

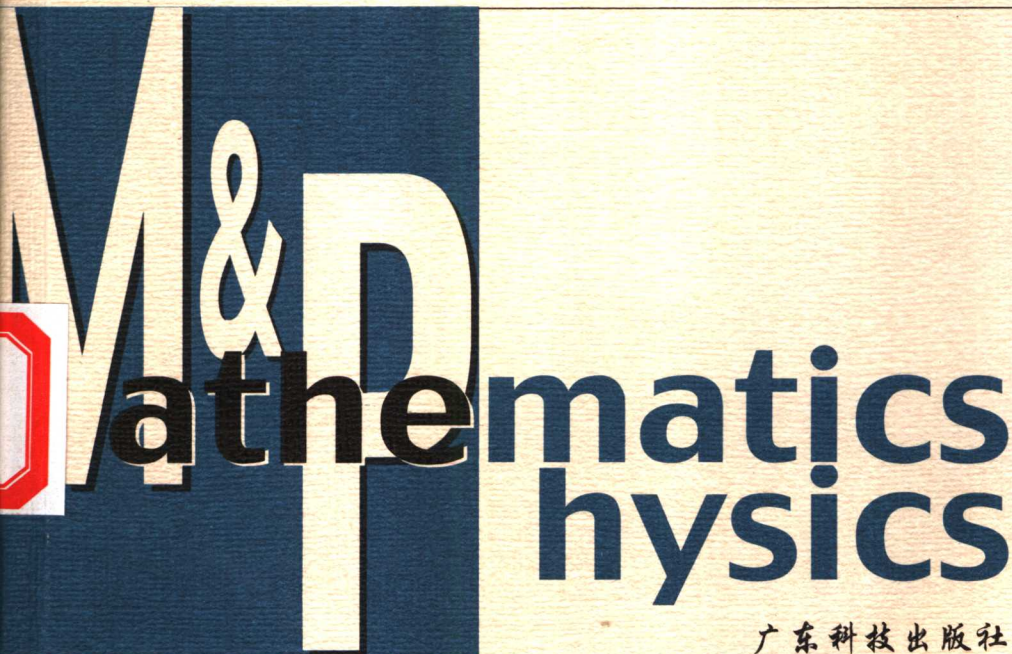


国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



室内声学与环境声学

吴硕贤 赵越喆 著



广东科技出版社

国家自然科学基金研究专著

室内声学与环境声学

吴硕贤 赵越喆 著

广东科技出版社

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

室内声学与环境声学 / 吴硕贤, 赵越喆著. —广州: 广东科技出版社, 2003.11

ISBN 7-5359-2041-1

I. 室… II. ①吴…②赵… III. ①室内声学②环境声学
IV. ①TU112②X121

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 105121 号

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮码: 510075)

E-mail: gdkjzbb@21cn.com

http://www.gdstp.com.cn

经 销: 广东新华发行集团

排 版: 广东科电有限公司

印 刷: 广东省佛山市新粤中印刷公司

(广东省佛山市普澜公路石头乡 邮码: 528041)

规 格: 787mm×1092mm 1/16 印张 12.5 插页 1 字数 250 千

版 次: 2003 年 11 月第 1 版

2003 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

如发现因印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

本书承

国家自然科学基金研究成果

专著出版基金资助出版

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

内 容 提 要

本书论述室内波动声学、几何声学与统计声学的基本原理，重点论述室内声场的计算机仿真及数值计算，包括三维声线跟踪模型、界面声能扩散系数的测量与计算原理、室内声场的有限元计算、音质可听化与仿真软件、厅堂音质评价指标及方法、响度评价与预测方法，以及用统计能量分析法计算隔声量等。环境声学部分重点论述声波在户外的传播以及交通噪声预报理论。

本书理论性、系统性强，推导详细，叙述清晰，其中反映出作者的科研成果和学科前沿，可供建筑、声学、音像制作、环保等部门的本科生、研究生及有关专业研究和工程技术人员阅读。

前言

建筑环境声学是声学与建筑学、环境科学相交叉的新兴边缘学科。在新世纪,这门学科正日益显示其生命力与重要性。

声学是一门既古老又年轻的科学。声学的重要性是不言而喻的,因为它与人类最重要的感觉器官之一——耳朵息息相关,同时与人类的发音器官——喉与口也息息相关。也正因为如此,西方学者预言,声学将是21世纪最有发展前途的学科之一。

说声学古老,是因为与声学有关的音乐和语言,其历史几乎与人类的历史一样悠久,而音乐和语言都是以声波为载体,以引起听觉为信息接受渠道的。早在人类发明文字,能通过眼睛阅读来传授文化、思想和知识之前,听觉就担负起文化传承的历史重任。

当今的考古发现,不断证实了人类早在新石器时代晚期,就已发明、使用了多种乐器。如我国在山西襄汾陶寺中原龙山文化墓地出土了木框鼙鼓和多例特磬,在陕西华县井家堡和山东莒县陵阳河等地新石器晚期墓葬出土了陶制号角,在浙江余姚河姆渡等新石器时代遗址出土了管哨、角哨等。近年又在河南舞阳距今近8000年的贾湖遗址出土一批(16件)骨笛,各开有5~8个音孔,能发出多种声调的乐音。世界其他国家也有类似的发现。正如德国学者格罗塞在《艺术的起源》一书中所说的,“音乐创造了听取的形式,创造了在自然界里没有原型,而且离开音乐也不能存在的声音的连接和结合。”^[1]上述考古发现充分证实,人类早在远古时期对声学就有了一定的认识,并高度发展了“听”的艺术。

著名的美国学者布尔斯廷在《创造者》和《发明者》等书中都说到,古代文化多半是通过声音传达的。以犹太民族为例,其创世纪即以“太初有道”起句。“道”字在原始西伯莱文中就含有音响之意。荷马史诗《伊利亚特》和《奥德赛》,早在希腊文明形成前数世纪就已产生。因此,荷马史诗也必然是一种口头创作,是在一个没有文字的时代,由游唱艺人集体创作、流传和记忆的产物。英国法学家威廉·布莱克斯通爵士早在1765年就说过:“过去在整个西方世界,都非常不通文学知识,文学完全凭口头传授,就由于这个很简单的原因,凡有文学流行的国家,都几乎没有书写的观念。”^[2]

古代中国的情形更是如此,正如哈佛大学杜维明教授所谈到的,古代中国尤其重视听觉在文化传承中的作用。^[3]古人崇奉圣贤,而“圣”字(繁体字为“聖”),即以耳为根,以口为本。孔子曾陶醉于雅乐之中,以至三月不知肉味。他又自称“六

[1]格罗塞.艺术的起源.蔡慕晖译.北京:商务印书馆,1987

[2]丹尼尔·丁·布尔斯廷.发现者.上海:上海译文出版社,1995

[3]杜维明.一阳来复.陈引驰编.上海:上海文艺出版社,1997

十而耳顺”，足见“听德”在儒学中的地位。荀子也言“以学心听”，朱熹则说“声入心通”，无不说明听觉和声学在文化传承中的主要作用。佛教也如此，佛祖菩萨的塑像，耳垂都非常长。“观音”虽是音译，但特别用“音”字，也是有讲究的，说明佛教对听觉的重视。在中国古代文学史上，说唱艺术长期以来占据着重要的位置，宋词、元曲都与说唱艺术有关，话本、章回小说更主要是以说书的形式在民间传播。

人类历史上是先有语言，后有文字。人类优于其他动物的显著长处之一是人类的喉、舌等发音器官很发达，能发出很复杂的声音，包括语言声和歌声。其他动物就逊色得多。例如猿就只能发出简单的声音，只能啼，所谓“两岸猿声啼不住”，用啼字就很准确。当然人类的肢体语言也很丰富，能做出很复杂的动作。同时，人类在长期进化过程中，其听觉器官与发音器官相适应，协调发展，使人类的听觉，对语言和音乐的主要频谱范围内的声音反应与辨析能力特别强。人类早就意识到自身的这些长处，因此很早就发展了音乐、绘画和舞蹈的艺术，并以语言作为最重要的信息交流方式。文字的起源也与声音有关。文字起源于图画和谐音。西方的古文字通常拆成几个音，每个音用画得出的物件代表，把这几幅画连贯起来就成了一个字。如鱼胶 (isinglass)，可先画一只眼睛 (eye, 与I谐音)，次画一个人张开嘴唱歌 (sing)，再画一只酒杯 (glass)。阿兹台克人就是用声音符号表现文字。古代巴比伦、古代埃及、古代中国也以谐音作为重要的文字创造法则。埃及、巴比伦的文字在公元前4000~公元前3000年间发展起来。埃及的古文字先从象形图画开始，后应用谐音法发展为拼音文字，是双管齐下。中国文字大约在公元前2500年出现。中国文字也应用谐音法（六书有假借、谐音之说）。如“来”字，音lai，与“麦”字同音，故形近。再如方块、城坊、纺织等，全都含有方块的象形，就以fang为发音基础，再配以象形偏旁来区别。又如“工”字，也是一种发音标记，由此生出“江、缸”等文字，均以“工”为主音变化而来。从图画文字进步到声音文字，是人类的谐音游戏促成的发明。因此，美国著名人类学者罗伯特·路威认为“谐音是诙谐之下乘，然而高等文明之始基。……真正的文字起始于图画谐音。”^[1]

自从文字发明以来，特别是印刷术的普及，渐使人类听的艺术一度有所衰退。近代工业化的结果，又使人类的居住环境充满了噪声的干扰。人类的耳根渐渐不那么清静。然而这种情况近来已有了较大的变化。信息技术革命正在使人类重新重视听觉的艺术，重视声波作为信息传输的主要媒介之一的作用。多媒体、长途电话、

[1] 罗伯特·路威. 文明与野蛮. 吕叔湘译. 北京: 三联书店, 1984

国际互联网、高保真音响、家庭影院、声卡等事物正大步迈入寻常百姓家。人们对噪声控制、对良好声学环境的要求越来越高，对高质量视听节目的欣赏正在成为新的时尚。这些要求极大地推动了建筑环境声学这门重要学科的发展。也正是在这一意义上，我们说声学，尤其是室内声学与环境声学，是一门年轻、方兴未艾的科学。

在思维、意图等信息的表达与交流中，语言（诉诸听觉）比文字（诉诸视觉）自有其优越之处。它更自然，更本能，更随意和更具即时性，因此也更方便，并且声波传播距离远、穿透力强。这也就是为什么在动物世界，多以声音作为信息交流的主要方式的原因（其他方式还有诉诸嗅觉的气味，诉诸视觉的表情、形体动作及颜色变换等）。这也就是为什么如前所述，在人类历史上很长的一段时期内，声音和听觉在文化遗产中起主要作用的原因。声音与听觉在信息交流中的这些优势，至今仍然起作用。这也就是为什么在今天，许多人宁可用电话交谈，而懒于通信联系的原因。也是今天许多人乐于观看电影、电视剧、收听广播剧等音像节目，而懒于阅读小说、剧本的原因（当然阅读的作用和阅读享受是不可能由其他方式所完全替代的）。也正由于此，我们可以预言，在新的世纪，声学将有更大的发展，并在文化遗产与科技发展中起着更重要的作用。

建筑声学自从 W.C.赛宾于 1900 年奠定其科学基础算起，不过百年历史。环境声学更是只有半个世纪的“年龄”。然而 20 世纪 60 年代以来，这门学科有了长足的进展。新理论、新方法层出不穷。我国学者在这一领域也做出了不少贡献。我本人从 80 年代初起，便在吴良镛、马大猷院士和张昌龄教授的指导下，从事建筑环境声学的研究。我的博士论文就是关于城市交通噪声预报理论和防噪规划的研究。80 年代末至 90 年代初，我先后在悉尼大学和因斯布鲁克大学继续这方面的研究。回国后，又主持国家自然科学基金《新型声场计算机仿真模型研究》、浙江省自然科学基金《三维声线随机跟踪模型及其在噪声控制中的应用》以及广东省自然科学基金《观演建筑音质响度指标研究》的课题研究。我所指导的几位研究生：葛坚博士、张继萍博士、赵越喆博士和李青梅硕士等，也都从事这方面的研究。这些年来，我本人独立或与奥地利 E.Kittinger 教授以及上述几位研究生合作，在《美国声学学会志》、德国《声学》杂志、英国《应用声学》和《声与振动学报》，以及中国《声学学报》、《建筑学报》、《环境科学学报》等学刊发表了多篇论文。我们提出或发展了声学虚边界原理及混响场车流噪声预报公式、用模糊集理论评价厅堂音质的方法、

音质响度评价新指标及其计算方法、室内声线三维随机跟踪模型、界面声散射仿真与声能散射系数的计算和实验方法,以及室内声场有限元计算方法等具有创新性的成果。正是这些工作,奠定了本书的基础。

为了总结我们在国家自然科学基金及广东省自然科学基金资助下所取得的研究成果,反映室内声学与环境声学学科的新进展,我决定撰写此书。我的学生赵越喆博士应邀协助本书的写作,并承担了本书若干章节的撰写工作。

本书以我们的自然科学基金研究成果为主要内容,但为了较系统、全面地反映室内声学与环境声学学科发展的全貌,便于读者理解和阅读,本书的章节安排顾及逻辑性和循序渐进性,对相关的学科基础理论,也安排一定篇幅予以介绍。对重要公式,都尽量给出详细的推导。这在其他同类书籍中往往付诸阙如。本书还较充分地反映了学科的国际前沿动态,诸如声场计算机仿真、数值计算、音质评价、交通噪声预报、统计能量分析、声场可听化以及声波在户外的传播理论等,在本书中都有较清晰和系统的论述与介绍。

本书获国家自然科学基金委员会研究成果专著出版基金的资助,由广东科技出版社出版。在此,我们对国家自然科学基金委员会和广东科技出版社表示衷心的感谢!

本书由吴硕贤拟定编写大纲,并撰写第一、二、三、八、九、十、十一章,由赵越喆撰写其余各章。全书由吴硕贤审定。由于作者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,期待读者不吝指正。

华南理工大学 吴硕贤

2003年7月

目录

第一章 声波的基本性质和基本声学量	1
第一节 声波的概念	3
第二节 声信号	4
第三节 傅里叶变换	6
一、傅里叶变换	6
二、傅里叶变换的若干特性	7
第四节 声的波动方程	9
一、运动方程	10
二、连续性方程	11
三、物态方程	11
四、波动方程	12
五、波动方程的解	13
六、速度势	14
第五节 平面波	15
一、亥姆霍兹方程	15
二、平面波	15
第六节 球面波	16
第七节 声场中的能量关系	18
一、声能量与声能密度	18
二、声阻抗率	19
三、平面波声场中的声能量	19
四、声功率与声强	19
五、球面波声场中的声强与声功率	20
第八节 声压级、声强级及声功率级	21
参考文献	22
第二章 室内声场的波动理论	23
第一节 作为线性系统的室内声场	25
一、线性系统	25

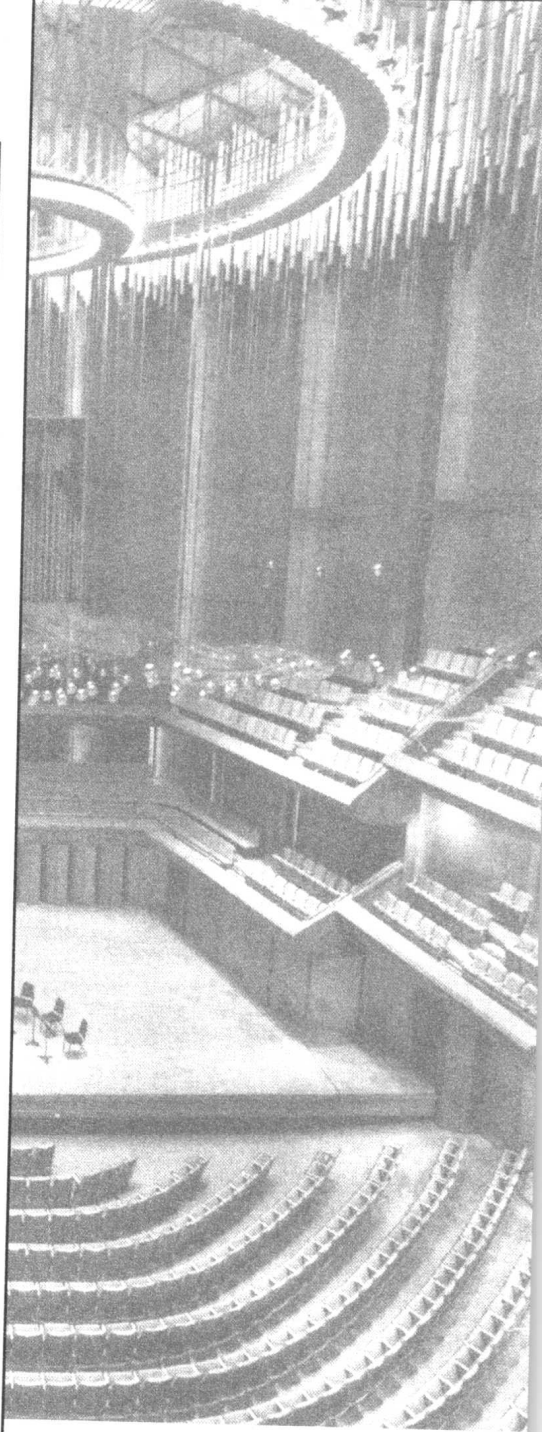
二、脉冲响应和传输函数	25
第二节 声波在界面上发生的现象	26
一、边界条件	26
二、声反射	27
三、边界前的驻波场	28
第三节 用波动声学处理室内声场	29
一、室内简正振动方式	29
二、简正频率分布	31
三、室内驻波的衰变	32
四、有源波动方程的形式解	36
五、室内稳态声场的混响时间	37
六、附录	39
参考文献	43
第三章 室内几何声学与统计声学	45
第一节 用几何声学处理室内声场	47
一、声线与虚声源的概念	47
二、虚声源链和镜像房间	48
三、由几何声学导出的脉冲响应与混响时间	50
第二节 用统计声学处理室内声场	51
一、扩散声场	51
二、平均自由程	52
三、扩散声场的稳态声能密度	53
四、总稳态声压级	55
五、混响时间计算公式	56
参考文献	57
第四章 基于几何声学的室内声场计算机仿真方法	59
第一节 声线跟踪法	61
一、声线的产生	61
二、声线与界面交点的计算和交点的判别	65

三、声线的反射与散射	67
四、声线跟踪的截止	75
五、跟踪结果的记录	76
六、基于概率分析的室内声场三维声线随机跟踪模拟的基本流程	77
第二节 虚声源法	78
参考文献	79
第五章 应用声有限元素法模拟室内声场	81
第一节 室内声场有限元基本方程	83
一、用加权残数法建立室内声场有限元基本方程	83
二、刚性及小阻尼界面条件下室内声场有限元基本方程	85
第二节 室内声传输函数的有限元计算模型	87
一、刚性房间声传输函数的有限元计算模型	87
二、小阻尼界面房间声传输函数的有限元计算模型	88
第三节 室内声脉冲响应函数的有限元计算模型	90
一、刚性房间声脉冲响应函数的有限元计算模型	90
二、小阻尼界面房间声脉冲响应函数的有限元计算模型	91
第四节 刚性房间的简正频率和简正模式	92
第五节 耦合房间声场的简正特性分析	94
参考文献	98
第六章 厅堂音质可听化技术与仿真软件	99
第一节 厅堂音质可听化模拟的基本原理	101
第二节 实现厅堂音质可听化的基本方法	103
第三节 声信号的重发	105
第四节 可听化中的技术问题	107
第五节 ODEON 可听化软件简介及应用	109
一、ODEON 可听化软件简介	109
二、人民大会堂音质改造三维计算机仿真	111
参考文献	113
第七章 相关法测量界面声能扩散系数	115

第一节	相关法测量界面声能扩散系数的原理	117
第二节	相关法测量界面声能扩散系数的理论推导	118
	参考文献	124
第八章	厅堂音质评价	125
第一节	概述	127
第二节	音质评价物理指标	128
一、	混响时间和早期衰变时间	128
二、	清晰度与语言传输函数	129
三、	侧向声能因子与双耳互相关系数	130
四、	混响时间或早期衰变时间的频率特性	131
五、	强度指数及齐奏强音标志乐段的平均声压级	131
第三节	音质主观评价及其与物理指标的关系	134
一、	丰满度与清晰度	134
二、	响度	135
三、	空间感	135
四、	音色	136
第四节	厅堂音质综合评价	136
一、	音质主观综合评价	136
二、	音质客观综合评价	137
	参考文献	142
第九章	统计能量分析及墙板隔声量计算	143
第一节	概述	145
第二节	双耦合系统	145
一、	功率流平衡方程式	145
二、	板的辐射阻	146
三、	板与混响室的耦合因子	147
第三节	单墙隔声的 SEA 模型	148
一、	功率流平衡方程式	148
二、	嵌于两室之间的板的辐射阻	148

三、嵌于两室之间的板的耦合因子	149
四、声传输和板的响应	149
第四节 一般化的墙隔声 SEA 模型	152
一、推广的墙隔声 SEA 方程组	152
二、SEA 参数的赋值	153
参考文献	155
第十章 声波在户外的传播	157
第一节 球面波和柱面波的几何衰减	159
第二节 地面声效应	160
一、平面声波从地面的反射	160
二、非平面声波从地面的反射	161
三、直达声和反射声的干涉	162
四、底波 (ground wave)	163
五、地面声阻抗	164
六、声表面波	166
第三节 微气象和地形对声传播的影响	167
一、大气条件引起的声折射	167
二、由不平坦的地面引起的声折射	168
参考文献	169
第十一章 交通噪声预报理论	171
第一节 线声源模型	173
第二节 同车种等间距模型	174
第三节 随机车流模型	176
一、单车种单车道随机车流模型	176
二、多车道多车种场合的考虑	179
第四节 混响场车流噪声模型	180
一、虚边界原理与虚墙概念	180
二、混响场等间距车流噪声模型	180
第五节 交通噪声的计算机仿真	182
第六节 考虑声散射的街道交通噪声预报模型	183
参考文献	187
附图	188

第一章 声波的基本性质和 基本声学量





第一节 声波的概念

声音是一种机械波，是由声源的振动所引起的在弹性介质中以振动的形式传播的机械振动。弹性介质可以是气体、液体或固体。在建筑与环境声学中，主要涉及声音在空气中的传播。一般在计算时，声音在空气中的声速 c 可取 340m/s (15°C 值)。

声波的频率是指一秒钟内介质质点完成的全振动的次数，用 f 表示，单位是赫[兹] (Hz)。频率的倒数，即质点完成一次全振动所需的时间称为周期，用 T 表示，单位是秒 (s)。

在声波传播途径上，两相邻同位相质点之间的距离称为波长，用 λ 表示，单位是米 (m)。

声速 c 、波长 λ 和频率之间有如下关系：

$$\lambda = c/f \quad (1-1)$$

由上式可计算出各频率声波的波长。在建筑与环境声学中，感兴趣的声频率通常为 $63 \sim 10\,000\text{Hz}$ ，相应的波长为 $5.4 \sim 0.34\text{m}$ 。

声速与振动的特性无关，仅取决于介质的弹性密度及温度。空气中的声速可表示为

$$c = \sqrt{\frac{rP_0}{\rho_0}} \quad (1-2)$$

若气体为理想气体，则有：

$$c = \sqrt{\frac{r}{M}RT} \quad (1-3)$$

式中， ρ_0 为介质静态密度 (kg/m^3)； P_0 为介质中的静压强 (Pa)； r 为比热比 ($r = \text{定压比热}/\text{定容比热}$)； M 为气体介质分子质量； T 为绝对温度 (K)； R 为摩尔气体常数，等于 $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

空气的 $r = 1.4$ ，故对于空气，由式 (1-3) 可知：

$$c = 20.05\sqrt{T} \quad \text{或} \quad c = 331.45 + 0.61t \quad (1-4)$$

式中， t 为摄氏温度 ($^\circ\text{C}$)。

在声波的传播过程中，介质中各点产生稠密和稀疏的交替变化，因而各点的压强也相应变化。假设在没有声波作用时，介质中的静压强为 P_0 ，当有声波作用时，介质中的压强为 p' ，则压强的改变量 ($p' - P_0$) 称为声压，即

$$p = p' - P_0 \quad (1-5)$$

声压的单位是帕 (Pa)。介质中任一点的声压都是随时间变化的。每一时刻的声压称为瞬时声压。某段时间内瞬时声压的均方根值称为有效声压，即

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1-6)$$

对于简谐声波，有效声压等于瞬时声压峰值除以 $\sqrt{2}$ ，即