

室内声学

H·库特鲁夫 著 沈 嶸 译



中国建筑工业出版社

室内声学

H. 库特鲁夫 著
沈 豪 译

中国建筑工业出版社

本书根据西德H.库特鲁夫所著《室内声学》的英文第二版(1979)译出,书中系统而全面地论述了建筑声学中的一个重要问题——室内音质。它从理论出发,讨论了声音在室内的产生和传播,声的吸收和吸声材料,以及音质设计、电声设备等实际问题。本书的理论性较强,材料较新,反映了近年来室内音质理论研究方面的新成果,并介绍了建筑声学中的一些新的实验方法。

本书可供建筑、声学、物理学、广播等有关专业的科技工作者参考。

Heinrich Kuttruff

Room Acoustics (2nd ed.)

Applied Science Publishers Ltd (1979)

* * *

室 内 声 学

沈 嶸 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

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(北京阜外南礼士路)

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 9 $\frac{1}{2}$ 字数: 269千字

1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷

印数: 1—6,900册 定价: 1.50元

统一书号: 15040·4313

译者序

室内声学的基本问题是研究大型厅堂内影响语言和音乐可听度的条件和制定保证整个房间内具有最佳听觉条件的声学解决办法。已经了解，房间内声信号的感觉条件，决定于每个听众所占的房间体积、房间的形状和房间内表面对声波吸收与扩散的特性。显然，上述因素和建筑处理有密切关系，因此声学处理不能排斥建筑观点的方案。反之，如果建筑处理采用和声学要求相矛盾的方案，则即使应用现代电声设备也不能满意地解决房间音质问题。

II. 库特鲁夫所著的《室内声学》，比较全面地反映了近代建筑声学的理论和实践方面的主要成就。全书在了解语言和音乐作为随机信号的统计特性，分析声源把信号传给室内听众时房间对信号的影响，探索室内声信号主观感觉和房间音质标准之间的关系等方面都作了比较系统的阐述。但是房间音质问题，不论是主观方面还是客观方面，都还没有完全解决而继续进行着研究工作。为了更好地理解室内声学的内容和最新的进展，下面根据国际上的研究情况，扼要介绍下述八个基本问题供参考：

1. 声信号的特性

自然声（语言和音乐）的特性，包括能级，它的时间分布和频率分布，动态范围，允许线性畸变和非线性畸变等，是由广播技术首先研究的。这些结果可以适当地运用于建筑声学。例如，演讲者和各种乐器的声功率和频谱有助于制定最佳混响时间。但这些资料还不充分并且不能说明许多实验中出现因素。主要原因是我们还不清楚在房间内感觉自然声最佳条件所决定的规律性。不久前，人们还不了解为了研究在房间内听语言和音乐应该选择哪些客观特性和指标。因此分析了由于房间内声反射而产生的基本信号的延迟重复。应该把这种延迟在时间上分成两个不同

部分：初始部分，它包括不超过某个延迟临界值的反射声信号并起着加强原声的有利作用；第二部分，即后一部分反射声，虽然它与形成混响过程有关，但在大多数情况下是一种有害的干扰。

具有时间延迟不大的初始部分反射声，和原信号保持着相当强的相关性。因此，在混响过程中初始部分的反射声信号和原信号在一定程度上是相干的，延迟更大的后一部分(超过相干间隔)的反射声信号已经和直达声不相关，如果它的能级仍然很大就起着干扰的不良作用。相干性的概念在光学中是完全清楚的，但它描述稳态图形，对于声信号叠加时呈现的相干效应是时间的函数。目前不研究信号函数本身的统计特性而研究与变化缓慢的随机时间函数有关的一些特性。这种函数就是所谓即时自相关函数。实验上可以定量地量度各种自然声的相干度。今后的工作是积累大量不同类型信号和不同延迟时间的相干系数的实验数据。

为了理解这种研究的实际价值，可以提出两种情况。演出音乐的房间应该保证对不同风格音乐作品的最佳发声和其相干间隔适应。这就是说，具有一定反射声信号时间结构的音乐厅，不能同样好地满足各种演出条件。因此正确的解决方案必须使房间的声学特性相应于乐队信号的平均特性。只有对许多常用节目的统计特性的实验研究能给出这种知识。统计特性研究的重要性还表现在立体混响系统的应用方面。立体混响装置能影响反射声过程的时间特性，所以可以使房间的声学特性适应于信号的要求。可以期望信息论中用概率观点研究信号的方法将能成功地应用于室内声学中。

2. 房间的声学特性

研究房间音质必须解决两个任务：探索反映房间声学特性的客观指标和反映房间内某点感觉条件的局部标准。这方面工作主要基于脉冲测量。房间用短脉冲声激发，记录反射脉冲的能级和时间延迟。分析这种测量的大量结果就可能给出反射声脉冲在能级和时间延迟分布方面的知识。比较同一大厅内不同位置上的这种分布可以初步了解局部标准的一些特性。为了研究反射声到达

听众的方向分布,用强指向性传声器进行稳态测量。测量的结果用所谓“刺猬的三维图形”表示,它可以清晰地表示出该点的扩散程度。经验证明,要获得良好的房间音质,相当高的扩散度是很重要的。

为了评价房间内与不同的能量、时间延迟和入射方向的反射声分布有关的特性,必须选择某个能反映房间音质的积分量。提出过两种标准,其中一个决定于反射声信号能级的时间分布,称为清晰度。另一个决定于反射声信号到达听众的方向分布,称为扩散度。应该指出,扩散度的测量不只是在房间音质范围内有实际意义。目前采用的在混响室内测量各种材料和结构吸声系数的方法,要求混响室内不论没有材料或装有材料时,都应具有很高的扩散度。检查这个条件的满足程度,对吸声系数测量标准化以及对比较各个实验室的许多测量结果是有重要意义的。

关于室内混响理论,值得注意的是经典的混响时间公式已经日益受到批评,已经发现许多新建大厅的混响时间常常比预期的要短。过去认为主要是无法充分估计大厅内所有吸声量引起的。但是现在越来越相信经典混响公式中可能渗有根本性的错误。用马尔科夫链来表述混响过程的研究工作已经取得进展。可以证明这种混响理论的极限情况零阶马尔科夫链可以导出艾润混响公式。计算机模拟和模型实验都证实了这点。关于这方面内容可参阅有关文献^①。

3. 吸声

声源断开后,室内稳态声级和它的衰变过程决定于总吸声量,即声波在传播时以及在边界面反射时单位时间内吸收的声能。所以在建筑声学中,具有一定数值和频率特性的吸声材料和吸声结构的布置,是控制房间音质的主要方法。计算复合结构的吸声理论现在已经详细研究并且应用于法向入射的情况。利用穿

① Gerlach und Mellert, Der Nachhall vorgang als Markoffsche Kette—Theorie und erste experimentalle überprüfung, Acustica, 32(1975), 4, 211.

孔板构成双层或三层共振结构，可以在很宽的频率范围内获得高的吸声系数。为了研究抑制室内产生噪声的最有效方法，分析了“空间吸声体”，由于这种结构的声衍射现象，它能得到大于1的吸声系数。合理地利用共振特性就可以在很宽的频带内获得有效的声吸收。应该指出，关于混响室测得的吸声系数，与实际条件下相应材料和结构的吸声系数之间的关系，是尚未解决的重要问题。

4. 反射声的主观感觉

心理声学的研究十分有助于建筑声学的发展。目前在房间音质的研究工作中，都频繁地测量混响和反射声的主观效应。显然，当声反射的时间延迟超过某临界值就会形成回声。在建筑声学中，时间延迟的临界值大约取50毫秒。对于延迟更大的反射声的主观效应还和反射声的强度及声信号的特性有关。如果信号是一个脉冲，则在无噪声情况下，只要它的强度超过听阈总是能听到的。对于语言就不一样，讲话的速度对反射声的主观感觉影响很大。对于音乐则几乎不受反射声干扰。这方面已经获得许多有意义的结果，例如回声干扰与讲话速度的关系，回声干扰与反射声强度的关系，音质对回声干扰的影响，混响时间对回声干扰的影响，哈斯效应和回声的绝对识别阈等。

5. 音质评价

任意选择室内音质的客观标准后，不可避免地会发生这种标准在某种条件下存在最佳值的问题。这答案只能把所选择的客观标准与在该条件下音质的主观评价比较以后才能获得。音质评价的主要问题是求房间的容积和最佳混响时间频率特性的关系。直到不久以前，研究这个问题还是用测量若干认为音质良好的厅堂并进行比较的方法。在这些厅堂内测量中频混响时间，把测量结果对应于厅堂容积作出的曲线给出许多离散的点，其平均趋势是混响时间随容积增加而增大。测量点集中在某条平均曲线的周围，它表示最佳混响和大厅容积的特性曲线。类似方法也可以用来研究最佳混响时间的频率特性。现代高质量录音技术的发展，

已经可能组织并进行在不同容积和不同混响的厅堂内录音的音乐作品的音质评价。不久前，库尔^①进行了这种研究，所获得的结果表明：在容积大于 $2000\sim 3000\text{m}^3$ 的大厅内，最佳混响时间不决定于房间的容积，但和演奏音乐的特性和风格有关。在研究音质主观评价的规律性方面，可以利用现代的人工混响技术。使用这种设备就可以调节混响过程的时间，也可以研究个别因素对音质的影响。

6. 房间音质和电声技术的关系

在大型厅堂内由于座位增多，音质要求复杂，所以逐渐采用电声设备。近年来国内外建造了许多多功能厅堂，成功地应用成套电声设备来实现这种多用途。如果考虑到这种设备的选择、布置和外形是建筑声学设计不可分割的一部分，并注意扩声质量和房间音质的紧密联系，就不难理解何以现代的扩声理论和技术应该作为建筑声学的的一个重要分支来研究。

现代扩声技术，特别是立体声技术拥有相当完善的设备，可以用来处理房间内某些音质问题。声反馈理论还未完善解决，因此声信号放大倍数还不能预先计算，最近频率不规则性和空间不规则性理论中的统计方法计算结果已被用来分析室内扩声系统的特性。用频移法来降低语言扩声系统的声反馈就是具有实用意义的结果^②。在国外，用电声技术来控制房间音质，特别是立体混响系统的研究有新的发展，它可以用来控制房间内音乐的音质。当然应该注意到立体混响只能应用于具有强吸声的大厅内。可以相信，在不远的将来会越来越多地建造多功能厅堂。所以立体混响系统的理论和实验研究是有发展前途的。直到目前为止，这种设备的数量还不多，所以立体混响的使用还缺乏经验。

7. 大厅的声学设计方法

各种厅堂的设计方法已经研究得很多，可以用来处理各类设

① Kuhl, W., Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios, *Acustica* 4(1954), AB2, 618.

② 沈燮：频移对语言扩声质量的影响，*声学学报*，2卷(1965)2期，91.

计问题。如果不包括大厅的相对形状和声线分析,则这种设计方法可以归纳为容积的选择,最佳混响时间和它的频率特性的选择,吸声材料的组合等。设计时力求混响时间与选择的数值相差小于 $\pm 10\%$ 。实际的计算准确度往往很低。听众和演员引起的声吸收的计算比较困难,因为一个听众的等值吸声量可以在很宽的范围内变化,它决定于听众分布的密度、家具类型和其它直接和听众有关的吸声量。混响室内测得的吸声系数总不能适应房间内实际条件,因为实际房间的扩散度比混响室内低。最后,大厅内还有许多考虑不到的吸收,例如由缝隙漏掉的声能,灯具和通风网格、弹性结构的振动等的吸收也使计算值和实际数值有差别。设计大厅时计算混响时间虽然还不充分,但总是必需的。因此改进计算总吸声量的准确度直到现在还是实验研究的对象。

大厅的声学设计和声学模型的实验研究有关。声学模型的研究工作国内外已做了不少。但应该指出,声学模型的实验技术近年来已有很大进展。在二十分之一的模型内已能模拟 100~5000 赫频率范围内的混响时间。用变速录音机方法还可以在十分之一模型内对混响时间和扩散度进行主观评价。

装有电声设备的厅堂音质设计比较困难。这时计算平均吸声系数时应该考虑到扬声器的位置和它的指向特性。这方面的工作虽然还进行得不多,但它的必要性是无可怀疑的。

8. 室内声传播的计算机模拟

数字计算机的发展与应用,为模拟室内声传播提供了一种新方法。用这种方法,可以在厅堂建成前评价它的音质。数字计算机模拟方法还可以研究室内声学的许多基本问题,例如初始时间间隔的作用,一次反射声的影响,回声分布的影响等。一个房间可以看作线性网络,房间内不同点之间的声传播可以用电网络来模拟,以产生舞台上某点和听众两耳之间的脉冲响应。电网络的模拟类似于数字计算机上的抽样数据控制系统,其模拟方法如下:一个没有混响的声信号(在消声室内录下的语言或音乐),经过抽样后量化并穿孔再输入计算机,计算机的程序是在这信号

上加入和被模拟厅堂内给定位置特性类似的反射声和混响。在这样的程序控制下，数字计算机产生两个输出信号，它们经数模转换后用两通路录音机录音。然后在消声室内用两个对称放置的扬声器重放立体声，听众就可以评价音乐厅的音质。

最后，我们还应注意声信号的区域性比较强，英语也不同于汉语，因此在实际工作中应该了解汉语和民族乐器的声学特性。书末的汉英索引是沈恺婷同志编的，特此表示感谢。

沈 壕

1980.12于北京

第 二 版 序 言

本书第二版为作者提供了一个消除正文和公式中错误的机会，更为重要的是增加了近年来的进展，这些内容在写第一版期间还没有获得进展。此外，对某些章节和内容作了修改，以使正文更为完整并且易于理解。同时也删去了一些不太重要和过时的材料，以便使本书大致保持原有的篇幅。

作者感谢指出本书第一版中不正确的公式或符号以及提出建设性批评帮助改进本书内容的所有读者。特别感谢萨尔福德（Salford）大学洛德（P.Lord）教授详细地检查了第二版的原稿。

H·库特鲁夫
于亚琛

第一版序言（节译）

本书企图用系统和综合的方式介绍室内声学^①的基本原理，因此提供的内容可以用于房间的音质设计^②并可作为有关测量技术的手册。

室内声学的基本原理实质上可以分成两个方面：闭室内声音的产生和传播以及生理和心理因素。声音的产生和传播是物理过程，可以用物理学家或工程师的语言毫不含糊地叙述出来。生理和心理因素具有头等重要的意义，但是甚至以我们现阶段的知识水平还不能作精确地描述。表述室内声学中这两方面的声学内容，不论对讨论测量技术、音质设计或安装扩声系统的问题，都是互相联系而又同等重要的。

本书前面的部分以充分的篇幅客观地描述闭室内的声场，但即使在这个阶段也尽可能考虑听觉特性引起的局限性。对于声场，以同等的份量用波动声学 and 几何声学两种方法描述；前一种方法可以提供更为基本的理解，而后一种方法则适宜于实际的应用。在这两种情况下，都充分运用了统计方法；所以对通常所说的“室内统计声学”就没有再作单独的论述。

对于声学工作者来说，彻底地理解各种吸声器是必需的，分析吸声机理就是以这样理解为根据。但是，在设计一间房间时，声学工作者多半不去计算具体结构的吸声特性，转而依靠收集到的测量结果和基于经验的数据。由于这个原因，在测量技术一章内比较详细地讨论了测定声吸收的方法。

在企图叙述房间内与感觉声音有关的一些重要因素时曾遇到某些困难，主要是现阶段的知识不够系统，似乎只是一些孤立试

① Room acoustics有两种含义。译本中，在强调其物理特性的术语时译为“室内声学”，而强调对听觉反应的术语时则译为“房间音质”。——译者

验的结果, 这种试验结果强烈地受到实验条件的影响。

我们省略了以成套房间为例子说明如何应用室内声学技术的内容。这方面内容的书已有出版。例如白瑞纳克(Beranek)^①, 布鲁克梅耶(Bruckmayer)^②, 弗雷尔(Furrer)和劳布(Lauber)^③的著作。我们宁愿代之以说明怎样设计一间房间和需要考虑哪些参数。此外, 因为模型研究已经证明是有用的, 所以详细地讨论了它。

最后, 用一整章讨论室内扩声设备的设计。这是考虑到这样的事实, 即目前在房间内使用电声设备几乎比瘸子使用拐杖还要频繁。即使在大多数音质优良的房间中, 这种电声设备也是清晰地传输讲话的唯一方法。实际上, 扩声设备和它的性能对于决定听闻的音质比房间本身某些设计的细节起着更重要的作用。

凡具有适当数学基础和一些声波传播基本知识的读者, 应该能全面地理解本书。对于数学训练较有限的读者, 可以省略某些论点也不至于有妨碍。

室内声学的参考文献很广泛, 作者不想列出一份详尽的参考文献目录。只有在正文内直接引用的著作或者为了满足可能要求内容更详细时才给出参考文献。

.....

H·库特鲁夫

于亚琛

-
- ① Beranek, L.L (1962), Music, Acoustics and Architecture, John Wiley, New York/London.
 - ② Bruckmayer, F. (1962). Schalltechnik in Hochbau, Franz Deutick, Wien.
 - ③ Furrer, W. and Lauber, A. (1972). Raum und Bauakustik, Lärmabwehr, third edition, Birkhäuser, Basel.

符 号 表

a	常数; 半径	J	贝塞尔函数
$a(t)$	计权函数	k	传播常数
A	常数; 吸声截面或吸声面积	k_{12}	耦合常数
b	常数; 长度	K	归一化常数; 内耳听觉相干性
$b(\tau)$	计权函数	l	长度
B	常数; 频带宽度; 单位墙面积的声能流	$\bar{l}$	平均自由程长度
c	声速; 常数 (第三章第五节)	L	声压级; 长度
C	常数; 透明度指数	m	整数; 声强衰减常数
d	距离; 方向性扩散	M	质量 (单位面积质量)
D	常数; 清晰度	n	整数
e	能量	N	整数
E	能量	P	声压
f	频率	p_0	空气的静压
F	力; 任意函数	P	声功率; 概率
g	常数	q	单位体积的容积速度; 常数
$g(t)$	脉冲响应		因子
G	增益或指向性因数; 任意函数 (第一章第二节)	Q	容积速度; Q 因数; 散射截面 (第五章第一节)
$G(f)$	传输函数	r	离原点的距离
$G(\omega)$		$r(t)$	无规噪声的时间函数 (第八章第二节)
$h(t)$	混响函数	R	反射系数; 力阻; 距离
$H(\delta)$	阻尼常数的分布	R_r	辐射阻
i	虚数单位	s	力劲
I	声强	$s(t)$	时间函数
		S	面积; 侧向和非侧向初始

声能的比值		$\delta(t)$	δ 函数
$S(f)$	谱函数	ε	仰角; 回声度
$S(\omega)$		ζ	墙的比声阻抗
S_n	第 n 次分振动的幅值	η	比声阻抗的虚部; 空气的 粘滞系数
t	时间	θ	几何角
t_s	“重心”-时间	θ	温度; 几何角
T	混响时间; 时间间隔; 振 动周期	θ_0	相干性的时间间隔
v	质点速度	κ	绝热指数 (比热比)
V	体积; 容积	λ	波长
w	声能密度	μ	相干度
$W(F)$	功率谱	ξ	比声阻抗的实部
x	笛卡尔坐标	Ξ	比流阻
y		ρ	空气密度
z		σ	孔隙率; 比例因子
Z	墙的复数阻抗率 ^①	τ	时间变数, 延迟时间
α	吸声系数	φ	方位角; 自相关和互相关 函数
β	相位常数; 墙阻抗率的相 角; 几何角	Φ	方位角
γ	反射系数的相角; 衰减常 数 (幅值); 相对方差 (第五章第二节)	ψ	相角
Γ	指向性函数	Ψ	相关系数或相关因数
δ	阻尼常数	ω	角频率
		Ω	立体角

① 原文为复数阻抗, 译文改为复数阻抗率, 见第二章有关注。——译者

目 录

译者序	
第二版序言	
第一版序言	
符号表	
绪论	1
第一章 气体中声波的自由传播	6
第一节 声学量	6
第二节 平面波, 声能密度和声强	8
第三节 球面波, 声辐射	10
第四节 声压级和响度级	12
第五节 非谐和的声信号	14
第六节 自然声源的特性	18
第二章 墙前方的声场	24
第一节 反射系数, 吸声系数和墙阻抗	25
第二节 法向入射的声反射	26
第三节 斜入射的声反射	29
第四节 一些例子	32
第五节 各向均匀分布的声波入射	39
第三章 关闭空间内的声场(波动理论)	45
第一节 闭室内波动方程的形式解	46
第二节 边界面为刚性的矩形房间内的简正振动方式	49
第三节 非刚性墙	57
第四节 稳态声场	61
第五节 房间内的衰变振动方式, 混响	67
第四章 声波频率非常高的极限情况:	
室内几何声学	74

第一节	声线的反射	75
第二节	房间内的声反射	77
第三节	声反射的时间分布	81
第四节	声反射的方向分布, 扩散	85
第五章	扩散声场中的混响和稳态声能密度	90
第一节	扩散声场的实现	91
第二节	平均自由路程和每秒平均反射数(反射频率)	97
第三节	声衰变和混响时间	101
第四节	其它混响理论, 蒙泰-卡洛计算	103
第五节	具有扩散声场的混响空间内的稳态声能密度	109
第六节	耦合房间	112
第六章	声吸收和吸声器	117
第一节	空气中的声衰减	117
第二节	不可避免的墙面吸收	120
第三节	振动墙或穿孔板的声吸收	122
第四节	宽频带共振吸声器	125
第五节	单个共振器	128
第六节	多孔材料的声吸收	133
第七节	听众和座椅的吸收	142
第八节	消声室	146
第七章	组合声场的主观效应	150
第一节	直达声和反射声结合效应的综述	152
第二节	单个反射的感觉能力	154
第三节	反射(回声)引起的烦扰	157
第四节	初始声能以及它和语言可懂度与透明度的关系	163
第五节	初始声能以及它和“空间感”的关系	168
第六节	混响的主观效应, 最佳混响时间和混响感	173
第七节	音乐厅音质的主观评价	180
第八章	室内声学中的测量技术	186
第一节	声学测量仪表和方法的综述	187
第二节	混响时间测量	190
第三节	相关测量	196