

音频注入抑制噪声烦恼感的标准样本评价法

陈克安^{1,2}, 李豪², 邓云云², 张珺², 刘健犇¹, 周兵¹

(1.电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430000; 2.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:基于声能量降低的噪声控制技术以声压级为评价指标,近年来提出的加法控制技术以烦恼度为评价指标。但目前尚未提出将声压级变化值与烦恼度变化值联系起来的方法。以3种变电站噪声为目标声,以自然声和人工合成声为调控声,使用标准样本法进行纯音和叠加声烦恼度主观评价实验,得到烦恼度下降值与等效声压级变化值曲线,并定量分析音频注入下的烦恼感抑制效果,构建了加法控制与减法控制效果评价相互沟通的桥梁。研究结果给出了调控声对于变电站噪声的烦恼感抑制效果,为噪声控制效果的定量分析以及变电站噪声控制提供了新思路。

关 键 词:加法控制;标准样本法;主观评价实验;烦恼度
中图分类号: TB533 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2021)06-1274-07

声环境与人类的活动息息相关,在生理和心理以及行为习惯等方面都给人们带来极大影响。噪声污染会影响人们正常的工作、学习和生活,甚至会对身心健康产生危害。噪声污染治理已成为现代环境保护的核心问题之一。传统的减法控制方式以降低声能量为目标,但站在听觉感知的角度看,噪声控制的最终目标是降低噪声引发的烦恼感。近年来,一种在原始噪声中注入调控声以降低其烦恼感的方法受到重视,该方法被称为音频注入法(audio injection, AI)。原始噪声称为目标声(target sound, TS),加入的声音称为调控声(controllable sound, CS),混合后的声音称为叠加声(combined noise, CN)。较之传统的减法控制策略,音频注入法具有实施简单、成本低廉、易于工程实现等优点,逐渐成为噪声控制领域的前沿和热点课题。

人对声音的主观感觉不仅仅取决于响度,还与声音的音调、音色和主观持续时间有关^[1]。变电站噪声低频成分较多,但A计权曲线对低频段衰减较多,低频噪声的A声级往往较低,因此传统的以反映声音响度为主的计权声级不能完全表征人对噪声的主观感觉,这一点已成为绝大多数噪声控制专家

的共识,也被国内外数篇学术论文所证实^[2]。

研究发现,组合噪声烦恼感的“相消效应”和“相长效应”源于噪声的能量掩蔽和信息掩蔽机制,其中“相消效应”在多个领域具有极强的应用价值。在此基础上,人们提出了各种基于声音叠加提高声环境舒适性的方法,先后用于抑制不同类型的噪声污染(如道路交通噪声^[3]、风力机组噪声^[4])、在开放式办公室中提高声音的舒适感及增强语音交流的私密性^[5],以及提升城市声景观品质^[6]。上述研究主要是以主观评价实验(如量值估计法、评分法)为基本手段,寻找使叠加声烦恼度降低的调控声。研究表明,自然声中的流水声、鸟鸣声、风声等对舒适性的提高尤为显著^[7]。此外,人们还研究了加入调控声实现声音愉悦度控制的系统设计问题^[8]。

在噪声主观评价研究中,国内学者同样进行了利用添加噪声实现目标噪声烦恼度调控的尝试。浙江大学^[9-11]开展了基于声调控法的不同类型噪声主观烦恼度降低实验研究,先后选取不同强度的粉红噪声、调频纯音或流水声,加入热泵机组结构传声、变电站噪声、风电机组噪声,在实验室内采用评分法等手段研究声样本的主观烦恼度,探索了叠加声类

型及其声学参量改变对原始低频声主观烦恼感的影响,也探索了改进后的 Zwicker 心理声学烦恼度模型,使得模型更适用于有调噪声烦恼度估计。

上述研究验证了音频注入法抑制噪声烦恼感的可行性,但不能对其抑制效果进行定量分析。本文以变电站噪声为目标声,首先进行目标声特性分析,选取合适的调控声开展主观评价实验研究,然后分析不同调控声对于变电站噪声的烦恼感抑制效果。在此基础上,提出了一种音频注入抑制噪声烦恼感的标准样本评价法,得出噪声烦恼度下降与等效声压级降低的关系,建立起加法控制与减法控制统一评价平台,为音频注入法研究提供理论支撑。

1 标准样本法

通常情况下,在主观评价实验中利用参考评分法进行烦恼度评分时,参考声样本的选择范围是目标声、调控声、叠加声中烦恼度居中的声样本,但该方法不能定量分析加法控制与减法控制效应,无法横向对比同一调控声对不同类型噪声的烦恼感抑制效果,因此提出标准样本法,进一步完善主观评价实验的评分效率及实验准确度。

标准样本法选取 1 kHz, 70 dB 纯音样本作为参考声样本。选取理由如下:根据我国《声环境质量标准》(GB3096-2008)的规定,2,3,4 类声环境功能区昼间限值分别为 60,65 和 70 dB(A);且我国《工作场所职业病危害作业分级第 4 部分:噪声》(GBZT 229.4-2012)规定职业噪声的下限为 80 dB(A)。因此在确保不损伤被试听力的前提下,选取声压级为 70 dB(A)的声音比较合适,且纯音没有音调特性等方面的干扰,同时考虑到变电站噪声有调特性较为明显,在 100 Hz 及其高次谐波频率处含有明显的音调分量,因此选取 1 kHz, 70 dB 纯音样本作为参考声样本较为合适。

- 标准样本法使用步骤如下:
- 1) 进行纯音烦恼度评价实验,获得 1 kHz 纯音烦恼度与其声压级关系曲线,实验中以 1 kHz, 70 dB 纯音为参考声样本;
 - 2) 将上述曲线中的纵坐标和横坐标分别换算为烦恼度下降值 R_{as} 与其等效声压级变化值 R_{ps} , 由

此得到 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线;

$$R_{as} = \frac{A_t - A_c}{A_t} \times 100\% \tag{1}$$

- 式中, A_t 和 A_c 分别是目标声和叠加声的烦恼度。
- 3) 进行叠加声烦恼度评价实验,获得注入不同调控声时噪声的烦恼度下降值,实验中以 1 kHz、70 dB 纯音为参考声样本;
 - 4) 参考步骤 2) 计算出的 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线,得到等效声压级变化值 (R_{ps})。

2 声样本的获取与分析

本文选取 2 种特性不同的变电站噪声作为目标声,其中一种线谱比较明显,另一种类似于宽带噪声。随后选取 7 种调控声,包括自然声以及人工合成声。目标声的总声级对调控声参数有重要影响,本文研究了音频注入法对于变电站噪声原始声样本以及降低 10 dB 后声样本的烦恼感抑制效果。

2.1 目标声获取与分析

本文中的目标声样本来自于电网环境保护国家重点实验室。选择高压并联电抗器 C 相隔声罩内声样本和变压器附近巡视走道声样本为目标声。其中高压并联电抗器 C 相隔声罩内声样本具有低频有调噪声为主、中高频宽带噪声为辅的特点。为了进一步研究声压级对烦恼感抑制效果的影响,将隔声罩内声样本的声压级降低至 70 dB 进行对比研究。变压器附近巡视走道噪声为低频噪声突出的宽频带噪声,有调特性不太明显,将其声压级降至 70 dB 进行研究。先前的研究表明,5 s 时长的声样本可产生稳定的感知印象,并避免了因时间过长而导致被试疲劳,这样可保证评价结果的准确性。因此,截取稳定状态 5 s 的变电站噪声进行实验,采样频率为 16 000 Hz。目标声的具体信息如表 1 所示,噪声的频谱特性如图 1 所示。

噪声中的线谱是人耳听觉感知中不舒适的主要体现,会对噪声烦恼感产生重要影响。3 种目标声能量都主要集中在低频部分。目标声 1 与目标声 2 线谱明显,烦恼感抑制难度较大,只有声压级的差异;目标声 3 有调特性不太明显,类似于宽带噪声。

表 1 目标声编号与参数

采样位置	声压级/dB	A 计权声级/(dB(A))	声样本编号
高压并联电抗器 C 相隔声罩内	80.5	71.0	1
高压并联电抗器 C 相隔声罩内	70.0	60.6	2
变压器附近巡视走道	70.0	57.5	3

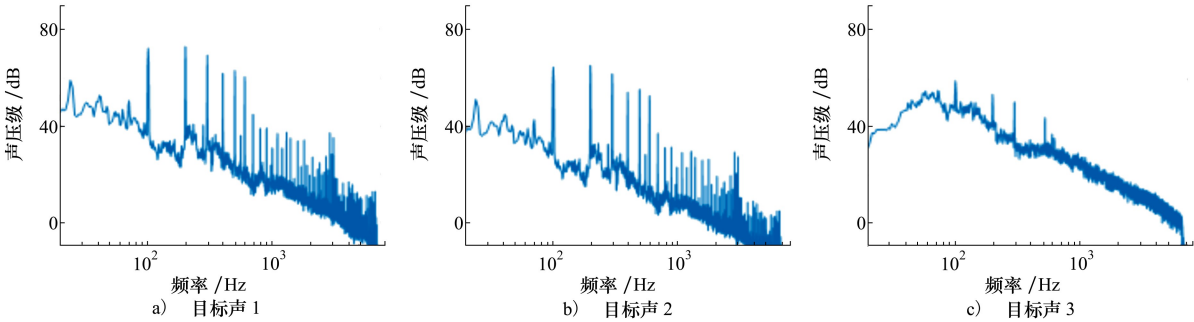


图 1 不同位置目标声的频域图

2.2 调控声获取与分析

从专业声效网站 (www.freesound.com 和 www.sound-ideas.com) 下载了蜜蜂嗡嗡声、鸟鸣声、风吹树叶声、流水声、海浪声作为调控声,采样频率从 48 000 Hz 降为 16 000 Hz。并利用 MATLAB 合成粉红噪声、红色噪声等作为调控声,经过滤波处理,生成带限粉红噪声和带限红色噪声。声样本时长 5 s,进行初步筛选后,调控声具体信息如表 2 所示。

表 2 调控声类型与编号

调控声类型	声样本编号
蜜蜂嗡嗡声	4
鸟鸣声	5
风吹树叶声	6
流水声 1	7
流水声 2	8
海浪声	9
带限粉红噪声	10
红色噪声	11
带限红色噪声	12

变电站噪声低频成分较多,因此可以从频谱均衡的角度进行调控声选取。研究表明^[9-13],自然声及色噪声对声环境舒适性改善有一定的效果。因此,本文选取上述调控声,以不同信噪比与变电站噪声进行叠加,开展主观评价实验,利用参考评分法,

探究音频注入烦恼感抑制效果。

2.3 调控声参数设置

将调控声视为信号,目标声视为噪声,设置一系列不同的信噪比,2 种声音组合后得到不同的叠加声。信噪比的定义如下:

$$R_{SN} = 10\lg \frac{P_s}{P_T} \tag{2}$$

式中, P_s 、 P_T 分别为调控声和目标声的信号功率。

将 3 种目标声和 9 种调控声以不同信噪比混合得到叠加声,用于后续主观评价实验。

3 主观评价实验

3.1 被试

本次实验中,被试选择要求为年龄在 18 ~ 50 岁、耳科状况均正常。实验期间无不适症状。并在实验前对所有被试进行听力测试,确保在 100 ~ 8 000 Hz 的频率范围内所有被试的听阈级都低于 15 dB。

本次实验共选取 24 名在校大学生以及研究生作为被试,男女比例 1 : 2。实验分 3 组,每组 8 人,每次实验耗时 1.5 h。

3.2 实验环境及设备

本次主观评价实验选择在安静的普通房间内进行。房间舒适,灯光柔和,座椅和耳机体验感舒适,避免被试注意力分散。房间内光照均匀、通风良好。

为保证所有被试在一致条件下听到同样的声音,通过头戴式耳机进行主观评价实验,评价结果不受房间声学特性或者被试位置的影响,而且可有效屏蔽外界噪声干扰且信号失真小。利用 MATLAB 对声样本随机排序后生成实验声样本片段,由 ArtemiS SUITE 11.6 通过计算机传至双耳耳机均衡器 (HEAD lab-compatible binaural headphone equalizers labP2),然后经动圈式高保真立体声头戴式耳机 (SENNHEISER HD600) 播放给被试。回放过程中,控制声样本的播放时长、播放间隔和播放顺序。这套双耳声音回放系统可避免背景噪声的影

响,最大限度保证理想的听音效果。

3.3 实验过程

为得到叠加声烦恼度评分,本次实验分为三部分:第一部分为预实验,初步筛选出 9 种调控声进行叠加声烦恼度评分实验。第二部分为纯音烦恼度实验,获得 1 kHz 纯音烦恼度与其声压级关系曲线,并计算出 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线。第三部分是叠加声烦恼度评价实验,用于音频注入效果定量分析。考虑到烦恼度 5 级评价尺度的实验精度有限,本次实验采用烦恼度 9 级评价尺度,具体见表 3。

表 3 烦恼度 9 级评价尺度

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
不烦恼	特别	相当	比较	有点	相同	有点	比较	相当	特别	烦恼

3.3.1 预实验

为了初步筛选调控声类型,设计了预实验,选取有丰富主观评价实验经验的被试开展实验,为后续实验提供依据。在预实验中,要求被试熟悉声样本列表,了解整体声样本,在主试的讲解下选取一些声样本试听,使被试熟悉声样本。以 5 dB 为步长叠加得到叠加声。被试每听完 5 s 的声样本有 2 s 的时间判断是否能听到调控声或目标声。为防止被试疲劳导致实验准确度下降,每组评分控制在 20 min 左右,休息 10 min 后继续实验。直至序列播放完毕。初步筛选出的调控声类型如表 2 所示。

3.3.2 纯音烦恼度评价实验

选取频率为 1 kHz,声压级为 70 dB 的纯音作为标准参考声样本,将其声压级依次下降或上升 3 dB,生成待测声样本,并进行主观评价,得到烦恼度评分,以此为依据,得到 1 kHz 纯音烦恼度与其声压级关系曲线,并计算出 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线,把主观评价实验烦恼度下降值量化为标准参考样本声压级的下降值 (dB)。待测声样本声压级分别为:79,76,73,70,67,64,61,58,55,52,49,46,43 dB。评价方法选取参考评分法。为了进行一致性等检验,全部样本随机排序后播放,且每个声样本随机出现 2 次,便于数据处理。

3.3.3 叠加声烦恼度评价实验

在阈值范围内,以 3 dB 为步长,叠加得到叠加声并进行参考评分,声样本序列随机播放。实验安排与预实验类似。

实验期间被试每次听到一对声音,每对包含两段 5 s 的声样本,中间间隔 2 s。第一段声音为参考样本 (频率 1 kHz,声压级 70 dB 的纯音),本文采用烦恼度 9 级评价尺度,因此选择中间值,将参考样本烦恼度评分设定为 5 分,第二段声音为待评价样本。在听完每对声音后,被试有 5 s 的时间打分。其中“9”、“5”和“1”分别表示待评价样本相对参考样本“非常烦恼”、“同样烦恼”和“非常不烦恼”。被试听完一对声样本后进行打分,直到声样本播放完毕,收集问卷结果进行数据分析。为了进行一致性检验,约 1/3 的待评价声样本随机出现 2 次。进行数据剔除后,选出被试打分的平均值作为每个叠加声样本的烦恼度评分。

3.4 数据有效性检验

为保证后续分析结果的准确性,首先对数据进行有效性检验。包括相关分析、误判分析以及聚类分析,剔除无效数据。

纯音烦恼度实验数据有效性检验时,如果某个被试的误判率大于 0.2,即一致性系数低于 0.8,则剔除该被试。进行相关分析时,所有被试对同一声样本的 2 次评价结果之间的相关性均大于 0.7,说明被试在评价过程中评价尺度相对稳定,因此不做数据剔除。进行聚类分析时,距离较远的被试进行烦恼度评分时可能采用了不同的策略,予以剔除。综上,共剔除 6 名被试的数据,剔除后被试的平均误判率为 0.05,平均相关系数为 0.95。有效性检验结果如图 2 所示。

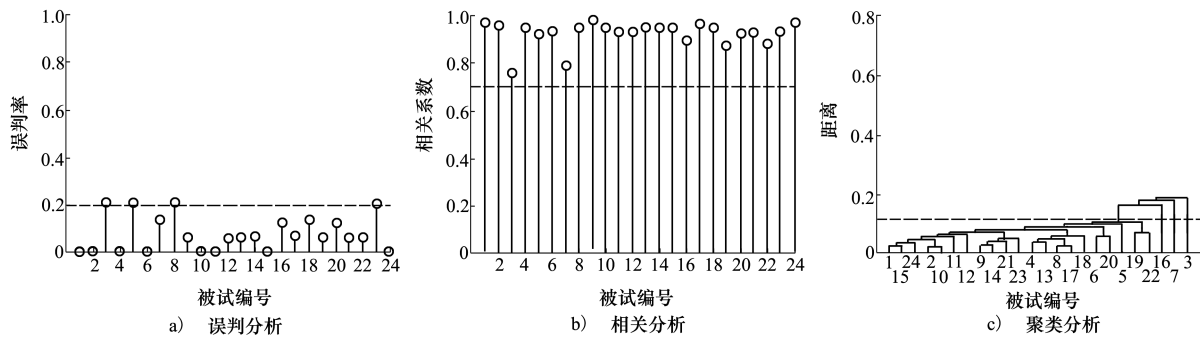


图 2 纯音烦恼度实验数据有效性检验

叠加声烦恼度实验数据有效性检验与纯音烦恼度实验数据有效性检验采取相同的策略。鉴于叠加声烦恼度评价实验采用标准样本法,实验中要比较叠加声相对于 1 kHz, 70 dB 纯音的烦恼度,判断难度高于纯音实验,因此将误判率剔除的标准设置为小于 0.4,即一致性系数高于 0.6。进行相关分析时,大部分被试对同一声样本的 2 次评价结果之间的相关性较高,部分被试的 2 次评价结果之间的相关性低于 0.5,说明这些被试在评价过程中评价尺度一直处于一个不固定的状态,因此予以剔除。进行聚类分析时,剔除距离较远和无法与其他被试聚为一类的被试。综上所述,共剔除 8 名被试的数据,剩余 16 名被试的数据做后续分析。

4 实验结果及分析

4.1 纯音烦恼度评价实验结果及分析

根据主观评价实验结果可得 1 kHz 纯音烦恼度与声压级关系曲线,如图 3 所示。

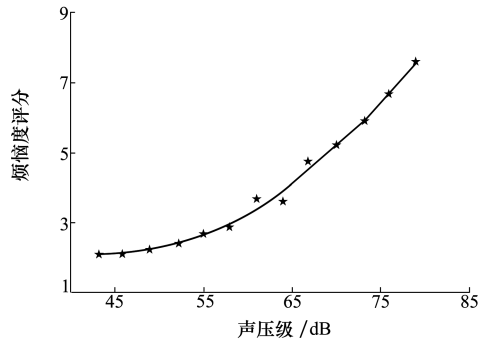


图 3 1 kHz 纯音烦恼度与声压级关系曲线

从图 3 可以得出,随着 1 kHz 纯音声压级的逐渐增大,被试的烦恼度得分也在逐渐增加,整体呈正

相关趋势。为保证曲线准确无误,曲线的拟合范围与测量值范围保持一致,特此说明。

为使曲线更易理解,将上述曲线中的横纵坐标分别换算为烦恼度下降值(R_{as})与等效声压级变化值(R_{ps}),由此得到 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线,如图 4 所示。

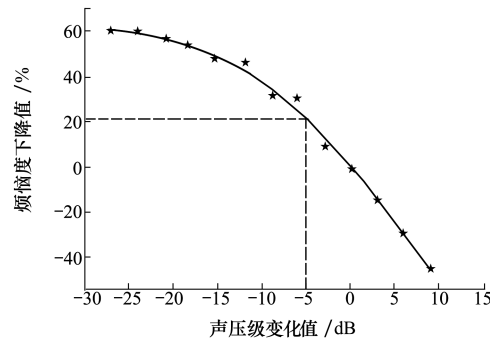


图 4 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线

从图 4 中可以得出,当烦恼度下降值为 20%时,等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 5 dB,符合主观认知。为保证曲线准确无误,曲线的拟合范围与测量值范围保持一致,特此说明。利用此曲线,便可将声压级变化值与烦恼度变化值联系起来,进行加法与减法控制烦恼感抑制效果评价与分析。

4.2 叠加声烦恼度评价实验结果及分析

对叠加声烦恼度评价实验数据进行处理,获得不同调控声对于噪声的烦恼度下降值(R_{as})如表 4 所示。根据 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线及表 4 可得,对目标声 1 进行声调控后,烦恼度下降 11.8%,等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 2.5 dB,对目标声 2 进行声调控后,烦恼度下降 17.5%,等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 4 dB,对目标声 3 进行声调控后,烦恼度下降 12.4%,等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 2.7 dB。

根据实验结果,叠加流水声后,声样本有了更丰富的元素,且人类比较偏爱大自然的声音,使得变电站噪声烦恼度有了一定的降低;带限粉红噪声频谱能量每倍频程下降 3 dB,带限红色噪声频谱能量每倍频程下降 6 dB,红色噪声与变电站噪声频谱下降趋势更为接近,再加上对频谱范围的调整,使得变电站噪声烦恼度得以降低。

由此,便可将噪声控制效果直观化,得到一种音频注入抑制噪声烦恼感的标准样本评价法。可以看出,通过音频注入,变电站噪声烦恼感得到一定的控制,使得变电站内部及周边地区声环境得以提升。

表 4 不同调控声对变电站噪声的调控效果

变电站噪声	调控声类型	烦恼度 下降值/%	等效声压 级变化值/dB
目标声 1	流水声 1	11.8	-2.5
目标声 2	带限红色噪声	17.5	-4.0
目标声 3	流水声 2	12.4	-2.7

5 结 论

本文选取 3 个不同位置的变电站噪声作为目标声,选取自然声和人工合成声作为调控声,并基于标准样本法开展主观评价实验,建立了等效声压级变化值与烦恼度变化值的关系曲线,完善了噪声控制定量评价方式,也为变电站噪声控制提供了新的解决方案。

研究发现:低频成分较少,高频成分较多的流水

声对于线谱较明显的高声压级变电站噪声的烦恼感抑制效果较好,是因为这种流水声的加入,使得整体频谱更加均衡;全频带频率成分较为均衡的流水声对于线谱不明显且类似于宽带噪声的变电站噪声的烦恼感抑制效果较好,是因为人类更加偏爱水流声;带限红色噪声对于线谱比较明显的中等声压级变电站噪声的烦恼感抑制效果较好,是因为带限红色噪声频谱的变化趋势与变电站噪声比较接近。通过使用标准样本法所得到的 $R_{as} \sim R_{ps}$ 曲线,可以定量描述上述调控效果;经声调控后,流水声 1 的烦恼感抑制效果等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 2.5 dB,带限红色噪声的烦恼感抑制效果等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音声压级降低 4 dB,流水声 2 的烦恼感抑制效果等效于将 1 kHz, 70 dB 纯音的声压级降低 2.7 dB。

通过对比目标声 1 和目标声 2 的烦恼度下降值,可以发现声压级对于烦恼感抑制效果的影响。声压级降低,音频注入法的调控效果有提升的趋势,因此,对于声压级过高的噪声,应先降低其声能量,之后采用音频注入法降低烦恼感。

为进一步完善本文研究内容,下一步工作将基于心理声学参量,建立多元线性回归模型,并着重研究不同参数的色噪声和流水声对于变电站噪声的掩蔽效应,在更完善的信噪比、频带范围等参数设置下,优化音频注入法的烦恼感抑制效果。本文提出的标准样本法将纯音作为参考声样本,下一步也可将白噪声作为参考声样本,探究不同参考声样本与不同目标声的关系,细化标准样本法的适用范围。

参考文献:

[1] 陈克安. 环境声的听觉感知与自动识别[M]. 北京: 科学出版社, 2014
CHEN Ke'an. Auditory perception and automatic recognition of ambient sound[M]. Beijing: Science Press, 2014 (in Chinese)

[2] FIDELL Sanford. The schultz curve 25 years later: a research perspective[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(6): 3007

[3] HAO Y, KANG J, WRTCHE H. Assessment of the masking effects of birdsong on the road traffic noise environment[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 140(2): 978-987

[4] BOLIN K, NILSSON M E, KHAN S. The potential of natural sounds to mask wind turbine noise[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2010, 96(1): 131-137

[5] HONGISTO V, D OLIVA, REKOLA L. Subjective and objective rating of spectrally different pseudorandom noises-implications for speech masking design[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(3): 1344-1355

[6] 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]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(5): 2906-2917

[7] MARIA R, ÖSTEN A, MATS E N, et al. Effects of sounds from water on perception of acoustic environments dominated by

- road-traffic noise[J]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2013, 99(2): 218-225
- [8] SUHARA Y, IKEFUJI D, NAKAYAMA M, et al. A design of control signal in reducing discomfort of the dental treatment sound based on auditory masking[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(5): 3452
- [9] 郑玥. 变电站噪声人体主观感受及其声调控方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
ZHENG Yue. Human subjective annoyance and adjustment methods of substation noise[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese)
- [10] 李争光. 噪声暴露主观感受模拟、调控及脑电变化规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
LI Zhengguang. Study on acoustical simulation and adjustment methods of subjective perception and objective law of electroencephalogram variation under noise exposure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese)
- [11] DI G Q, CHEN X W, SONG K, et al. Improvement of Zwicker's psychoacoustic annoyance model aiming at tonal noises[J]. *Applied Acoustics London*, 2016, 105: 164-170
- [12] DI G Q, LI Z G, ZHANG B J, et al. Adjustment on subjective annoyance of low frequency noise by adding additional sound[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2011, 330(23): 5707-5715
- [13] LI Z G, DI G Q. Reduce subjective annoyance from transformer noise by the method of sound adjustment and control[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2016, 102(3): 452-461

Standard sample evaluation method for noise annoyance suppression from audio injection

CHEN Ke'an^{1,2}, LI Hao², DENG Yunyun², ZHANG Jun², LIU Jianben¹, ZHOU Bing¹

(1.State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430000, China;
2.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Noise control technology based on sound energy reduction uses sound pressure level as an evaluation index, and the addition control technology proposed in recent years uses annoyance as an evaluation index. However, no method has been proposed to link the change in sound pressure level with the change in annoyance. In this paper, three types of transformer substation noise are selected as the target sounds, natural sounds and synthetic sounds are selected as the controllable sound, and the pure tone annoyance and combined noise annoyance evaluation experiments are carried out using the standard sample method, and the curve of the decrease value of annoyance and the equivalent sound pressure level change value is obtained. And the effect of audio injection annoyance control is quantitatively analyzed, aiming to build a bridge between addition control and subtraction control. The research results show the effect of controllable sound on the annoyance of substation noise. This study provides new ideas for quantitative analysis of noise control effects and substation noise control.

Keywords: addition control; standard sample method; subjective evaluation experiment; annoyance

引用格式: 陈克安, 李豪, 邓云云, 等. 音频注入抑制噪声烦恼感的标准样本评价法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1274-1280

CHEN Ke'an, LI Hao, DENG Yunyun, et al. Standard sample evaluation method for noise annoyance suppression from audio injection[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(6): 1274-1280 (in Chinese)