

建筑声学

——原理和实践

architectural acoustics

PRINCIPLES AND PRACTICE



(美) 威廉 J.卡瓦诺夫 约瑟夫 A.威尔克斯 编著

赵樱 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



建筑声学

——原理和实践

(美) 威廉 J. 卡瓦诺夫 编著
约瑟夫 A. 威尔克斯 译
赵 樱



机械工业出版社

本书是一本介绍建筑声学的实用性读物,系统、深入地介绍了20世纪建筑声学尤其是观演建筑声学的成果和声学设计的原理、经验与技术措施,着重介绍近年来这一领域的新成果、新趋势。本书内容包括观演建筑史、建筑声学基本知识、室内声学原理、音质评价、吸声和隔声、室内噪声控制等,重点介绍各类观演建筑的音质设计和建筑设计。

Architectural acoustics: principles and practice /WilliamJ. Cavanaugh and Joseph A. Wilkes, editors. Copyright © 1999 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

版权所有,侵权必究

版权登记号:图字 01-2003-6904

图书在版编目(CIP)数据

建筑声学:原理和实践/(美)卡瓦诺夫(Cavanaugh, W. J.), (美)威尔克斯(Wilkes, W. J.)编著;赵樱译. —北京:机械工业出版社, 2004.10

书名原文: Architectural Acoustics: Principles and Practice
ISBN 7-111-15096-1

I. 建… II. ①卡…②威…③赵… III. 建筑声学 IV. TU112

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第083118号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:杨少彤 版式设计:霍永明 责任校对:申春香
封面设计:张静 责任印制:石冉
三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm $1/16$ ·18.5印张·456千字
0 001—4 000册

定价:37.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

序

在今天这个科技日新月异的时代，建筑设计队伍囊括了许多领域的专家。取决于建筑项目的性质，这些专家可能包括岩土工程师、结构工程师、机械设计师、民用建筑顾问、园林设计顾问、室内设计师、灯光设计师，以及数量日益增加的声学顾问。

对建筑声学有要求的建筑物包括机场和其他交通设施、教堂、电影院、歌剧院、音乐厅、教室、报告厅、图书馆、音乐室、体育馆以及运动场，还包括各式各样的住宅建筑，如公寓大楼、旅馆、多用户住宅以及单用户住宅等，此外还包括各类的商业建筑和工业建筑。

声学顾问在建筑物的声学设计过程中起着主要的作用，包括建筑构成和内表面材料的选择和细节设计，声音和通信系统的设计和规划，以及机械系统的噪声控制和振动控制的细节设计。

在技术发展和对许多人造环境及建筑物周围声音的产生、测量、增强和控制的解释等方面，声学艺术和科学也已经取得了很大的进展。

本书的目的就是使声学的科学成果能够为很多类型结构的设计师和使用者所用。要想使建筑结构实现它的使用效用，能够带给人们享受，一个很重要的因素就是要合理地处理那些希望听到的声音和不想听到的声音，不管是人的噪音、乐器声，还是机械系统发出的声音。为实现这个目的，由一批在发展建筑声学领域内很有经验的声学专家顾问执笔，编写了本书。全书共分6章每一章都包括案例研究分析，用来说明在建筑设计中声学原理的应用。其中，各章的内容都是基于 Wiley 原来出版的共5卷的《建筑百科全书：设计、工程和建筑》中的材料。

第1章将介绍建筑声学涉及的领域，声音及其控制的基础知识，以及声学作为一门科学技术的发展历程及其在当代建筑设计中的作用。这一章将解释声音的基本测量技术、波长、人耳能够听见的音频范围，声强的单位（分贝），乐器的频率测量技术等等。建筑设计声学方面的建筑规范在逐渐增多，建筑空间中声学设计标准也需要尽早建立。这些都是很基本、也很重要，比如在居住和办公空间中要求保密性，这就需要有合适的隔声效果，在礼堂、剧院、礼拜堂等这些对声音有特殊要求的场所中也需要对声音有加强和混响控制。

第2章描述了大量的建筑材料以及这些建筑材料在建筑物中吸收声音、反射声音和传输声音的能力及其应用。可以看到，所用的材料基本上都是“声学的”，因为它们都从某种程度上影响了建筑的声学环境。讨论了用于声音衰减的材料，包括在多层居住结构中的冲击噪声、马达的振动和管道中的空气流动等等。

还提供了普通建筑材料的声学衰减性能评价，比如砖、混凝土、石膏、玻璃、还有墙壁和地板/天花板系统采用的材料。这一章中的一节描述了用于管道、管子、马达等产生噪声的机械成分中进行噪声衰减的特殊装置，比如空气弹簧、管道消声器、柔性管道接头、弹性夹、通道和构架。

第3章分析了从多种声源发出，通过路径传播到最终的接收者的噪声，还有为保证声学舒适性和保密性采取的必要的声音控制。所用的建筑都不同程度地需要背景噪声控制，而在

一些要求较高的听音场所中这一点尤为重要。特殊建筑系统中的噪声控制方法，声音隔离细节和保密性测量已经成为一些建筑类型的工业标准，在建筑标准中，甚至是国际标准中，也经常有所要求。其说明的系统包括建筑隔离物、地板/天花板、建筑外围、HVAC 机械系统及其分布系统。还提到了马达装置、风机叶片、房屋设计及管道、以及管道消声装置等等。

第4章涉及人造的室内建筑和户外建筑，这些建筑的主要用途是作为发音和听音的场所。本书把这些建筑称为听音场所。它们包括各式各样的建筑，例如音乐厅、歌剧院、舞台剧院、电影院、教堂、运动场，以及教育设施中的报告厅、教室和练习室。人们希望这些建筑能更好地服务于表演者和他们的听众，因此也促使人们开展广泛的研究，更好地理解建筑空间的声学。使用改进的材料和设计技术，对于使用者和听众来说，提高了这些建筑空间带给人们的享受。

为了提高上一章所讨论的大多数听音场所的音质，人们在听音场所中使用了扩声系统。第5章讨论了扩声系统的设计基础，扩声系统的组成，包括麦克风、扬声器、声音控制装置，以及扩声系统在诸多听音场所的应用。扩声系统的作用是让厅堂内各处的听众都能听清楚演奏者的表演。在大型的听音场所，为了听清演讲和音乐，足够功率的声音放大系统是必不可少的。在这些扩声系统的设计中所使用的技术不断朝着更高效率和更低成本的方向发展。

第6章记录了人们在声学领域中取得的最新进展，人们研制出能够评价、建模和预测建筑物音质的方法。有人预计，用来理解和定量分析建筑空间音质的新方法将被证明在所有建筑物的设计过程中都是很有益的。本章也回顾了建模技术和声场模拟技术取得的进展、关于新型声音扩散材料的研究、机械系统的噪声控制装置、撞击噪声、排气系统噪声以及其他建筑物系统取得的进展。

为改善建筑空间的设计并使其具有我们所希望的声音特性，人们开展了许多研究来确立在各类音乐演出中听众所喜欢的混响效果。此外，人们还测量了语言清晰度，目的是确认在建筑空间中哪些因素有助于语言清晰度，哪些因素不利于语言清晰度。

总而言之，我和本书的合编者 Bill Cavanaugh 希望，《建筑声学——原理和实践》能够实现我们的初衷，即编写一本能够反映建筑声学的最新进展、有用的和可操作性强的建筑声学教材，本书适用于建筑师、工程师、声学顾问、教师、学生以及建筑物的业主和经营者，有助于他们建造出具有良好音质的建筑。

Joseph A. Wilkes, 美国建筑师协会会员
安纳波利斯, 马里兰州

1998年1月

目 录

序

第 1 章 建筑声学及基本概念	1
1.1 简介	1
1.2 基本概念	1
1.3 设计规范	26
1.4 建筑声学中选择的标准	34
参考文献及深入研究阅读资料	36
案例分析	37
哈佛大学 Fogg 艺术博物馆讲演厅 (1895-1973):	
现代建筑声学的开端	37
第 2 章 声学材料和研究方法	45
2.1 简介	45
2.2 声音的衰减	45
2.3 声吸收	48
2.4 常见的建筑材料	51
2.5 声学材料	54
2.6 特殊装置	59
2.7 性能表	63
参考文献及深入研究阅读资料	80
案例分析	81
Duke 大学礼拜堂: 声学材料应用的范例	81
第 3 章 建筑噪声控制应用	86
3.1 简介	86
3.2 声学分析	86
3.3 建筑物噪声标准	94
3.4 噪声控制方法	102
参考文献	124
推荐读物	124
案例分析	125
马萨诸塞州, 伍斯特市, 麦坎尼克斯大厅, 冷却塔隔声	125

第4章 声学设计：听音场所	127
4.1 简介	127
4.2 听音场所的声音传播——室内与室外	127
4.3 音乐厅和演奏厅	131
4.4 歌剧院、话剧院，一般功能礼堂和宗教场所	140
4.5 用于演讲和音乐活动的其他场所	149
参考文献	152
深入研究阅读资料	152
案例分析	153
纽约州，斯卡斯代尔市，HITCHCOCK 长老会教堂	153
案例分析	154
纽约州，CHAUTAUQUA 教育中心，LENNA 大厅	154
案例分析	156
宾夕法尼亚州，费城，美国哲学学会，BEN FRANKLIN 大厅	156
第5章 扩声系统	158
5.1 简介	158
5.2 扬声器系统	159
5.3 设备	161
5.4 扩音及声音播放系统举例	165
5.5 特别的音响系统安装	170
参考文献及深入研究阅读资料	171
案例分析	171
麻萨诸塞州，康科德，Concord - Carlisle 地区高中礼堂的音响系统	171
案例分析	173
麻萨诸塞州，波士顿，东北大学法学院，Cargill 97 报告厅的音响系统	173
案例分析	175
路易斯安那州，新奥尔良，路易斯安那体育馆的音响系统	175
案例分析	180
佛罗里达州，Vero 海滩的社区教堂的音像系统	180
案例分析	182
泰国，曼谷，Sitikit 女皇国际会议中心的音响系统	182
案例分析	189
香港，九龙，香港文化中心的音响系统，TSIM SHA TSUI	189
第6章 声学设计和研究的近期革新	199
6.1 简介	199
6.2 理解和测量室内音质	201
6.3 声学建模和声场模拟	224
6.4 建筑声学研究的其他方向	226

6.5 结论	229
深入研究阅读资料	230
参考文献	230
案例分析	233
奥伦奇县, 表演艺术中心, 西格斯通礼堂	233
案例分析	243
德克萨斯州, 达拉斯, 莫顿·H·梅尔森交响乐中心, 马克狄莫特音乐厅	243
案例分析	252
阿拉斯加州, 安克雷奇, 阿拉斯加表演艺术中心, 伊万杰琳·艾特伍德音乐厅	252
案例分析	257
声学模型测试	257
附录	262
附录 A 转换因数, 单位名称及符号	262
附录 B 世界各地的声学协会	267
附录 C 声学顾问的选择	273
术语表	274
索引	282

第 1 章 建筑声学及基本概念

1.1 简介

建筑内部及周围的声学环境是受建筑规划、设计和建造过程中很多相关或者相互依赖的因素影响的。从任何建筑发展的开端来看，地点的选择、建筑的位置、甚至空间上的安排都能不同程度地影响声学问题。形成一体化空间的材料和建筑要素也将决定人们如何感知声音以及声音如何传输至毗邻空间。建筑师、工程师、建筑技术人员和指挥者也对声学环境的控制起着重要作用。通过对声学基础规律的理解，掌握材料和结构控制声音传输的规律，可以避免一些问题，或者至少可以在工程的早期解决问题，这样就能大大减少损失。但是如果是在建筑完工后或是已经入住使用后发现问题，即使有好的解决办法，“校正”测量也会不可避免地导致巨大的花费。

日前，联邦、州和当地建筑法规标准均要求在建筑设计的声学方面引起注意。在一个音乐厅或是播音室中，对声音的特殊要求显而易见，然而，更多的问题是在与人们工作、居住息息相关的普通空间。相应于 1970 年的环境保护法案，美国大多数主要联邦政府都提出了要求和标准，争取提供安全、舒适的工作生活环境。几乎所有这些都意味着建筑设计师们要认真考虑建筑的声音环境。例如，美国劳工部（DOL, The U.S. Department of Labor）非常关心保护工业环境中工人的听力，并建立了工人在噪声环境中的最大承受标准。工厂的建筑对从事工业劳动的工人的工作环境会产生重要的影响。同样地，美国住房和城市发展部也要负责保障联邦政府资助的住房不要位于噪声严重的环境中。即使不得不这样，在设计中也一定要适当地考虑建筑的隔声功能。一些州政府要求在主要机场或高速公路附近的所有公共建筑必须有特殊的消声功能。随着频率的逐渐增长，当地政府建筑法规规定要足够重视住宅单元之间的隔声效果和建筑系统设备之间的噪声传播，并为此采取了一定的措施。美国总务管理局，联邦政府最大的办公建筑建造者，为将来的办公建筑采取了相关的“开放”政策。声学可能是在考虑这些办公环境最终能否通过时主要关心的问题。

人们现在越来越关注自身的需求，关注他们居住和工作的环境，并且意识到可以通过有效的方法来改善这些条件，这些需求将最终反映在工程设计的标准上和建筑相关的法规、标准上。

1.2 基本概念

任何有关建筑声学的考虑都可以看作这样一个系统：声源、传播路径和声音接受者。即使是最复杂的问题，也可以分解为一个或多个声源，连同声音传播到最终接受者的路径等问题来研究。不管这个声源我们是希望听到的，还是不受欢迎的（比如噪声），这个系统的每一个影响因素都是可以控制的。如图 1.1 所示，即使在一个简单的讲演礼堂里，人们希望听

到的声音（讲演者以及听众的发言）和不愿听到的声音（如空调系统的声音等等）都是同时存在并且必须得到控制的。自然，建筑的设计和技术都对传播路径有着至关重要的影响。但是，要了解一个给定情况中的声源和接收者，最基本也是最重要的是首先有效全面地了解这个问题。例如，选择和指定最安静的机械/电子装置可避免以后设计中一些特殊的噪声和振动控制建筑因素。或者在建筑中安装一个特殊的噪声处理装置，这类行为可大大节省以后在这方面的投入，因为在已经建好的建筑物中重新安装特殊声音衰减装置需要很大花费。

大多数时候，建筑中声音环境的有效控制至少基于对声音基本性能的概念上的理解，比如它如何通过典型的建筑空间传播，不同的建筑材料和建造系统对它产生怎样的影响。这些理解对那些关心整个建筑设计/建造过程的人来说至关重要，而他们将影响到很多即将投入建造的建筑。另外，正如很多其他原理，如整体建筑环境、冷热舒适度、采光、能量保持等类似的问题一样，声学问题的解决办法要求大量的经验判断和非简单的感觉。毕竟，人们并不仅仅只关注他们所处环境中的一面。因此，声学即使只是其中一个重要的方面，但它也是环境中重要的一部分，对它的有效控制将有助于建造出优秀的建筑。

声音的基本原理及其控制

为了解控制建筑中声音的基本程序，必须至少从概念上要理解声音自身可测量的物理特性。在有弹性介质扰动时会产生声音。一旦扰动发生，不管是在空气中乐器的弦振动还是下落的物体在固体表面引起的声音，声波将依靠介质的弹性性能，由声源以一定的速度向外传播。

图 1.2 中表示的可能是声音产生的一种最简单的形式——敲击声叉。拨动音叉臂使其开始振动，在音叉每次反复运动时，邻近振动表面的空气分子立即被交替挤压，所以表面的空隙变得稀疏。在受到这个声源循环振动的干扰（空气分子被挤压并变得稀疏）后，邻近的介质分子也随之发生振动，从而使能量由声源向外传播。在这个向外传播的过程中，声音可以被看作是一个“连锁反应”，由于振动不断地被传输到邻近的分子，压力迅速而微小的起伏变化，就像在拥挤的地铁列车里，更多的人想挤进来时会不断地碰到周围的人。但是，最初的被挤压的空气分子并没有从声源开始继续向周围运动，而只是在有限的范围内来回做往复运动，并将它们的能量传输给邻近的分子。尽管最后

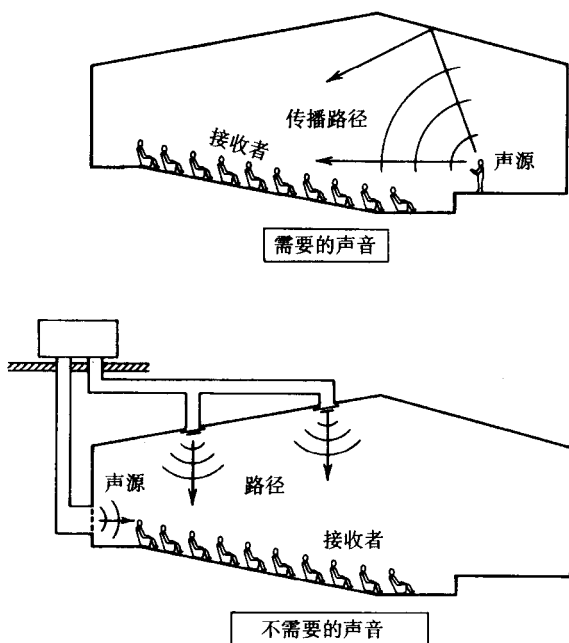


图 1.1 每个建筑声学问题，不管是要加强希望得到的声音还是要控制不希望得到的声音（噪声），都可以按照声源、传播路径和接收者这三方面来考虑。（选自建筑百科全书：设计、工程及建筑，William J. Cavanaugh, “Acoustics-General Principles”, Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons, 经 John Wiley & Sons 同意再版。）

挤上列车的人没法移动太远，但是周围一些人仍能感觉到由他引起的拥挤扰动。

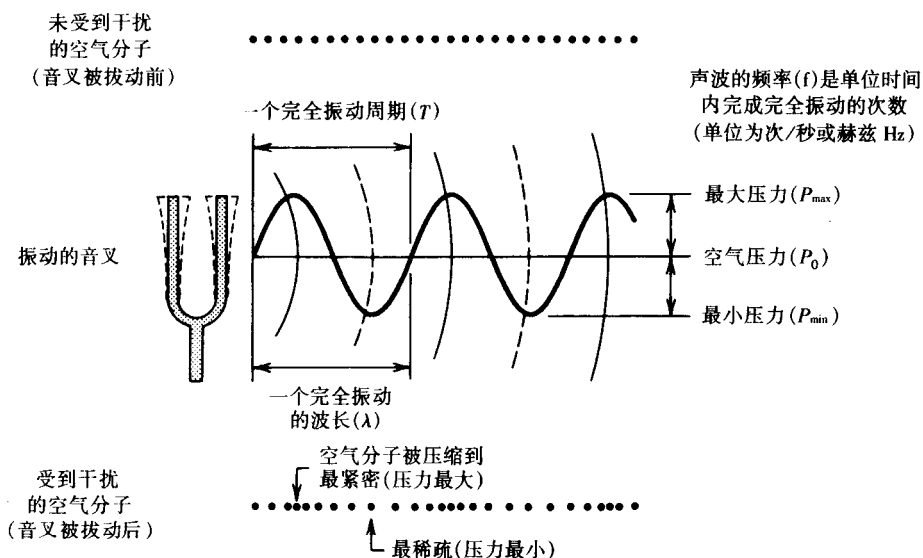


图 1.2 音叉说明一个简单的纯音如何产生。(选自建筑百科全书：设计、工程及建筑，
William J. Cavanaugh, "Acoustics-General Principles", Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 ©
1988 John Wiley Sons, 经 John Wiley & Sons 同意再版。)

由振动的音叉引起的压力扰动是肉眼看不到的，但最终声波将到达人耳，引起耳膜的振动，经过极其复杂的机制，最后在大脑中产生听觉。我们的耳朵可能已经是最精密复杂的声音测量装置了，但是人们还是发展出一些近似于人耳听觉系统的有效测量仪器来提供给我们科学试验和工程应用所必需的定量数据。对于一个振动的音叉在空气中产生的简单的声波（其他所有复杂的声波亦是如此），有两个重要的基础测量量：声波的频率和它的强度级别。

频率

声波的频率是在单位时间内完成完全振动的次数。音乐家称之为音准，而将这个基频或是这个循环振动的速率称之为声音的特征。低频声音的声音特征，比如一个低音贝斯的声音，“是低沉而有回响的”。高频声音的声音特征，比如蒸汽喷嘴发出的声音，是“很尖锐的滋滋声”。

频率的单位是赫兹，缩写为 Hz（早期声学教材和一些出版物可能使用每秒循环次数，表示为 cps，即 cycles per second）。上面所说的音叉产生的声音频率是单一的，称之为纯音。一个简单音调有一个基音以及一个或更多个泛音。所有其他通常的声音、音乐、演讲以及噪声更为复杂，因为它们包含很宽频率范围的声能（也就是振动），甚至会超过人耳可听频率的范围（健康正常青年人听力范围为 20~20,000Hz）。图 1.3 说明了这些简单和较为复杂声音的比较。图 1.3 是简单的与复杂的日常声音作比较。简单音、纯音和音乐声只包含基音和相关的泛音。一般的日常声音包含人耳可听能力很宽范围内的声能。

图 1.4 中说明了一些包括可能出现的峰或显著强度的典型音频范围。为了方便比较，图

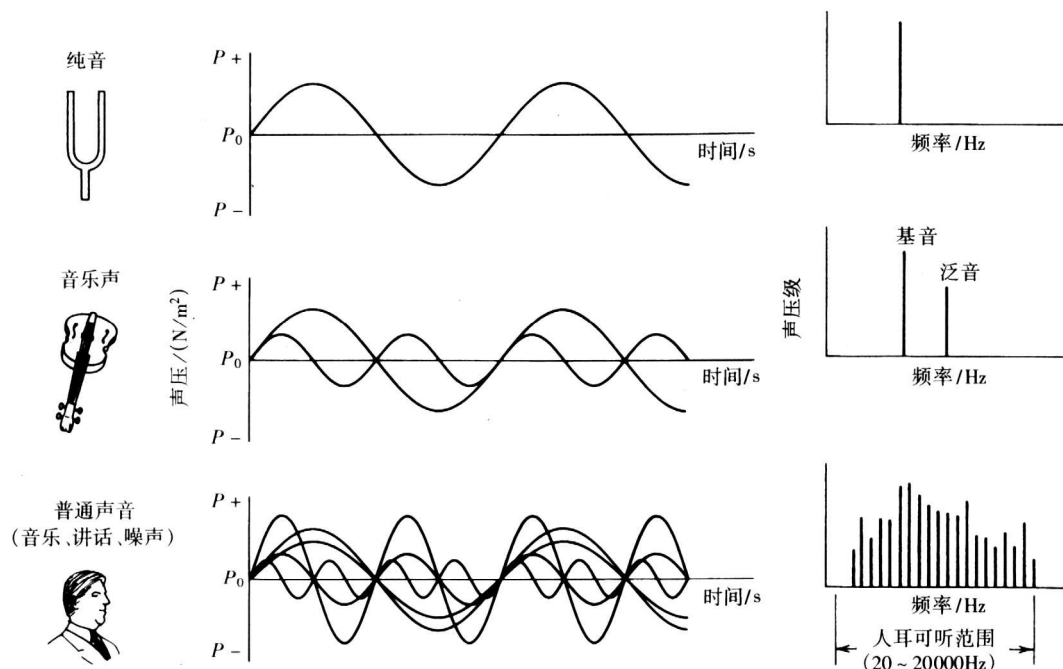


图 1.3 简单的与复杂的日常声音比较。简单音、纯音和乐声仅包含基音频率及由其倍数构成的相关泛音频率的声能。日常生活中的普通声音范围很宽，甚至超过人耳可听频率范围。（选自建筑百科全书：设计、工程及建筑，William J. Cavanaugh, “Acoustics-General Principles”, Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons, 经 John Wiley & Sons 同意再版。）

中给出了钢琴键盘及其频率范围。这说明我们身边的大多数声音在某种程度上超过了人耳可听频率范围。

频带

为了方便测量，如图 1.5 所示，将人耳可听频率范围再细分为几个部分。在测量系统中利用电子过滤器，频率范围可按倍频带或如 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{1}{10}$ 倍频带分为几部分。通常倍频带就可以给出一个声源足够的频率信息。但是，在一些实验测量中，比如在测量墙壁的声音能量损失性能时，要测量 $\frac{1}{3}$ 倍频带。建筑物中的声源物体，如声音控制物品和材料，是依赖于频率的（例如会随频率变化而变化）。即使最终只是用简单平均值或者单一数值描述声级或说明产品，谨记涉及到宽范围也是很重要的。

声音的波长

与声波频率有关的另外一个基本量是声波的波长。声波在其传播途径上，发生一次完整振动所经过的距离称为波长。声音在介质（如空气或混凝土）中的传播速度和它的频率、波长之间存在着基本关系，表示为：

$$c = f\lambda$$

其中,

c = 声音的传播速度

f = 声波的频率

λ = 声波的波长

例如, 钢琴上的中音 C 频率为 256Hz。在空气中, 声音传播速度大约为 1100ft/s, 它的波长为 4.3ft。如果在水中激发频率为 256Hz 的声波, 它的速度会增加到 4500ft/s, 波长为 12ft。相应地, 在固体混凝土结构中声音会传播得更快 (10, 200ft/s), 波长将为 24ft。

对不同的建筑声学问题, 记住在可听范围内的波长尺度是很有用的。比如, 在实验室中, 对建筑成分进行声音传播损耗和其他测量时, 都要测量中心频率为 125 ~ 4000Hz 的 1/3 倍频带范围。相应这些频率的波长分别大约为 8.8ft 和 0.28ft。通常来讲, 我们需要很大的元素来控制波长较长的低频声音; 而另一方面, 较薄、较小的建筑元素则可以通过吸收来有效地控制声音, 比如, 高频下波长较小。

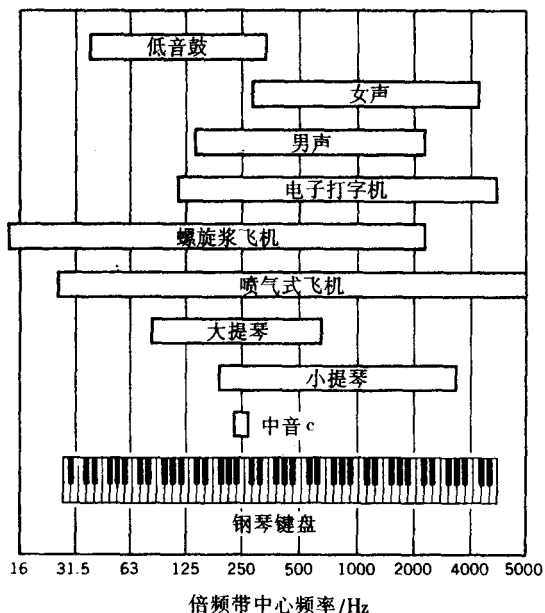


图 1.4 一些常见声音与钢琴键盘所示频率范围的比较 (选自建筑百科全书: 设计、工程及建筑, William J. Cavanaugh, "Acoustics-General Principles", Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons. 经 John Wiley & Sons 同意再版。)



图 1.5 为了方便测量和分析, 将可听频率范围划分为标准倍频带和 1/3 倍频带。许多建筑组成部分的实验室测量标准声学性能频带的中心频率在 100 ~ 4000Hz 范围之内。(选自建筑百科全书: 设计、工程及建筑, William J. Cavanaugh, "Acoustics-General Principles", Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons. 经 John Wiley & Sons 同意再版。)

声音的强度

除了声音的特性（比如频率）之外，声波中包含的声学能量的强度级别也是人们所关心的问题。声音的强度是与在未干扰气压（参见图 1.2）上下的压力扰动振幅成比例的。上下空气压力的波动可能很小，但人耳对声音的分辨率却很高，可以觉察小到 0.00000003psi 的声压差别。同时，人耳可以短期忍受类似喷气式发动机的轰鸣声，其强度可能为前者的 100 万倍，即 $3 \times 10^{-2}\text{psi}$ 。当人持续处于在这种强度的声音中时会导致听力的损伤。就像声音的频率可以在很宽范围内变化一样，定义声能尺度的强度或压力范围也跨越了一个很大的量级范围。由于范围很宽，就像人耳可以大概以对数方式感觉声音的强度一样，声级测量也采用基于对数形式的测量单位——分贝。分贝单位简写为 dB。

分贝标度

分贝标度从 0 开始，有一些可选择的参考值和比较值，以便对要测量的值进行强度或压力的比较。对于声压级测量，选择 0.00002 牛顿/平方米 ($2 \times 10^{-5}\text{ N/m}^2$) 为参考值，这是一个健康年轻人听力的极限。任何用分贝表示的声压级均由下式表示：

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

上式中， L_p = 声压级分贝数 (dB)

p = 要测量的声压

p_0 = 基准声压，通常采用 $2 \times 10^{-5}\text{ N/m}^2$ （一些早期的文献或出版物可能使用参考值为 0.0002 mbar 或是 $2 \times 10^{-4}\text{ dyn/cm}^2$ ）

幸运的是，现在使用声学仪器可以直接测出分贝值。但是，由于这是个基本的对数刻度计，因此在与本章后面所讨论的分贝单元相结合时需要注意一些地方，认识到这一点是很重要的。

图 1.6 表示了一个普通声音的“声学计”和声压测量仪（磅/平方英寸 (psi)，根据声压级，用 dB 表示）的比较。在处理这种比人耳可听范围更宽的多个数量级声音问题时，使用分贝标度，就可以压缩这个范围，显然就方便了许多。图 1.6 中还给出了相关的主观性描述——正常听者可能对不同声压级的反应，从“非常微弱”（低于 20dBA ）到“令人感到痛苦”（大于

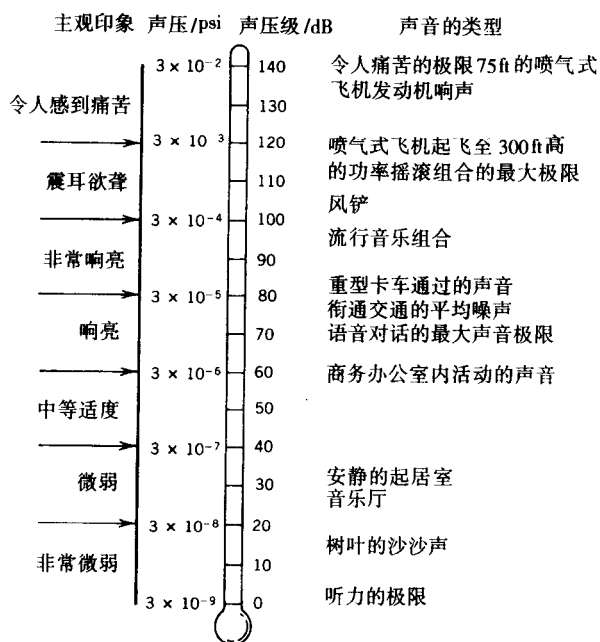
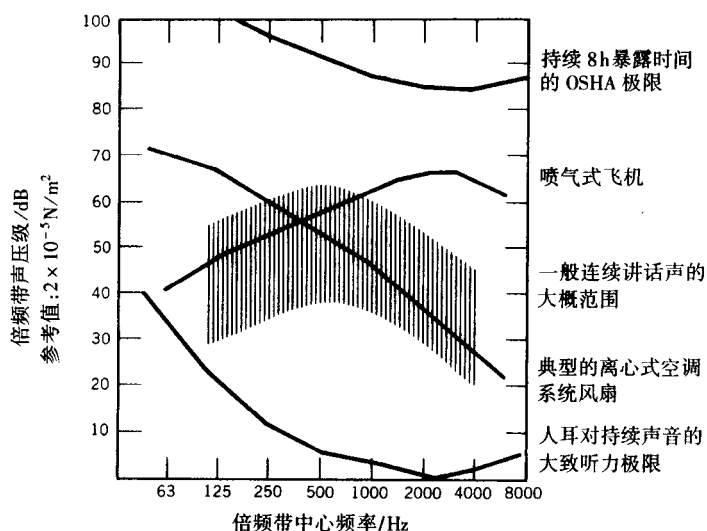


图 1.6 声学计示意图。比较声学标准中使用的声压数量级（单位： lb/in^2 ）和等价的对数表示值（单位：dB）（选自建筑百科全书：设计、工程及建筑，William J. Cavanaugh, “Acoustics--General Principles”, Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons, 经 John Wiley & Sons 同意再版。）

正常听者可能对不同声压级的反应，从“非常微弱”（低于 20dBA ）到“令人感到痛苦”（大于

120dBA)。

图 1.7 则表示一般声音的 3 个倍频带频谱与人耳听力上、下限的比较。例如, 相对于中频和低频范围, 空调频谱中包含了大量低频声音, 所以人们可以听到“隆隆”的响声。另一方面, 一架喷气式飞机则恰恰相反, 主要产生高频声能。人们的讲话声不仅覆盖了一个比较宽的频率范围, 而且在连续的讲话过程中该范围同时会随时间有所波动。讲话时产生的最低与最高声级波动范围大约为 30dB。



幸运的是, 在许多建筑声学问题中不必处理涉及到的全部频率范围的声学问题。对一类声源, 当已知频率特性并且有可重复性的或为常数、简单单个数的声级值可能就足够了。图 1.8 表明对不同交通噪声声源简单声级等价的典型倍频带谱。在过去的几十年中, 国际和国内相关部门已经积累了大量的飞机、火车、高速公路等传播声源及其他环境声音的测量值。例如图 1.8 中给出的汽车、飞机、卡车声级谱, 由美国环

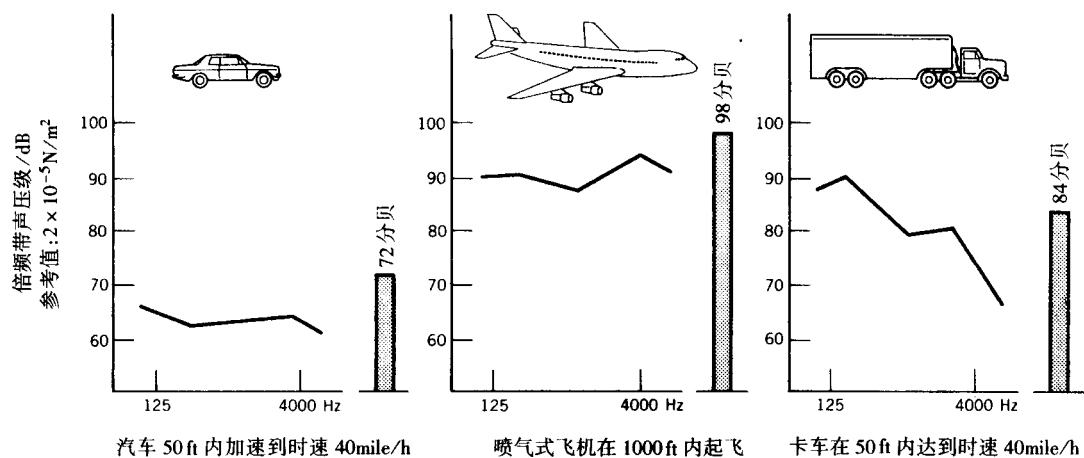


图 1.8 常见外部噪声由声源传输的声级示意图举例 (选自建筑百科全书: 设计、工程及建筑, William J. Cavanaugh, "Acoustics--General Principles", Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons. 经 John Wiley & Sons 同意再版。)

境保护机构提供。在第3章中描述了建筑物外部封闭墙壁、窗户和屋顶等的声学设计中这些数据的应用。

“简单”频率——计权声级

人耳并非仅仅将整个听力范围的所有声能简单地加起来成为一个声音，而且将该值解释为声音的响度。人耳能分辨出低频（例如，计权或忽略某些低频的声能）。一个已知的中频和低频范围的声级会显得比低频的相同声级更响。声压表上都会有电子过滤或“计权网络”装置，考虑到人耳的这一特性，就能很好地体现人类对音频的反应，以最少的差异直接读出接近人耳判断的相关声音响度的声级值。

图1.9说明了一个声源谱在全频范围内的测量值及转换成的单一数值。通常标准声压表使用两个频率计权：C计权和A计权。C计权本质上近似平坦；所有的声能求和转换成一个全面值。频率计权网络使用的分贝C计权指数通常记作dBC。A刻度网络对应人耳对声音响度的反应，就像人的耳朵一样，过滤或是忽略低频声音，从表上可以直接读出计权声级的值。A分贝刻度表示的声级在实际应用中是最普遍、最有用的描述方法，许多建筑物中遇到的声音问题都用dBA表示。当已知噪声声源相关的频率时，这些数据对简要分析许多问题和详述简单声音测试已经足够了。图1.10给出了使用A频计权标准声级时许多通常的内部、外部声源范围。例如，在一个安静的居住环境中预期的声级大约在30~50dBA范围内。但是，在典型的工厂环境中，工人工作在60~100dBA噪声中。

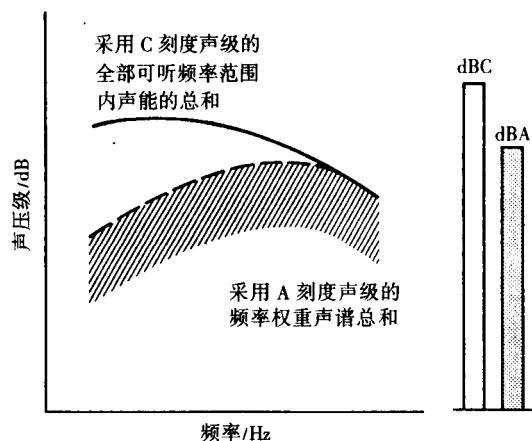


图1.9 标准声级计的计权特性，采用简单、常用的全面声级（dBA表示经过A计权的声级分贝值，dBC是使用C刻度，或者说是本质上近似平坦的频率计权）（选自建筑百科全书：设计、工程及建筑，William J. Cavannaugh, “Acoustics—General Principles”, Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons. 经 John Wiley & Sons 同意再版。）

随时间变化的声级

不管是在遥远宁静的乡村，还是在高度发达的城镇。室内和室外环境声级经常会随着时间的变化而变化。对这种随时间变化的声音，比如说受天气的影响，没有什么单一的、简单方便的度量标准去完全地描述声能所表现的质量和数量。

如图1.11所示的美国环境保护机构报告是选取在安静的郊外街道、一个普通的下午、在10min的时间里测得的有代表性的户外声音。当一辆跑车经过附近街道的瞬间，声级达到最大，为73dBA。在这10min的取样时间中，普遍的最低声级，也就是说超过取样90%的时间，大约是44dBA。这是参考90%噪音分布值 L_{90} 。噪音分布值为1（ L_1 ）是指在取样观测时间内只有1%的音量超过某标准，通常用来代表取样观测时间内的预期最大声级（在此取

样中, 10min 的 1% 为 6 秒)。

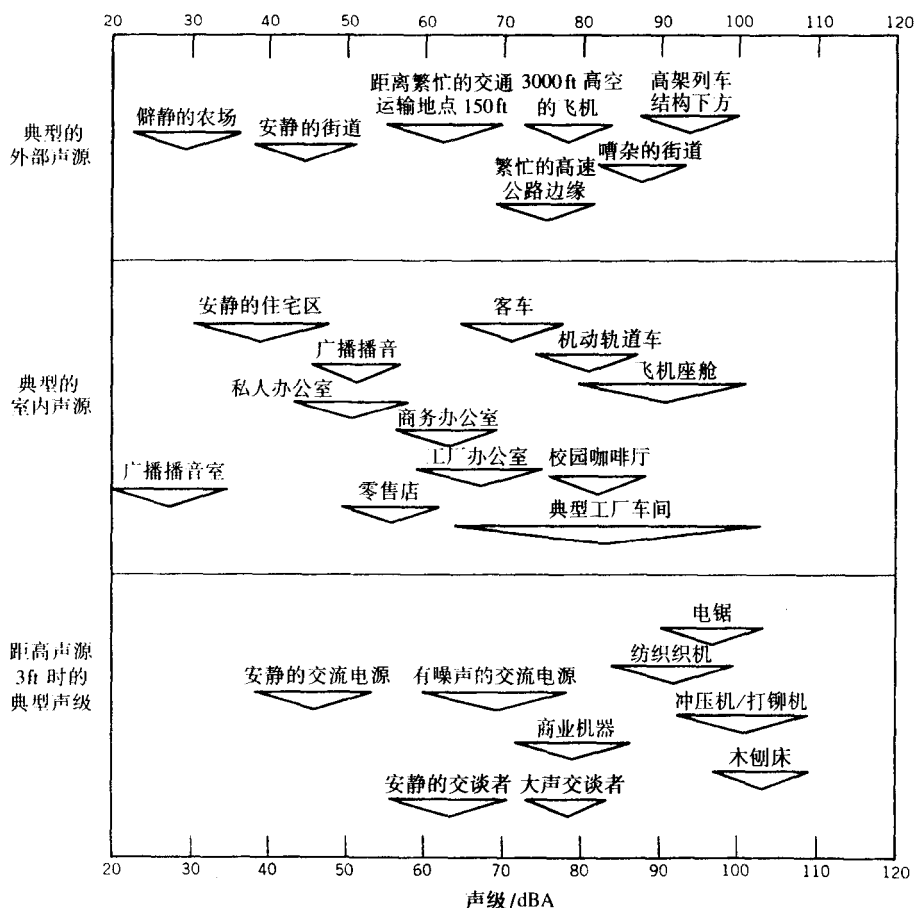


图 1.10 经过 A 刻度频率计权的普通室内外声源的声级范围, 单位为 dB。(选自建筑百科全书: 设计、工程及建筑, William J. Cavanaugh, "Acoustics-General Principles", Joseph A. Wilkes, Ed. 版权 © 1988 John Wiley Sons, 经 John Wiley & Sons 同意再版。)

很显然, 如上所述, 大多数像图 1.11 中表明的户外声音都必须使用统计结果来恰当地描述声音环境。确实, 许多简单的、绝对限制的社会噪声标准定义得并不确切, 这样不仅难以进行评估, 而且促使许多噪声法规无法执行或是被忽略。不切实际地一味要求低噪声标准以致于常常没办法实际执行, 因为这样的话, 即使许多很普遍的活动引起的声音都会超标。总之, 任意地限制低噪声值并不合理, 最终也会被置之不理。

近几十年来, 正如 1970 年的美国环境保护法案所要求的, 所有的联邦政府都提出了要发展环境标准, 而且, 由于现在精细的声音测量仪器的适用性, 在测量和评价声音随时间变化的时候可以使用更有意义、更直接方便的公制能量等效声级 (L_{eq})。 L_{eq} 是一个假定的等效稳固声级, 它包含在一个实际的随时间变化的声音采样在一段给定的时间内所有的声能。例如如图 1.11 中对应的 L_{eq} 值应为 58dBA。因此, L_{eq} 值更准确地表现了波动的声音在观测时间段内的实际声能。叙述时必须指出观测的时间。仅仅使用 L_{eq} 来描述声音是不够的, 还必须指