

CHENGSHI BIANDIANZHAN
ZAOSHENG KONGZHI JISHU

城市变电站 噪声控制技术

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

CHENGSHI BIANDIANZHAN
ZAOSHENG KONGZHI JISHU

城市变电站 噪声控制技术

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着城市化进程的不断深入,在电力分配环节,城市变电站的降噪成为亟待解决的突出问题。

本书首先介绍城市变电站噪声源及其特性,然后从变电站噪声测量技术理论与方法、噪声治理技术理论、常用噪声控制方法进行阐述,引入变电站品质概念并对变电站噪声品质进行分析,最后介绍城市变电站噪声控制典型案例,从理论到实践给出了城市变电站噪声控制的方法和途径。

本书适合变电站噪声治理设计和施工人员、电网环评人员、电网环验收人员及电网环保管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

城市变电站噪声控制技术 / 《城市变电站噪声控制技术》编委会编. —北京:中国电力出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5198-1308-6

I. ①城… II. ①城… III. ①变电所—噪声控制—研究 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 259806 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:刘 薇

责任校对:闫秀英

装帧设计:郝晓燕

责任印制:邹树群

印 刷:北京大学印刷厂

版 次:2017 年 12 月第一版

印 次:2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本:710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张:11.75

字 数:191 千字

印 数:0001—1000 册

定 价:50.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

本书编委会

主 编 王忠强

副 主 编 高东学 寇晓迢 张劲光 王小鹏

编写人员 张嵩阳 聂京凯 钱诗林 赵发平 余彦杰

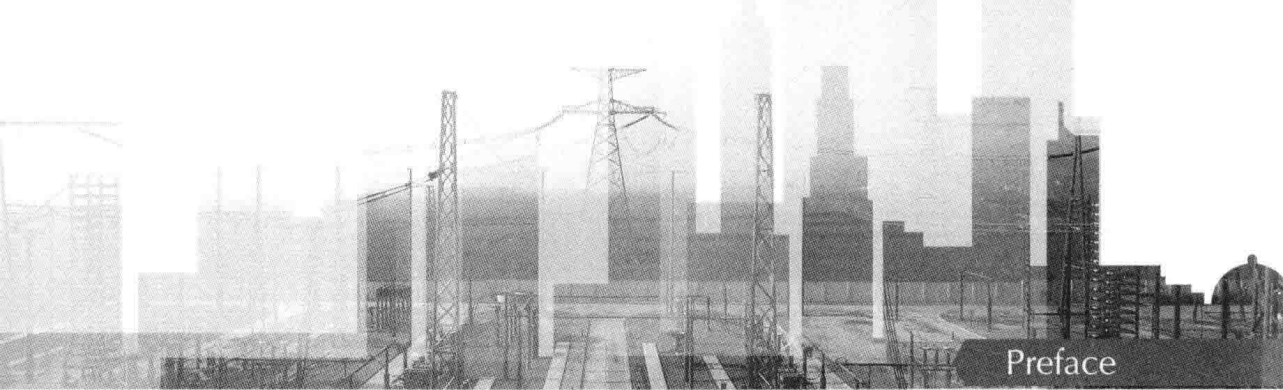
陈 新 姚德贵 田 一 樊越甫 吕中宾

韩 钰 柯昌麟 刘莘昱 李 尊 周显达

张 远 王广周 郭 星 王 飞 李晓东

刘 强 吴 豫 孙才华 张光明 陈豪然

李海峰 李 媛 王 博



Preface

前 言

随着城市化进程的不断深入,电力系统相关设施与城市的结合愈发紧密。这就要求电力设施能够尽可能地减小对周边环境的影响,而城市变电站的降噪就成为了亟待解决的突出问题。

本书根据编者对河南省电网在运变电站的系统调研分析,结合其中具有代表性变电站的主要设备噪声数据,在充分研究变电站的通用设计和所分析变电站实际结构的基础上,利用理论计算、仿真分析、现场试验等多种手段,提出了变电站噪声控制的可行方案。本书系统地介绍了变电站噪声控制的相关知识,完整地展示了分析计算的过程,为城市变电站的系统化模块化降噪提供了参考。

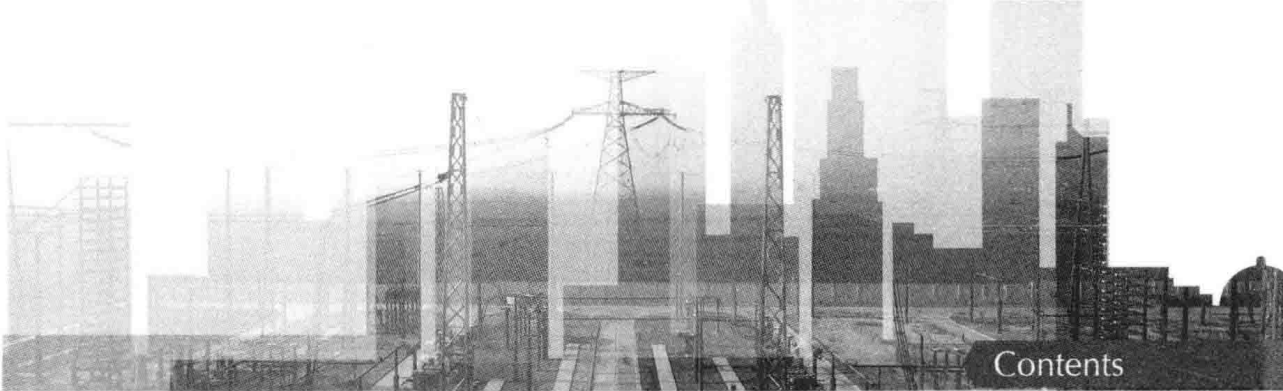
全书共分为七个部分:第一章概述,是对本书背景作简要说明,并介绍噪声的危害、评价和控制标准以及噪声控制的基本知识;第二章城市变电站内主要噪声源及其特性,分析变电站内变压器、电抗器、电容器以及其他噪声源的产生机理及噪声特性;第三章城市变电站噪声测试与频谱特性,介绍变电站噪声测试的相关过程,并对噪声数据进行频谱特性分析;第四章城市变电站噪声治理,介绍常用降噪技术和城市变电站噪声治理流程,变电站降噪方案设计与评估过程,以及工程方案编制实施及验收和设备的维护、保养与检测;第五章变电站常用降噪设施,概要介绍隔声结构、吸声结构、消声结构和隔振装置等;第六章城市变电站声品质分析,从基础知识、人工头声音采集及回放系统、声品质的评价方法、城市变电站噪声的声品质客观评价等方面对变电站声品质进行分析;第七章城市

变电站噪声控制典型案例，介绍 10kV 全户内配电站、110kV 全户内变电站及半户内变电站三个噪声控制典型案例。

由于编者的水平有限，加之时间仓促，书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 8 月



目 录

前言

1 概述	1
1.1 城市变电站的组成及分布	1
1.2 城市变电站噪声的危害、评价和控制标准	3
1.3 噪声控制基本知识	7
参考文献	12
2 城市变电站内主要噪声源及其特性	14
2.1 变电站内主要噪声源	14
2.2 变压器噪声产生机理及特性分析	15
2.3 电抗器噪声产生机理及特性分析	25
2.4 电容器噪声产生机理及特性分析	28
2.5 其他噪声源及特性分析	32
参考文献	34
3 城市变电站噪声测试与频谱特性	35
3.1 噪声测量系统	35
3.2 声环境调查与监测	42
3.3 不同类型变电站测试方法	47
3.4 变电站噪声频谱特性	50
3.5 噪声指向特性分析	57
3.6 噪声传播衰减特性分析	60

参考文献	64
4 城市变电站噪声治理	65
4.1 常用降噪技术	65
4.2 城市变电站噪声治理流程	81
4.3 变电站降噪方案设计与评估	85
4.4 工程方案编制实施及验收	91
4.5 设备的维护、保养与检测	93
参考文献	93
5 变电站常用降噪设施	95
5.1 隔声结构	95
5.2 吸声结构	103
5.3 消声结构	110
5.4 隔振装置	118
参考文献	123
6 城市变电站声品质分析	124
6.1 声品质基础	124
6.2 人工头声音采集及回放系统	135
6.3 声品质的评价方法	139
6.4 城市变电站噪声的声品质客观评价	149
参考文献	155
7 城市变电站噪声控制典型案例	157
7.1 全户内变电站噪声控制典型案例	157
7.2 半户内变电站噪声控制典型案例	168
 附表 A 变电站隔声模块的降噪量参考值 (dB)	175
附表 B 变电站吸声模块的降噪量参考值 (dB)	177
附表 C 变电站消声模块的降噪量参考值 (dB)	178

1 概 述

随着我国经济社会的快速发展,电力能源在国民生产中起到了日趋重要的作用。作为一类二次能源,电能具有清洁、高效等特点,但与此同时,电能开发与利用方面也存在消耗其他能源、占用土地资源(建设电厂、电站等)、产生噪声和电磁环境影响等一系列问题。如何在妥善使用电能的同时,发展资源节约、环境友好的电力产业,是摆在相关从业者面前的一道考题。在我国城镇化进程不断推进的大背景下,电力输配环节中的变电站噪声超标已经成了一个亟待解决的问题。

噪声污染如今已经同水污染、大气污染、固体废弃物污染一起,并称为当代社会四大污染。从物理学的定义而言,发声体振动频率、振幅无规律情况下发出的声音即为噪声;而从环保角度讲,各类场合中所不需要的声音均可称为噪声,其中变压器噪声通常以低频方式出现。

在人口密度高、产业密集度大的城市中,变电站所造成的噪声污染凸显。加之在大中型城市中,城市化进程加快,许多变电站旁新建了居民小区和商业区,由于土地资源紧张,新建变电站往往同其他民用、商用建筑相结合,使得噪声的影响扩大,变电站降噪的需求变得更加急迫。

1.1 城市变电站的组成及分布

按电压等级,变电站可分为 500、330、220、110、66、35kV 和 10kV 等,其中 220、110kV 变电站主要用于电厂相联结和区域范围供电。按变电站的建设形式,可分为户外式变电站、半户外式变电站、户内式变电站等类型。户外式是指将变电站的主变压器、高压配电装置置于户外,10kV 配电装置置于户内的建

设模式；半户外式是指将变电站的主变压器置于户外，高中压配电装置置于户内的建设模式。而在目前的大中型城市中，随着对于变电站节约用地、降低噪声、融合景观的考虑，户内式变电站成为首选。根据具体的建设方式，户内式变电站又分为独立式全户内变电站、与建筑物相结合建设的变电站和地下变电站等几类。

1.1.1 城市变电站的组成

城市变电站从工程实践的角度来说，由以下几个部分组成：

- (1) 主控制楼：主控室、休息室等。
- (2) 室外土建：设备构架、设备基础、站区道路、电缆沟等。
- (3) 一次设备：断路器、隔离开关、接地开关、变压器、母线等。
- (4) 二次设备：微机保护、微机测控、操作箱、自动装置等。
- (5) 电源系统：交流系统、直流系统、逆变电源等。
- (6) 通信系统：光端机、配线架等。
- (7) 环境系统：火灾自动报警、图像监视等。

变电站的主要设备包括变压器、开关设备、电抗器、电容器组、接地消弧装置、配电装置、冷却通风设备等。

1.1.2 城市变电站的分布

城市变电站的规划不仅要立足于电力供应的需要，同时也要与城市规划相结合。通常情况下，城市电网中变电站的规划包括选址和定容两个步骤。变电站站址的选择是在确保满足特定地区负荷需求的前提下，根据相关人员的经验以及特定的优化算法，寻找变电站的可能位置，并从中遴选投资和年运行费相对较小的一种方案，概括来说有以下原则：①选址靠近负荷中心；②与城市总体布局规划相契合；③考虑对周围环境和设施的影响；④便于布线；⑤满足防火、防地震灾害等需求。

在城市这种负荷相对集中的区域，一个 110kV 变电站的供电半径大约为 1.5km，超过这个范围，供电的质量就会显著下降。以上海市为例，其建成区面积约为 1563km²，电力系统设置 242 个编制单元。城区供电所需的城市变电站数量十分庞大，而在市中心等用电集中的区域，变电站的密度会更大。

1.2 城市变电站噪声的危害、评价和控制标准

1.2.1 噪声的危害

噪声作为一种影响广泛的环境污染形式，其危害表现在很多方面。其中最直接的危害便是对人体听力的损害。有研究显示，儿童若长期在 85dB 以上的噪声下生活，其耳聋比例可高达 5%。据有关部门统计，我国目前约有 1000 万人在超标噪声条件下工作，其中超过 1/10 患有不同程度的噪声性耳聋。值得注意的是，噪声性耳聋是不可治愈的。根据国际标准话组织（ISO）公布的数据，噪声性耳聋发病率同噪声暴露年限、等效 A 声级关系见表 1-1。

表 1-1 噪声性耳聋发病率同噪声暴露年限、等效 A 声级关系

等效连续 A 声级	统计资料	各噪声暴露年限的发病率									
dB(A)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
≤80	发病率 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	听力损伤者 (%)	1	2	3	5	7	10	14	21	33	50
85	发病率 (%)	0	1	3	5	6	7	8	9	10	7
	听力损伤者 (%)	1	3	6	10	13	17	22	30	43	57
90	发病率 (%)	0	4	10	14	16	16	18	20	21	15
	听力损伤者 (%)	1	6	13	19	23	26	32	41	54	65
95	发病率 (%)	0	7	17	24	28	29	31	32	29	33
	听力损伤者 (%)	1	9	20	29	35	39	45	53	62	73
100	发病率 (%)	0	12	29	37	42	43	44	44	41	23
	听力损伤者 (%)	1	14	32	42	49	53	58	65	74	83
105	发病率 (%)	0	18	42	53	58	60	62	61	54	41
	听力损伤者 (%)	1	20	45	58	65	70	76	82	87	91
110	发病率 (%)	0	26	55	71	78	78	77	72	62	45
	听力损伤者 (%)	1	28	58	76	85	88	91	93	95	95
115	发病率 (%)	0	36	71	83	87	84	81	75	64	47
	听力损伤者 (%)	1	38	74	88	94	94	95	76	97	97

与此同时，噪声对人们的交谈、通信有很大影响。一般认为，当噪声超过

70dB时就很难交流、通电话了。更为严重的是,一定强度的噪声会影响大脑皮层的兴奋与抑制平衡,甚至会引起渗出性出血灶。此类中枢神经的影响也会影响其他器官,造成胃肠功能紊乱、心脑血管疾病等。此外,噪声对人心理、视力等也有一定程度的损害。

城市变电站噪声来源复杂,归类起来主要有主变压器噪声、电抗器噪声、冷却通风设备噪声、电容器和配电装置的电容噪声、线的电磁噪声等。考虑一般城市变电站不设高压电抗器,故其噪声声源主要为变压器噪声和通风冷却设备噪声。通风设备噪声频率较高,但贡献更大的主变压器噪声却表现出明显的低频特性。

低频噪声由于空气分子振动小、摩擦损耗小,通常可以传播更远的距离。同时,低频噪声波长较长,可以轻易地绕过障碍物。人体内各个器官一般都以低频振动,易与低频噪声产生共振,进而造成身体不适。有研究显示,低频噪声可以直接作用于耳骨,造成交感神经紧张,心率不齐,血压升高等。长期受到低频声音的人容易产生神经衰弱、记忆力下降、头痛、失眠等,严重影响人的身心健康。

1.2.2 噪声的评价

在物理学中,对于噪声的评价标准常用声压和声压级来描述,然而从人的主观感受出发,还应考虑噪声的频率、持续时间等。对于不同频率的噪声,人的感知是截然不同的。例如对于声压级很高的超声波,人耳完全听不见。对于变压器产生的低频噪声,人耳的感受相对迟钝一些。要想将噪声这一系列属性同人的主观感受一一对应起来,就需要一系列标准。常用的主观感受主要有A声级和连续等效A声级,现简要介绍如下。

1. A声级与连续等效A声级

在噪声测试仪器中,利用人耳的特性,对特定频率噪声的声压级进行增减,得到模拟人耳主观感觉的一个数值。这种基于频率计权方法得出的声压级,称为计权声级。计权网络有A、B、C、D,常用的有A、C计权两种。

A计权网络模拟的是40phon响度级的等响曲线的倒置曲线,对于500Hz以下的低频声有较大的衰减。B计权模拟的是70phon的等响曲线的倒置曲线。C计权模拟的是100phon的等响曲线的倒置曲线,它对人听力范围内所有频率的声

音几乎不衰减。D 计权对高频声音作了补偿，主要用于评价航空噪声。经 A 计权网络测出的声压级称为 A 计权声级，简称 A 声级，其余三种同理。图 1-1 给出了 A、B、C、D 计权网络的衰减特性。

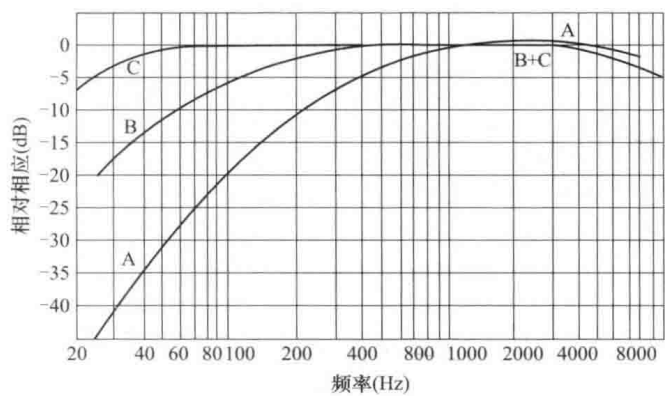


图 1-1 A、B、C、D 计权网络的衰减特性

A 声级的结果最贴近人耳的主观感觉，对高频的敏感度高于低频。A 声级目前广泛应用于噪声的评价。表 1-2 给出了生活中常见噪声的 A 声级。

表 1-2 生活中常见噪声的 A 声级

声源	主观感受	A 声级 (dB)
轻声耳语	安静	20~30
静夜，图书馆	安静	30~40
普通房间，吹风机	较静	40~60
空调机，普通谈话声	较静	60~70
大声说话，缝纫机	较吵	70~80
吵闹街道，公共汽车	较吵	80~90
很吵的马路，载重汽车，推土机	很吵	90~100
大型鼓风机，织布机，电锯	很吵	100~110
柴油发动机，球磨机	痛阈	110~120
高射机枪，螺旋桨飞机	痛阈	120~130
喷气式飞机，火炮	无法忍受	130~140
火箭，导弹	无法忍受	150~160

除了噪声的频率以外，噪声的持续时间同样也是影响人主观感受的一个重要因素。例如一个人在 80dB 的噪声中工作 2h，在 100dB 的噪声中工作 3h，另一个

人在 90dB 的噪声中工作 5h，要比较两人受到的影响，显然仅仅用 A 声级已经不够了。对于此类随时间而变化的非稳态噪声，引入了等效连续 A 声级的概念。其定义为在声场中某一个特定点，用一个相同时间内的连续稳定的 A 声级来代表几个不同的 A 声级噪声，两者的声能相等。这一 A 声级即称为等效连续 A 计权声压级。可用下式表示

$$L_{eq} = 10\lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt \tag{1-1}$$

式中， L_{eq} 为等效连续 A 计权声压级； T 为噪声暴露时间； L_A 为在 T 时间内，A 声级变化的瞬时值。

2. 噪声评价数 NR 及曲线

A 声级和连续等效 A 声级在国内外应用十分广泛，但是 A 声级不能代替倍频程声压级，因为 A 声级不能全面反映噪声源的频谱特性。具有相同的 A 声级的噪声，其频谱可能有极大的差异。

对于办公室、建筑室内、其他稳态噪声的场所，国际标准化组织（ISO）推荐使用一簇噪声评价曲线，即 NR 曲线。曲线 NR 数为噪声评价曲线的号数，它是中心频率为 1000Hz 的倍频程声压级的分贝数。它的噪声级范围为 0~130dB，适用于中心频率 31.5~8kHz 的 9 个倍频程。同一条 NR 曲线上各倍频程的噪声级对人们的影响是相同的。

各倍频程声压级 L_P 与 NR 数的关系可以用下式表示

$$L_P = a + bNR \tag{1-2}$$

式中， L_P 噪声各倍频程的声压级； a 、 b 为与倍频声压级有关系的常数，见表 1-3。

表 1-3 倍频程的 a 、 b 常数

倍频程中心频率	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
a	35.5	22	12	4.8	0	-3.5	-6.1	-8.0
b	0.790	0.870	0.930	0.974	1.000	1.015	1.025	1.030

如果需要得到某噪声的噪声评价数，可以将测得的倍频程声压级的频谱图同 NR 曲线簇放在一起，噪声各频带声压级的频谱折线最高点接触到的一条 NR 曲线即为该噪声评价数。

噪声评价数与 A 声级有很好的相关性，当 A 声级大于 55dB 时，A 声级与噪

声评价数的关系可用下式表达

$$L_A \approx NR + 5 \quad (1-3)$$

式中, L_A 为噪声声压级; NR 为噪声评价数。

1.2.3 噪声的控制标准

国际标准化组织 (ISO) 公布了噪声的容许标准, 见表 1-4。噪声标准分为三类: ①人的听力和健康保护标准; ②环境噪声容许标准; ③机电设备及其他产品的噪声控制标准。

表 1-4 ISO 推荐的噪声容许标准

累计噪声暴露时间 (h)	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	最高限
噪声级 [dB(A)]	85~90	88~93	91~96	94~99	97~102	100~105	103~108	115

针对噪声污染, 我国很早就制订了相应的标准与规范。国家环保部门在 1997 年颁布了《中华人民共和国噪声污染防治法》, 之后国家又陆续颁布了 GB 12348—2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》和 GB 3096—2008《声环境质量标准》, 规范工业生产中的噪声控制; 颁布了 GB/T 3222.2—2009《声学环境噪声的描述、测量与评价》和 GB/T 1094.10—2003《电力变压器 第 10 部分: 声级测定》规范噪声测量的相关细节标准; 颁布了 HJ/T 90—2004《声屏障声学设计和测量规范》和 GB/T 19886—2005《声学隔声罩和隔声间噪声控制指南》规范环境噪声的控制与防治。

1.3 噪声控制基本知识

1.3.1 声音的产生、传播

声波是由声源的振动而产生的。例如, 鼓面振动产生澎湃的鼓点, 提琴琴弦的振动能产生悦耳的旋律。一般而言, 生活中的各种声音都由机械振动产生, 当消减振动时, 声音也就随之消失。例如用手按在振动的锣面上, 其声音也就减小消失了。除了固体振源, 液体、气体的振动同样能发声。

物体振动发出的声音需要中间介质才能传播出去, 被人耳所听到。当声源振

动时，引起附近弹性介质分子的振动。依靠介质的惯性和弹性作用，振动就被不断传播开去。这种波动被鼓膜所接收进而转换成神经脉冲，由听觉神经传递到大脑当中，人们由此就感觉到声音。

声音在介质中的传播本质上靠的是动量的传播而造成物质的移动，介质分子只是在其平衡位置来回振动。声音的传播就是物体振动形式的传播，故声音又称声波。介质中有声波存在的区域成为声场，声波传播的方向叫做声线。

声波两个相邻密部（或疏部）之间的距离称为波长 λ ，即声源振动一次声波传播的距离，声波每秒钟在介质中传播的速度为声速 c ，振源每秒钟振动的次数为频率 f 。他们三者的关系为

$$\lambda = c/f$$

(1-4)

声音不仅可以在空气中传播，也可以在水、钢铁等固体或液体中传播，不同介质中声速不同。声速只和介质有关（见表 1-5），和声源无关。

表 1-5 常见介质中的声速

媒质	声速 (m/s)	媒质	声速 (m/s)
铝	5100	水银 (20℃)	1450
铜	3700	甘油 (20℃)	1980
钢	5050	空气 (0℃)	331.45
玻璃	5200	空气 (20℃)	343
木材	3300	氧气 (0℃)	317
淡水 (20℃)	1481	氢气 (0℃)	1270
海水 (13℃)	1500	二氧化碳 (0℃)	258

1.3.2 噪声的物理量度

1. 有效声压、声强、声功率

声波引起空气质点振动。定义声场中单位面积上由声波引起的压力增量为声压，用 P 表示，其单位为 Pa。人耳刚能听到的声压为 2×10^{-5} Pa，成为听阈声压；人耳产生不适、痛觉的声压是 20Pa，成为痛阈声压。

在一定时间间隔中最大的瞬时声压称为峰值声压。在一定时间间隔中，瞬时声压对时间取均方根值称为有效声压。其数学表达式为

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

(1-5)

式中, P 为有效声压; $p(t)$ 为瞬时声压; T 为声波振动的周期。对于正弦波, 有效声压为峰值声压的 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 倍。

声波将声源的能量向四周空间辐射。定义单位时间内通过垂直声波传播方向的单位面积上的声能, 叫声强。用 I 表示, 单位为 W/m^2 。

在自由声场中, 声强和声压有如下关系

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (1-6)$$

其中, ρ 为空气密度; c 为空气中的声速; 声源在单位时间内辐射的总的声能量叫声功率, 通常用 W 表示, 单位是 W , $1\text{W}=1\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。

自由声场声波作球面辐射时, 声功率和声强的关系可以用下式表示

$$I \approx \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1-7)$$

2. 声压级、声强级和声功率级

从听阈到痛阈, 声压的绝对值相差 100 万倍, 如用声强表示更是高达亿万倍, 在使用中非常不方便。因此, 在声学中采用对数标度, 即用“级”来度量声压、声强和声功率, 分别称为声压级、声强级和声功率级。级的单位是分贝, 一般记作 dB 。

声压级用符号 SPL 表示, 其定义为

$$SPL = 20\lg \frac{P_e}{P_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-8)$$

其中, $P_{\text{ref}}=2\times 10^{-5}\text{Pa}$, 为基准声压即听阈声压。

声强级用符号 SIL 表示, 其定义为

$$SIL = 10\lg \frac{I}{I_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-9)$$

其中, $I_{\text{ref}}=10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$, 为基准声强。

声功率级用符号 SWL 表示, 其定义为

$$SWL = 10\lg \frac{W}{W_{\text{ref}}} (\text{dB}) \quad (1-10)$$

其中, $W_{\text{ref}}=10^{-12}\text{W}$, 为基准声功率。

典型噪声环境的声压和声压级如表 1-6 所示。