

# 便携式计算机风扇异响的心理声学建模

高玉运, 黄煜, 杜亚男, 吴海军

(上海交通大学机械与动力工程学院振动、冲击、噪声研究所, 上海 200240)

**摘要:** 风扇作为广泛应用于各个行业的零部件, 其噪声问题一直受到人们的重视。其中, 在噪声能量相对较小的设备和系统中, 风扇异响是引起投诉的重要因素。以存在不同程度异响的便携式计算机风扇为例, 研究了风扇异响的严重程度与声品质中主要心理声学参数之间的相关性, 并建立异响的主观评分同客观参数之间的线性回归模型。结果表明, 响度、尖锐度、突出比、音调度峰值频率影响异响的主观感受, 包含响度和突出比的多元线性模型能够较好地评价异响的主观严重程度。

**关键词:** 风扇异响; 心理声学; 声品质; 响度

**中图分类号:** TB52 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202311052

## Psychoacoustic modelling for abnormal noise of laptop fans

GAO Yuyun, HUANG Yu, DU Yanan, WU Haijun

(Institute of Vibration, Shock and Noise, School of Mechanical Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As a component widely used in various industries, the noise problem of fans has always attracted people's attention. In equipment with relatively low noise energy levels, abnormal noise, such as whistling, or rattlesing, from fans are key factors that lead to user complaints. Taking laptop fans with various abnormal noises as an example, the correlation between the severity of fan abnormal noise and the main psychoacoustic parameters of sound quality was studied, and a linear regression model between the subjective score of abnormal noise and the objective parameters was established. The results show that loudness, sharpness, prominence ratio, and the frequency corresponding to the maximum value of pitch affect the subjective feeling of abnormal noise. The multivariate linear model including loudness and sharpness can better evaluate the subjective score of the severity of abnormal sound.

**Keywords:** abnormal noise of fan; psychoacoustics; sound quality; loudness

从大型机械设备如飞机环控系统、发电厂中的冷却风扇、汽车空调系统等, 到小型电子设备如计算机, 风扇作为重要的散热器件是保证设备正常运转的必要零件之一。风扇运行过程中由于电机旋转以及扇叶与空气的相互作用产生旋转噪声和涡流噪声。目前针对风扇噪声的测量指标以 dBA 表示的声压级 (SPL) 为主, 大多针对风扇的噪声优化均以此作为优化设计的评价指标, 如 LI 等<sup>[1]</sup>研究了鼠笼式风扇的气动性能与噪声频谱, 通过缩短叶片长度降低其声压级; FENG 等<sup>[2]</sup>对轴流风扇的空气动力噪声进行了试验和数值研究, 开发了一种低噪声风扇。

近年来, 通过客观声品质参数来描述与评估风扇噪声弥补了以往单一准则的不足。PREZELJ 等<sup>[3]</sup>结合噪声大小控制以及噪声的心理声学特性的控制, 优化了离心风机的叶片结构, 提高了心理声学参数指标; HUANG 等<sup>[4]</sup>对吹风机的噪声不舒适度进行了研究, 分析了不同心理声学指标对不舒适度

的贡献并建立了评价模型; ZHANG 等<sup>[5]</sup>综合考虑风扇结构设计和发动机噪声质量, 提出了一种利用心理声学理论分析风扇噪声对发动机噪声质量贡献的方法。LOTINGA 等<sup>[6]</sup>总结了非常规飞机产生的噪声的测量和评估的进展, 其中无人机及其风扇噪声的主观不舒适度方面, 除响度作为主要影响因素外, 尖锐度和音调度也被认为与其密切相关。TORIJA 等<sup>[7]</sup>研究了无人机转子的声品质和一阶物理参数之间的关系, 并提出了针对转子噪声优化的心理声学烦恼度模型。

除了噪声能量, 风扇系统的异响也是引起人主观不适的重要因素。便携式计算机风扇的异响由机械系统中非正常的噪声产生, 可能源于风扇轴承磨损、风叶不平衡或其他机械故障, 在主观听觉感受上主要表现为咔哒、擦擦、口哨啸叫等特点。近年来, 随着风扇噪声辐射能量的降低, 恼人异响显得更为突出, 用户对于风扇异响的投诉逐渐增加。找出与风扇异响的严重程度关联高的客观心理声学参数,

用于异响的测量和表征成为需要解决的问题。NI 等<sup>[8]</sup>通过主观评价与车轴振动信号的卷积对车轴的声品质进行检测,以实现异响的分辨;李靖<sup>[9]</sup>对侧移式挖掘装载机动臂回转时的销轴异响进行分析,通过提高结构刚度解决了异响问题。

本文通过对存在不同程度异响的便携式计算机风扇音频的客观心理声学参数进行分析以及主观评价试验,分析了影响风扇异响严重程度的主要心理声学参数,并通过多元线性回归建立了风扇异响的心理声学模型。

## 1 方法

### 1.1 刺激

在半消声室内录制便携式计算机运行时的风扇

噪声作为试验中的刺激。参与试验的便携式计算机共有 18 台,型号相同,均为惠普(HP)公司生产的高端游戏型便携式计算机。每台计算机录制不同转速下的音频,转速包括 2700、2900、3100、3300、3500、3700、3900、4100、4300、4500、4700、4900 r/min,转速由便携式计算机的主控程序进行控制调节。将便携式计算机水平放置和倾斜放置进行录制,得到的刺激数量共计 396 个。由 2~3 名具有听音经验的试验者对以上刺激音频进行初步筛选,最终确定包含各个转速以及不同异响严重程度的刺激,共计 72 个,用于后续的主观评价试验。

具有异响的噪声刺激由惠普(HP)工程师根据用户投诉反馈和主观判断确认。图 1 列出了正常无异响(左列,转速为 2900 r/min)、中等程度异响(中间列,转速为 2900 r/min)和严重程度异响(右列,转速为 4700 r/min)的风扇噪声时域和频谱特征。

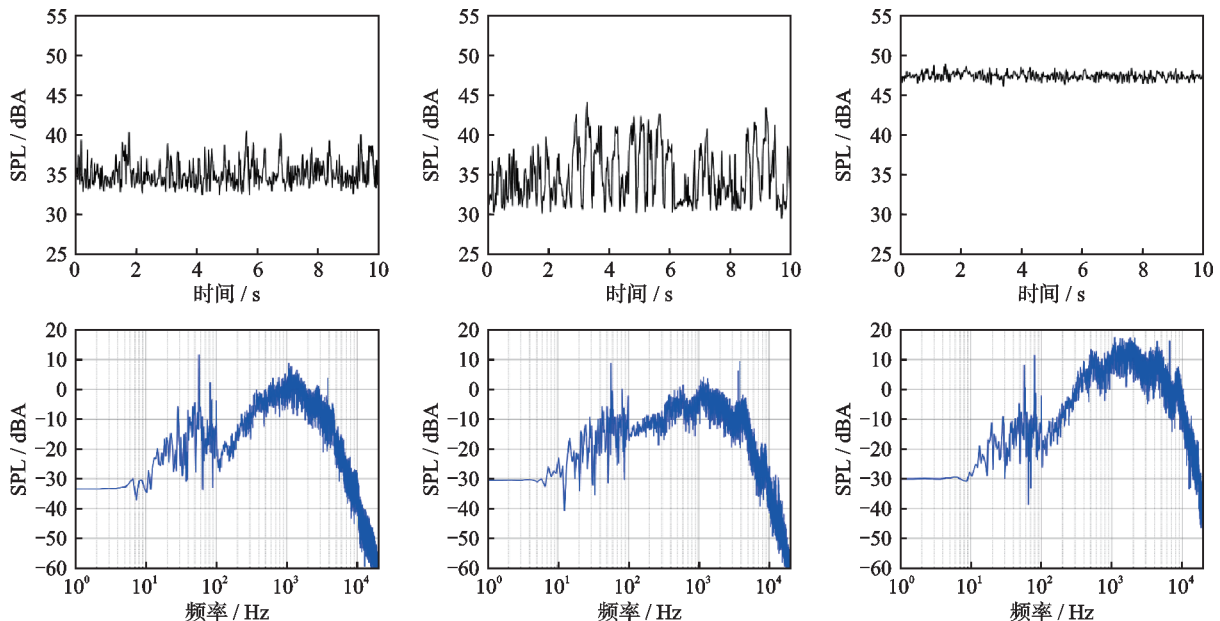


图 1 典型风扇噪声样本时域和频谱图

Fig. 1 Time-domain and frequency spectrum diagram of typical fan noise samples

### 1.2 试验装置

试验中使用 ArtemiS SUITE 软件(V12, Head Acoustics GmbH, 德国)进行录制以及后续的校准。使用 RME ADI-2DAC 声卡(RME, 德国)进行刺激的数模转化。使用 JBL 307 音箱(JBL, 美国)进行音频的重放。

### 1.3 试验内容

#### 1.3.1 校准试验

由于试验需要通过音箱直接播放音频,为弥补音箱播放时带来的高频损失<sup>[10]</sup>,在半消声室中对 1.1 节中得到的刺激音频进行校准,音箱正对人工头(HMS IV.0, Head Acoustics GmbH, 德国)进行放

置。试验场景的布置如图 2 所示。音箱与人工头的水平距离为 25 cm, 垂直距离为 45 cm。

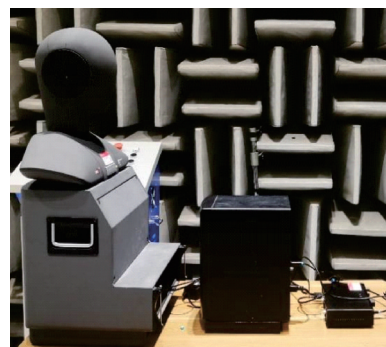


图 2 校准试验设备布置

Fig. 2 Calibration experiment equipment layout

参考原始样本的 A 计权声压级,通过电脑连接 RME ADI-2DAC 声卡,声卡连接 JBL 307 音箱播放刺激,并通过人工头在正对音箱一定距离处录制并分析所播放的音频,计算得到人工头处的 A 计权声压级大小,以此弥补音箱播放音频时的损失。设备连接情况如图 3 所示。

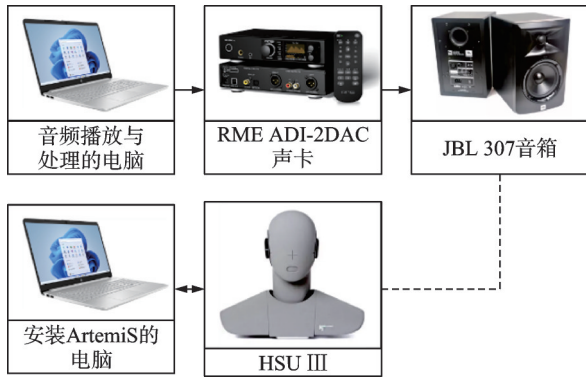


图 3 校准试验各器材连接图

Fig.3 Connection diagram of calibration experiment equipments

1.3.2 主观评价试验

主观评价试验在全消声室中进行。被试正对音箱以舒适的坐姿开始试验,被试坐下后和音箱之间的距离需要保持与校准时的人工头与音箱的距离一致。被试的前方桌面上有用于评分的键盘,被试的右方桌面有显示屏,显示当前的音频播放进度以及相关提示信息。评分量表是基于 ICBEN 标准化的用于评估不适的 0~10 数字量表<sup>[11]</sup>,它是一种广泛用于评估飞机、汽车和家用电器噪声引起的烦恼的量化方法<sup>[12-13]</sup>。本研究中所使用的量表如图 4 所示。

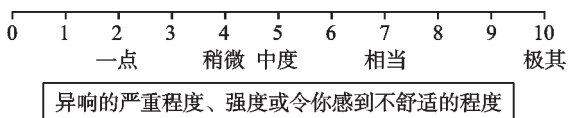


图 4 被试评分量表

Fig.4 Subject rating scale

被试在试验过程中通过事先编写的程序对挑选的 72 段刺激进行主观评价,试验过程中试验操作人员全程在场,随时解答被试的疑问。

试验流程如下:首先由试验指导人员向被试说明本次试验的目的以及注意事项。在被试准备好后,播放事先挑选出的多人综合对刺激的异响程度进行评分后的样本,包括无异响(或轻度异响)样本、中度异响样本和重度异响样本。在被试分别听取这些示例样本并确认能够判断异响后,正式开始试验。实验进行过程中,为了消除顺序效应,被试会听到随机顺序的样本音频,共计 72 个。被试在每次听完音

频后都可以选择重听一次以更加准确地评分。在有把握进行评分后,被试在评分框里填入相应的分数并点击“提交”或按回车键自动播放下一个音频。被试所打的分数实时写入记录文件中。重复以上步骤直至试验结束。试验的整体流程如图 5 所示。

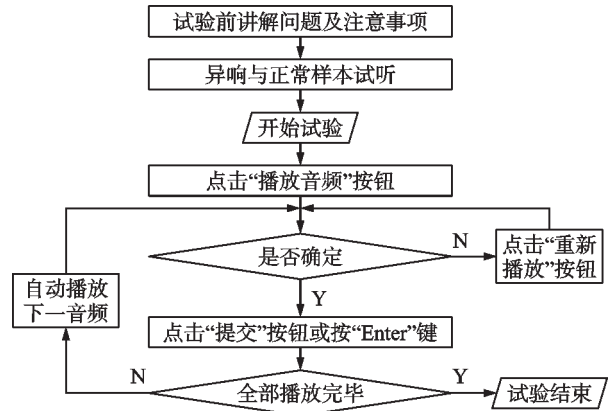


图 5 试验流程图

Fig.5 Experimental flow chart

1.4 被 试

主观试验共计招募 24 名被试,包括 12 名男性与 12 名女性。被试的年龄分布为 20 岁至 30 岁,所有被试均无任何生理或心理疾病,无任何听力问题。

1.5 数据处理

根据 ZWICKER 的心理声学的烦恼度模型<sup>[14]</sup>,响度、尖锐度、波动强度、粗糙度分别从 4 个方面描述了声音的物理特性。ECMA-418-2 标准<sup>[15]</sup>对于电子信息与通信设备的心理声学参数主要包括突出比、音调度、粗糙度。TORIJA 等<sup>[7]</sup>对无人机转子噪声的心理声学的烦恼度的研究中选择了响度、尖锐度、音调度、波动强度、粗糙度来进行建模。响度和尖锐度指标分别反映了感知的声音强弱和高频成分的占比。音调度描述了频谱不规则或离散音调是如何被感知的。波动强度和粗糙度分别解释了声音水平缓慢和快速波动的感知。在此基础上添加突出比进一步反映频谱中的单一频率成分的占比情况。综上,本文关注的客观心理声学参数有:响度、尖锐度、波动强度、音调度、突出比、粗糙度。

响度(loudness)是衡量声音强度的参数,本文选择 ISO 532-1: 2017 标准<sup>[16]</sup>进行计算。尖锐度(sharpness)是衡量声音高低音调差异的参数,它与声音的频率特征相关,描述了高频成分在声音频谱中所占比例,反映了声音信号的刺耳程度。本文根据 DIN 45692 标准<sup>[17]</sup>中的定义进行计算。波动强度(fluctuation strength)是衡量声音波动性的参数,它形容声音信号的瞬时变化造成声音的起伏感,主要

是低频区域所造成的感受,适合对 20 Hz 以下的调制声音信号进行评价。粗糙度(roughness)能够较为准确地评价 200 Hz 以下调制频率的声音,ZWICKER 最早基于试验结果提出了粗糙度的经验模型<sup>[14]</sup>,AURES<sup>[18]</sup>在其基础上提出了数值计算方法。突出比(prominence ratio)是用来评价音频中是否存在任何听觉上突出的音调的客观参数,一个音调的声压级如果相较于其邻近频带有 9 dB 及以上的差值,则认为该音调是突出的。音调度(tonality)是衡量声音音调高低的参数,它与声音的频率有关,是一个度量给定噪声频谱中音调成分相对权重的方式。它的计算是基于音调成分的幅值与相邻频率处噪声的幅值之间的比较。本文参考 ECMA-418-2 标准<sup>[15]</sup>计算波动强度、粗糙度、突出比和音调度。以上所有客观心理声学参数的计算均使用 ArtemiS 软件。

对每个刺激的主观评分值采用 Shapiro-Wilk 检验,检验是否符合正态分布(72 组,每组 24 个评分值)。若不是所有刺激的主观评分值均符合正态分布(S-W 检验),则需要选择 Friedman 检验对不同刺激的异响的严重程度是否有显著差异进行非参数检验,并选择 Spearman 相关系数来计算主观评分值和声品质参数之间的相关性。

## 2 结 果

### 2.1 主观评价结果

对 72 段刺激的得分值进行信度检验,计算其 Cronbach's  $\alpha$  系数的大小。计算得到的  $\alpha$  值为 0.931,表明结果具有很高的一致性,即主观评价的试验结果的信度较高。

按照刺激所对应的不同转速分别绘制反映得分情况的箱线图,如图 6 所示。从箱线图中可以看出,对于同一样本,存在不同被试给出的评分的方差较大的情况;从整体趋势上看,随着转速的增加,评分的中位数也随之增大,两者表现出一定的正相关性,需要后续通过统计学方法进行进一步验证说明。分析计算得到的离群值,共计 23 个,仅占样本总量的 1%,对于平均值以及中位数的影响较小,因此不做进一步的处理。

上述 72 个刺激分值的正态性检验结果中,有 37 个样本的  $p$  值大于 0.05,即不拒绝原假设;有 35 个样本的  $p$  值小于 0.05,则拒绝原假设,认为样本数据不满足正态分布。因此,后续检验选择非参数检验方法。

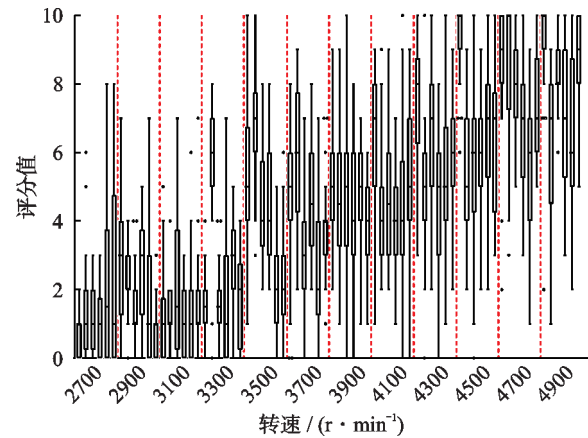


图 6 各转速下音频得分箱线图

Fig. 6 Box plot of subjective response values

### 2.2 多元线性回归建模

对 72 段音频进行心理声学客观参数的计算,包括平均 A 计权声压级、响度、尖锐度、波动强度、突出比、粗糙度、音调度共 7 个客观物理参数。对于突出比和音调度,同时关注突出比频率以及音调度最大值处对应的频率。

将计算得到的声品质参数与前述的每段音频对应的评分的中位数结合,分析主客观参数之间的相关性。由于 A 计权声压级、响度与异响主观评分值之间的相关性系数均高于 0.9,需要控制响度变量进行进一步分析。在控制响度后的主观评分和其余声品质参数之间的偏相关系数如表 1 所示。可以看出,尖锐度、突出比和音调度峰值频率与评分之间的相关性系数均高于 0.4,分析认为这 3 个参数是在控制响度这一变量后对于评分具有较大影响的关键因素。因此在后续建模过程中,除考虑响度作为建模自变量外,还应优先考虑尖锐度、突出比和音调度峰值频率作为建模的自变量,并进一步考虑这些自变量之间的相关性以及回归时的共线性程度。

当控制响度时,反映声音幅值的调制特性的粗糙度和波动强度与主观评分值之间的偏相关系数的绝对值均小于 0.4,表明在异响的可解释变量中,声音的幅值的调制特性并未占据主导地位。

### 2.3 多元线性回归模型

选择响度、尖锐度、突出比、音调度最大值处对应的频率参数作为回归的自变量,进行逐步回归的多元线性建模。由于得到的模型中响度和尖锐度、突出比间均存在较大的共线性,因此排除响度变量,综合考虑模型参数的偏相关系数、参数的 t 检验结果、方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)和模型的 F 检验结果,重新进行建模,得到模型如表 2 所示。模型的决定系数为 0.9348,表示模型中的变量能够很好地对异响的主观严重性进行解释。模型中响度的标准化系数为 0.942,可以近似认为其对于

表1 控制响度后主观评分和声品质参数之间的偏相关系数矩阵

Tab. 1 Partial correlation coefficient matrix between subjective response values and sound quality metrics after controlling loudness

	尖锐度	波动强度	突出比	突出比频率	粗糙度	音调度	最大音调度频率	转速	主观评分值
尖锐度	1.00	-0.33**	0.67**	0.54**	-0.63**	0.24*	0.38**	-0.09	0.49**
波动强度		1.00	-0.27*	-0.17	0.25*	-0.24*	-0.11	0.11	-0.13
突出比			1.00	0.27*	-0.29*	0.26*	0.49**	-0.09	0.49**
突出比频率				1.00	-0.34**	0.05	-0.04	-0.03	0.13
粗糙度					1.00	-0.45**	-0.17	0.25*	0.34**
音调度						1.00	0.13	0.16	0.23
最大音调度频率							1.00	-0.28*	0.40**
转速								1.00	0.02
主观评分值									1.00

注：“\*”表示 $p < 0.05$ ；“\*\*”表示 $p < 0.01$ 。

表2 响度、突出比多元线性回归

Tab. 2 Loudness, prominence ratio multiple linear regression

变量	估计	VIF	$R^2$
截距	-1.048***	—	
响度	1.782***	1.010	
突出比	0.2518***	1.010	
公式	$R_t = 1.78 \times L_d + 0.25 \times PR - 1.048$		0.9348***

注：“\*\*\*”表示 $p < 0.001$ ； $L_d$ 表示loudness(响度)； $PR$ 表示prominence ratio(突出比)； $R_t$ 为主观评分值。

模型的贡献占比为0.9,突出比的标准系数为0.143,即其对于评分的贡献量系数约为0.1,表明响度在模型中起到主导作用,而突出比在响度相同条件下提供了进一步的解释和判断准则。

在该模型下,响度和突出比的VIF值均小于5,可以认为模型的共线性程度不大,表明两者能够从不同层面反映异响的严重程度。模型对异响主观感受的估计值和实际试验的评分值的对比如图7所示,二者的高相关程度和小残差( $r=0.967$ ,  $RSS=25.58$ )表明了模型的良好预测能力。

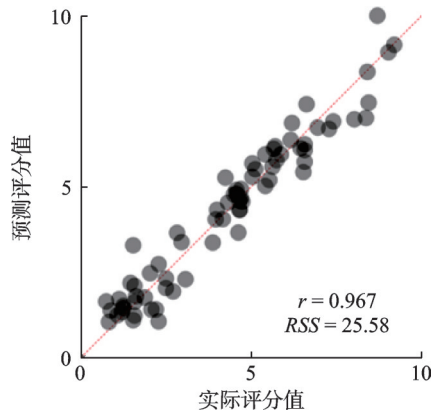


图7 异响的主观评分值和模型估计值对比

Fig. 7 Comparison between subjective assessment and model estimated values of annoyance

### 3 讨论

为了验证模型的预测能力,重新招募12名被试(6名男性,6名女性)进行主观评价试验,并利用模型计算相应样本的异响的严重程度分值,结果如图8所示。计算得到模型预测的均方误差为0.6325,这意味着模型预测的评分的平均误差在1分以内,而预测评分值和实际评分值之间的高相关程度和小残差( $r=0.946$ ,  $RSS=45.54$ )表明模型在其他数据上的良好预测能力。

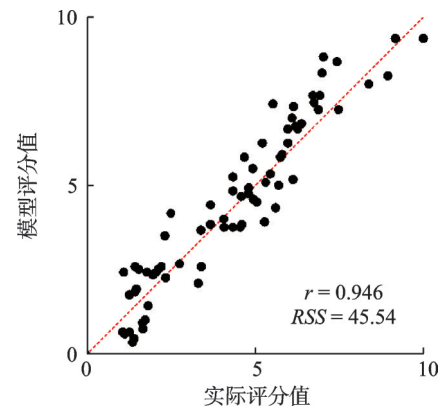


图8 模型预测能力与实际得分对比

Fig. 8 Comparison between model predictive capability and actual scores

进一步地,对建模数据进行K均值聚类分析,根据预测评分的分布,分为低、中、高3类,得到聚类分析的结果如图9所示,图中1类代表评分为中等,2类代表评分较低区间,3类代表评分较高区间。分别计算3类样本模型预测和实际评分的均方误差,得到1、2、3类的均方误差分别为0.236、0.413、0.448。

由图9可知,预测模型在中间得分区域的预测误差较小,在低分区和高分区的预测误差相较中分区较大。进一步分析低分区和高分区声样本刺激的心

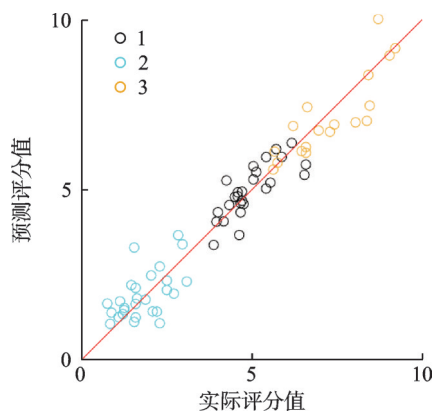


图 9 K均值聚类分析

Fig. 9 K-means clustering analysis

理声学参数及其相关系数,发现在低分区内,除响度主导外,音调度峰值频率与异响严重程度评分相关程度最高;而在高分区内,除响度外,最大突出比和尖锐度与异响严重程度评分也显著相关。这表明,响度、尖锐度、音调度峰值频率、最大突出比频率及幅值能够有效表征风扇不同转速下的异响严重程度。

根据上述讨论,响度和突出比是表征控制风扇异响的主要指标,应在保证功能的前提下使得响度越小越好。其次,可以针对突出比较大的峰值频率进行降噪设计,尽管降低单一频率或窄频范围内的能量不一定会降低响度值(甚至可能略微提高响度值),但仍可以有效控制风扇异响,提高风扇声品质。

## 4 结 论

本文研究了风扇异响的主观感受和主要心理学参数,发现异响的主观严重程度由响度主导,并受突出比影响。由此,建立了利用响度与突出比评价异响主观感受的心理声学模型,能够准确预测异响的主观严重程度,预测和实际评分值的相关系数达0.946。

### 参考文献:

[1] LI Z H, CAO W B, YE X X, et al. Experimental investigation on the noise characteristics of a squirrel-cage fan with different blade lengths[J]. *Energies*, 2023, 16(1): 69.

[2] FENG G E, CHEONG C, KIM T. Development of low-noise axial cooling fans in a household refrigerator[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(12): 2995-3004.

[3] PREZELJ J, NOVAKOVIĆ T. Centrifugal fan with inclined blades for vacuum cleaner motor[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 140: 13-23.

[4] HUANG Y, ZHENG Q J. Sound quality modelling of hairdryer noise[J]. *Applied Acoustics*, 2022, 197: 108904.

[5] ZHANG J H, LIU H, BI F R, et al. Psychoacoustic study on contribution of fan noise to engine noise[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(4): 809-815.

[6] LOTINGA M J B, RAMOS-ROMERO C, GREEN N, et al. Noise from unconventional aircraft: a review of current measurement techniques, psychoacoustics, metrics and regulation[J]. *Current Pollution Reports*, 2023, 9(4): 724-745.

[7] TORIJA A J, LI Z G, CHAITANYA P. Psychoacoustic modelling of rotor noise[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 151(3): 1804.

[8] NI Z X, HE D, WANG X F, et al. Research on the detection of axle abnormal noise based on maximum auto-correlation kurtosis deconvolution[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 203: 109228.

[9] 李靖. 侧移式挖掘装载机动臂回转时销轴异响的分析研究[J]. *工程机械*, 2010, 41(12): 26-28.

LI Jing. Analysis and research to abnormal noise during the boom swing of a backhoe loader with offset boom[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2010, 41(12): 26-28.

[10] MANOLAS C, PAULETTO S. Volume attenuation and high frequency loss as auditory depth cues in stereoscopic 3D cinema[J]. *3D Research*, 2014, 5(3): 23.

[11] FIELDS J M, DE JONG R G, GJESTLAND T, et al. Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 242(4): 641-679.

[12] DA SILVEIRA BRIZON C J, MEDEIROS E B. Combining subjective and objective assessments to improve acoustic comfort evaluation of motor cars[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73(9): 913-920.

[13] General methods for the subjective assessment of sound quality: BS 1284[S]. Geneva: Electronic Publication, 2019.

[14] FASTL H, ZWICKER E. *Psychoacoustics: Facts and Models*[M]. Heidelberg: Springer, 2007.

[15] Psychoacoustic metrics for ITT equipment-Part 2(models based on human perception): ECMA-418-2[S]. Geneva: European Computer Manufacturers Association International, 2020.

[16] International Organization for Standardization. *Acoustics — Methods for calculating loudness level — Part 1: Zwicker method: ISO 532-1:2017*[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

[17] Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness: DIN 45692[S]. DIN, 2009.

[18] AURES W. Ein Berechnungsverfahren der rauhigkeit[J]. *Acustica*, 1985, 58(5): 268-281.

第一作者:高玉运(2001—),男,硕士研究生。

E-mail: gaoyuyun@sjtu.edu.cn

通信作者:黄煜(1984—),男,博士,副教授。

E-mail: yu\_huang@sjtu.edu.cn