

# 变电站噪声水声掩蔽的效果预测研究

满智勇<sup>1</sup>, 王俊杰<sup>2</sup>, 于衍青<sup>2</sup>, 蔡俊<sup>2</sup>

(1. 山东省烟台生态环境监测中心, 山东 烟台 264000; 2. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:**作为物理降噪技术的补充,声掩蔽被广泛应用于以降低人体主观影响为目的的声环境质量改善中。由于影响掩蔽效果的因素复杂,声掩蔽效果的预测一直是难点。为此,研究以变电站厂界排放的低频噪声为掩蔽对象,采用三种不同的自然水声(溪流声、喷泉声和雨滴声)在4个信噪比下(-3、0、+3、+6dB)开展了声掩蔽主观烦恼度试验研究,采用谱质心和等效响度来开展变电站厂界噪声掩蔽效果的预测分析。研究发现,噪声经掩蔽后烦恼度与掩蔽声谱质心呈现显著正相关,同时与掩蔽声和掩蔽后噪声的等效响度呈显著负相关,最终采用回归分析方法建立了基于谱质心和等效响度的掩蔽效果预测模型。本研究所采用的掩蔽效果预测模型建立方法可适用于更多的声掩蔽研究。

**关键词:**声掩蔽;变电站;自然水声;信噪比;谱质心;等效响度

**中图分类号:**X593 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2023)01-0021-06

声掩蔽是一种心理声学的降噪手段,通过其他声信号的添加,以达到降低噪声对人的影响的目的。水声是一类常见的掩蔽声。尤其在城市中,水声被认为适用于掩蔽城市中的人流引起的噪声等<sup>[1]</sup>,流动的水声也常被用于提高城市环境声品质<sup>[2]</sup>。Lee等<sup>[3]</sup>研究认为水声比纯音的掩蔽效果更好,更适用于城市中噪声的掩蔽。Shu等<sup>[4]</sup>用水声掩蔽城市噪声,并获得了较好的掩蔽效果。在掩蔽研究中,烦恼度是衡量掩蔽效果的常用指标,通过主观烦恼试验获得。通过比较掩蔽结果的烦恼度,可以获得最优的掩蔽条件,或选择更优的掩蔽声。也有研究者通过建立烦恼度和影响因子之间的关系模型,来表述掩蔽条件对掩蔽效果的影响方式,对掩蔽的原理有更进一步的解释。例如,Leung等<sup>[5]</sup>用水声掩蔽交通噪声,并建立了与声压级和水声类别等因素相关的烦恼度模型。本文作者先前的研究中<sup>[6]</sup>,也通过城市腹地低频噪声掩蔽试验,建立了掩蔽声声学参数与掩蔽效果间的模型。

在掩蔽过程中,很多因素会影响掩蔽效果。其中,掩蔽信号的强度是重要的影响因素之一<sup>[7]</sup>。表征信号强度的声学参数有声压级、响度

等。常用的响度参数主要是N5和N10,这两个参数主要表达了声信号在持续时长内响度的峰值。Kuwano等<sup>[8]</sup>根据Zwicker响度模型<sup>[9]</sup>提出了等效连续响度的模型,使Zwicker模型中响度-时间曲线等效为单一响度值。等效响度的模型被证明与信号的听觉感知强度具有显著的相关性,且相关性优于N5、N10和声压级参数<sup>[8,10]</sup>。

除此之外,掩蔽声信号的时频特性也是影响掩蔽效果的重要因素<sup>[11-12]</sup>。Alayrac等<sup>[13]</sup>研究认为,除了声压级,噪声的频谱成分也会影响其引起的烦恼度,并基于此提出了与频谱特征有关的烦恼度预测模型。当采用稳态声对噪声进行掩蔽时,频域特性对掩蔽效果的影响则会占主导地位。许多研究表明,信号频域特性对掩蔽结果的影响是显著的,与噪声频域特性接近的掩蔽声往往具有更好的掩蔽效果<sup>[14]</sup>。但对于杂乱无章的噪声信号,目前还没有找到一个合适的标准参数,用来表达频域特性对掩蔽效果的影响。

谱质心<sup>[15]</sup>(spectral centroid, SC)是一个常用的音色参数。谱质心是在信号频谱分布范围内,信号频率按能量加权的平均值。谱质心在一定程度上反映了一个重要的频域特性,即信号的能量

收稿日期:2022-08-02;修回日期:2022-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(11004133)

通信作者简介:蔡俊(1976—),男,副教授,博士,研究方向为噪声污染防治研究。E-mail:juncail@sjtu.edu.cn

分布。基于这个原理,谱质心常被用来进行声源的识别<sup>[16]</sup>。谱质心也是音色空间中,频域维度的重要参数之一<sup>[17]</sup>,对听觉感知有较强的影响。近年来也被作为心理声学参数,广泛应用与听觉感知相关的研究中<sup>[18-19]</sup>。Ekman 等<sup>[20]</sup>研究发现,谱质心与听者的满意度具有显著的相关性。杨立学等<sup>[21]</sup>利用谱质心来表达飞机舱内声品质。

低频噪声的厂界排放一直是变电站运营的主要环境问题,也制约了城市变电站的选址和建设,而相关的声掩蔽研究较少。为此,本文以变电站厂界排放的低频噪声为对象,开展了自然水声掩蔽的主观烦恼度试验,并进行了掩蔽效果的预测分析。结合前期的研究成果<sup>[22]</sup>,本研究采用谱质心作为频域特性参数,等效响度作为信号强度参数,探究自然水声掩蔽对变电站厂界低频噪声掩蔽效果的影响方式和影响程度,从而建立相关的声掩蔽效果预测模型。

## 1 主观烦恼度试验

### 1.1 测试信号

作为典型的工业企业厂界排放噪声,青岛市市北区某变电站厂界排放噪声被作为被掩蔽的噪声信号。在试验中,为了更好地模拟真实效果,将变电站噪声调整为 60 dBA 进行掩蔽。掩蔽声采用 3 种不同类型的水声,分别为溪流声、喷泉声和雨滴声。掩蔽水声均属于稳态声,信号强度随时间变化小。噪声及掩蔽声在 60 dBA 下的 1/3 倍频程谱如图 1 所示。

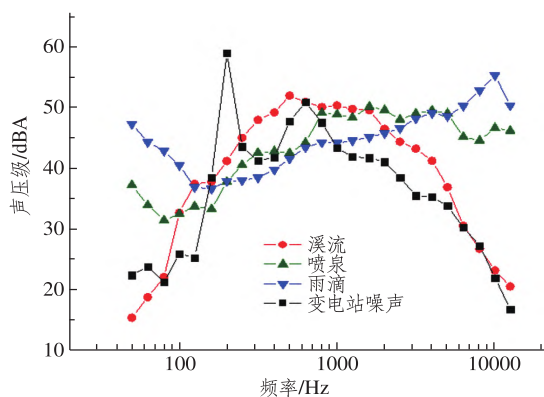


图 1 试验声信号样本的 1/3 倍频程谱  
(声压级均等于 60 dBA)

Fig. 1 1/3 octave spectrum of experimental sound samples  
(Their sound pressure levels are all equal to 60 dBA.)

从图 1 中可以发现,变电站噪声属于典型的高频信号,雨滴声在高频处和低频处均具有较高的能量。喷泉声的能量峰出现位置在中频段,溪流声在中低频段具有明显的能量峰。

掩蔽采用 4 种不同的信噪比 (signal-to-noise-ratio, SNR) 分别进行掩蔽,分别为 -3、0、+3、+6 dBA。研究共有 13 个测试信号(包括 1 个变电站噪声信号和 4 个信噪比条件下 3 种掩蔽声的混合声信号)。

### 1.2 参数计算

谱质心参数按如下公式计算:

$$SC = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} fE(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E(f) df}, \quad (1)$$

其中:  $SC$  为信号谱质心,单位 Hz;  $E(f)$  为信号连续时域波谱经变换得到的能量频谱;  $f$  为  $E(f)$  频谱对应的频率,单位 Hz;  $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$  分别为信号频率范围,单位 Hz。

等效响度按如下公式计算<sup>[8]</sup>:

$$N_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{N_i}{10}} \right), \quad (2)$$

其中:  $N_{eq}$  为等效响度,单位 sone;  $N_i$  为根据 Zwicker 响度模型计算的瞬时响度<sup>[9]</sup>,计算的时间步长为 2 ms,单位 sone。

声学参数通过 MATLAB 软件计算获得,分别计算掩蔽前后信号的声学参数。掩蔽声的参数作为试验变量,应被纳入分析范围;掩蔽后的噪声信号是主观试验中的被试信号,与试验结果有直接关系,故掩蔽后信号参数也应被纳入分析。

### 1.3 受试者

试验共招募了 37 位受试者,其中男性 16 人,女性 21 人;年龄分布在 17—28 岁之间,平均年龄 22 岁。所有受试者主观测试前均接受了听力测试,确保在 125、250、500、1000、2000、4000 和 8000 Hz 频率下的听力阈值不超过 20 dB;并在签署了知情同意书和完成了背景文件调查后开展主观烦恼度评价试验。

### 1.4 主观评价测试

主观测试在消声室中进行,受试者佩戴 (Oto-metrics, ER-2) 入耳式耳机接收测试信号。测试信号通过软件随机播放。每当受试者受试者听完一个信号,需要在电脑上完成对信号的烦恼度评

价。测试软件记录和收集所有评价结果。试验流程如图 2 所示。

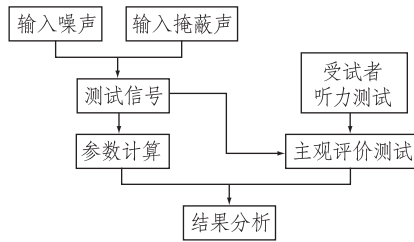


图 2 主观试验流程图

Fig. 2 Flow chart of subjective experiment

受试者以评价烦恼度的方式对测试信号进行评价。在播放完每个测试信号后,受试者将被询问对声音感到烦躁的程度。评价方式为基于语义细分法的 0~10 分评分制,其中 0 分表示“完全不烦躁”;而 10 分表示“非常烦躁”;中间四等分点分别表示“不烦躁”“一般烦躁”和“烦躁”。

## 2 试验结果分析

### 2.1 声学参数及烦恼度

噪声及掩蔽声在掩蔽前后的谱质心及等效响度如表 1 所示。表中  $SC_b$  (before - masking) 为掩蔽声谱质心,  $SC_a$  (after - masking) 为噪声经掩蔽后的谱质心,  $N_{eqb}$  (before - masking) 为掩蔽声等效响度,  $N_{eqa}$  (after - masking) 为噪声经掩蔽后的等效响度。掩蔽声在同声压级下,谱质心为 2208 Hz 的雨滴声,在掩蔽前后的响度均为最高;而谱质心更高的喷泉声,则在掩蔽前后的响度均为最低;谱质心最低的溪流声,在掩蔽前后的响度介于二者之间。低频成分明显的变电站噪声,其响度反而明显低于 3 个掩蔽声。结果说明,低频或高频成分对响度的贡献较低,而中频段的能量对人耳敏感,导致对响度有较大的贡献。这个结果与纯音的等响曲线所表达的含义是相似的。

每位受试者共采集 1 个原始噪声烦恼度数据和 12 个经掩蔽后烦恼度数据。剔除奇异值后取均值,结果如表 1 所示。从表中可以看出,噪声掩蔽后的烦恼度均产生了一定程度的下降。

### 2.2 方差分析

对各声学参数做烦恼度结果的方差分析,分析结果如表 2 所示。结果显示,各参数对烦恼度

结果的影响均是显著的。这个结果表明,掩蔽声信号强度和不同类型掩蔽声的频域特性,都对掩蔽效果有显著的影响。

表 1 掩蔽试验结果与信号参数

Tab. 1 Masking experiment results and signal parameters

信号	掩蔽前			掩蔽后		平均烦恼度
	$L_{aeq}$ /dBA	$SC_b$ /Hz	$N_{eqb}$ /sone	$SC_a$ /Hz	$N_{eqa}$ /sone	
变电站厂界	60	212	13.1			6.68
溪流	57	657	14.1	374	23.0	4.94
	60	657	20.5	452	27.8	4.77
	63	657	27.7	542	32.9	4.99
	66	657	35.7	561	40.0	5.35
喷泉	57	3026	13.2	1204	21.5	5.90
	60	3026	19.4	1675	25.6	5.97
	63	3026	26.6	2064	31.6	6.23
	66	3026	34.7	2502	38.8	6.57
雨滴	57	2208	15.2	1069	21.5	5.02
	60	2208	21.8	1378	27.4	5.64
	63	2208	29.7	1571	31.0	5.66
	66	2208	38.9	1852	41.2	6.51

表 2 谱质心和等效响度对烦恼度的 ANOVA 分析

Tab. 2 ANOVA analysis of annoyance by spectral centroid and equivalent loudness

参数	均方	F	显著性
$SC_b$	74.350	11.206	< 0.01
$SC_a$	21.010	3.192	< 0.01
$N_{eqb}$	21.010	3.192	< 0.01
$N_{eqa}$	23.099	3.518	< 0.01

各参数之间本身存在相互影响,例如掩蔽声响度高必然导致掩蔽后信号响度更高。为了进一步了解参数间关系,做各声学参数间的相关性分析,结果如表 3 所示。结果发现,掩蔽后的谱质心和响度,均与掩蔽前的谱质心不具有显著相关性,但均与掩蔽前的响度具有显著相关性。这一结果说明,掩蔽声的谱质心相对于其他 3 个参数具有一定的独立性,其对掩蔽效果影响的研究具有重要意义。

表 3 谱质心和等效响度间 Pearson 相关性分析

Tab. 3 Pearson correlation analysis between spectral centroid and equivalent loudness

参数	$SC_a$	$N_{eqb}$	$N_{eqa}$
$SC_b$	0.411	-0.048	-0.094
	0.184	0.882	0.771
$SC_a$	—	-0.823 **	-0.776 **
	—	0.001	0.003
$N_{eqb}$	—	—	0.985 **
	—	—	0.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。



相关性分析结果也发现掩蔽后的谱质心和响度之间,也具有显著的相关性。这是由于线性相关的传递性导致的,这两个参数均与掩蔽前的响度具有显著相关性。

### 2.3 响度对烦恼度的影响

如表 1 所示,对溪流声掩蔽和雨滴声掩蔽,均呈线掩蔽后噪声引起烦恼度随 SNR 增加而上升。采用喷泉声掩蔽时,信噪比为 0 时掩蔽后噪声引起烦恼度最低,信噪比为 +6 时烦恼度最高。

对不同信噪比掩蔽下的烦恼度结果取均值,结果如图 3 所示。随着信号强度的增加,噪声掩蔽后引起烦恼度呈现上升的趋势。相应地,这个结果也体现在表征信号强度的响度参数上。将不同的掩蔽结果下的烦恼度,对信噪比、掩蔽声等效响度、掩蔽后噪声等效响度做相关性分析,结果如表 4 所示。相关性分析结果表明,掩蔽声等效响度和掩蔽后噪声等效响度均与掩蔽后烦恼度呈现显著相关,但信噪比不具有显著相关性。这个结果说明,等效响度在表达掩蔽后烦恼度方面,比信噪比更准确。等效响度作为信号强度参数,来分析掩蔽作用结果时,比信噪比更有效。这个结果与 Kuwano<sup>[8]</sup>的研究结果是类似的,认为等效响度相对声压级参数在心理声学方面具有更好的相关性。

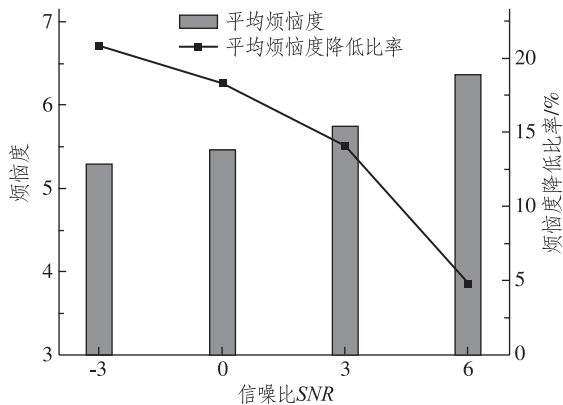


图 3 不同信噪比下的平均烦恼度

Fig. 3 Average annoyance at different signal-to-noise ratios

表 4 掩蔽后烦恼度与信号强度参数 Pearson 相关性分析  
Tab. 4 Pearson correlation analysis of annoyance degree and signal strength parameters after masking

SNR	$N_{eqb}$	$N_{eqa}$
0.537	0.582 *	0.632 *
0.072	0.047	0.028

注: \* 表示在 0.05 水平上显著。

### 2.4 谱质心的影响

如表 1 所示,在各信噪比下,不同掩蔽声掩蔽后烦恼度值均呈现:喷泉 > 雨滴 > 溪流。取不同掩蔽声下烦恼度均值,得到烦恼度与掩蔽信号谱质心的关系,如图 4 所示。随着掩蔽信号谱质心的升高,噪声掩蔽后烦恼度呈现下降的趋势,即掩蔽效果更好。而对于谱质心较高的变电站噪声,掩蔽信号谱质心越高,其能量的分布也与噪声更接近。

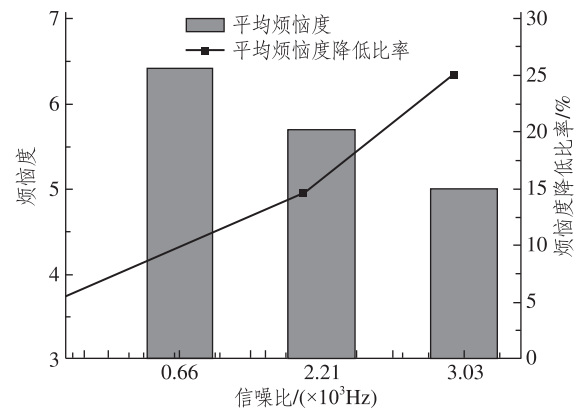


图 4 不同谱质心下的平均烦恼度

Fig. 4 Average annoyance at different spectral centroids

将不同的掩蔽结果下的烦恼度,对掩蔽声谱质心、掩蔽后噪声谱质心做相关性分析,结果如表 5 所示。结果发现,掩蔽声的谱质心与掩蔽后烦恼度显著相关,是上述结果的定量体现。同时,掩蔽后噪声的谱质心与掩蔽后烦恼度呈现显著相关性。在数值上,掩蔽声的谱质心反映了掩蔽声和噪声频域成分的相似性,数值越高,说明掩蔽声频率成分越接近变电站噪声,则具有更好的掩蔽效果<sup>[11]</sup>。

表 5 掩蔽后烦恼度与信号谱质心 Pearson 相关性分析  
Tab. 5 Pearson correlation analysis between annoyance degree and signal spectrum centroid after masking

$SC_b$	$SC_a$
-0.785 **	-0.734 **
0.002	0.007

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著。

而在参数间的相关性分析中,这两个参数之间本身不具有相关性,但都与烦恼度呈现显著相关。掩蔽后信号谱质心,是掩蔽声谱质心和等效响度共同作用的结果,说明在掩蔽效果的分析中,

掩蔽声频域特性和信号强度的影响应同时考虑。

### 3 噪声掩蔽后的烦恼度预测模型

根据烦恼度的相关性分析结果,发现掩蔽声及掩蔽后噪声的等效响度和谱质心这 4 个参数均与掩蔽后噪声烦恼度呈现显著相关性。根据这个结果,可以建立基于这些声学参数的掩蔽后烦恼度预测模型。但参数之间存在相关性,具有相互关联。为了寻找影响掩蔽结果的关键变量,来对掩蔽后烦恼度进行解释,对 4 个参数进行主成分分析,分析结果如表 6 所示。

通过主成分分析,共提取出了两个成分。其中第二个成分中,掩蔽声的谱质心对应的特征值大小远高于其他 3 个参数,说明其相对其他 3 个参数具有独立性,应被选作用于解释掩蔽后烦恼度的参数。而在另一个成分中,掩蔽声的等效响度、掩蔽后噪声的等效响度和谱质心,三者的特征

值大小相近,且远高于掩蔽声谱质心。同时相关性分析表明这 3 个参数之间本身具有高度显著的相关性。所以可以从这 3 个相互相关的参数中取一个,作为解释掩蔽后烦恼度的第二个参数。主成分分析的结果也表明了掩蔽声谱质心对掩蔽效果的影响是独立于信号强度的影响的。

表 6 声学参数主成分分析

Tab. 6 Principal component analysis of acoustic parameters

参数	成分 1	成分 2
$SC_b$	-0.291	0.948
$SC_a$	-0.928	0.193
$N_{eqb}$	0.964	0.254
$N_{eqa}$	0.953	0.221

根据上述结果,通过逐步法的线性回归分析,建立关于掩蔽后烦恼度的线性模型<sup>[5-6]</sup>。线性回归结果如表 7 所示,模型显著性  $p < 0.01$ 。

表 7 线性回归分析

Tab. 7 Linear regression analysis

参数	$B$	标准误差	标准系数	$t$	Sig.
(常量)	4.36	0.547	/	7.966	<0.01
$SC_b$	$-7.849 \times 10^{-4}$	$9.461 \times 10^{-5}$	-0.732	-8.296	<0.01
$N_{eqa}$	$6.133 \times 10^{-2}$	$9.620 \times 10^{-3}$	0.563	6.375	<0.01

根据模型中参数的显著性值,掩蔽声的等效响度、掩蔽后信号的谱质心被模型排除。模型保留了掩蔽声的谱质心和掩蔽后信号的响度,这一结果与主成分分析的结果是相对应的。同时该结果与先前的研究结果一致<sup>[6]</sup>,均认为掩蔽声等效响度和掩蔽后信号等效响度是构成掩蔽效果模型的参数。

根据回归模型,本试验中掩蔽后烦恼度与声学参数的关系可以表示为:

$$A = -7.849 \times 10^{-4} SC_b - 6.133 \times 10^{-2} N_{eqa} + 4.36, \quad (3)$$

其中: $A$  为烦恼度数值 (Annoyance),  $SC_b$  为掩蔽声的谱质心,单位 Hz;  $N_{eqa}$  为掩蔽后信号的等效响度,单位 sone。

为清楚表达噪声掩蔽效果,本研究将掩蔽后的烦恼度转化为烦恼度降低比率 (Annoyance Reduction Percentage, 简称 ARP), 其表达式为

$$ARP = \left(1 - \frac{A}{A_{noise}}\right) \times 100\%,$$

其中: $A_{noise}$  为原噪声烦恼度,本试验中为 6.68, 从而最终得到烦恼度降低比率模型,如式(4)所示:  

$$ARP = (1.18 \times 10^{-4} SC_b - 9.18 \times 10^{-3} N_{eqa}) \times 100\% + 34.7\%。 \quad (4)$$

## 4 结论

本试验用 3 种不同的水声 (溪流声、喷泉声、雨滴声), 在 4 个不同的信噪比下 ( $SNR = -3, 0, +3, +6$ ), 掩蔽 60 dBA 的变电站噪声。招募共 37 位受试者接受烦恼度主观评价试验。试验将等效响度和谱质心作为评价参数,对掩蔽后烦恼度进行分析。

结果表明:

1) 掩蔽后噪声烦恼度随着掩蔽声信号强度的增加而增加,掩蔽后的烦恼度与掩蔽声等效响度和掩蔽后噪声等效响度呈显著正相关。

2) 掩蔽后噪声烦恼度与掩蔽声谱质心呈现显著负相关。由于掩蔽声谱质心对掩蔽作用下噪

声烦恼度的影响独立于信号强度带来的影响,因此适合作为评价掩蔽效果的参数。

3) 通过线性回归,建立了基于掩蔽声谱质心和掩蔽后信号等效响度的掩蔽效果(烦恼度降低比率)预测模型。该模型的适用范围有待下一步更多的研究内容来拓宽,但该掩蔽效果的评价方法可适用于更多的声掩蔽研究。

#### 参考文献:

- [1] JEON J Y, LEE P J, YOU J, et al. Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 127(3): 1357-1366.
- [2] LUGTEN M, KARACAOGLU M, WHITE K, et al. Improving the soundscape quality of urban areas exposed to aircraft noise by adding moving water and vegetation [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 144(5): 2906-2917.
- [3] LEE H M, LEE H P. Noise masking in high population country using sound of water fountain [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 162: 107206.
- [4] SHU H, SONG Y, ZHOU H, et al. Assessment of music and water sounds for urban noise masking [C]. *Proceeding of TENCON*, 2018: 1451-1455.
- [5] LEUNG T M, CHAU C K, TANG S K, et al. Developing a multivariate model for predicting the noise annoyance responses due to combined water sound and road traffic noise exposure [J]. *Applied Acoustics*, 2017, 127: 284-291.
- [6] XU X, CAI J, YU N, et al. Effect of loudness and spectral centroid on the music masking of low frequency noise from road traffic [J]. *Applied Acoustics*, 2020, 166: 107343.
- [7] LEE S C, HONG J Y, JEON J Y. Effects of acoustic characteristics of combined construction noise on annoyance [J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 657-667.
- [8] KUWANO S, HATOH T, KATO T, et al. Evaluation of the loudness of stationary and non-stationary complex sounds [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 119: 1-8.
- [9] International Organization for Standardization. *Acoustics-Methods for calculating loudness-Part 1: Zwicker method. ISO 532-1*; 2017[S]. Geneva, 2017.
- [10] SCHLITTENLACHER J, HASHIMOTO T, KUWANO S, et al. Overall judgment of loudness of time-varying sounds [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(4): 1841.
- [11] GELFAND S A. *Masking* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018: 251-274.
- [12] KLEIN A, MARQUIS-FAVRE C, WEBER R, et al. Spectral and modulation indices for annoyance-relevant features of urban road single-vehicle pass-by noises [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 137(3): 1238-1250.
- [13] ALAYRAC M, MARQUIS-FAVRE C, VIOLLON S, et al. Annoyance from industrial noise: indicators for a wide variety of industrial sources [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128(3): 1128-1139.
- [14] HONG J Y, ONG Z T, LAM B, et al. Effects of adding natural sounds to urban noises on the perceived loudness of noise and soundscape quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711.
- [15] GIANNAKOPOULOS T, PIKRAKIS A. *Audio features* [M]. Oxford: Academic Press, 2014: 79-81.
- [16] 王娜, 陈克安. 分段谱质心特征在水下目标识别中的应用 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(2): 144-149.
- [17] Deutsch D. *The psychology of music* [M]. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2013: 35-67.
- [18] MAROZEAU J, DE CHEVEIGNE A. The effect of fundamental frequency on the brightness dimension of timbre [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(1): 383-387.
- [19] KENDALL R A, CARTERETTE E C, HAJDA J M. Perceptual and acoustical features of natural and synthetic orchestral instrument tones [J]. *Music Percept*, 1999, 16(3): 327-363.
- [20] EKMAN M R, LUNDEN P, NILSSON M E. Similarity and pleasantness assessments of water-fountain sounds recorded in urban public spaces [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(5): 3043-3052.
- [21] 杨立学, 陈克安, 李双, 等. 飞机舱内声品质的音色参数表达 [J]. *西北工业大学学报*, 2015, 33(3): 444-450.
- [22] CAI J, LIU J, YU N, et al. Effect of water sound masking on perception of the industrial noise [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 150: 307-312.

(下转第82页)

## Research Progress of Polystyrene Modified by Nanomaterials

WU Yaoqin, ZHAO Zhiping, GUO Peng, SUN Changmei, ZHANG Ying

(School of Chemistry and Materials Science, Ludong University, Yantai 264039, China)

**Abstract:** Polystyrene (PS) is an important material in modern plastic industry. It has the advantages of good formability, excellent electrical insulation and low price. But at the same time there are also brittle, impact strength is not high, poor heat resistance and other defects. Among the many modification methods, the modification of PS by using the ultra-micro size and surface activity effect of nanomaterials shows its unique advantages, which can greatly improve the strength, toughness, aging resistance, heat resistance of PS. In this paper, the modification methods of PS by nanomaterials and the preparation and properties of PS composites in recent years are reviewed.

**Keywords:** nanomaterials; polystyrene; modification; nanocomposite materials; research progress

(责任编辑 刘军深)

---

(上接第26页)

**Abstract ID:** 1673-8020(2023)01-0021-EA

## Effect Prediction of Water Sound Masking Substation Noise

MAN Zhiyong<sup>1</sup>, WANG Junjie<sup>2</sup>, YU Yanqing<sup>2</sup>, CAI Jun<sup>2</sup>

(1. Yantai Ecological Environment Monitoring Center, Shandong Province, Yantai 264000, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Sound masking is a psychoacoustic noise reduction method, which aims at lowering noise perception. This method is widely used in improving sound environment. However, it is difficult to properly estimate the masking effect with various influencing factors. Therefore, a subjective test was conducted in this research with substation boundary noise masked by 3 kinds of water sounds (stream, fountain, rain sounds) under 4 signal-to-noise-ratio ( $SNR = -3, 0, +3, +6$  dBA). Spectral centroid (SC) and equivalent loudness (Neq) were applied in masking effect analysis. SC of masking sounds was discovered to have a significant positive correlation with annoyance evoked by combined noise. Also, Neq of masking sounds and combined noise all had a significant negative correlation with the annoyance. According to the regression analysis, a masking effect prediction model was established based on SC and Neq. The masking effect evaluation method suits for more related masking research.

**Keywords:** acoustic masking; substation; natural underwater sound; signal-to-noise ratio; spectral centroid; equivalent loudness

(责任编辑 刘军深)