

室內聲學入門

KARLHANS WEISSE 原著

馮 紀 忠 譯

中國科學圖書儀器公司

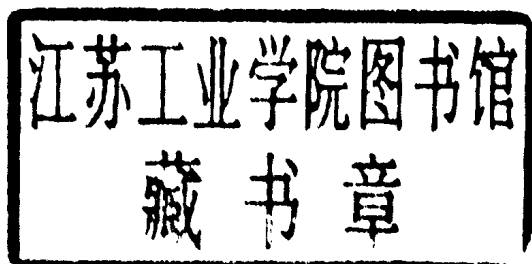
出 版

室內聲學入門

Leitfaden der Raumakustik für Architekten

Karlhans Weisse 原著

馮 紀 忠 譯



中國科學圖書儀器公司

出 版

內 容 提 要

本書介紹建築師需用的聲學知識。首先以物理學為基礎，述及聲學中的名詞和單位；其次詳細闡述回聲的形成，以及用圖解法和模型法求出回聲的擴展；再次講述如何運用建築設計消除回聲；最後分述關於混響時間的意義及計算方法，多孔的與同振的吸聲材料的運用與空間容積的意義等。

本書最切合建築師設計時參考應用，亦可供大專學校建築系科作為教學參考用書。

室 內 聲 學 入 門

Leitfaden der Raumakustik für Architekten

原 著 者 Karlhans Weisse

原出版者 Verlag des Druckhauses
Tempelhof, Berlin, 1949

譯 者 馮 紀 忠

出 版 者 中國科學圖書儀器公司

印 刷 上海延安中路 537 號 電話 64545

上海市書刊出版業營業許可證出〇二七號

經 售 者 新 華 書 店 上 海 發 行 所

★ 有 版 權 ★

CE. 78-0.12 81千字 開本：(762×1066) $\frac{1}{32}$ 印張：4.5

定 價 ￥ 5,000 1955年2月初版第1次印刷 1—3,500

著者序言

如果在講演廳、戲院或電影院中每個字都聽得不費力，如果在歌劇院或音樂廳中的音樂抑揚圓潤；如果在教堂中的唱詩聲和琴聲動人心神，這樣，室內聲音纔到達了真和美。一個廳堂在建築構形上；在其形體、光線、色彩的配合上；在珍貴的裝飾上，無論怎樣的成功，設若聲音不能令人滿意，終究是嚴重的缺陷，此種缺陷並不亞於比例上的失敗。

一個廳堂的聲學要求的體現是要依靠建築師的，所以建築師在聲學上應該着眼於解決兩個特殊的問題：

(1) 必須通過適當的房間尺度和形狀來防止回聲現象的形成。

(2) 必須使低音、中音、高音的交混回響時間都在相當的經驗數值之內，俾使講話字字聽得明白不費力，音樂悅耳自然。

回聲和交混回響是經過同樣的過程而發生的。從一個聲源產生出來的聲波，如果不受障礙就成球狀地向各方擴展，及至接觸到一個觀測點時，就在這裏化成一個聲印象。但在關閉着的室內，它不只接觸到聽衆，它還碰到室內的各面（四壁、平頂等），又由這些面射回而不只一次地觸及聽衆。

設直接聲的到達與其緊接着的反射聲的到達之間（或兩個緊

接着而來的回射聲之間)的時差等於或長於 $1/20$ 秒,那麼這兩者就被人辨明為兩個分開的聲印象。這種現象叫做“回聲”。然而,因為人耳組織的關係,短於 $1/20$ 秒時差的兩次聲刺激接觸人耳,就被聽成稍長些的不間斷的一個過程了。因此我們也把 $1/20$ 秒這個時間稱為人耳的“交混波”。在一個關閉的空間內,隨着一個直接聲之後到達人耳的許多相互短於 $1/20$ 秒時差的聲印象的總和被感覺成“交混回響”。以“交混回響時間”為尺度,這個以後還要進一步加以闡述的。

要求在各種廳堂不出現被聽衆辨明得出的回聲現象是聲音良好的必要前提,也可說是當然的。聲(擴展的)速度在空氣中大約為 340 公尺/秒;所以在 $1/20$ 秒約行 17 公尺。為防止回聲的形成,一個廳堂的尺寸必須使直接波前與其緊隨回射(或兩緊接回射)的間距不可能等於和大於 17 公尺。

其實一個廳堂聲學上的品質,基本決定於其在低音、中音、高音時的交混回響時間的長短。聲學上的品質就是能使講話、音樂從最輕微柔美的鋼琴獨奏到雄壯繁複的大合奏都明朗清晰。設若交混回響時間較其應有的數值過長了,那麼講話變為混沌不易了解,因為前一個字的交混回響還不及消滅而跟着的一個字又已經說出來了。反之,如交混回響時間過短,就迫使歌者或講者不自然的用力,音樂就顯得不悅耳地枯竭無色。各類演出的最適當的交混回響時間數值都是已知的,並且可以用按裝吸聲材料的方法來達到非常接近應有的數值的。吸聲材料如簾幕、

木纖維板、特種粉刷、特製版等等。

但是人耳非常敏感，因之增加了體現這個簡單要求的困難。聽覺範圍大約包括十個音階，對於其中間的五個必須加以控制。又因建築上可以應用的材料對不同高低的音具有很不同的吸聲率，更由於不同的按裝可能性而吸聲率在一定程度內大有出入。這個問題也需要深入的考慮。

聲學的研究成果大部是物理學家的貢獻。所以是用他們習慣的數學的表示方法記錄下來的。這可以看做是為什麼工程界至今對這方面很少注意的主要原因，因之很多可以避免的失敗沒有能夠防止。這本書希望給予建築師們一些啓發，指出要點，並附帶不用建築師們費解的數學定義而儘可能明白地介紹些最必需的知識。所以這本書首先包括一章關於基本的物理學名詞的概念，然後接着一章關於利用投影幾何學確定室內回聲現象的方法，最後一章概述工程上通常一些可能性，如何通過適當的室內處理以使交混回響不超出許可界限。

這裏從一個廣大的專門學問中摘出的片段對某些讀者是不夠的，茲介紹附錄中廣泛的書籍，如新出版克瑞墨爾著的“室內聲學的科學基礎”。

謹謝慕尼黑城克瑞墨爾講師給我許多指迷的建議和啓發，並謝外爾畢爾經理先生對本書印刷悉心的指導。

目 錄

著者序言

第一章 淺近的自然科學的基本概念..... 1

第一節 發生傳播波長和聲波的頻率..... 1

第二節 聲強的尺度..... 2

第三節 實際的聲感..... 4

第二章 回聲..... 9

第一節 波前及其諸回射在平的剖面中..... 9

第二節 波前及其諸回射在室內，它與聽衆耳面的穿透..... 15

第三節 兩平行面之間一個球體的諸回射的圖示法..... 18

第四節 不同形狀和大小的三度空間中回聲的有無..... 20

第五節 由建築裝修凹凸的面的回射和由聽衆席的回射..... 30

第六節 實用中預先確定回聲現象的圖解法..... 36

第七節 具有強烈彎曲界面的房間內的諸聲回射..... 56

第八節 圖解法的效能範圍..... 59

(甲)球切體在房間中

(乙)具有不平的地坪和平頂的房間

(丙)顫動回聲

第九節 放射線幾何學的模型檢查法..... 63

(甲)方法

(乙)進行步驟及其與相應的圖解結果的比較

第三章 交混回響..... 75

第一節 追求的交混回響時間..... 75

第二節	交混回響時間的計算	78
第三節	吸收度的測量	79
第四節	疏鬆多孔的吸聲物	80
第五節	單獨的同振吸聲物	82
第六節	湊合的同振吸聲物	85
第七節	每座席所佔容積的意義	93
第八節	“特效藥”	95
第九節	交混回響處理的方法	96
第十節	“木座椅電影院”中交混回響處理的實例	105
附錄		125
(甲)	計算基礎	125
(乙)	吸收度表	131

第一章

淺近的自然科學的基本概念

第一節 發生傳播波長和聲波的頻率

差不多一切能被人的耳朵辨明得出來的聲印象，都是由於彈性的媒介質、空氣的振盪而發生的。這些振盪相互的區別在於其每秒鐘內的週數(頻率 f)和其不同的聲強(J)。人的聽器官是非常敏感的，最低可聽的頻率在 $f \approx 16$ 次振盪每秒鐘；最高的在 $f \approx 20000$ 振盪每秒鐘。每秒一振簡稱一海茲。是從物理學家漢瑞區、海茲的簡寫而來。頻率每加一倍，音即被辨別為提高了一個音階。從 16 到 20000 海茲之間具有略多於十個的音階。

一個聲的振盪由於彈性空氣的“擾動”而產生。個別的空氣的細粒從靜止狀態被聲源向前拌動，撞到它的緊鄰細粒，自己却被攔住，並被撞回到超出它的原來靜止的地點，然後纔又回到原來靜止的地點。被撞的緊鄰細粒亦復如此，就這樣地使“擾動”向前傳播，但是作為擾動媒介體的空氣，如果不究其細粒活動，仍留在原來的地位。在空氣中一個聲波的傳播速度(c)約在 340 公尺/秒。

我們通常所見的水表面波紋，由於水的個別部分有節奏的起伏對平均的水平而言形成許多波峯和波谷。這裏局部動向垂直於傳播方向。至由於(彈性的)空氣細粒有節奏地互相衝撞而形成的聲波，則發生與空氣的大氣壓力相對而言的近似的低壓極限和高壓極限。這裏細粒動向是順着波的擴展方向的(及逆着的)。在水波從一個波峯到第二個波峯的距離；在聲波從一個壓極限到第二個的距離稱為波長 λ 。

傳播速度 c ，波長 λ ，與頻率 f 相互之間的簡單關係是 $c = f \cdot \lambda$ 。下表表示各個音階的音樂符號、頻率和波長：

樂音的符號	頻率(海茲)	波長(公分)
$\underline{\underline{C}}$	16	≈ 2125
$\underline{C}$	32	≈ 1063
C	64	≈ 531
c	128	≈ 266
c'	256	≈ 133
c''	512	≈ 66
c'''	1024	≈ 33
c''''	2048	≈ 17
c'''''	4096	≈ 8

空氣細粒在往返活動中達到某一個速度 s (聲速)和一個壓力 p (聲壓)。這兩個差不多相等大小的係數的積數是一個聲波的總強度 $J = p \cdot s$ 。因此單獨刺激人耳的聲壓等於 $p \approx \sqrt{J}$ 。

第二節 聲 強 的 尺 度

人的聽器官對於相等或不相等頻率的不同強度也是很敏感

的。在最輕微的聲印象“可聽低限強度”(J_0)與較響的(J)之間強度比率可以達 $J_0:J = 1:10^{12}$, 相應地聲壓比率將被辨別為 $p_0:p \approx 1:10^6$ 。

但是因為要使計算數字不致太大太長, 所以纔利用 J/J_0 的十倍對數($\log$)代替強度比率 J/J_0 來作尺度。稱之為“聲強”或更恰當地稱作“聲強測度”, 以分斐為單位。例如某強度比率 $J/J_0 = 10^5$ 就寫成

$$10 \cdot \log J/J_0 = 50 \text{ 分斐},$$

顯而易見用這種寫法, 最大強度比率 $J/J_0 \approx 10^{12}$ 的聲強相當於 120 分斐。

因為產生可聽低限強度所需的聲壓, 在頻率 16 和 20000 海茲之間很是不等, 所以分斐尺度只是相對的。它可以說是代表, 受對數的“歪曲”的, 聲音強度比率對所屬頻率的低限值的比較。為了求得一個絕對的尺度, 就必須一致地認定某一個頻率和它所屬的固定低限值。因此選定了頻率 1000 海茲, 它的 $10 \cdot \log J/J_0$ 代表“響強” L , 以“昉”為單位。例如 $L(1000 \text{ 海茲}) = 10 \cdot \log 10^5 = 50 \text{ 昉}$ 。

換言之, 在 1000 海茲時聲強與響強恰正互相符合。響強相差一昉差不多正好是人耳能夠辨別得出的最小響強變化, 所以一個昉或一個分斐的小數就不必計算了。

由儘量多人參加進行的比較測驗, 已經肯定了在高於和低於 1000 海茲的頻率時要達到同等響強所需的各個強度(圖1)。我

們可以看得很清楚，為產生低限值，在低頻率較在 1000 海茲所需的強度要大得多；但是例如在 100 海茲每增十呌只約增五分之一，而在 1000 海茲則每增十呌則按定義地增十分之一。

第三節 實 際 的 聲 感

用來代表強度比率對數的尺度的名詞“響強”已經被證明是不妥當的了，因為真實者必須自然地思維，這應該是對於實際人耳聽感的準繩。而“響強”並不符合這個要求。為了區別於已廢的名詞“響強”，所以新用“響度”二字來表示實際的聽感。實際聽感的新測驗指出在可聽範圍四十呌以上的裏面每十倍強度約符合每二倍響度（較準確是 2.16 倍）。四十呌以下的時候它們的關係就不同了，此處可以不必討論，因為這樣小的響強在實用的室內聲學上差不多不必考慮了（參閱附錄甲一）。

“強度十倍 $\approx$ 響度二倍”，

把可以量得出的聲強和實際的聽印象明白地聯繫起來，嚴格地講，這個準則又只適合於 1000 海茲。但是它可以無疑地適用在人耳可聽面積的某一部分，在這個部分中每十呌同等響強的各個曲線與聲強每十分之一差不多具有同等的距離。這個範圍在圖 1 中用粗線畫出。

表一用任意選擇的舉例數字可以對聲強、物理學的響強和主觀的聽印象（響度）的關係取得更清楚的概觀。按第三項中一般的參照數字可以直接組成以呌為單位的響強的總和與積數，以

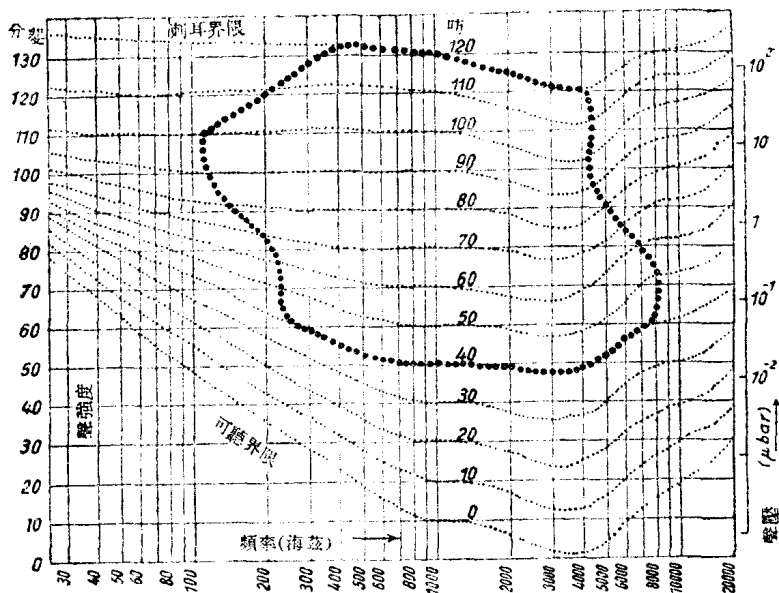


圖 1. 同等響強(吩)的曲線,按弗雷契爾氏和孟森氏

在可聽範圍的粗線圈入部分中每十倍聲強——每增十分斐——略相當於直覺的響度感覺加倍而有餘

避免第一項中用非整指數的不方便的計算。

下面讓我們把吩級和普通知道的聽印象作一對照。

0吩 = 聽覺低限；

10吩 = 輕微耳語，翻書；

20吩 = 安靜花園，鐘擺聲；

30吩 = 細語；

40吩 = 撕紙；

50吩 = 寒喧，安靜街道；

表一 聲強 J , 響強 L (呔) 及直覺的響度感覺 L (宋) 的對照, 任選的數字為例

1 聲強 J 總和, 積數, 商數	2 物理學的響強尺數 $L = 10 \cdot \log J$ (呔)	3 相 差 (呔)	4 直覺的聽感“響度” L (宋)	5 宋增長 辨別程度, 與 50 呔 = 2.16 宋相較
	起點數值: 50 呔	—	2.16	0
$10^5 + 10^4 \approx 10^{5.04}$	50 呔 + 40 呔 = 50 呔	10 及 10 以上	2.22	+ 3%
$10^5 + 10^{4.1} \approx 10^{5.05}$	50 呔 + 41 呔 = 51 呔	9 到 5	2.24	+ 4%
$10^5 + 10^{4.5} \approx 10^{5.12}$	50 呔 + 45 呔 = 51 呔		2.36	+ 9%
$10^5 + 10^{4.6} \approx 10^{5.15}$	50 呔 + 46 呔 = 52 呔	4 到 2	2.41	+ 12%
$10^5 + 10^{4.7} \approx 10^{5.21}$	50 呔 + 48 呔 = 52 呔		2.53	+ 17%
$10^5 + 10^{4.9} \approx 10^{5.29}$	50 呔 + 49 呔 = 53 呔	0 及 1	2.7	+ 25%
$10^5 + 10^5 \approx 10^{5.3}$	50 呔 + 50 呔 = 53 呔		2.72	+ 27%
$10^5 \times 2 \approx 10^{5.3}$	50 呔 $\times$ 2 = 53 呔	3	2.72	+ 27%
$10^5 : 2 \approx 10^{4.7}$	50 呔 : 2 = 47 呔		1.71	- 21%
$10^5 \times 3 \approx 10^{5.5}$	50 呔 $\times$ 3 = 55 呔	5	3.11	+ 45%
$10^5 : 3 \approx 10^{4.5}$	50 呔 : 3 = 45 呔		1.48	- 32%
$10^5 \times 4 \approx 10^{5.6}$	50 呔 $\times$ 4 = 56 呔	6	3.42	+ 59%
$10^5 : 4 \approx 10^{4.4}$	50 呔 : 4 = 44 呔		1.36	- 27%

清楚的響度增減

恰可辨別得出的響度增長

較響的聲源遮往較輕的聲源

關係數值

$10^5 \times 5 \approx 10^{5.7}$	$50\text{方} \times 5 = 57\text{方}$	7	3.69	+	69%	響度加倍或折半
$10^5 : 5 \approx 10^{4.3}$	$50\text{方} : 5 = 43\text{方}$		1.26	-	42%	
$10^5 \times 6 \approx 10^{5.8}$	$50\text{方} \times 6 = 58\text{方}$	8	3.92	+	82%	
$10^5 : 6 \approx 10^{4.2}$	$50\text{方} : 6 = 42\text{方}$		1.18	-	46%	
$10^5 \times 7 \approx 10^{5.84}$	$50\text{方} \times 7 = 58\text{方}$		4.12	+	90%	
$10^5 : 7 \approx 10^{4.16}$	$50\text{方} : 7 = 42\text{方}$	9	1.13	-	48%	
$10^5 \times 8 \approx 10^{5.9}$	$50\text{方} \times 8 = 59\text{方}$		4.3	+	100%	
$10^5 : 8 \approx 10^{4.1}$	$50\text{方} : 8 = 41\text{方}$	10	1.08	-	50%	
$10^5 \times 9 \approx 10^{5.96}$	$50\text{方} \times 9 = 60\text{方}$		4.48	+	106%	
$10^5 : 9 \approx 10^{4.04}$	$50\text{方} : 9 = 40\text{方}$		1.03	-	52%	
$10^5 \times 10 \approx 10^6$	$50\text{方} \times 10 = 60\text{方}$		4.64	+	115%	
$10^5 : 10 = 10^4$	$50\text{方} : 10 = 40\text{方}$	20	1.00	-	54%	響度五倍弱
$10^5 \times 10^2 = 10^7$	$50\text{方} \times 100 = 70\text{方}$		10.0			
$10^5 : 10^2 = 10^3$	$50\text{方} : 100 = 30\text{方}$	30	—			
$10^5 \times 10^3 = 10^8$	$50\text{方} \times 1000 = 80\text{方}$		21.6			響度十倍
$10^5 : 10^3 = 10^2$	$50\text{方} : 1000 = 20\text{方}$	40	—			
$10^5 \times 10^4 = 10^9$	$50\text{方} \times 10000 = 90\text{方}$		46.4			響度二十倍有餘
$10^5 : 10^4 = 10$	$50\text{方} : 10000 = 10\text{方}$		—			

- 60 呔 = 交通繁忙的街道, 吸塵器聲;
- 70 呔 = 鬧街;
- 80 呔 = 大聲呼喚, 地下車道;
- 90 呔 = 電喇叭, 壓氣鑽機聲;
- 100 呔 = 機器腳踏車;
- 110 呔 = 鍋爐鑄工;
- 120 呔 = 飛機距離三公尺;
- 130 呔 = 疼痛感覺。

第二章

回聲

第一節 波前及其諸回射在平的剖面中

一個聲波自一個點形的聲源 S 出發，即以聲源為中心點球狀地向外擴展。若是一個短暫的聲刺激（爆聲或裂聲），那麼這擴展着的聲波就表現成一個球壳。球壳的厚度約等於一個波長。

這樣的球壳我們稱為“波前”，它以聲（擴展）速 $c \approx 340$ 公尺/秒的速度向各方增長，在任何時間 t 它的半徑等於 $r = c \cdot t$ 。這個半徑我們按米契爾稱之為“聲半徑”。

為了使我們對球狀波前的探討簡單化，我們暫且限制在平面的關係上。在圖面上球體成爲一個同半徑的圓，其垂直於圖面的障礙面成爲一條線。

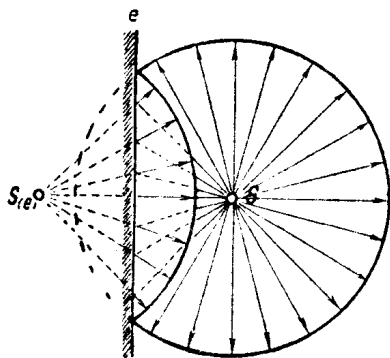


圖 2. 一個平面障礙上的聲回射

一個波前碰到了一個平面障礙 e （圖 2），就被從這個平面射回。波前射回來的部分適成以 e 為鏡面的映像。於是波前及其回射的形象就好像是另有第二