

建

筑

中

的

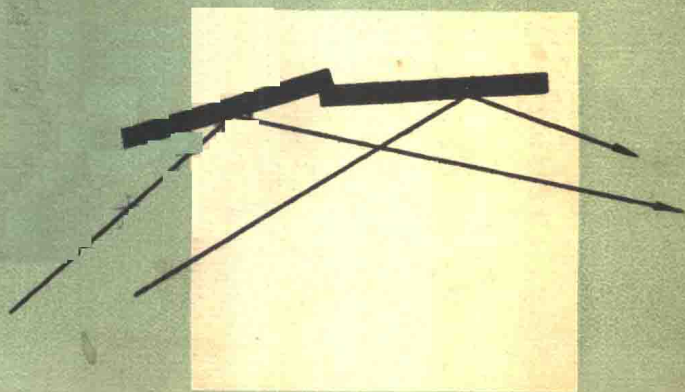
声

学

設

計

〔美国〕V.O. 努特生 C.M. 哈里斯著



建筑中的声学設計

[美國] V. O. 努特生 著
C. M. 哈里斯

王季卿 鄭長聚 譯

科學技術出版社

內 容 提 要

本書譯自 V.O. Knudsen 及 C.M. Harris 所著 Acoustical Designing in Architecture, 闡述建築物內關於隔聲、吸聲和音質處理方面的聲學理論和設計方法。全書共十九章, 一至十四章為一般建築聲學的理論及設計原則, 第十五至十九章為上述理論與原則應用於各項建築物內的設計方法, 包括會堂、劇院、學校、公共建築物、住宅、公寓、旅館、及無線電廣播、電視、錄音用的播音室等。

本書可作為高等學校建築學專業的教學參考書。

建築中的聲學設計

ACOUSTICAL DESIGNING IN ARCHITECTURE

原 著 者 [美國] V.O. Knudsen and C.M. Harris

原出版者 John Wiley & Sons, Inc. 1950 年版

譯 者 王 季 卿 鄭 長 聚

*

科 學 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 號)

上海市書刊出版業營業許可証 079 號

上海啓智印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號 15119·549

開本 787×1029 1/27·印張 14 8/27·字數 285,000

1957 年 10 月第 1 版

1957 年 10 月第 1 次印刷·印數 1—1,500

定價: (10) 2.20 元

譯 者 序

本書的內容及性質已由原著者在序言中很清楚地說明過了，所以不再贅述。

今就譯者對本書翻譯工作中的一些意見加以說明如下：

1. 全書譯文以尽量忠實原著為主，其中除原著第十九章教堂建築因不切合我國國情已將其全章刪除外，其他并無更動。

2. 目前專業名詞尚未統一，譯者對於專門譯名本着力求真切之精神反復推敲以期妥洽，其間亦曾獲得國內聲學家、建築學家等的匡助，唯以限于譯者的水平，謬誤不當之處，在所難免，還望讀者們及時指正。

3. 原著度量單位採用英制，譯文時考慮到大部分圖表資料不便折合公制；故除將附錄部分換算為公制外，正文內仍以英制為主，另於書后附刊英制公制度量換算表以便讀者查對。

全書譯作過程中承南京大學物理系主任魏榮爵教授多方指導，并于百忙中抽閑為之審校，銘感殊深。本書第十三章通風系統中的噪聲控制及第十四章擴音系統曾分別請本校衛生工程系副主任巢慶臨副教授及電工教研組鄧漢興副教授校閱，并予以適當的修正，深以為感。此外科學技術出版社為本書整理譯稿，悉心校訂，對譯者亦有莫大助益，謹致謝忱。

王季卿 鄭長聚合譯

一九五六年十一月于

上海同濟大學

魏 序

解放七年多以來，我國的各个城市里都已涌現出不少新的建筑。在社会主义建設的高潮里，我們还需要数量更多和質量更高的各种不同使用目的的建筑物。經驗告訴我們：在音質惡劣的礼堂里无法听懂报告；噪声聒張的环境里不能保証工作效率……。可是在同一个时期，國外曾經建立了一些音質优良、史无前例的新型建筑^①。为了配合我國的社会主义建設以及使我們的建筑事業赶上國際水平，建筑中的优良声学設計將是我們迫切需要的。

建筑声学是一門“邊緣”的科学，然而主要还是声学中的一个部門。現代建筑声学中包含了比較复雜的数学推演和物理概念；这些，对一般建筑工作者來說，并不很熟悉，其中也有很大一部分完全沒有必要去熟悉它。因此建筑工作者并不欢迎一本数学多和理論上很嚴謹的書，同时也不会滿足于一本只罗列了設計条文、数据、以及如列寧所說的“脫離了数学式子物質便消滅了”的書。原著在取材和表达方式方面是折中的：它考慮到建筑工作者的实际需要和接受的水平，另一方面也还尽量的保存了這門科学的系統性和完整性，以深入淺出的方式將有关近代声学的概念貫串在近代建筑中的声学設計問題里^②，并对這些問題提出了具体的答案。

① 例如众所周知而在文獻中介绍得較詳尽的英國皇家節日音樂廳（中文的介绍見王季卿：电信科学，1956年第六期59頁）。实际上科学和工業先進的國家均有許多新的成就，这里不一一列举。

② 例如原著中第八章即系以 Morse 著“振動与声”一書中的第八章为主要依据，而以淺顯方式表达的。

書中的数学部分乍看起來似乎还多了一些，然而这些都是实际問題中所需要的，对于公式的应用也有举例。書中許多的列綫圖、圖表等可以減免若干較繁雜的計算。這本書可以帮助建筑工作者在声学設計方面走向定量的途徑。如果循序地閱讀，這本書的內容是易于接受的。直到目前为止，這本書仍是同类著作中較好的一本，在國外曾博得建筑工作者和建筑声学工作者的好評，并且值得向國內有关工作者推荐。

然而原書也并不是完全沒有缺点的^①。例如对有关声学測量技術，通風管道噪声減低的处理，擴音系統，立体声系統等等談得過少或者不够細致（和其他部分相对比而言）。又這本書实际上是1949年完稿的，因此，对这方面最新的成就，不免遺漏了一些。但是基本上是完整的，現代化的，能滿足一般建筑工作者的要求的，我們不能要求这种类型的書包含過多的內容，而最新資料也只有文献中才能找到。

本人早就感到原著有譯成中文的必要，以前曾向原著者提到，而对于王季卿和鄭長聚两位同志从事這項翻譯的工作一直是認為很有价值的，当然原著里有些部分顯然不符我國实际情况和需要，都已經过刪節或加附注；还有些部分例如吸声材料，我國自己的產品產量少、品种种类不够多、質量也还不够高，同时也沒有足够的和可靠的測量数据，因此把外國商品和数据仍然保存，可能对我们今后在这方面的發展还有帮助。他如有关清晰度測驗不僅由于漢語与英語有別，这个測驗的本身需要整个重寫，其他与清晰度有关的曲綫也必需有我們自己的統計数据，然而這項工作也不是短期內能够完成的。就目前來說，我們还应当讓这些部分保留，作为原則性的指導和參考。

王、鄭两位同志曾花了近二年的时间从事這項翻譯工作，譯稿

① 見如Rudmose的贊評[J. Acoust. Soc. Am., 521 (1950)]評到原著的优点，也提出他所認為的缺点。

完成后曾向多方面虛心地征求过意見。本人謬承不棄得参与校閱之役，虽尽力太少，助益有限^①，然而此中文譯本之問世，將对我國建筑中的声学設計起一定的作用，則毫无疑義。

魏 荣 爵

一九五六年十二月于南京大学

① 在譯名方面，目前尙未統一，还待有关方面專家集体的討論，这些，可能都是再版时的努力方向。

原 序

本書旨在作为建筑中良好声学設計的实用指南。本書主要为建筑师、建筑学專業学生,以及其他对本題希望少些数学上的篇幅而有一廣泛性理論叙述的人士而寫作的。全書罗列了許多有用的設計資料,故对解决建筑声学中所常遇到的許多問題不失为一本方便的手册。

全書分为二大部分。第一章至第十四章包括声学計設中所必須依据和考慮的一般原理及步驟。第十五章至第二十章引述了以上这些原理及步驟的具体应用,包括会堂、戲院、学校建筑、公共建筑、住宅、公寓、旅館、教堂†、无綫电、电视和錄音用的播音室等設計。

我們化了二年的时间緊密地合作着为筹划和寫作本書而努力。当我們观点或意見分歧时,便互相商討或請教他人直至意見統一为止。原稿曾征得許多同道們的大力协助和指教,其中賽賓氏(H. J. Sabine, Celotex Corporation),杰克氏(W. A. Jack, Johns-Manville Research Laboratory),司諾氏(W. B. Snow, Kellex Corporation),柯克氏(R. K. Cook, National Bureau of Standards),和弗立克氏(R. H. Frick, Rand Corporation)等帮助尤大,至于其他人士不及一一备載,謹此一并致謝。編寫稿件得摩勒氏(C. T. Molley),尼古尔斯氏(R. H. Nickols, Jr.)和安德遜氏(J. R. Anderson)等襄助整理并提出意見。此外对各个試驗所的柯克氏(L. B. Cooke),茄德納氏(M. B. Gardner),亨生氏

† 見譯者序

(R. L. Hanson), 哈維氏(F. K. Harvey), 摩太氏(W. E. Matthews), 門生氏(W. A. Munson), 卜德氏(R. K. Potter)和斯丁堡氏(J. C. Steinberg)等人員亦深表謝意。圖 11-7 是征得英國建筑研究院的同意而复制的。最后霍登女氏(Miss. Judith K. Horton)为我們做了許多圖例及注解,殊为感謝,

努特生(V. O. Knudsen)

哈里斯(C. M. Harris)

1949年11月

目 錄

序.....	i—vi
第 一 章 声音的性質.....	1
良好音質的設計——声音是什么——声音的傳播——位移振幅和 質点速度——頻率——声音的速率——声波的特性——波形—— 一般人的和某些乐器的声动率——声音强度——压力和强度隨距 离的变化——分貝标度——声級計——声源的方向性。	
第 二 章 我們是怎样听聞的	17
耳的灵敏度——有缺陷的听覺——响度与响度級——噪声对听聞 的影响——从声压頻譜計算掩蔽頻譜——在典型室內噪声情況下 的响度計算。	
第 三 章 語音和音乐	31
噪声、乐音和語音——語音的声功率——乐音的性質——房間对 語音和乐音的影响。	
第 四 章 室內声音的反射及衍射	43
声音的反射——声音的衍射——声象。	
第 五 章 露天劇場	53
声音在露天中的傳播情况——在露天中語音清晰度的測驗——露 天劇場的設計——演奏席的亮蓋。	
第 六 章 吸声材料	72
声音是怎样被吸收的——材料吸声率的評價——吸声材料的类型 ——預制吸声單元——吸声塗料及噴料——吸声毯——吸声系数 表——穿孔护面板——吸声材料的裝置——吸声材料对光的反射 ——吸声材料上油漆对吸声效果的影响——补釘式材料的吸声效	

果。

第七章 特殊的吸声构造 99

板片形吸声体——亥姆霍兹共振器吸声体——共振器式的板片吸声体——帷幔——可变换的吸声体——悬挂式吸声体。

第八章 室内声学原理 111

房间的共振、简正方式——声压的分布——声音的扩散——物理声学——几何声学——室内声音的增强——声压的稳态值——室内声音的衰变——平均衰变率——混响时间——混响公式应用的限度——不同频率声音的衰变和混响时间——空气吸收对衰变率和混响时间的影响——混响时间的列线图——耦合空间的混响——与房间形状有关的特殊声学现象。

第九章 室内音质设计 144

良好音质的要求——语言可懂度的评定——房间形状的设计——每座体积——室内的最佳混响——混响特性的控制——缩尺模型试验——已竣工房间的检验——清晰度测验。

第十章 噪声控制 176

噪声级的相加——建筑物内的噪声——户外噪声——建筑物内的容许噪声级——选择和布置基地以防禦噪声——基地的环境布置——建筑物的布置。

第十一章 空气载噪声的减低 189

声音是怎样传递的——通过开口的传递——传声损失——刚性间壁——多孔性材料——复式墙的构造——窗和门——隔噪因数——噪声隔绝的要求——计算因隔声而减低的响度——隔声资料表——用吸声处理减低噪声——吸声材料的应用。

第十二章 固体载噪声的减低 214

地板和平顶——不连续性的构造——机器振动的隔离。

第十三章 通风系统中的噪声控制 230

通风系统中噪声的来源——通风系统中噪声的抑制——用作管路的吸声材料——有衬料的通风道中噪声减低量的计算——减声器

——交擾傳遞的消除。

第十四章 擴音系統 247

擴音系統的用途——單波道擴音系統——立體聲擴音系統

第十五章 會堂 257

會堂的發展過程——會堂的布置——小型戲院——劇院——電影院——學校會堂——公共會堂。

第十六章 學校建築 277

學校基地——學校建築物的布置——需要音質設計的房間——教室——講堂——音樂室——健身房、食堂、圖書館、辦公室、其他各式房間及走道。

第十七章 公共建築 297

辦公室、銀行和商店房屋——飯店——工業建築物——圖書館、俱樂部、文化宮、及博物館——醫院——立法、行政和司法用的建築物。

第十八章 住宅、公寓及旅館 310

住宅——公寓——旅館。

第十九章 無線電廣播、電視和錄音的播音室 317

播音室的最佳混響時間——播音室中的聲音隔絕——擴散——播音室的大小及形狀。

附 錄 329

1. 吸聲系數表
2. 隔聲資料表
3. 英制及公制換算表
4. 中英名詞對照表

第一章 声音的性质

建筑中关于声学方面的設計在建筑草圖开始时便要随即作出初步的考慮，并須繼續貫徹至各階段的設計和構造方面去。如果一个建筑师懂得了建筑声学的原理和知道怎样去运用它，則在他所設計的建筑物中就能保證有良好的音質条件。

良好音質的設計

建筑中关于声学方面的設計正象設計結構强度或房屋平面布置那样，必須符合功能的要求；因此，建筑师对所有这些功能都应当要有充分的了解。声学方面的重要性并不次于構造强度和建筑物的平面布置，所以在設計开始时就应当考慮到这个問題。假若等到設計完畢甚至房屋完工以后，再請一位声学專家來改善建筑物的音質条件，同时并要求最好不要再更改建筑物的主要結構，那么这位專家往往已无能为力了。

关于建筑物内的声音控制并不是玄虛莫测的或者不能預先掌握的。建筑声学是一門嚴密的科学，同时也是一种实用的藝術。一位对这方面有修养的建筑师，他在設計时便能适当地考慮到建筑物内的音質問題。这本书的目的是以簡便、实用的方式提供了对这门科学和藝術上的一些处理原則。基于这些原則下的建筑設計將保證房間和建筑物的構造免受噪声的干擾，并对于音乐的演奏或演講的傾听具备了适宜的条件。实用的建筑声学設計要求有科学的、美觀的和切合实际的方案。

声音是什么

在还没有充分了解控制室内音质的最基本的规律以前，我們必須先了解声波以及声波所引起听觉上的一些性质和定义。首先，我們必須对客观存在的声音和由人耳所产生的感觉加以区别。例如，荒林中一棵大树轟然倒地是否算是产生了声音，关于这一点純系定义的问题。本书中声音一詞的定义是指正常人耳所能感觉得到的一种物理性擾动，——即压力的脉动或变化（按照这样的定义，大树倒下是有声音产生的）。这种擾动一般是通过空气而傳到耳中。在任何情况之下，声波不能行經真空，它必須借一具有慣性和彈性的媒質來傳播。

由声波所产生的听觉称为声觉。大树倒下轟隆作响所产生的只是当耳朵听聞时的声觉。

声音的传播

声音起源于物体的振动。撥动琴弦或敲击音叉所产生的振动是真切地可以看得見的；多数其他的声源如鋼琴的音板和揚声器的紙盆喇叭，由于振动的振幅太小，我們虽看不到，但可以用指尖感触到。

假定一物体在空气中振动，当它向外方向运动时，推动了靠近它的一“層”空气，于是这層空气被压缩了，它的密度和温度也随之而增加。由于这層空气中的压力高于周圍其他未被擾动的大气压，在这層中的各質点（即分子）就趋向外移^①，并将它們的运动傳遞到相鄰的一層。其后，这一層又傳遞到另一相鄰層，这样一直繼續下去。当振动物体轉向向內移动时，靠近它的空气層便变得稀薄了，这一稀薄層是跟随着向外方向的压缩層而运动的，并有相同

① 这一运动是加在分子的无規运动上的，但在此处的討論中后一运动可略而不計。

的速率；这种压缩层与稀薄层向外传播的连续运动称为波动。其传播的速率决定于媒质的密度和压缩系数；媒质的压缩系数和密度愈小，波动的传播也就愈快。

因声波的通过而引起空气的压力、密度和温度的变化通常是极其微小的。例如，距离喇叭 3 呎处空气中的有效声压，即压力变化的方均根值，大约是每平方公分 9 达因；就是说这种压力的涨落大约只及于正常大气压力的百万分之九。正常的大气压力是每平方公分 1.01×10^6 达因（每平方英吋 14.7 磅）^①。象这样大小的声波引起空气密度的变化约为 0.001%（空气的正常密度为每立方公分 0.0012 克），其温度的涨落也只有 0.0008°C 。

位移振幅和质点速度

如果传递的媒质本身不在运动，则传递声波的个别振动质点都不会改变它们的平衡位置；它们只是在平衡位置上来回振动。各个质点离开它们平衡位置的平均最大距离称为位移振幅，平常在室内听到的声波其位移是非常小的。例如，离开吃饭时敲的钟 3 呎处的空气质点，其所遭受到的最大位移仅仅是万分之几吋。质点在平衡位置上来回运动的速度称为质点速度。距离仅 3 呎远的空气质点速度每秒内只有几吋，它与位移振幅和声波的频率成正比。

频率

声源在 1 秒内完成来回振动一周的次数称为振动的频率。媒质中质点的频率也是这样。一根弦线在 1 秒内振动 256 次（“C 中音”），这时它周围空气的质点和声场内观察者的耳膜中都产生了同样频率的振动；这是假定声源与观察者相应媒质而言是静止的，是室内声学中的一般假定。频率是一种物理的现象，能用仪器来

① 英制及公制单位换算表见附录 III。

測量,它与音調有密切的联系;但是音調是一种心理現象,二者并不相同。頻率通常是在一个数字后面加上周/秒(或用符号~)來表示的,或簡單地僅寫一个“周”字。于是剛才所提到的弦綫的振动頻率可寫成 256 周。圖 1-1 列出了以鋼琴鍵板作比較的某些乐器和歌声的基頻范围。

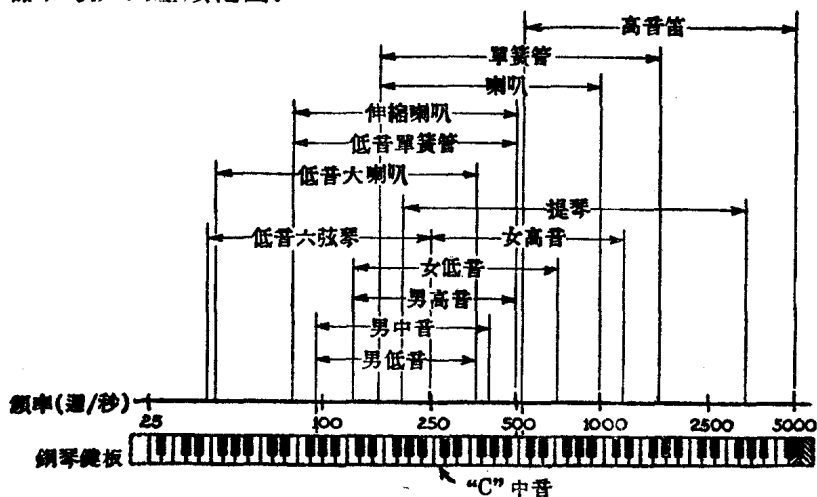


圖 1-1 以鋼琴鍵板作比較的几种乐器和歌声的頻率范围。

声音的速度

如果声音依照每秒約 186,000 哩 (300,000 公里) 的光速進行,那么許多引起会堂中音質不好的原因都將不会存在,可是声音的進行比較光綫要慢得多,在室温的空气中僅約 1130 呎/秒。因此,回声和混响便成为許多室内的嚴重缺点,在以后將提出詳加討論。从实验的数据証明,当反射声到达观察者迟于直达声約 0.058 秒时,就能区别出其为回声(在这段时间內声音約行經 65 呎)。混响,可最簡單地解釋为室内声音多次連續反射的混合,因为声音進行的速率每秒僅約 1130 呎,在声音衰减至听不到以前常有这些較長的連續反射,因此可以看出声速在建筑声学中占着很重要的地位。

可聞範圍內的声音速率在空气中并不顯著地随頻率而改变,除了一些非常强烈的声波以外一般也不随强度而改变。一强大功率的声源,如空襲警报的汽笛,其声音的速率僅在离声源几公分內是随强度的增加而略有所增。在建筑声学中,为了应用上的方便,一般認為声音的速率是与頻率、强度以及大气压的改变无关的。但温度对速率却有顯著的影响,每升高華氏 1 度 (攝氏 0.55 度) 約增加 1.1 呎/秒。由于声速与温度有关,便成为大气中声音射綫弯曲的主要原因之一。这种声波的弯曲(折射)有时会影响声音到达听众前的分布情况,特別在露天劇場中更为明顯。

空气中声音的速率可由 $\sqrt{1.40P_s/\rho}$ 得出, P_s 是大气压力, ρ 是它的密度。在本書的計算中,空气中的声音速率是假定在温度 22°C 时每秒 1130 呎。速率随相对湿度的改变而微有变动。在 22°C 时各种不同相对湿度的空气中,其实际速率与 1130 呎/秒的数值相差不到 1 或 2 呎/秒。

声音在液体和固体中進行比在空气中快得多。如在水中的速率約 5,000 呎/秒;硬木中順着木紋方向約为 13,000 呎/秒,橫穿木紋約 4,000 呎/秒;在石料中約 12,000 呎/秒。

声音速度这一名称常与声音速率相通用,但嚴格地講,两者并不相同。速度包括傳播的方向和速率,在一定方向的速率才是速度,故速度为一向量。其傳播的方向是波的前進方向,更精确地說,它是垂直于前進波的波陣面(恒定位相的面)。

声音速度不可与質点速度相混。質点速度的速率指空气質点在平衡位置左右來回运动的速率,因此質点速度与声波的頻率和位移振幅的乘積成正比,且常与声波离开声源的距离有关,而声音速度在一定的大气压条件下一是一恒量。

声波的特性

具有一个單獨頻率的振动是振动的最基本的类型,一般称之为