人员,所要讨论和解决的有科学问题、技术问题,同时有政策、法规、教育等问题。从 1974 年第八届国际声学会议(每三年一次)开始,使用“环境声学”这一学科术语,它涵盖建筑声学、环境噪声和噪声控制,把原来的以建筑物内部声学问题为主的追求美好音质的建筑声学,扩展到人们生活和工作的大环境内的所有声学问题,其目的是使需要听的语言和音乐听得好,不需要的噪声被抑制到可允许的范围,为人们建立良好的声环境。

3 21 世纪展望

3.1 厅堂音质的评价和设计

依靠迅速发展的声场数字模拟技术,厅堂音质 CAD 有了很大进步,并正在发展“可听化”技术^[6],这是用在消声室内录制的“干音乐”,与厅堂内声源到某座位之间的传递函数相卷积,将得到的结果在高质量重放系统中还音,便可听辨厅堂建成后的音质。现在已有商业软件应用“可听化”技术来设计厅堂音质或扩声系统,但目前对语言清晰度的“可听化”

模拟有一定效果,而对音乐传输质量的模拟还有一定距离。因为第一,实际厅堂的体形结构复杂,得到的传递函数有一定程度的近似,即使从缩尺模型实验取得传递函数,也有一定误差;第二,实际的声源比较复杂,尤其是交响乐之演出于音乐厅,更难模拟;第三,重放系统的辐射声场,特别是其中的扬声器质量,难以真实地模拟实际厅堂的效果。所以要提高数字模拟的准确度,还要作不懈努力。

回过头来说,厅堂音质最终由观众实地聆听为最终评价,这一主观评价与不同的音乐节目、观众的民族习惯、个人的经历、爱好和心情有关。而主观评价与客观物理参量之间关系的研究还远未穷尽。(例如人们对双耳聆听所具有的“方位感”的立体声效果已有较深入的研究,但对于什么物理量决定“远近感”则鲜有研究)。所以到目前为止,要保证厅堂音质有高的语言清晰度是比较有把握的;但作为音乐厅声学,这一涉及声学、建筑、生理、心理以及民族文化等极其广泛的综合问题,可认为是一项不断有新进展但又是永无止境的研究课题。

3.2 噪声对人的影响

迄今为止,所有与劳动保护和环境保护有关的噪声标准,基本上都是以 A 声级(或等效连续 A 声级)为评价量。对于劳动岗位,以 A 声级噪声暴露量与耳聋发病率的关系有较多的调查结果。如果长期工作在超过 90dB(A) 噪声环境下,则噪声性耳聋发病率迅速提高。所以大多数国家的劳动卫生标准定为 90dB(A),也有的定为 85dB(A)。但对于低频成份丰富的高噪声环境,例如大型泵房, A 声级可能不到 90dB,但 C 声级可能大于 110dB,严重影响岗位人员的身心健康。

作为城市区域环境噪声标准,其限值在 50dB(A) 上下,对于稳态噪声和起伏不很大的连续噪声,大体上是适用的。但是环境噪声经常出现不连续的噪声,如车流量较小时的交通噪声、断续的机械加工声、高压锅炉突发性的排汽声等等,这些非稳态噪声对人的生理、心理

影响的研究还很不够。在正在修订的 ISO1996-1 的 DIS 文件^[7]中,对于不同脉冲声的情况,例如各种冲击、碰撞等强脉冲性声源和各种爆炸、轰声等高能量脉冲源,在评价时给予适当的声级修正。但这些修正是否将噪声的物理特性与人的生理、心理反应很好地结合,还待进一步研究。

对不同劳动岗位,考虑不同频率特性的噪声,尤其是低频和次声对人的影响;在不同环境条件下,研究不同时间特性的噪声对人的影响,这些涉及声学、医学、生理、心理和社会各方面的综合研究,应为一项长期的研究工作。

上述研究也是制订或修订有关噪声标准的基础。随着科技发展和环境条件的变化,无论是劳动保护或环境保护,都要针对噪声环境的特点和人的响应效果,来合理地分类修订,以利于正常的工作和生活。例如 L.L.Beranek 考虑到空调系统及其它低频成份噪声的影响,于 1989 年提出的 NCB(Balanced Criteria Curves) 噪声评价曲线^[8],将低频范围扩展到中心频率为 16Hz 的倍频程;美国于 1995 年将评价室内噪声的房间标准曲线(RC 曲线)也扩展到 16Hz。

表 1 所列一些国家和地区的居住地对工业噪声的限值中,有不少采用了“评价级 L_T ”,即对含有明显纯音成份或脉冲性噪声时,分别加上调整量 K_T 和 K_I 。这在我们今后标准修订时可以参考。

3.3 噪声控制新技术

传统的噪声控制技术——吸声、隔声、减振和管道消声等——已逐渐成为一般的声学工程设计的内容,有的编制了工程设计的软件。噪声控制工程和建筑声学工程、扩声系统工程,这些声频方面的工程技术性研究发展成为“工程声学”的实用性学科分支。

从声学功能结合建筑装饰的美观要求出发,发展各种新型吸声、隔声材料和结构是当前工程声学的-一个特点。例如各种无纤维吸声

表 1 一些国家或地区居住地对工业噪声的限值, dB(A)

国家或地区	噪声评价量	限值		
		白天	休息时间	夜间
奥地利	L_T	50-55		40-45
比利时	L_{95}	45-50	40-45	35-40
丹麦	L_T	45-50	40-45	35-40
法国	L_T	50-55	45-50	35-40
德国	L_T	50-55	6dB 调节	35-40
香港	L_T	60-65		50-55
意大利	L_T	50-55		40-45
日本	L_{50}	50-60	45-50	40-45
韩国	L_T	50-65	45-50	40
荷兰	L_T	50	45	40
挪威	L_T	50	45	40
瑞典	L_T	50-55	45-50	40-45
瑞士	L_T	55	45	

材料或结构, 逐渐有较多的应用。马大猷院士在 60 年代后期提出微穿孔板吸声体, 已得到国内外广泛应用^[9]。最近又研究微缝吸声体理论^[10]。德国夫琅霍费建筑研究所还发展了一种聚碳酸酯薄膜穿孔吸声结构, 本身是一种阻燃材料, 它除了具有微穿孔吸声结构特点外, 还有透明感, 可用于原建筑只重美观忽视声学而导致过长混响时间的厅堂, 进行增加声吸收的补救, 又基本不影响原有建筑风貌。它还可做成卷帘式安装构件, 随吸声需要而打开或卷起, 来调节厅堂的混响时间。

在隔声材料方面, 如果不考虑材料的弹性, 则(无限大面积)材料的传声损失遵循“质量定律”, 即使传声损失变大, 就得增加隔层材料的单位面积质量。如果考虑弹性, 则无论是厚度共振或吻合效应, 都将降低隔层的传声损失。但是最近出现了一种称之为“声学晶体”的新型组合材料^[11], 它由局部共振结构单元组成。改变结构单元的大小和几何形状, 可以调谐频率范围使在此范围内有效弹性常数是负的, 从而成为反射器的材料, 显示出比相关波长小两个数量级的点阵常数的谱隙, 打破了传统的“质量定律”的声传输规律。一个具体例子是: 半径 5mm 的铅球(高密度的固体核心)外

包 2.5mm 厚的硅橡胶(弹性软材料), 包好的圆球排列成 $8 \times 8 \times 8$ 个的简单立方晶体, 点阵常数 1.55cm, 用环氧作为基质材料。在阻抗管中 250-1600Hz 范围内对四层声学晶体作传输系数测量。当环氧内声学晶体的体积占 48% 时, 发现在 400Hz 和 1100Hz 有两个振幅传输系数小于 10^{-3} 的低谷, 而同样厚度为 2.1cm 的纯环氧薄板, 其振幅传输系数在 10^{-2} 左右, 随频率缓慢变小。这个传输频率低谷的位置与理论计算符合较好。也有消息报导美国海军应用了似乎与此类材料类似的新型隔声材料, 但民用上尚未见到有具体应用的例子。我们等待此类材料的研究和应用的进展。

有源消声减振的研究热潮已持续了 20 多年, 其所具有的优势是对于低频噪声的抑制功能。但绝大多数噪声信号呈无规特性, 即它的频率成分的振幅与相位随时间的变化是随机的, 要实时地产生次级噪声与原始噪声相抵消, 其难度当然极大。所以, 首先应用和发展信号处理技术, 实现局部空间的降噪, 如有源消声耳罩或头部附近降噪, 管道内的低频降噪等。另一种情况是应用于噪声信号比较简单情况, 如变压器噪声。近年来一个突出的例子是澳大利亚一个 6m 高、160MVA 的大型变压器, 用了 100 个有源控制通道, 使 100Hz 的噪声在变压器周围降低了 20dB^[12]。这是传统的噪声控制技术, 如声屏障所不能达到的。国际上大的电力公司对此项目有很大兴趣。

有源降噪不仅在噪声控制方面有潜在的广泛应用价值, 并有可能应用在其他方面, 如消除机翼颤振^[13], 防止航空器发生灾难事故。

* * * * *

环境声学的目的是改善人们的生活、工作环境。随着科技的发展, 文化素质的提高和生活的改善, 对声环境质量的要求越来越高。无论是对音乐的美的享受还是抑制周围环境的噪声, 都要考虑人的主观感受。所以环境声学是声学 and 现代科技与生命科学结合的科学, 具有永久的生命力。

(下转第 39 页)

的基础上处理自然语言。创新的 HNC 理论与技术适应这一需求而诞生, 有望为语音技术的突破提供新的思路与方法。

参 考 文 献

- 1 林焘, 中国现代语音学的形成与发展. 金城出版社, 1999.
- 2 吴宗济, 林茂灿主编. 实验语音学概要. 高等教育出版社, 1989.
- 3 林焘, 王理嘉. 北京语音实验录. 北京大学出版社, 1985.
- 4 曹剑芬, 杨顺安. 中国语文, 1984, (6):
- 5 齐士铃, 张家骥. 声学学报, 1982, 7(1):
- 6 周磊. 现代汉语方言自然口语语料库建库的若干问题. 《HNC 与语言学研究》武汉理工大学, 2001.
- 7 鲍怀翘. 中国语言学报, 1995, (7):
- 8 孔江平. 蒙语声门阻抗参量的相关性及其分类. 金城出版社. 现代语音学论文集, 1999.
- 9 祖漪清, 陈肖霞. 连续语流中的音节延长及其作用. 金城出版社, 1999.
- 10 沈炯等. 语文研究, 1994, (3):
- 11 林茂灿. 语音学、语言学与言语工程. 《HNC 与语言学研究》武汉理工大学 2001.
- 12 张家骥. 声学学报, 1990, (2):
- 13 许军, 袁保宗. 高自然度的语音合成广播系统. 第五届全国语音图象通讯信号处理会议论文集.
- 14 初敏. 高清晰度高自然度汉语文语转换系统的研究. 中科院声学所博士论文, 1995.
- 15 陈永彬, 王仁华. 语言信号处理. 中国科技大学出版社, 1990.
- 16 马大猷等. 声学学报, 1965, 2(7):
- 17 俞铁城. 物理学报, 1978, 27(5):
- 18 Lee Linshan, et al. A Real-time Mandarin Dictation Machine for Chinese Language with Unlimited Texts and Very Large Vocabulary, ICASSP 1990.
- 19 Gao Yuqing, et al. Tangerine: A Large Vocabulary Mandarin Dictation System, ICASSP-95.
- 20 Xu Bo, et al. A General Chinese Acoustic/Phonetic Decode for Syllable, Word and Continuous Speech Recognition, International Symposium on Speech, Image Processing and Neural Network, 1994.
- 21 Ji Tianying, Wang Zuoying, Lu Dajin, "A Method for Chinese Syllables Recognition based upon Sub-syllable Hidden Markov Model, International Symposium on Speech, Image Processing and Neural Network, 1994.
- 22 何磊, 方棣棠, 吴文虎. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(1):
- 23 刘建. 汉语连续语音识别及连续汉语的声调识别研究. 中科院声学所博士论文, 1999.
- 24 姚天顺. 自然语言理解——一种让机器懂得人类语言的研究. 清华大学出版社, 1995.
- 25 黄曾阳. HNC 的发展和未来, 《HNC 与语言学研究》武汉理工大学, 2001.
- 26 黄曾阳. 中国基础科学, 1999, 1(1):
- 27 黄曾阳. 中文信息学报, 1997, 11(4):
- 28 黄曾阳. HNC(概念层次网络)理论——计算机理解自然语言的新思路. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- 29 苗传江. HNC 句类知识研究. 中科院声学所博士论文, 2001.
- 30 张全, 张倪, 韦向峰. 汉语语音识别的纠错处理, 《自然语言理解与机器翻译》. 清华大学出版社, 2001.
- 31 晋耀红. 基于 HNC 理论的句类分析系统的设计与实现. 中科院声学所硕士论文, 1998.
- 32 李耀勇. 基于 HNC 理论的机器翻译. 中国科学院声学所博士后研究报告, 2001.
- 33 见《HNC 与语言学研究》中的有关论文. 武汉理工大学, 2001.
- 34 许嘉璐. 现状与设想. 中国语文, 2000, (6):

(上接第 49 页)

参 考 文 献

- 1 Sabine W C. "Reverberation", The America Architect, 1900; Collected papers on Acoustics, Dover, New York, 1964, 3-68.
- 2 Pakin P H, et al. *Acustica*, 1953 3(1): 1-21.
- 3 Haas H. *Acustica*, 1951, 1(1): 49-58.
- 4 Marshall A H. *Archit. Sci. Rev.*, (Australia) 1968, 11(1): 81-87.
- 5 Barron M. *J. Sound. Vib.*, 1981, 77(2): 211-232.
- 6 Keiner K, et al. *J. Audio Eng. Soc.*, 1993, 41(11): 861.
- 7 ISO/DIS 1996-1, 2001-08-01.
- 8 Beranek L L. *J. Acous. Soc. Am.*, 1989, 86(2): 650.
- 9 查雪琴. 声学学报, 2000, 25(4): 258-265.
- 10 马大猷. 声学学报, 2000, 25(6): 481-485.
- 11 Liu Zhengyou, et al. *Science*, 2000, 289(5485): 1734.
- 12 Qiu X, Hensen C H. *J. Sound Vib*, 2001, 240(4): 647-665.
- 13 Yang J, Sha J, Qiu X. *J. Sound Vib.*, 1996, 190(5): 843-846.