

多噪声源共同作用下的总烦恼度评价与预测*

闫靛^{1)2)†} 陈克安¹⁾ Ruedi Stoop²⁾

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (苏黎世联邦理工大学神经信息学院, 瑞士苏黎世 8057)

(2011年10月21日收到; 2011年12月20日收到修改稿)

主要研究了多噪声源共同作用下的混合噪声烦恼度的评价过程与预测方法. 首先, 设计并完成了固定播放时长噪声样本作用下的烦恼度主观评价实验, 获得了人工合成的混合噪声样本作用下的混合噪声烦恼度 (亦称总烦恼度) α_T 评价数据与构成混合噪声样本的所有单一噪声样本单独作用时的烦恼度 α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$; K 为混合噪声样本中单一噪声样本的总数) 评价数据. 随后, 细致分析了两组评价数据之间的关系, 提出在已知 α_i 的基础上利用多元线性回归模型预测 α_T . 最后, 解决了如何确定模型中对应各 α_i 的权值 ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$) 的问题. 研究表明, 以所提出的权值确定方法建立的多元线性回归预测模型能够较为成功地预测混合噪声样本作用下的总烦恼度评价价值.

关键词: 噪声烦恼度, 主观评价, 预测模型, 多元线性回归

PACS: 43.50. Yw, 43.50. Ba, 43.50. Qp, 43.50. Rq

1 引言

长期以来, 针对单一噪声源^[1]或特定噪声源^[2]作用下的噪声烦恼度问题, 研究工作大多局限在对噪声烦恼度主观评价方法与客观预测模型的建立^[3-5]两个方面. 随着研究工作的日益深入, 各国学者普遍意识到现有的噪声作用剂量与烦恼效应 (或反应) 关系模型^[6-8]缺乏细致深入的基础理论与合理有效的分析论证. 这些模型在使用条件和适用范围上均具有明显的局限性, 实际应用中经常出现模型预测值与实际调查值或评价价值之间绝对误差较大的问题. 若采用这些模型定量评价或预测人群在多种 (或多个) 噪声源同时作用下的烦恼度, 其结果必定会不尽人意.

单一声源和组合声源分别产生单一噪声和混合噪声^[1,9]. 组合声源既可以指不同声源种类的组合, 又可以指同种类声源数量上的组合. 由组合声源产生的混合噪声具备听觉感知上的可辨识

性, 人耳不但能够明显感受到各种声音组分的存在, 还能够凭借个人经验对不同声音组分的来源和基本特性 (持续性、响度和音调等) 进行简单描述. 为了正确评价人群在复杂噪声环境中的烦恼程度, 国外研究人员陆续开展了组合声源 (combined sources 或 mixed sources) 作用下的混合噪声烦恼度研究^[1,9].

20世纪70年代, 混合噪声烦恼度研究主要是对两种及两种以上类型交通噪声源共同作用下的人群烦恼程度开展广泛的社会调查. 这一阶段获得的研究结论主要有混合噪声烦恼度高于单一噪声烦恼度^[10]、混合噪声烦恼度低于单一噪声烦恼度的最大值. 文献[11]重点研究了车辆噪声和飞机噪声共同作用下的人群烦恼度. 文献[8,12,13]研究了高声压级车辆噪声和飞机噪声共同作用下的人群烦恼度、车辆噪声和冲击性噪声 (如枪声、凿岩锤声、打桩声等) 共同作用下的人群烦恼度. 特别值得一提的是, Taylor^[1]采用五种不同的数学模型研究了飞机噪声和车辆噪声共同作用下的混合噪声

* 西北工业大学基础研究基金 (批准号: JC201025) 资助的课题.

† E-mail: liyan1832@hotmail.com

烦恼度, 细致比较了五种模型的评价与预测效果, 为混合噪声烦恼度的定量研究提供了参考。

当前, 有关混合噪声烦恼度的研究尚未明确区分“单一噪声”与“混合噪声”。研究人员时常将道路噪声或铁路噪声看作“单一噪声”, 将道路噪声和铁路噪声共同作用下的复杂声环境看作“混合噪声”。事实上, 道路噪声本身就是各种车辆行驶噪声同时作用下的混合噪声。此外, 现有的混合噪声烦恼度模型大多是根据早期的社会调查数据拟合而成的, 缺乏可靠的理论基础以及必要的分析和验证过程, 模型的正确性值得怀疑, 预测精度也不够理想。国内对噪声烦恼效应的研究尚处于起步阶段, 针对组合声源的声学特性、混合噪声烦恼度的评价方法以及混合噪声烦恼度预测模型的研究尚不多见。然而, 随着工业化进程的日益加快, 人为噪声源在数量和种类上与日俱增的事实, 迫切要求我们从组合声源的角度出发深入开展混合噪声烦恼度的主观评价与客观预测方法研究。

本文设计并进行了固定播放时长噪声样本作用下的人群烦恼度主观评价实验, 获得了单一噪声样本与人工合成的混合噪声样本作用下的人群烦恼度评价数据。通过分析混合噪声总烦恼度与单一噪声烦恼度之间的关系, 研究了确定权值 ω_i 的具体方法, 以多元线性回归模型对固定播放时长混合噪声样本作用下的 α_T 进行了定量评价与预测。

2 混合噪声烦恼度

混合噪声烦恼度 α_T , 亦称总烦恼度 (total annoyance), 可用于表征和度量人群在组合声源作用下的烦恼程度。组合声源中, 各单一噪声源独立作用时人群的烦恼程度为单一噪声烦恼度 (single noise annoyance), α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$; K 为组合声源中单一声源的总数)。 α_T 并非是 α_i 的简单相加。大量研究表明, 人群在复杂声环境中的烦恼程度源于每个独立作用的噪声源。因此, 在判断声环境整体的 α_T 时, 人们会无意识地将所有 α_i 相互叠加。由此可知, 定量评价 α_T 应以获取 α_i 为前提, 探索两者之间定量关系的规律性, 对 α_i 的叠加过程进行数学建模。

目前, 针对 α_T 建模过程的研究尚处于起步阶段。现有模型在计算精度、使用条件和适用范围

上各不相同。其中, 多元线性回归模型不仅考虑到组合声源中每个单一声源的独立性, 更兼顾了 α_i 对 α_T 贡献效果的差异性^[1], 该模型的数学表达式为

$$\alpha_T = \sum_i \omega_i \alpha_i, \quad (1)$$

其中 ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$) 为衡量第 i 种单一噪声源单独作用时 α_i 对 α_T 贡献的权值。

选取合适的 ω_i 对准确预测 α_T 至关重要, 而 ω_i 与单一噪声源自身的声学特性密切相关^[1]。如何在已知 α_i 和 α_T 的前提下正确选取对应各组合声源中各 α_i 的 ω_i , 目前仍无定论。

3 主观评价实验

3.1 噪声样本

3.1.1 单一噪声样本的选取

研究中使用的单一噪声样本取自 Sound Ideas 公司公布的通用 6000 系列声音素材库。所有声音素材均为双声道数字信号, 采样频率为 44100 Hz。经反复听音与时域波形比对, 从中挑选了 300 段声音素材。随后, 依据“保留特性、稳态截取”的原则, 对所挑选的声音进行截取, 截取后的声音片段时长均为 15 s。控制声音片段的 A 计权声压级在 50—75 dB 之间, 观察时域波形, 以“波形峰值位于信号时程中段”为标准, 最终挑选出单一噪声样本 159 个。

3.1.2 混合噪声样本的人工合成

随机选取三个单一噪声样本, 利用 CoolEdit Pro. 2.1 软件进行时域波形混缩, 调节各音轨音量至适当位置, 控制合成样本的声压级, 获得由三个单一噪声样本共同作用形成的混合噪声样本 53 个, 每个混合噪声样本的播放时长亦为 15 s。

3.2 评价过程

本次主观评价实验采用经过证实效果最佳的五级语言尺度^[9] 衡量评价者对噪声样本的烦恼度。该尺度采用“几乎不烦恼”、“稍微有点烦恼”、“实在有点烦恼”、“十分烦恼”、与“非常烦恼”五个不同的短语来衡量噪声样本致人烦恼的具体程度。为了实现评价结果的数字化表征, 分别以 1—5 的整

数对应语言尺度上由低至高的五个等级. 具体评价方法如下: 请评价者倾听每段声音, 依据语言尺度判定每段声音样本致其烦恼的具体程度并以 1—5 的整数对样本作出评价. 评价过程中, 允许评价者在任意时间修正已给出的评价值.

参考中华人民共和国国家标准 GB/T 10220 《感官分析方法总论》对评价者人数的规定, 根据之前在环境噪声烦恼效应社会调查研究中获得的“身体健康的被调查者在性别与年龄上的个体差异不会对调查结果产生显著影响”的结论^[9], 从曾经参加过声音主观评价实验的学生^[14–16]中挑选出 10 位年龄在 20—28 岁、身体健康、听力正常且有意愿再次参加评价实验的学生组成评价小组, 其中男、女评价者各 5 人. 另外, 本次评价实验还专门邀请了一位担任组织协调工作、在实验过程中负责分发和回收表格、操作声音样本回放设备的实验负责人. 考虑到评价小组中所有评价者都应具备同等资格水平、尽可能避免各种与评价者有关的因素可能对评价结果产生的影响, 参考 GB/T 14195 《感官分析: 评价员选拔与培训, 感官分析优选评价员导则》和 GB/T 16291 《感官分析: 专家的选拔、培训和管理导则》, 制定了评价者培训计划, 完成了对所有评价者的培训.

为防止评价者的主观偏差和个人偏好可能对评价结果产生的影响, 将本次主观评价实验设计为双盲实验 (double-blind trials)^[17]. 在整个实验过程中, 不向评价者和实验负责人提供任何有关声音样本的描述、分组情况和播放顺序的具体信息, 每位评价者收听到的样本播放次序与分组情况完全不同.

为确保评价结果的稳定性, 满足对评价者效应进行分析的条件, 将每个声音样本重复播放三次, 每位评价者需要评价的声音样本数量为 $3 \times (159 + 53) = 636$ 个. 若样本播放间隔为 2 s, 则整个评价实验耗时约 3 h. 为避免听觉疲劳, 依据单次听音时间不超过 30—40 min 的国际惯例, 我们以单次听音时间不超过 35 min 为标准, 根据 Fisher 实验设计原则, 利用配伍组设计^[17]确定样本分组, 以完全随机化设计确定各样本组的先后评价次序和组内样本的播放次序. 分组后, 每组均有 106 个声音样本. 所有声音样本经由计算机的 24 bit 声卡传至 Behringer HA4700 型 16 通道耳机式放大器后,

经 Sennheiser HD250-II 型动圈式高保真头戴耳机回放.

评价实验在安静的普通房间内. 实验室本底噪声在 16—8000 Hz 倍频带内均低于美国国家标准 NC20 《主观评价实验室室内噪声标准》中规定的允许值. 同时, 依据 GB/T 13868 《感官分析: 建立感官分析实验室的一般导则》对实验室布局、评价者坐席、实验负责人坐席、声音样本回放控制设备的放置位置等进行了统一安排. 实验室室内温度约为 22 °C, 湿度为 45%—50%, 光照均匀、通风良好且无异味.

评价正式开始之前, 利用丹麦 B&K 公司生产的专业人工头声信号采集器采集双耳处的声信号并进行实时监控, 调节计算机音量与耳机式放大器输出功率至恰当位置, 使双耳声压级保持在评价者可接受的动态范围之内. 随后, 请评价者在指定位置就坐, 佩戴耳机. 为防止评价者之间相互影响, 评价者坐席间隔为 1 m. 每个坐席上放置黑色和红色的笔各一支, 需要填写的表格若干. 黑色笔用于填写表格, 红色笔用于修改已填写的结果.

3.3 评价数据分析

首先, 对原始评价数据进行误判分析, 剔除无效的评价数据. 六组评价数据的误判率分别为 24.5%, 36.5%, 34.3%, 30.8%, 26.0% 和 19.0%, 无效评价数据的剔除率分别为 13.0%, 17.5%, 16.5%, 15.8%, 14.3% 和 11.0%. 所有评价数据的总误判率为 28.5%, 总剔除率为 14.7%. 各组评价数据以霍伊特信度系数表征的内在一致性信度分别为 80.8%, 90.4%, 94.9%、85.9%, 94.3% 和 90.2%, 各组数据内在一致性信度的平均值为 89.4%; 以肯德尔和谐系数表征的评价者信度分别为 80.8%, 90.4%, 94.9%, 85.9%, 94.3% 和 90.2%, 评价者信度的平均值为 84.4%. 由此可见, 评价数据一致性良好, 可信度高.

随后, 依据 GB/T 11792 《测试方法的精密性: 在重复性或再现性条件下所得测试结果可接受性的检验和最终测试结果的确定》确定每个噪声样本致烦恼效应的最终评价结果, 流程如图 1 所示. 图 1 中的 X_1 和 X_2 为评价者给出的某一噪声样本致烦恼效应的两个评价值, r 为重复性限, $C_r, R_{95}(3)$

为该噪声样本具有三个评价值的重复性临界极差. 在满足重复性条件的前提下, 这三个评价值的极差不超过 $C_r R_{95}(3)$ 的概率为 95%.

最后, 考察每组评价数据中不同评价值重复出现的概率与理论正态分布的拟合优度, 检验评价数据的有效性. 以第四组评价数据为例, $\mu = 2.7177$ 和 $\sigma = 0.4250$ 分别为该组评价数据的均值和方差, 概率 $p = 0.05$ 表明假设检验的置信水平为 95%. 该组数据中不同评价值的概率分布如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 该组数据中不同评价值以 95% 的概率服从均值 $\mu = 2.7177$, 方差 $\sigma = 0.4250$ 的正态分布, 说明评价数据分布合理.

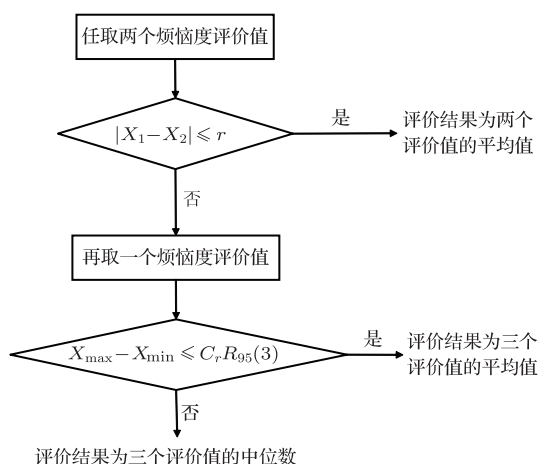


图 1 满足重复性临界极差 $C_r R_{95}(3)$ 评价结果的确定流程

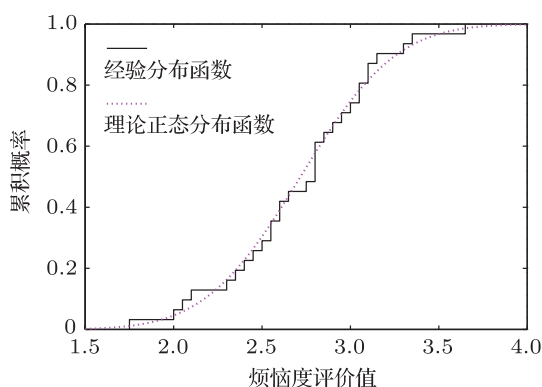


图 2 第四组评价数据中不同烦恼度评价值的概率分布 $\mu = 2.718, \sigma = 0.425, p = 0.05$

综上可知, 在对原始评价数据进行误判分析、剔除无效的评价数据之后, 以重复性临界极差 $C_r R_{95}(3)$ 确定每一个声音样本致人烦恼程度的评价值. 研究表明, 上述评价数据的分析与处理方法科学有效.

4 混合噪声样本烦恼度评价值的分析与预测

4.1 α_T 与 α_i 的关系

本次主观评价实验中, 评价者对所有单一噪声样本与人工合成的混合噪声样本致人烦恼程度的评价如图 3 所示. 由图 3 中数据点分布的相对位置可知, α_T 高于 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$.

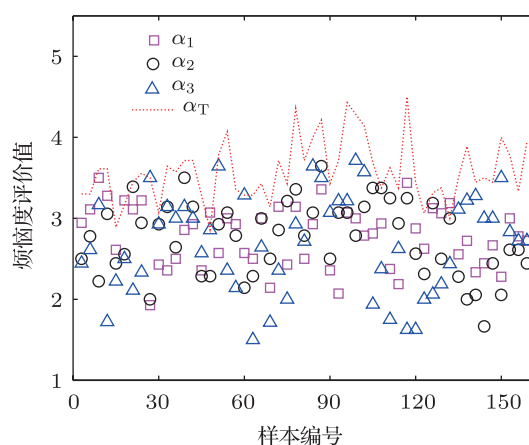


图 3 α_T 与 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的关系

比较 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 的最大值 $\alpha_{i,max}$ 和最小值 $\alpha_{i,min}$ 、平均值 $\alpha_{i,mean}$ 和中位数 $\alpha_{i,median}$ 、极差 ρ_α 和标准差 $\alpha_{i,SD}$ 与 α_T 的大小可知, 显然 $\alpha_{i,max}$ 与 α_T 最为接近, 如图 4(a) 所示. 以 $\alpha_{i,max}$ 预测 α_T , 预测误差 ε_α 随 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 的极差 $\rho_\alpha (\rho_\alpha = \alpha_{i,max} - \alpha_{i,min})$ 的变化情况如图 5 所示. 显然, $\alpha_{i,max}$ 高估了 α_T 的实际值, 其高估程度随 $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 离散程度的增加而略有缓解. 可见, 当组合声源中每种单一噪声源独自作用时的 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 越接近, 以 $\alpha_{i,max}$ 预测该组合声源作用下 α_T 的效果越不理想. 经分析认为, 在以 $\alpha_{i,max}$ 预测 α_T 时, 除了这个致人烦恼程度最高的单一噪声源以外, 并未考虑到组合噪声源中其他单一噪声源可能对 α_T 的影响. 显然, α_T 是 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 相互作用的结果, 因而应以 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, K)$ 的线性加权和来预测 α_T .

4.2 采用多元线性回归模型预测 α_T

已知组合噪声源中每个单一噪声源单独作用时的烦恼度为 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, K)$, 采用多元线性

回归模型预测组合声源作用下的混合噪声烦恼度时,首先需要确定模型中对应 α_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 的权值 ω_i ($i = 1, 2, \dots, K$).

目前,确定权值的方法主要有主观赋权法、客观赋权法和主客观结合赋权法,其中客观赋权法主要包括变量系数法、夹角余弦法和熵值法 [18].

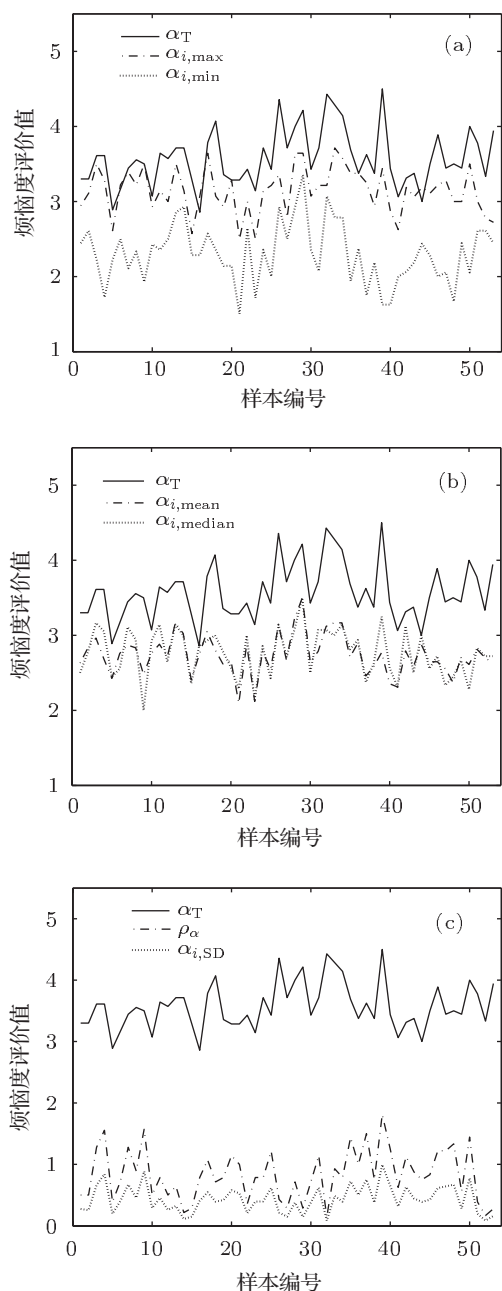


图4 α_i ($i = 1, 2, 3$) 与 α_T 的比较 (a) α_i 的最大值 $\alpha_{i,max}$ 、最小值 $\alpha_{i,min}$ 和 α_T ; (b) α_i 的平均值 $\alpha_{i,mean}$ 、中位数 $\alpha_{i,median}$ 和 α_T ; (c) α_i 的极差 ρ_α 、标准差 $\alpha_{i,SD}$ 和 α_T

本文中,在确定权值 ω_i ($i = 1, 2, 3$) 时,随机挑选了 20 个混合噪声样本(约占混合噪声样本总数的 1/3)和与之相应的 60 个单一噪声样本. 因 α_i

($i = 1, 2, 3$) 对 α_T 的作用规律未知,故研究时将 α_i ($i = 1, 2, 3$) 分别看作效益型、成本型和固定型指标. 随后,分别以极差变换法和线性比例变换法对评价数据进行无量纲化处理. 然后,分别采用变量系数法和夹角余弦法获得对应 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 的权值 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$. 显然,采用不同的评价数据处理方法可以获得不同的权值向量 $\Omega_{mnl} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$, 所得结果如表 1 所列. 在此,向量下标 $m = 1, 2, 3$ 分别表示效益型、成本型和固定型三种指标类型; $n = 1, 2$ 分别表示所采用的极差变换法和线性比例变换法两种无量纲化处理方法; $l = 1, 2$ 对应变系数法和夹角余弦法两种权值确定方法. 最后,将 Ω_{mnl} 代入 (1) 式,计算得到评价者在人工合成的混合噪声样本作用下的总烦恼度. 比较模型预测值 α'_T 与主观实验评价价值 α_T 的接近程度,即可确定相对理想的权值向量.

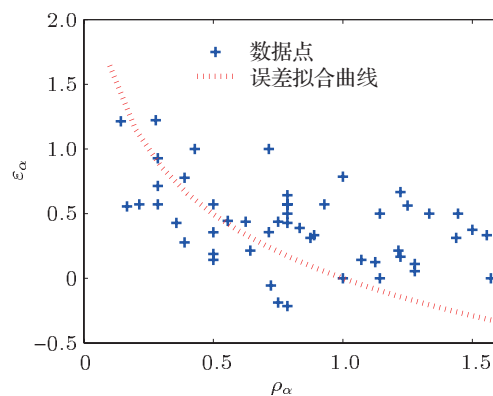


图5 以 $\alpha_{i,max}$ ($i = 1, 2, 3$) 预测 α_T 时的预测误差分析

对所有混合噪声样本,利用具有不同权值向量的多元线性回归模型计算 α'_T ,通过 α'_T 预测评价者在人工合成的混合噪声样本作用下的烦恼度评价价值 α_T . 分析权值向量取不同值的情况下该模型在预测 α_T 时的平均绝对误差与平均相对误差,不同模型预测性能的比较结果如表 2 所列.

由表 2 中的数据可知,在综合评价 α_T 时,需将 α_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 作为成本型指标,以所有评价者对 α_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 评价结果的算术平均值作为对应该指标的值,采用极差变换法对所有评价数据进行无量纲化处理. 此后,以变量系数法确定权值向量 Ω_{211} ,将 Ω_{211} 代入多元线性回归模型预测 α_T ,模型预测值 α'_T 与评价价值 α_T 的平均误差为 0.24,平均相对误差为 6.79%. 由此可知,采用 Ω_{211} 的预测效果最好,如图 6 所示.

表 1 利用评价数据确定权值向量的具体方法及相应的权值向量表示

α_i 指标类型 (向量表示)	评价数据的无量纲化处理方法 (向量表示)	确定权值的方法 (向量表示)
效益型 Ω_1	极差变换法 Ω_{11}	变量系数法 Ω_{111} 夹角余弦法 Ω_{112}
	线性比例变换法 Ω_{12}	变量系数法 Ω_{121} 夹角余弦法 Ω_{122}
成本型 Ω_2	极差变换法 Ω_{21}	变量系数法 Ω_{211} 夹角余弦法 Ω_{212}
	线性比例变换法 Ω_{22}	变量系数法 Ω_{221} 夹角余弦法 Ω_{222}
固定型 Ω_3	极差变换法 Ω_{31}	变量系数法 Ω_{311} 夹角余弦法 Ω_{312}
	线性比例变换法 Ω_{32}	变量系数法 Ω_{321} 夹角余弦法 Ω_{322}

表 2 具有不同权值向量的多元线性回归模型预测性能比较

权值向量	ω_1	ω_2	ω_3	平均绝对误差	平均相对误差/%
Ω_{111}	0.32	0.31	0.37	0.24	6.83
Ω_{112}	0.35	0.35	0.30	0.25	6.93
Ω_{121}	0.32	0.32	0.36	0.24	6.83
Ω_{122}	0.35	0.35	0.30	0.24	6.93
Ω_{211}	0.31	0.29	0.40	0.24	6.79
Ω_{212}	0.35	0.35	0.30	0.24	6.94
Ω_{221}	0.25	0.32	0.43	0.24	6.82
Ω_{222}	0.35	0.35	0.30	0.24	6.93
Ω_{311}	0.25	0.31	0.44	0.24	6.83
Ω_{312}	0.35	0.36	0.29	0.25	6.95
Ω_{321}	0.53	0.23	0.24	0.27	7.72
Ω_{322}	0.17	0.43	0.40	0.24	6.82

5 结论

本文利用主观评价实验对固定播放时长的单一噪声样本与人工合成的混合噪声样本致人烦恼的具体程度展开评价, 获得大量评价数据. 在此基础上利用多元线性回归模型, 研究了在已知单一声源烦恼度 α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$) 的前提下预测混合噪声烦恼度 α_T 的问题. 研究表明: 混合噪声烦恼度与单一噪声烦恼度密切相关; α_T 高于 α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$) 且与 $\alpha_{i,\max}$ 最为接近; $\alpha_{i,\max}$ 会高估 α_T 的实际值, α_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 彼此越接近, 以 $\alpha_{i,\max}$ 预测 α_T 的效果越不理想. 本文所采用的以评价数据 α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$) 确定多元线性回归模型权值向量的方法, 简单易行, 可操作性强. 以此为基础, 利用多元线性回归模型可以成功预测不同类型、不同数量的单一噪声源同时作用下的总烦恼度. 另外, 本文采用了更加合理的主观评价实验流程和科学有效的评价数据处理方法.

本文所开展的研究工作不但弥补了混合噪声烦恼度研究中的不足, 而且能够为制定合理的噪声控制方案、开展有效的噪声控制提供科学的理论依据. 相关研究结果不但可以直接应用于复杂噪声源、复杂环境下的噪声评价与预测, 还可为复杂声源的噪声控制提供新的准则, 为目前正在开展的声景观设计研究提供理论指导.

混合噪声烦恼度与组合声源中单一噪声源的类型、组合方式及具体数量均有关系. 本文工作仅模拟了真实环境中最简单的声源组合方式, 即多个

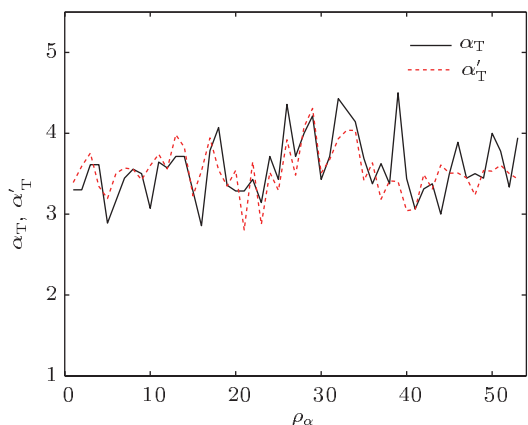


图 6 多元线性回归模型的预测值 α'_T 与实验评价价值 α_T 的比较

声源同时作用. 事实上, 大量声源连续作用或个别声源间歇作用常会引发更高的烦恼度, 这是由于大量声源连续作用会延长混合噪声的作用时间, 个别声源间歇作用会增强混合噪声的起伏性和波动性.

因此, 后续研究应深入探讨声源数量及其组合方式可能对混合噪声声学特性的影响, 从混合噪声自身的声学特性出发研究混合噪声特性与总烦恼度关系.

-
- [1] Taylor S M 1982 *J. Sound Vib.* **81** 123
- [2] Vos J 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 3330
- [3] Kryter K D 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 2601
- [4] Favre C M, Premat E, Aubrée D, Vallet M 2005 *Acta Acust.* **91** 613
- [5] Favre C M, Premat E, Aubrée D 2005 *Acta Acust.* **91** 626
- [6] Schultz T J 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **64** 377
- [7] Fields J M 1994 *A Review of An Updated Synthesis of Noise/Annoyance Relationships* (Atlanta: Georgia Institute of Technology)
- [8] Berglund B, Berglund U, Goldstein M, Lindvall T 1981 *J. Acoust. Soc. Am.* **70** 1628
- [9] Yan L 2011 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [闫靛 2011 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [10] Bottom C G 1971 *J. Sound Vib.* **19** 473
- [11] Powell C A 1979 *A Summation and Inhibition Model of Annoyance Response to Multiple Community Noise Sources* (Hampton: Langley Research Center)
- [12] Rice C G 1985 *Proceedings of the Internoise'85* (Munich: Bundesanstalt für Arbeitsschutz) p913
- [13] Yano T, Kobayashi A 1990 *Proceedings of the Internoise'90* (Gothenburg: Acoustic Society of Sweden) p1189
- [14] Yan L, Chen K A, Jin Y 2006 *Appl. Acoust.* **25** 319 (in Chinese) [闫靛, 陈克安, 金义 2006 应用声学 **25** 319]
- [15] Chen K A, Ma M, Zhang Y N, Wang N, Yan L 2008 *Acta Acoust.* **33** 348 (in Chinese) [陈克安, 马苗, 张燕妮, 王娜, 闫靛 2008 声学学报 **33** 348]
- [16] Huang Y, Chen K A, Yan L, Wu Q L 2008 *Acta Acoust.* **33** 443 (in Chinese) [黄煜, 陈克安, 闫靛, 吴群力 2008 声学学报 **33** 443]
- [17] Lin H S, Xia S J 2005 *Chin. J. Health Statist.* **22** 397 (in Chinese) [林汉生, 夏苏建 2005 中国卫生统计 **22** 397]
- [18] Zhang D F, Zhou Y 2010 *Application of Matlab on Statistical and Engineering Data* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p148 (in Chinese) [张德丰, 周燕 2010 详解 Matlab 在统计与工程数据分析中的应用 (北京: 电子工业出版社) 第 148 页]

Noise annoyance from a mixture of multiple single sources: rating and prediction*

Yan Liang^{1)2)†} Chen Ke-An¹⁾ Ruedi Stoop²⁾

1) (College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

2) (Institute of Neuroinformatics, Swiss Federal Institute of Technology Zurich , Zurich 8057, Switzerland)

(Received 21 October 2011; revised manuscript received 20 December 2011)

Abstract

In this paper, noise annoyance from a mixture of multiple single sources is studied with emphasis on subjective evaluation and objective prediction. From 10 subjects, annoyance values for all single and artificially combined noise samples are collected using the semantic differential method with a suitable verbal scale. We propose a novel method to determine the utility weights of a multivariate linear regression model by comparing the total annoyance α_T of the combined noise sample to every single annoyance α_i from its componential single sound sample. This method predicts α_T on the premise of given α_i . Our results demonstrate that the multivariate linear regression model and the calculated utility weights provide a good and conceptually simple framework to predict the total noise annoyance.

Keywords: noise annoyance, subjective rating, predictive modeling, multivariate linear regression

PACS: 43.50. Yw, 43.50.Ba, 43.50.Qp, 43.50.Rq

* Project supported by the Foundation for Fundamental Research of Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. JC201025).

† E-mail: lian1832@hotmail.com