

◇ 研究报告 ◇

听觉感知中的噪声特性语义描述及其分析

李 豪¹ 陈克安^{1†} 尹秋阳¹ 张 琚¹ 俞贵涛² 殷久超² 李 晗¹

(1 西北工业大学航海学院 西安 710072)

(2 杭州方太智能科技有限公司 杭州 311200)

摘要: 基于听觉感知的噪声语义描述是噪声声品质研究的基础性问题,已有研究未将语义描述与噪声来源、频谱特性以及产品运行状态等物理信息联系起来。该文分别针对飞机舱内噪声、车辆噪声和空气净化器噪声这 3 组典型噪声开展了主观评价实验,并通过多维尺度分析和主成分分析描述了 3 组噪声的语义空间,系统分析了不同类型噪声的描述词,同时解释了描述词与噪声物理属性之间的联系。研究发现:飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声可以由 4 维、4 维和 3 维语义空间进行描述;不同类型噪声在语义描述中具有共性与个性,3 组噪声语义的主要维度均与嘈杂感相关,而噪声的个性描述词与其声源的物理属性密切相关;进行声品质建模及应用时,应同时考虑噪声共性和个性描述词对听觉感知的影响,采取有针对性的措施以提升产品声品质。该文从听觉感知的角度进行了噪声特性的语义描述和分析,研究结果可为产品声品质以及噪声控制研究提供帮助。

关键词: 声品质;主观评价;语义空间;听觉感知

中图法分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)01-0018-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.003

Semantic description and analysis of noise characteristics in auditory perception

LI Hao¹ CHEN Ke'an¹ YIN Qiuyang¹ ZHANG Jun¹ YU Guitao² YIN Jiuchao² LI Han¹

(1 School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2 Hangzhou Fotile Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: Noise semantic description based on auditory perception is a basic problem of product sound quality research. Previous studies have not linked the semantic description with specific information such as noise source, spectrum characteristics and product operation status. Therefore, this paper carried out three subjective evaluation experiments on three groups of typical noise: aircraft cabin noise, vehicle noise and air purifier noise, described the semantic space of three groups of noise through multi-dimensional scale analysis and principal component analysis, and systematically analyzed the descriptors of different types of noise, at the same time, the relationship between descriptors and physical properties of noise is explained. It is found that: aircraft cabin noise, vehicle noise and air purifier noise can be described by 4-D, 4-D and 3-D semantic space. Different types of noise have commonness and individuality in semantic description. The main dimensions for the three groups of noise are related to the sense of noisy, and the individual descriptors of noise are closely related to the physical properties of their sound sources. When modeling and applying sound quality, the effects of noise commonness and individuality descriptors on auditory perception should be considered at the same time, and targeted measures should be taken to further improve the sound quality of products.

2021-11-09 收稿; 2022-01-14 定稿

作者简介: 李豪 (1997-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 研究方向: 环境声的听觉感知与声品质评价。

† 通信作者 E-mail: kachen@nwpu.edu.cn

In this paper, the semantic description and analysis of noise characteristics are carried out from the perspective of auditory perception. The results can provide help for the research of product sound quality and noise control.

Keywords: Sound quality; Subjective evaluation; Semantic space; Auditory perception

0 引言

在日常生活中,人们会接触到包括噪声在内的各种各样的声音。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]。不同响度的噪声会带来完全不同的听觉感受,但是很多噪声在响度相同时,仍然存在较大的听觉差异,这种差异源于除响度之外的其他听觉属性。经过多年的研究,研究者已经建立了响度和音调的评价体系^[2-3],而目前还没有定量分析音色的相关标准,美国国家标准协会将音色定义为“具有相同响度和音调的两种声音在听觉感知属性上显示出的差异^[4]”。可以看出,音色作为一个多维参量,难以定量刻画和描述。以往对于噪声源的描述是通过物理属性或频谱分布进行的,例如计算噪声的声压级、声功率级等,观察频谱来确定是否含有线谱成分等,并未将人的听觉感知与客观描述对应起来。

声品质作为心理声学领域中不可或缺的一部分,能够站在主观感知的角度更真实地反映人对声刺激的感受,有利于设计和制造出更符合人类需求的产品。目前,声品质技术已广泛应用于飞机舱室、汽车、家用电器等行业。Li等^[5]研究了基于感知差异的吸油烟机噪声建模,建立了不同环境下基于反向传播(Back propagation, BP)神经网络的吸油烟机声品质模型,并利用模型对声源特性和降噪措施进行分析。噪声语义细分是建立产品声品质模型的基础,在研究过程中起着至关重要的作用。杨立学等^[6]基于成对比较法进行了飞机舱内声品质评价。张勇等^[7]基于径向基函数(Radial BASIS FUNction, RBF)神经网络对车内声品质进行了预测及分析,利用主观评价实验结果作为数据输出,分析车辆噪声源,用于指导产品声品质的提升。

主观评价实验作为获取真实主观感受的重要手段,在听觉感知研究中起着关键作用。对于语义描述的研究,常用的主观评价方法包括语义细分法^[8]、基于成对比较的多维尺度分析法^[9](Multi-dimensional scaling, MDS)等。通过主成分分析(Principle component analysis, PCA)等方法建立噪声感知空间,从不同维度对声源的物理属性进行具体解释。因此,分析机电产品在不同状态下噪声

语义描述的异同,在声品质模型的建立及其应用等多方面都十分重要。

在之前的研究中,研究者们以建立噪声评价词库和主观评价实验的方式对个别类型的噪声进行了研究,基于客观参量对噪声的听觉属性进行了量化表达,但未将语义描述与噪声来源、频谱特性以及产品运行状态等具体信息联系起来。本文基于中文描述词,分别针对飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声,研究3类噪声听觉感受的语义特性。民用飞机分为涡桨和涡扇两类,其舱内噪声响度大、音调感强,本文主要选取民用涡扇飞机舱内噪声进行实验;空气净化器噪声状态稳定、响度较小;车辆噪声响度介于两者之间,但工作状态种类多,相互切换的速度较快。可以看出,这3类噪声具有典型性,与人的日常生活密切相关,其物理属性和感知属性差异明显,代表性强。目前,已有研究者分别建立了车内噪声^[9-10]、飞机舱内噪声的描述词库^[11-12],但针对不同类型噪声在不同运行状态下语义描述的比较研究还很少。因此,本文从该角度出发,研究不同噪声的声源特性、语义描述、听觉感知规律及其应用,从语义分析中找出其共性与个性,可用于指导产品声品质模型的建立及其应用。

1 主观评价实验

为了对不同声源特性开展语义描述,对飞机舱内噪声、车辆噪声和空气净化器噪声开展主观评价实验。这3类噪声是飞行器、道路交通工具及家用电器这3种典型机电产品噪声的代表,它们是目前声品质研究中涉及最多的产品噪声类型,另外,这3类噪声在物理属性和感知特性方面存在一定差异,具有典型性(详见表1)。车辆噪声的主观评价实验先已由作者所在课题组进行过^[9]。本文先对实验中使用的3种噪声样本进行介绍,然后详述飞机舱内噪声和空气净化器噪声的主观评价实验完成情况。本文设计并完成了3组主观评价实验,分别是:(1)听音选词实验,用于选择恰当的听觉描述词。(2)成对比较实验,被试对声样本的不相似度进行评分,并通过MDS分析获取噪声的语义空间维度数。(3)语义细分实验,被试对获取的听觉描述词进行评分,并对实验结果进行PCA获得语义空间的主成分。为

了获得不同噪声源听觉感知的异同,本文与文献[9]中的车辆噪声的主观评价实验采取相同的策略。所有的实验均严格执行实验讲解、被试训练、问题解答和正式实验这4个环节,确保实验数据的准确性。

表1 3种不同类型噪声的物理属性与感知特性
Table 1 Physical properties and perceptual characteristics of three different types of noise

噪声类型	物理属性	感知特性
飞机舱内噪声	强度大、有线谱	响度大、音调感较明显
车辆噪声	强度中等、线谱少	响度中等、音调感较弱
空气净化器噪声	强度小、无线谱	响度小、无音调感

1.1 实验准备

1.1.1 实验声样本

本文使用飞机舱内噪声、车辆噪声和空气净化器噪声开展主观评价实验,实验声样本说明见表2。

(1) 飞机舱室噪声

实验所用飞机舱内噪声样本源于现场实录噪声和商业记录噪声。首先,通过现场实测,获得波音和空客在巡航、爬升、滑跑起飞、下降等各个工况下的噪声数据。测点均匀分布于客舱的各个位置,采用PULSE 3560B系统和B&K 4188传声器采集声信号,采样频率为65.536 kHz。由于实测条件限制,其余声样本从Sound Idea公司的商业记录中购买,

均来自典型的涡扇飞机。正常工况下,涡扇飞机的舱内噪声主要来自辅助动力装置、发动机、外部气动和空调系统等^[13]。

(2) 车辆噪声

城市车辆噪声一般包括公共汽车、小汽车、摩托车、卡车等的噪声,而且车辆在不同行驶状态时引起的烦恼度不同。为保证声样本的全面性和典型性,在Sound Idea公司发布的General 6000标准声效库中,选择卡车、货车、公共汽车、小轿车和摩托车等典型车辆,每种车型包括不同的行驶状态^[9-10]。车辆噪声主要来自于发动机、排气系统、风扇、传动系统、轮胎、制动系统、车身结构等^[14]。

(3) 空气净化器噪声

选择国内市场常见的主流空气净化器品牌的样机。在半消声室内放置空气净化器,使用海德声科公司的人工头及SQuadriga III采集回放系统在不同的测点录制不同档位下空气净化器正常使用时的双耳声样本,采样频率为44.1 kHz。

为获得等时长的稳态噪声,对获得的声样本进行截取,一般情况下,截取声样本的时长为5 s^[9]。为保证成对比较实验过程中被试注意力集中在噪声的音色差异中,对声样本进行等响处理,采用Moore模型的响度计算方法^[15],将所有声样本的响度调整为10 sone。空气净化器噪声主要是由风机的转动产生的。

表2 实验声样本说明

Table 2 Description of experimental sound samples

噪声类型	样本描述	样本个数
飞机舱内噪声	大型客机在滑跑-起飞、爬升、巡航、下降、落地等状态下的声样本	48
车辆噪声	公共汽车、小轿车、摩托车、货车、吉普车、卡车在启动、刹车、匀速行驶、快速行驶等运行状态下的声样本	36
空气净化器噪声	国内主流品牌空气净化器在弱档、中档、强档等档位下的声样本	48

1.1.2 被试及实验环境

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(参见国家标准GB/T 16296.1-2018)的在校大学生以及研究生。在实验前对所有被试进行听力测试,确保在100~8000 Hz的频率范围内所有被试的听阈级都低于15 dB。被试在实验期间无不适症状。实验共选取24名被试,男女比例为1:1。按照实验时长支付被试费。

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,而且可有效隔离外界噪声干扰且信号失真小。利用计算机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(HEADlab-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。

1.2 主观评价实验

1.2.1 听音选词实验

目前已有文献总结了噪声属性描述词库 [11,16], 为了保证所选的描述词涉及噪声的各个属性, 同时避免描述词冗余和实验量的增加, 通过听音选词实验的方式确定所有描述词的选择概率, 以每类词汇中选择概率最高的描述词, 作为语义细分法实验的评价词汇。该实验需要被试基于实验噪声的整体感知对词汇进行选择, 因此选择不同状态下的多个典型噪声样本进行实验, 每个声样本的时长为 5 s。实验所用的 2 级评价尺度及评分设置如表 3 所示。被试需要对每个描述词是否适用于描述空气净化器噪声进行评价, “1” 表示适用, “2” 表示不适用。

表 3 听音选词实验评价尺度及评分设置

Table 3 Evaluation scale and score setting of experiment of semantic selection by listening

适用	不适用
1	2

1.2.2 成对比较实验

从所有声样本中选择出 15 个听起来具有明显差异的声样本进行实验, 包括不同工况、不同机型的噪声样本。实验声样本时长均调整为 5 s, 响度值调整为一致。将声样本随机组合成 152 对声音, 其中包括 105 对不同声音的比较 ($i-j$ 比较)、15 对相同声音自身的比较 ($i-i$ 比较) 以及用于数据一致性检验的 32 对不同回放顺序声音的比较 ($ij-j_i$ 比较)。实验采用 5 级评价尺度, 评价尺度如表 4 所示。实验过程中, 被试每次听到一对声音, 第一个声音播放后间隔 2 s 播放第二个声音, 每对声音播放完后, 被试将有 5 s 的时间对声音的不相似度感知进行评分。

1.2.3 语义细分实验

被试依据个人的真实感受, 采用 1.2.1 节获得的描述词, 对选定的 15 个声样本 (同成对比较实验声

样本) 等响后进行主观感知的量值判断。评价等级定为 5 级, 见表 5。实验时, 声样本随机播放, 播放一个声样本后, 被试对描述词进行评分。以“沉闷的”为例, 被试听取声样本后, 根据对噪声“沉闷的”感知进行评分, “1” 表示相当“沉闷的”, “5” 表示相当“不沉闷的”。

表 4 成对比较实验 5 级评价尺度

Table 4 Grade 5 evaluation scale of paired comparison experiment

评价分值	1	2	3	4	5
语言描述	完全相同	有点不相似	比较不相似	很不相似	非常不相似

表 5 语义细分实验 5 级评价尺度

Table 5 Grade 5 evaluation scale of semantic differential experiment

沉闷的	1	2	3	4	5	不沉闷的
	相当	比较	差不多	比较	相当	

2 噪声源特性的语义描述

基于上述内容以及文献 [9] 的主观评价实验, 对实验结果进行处理后, 分别对飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声进行横向比较, 分别从听觉描述词、语义空间以及音色空间等 3 个角度进行噪声听觉感知特性的分析。

2.1 听觉描述词

基于听音选词主观评价的实验结果, 对数据进行有效性检验及剔除后, 统计出适合描述 3 类噪声的特定描述词。特定描述词从响度、音调、音色等方面对噪声进行了描述。然而, 响度在任何情况下都与噪声的烦恼度有很强的相关性, 为了深入探究不同类型噪声的听觉感知, 剔除了与响度相关的描述词后, 得出了噪声的听觉描述词, 并进一步分为两类, 体现出了 3 类噪声的共性与个性, 具体结果见表 6。第 3 节将对描述词进行详细分析。

表 6 噪声听觉描述词

Table 6 Noise auditory descriptors

噪声类型	听觉描述词	
	共性描述词	个性描述词
飞机舱内噪声	粗糙的、吵闹的、刺耳的、震颤的、闷的、低沉的、紧促的	变化的、规律的、重复的
车辆噪声	摩擦的、嘈杂的、刺耳的、震颤的、闷响的、急促的	单调的
空气净化器噪声	摩擦的、吵闹的、嘈杂的、刺耳的、震颤的、沉闷的、急促的、紧凑的	持续的

2.2 MDS不相似度分析

通过对比较实验获得有效的不相似度评分数据后,通过MDS分析,对数据进行降维处理,可以获得不同类型噪声语义空间的维度数,它是指独立描述某类噪声语义空间的独立变量个数。利用SPSS软件的MDS模块计算出不同类型噪声的正态化原始应力随维度的变化值,据此绘制出碎石图。其中,正态化原始应力是指拟合的模型距离与观测距离之间的一致性程度。如图1所示,当正态化原始

应力小于0.1时,表明模型的拟合程度达到90%以上,且碎石图中正态化原始应力的变化量逐渐变小,可以比较完整地描述噪声语义空间,通过寻找碎石图中斜率变化的“拐点”,可以发现:图1(a)从1维到4维的斜率较大,4维到5维的斜率变化趋于平缓,图1(b)从4维到5维的斜率趋于平缓,图1(c)从3维到4维的斜率变化趋于平缓,因此飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声可以分别由4维、4维和3维语义空间进行描述。

本节通过MDS分析,获取了3种典型噪声语义空间的维度数,为了进一步确定空间每个维度的具体语义描述,可以对语义细分实验结果做进一步的PCA,将主成分与具体语义描述相联系。

2.3 语义空间及其解释

听音选词实验得到的听觉描述词之间并不是相互独立的,通过对语义细分实验的评价结果进行PCA,可以获取语义空间的主成分,实现用较少的成分对噪声的听觉感知进行描述。分别对3类噪声的语义细分实验结果进行分析,提取主成分。不同类型噪声的主成分个数及累积贡献率见表7。

表7 不同类型噪声的主成分个数与累积贡献率的关系

Table 7 The relationship between the number of principal components and the cumulative contribution rate of different types of noise

噪声类型	主成分个数	累积贡献率/%
飞机舱内噪声	4	92.53
车辆噪声	4	92.66
空气净化器噪声	3	91.52

从数据处理结果可以看到:对于飞机舱内噪声来说,前4个主成分的累积贡献率可以达到92.53%,即能够解释总变异的92.53%,因此提取4个主成分来代替描述飞机舱内噪声的10个描述词;对于车辆噪声而言,前4个主成分的累积贡献率可以达到92.66%,故提取4个主成分来代替车辆噪声的7个描述词;对于空气净化器噪声,前3个主成分的累积贡献率达到了91.52%,故提取3个主成分来代替空气净化器噪声的9个描述词。显然,通过PCA获取的3类噪声主成分的个数与MDS分析获取的3类噪声语义空间的维度数一致,进一步验证了空间维度数的准确性。

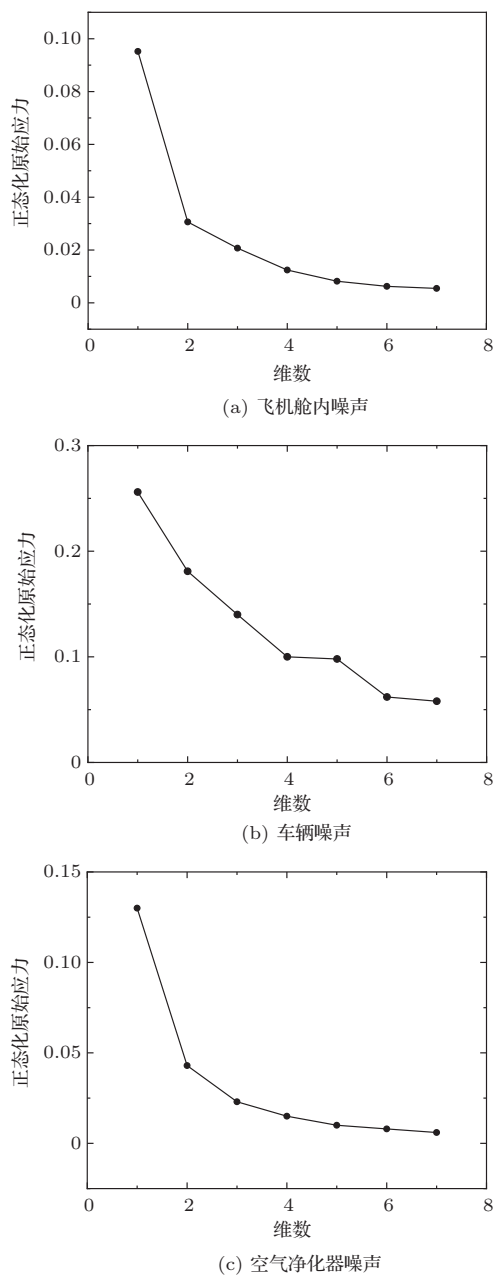


图1 不同类型噪声碎石图

Fig. 1 Gravel figure of different types of noise

之后利用方差最大正交旋转法对各因子方差进行旋转,得到旋转成分矩阵,获得3类噪声的主成分与描述词之间的相关系数。之后提取主成分的得分系数矩阵,即主成分与描述词评分之间的线性偏回归系数矩阵,由此便可获得各主成分与描述词之间的表达式。3类不同噪声的主成分与描述词的关

系见表8。之后,将MDS的结果与PCA获得的主成分进行相关分析,得知语义空间的维度数与主成分个数相等,因此可以分别用主成分解释语义空间的各个维度。表9总结了3种不同类型噪声语义空间维度与听觉描述词的对应关系,以及噪声各维度的物理意义。

表8 不同类型噪声的主成分与描述词的关系

Table 8 The relationship between principal components and descriptors of different types of noise

噪声类型	主成分和描述词的关系
飞机舱内噪声	$A_1 = 0.18 \times V_{\text{吵闹的}} + 0.17 \times V_{\text{粗糙的}} + 0.21 \times V_{\text{刺耳的}} + 0.21 \times V_{\text{紧促的}}$
	$A_2 = 0.87 \times V_{\text{震颤的}} + 0.41 \times V_{\text{变化的}}$
	$A_3 = 1.03 \times V_{\text{重复的}}$
	$A_4 = 0.57 \times V_{\text{闷的}} + 0.71 \times V_{\text{低沉的}} - 0.56 \times V_{\text{规律的}}$
车辆噪声	$B_1 = 0.22 \times V_{\text{刺耳的}} + 0.41 \times V_{\text{嘈杂的}} + 0.54 \times V_{\text{震颤的}}$
	$B_2 = 0.41 \times V_{\text{摩擦的}} - 0.82 \times V_{\text{单调的}}$
	$B_3 = -0.86 \times V_{\text{闷响的}}$
	$B_4 = 1.10 \times V_{\text{急促的}}$
空气净化器噪声	$C_1 = 0.18 \times V_{\text{刺耳的}} + 0.17 \times V_{\text{急促的}} + 0.17 \times V_{\text{吵闹的}} + 0.19 \times V_{\text{嘈杂的}}$
	$C_2 = 0.56 \times V_{\text{持续的}} + 0.29 \times V_{\text{紧凑的}} - 0.40 \times V_{\text{摩擦的}}$
	$C_3 = 0.77 \times V_{\text{震颤的}} + 0.43 \times V_{\text{沉闷的}}$

表9 噪声语义空间维度及其物理解释

Table 9 Semantic spatial dimension of noise and its physical interpretation

噪声类型	语义空间维度	主成分	听觉描述词	物理意义
飞机舱内噪声	维度1	A_1	吵闹的、粗糙的、刺耳的、紧促的	飞机舱内噪声嘈杂和刺耳的程度以及给人不舒适的感觉
	维度2	A_2	震颤的、变化的	飞机舱内由于发动机转动及不平稳气流引起的振动
	维度3	A_3	重复的	飞机运行状态无明显变化带来的重复感
	维度4	A_4	闷的、低沉的、规律的	低频能量较多带来的沉闷感
车辆噪声	维度1	B_1	嘈杂的、刺耳的、震颤的	车辆噪声的嘈杂和刺耳程度
	维度2	B_2	摩擦的、单调的	在时间上重复且缺少变化
	维度3	B_3	闷响的	反映部分噪声的低沉程度
	维度4	B_4	急促的	交通工具快速行驶或运转
空气净化器噪声	维度1	C_1	刺耳的、急促的、吵闹的、嘈杂的	空气净化器噪声嘈杂和刺耳的程度且给人不舒适的感觉
	维度2	C_2	持续的、紧凑的、摩擦的	整体比较平稳但粗糙的感受
	维度3	C_3	震颤的、沉闷的	低频声能量高且成分多的特性

3 不同类型声源噪声的语义分析

3.1 描述词分析

由表6可得,对声音进行等响处理后,排除了响度对于噪声的影响,由此展现出3类噪声的语义特征。从实验结果可以看出:(1)排除响度影响后的噪声体现了3类噪声的共性,如“闷的”、“刺耳的”等,

也体现出了低频噪声对人产生的负面影响。低频噪声的A声级往往较低,在产品设计时容易被忽略,却阻碍了产品声品质的提升。(2)虽然3类噪声的描述词都有“震颤的”,但引起震颤的来源不同。飞机舱内的震颤可能是辅助动力装置、发动机等大型器械振动造成的,车辆的震颤可能是路面不平稳及地面交通状态多变引起的,空气净化器的震颤可能是内部风机转动引起的轻微震颤感。(3)3类噪声的描

述词也体现出了“吵闹的”、“嘈杂的”等共性,但由于声环境的不同,相同描述词所对应的状态也有所不同。飞机舱内的吵闹是外部气动噪声以及空调系统所引起的,车辆的嘈杂是车内车外复杂的交通环境以及风扇、排气系统等造成的,空气净化器的吵闹主要是风机的噪声与室内安静环境形成对比产生的。(4) 不同噪声源的语义描述与噪声源的物理属性相关,例如:飞机舱内噪声可用“变化的”、“规律的”、“重复的”来描述,是辅助动力装置以及发动机等旋转机械在运行状态下产生的;车辆噪声可用“单调的”来描述,是发动机的运行以及车身结构的振动造成的;空气净化器噪声可用“持续的”来描述,是其本身运行状态比较平稳,风机持续转动产生的。

3.2 噪声听觉属性分析

不同类型的噪声源在不同状态下会展现出不同的听觉属性。从表7可以看出,在累计贡献率接近时,不同类型的噪声可以用不同的维度来描述。例如:在累计贡献率接近92%时,飞机舱内噪声和车辆噪声需要用4维空间来表征,而空气净化器噪声只需要3维空间便可解释其语义描述。相比而言,飞机和车辆的运行状态变化较多,其语义空间包含的信息量大于空气净化器。飞机有巡航、爬升、滑跑起飞、下降等多种工况,相比而言其强度较大,且由于大型机械的运转,可能会产生音调感;而车辆在运行过程中也会遇到加速、减速、刹车等多种运行状态,噪声强度介于飞机舱内噪声和空气净化器噪声之间;而空气净化器在室内运行过程中除了档位的变化外,噪声的成分及运行状态都比较稳定,且噪声强度小。因此,不同噪声可以根据其噪声属性,使用不同维度的感知空间来描述。

同时,本文基于主观评价实验的结果,利用PCA,确定了3类典型噪声源在每一个维度下的语义描述。不同类型噪声源的主成分与描述词之间的具体关系见表8。根据听音选词实验选出的描述词之间存在一定的信息重叠,例如“吵闹的”和“嘈杂的”,两者之间存在较强的相关性。PCA常被用来判断某种事物或现象的综合指标,并且给综合指标所包含的信息以适当的解释,从而更加深刻地揭示事物的内在规律。也就是找到互不相关的主成分,消除多重共线性带来的弊端。表9对3种典型噪声源的每一个维度进行了详细的解释,从噪声源属性、运行状态、环境因素等角度,分析噪声的语义描述。

因此,在产品声品质开发过程中,可以根据每一个维度噪声的特点,采取有针对性的措施,从根本上提升产品声品质。

从表9可以得出,3类噪声的第一个维度都包含“嘈杂的”、“吵闹的”等描述词,且第一个维度对于整个语义空间的贡献率是最高的,同时也说明,对这3类噪声源进行噪声控制时,应首先从引起嘈杂和吵闹的部件着手。对于飞机舱内噪声而言,发动机的降噪技术已经比较成熟,舱内噪声显著降低,由此,空调系统引起的噪声应受到更多的重视;同理,应更加关注车辆排气系统及风扇的降噪;空气净化器的噪声与其净化效果在一定程度上相互制约,风机转速提升会带来净化能力的改善,但也会降低产品的声品质,因此,应找到一个最优化的处理方式,使二者达到动态平衡。同时,从表8主成分与描述词的关系式可以看出,3类噪声的个性描述词和共性描述词同时作用,描述了不同的空间属性,因此,更多的时候,应从综合的角度寻找噪声的感知描述与物理属性的联系,进而应用到产品的开发过程。

4 结论

为了更好地分析不同噪声语义描述的异同,本文以主观评价实验结果作为输出,分别研究了飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声这3种典型环境噪声的声源特性和语义描述。

(1) 从听音选词实验可以看出,不同噪声源的语义描述与噪声源的物理属性密切相关。可以通过描述词分析出噪声的共性与个性。排除响度影响后,体现出了这3类噪声所共有的特性,但不同噪声源感知同一描述词的方式不同,是由噪声强度、声源特性及其运行状态等多个属性所决定的。但这3类噪声的低频能量占比都较大,也体现出了共有的特性。

(2) 通过成对比较实验获取有效的不相似度评分数据后,进行MDS分析,对数据进行降维处理,最终确定飞机舱内噪声、车辆噪声以及空气净化器噪声语义空间的维度数。对于其他类型噪声也可以采取MDS方法,用适当的维度对噪声语义空间进行表征。

(3) 将MDS分析的结果与PCA获得的主成分进行相关分析,得知语义空间的维度数与主成分个数相同,因此可以分别用主成解释语义空间的各个维度,获取不同噪声的语义空间各个维度对应的具体描述。3类噪声的主要维度均与“吵闹的”、“嘈

杂的”、“刺耳的”有关,进行噪声控制时应首先考虑该类描述词对于听觉感知的影响,进而确定相应的噪声源或针对相应的声信号频谱特性设计有针对性的噪声控制措施。另外,对于不同类型噪声,可从个性描述词出发,采取有针对性的措施,例如飞机舱内噪声可用“变化的”来描述,因此可以从声信号的时间或频率波动上寻找相应的噪声源实施降噪措施,从而改善飞机舱内噪声声品质。基于听觉感知特性进行声学设计或噪声控制称为“基于感知的声音工程”,是目前噪声控制领域的研究热点^[17]。

通过主观评价实验结合数据处理及分析的方式,完成了基于听觉感知的噪声特性语义描述及分析,建立了听觉感知与客观描述之间的关系,进一步从感知描述的角度解释了声源的物理特性,为产品声品质以及噪声控制研究提供帮助。

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.
- [2] Moore B, Glasberg B R, Baer T. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness[J]. The Journal of the Audio Engineering Society, 1997, 45(4): 224-239.
- [3] Meddis R, O'Mard L. A unitary model of pitch perception[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(3): 1811-1820.
- [4] Bismarck G V. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1974, 30(3): 159-172.
- [5] Li H, Chen K A, Wang X, et al. A perceptual dissimilarities based nonlinear sound quality model for range hood noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(4): 2300-2311.
- [6] 杨立学, 陈克安, 李双, 等. 基于成对比较法的飞机舱内噪声音色评价与表达[C]. 中国声学学会第十一届青年学术会议会议论文集, 2015: 444-447.
- [7] 张勇, 王坤祥, 欧健, 等. 基于RBF神经网络的车内声品质预测及分析[J]. 控制工程, 2019, 26(11): 2025-2030.
- Zhang Yong, Wang Kunxiang, Ou Jian, et al. The vehicle interior sound quality prediction and analysis based on RBF neural network[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(11): 2025-2030.
- [8] 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.
- Yang Lixue, Chen Ke'an, Li Shuang, et al. Timbre parameter representations of aircraft cabin sound quality[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015, 33(3): 444-450.
- [9] 梁雍, 陈克安, 张冰瑞, 等. 车辆噪声烦恼度的音色表达[J]. 声学学报, 2016, 41(3): 442-448.
- Liang Yong, Chen Ke'an, Zhang Bingrui, et al. Timbre representation of vehicle noise annoyance[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 442-448.
- [10] 黄夙. 交通噪声烦恼度属性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- [11] 杨立学, 陈克安, 周静. 客机舱内声品质主观描述词研究[C]. 2014年全国环境声学学术会议, 2014: 52-55.
- [12] 周静. 飞机客舱噪声声品质的评价与建模[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [13] 孙学德. 民用飞机舱内噪声源测试技术研究[J]. 科技视界, 2014(17): 88-89.
- Sun Xuede. The study of commercial aircraft cabin noise resources test[J]. Science and Technology Vision, 2014(17): 88-89.
- [14] 陈兆俊. 汽车噪声源的分析与控制[J]. 汽车维修与保养, 2016(10): 58-59.
- [15] 马元锋, 陈克安. Moore响度计算模型的改进[J]. 应用声学, 2009, 28(1): 59-65.
- Ma Yuanfeng, Chen Ke'an. Revision of Moore's loudness model[J]. Journal of Applied Acoustics, 2009, 28(1): 59-65.
- [16] 陈克安, 马苗, 张燕妮, 等. 汉语语境下的车辆噪声听觉属性评价与分析[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 348-353.
- Chen Ke'an, Ma Miao, Zhang Yanni, et al. Evaluation and analysis of auditory attributes for vehicle noise based on Chinese expressions[J]. Acta Acustica, 2008, 33(4): 348-353.
- [17] Davies P. Perception-based engineering: integrating sound perception into engineering design[C]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2018: 6159-6174.