声学譯丛之四

建筑声学

上海市物理学会声学工作委員会 主編

上海市科学技术編譯館

声学譯丛之四

建筑声学

上海市物理学会声学工作委員会主編

*

上海市科学技术編譯館出版
（上海市南昌路59号）
新华书店上海发行所发行　各地新华书店經售
商务印书館上海厂印刷

*

开本 787×1092 1/16　印張 9 3/4　字数 300,000
1962 年11月第1版　1962 年11月第1次印刷
印数 1—1,000

編　号：5007・55
定　价：2.00 元

編者的話

声学譯丛自开始編譯以来这已是第四輯了．本輯以建筑声学为专題．在这一輯中理論性和实用性的文章都有一些．有关于新問題和新发展的文章，例如“在吸收不均匀分布情况下比較精确的混响公式”、“內阻尼极高的材料”和“新型高隔声輕质墙”等；也有一些一般原理和总結性的文章，例如“1929年以来測量吸声材料的声学性能方法的进展”、“建筑物的声輻射問題”、“固体声过程的計算”、“撞击声的发生与隔絕”和“工业噪声研究現况”．此外也介紹了一些还未能肯定的看法，例如“語言扩声系統的評价”、“立体声重放”和“建筑声学中关于測量标准方法的問題”等．选題中大部分取自国外期刊和会議論文集等最近发表的文章，也有一些原则性和总結性文章虽然还是几年前的，而在今天仍有它的意义，因此亦有选入．資料包括俄、英、德、法四种文字，英文較多．总的来說，由于建筑声学的范圍較广，同时限于篇幅，所以本輯并沒有包括建筑声学的各个方面．例如对于管道噪声、城市及戶外噪声、測定技术等方面就沒有选題，有些方面却比較多一点，例如固体声、室內音质和吸声材料等．这些問題打算在以后各輯中再作适当的調整．

在編輯工作中，深感譯名和符号的統一很是重要．“声学术語”的出版已为这方面提供了不少方便，但是要逐步改进还得依靠大家的努力和关怀．为此我們拟对文中所出現的尚未肯定或值得推敲的术語在书末列出，便于大家一起来商榷确定，为今后增訂“声学术語”积累資料．此外，中国科学院电子学研究所曾在1961年9月提出了一个“声学常用統一符号”，我們认为这个方案很好也很及时，在征得有关方面同意后列于本輯之末，供大家参考．本輯中所列单位一律为公制，凡原文为英制者均已换算，有些图表也重新繪制，以便利讀者．

本輯的組稿工作得到本市和外地許多单位和个人的协作和支持，对我們的工作、选題和譯文提出了宝貴的意見，这些都使我們对办好譯丛增加了信心．由于篇幅关系，有些譯稿只能安排在下次专輯中，这一点請譯者鉴諒．

声学譯丛的出版工作还只是初創阶段，因此缺点可能更多一些，希望讀者随时对我們的工作多多指正．

上海市物理学会声学工作委員会

本輯执行編輯 章启馥 王季卿（同济大学）

1962年8月

目　录

1. 建筑声学中的几个新問題

В. В. Фурдуев 著　　陈 通譯　倪乃琛校

Архитектурная Акустика (Труды научно-технического совещания в Москве 1959г.) Стр.5～27 (1961) [俄文]

大空間的室內声学方面的研究，特别在战后几年来，获得了下列一些重要結論：

1. 最佳声学条件和自然声的特殊性质有着很重大的关系，它不但对語言和音乐有很大的差别，并且对于不同性质和风格的音乐作品也极不相同。例如，由实驗所得的最佳混响时間和音乐性质的关系有相当大的变化范圍（1.5到2.1秒），并且和傳統的观念相反，当房間体积大于2000～3000米^{3}时，它实际上和房間的体积无关。

2. 在大的厅堂中，混响时間和它的频率特性时常失去作为单值地决定房間音质基本評价标准的意义。使混响时間接近于最佳值（对于一定形式的发声）可能是必要的，但这絕不是厅堂良好音质的充分条件。

3. 反射声（回声訊号）的时間結构决定于各反射声相对于原始訊号（直接声）的声級和延迟时間，最初几次反射声的时間結构对語言的听覺和对音乐的音质有很大的影响。这和将混响訊号的时間結构分为性质上不等同的两个部分是有关的。第一（起始的）部分包括延迟比較少的回声訊号；它起着有利的作用，加强原始訊号并使发声丰滿。第二（滞后的）部分虽然使听覺上形成房間的空間感覺，但是，当它的声級不够低时，会对听声产生显著的干扰从而使所听到的訊号质量明确度降低。因此，混响訊号时間結构的滞后部分不能同起始部分那样被认为是有利的。

4. 室內声場的扩散程度——即声能量流以不同方向到达接收点并接近于均匀分布的程度——具有一定的意义（虽然在这方面研究得还很少）。經驗表明，为了得到优良的音质，在音乐厅和大型音乐播音室內有相当的扩散程度是必要的。

在給予这些科学研究成果和实际經驗的总結以十分肯定的評价的同时，不能忽略从而提出的一系列的新問題，迄今为止，这些問題还沒有得到完滿的解答。室內声学的最佳条件决定于自然发声的哪些性质或特征还沒有被搞清楚，因此，在确定这些条件和提供满足它的一般法则方面是存在着困难的。还沒有为众所公认的大型厅堂的音质評价标准，这些評价标准和混响时間及其频率特性应該能够同时使我們肯定地判断音质的好坏。人們还不知道应当如何决定混响訊号时間結构中有利部分的持續时間，和在怎样的客观标志的基础上来确定在这时間結构中的起始和滞后部分的界限。最后，我們还沒有找出实用上簡便的声場扩散程度定量、度量的定义和尽可能簡单的測量方法。

这里所提出的問題是对于进一步发展建筑声学和圆满地解决实际問題的科学研究的最重要方向。下面将叙述在这些方向上科学研究工作的一些結果。

信号的統計特性和它在建筑声学中的意义

理論研究

在房間中，訊号的最佳感受条件，由表示自然发声（語言和音乐）的哪些性质所确定，这个問題无疑是非常复杂的，因为这些条件不只和室內声場的瞬态物理特性有关，并且还和心理生理及审美上的主观因素有关。然而，可以认为这方面研究工作的第一阶段是研究問題的純粹物理方面，因为，主观欣賞的評价只有在它和任何客观量的測定数值有联系时才能在实际中得到应用，当然，这些客观的測定量是按照总的研究問題而选定的。

在室內，声信号的感受可以看成是信息傳輸的特殊情况，声源是信息源，而听众或傳声器是接收器。从现代信息論的基本概念来看，对傳輸系統（在我們的情形下，这个系統是被具有已知物理特性的界面所包圍的房間的空間体积）作质量的評价时，必須考虑到随机过程的統計特性，这里，随机过程是指任何具有信息荷載的訊号，特别是語言和音乐。

下面将指出，在建筑声学的問題中，合理的是不去研究訊号函数本身的統計特性，而是研究变化慢

得多的、和訊号有关的时間随机函数。首先討論这类函数之一，即訊号平均功率的即时值。

設$f(t)$是时間的随机函数，代表声訊号；訊号的功率决定于适当地規定的訊号函数均方值，它可以表示为和时間有关的随机函数

$$P(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t-x}{T}} f^2(x)\,dx \tag{1}$$

式中，乘子

$$\frac{1}{T} e^{-\frac{t-x}{T}} \qquad (x\leqslant t)$$

是加权函数，加在訊号$f(t)$的过去值上，訊号过去的时間愈长，相对的加权值就愈小，即对平均功率的即时值对应于現在时間t的一瞬刻的影响愈来愈小。加权函数中的时間常数T是訊号接收器的积分能力特性。

在尺度足够大并且可以正确地运用几何声学方法的房間中，在接收点处的訊号$f(t)$可以用(在某些簡化的假設下)由声源所輻射的直接訊号$\varphi(t)$及其所有滞后于它的重复訊号之和来表示，由于从界面表面每一次的反射有不可避免的能量損失，重复訊号的声級平均地讲是随着滞后时間的增加而减小的即

$$f(t)=\sum_{i=0}^{\infty} \beta_i\varphi(t-\tau_i)。 \tag{2}$$

这里，τ_i是第i次回声訊号的延緩时間，而β_i是乘子，表示在混响过程中衰减效应的特征；可以假設$\tau_0=0$和$\beta_0=1$，这样并不失去一般性的意义。将式(2)代入式(1)，則得

$$P(t)=\sum_{i=0}^{\infty} \beta_i^2 r_{ii}(t)+2\sum_{i=0}^{\infty} \beta_i \sum_{k=i+1}^{\infty} \beta_k r_{ik}(t), \tag{3}$$

式中，

$$r_{ii}(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t-x}{T}} \varphi^2(x-\tau_i)\,dx$$

是随机函数，表示(乘β_i^2以后)每一个回声訊号的平均功率的即时值，而

$$r_{ik}(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t-x}{T}} \varphi(x-\tau_i)\varphi(x-\tau_k)\,dx \tag{4}$$

是訊号在时間上移动了$\tau_k-\tau_i$值时，訊号的即时自相关随机函数。

我們希望决定房間对声源輻射訊号$\varphi(t)$的影响特性，为此，必須将随机函数(3)的某些特性和基本訊号平均功率即时值的同样特性P_0进行比較，此处

$$P_0(t)=r_{00}(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t-x}{T}} \varphi^2(x)\,dx$$

是假設在无限媒质的条件下声場同一点处所具有的訊号平均功率的即时值。

选用訊号的平均声級作为这些特性之一，也就是即时声級

$$N(t)=10\lg\frac{P(t)}{P_1},$$

的长时間平均值，式中，P_1是相应于任意选定的零声級的功率。

預先注意到在表示式(3)中的第一个和是基本訊号及其所有后随的回声訊号的功率之和；这个和給出了在功率$P(t)$中相应于不相干訊号单純能量叠加情形的部分。式(3)中第二个(双重的)和决定了即时的干涉效应，这些干涉效应由回声訊号巳知的相干程度所决定。在計算功率$P(t)$的长时間平均值时，双重和所起的作用同第一个和相比是不大的，因为，甚至在时間推移很小的情况下到达的回声訊号具有較高的声級时，即时自相关函数的平均值和零也相差无几(在两側)。順便指出，这种意見說明了“就平均意义上讲的不相干性”的想法，在基于能量叠加原理上的經典混响理論中就是这样假設的。于是，功率$P(t)$的长时間平均值可以由下述量确定：

$$\overline{P}=\overline{P}_0\left(1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2\right)$$

式中，$\overline{P}_0$是基本訊号$\varphi(t)$的平均功率。

混响訊号的平均声級是

$$\overline{N}=10\lg\frac{\overline{P}}{P_1}=10\lg\frac{\overline{P}_0}{P_1}+10\lg\left(1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2\right)=$$

$$=\overline{N}_0+10\lg\left(1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2\right),$$

其中，$\overline{N}_0$是基本訊号(直接声)的平均声級。由于房間的混响，这个訊号的总增益等于

$$\Delta N=\overline{N}-\overline{N}_0=10\lg\left(1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2\right) \tag{6}$$

这增益还不能說是有利的，因为，按照实驗数据可知，只有延迟时間为$\tau_i\leqslant\theta$的回声訊号的起始部分起着有利的作用，这里θ是混响訊号的时間結构中有利部分的持續时間。設$\tau_n=\theta$，对于有利的增益可写成

$$\delta N=10\lg\left(1+\sum_{i=1}^{n}\beta_i^2\right).$$

于是，不希望有的增益剩余等于

$$\Delta N-\delta N=10\lg\frac{1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2}{1+\sum_{i=1}^{n}\beta_i^2}=10\lg\frac{1}{D(\theta)}, \tag{7}$$

式中，$$D(\theta)=\frac{\int_0^{\theta}\varepsilon(t)\,dt}{\int_0^{\infty}\varepsilon(t)\,dt}=\frac{1+\sum_{i=1}^{n}\beta_i^2}{1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^2}$$

是近些年来提出的、作为局部音质評价标准之一的特征量，称为混响訊号的明确度；式(7)中的 $\varepsilon(t)$ 表示混响过程中声能的平均密度。

必須着重指出，为了估計房間质量的評价标准明确度的应用，提出了混响訊号时間結构有利部分的持續时間 θ 值，而这些混响訊号的感受正是房間的功用。式 (3) 的結构直接指出决定这持續时間的客观因素。如果认为回声訊号的有利部分是指还和直接声或多或少地保持着强相关关系的那些訊号，則混响訊号有利部分的持續时間应等于时間推移的最大值 $\tau=\tau_n$，这时，即时自相关函数

$$r_\tau(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t}e^{-\frac{t-x}{T}}\varphi(x)\varphi(x-\tau)\,dx, \qquad (8)$$

在相当大部分的发声时間內还沒有非常趋近零值。显然，量 $\theta=\tau_n$ 应和訊号 $\varphi(t)$ 的相干性間隔有关。函数(8)和函数(1)一样，是和訊号函数 $\varphi(t)$ 有关而緩慢变化的时間随机函数；研究它的統計特性，对于在音乐或語言发声时室內声过程的理論有重要的意义。

由于延緩时間 $\tau_i<\theta$ 的回声訊号叠加而产生的干涉效应，对于室內的訊号接收在某一程度上有重要的影响，它扩展了訊号的动态范圍，并使随机函数 $P(t)$ 的一次分布形状更为傾斜。事实上，在个别的两个回声訊号叠加时，随时間而变化的互相加强的和减弱的效应使声級 $N(t)$ 的最大值增大而最小值减小；同时，$N(t)$ 值和平均声級 $\overline{N}$ 有显著的差别，比基本訊号的即时声級 $N_0(t)$ 和它平均值 $\overline{N}_0$ 的偏离更多。可以这样設想：我們应从这种效应去探索音乐发声丰滿度的定量量度，而丰滿度在良好音质的厅堂中是始終存在的。在听語言用的厅堂中，訊号有利的增强可能比一次分布的变换起着更重要的作用。

为了說明上述的想法，我們討論随机函数 $P(t)$ 的方差，并和函数 $P_0(t)$ 的方差相比較，$P_0(t)$ 代表基本訊号的特性。再回到式(3)并假設（一次近似）随机函数 $r_{ii}(t)$ 相互間是无关的，求混响訊号平均功率即时值的方差 $D[P]$：

$$D[P]=\sum_{i=0}^{\infty}\Big\{\beta_i^4[Dr_{ii}]+ +2\beta_i^2\sum_{k=i+1}^{\infty}\beta_k^2M[(r_{ii}-m)(r_{kk}-m)]+ +2\beta_i^2\sum_{k=i+1}^{\infty}\beta_k^2D[r_{ik}]\Big\},$$

式中，

$$D[r_{ii}]=D[r_{00}]=D[P_0]$$

是基本訊号平均功率即时值的方差；$D[r_{ik}]$ 是即时自相关函数的方差，最后

$$M[(r_{ii}-m)(r_{kk}-m)]=k_{ik}$$

是随机函数 r_{ii} 和 r_{kk} 的相关矩（耦合矩），r_{ii} 及 r_{kk} 有相同的平均值 m，当尾标 i 及 k 值相接近时不能认为它們是无关的*。

所得結果可表示成

$$D[P]=D[P_0]\Big(1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^4\Big)+ +2\sum_{i=0}^{\infty}\beta_i^2\sum_{k=i+1}^{\infty}\beta_k^2(D[r_{ik}]+k_{ik}). \qquad (9)$$

平均功率 $P(t)$ 方差的增大是和房間对訊号 $P(t)$ 的影响相联系的。从一方面来看，这增大是回声訊号叠加本身的因素所造成的必然結果，甚至当回声訊号間彼此不相关时也是如此。事实上，几个独立的随机函数之和的方差永远大于每一个分量的方差；函数 $\varphi(t)$ 方差的增大值相应于上述的部分由下列关系确定：

$$\frac{D[P]}{D[P_0]}=1+\sum_{i=1}^{\infty}\beta_i^4,$$

如果假設 $r_{ik}=0$ 及 $k_{ik}=0$，由式(9)可得出这关系式。从另一方面来看，回声訊号的相干性使 $D[P]$ 又有所增大，增大的量是式(9)中双重和部分。

应当指出，从新观点所得到的結果闡明了先到达的回声訊号的作用，这些回声訊号組成混响訊号时間結构中的有利部分。問題在于在式 (2) 中减弱系数序列 $\beta_1,\beta_2,\cdots$ 仅就平均的意义上讲是随尾标的增大而减小的。这序列起始部分的个别项甚致可能大于 1，例如，当直接声显著的掠射吸收或是由于几个回声訊号在同一时間內到达时的情况就是这样的。因此，随机函数 $P(t)$ 一次分布的变换可能仅由回声訊号的起始部分所引起，对于这些回声訊号，β_i^4 和 $\beta_i^2\beta_k^2$ 諸量在数值上将不能予以略去。

方差 $D[P]$ 的增大还不能同时决定所观察到的混响訊号动态范圍的扩展，因为，方差和动态范圍間的关系与一次分布的特性有关。下述的情形是可能的：即在音乐发声质量的主观評价中甚至当动态范圍扩展得不大时，一次分布的变換也起着重要的作用。

当然，所有这些想法还不能被认为是室內声学过程的完善理論；为了探討这理論，首先必須积累关于語言和音乐的即时自相关函数統計特性的大量实驗数据。然而，相关性的理論（原始的概念如上所述）能使我們初步考慮到各种不同自然发声的典型

* 这里符号 $M[\ \ ]$ 表示数学期望。

統計性質，而这性质决定了在室內听覺感受它們的不同条件。因此，相关性方法的发展可以认为是建筑声学中对基本問題作进一步理論分析的新的和重要的阶段。

一些实驗結果

为了研究即时自相关函数的統計性质，由 С.И. 克列契麦尔做成了测量設备，設备的方框图如图 1 所示。磁录声机 M_0 是訊号源，用于发声試样的放声。放声訊号轉录在两录声机 M_1 和 M_2 上，其中之一 (M_2) 有延时設备使它的輸出訊号相对于另一录声机的放声訊号有时間为 τ 的延迟。訊号 $\varphi(t)$ 和 $\varphi(t-\tau)$ 加到相关器(具有积分电路的电子乘积綫路)的两个輸入端上；輸出电压和訊号 $\varphi(t)$ 的即时自相关函数(8)成正比，用回綫示波器連續地記录在光敏紙上。延时設备可使 τ 在 0 到 0.56 秒的范圍內均匀地变化。

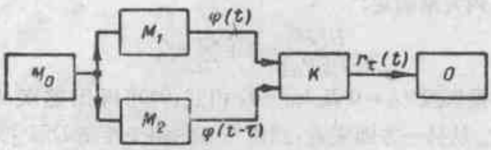

图 1 測量自相关性的方框图

选擇語言即时自相关性的研究作为第一个实驗課題，因为語言訊号的动态范围不大，均匀性的界限不长(一分钟左右)，和音乐訊号相比它是統計分析中最簡单的对象。术語«均匀性界限»应被理解为得出統計規律所需的最小訊号的持續时間。加权函数的时間常数 T 选用 30 毫秒，以便在研究即时干涉效应时，从不感兴趣的声频分量中将慢变化的即时自相关函数分量分离出去。

研究了語言訊号的两个試样(男声和女声，讀同样的文章并保持有語意的声調和間断)，确定了在不同的延迟时間情况下，即时自相关函数的下述統計特性：

1. 随机函数 $r_\tau(t)$ 值的概率密度 $w_\tau(r)$ (一次分布)。

2. 概率分布的积分定律

$$W_\tau(r_1)=\int_{-r_1}^{r_1} w_\tau(r)\,dr, \tag{10}$$

它决定函数 $r_\tau(t)$ 的絕对值不超过某值 r_1 的訊号持續时間的百分数。

3. 相干系数

$$\mu(\tau)=\frac{R(\tau)}{R(0)}, \tag{11}$$

式中：

$$R(\tau)=\left[\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} r_\tau^2(t)\,dt\right]^{1/2} \tag{12}$$

是在給定时間推移 τ 值下即时自相关函数的长时間均方值；当然，平均时間 T_0 应足够大，使 $R(\tau)$ 值和时間間隔 T_0 在时間軸上的位置无关。

图 2 表示在三个 τ 值下，一次分布 $w_\tau(r)$ 的图形。当 $\tau=0$ 时，图形表示語言訊号平均功率的即时值的分布；在函数 $r_0(t)$ 值小的区域內的极大值，一方面說明了語言訊号有大的"間断性"(到25～30%)，而另一方面則說明了大的 $r_0(t)$ 值所占的持續时間是很短的。还应注意到一个事实，即从很小的时間

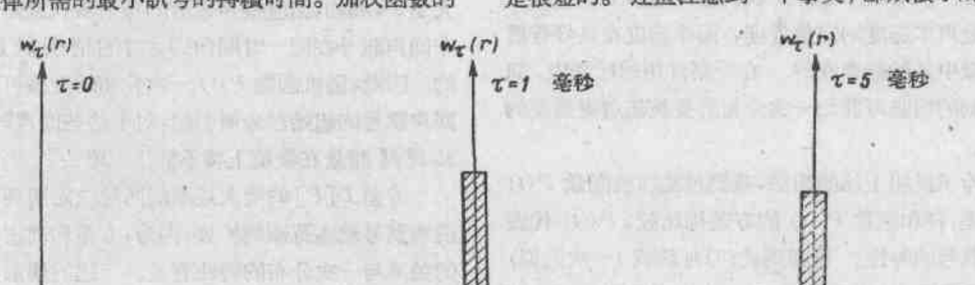

图 2 当 $\tau=0$, $\tau=1$ 毫秒和 $\tau=5$ 毫秒时，語言自相关性的一次分布

推移值开始，分布 $w_\tau(r)$ 就明显地集中在零附近，这可从推移为 1 毫秒和 5 毫秒的图形中看出。根据这事实，可以认为在語言訊号中当时間推移由零增到 1 毫秒时，相关性的联系就很快地减弱。当 τ 继續增大时，这种联系的减弱就慢得多并在某种不大的程度上保持到某些偏移值时为止，在这种偏移的情况下即时自相关性只可能是由于相同語音叠加的結果；显然，在足够长的訊号中相同的語音可以用任何大的时間間隔来彼此分开。比較图 3 中的两个分布，可以証明这种假設的正确性。图中左图表示 $\tau=80$ 毫秒时語言即时自相关性的一次分布；在这情形下，增加一个和基本訊号声級相等的延迟重复訊号在听觉上就明显地产生回声的感覺。右图表示用同一語声讀不同內容的文章时，两个語言訊号 $\varphi_1(t)$ 和 $\varphi_2(t)$ 即时互相关函数的分布

$$r_{12}(t)=\frac{1}{T}\int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t-x}{T}}\varphi_1(x)\varphi_2(x)\,dx,$$

从比較的結果可知这两个分布的差别很小。这說明当推移为 80 毫秒时，語言訊号和它的延迟重复訊号实际上应被认为是不相干的，(虽然它們之間还有不大的相关联系)。

图 4 表示在不同时間推移值下，相应于定义 (10) 的概率分布积分定律。曲綫的纵座标給出即时自相关函数不超过横座标上数值时的概率；横座标值用毫米表示，因为在用相关图作統計加工数据的过程中，它的纵坐标是在毫米坐标紙上量度的。当 $\tau=80$ 毫秒时，$r_1=2.5$ 毫米(大致相当于 $|r_\tau(t)|$ 最

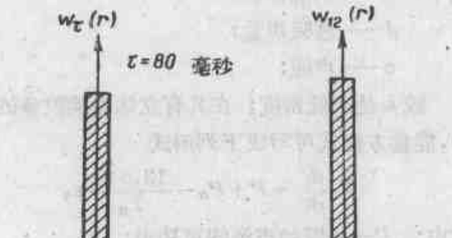

图 3 $\tau=80$ 毫秒时，語言自相关性的一次分布和两不同語言訊号互相关性的分布

大值的 5%) 所占的时間不超过总发声时間的 90% 左右；当 $\tau=40$ 毫秒时，这数字降到 80%，仍然相当的大。

比較图 4 中的曲綫可知，語言的即时自相关函数的統計性质正是在延迟很短的区域內有着重要的变化。在从 5 到 80 毫秒的范圍內，概率分布积分定律的变化比在从零到 5 毫秒范圍內的变化要小得多。这同相干系数 (11) 和延迟时間的关系 (見图 5) 完全是对应的。这系数在时間推移值小时就很快地减小；当 $\tau>10$ 毫秒时，相干性只发生緩慢的减小并逐渐趋近于一常数 (約为 0.2~0.25)，这常数表征两个无关的語言訊号的互相关性。

根据实验所得的数据，可以使我們认为相干系数减小到上述的下限时，时間推移近似地等于 70 毫秒；这数值可采用为語言訊号的相干間隔。

有趣的是这个数值和著名的哈斯实验中的延迟时間很接近，对于这样的延迟时間，当同时听語言訊号和等声級的延迟重复訊号时，50% 的听者感到有干扰。按照哈斯的数据，这种干扰的 50% 察覺度的限度和 68 毫秒的时間推移(語言速度为每秒钟 5.3 个音节)相对应。

虽然这里所引用的只是初步的結果，并且需要通过相当多的各种不同語言訊号試样的研究使它准确化，但这已經使我們可以作出一些实用上的結論。例如，可以认为混响語言訊号有利部分的持續时間大約是 40 毫秒。这数值(已凑成整数)比相干間隔小一半；当 $\tau=40$ 毫秒时，相干系数在所有情形下都小于 0.3。

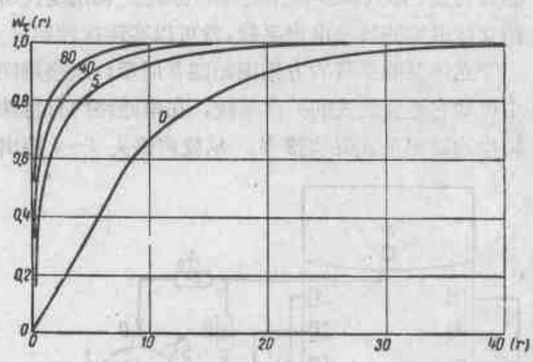

图 4 自相关性概率分布的积分定律

其次，在扩声系統中由几个揚声器同时放声的区域內，声場声級是按訊号能量迭加的原理进行計算的，即时自相关函数的长时間平均值甚至在时間推移很小时就趋近于零的这一事实，为这种計算方法提供了确切的依据。这不仅和具有各种不同的延

迟反射訊号(使上述所謂"就平均意义上讲的不相干性"成立)的室內声場声級有关，并且也和室外空間中少量的訊号迭加时的情形有关。由直接测量可知，語言的响度級在存在声級相等的外加延迟訊号时增加3昉，甚至当延迟很短(小于10毫秒)时也是如此，这个现象也得到了解釋。

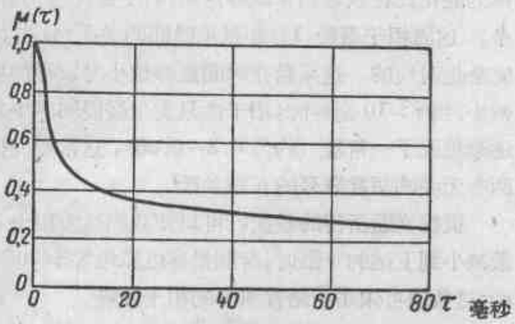

图5 語言訊号的相干系数

立体混响的理論和技术

在室內，声学最佳条件和所听自然发声的种类及特性有关，这就促使我們采用折衷的解决办法来选擇这些条件，解决的方向是使房間性质和某些尽可能多的訊号类型的統計特性相协調。这是最簡单的办法，事实上直到现在还为音乐厅和音乐播音室的音质設計所运用。另一个比较进步的办法是：找出有效地控制厅堂音质的方法，尽可能地影响混响过程的时間进程和室內声場的性质，使它和演出作品的特性、形式和旋律作最佳的协調。利用現代所謂立体混响的特殊电声系統，就可以实现这种要求。

立体混响系統的方框图如图5所示；从綫路图中可知它是分散式的扩声系統，在电通路內有特殊結构的磁記录式混响器 R。从放声磁头 $1\sim4$ 得出

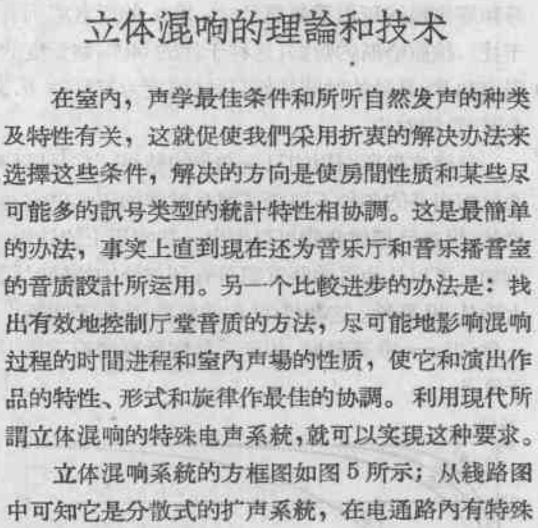

图6 立体混响系統方框图

无限的衰减回声訊号序列以模拟发声的过程，放声磁头放在录声磁头 0 和消声磁头 5 之間，从最后的放声磁头引出反饋訊号回輸到录声放大器 A_0 的輸入端。回声訊号級随着延迟时間的增加按綫性律衰减；衰减的速度可以在足够大的范圍內用放声通道 $A_1\sim A_4$ 內統調的放大率調整器予以改变，或通过重复放大器 B 改变反饋的深度。由傳声器 M 接收的原始訊号送到混响器的輸入端；由混响器产生的混响声通过分散在厅堂內的揚声器以不同的声級 Γ 放出。

厅堂內的揚声器分成許多組，組的数目和放声通道的数目相应；分組系按照第一个加到它們上面的回声訊号的延迟时間来实现的。在使用这种系統的情形下，由人工产生并用电調整的混响和房間內固有的混响相加以实现对厅堂音质的控制，这时，不仅使用了对混响时間和总(立体的)混响的频率特性起作用的方法以控制音质，并且还由于提高了声場的扩散程度，因此对于先到达的回声訊号的时間結构产生了必然的影响。

在对各种形式自然发声的应用中，分析立体混响对房間音质的各种影响是很困难的，这在总結和积累立体混响系統使用的經驗之前未必是可能的。根据賽宾的近似理論来研究立体混响对放声时間过程的作用是比较簡单的，其中，房間固有的混响时間 T_n 决定于賽宾的簡化公式

$$T_n=13.8\,\frac{4V}{cA},$$

式中：V——房間体积；

A——总吸声量；

c——声速；

設 ε 是声能密度；在具有立体混响設备的厅堂中，能量方程式可写成下列形式

$$V\,\frac{d\varepsilon}{dt}=P+P_a-\frac{13.8\,V}{T_n}\,\varepsilon, \qquad (13)$$

式中：P——原始声源的声功率；

P_a——立体混响系統中揚声器的功率。

設在一次近似下略去声反饋，則在稳定状况下揚声器的功率 P_a 正比于原始声源的功率 P，并且和混响器的工作状况有关。按照混响統計理論中的一个基本假設，設回声訊号按平均讲是互不相干的，可以証明立体混响設备的輸出功率和下列函数成正比

$$R\left(\frac{\tau}{T_u}\right)=\sum_{n=0}^{\infty}e^{-13.8\,\frac{n\tau}{T_n}}=\frac{1}{1-e^{-13.8\,\frac{\tau}{T_n}}},$$

式中，τ——回声訊号間的平均时間推移；

T_u——人工混响时間。

于是，在稳定状况下 $P_a=kRP$，当 $\frac{d\varepsilon}{dt}=0$ 时，从方程式(13)得出

$$\varepsilon=\varepsilon_0=\frac{PT_n}{13.8V}(1+kR) \tag{14}$$

式中 k 是表征录声和放声通道中放大量的比例常数。

在混响过程中原始声源切断后，揚声器的声功率随时間成指数衰减，能量方程式(13)成为

$$\frac{d\varepsilon}{dt}+\frac{13.8}{T_n}\varepsilon=\frac{kRP}{V}e^{-13.8\frac{t}{T_u}}.$$

满足起始条件($t=0$ 时 $\varepsilon=\varepsilon_0$)的解可写成下列形式：当 $T_n\neq T_u$ 时，

$$\varepsilon(t)=\frac{1}{T_u-T_n}\frac{PT_n}{13.8V}\left\{kRT_ue^{-13.8\frac{t}{T_n}}+\right.$$

$$\left.+\left[T_u-(1+kR)T_n\right]e^{-13.8\frac{t}{T_u}}\right\}, \tag{15a}$$

当 $T_u=T_n=T_0$ 时，

$$\varepsilon(t)=\frac{PT_0}{13.8V}\left[1+kR\left(1+13.8\frac{t}{T_0}\right)\right]e^{-13.8\frac{t}{T_0}} \tag{15б}$$

这解說明在一般情形下立体混响的过程并不按指数定律进行。只有在 $T_u=(1+kR)T_n$ 的情形下，能級以恒定速度衰减并且立体混响的混响时間 $T=T_u$。然而，在一般的情形下 T 可定义为在原始声源停止后，声能密度从稳定值 $\varepsilon=\varepsilon_0$ 开始下降 10^6 倍所需的时間。解(15)給出决定 T 的超越方程式，它的分析可导致下列結論：

1. 当立体混响系統对增加能量的作用保持在能量密度稳定值不变时($kR=$常数)，时間 T 随 T_u 的增大而增加；其中，若 $T_u<(1+kR)T_n$ 时，$T>T_u$，当 $T_u>(1+kR)T_n$ 时，$T<T_u$。重要的是：甚至当立体混响設备的功率比較不大时，控制房間的音质

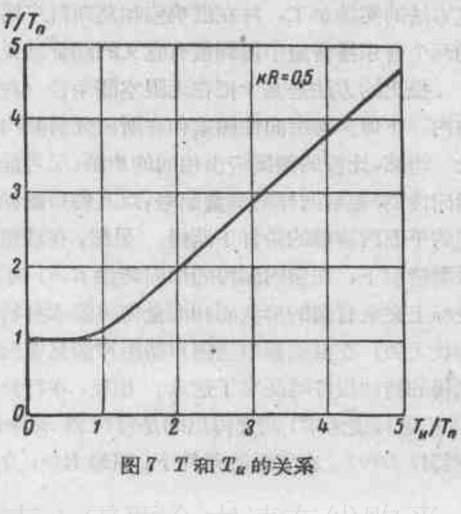

图 7 T 和 T_u 的关系

还是有可能的。为了說明这个問題，在图 7 上表示出当 $kR=0.5$ 时 T 和 T_u 的关系。在这情形下，从(14)可知由立体混响产生的声放大率等于

$$N=10\lg(1+kR),$$

只相当于 2 分貝左右，但是立体混响的混响时間 T 在 $T_u\geqslant1.5T_n$ 时已和 T_u 相差无几。此时，听众对立体混响系統的工作是直接察覺不到的，因此我們应将系統調整到这种情况。

2. 当 $T_u=$常数时，混响时間 T 随 kR 的增大而增大，但增大得极小。由此可知，为了控制立体混响的频率特性，不应該在放大通道中加入电校正(在放大通道中它只对系数 k 有影响，而对函数 R 沒有影响因此对 T_u 也无影响)，而应当在反饋通道中加入校正使 T_u(也就是 T 的)频率特性曲綫能具有所希望的形式。其中值得注意的是：这校正使房間的固有混响在高频段相当大的降低有可能得到补偿，这种不可避免的降低是由于在大体积厅堂中由于空气吸声所造成的。

3. 当 T_u 值不变时，时間 T 随磁混响器中載声体速度的增加而增大，这是由于当 τ 减小时，函数 R 增大。

根据由賽宾近似理論所发展的立体混响理論，同样地可以研究声反饋通过扩散声場的影响；减小声反饋对于系統的稳定性是有决定性的意义的，因为立体混响显著地提高了扩散程度。研究表明，当 $kR=0.5$ 时，在满足下列条件下，相对于自激閾的稳定度富余量不低于 6 分貝：

$$\frac{\Omega}{r^2}\geqslant1.56\cdot10^3\frac{T_n}{V}, \tag{16}$$

式中：Ω——立体混响設备中傳声器的指向性因数，

r——原始声源距傳声器的平均距离(适当的估計)。

可以进一步指出，声反饋使混响过程中声級的衰减速度逐漸减小。从某临界值开始，这效果会导致立体混响設备"暴露"以及使音乐发声的音质降低的不良后果。

在莫斯科格聶欣音乐师范学院中的音乐厅里安裝了实驗性的立体混响設备，由 А. Д. 斯卡洛夫和 Н. С. 庫兹明进行的声学测量証实了上述理論所說明的結論。在这音乐厅公开演出的音乐会上使用立体混响的經驗表明了系統的工作是完全令人滿意的；为了更有效地应用它，最好按条件(16)将厅堂的固有混响时間稍为减短些。

在通用的厅堂中，需要造成对听語言和各种音

乐节目的最佳条件，立体混响系統必定会获得最广泛的应用。

室内声場扩散的測量

直到現在为止，对室內声場扩散程度的实驗研究有两类測量和評价扩散的方法。

其中之一是 R. 梯雷所提出的，它采用强指向性傳声器直接測量正比于各个方向的声能量流。声能量流的角度分布函数是研究的第一个結果，分布函数显明地表示在被象征性地称为“刺蝟”的空間图案上：在半球面上徑向地插許多細棒，棒的間距相等，其长度和相应的傳声器方向上所量得的声压平方成正比。扩散的定量量度可以采用由棒长所决定的随机变量的正則化离散特性有关的任意量；梯雷选用了平均絕对偏差作为这种特性。

另一方法是 C. Г. 盖尔什曼在建筑声学的測量技术中提出的，这方法是基于室內声場中相邻两点上所接收訊号的互相关性的研究。在声場的任何区域內，这两个訊号的相关系数是所选点間距离的某种函数，在一般情形下，当距离給定时，这函数和这两点連綫綫段的方向有关。对于統計性质已知的測量訊号（例如频帶噪声），声場內两点所接收訊号的互相关函数在两种极端情形下在理論上是可預知的，这两种极端情形是行波場（在任何意义上都不是扩散的）和理想的各向同性場（在所有方向上能量流按时間的平均值相等），在相关性方法基础上来作扩散程度評价的可能性就是和这种設想相联系的。在理想的扩散場中，互相关函数随接收点間距离的增加应迅速地趋近于零。在某些房間中，扩散程度的評价是根据由实驗得出的相关函数和上述极端情形的对比而确定的。

两种方法在測量学上的根据和对所得結果的实用意义是无可怀疑的；但任一种方法的广泛应用在技术实踐中都有困难。梯雷的方法不适于研究低于1～2千赫频率范圍內的声場扩散，因为，实用上在这频率范圍內不可能做出指向性足够尖銳的接收設备，而这对于决定声能量流的角分布函数却是必需的。相关性方法要求有复杂的特殊設备以及两个电声接收通道的振幅-频率和相位-频率特性的严格协調。在高频率范圍內，互相关性的測量遇到了傳声器在这频帶中沒有指向性的困难。

在用相关性法測量扩散时，应注意所測声場的結构內总的或局部的对称性的存在对測量結果会有很大影响。作为說明的例子，图8表示互相关系数 $\rho(r)$ 的两个測量結果和它与訊号接收点間距离 r 的关系。这两个測量是由 H. C. 康茲明在里加广播电台音乐播音室內中間部分所进行的；曲綫 a 对应于傳声器离开矩形播音室的纵对称軸两侧分开移动的情形；曲綫 $б$ 的測量是：一傳声器保持在对称軸上不动，而另一垂直于对称軸移动。在第一种情形下，相关系数先随距离 r 的增加而减小，然后保持着趋近于0.5的常数值。在第二种情形下，相关性在同一声場范圍內随 r 的增加而减小，逐漸趋近于零。完全可以理解，在第一种情形下相关系数有大的值并不說明声場有高度的扩散程度，而是証实了声場結构中对称性的存在；在理想的对称情形下，傳声器离开对称軸的两側移动时，相关系数等于1并和傳声器間的距离无关。

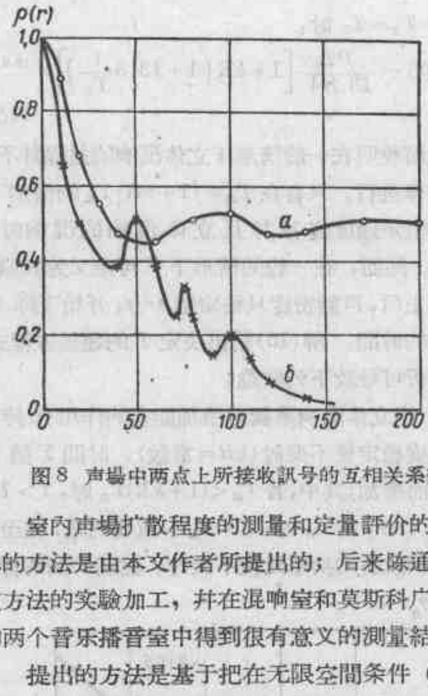

图8 声場中两点上所接收訊号的互相关系数

室內声場扩散程度的測量和定量評价的比較简单的方法是由本文作者所提出的；后来陈通完成了这方法的实驗加工，并在混响室和莫斯科广播电台的两个音乐播音室中得到很有意义的測量結果。

提出的方法是基于把在无限空間条件（在消声室內）下傳声器指向性图案和在所研究房間內的对比。当然，比較的图案应由相同的声源（尽可能是无指向性的）輻射同样的測量訊号，以及傳声器軸在相同的平面內旋轉的条件下測得。显然，在理想的扩散場情形下，在室內測得的指向特性 $R(\theta)$ 应在极坐标上完全有圓的形状而和測量傳声器本身特性的形状无关；在混响室中当傳声器距声源足够远时所測得的特性很好地証实了这点。相反，在行波場中（即扩散程度为零）測量得出的是傳声器本身的指向特性 $D(\theta)$。在实际的条件下，图形 $R(\theta)$ 介于单

位半徑的圆和正則化特性 $D(\theta)$ 之間，如图 9，a 所示。

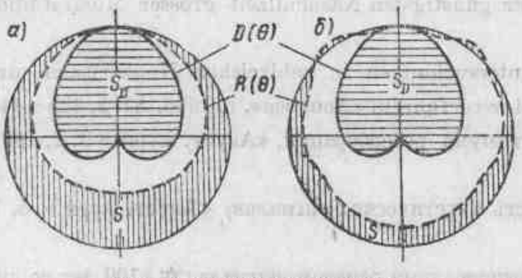

图 9 关于声場扩散系数的測量

在傳声器声軸旋轉平面內所測的声場扩散的量度可如下决定。設 $S_0=\pi$ 是单位半徑圓的面积，S_D 是正則化特性 $D(\theta)$ 所包括的面积，最后，S 是圆和正則化特性 $R(\theta)$ 間包括的面积。又設 $S_1=S_0-S_D$。可选下值

$$d=\frac{S_1-S}{S_1} \tag{17}$$

作为在接收点上声場扩散的量度。

不难看出，在理想的扩散場中 $S=0$ 和 $d=1$；在行波場中 $S=S_1$ 和 $d=0$。在实际条件下，所測定的值应在 $0<d<1$ 的范圍內。

在某些情形下，特性 $R(\theta)$ 和圓可能相交（图 9 б）；則面积 S 所有的部分（圓內和圓外）应以同样符号相加。

用指向性傳声器法研究扩散的經驗表明，在低于 1000 赫的頻率范圍內，采用倍頻程带寬的白噪声用作測量訊号最为适宜；在更高的頻率，即使用 $^1/_3$ 倍頻程带寬，也可在傳声器放大器的輸出仪表上有稳定的指数。当然，測量的結果和測量傳声器本身指向特性的选擇有关。然而，使用电容傳声器 C-12（它具有选擇各种特性 $D(\theta)$ 的可能性）的測量表明，在大多数情形下这关系并不显著。照例，用心脏形指向特性更为合适，它使这方法有足够的灵敏度。仅当在水平面和垂直面內的扩散程度存在显著的差别时，就須选擇具有 8 字形指向性特性的压差式傳声器。

訊号源应該是无指向性的，可以是安装在多面体上的揚声器組，就如同其他建筑声学測量技术中所采用的一样。

在式 (17) 中的各面积可以极容易地用面积积分仪求出。

这里不拟对陈通所研究的播音室內声場扩散的实驗数据作仔細的分析，而只說明一个有重要原則性意义的結果。从明显的物理意义可知，室內声場扩散程度不能不和混响时間有关，并且，在其他条件相等的情形下，混响时間的增加会使扩散增加。然而，扩散程度的測量只能在下述的情形下才能有意义，即所測量的特性值和混响时間不是单值关系，只有这样才能是独立的建筑声学的評价标准。只有在这情形下，这評价标准的知識能在实质上补充关于房間音质和混响时間有关的信息。在不同頻率下，两播音室內不同点上所进行的扩散測量可以用于（虽然所做的測量次数不很多）预先估計 d 及 T 值間的关系。

在图 10 上給出这些值的对比；圈对应于 1 号播音室內的測量，点对应于 2 号播音室內的測量。測量結果的組合，正如所预期的一样，发現 d 随 T 的增加而增大的某些趋势；然而，离散的程度是如此的大，以致应认为这些值間只有弱的相关。因此，用指向性傳声器法測量的声場扩散程度可以认为是和混响时間无关的局部評价标准。

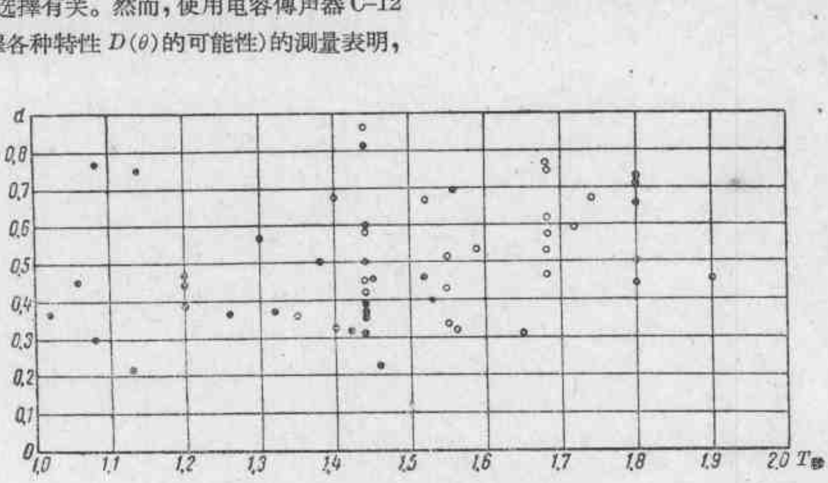

图 10 混响时間和扩散度間的关系

参 考 文 献

[1] W. Kuhl, Über Versuche zur Ermittelung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios, «Acustica», 4, 1954, AB 2, 618～634.

[2] E. Meyer und R. Thiele, Raumakustische Untersuchungen in zahlreichen Konzertsälen und Rundfunkstudios unter Anwendung neuerer Messverfahren, «Acustica», 6, 1956, AB 2, 425～444.

[3] В. В. Фурдуев, Корреляционный критерий оптимума реверберации, «Акуст. журн.» 3, 1, 1957, 74～79.

[4] В. В. Фурдуев, Интерференция и когерентность акустических сигналов, «Акуст. журн.» 5, 1, 1959, 111～116.

[5] В. В. Фурдуев и С. И. Кречмер, Текущая автокорреляция речевого сигнала, 在 «100 лет со дня рождения А. С. Попова» 书中, изд. АН СССР, 1960, 228～234.

[6] С. И. Кречмер, Аппаратура для исследования статистических характеристик речи и музыки. (在 «Архитектурная акустика» 文集中).

[7] R. Vermeulen, Stereo-reverberation. «Philips Technical Review», 17, N 7～8, 1955～56, 258～266; J. Audio Eng. Soc., 6, 2. 1958, 124～130.

[8] D. Kleis, Modern Acoustical Engineering, «Philips Technical Review», 20, N 11, 1958～59, 309～326; 21, N 2, 1959～60, 52～72.

[9] В. В. Фурдуев, Современная техника искусственной реверберации, «техника кино и телевидения» 1960, № 9. 70～77.

[10] А. Д. Скалов, Исследование амбиофонических систем (在 «Архитектурная акустика» 文集中)

[11] В. В. Фурдунов, Амбиофоническая реверберация, «Акуст. журн.» 6, 2, 1961.

[12] В. В. Фурдуев, Обзор методов оценки и измерения диффузности звукьвого поля. «Акуст. журн.» 1, 4, 1955, 301～314.

[13] С. Г. Гершман, Коэффициент корреляции как критерий акустического качества закрытого помещения, «Журн. техн. физ.», 21, 1951, 1492～1496.

[14] R. K. Cook, R. V. Waterhouse, R. D. Berendt, S. Edelman and M. C. Thompson, Measurement of Correlation Coefficients in Reverberant Sound Fields, «J. Acoust. Soc. Am.» 27, 6, 1955, 1072～1077.

[15] В. В. Фурдуев и Чен Тун, Измерение диффузности звукового поля в помещениях методом направленного микрофона; «Акуст. журн.» 5, 1, 1960, 107～115.

2. 大型音乐厅中听众和座位的吸收

Beranek, L. L. 著　　吕如榆譯　林寿南校

J. Acoust. Soc. Am., Vol. 32, p. 661~670 (1960) [英文]

引　言

直到現在，即使全部建筑設計資料齐全，还不能很精确地用現有公式来预計大厅最普通的声学特性，即混响时間，这可以从倫敦皇家节日音乐厅等大厅的技术报告获得証明[1]~[4]。一般的情况是，設計的計算值要比实测值高出0.3到0.5秒。

很明显，自从1895年 W. C. Sabine（賽宾）从事于研究美国麻省劍桥市 Fogg 艺术宫的音质以来，情况是有改进的。他研究了五年后，提出了一个經典的混响方程式，并且他以很大的精力仔細地进行了有关音乐厅中主要材料的吸声系数的测定。这些材料在512赫时的吸收系数可从他的早期"混响"长篇論文中查出[5]，如表1所示。与今天的教科书和手册中公布的数值是非常接近的。但是，Sabine 原意想把这些数值应用在这样的混响方程式中去：

$$T=\frac{0.161V}{S\bar{\alpha}_{Sab}+4mV} \tag{1}$$

式中 $4mV$ 一項，是經过很长时間后由 Knudsen（努特生）引入的[6]。

在这个方程式中，V 是体积（米³），S 是地面、平頂和墙面的总面积（米²），而 $\bar{\alpha}_{Sab}$ 是房間的平均吸收系数，它定义如下：

$$\bar{\alpha}_{Sab}=\frac{S_1\alpha_1+S_2\alpha_2+S_3\alpha_3+\cdots+N_1a_1+N_2a_2}{S} \tag{2}$$

式中：　$S=S_1+S_2+S_3+\cdots$（米²）　(3)

$S_1, S_2, S_3, \cdots$等等是房間內各个表面的面积（米²），$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots$等等是相应的表面吸收系数；$a_1$ 是每一占人座位的总吸收（米²）；N_1 是占座的数目；a_2 是每一空座的总吸收（米²）；N_2 是空座数目。m 是房間中分子吸收的衰減系数（米⁻¹），在1500赫以下，它可以略去不計。

若采用 Norris-Eyring（諾列斯-艾潤）公式：[7]~[9]：*

$$T=0.161\frac{V}{S[-2.3\log_{10}(1-\bar{\alpha}_{Ey})]+4mV} \tag{4}$$

要获得相同的 T 值时，则 $\bar{\alpha}_{Ey}$——因此即(2)式中 α 和 a 的每一值——必須比 $\bar{\alpha}_{Sab}$ 小10%到15%。之譜。

Sabine 在他的那一篇論文中，曾发表 Jefferson（杰弗逊）物理实驗室讲演厅中测得的听众吸收值，这些是以"每人"和"单位面积"作为依据的。可是他和后来的一些作者在公布的計算中却都是应用"每人"的概念，[应用(2)式中 N_1a_1]。

值得注意的是：当 Sabine 采用从他在上述演讲厅中测得的"每人"吸收值和吸收系数应用到他自己的混响公式来計算两个音乐厅满座的混响时間时，发現他的計算值与实测值有很大的差别（見表1）。

表1　1900年 Sabine 計算的500赫满座混响时間和用近代設备实测值的比較表

大　厅	实　测　者	实测值	計算值	百分差
Leipzig 大厅（現已毁）	Meyer and Cremer (1933)	1.6* 秒	2.30 秒	44%
Boston 交响乐大厅	Bolt, Beranek and Newman (1957)	1.8 秒	2.31 秒	28%

* 这个数值比原始报告高10%，因为 Kuhl 发現。德国的現有大厅在 Meyer 等人测試的那个时期测得的数据，都大約要低10%。

可以看出，不但 Sabine 的計算結果不准确，而且两个大厅的混响时間計算值与实测值的百分差也很不

---

* 这个公式 Eyring 最先在美国声学学会会刊上发表，在此以前，Norris 在美国声学学会的会上报告过这个公式，但据 Knudsen 引証，Waetzmann（瓦兹曼）和 Schuster（蕭斯脫）的工作要比 Norris 以前。因此，这公式应該称："Waetzmann-Schuster-Norris-Eyring 公式"，不过一般簡称 "Norris-Eyring 公式"。

一样。百分差的不同，不能説因为大厅形状彼此有所差异，因为大厅的形状是十分相似的。此外，Sabine 的計算并沒有誤差，因为他的計算是經过詳細驗証的[5]。

本文的目的是要闡明从 Sabine 时代起一直到現在为止，仍然存在的計算値和实测值严重偏差的主要原因。并将証明，不是方程式 (1) 或 (4) 不对，而是 (2) 式所采用的听众吸收值計算方法具有缺陷。

經典假設和作者新的假設

在多数音乐厅中，听众的吸收占总的吸收百分比很大。从文献中可查出，在 500 赫时坐在座位上的听众的吸收量，是 0.29 甚至高达 0.6 賽(米^2)的范圍之間[1],[10]~[13]。由于一个有經驗的听众对混响时間微小的改变，例如从 1.5 秒改变到 1.6 秒 (7%) 能够辨别出来，所以座位吸收值不正确的估計就会釀成混响計算值巨大的錯誤。(差不多 2:1)。

从十五个国家的四十几个大音乐厅里一些很广泛的声学测量結果，本文推导出較合理的听众吸收計算。因为所有大厅差不多具有相同的平均吸收系数，所以为方便起見，計算中所用的是較簡单的 Sabine 混响公式。求出这样的吸收系数后，则只要减去此系数的 9% 到 12%，就可以得出适用于 Norris-Eyring 公式的数值。在本文中都列出了适用于两种公式的系数表。

因为 Sabine 和 Norris-Eyring 公式都是在統計基础上来处理声場的，因此，有关 V/S 的比值，它們只取决于大厅的形状而已。本文中所研究的許多大厅，体积在 7,000 到 28,000 米^{3}之間。这些大厅 V/S 的中值大約是 3 米。除个别很少数外，V/S 大都在 2.7 到 3.3 之間。

对沒有吸声材料装置的满座大厅，在 1500 赫以下频率时，方程式(1)可近似地簡化为：$T \doteq 0.161 \times (V/N_1)(1/a_1)$。既然經典的假設是听众的吸收(即 a_1) 是与听众的人数成正比例的，所以混响时間的長短应該近似地与每座体积成正比。为此，許多作者对 V/S 的比值，(譬如 [13])，认为是决定估計最大混响时間的一个重要的評价标准。要檢驗"每座体积"这一概念方法很簡单，只要把一些大厅的实測混响时間对每座体积作出关系綫图，就可以看出了。图 1 所示可看出它們之間的关系很差。例如，每座体积在 5.6 米^{3}至 9.6 米^{3}之間的大厅的混响时間都是 1.6 秒，又如每座体积在具有 6 米^3 至10 米^3 之間也是 1.85 秒，根本与方程式 (1) 到 (4)的意图相反。

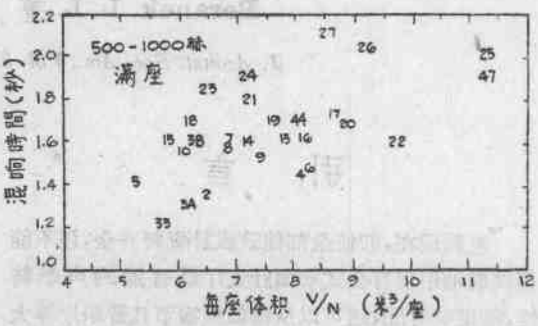

图 1 满座大厅中中频 (500～1000 赫) 的混响时間对每座体积的图。其中有些大厅是加过少量多孔吸声材料的，但由此而引起混响时間的改变不会超过 0.1 秒。为計算精确起見，这些大厅沒有列入图 2。

因为图 1 所示的数据很分散，所以有很多人推测，大厅的混响时間有很大部分取决于它的形状，或者取决于相同面层材料在不同大厅中声学特性的差异，或者同时取决于两者。要是大厅形状能使混响时間有如图 1 所示有那样巨大的改变的話，那末对方程式 (1) 到 (4) 的現实性就有抵触，而 Sabine 和 Norris-Eyring 的計算方法应該放弃，或者要作主要方面的修正了。

但是可以相信，方程式(1) 或 (4)基本上是正确的，而且材料的吸声也不会随大厅的形状或各地材料的差异而有很大的变化，因此作者提出如下的新假設：**在大型音乐厅中座位上的听众、合唱队或乐队的吸收量，是与他們所占的地面面积成正比而增加的，近似地与該面积上人数多少无关(假定人是均匀地分布的)。**

本文初次写就后，作者想起了 Meyer 和 Jordan[14] 的文章。他們曾經指出，在第二次大战前柏林 Philharmonie 大厅中测得的混响时間，不管听众出席是 50% 还是 100%，差不多是沒有什么改变，即使座位沒有很高的吸收材料也是如此。这些实测数据是可以有效地支持上面的假設是符合实际情况的。

必須指出，本文所发表的一些数据，作者是按接近满座情况考虑的，座位密度(包括过道)是在每人 0.42 到 0.8 米^{2}之間。对有部分空座的情况并沒有研究。乐队的密度(包括乐器和乐譜架)是按每一演奏者占 1.1 到 1.9 米^{2}之間計算的。

新假設的驗証

为了驗証新的假設，我們把音乐厅的吸收分成两类：(1) 听众、合唱队或乐队的吸收，(2) 其余的吸收。如果我們現在只研究一些沒有过大面积的多孔性吸声材料的大厅，則至少对 500 赫以上的頻率来說，这些驗証应該不会有很大的出入。在选擇一些大厅中其中有少数的表面上是用柔韌的木鑲板之类的吸声材料鋪設的，这种材料对低頻的吸声很有效。对那些表面上指定了适当的吸声系数后，这几个大厅也包括在为驗証新假設的一組大厅之中（列于表 4）。

为了遵照上面的規定，方程式 (1) 和 (2) 式应改写为：

$$\bar{\alpha}_{sab}=0.161\cdot\left(\frac{V}{S}\right)\left(\frac{1}{T}\right)-4m\left(\frac{V}{S}\right) \tag{5}$$

$$\bar{\alpha}_{sab}=\frac{S_T\alpha_T+S_R\alpha_R}{S} \tag{6}$$

式中，S_T = 听众、合唱队和乐队所占的地板面积，(包括寬度 1 米以内的过道)*；S_R = 房間其余表面积，包括楼厅底下的表面；$S=S_R+S_T$；α_T = 占地板面积为 S_T 的听众、合唱队和乐队的吸收系数；α_R = 房間其他表面的平均吸收系数，其中包括墻、平頂、門、通风柵、玻璃、风琴开口、雕象、灯架和楼厅底下表面等等的平均吸声值。

因为 $S=S_T+S_R$，又假定 $V/S=3$**，从方程 (5) 与 (6) 可解得：

$$6.2\left(\frac{S_T}{V}\right)(\alpha_T-\alpha_R)+2.04\,\alpha_R+24.8\,m=\left(\frac{1}{T}\right) \tag{7}$$

当 (7) 式的 $(1/T)$ 对 (S_T/V) 作图，結果是一根直綫，直綫的斜率为 $6.2(\alpha_T-\alpha_R)$，在 $(S_T/V)=0$ 上的綫段是 $1/T=(2.04\,\alpha_R+24.8\,m)$。因此，$\alpha_T$ 和 α_R 就可以求得。

图 2 和图 3 是 500～1000 和 4000 赫时的典型作图，（对 125，250 和 2000 赫也有类似的結果图

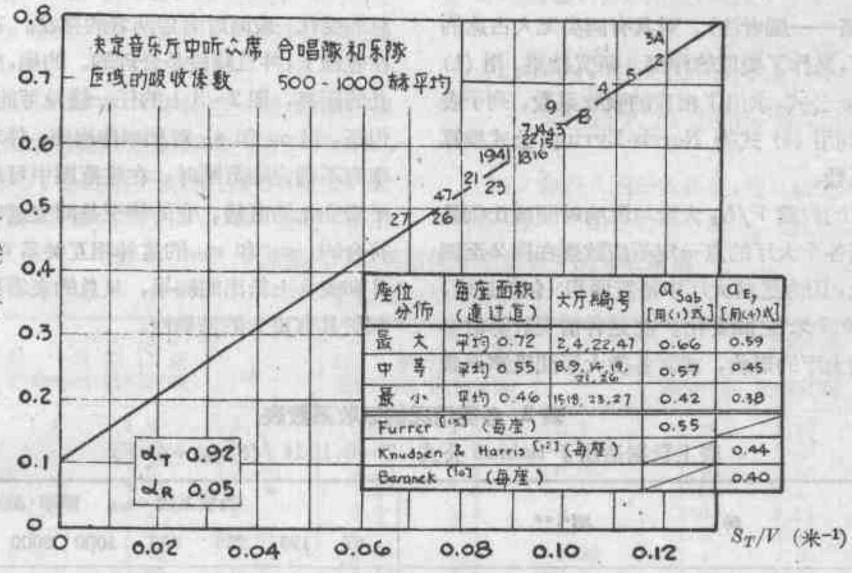

图 2 混响时間(測量值)的倒数对总的占座面积(即听众席面积加 1 米的过道加——如果有的話——合唱队席位再加乐队席位的面积)同大厅体积之比的图，大厅中的吸声材料(帷幔等)的数量可以忽略不計。图中插表上三行的 "a" 值，是对 $\alpha_T=0.92$ 讲的(Sabine 公式，或者对减 12% 的吸收系数讲的 Norris-Eyring 公式)。下三行是取自 Furrer[13]，Beranek[10]，和 Knudsen-Harris[12] 书上的数值。

* 在計算过道的面积时，要包括听众席区域中寬度在 1 米 (3.5 呎) 以內的过道，繞听众席边緣区 1 米以內的过道也应該包括在內。但是楼厅前边不必作这种考虑，因为这部分听众的座位是靠楼厅栏杆的。如果过道的寬度大于 1 米，則超过的数量不作为听众席面积的一部分。包括寬度在 1 米以內过道的理由，是由于繞听众边緣有声音繞射的緣故。可以估計到，对空座来說，所取的寬度应該比此数为小，恐怕只有此数的一半。

** 这个假定不会限止結果的正确性，因为这里只是求解的中間步驟。結果的正确性要在表 4 中分別对每一个大厅进行驗証，这时所用的 V/S 值則是实际值。