

引用格式: 姜惠芸, 傅秀章. 典型民用建筑设备噪声频谱特性与声品质分析探讨[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 482-489. [JIANG Huiyun, FU Xiuzhang. The analysis and discussion of noise spectrum characteristics and sound quality of typical civil construction facilities[J]. Technical Acoustics, 39(4): 482-489.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.017

典型民用建筑设备噪声频谱特性与 声品质分析探讨

姜惠芸¹, 傅秀章^{1,2}

(1. 东南大学建筑学院, 江苏南京 210096;

2. 东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 建筑设备噪声是建筑内部噪声的主要来源之一, 通过对建筑设备噪声的频谱特性和声品质进行分析, 探讨利用声品质参数对民用建筑设备噪声, 特别是低频噪声的影响进行恰当评价的可行性, 从而为后续选择合适的噪声控制措施来减少设备噪声污染提供新的思路。选取了 4 种建筑中常见的配套设备噪声源进行研究: 变频水泵、配电器、排风扇和室外空调机, 从声级指标和声品质指标两个方面对设备噪声特性进行探讨。使用 Head Acoustic 数字式人工头系统进行噪声采样, NOR140 噪声分析仪同步展开噪声测量, 通过 ArtemiS 频谱分析软件分析噪声的频谱特性, 计算各频率段的声能量分布及声品质各项指标。结果表明, 在所测量的设备噪声中室外空调机的烦恼度最大; 变频水泵的声级峰值位于高频段(15.2~24 Bark), 且高频噪声能量占比和响度分布近 50%; 除水泵外其他设备噪声声级峰值位于低频段(0~3.4Bark), 且低频段能量占比最大, 响度分布在中频段(3.5~15.2 Bark)超过 50%, 低频段接近 30%。

关键词: 设备噪声; 频谱特征; 声能量; 响度; 声品质

中图分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-04-0482-08

The analysis and discussion of noise spectrum characteristics and sound quality of typical civil construction facilities

JIANG Huiyun¹, FU Xiuzhang^{1,2}

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory of Urban and Architectural Heritage Conservation of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The noise from construction equipment is one of the main internal noises in buildings. In this article, the spectral characteristics and sound quality of construction equipment noise are analyzed, and the feasibility of using sound quality parameters to evaluate the influence of civil construction equipment noise, especially low-frequency noise, is discussed, so as to provide a new idea for selecting appropriate noise control measures to reduce equipment noise pollution in the future. Four types of common equipment noise sources in buildings are selected for the research: variable frequency pumps, power distributors, exhaust fans, and outdoor air-conditioner units, and their characteristics are discussed from two indicators of sound energy and sound quality. The 'Head Acoustic' digital artificial head system is used for sampling the noise, and the 'NOR140' noise analyzer conducts the noise measurement simultaneously. The spectrum characteristics of the noise are analyzed by the 'ArtemiS' spectrum analysis software to calculate the indicators such as sound energy distribution and sound quality of each frequency band. The results show that the noise of the outdoor air-conditioner units causes the greatest annoyance among the measured equipment noises; the peak of the sound level of the variable frequency pumps is located at high frequencies (15.2~24 Bark), the energy ratio and loudness distribution of the noise at high frequencies are nearly 50%; the peak noise levels of other equipments are located at low frequencies (0~3.4 Bark), and the proportion of sound energy is also the largest; the loudness distribution at mid frequency (3.5~15.2 Bark) is more than 50%, and near 30% at low frequencies.

Key words: equipment noise; frequency spectrum characteristic; sound energy; loudness; sound quality

收稿日期: 2020-01-01; 修回日期: 2020-02-25

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18_0015)、江苏省建筑节能科技支撑项目。

作者简介: 姜惠芸(1994—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为建筑声学。

通讯作者: 傅秀章, E-mail: foux@seu.edu.cn

0 引言

依据中国生态环境部统计, 2018 年社会生活噪声投诉高达 3.69 万件, 占据噪声投诉的 15.6%, 其

中固定设备噪声占据较大比例^[1]。建筑设备数量与种类随着城市化过程不断增加，低频噪声的研究也越来越受到重视。低频噪声会降低人的学习和工作效率，影响人的情绪与睡眠质量；长时间暴露在噪声环境下，甚至导致听力损伤，引发血压增高慢性等疾病^[2-7]。

国内规范对于噪声的评价标准多采用 A 声级作为评价量，然而 A 计权对于低频段噪声的计权值较大，无法准确反映人耳对低频噪声的感知^[8-11]。其次，为了测量和后期处理相对容易，采用了基于总噪声级(频率范围 20 Hz~20 kHz)的最大噪声限值作为评价指标，对于建筑设备中低频辐射较强的噪声源会产生较大的误差^[11]。不同标准针对低频噪声采用不同的修正模型和评估方法，这使得低频噪声的评价难以横向对比，如德国 DIN45680 标准中提出 K_{ai} 系数进行校正，波兰提出 A 计权与阈值及背景噪声之间的差值来进行判断。我国的《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)和《社会生活环境噪声排放标准》(GB22337-2008)采用倍频带中心频率声压级限值来对低频噪声进行约束^[12-16]。Broner 在低频噪声对人产生的心理效应研究中，发现采用主观烦恼度更适合描述低频噪声^[17]。烦恼度与响度、波动度等是声品质的重要评价指标。心理声学采用了数学模型来对人耳感知的噪声进行表述，目前使用最广泛的计算模型是由 Zwicker 等^[18]提出的相关公式。本文尝试采用心理声学的指标对设备噪声进行分析评估，对比现有的低频噪声评价方法，探究其评价结果的差异性，以进一步了解建筑设备噪声的声音特性。

1 建筑设备噪声源调查与采样

1.1 噪声烦扰投诉调查

2017 及 2018 年，国民对于缓解噪声污染的投诉如表 1 所示，其中设备噪声投诉占比率较大，频繁的设备噪声投诉问题亟待解决。2017 年固定设备(如冷却塔、风机等)噪声案件占社会生活噪声投诉的 28.6%^[1,19]。

1.2 噪声采样

通过对南通某办公建筑的实地调查和使用者的投诉信息，确定对以下常见的 4 种噪声源进行采样，包括水泵、排风扇、配电器和室外空调机。其中水泵、排风扇、配电器位于负一楼，室外空调机

表 1 2017 及 2018 年中国环境噪声污染投诉
Table 1 China's environmental noise pollution complaints in 2017 and 2018

噪声类型	2017		2018	
	投诉量/ 万件	占比/ %	投诉量/ 万件	占比/ %
建筑施工噪声	25.4	46.1	10.2	43
工业企业噪声	5.5	10.0	7.1	30
社会生活噪声	21.8	39.7	3.7	16
交通运输噪声	2.3	4.2	9.0	4

注：一些投诉同时涉及多种噪声类型，因此占比之和不等 100.0%。

位于一楼和八楼屋顶平台。

利用 Head Acoustic 数字式人工头系统进行噪声采样，同步使用 NOR140 噪声分析仪展开噪声测量。测点布置及采样、测量方法等参照国家和 ISO 相关标准确定，同时记录相关声场景和声源分布、运行工况等。

使用四通道噪声采集前端 SQuadriga 记录仪对正常运转的设备噪声进行数字录音，通过 HUS II.1(Code 1319)HEAD 音频记录软件将样本以波形文件记录。变频水泵和 8 层屋面的室外空调机采样时间为 60 s，其余每个样本的采样时间为 30 s，采样频率为 48 kHz，分辨率率为 1 Hz，频率下限为 12.5 Hz，频率上限为 21 834 Hz。

2 噪声频谱特性分析

2.1 各频段噪声声能量分布

本文为了频率划分与倍频程中心频率的上、下限频率相一致，将低、中、高 3 个部分频段设定为 20~350 Hz(倍频程中心频率 250 Hz 的上限频率)、350~2.8 kHz(倍频程中心频率 2 kHz 的上限频率)和 2.8 kHz 以上。各频段的能量占比如表 2 所示，能量计算采用式(1)与式(2)^[20]：

$$\eta_{\text{低}} = \frac{E_{\text{低}}}{E_{\text{总}}} = \frac{P_{\text{低}}^2}{P_{\text{总}}^2} = 10^{0.1(L_{\text{低}} - L_{\text{总}})} \quad (1)$$

$$L_{\text{低}} = 10 \lg \left(\sum_i 10^{0.1L_i} \right) \quad (2)$$

式中： $\eta_{\text{低}}$ 为低频段声能量占总声能量比率； $E_{\text{低}}$ 为低频段声能量； $E_{\text{总}}$ 为总声能量； $P_{\text{低}}$ 为低频段声压； $P_{\text{总}}$ 为总声压； $L_{\text{低}}$ 为低频段声压级叠加； $L_{\text{总}}$ 为总声压级； L_i 为低频段各倍频程声压级。

表 2 显示大部分设备的噪声能量都集中于低频段即在 350 Hz 以下，室外空调机低频噪声能量的占

表 2 不同设备噪声样品各频段声能量占比
Table 2 Energy ratios of different equipment noise samples in each frequency band

声源	声道	L_p /dB(A)	$f_{L\text{-max}}$ /Hz	声能量分布/%		
				低频段	中频段	高频段
水泵-1	L	68.4	12 500	34.47	13.41	52.12
	R	68.1	4 000	36.95	15.77	47.28
	N	67.2	4 000	41.16	12.34	46.50
水泵-2	L	67.2	12 500	35.21	9.54	55.24
	R	67.0	5 000	37.45	10.40	52.15
	N	68.0	4 000	47.06	13.82	39.12
排风扇	L	66.9	250	82.67	16.34	0.98
	R	67.0	250	83.26	15.92	0.82
	N	65.8	200	89.10	10.51	0.38
配电柜	L	63.1	315	63.40	35.80	0.79
	R	67.8	500	27.14	72.49	0.38
	N	64.0	315	64.57	35.25	0.18
室外空调机-G	L	71.6	50	89.67	9.64	0.69
	R	71.9	50	92.34	6.99	0.67
	N	71.1	50	97.65	2.24	0.11
室外空调机-1	L	78.8	50	96.79	3.07	0.15
	R	77.8	63	95.95	3.89	0.15
	N	76.6	63	98.84	1.10	0.06
室外空调机-2	L	79.9	63	96.73	3.18	0.09
	R	81.8	63	95.92	3.98	0.10
	N	79.3	50	99.51	0.47	0.01

注: L_p 表示声压级, $f_{L\text{-max}}$ 表示最大声级对应 1/3 倍频程的中心频率, L 表示左声道录制音频信息, R 表示右声道录制音频信息, N 表示 NOR140 噪声分析仪测量数据。

比甚至能够达到 90% 以上。变频水泵大部分能量集中于高频, 但是低频段的能量也能达到总能量的 1/3 左右。

2.2 噪声最大声级分布

各设备噪声频谱图如图 1 所示, L 表示左声道。左右声道频谱峰值趋势较为相似, 因此图内选

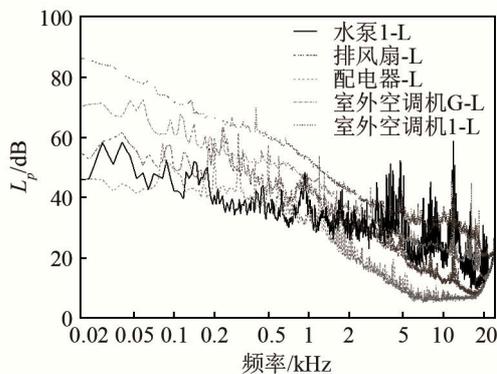


图 1 不同设备噪声样品左声道频谱图
Fig.1 Left channel spectrums of different equipment noise samples

择显示典型设备噪声左声道频谱。

从图 1 可以看出, 水泵频谱数据在高频出现峰值, 在 11.8 kHz 时声压级达到 58.7 dB。空调、排风扇和配电柜峰值存在于低频, 室外空调机在高频段 11.5 kHz 处出现局部峰值, 声压级值为 43.5 dB。

2.3 累积百分数 A 计权声级分析

设备在运行过程中运行状态会发生变化, 如图 2 所示, 运行状态的变化会导致产生的噪声也存在阶段性变动。用各个噪声级出现的概率或累积概率来对各噪声运行产生的噪声污染进行评价。

定义 L_{10} 为测量时间内 10% 的时间超过的噪声级, 表示噪声的峰值声级; L_{50} 为测量时间内 50% 的时间超过的噪声级, 表示平均噪声级; L_{90} 为测量时间内 90% 的时间超过的噪声级, 表示背景噪声级。

噪声样品累计百分数 A 计权声压级如图 3 和表 3 所示。排风扇、配电柜的运行状态基本保持不变, 噪声大小较为稳定, 大多数的设备噪声在整个采样

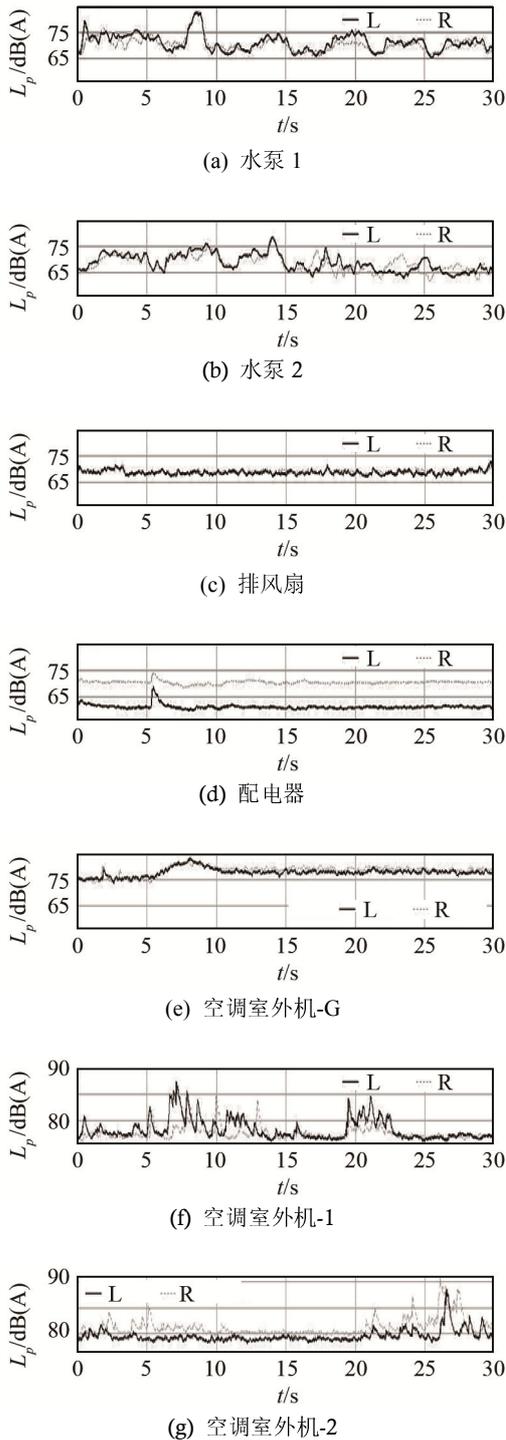


图 2 不同设备噪声的 A 计权声压级随时间变化
 Fig.2 Variation of A-weighting SPLs of different equipment noise samples with time

过程中都存在突发峰值。《社会生活环境噪声排放标准》(GB22337—2008)中提出非稳态噪声的情况,最大声压级限值的幅度不得高于 10 dB(A)。

其中水泵、排风扇、配电器皆为室内设备,而室外空调机信号在录制过程中,屋顶平台上可能存在风噪声干扰,背景噪声也会存在突发峰值,对测量结果可能存在有一定的影响。

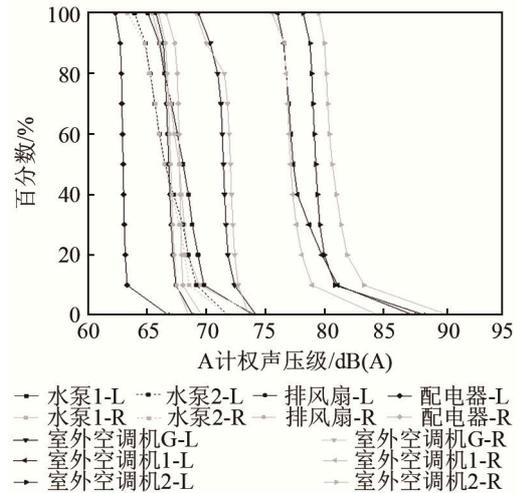


图 3 不同噪声的累积百分数 A 计权声压级分布
 Fig.3 Cumulative A-weighting SPL distributions of different equipment noise samples

3 声品质分析

根据表 2 声能量分布显示,大部分设备噪声主要能量集中于低频段,但 A 声级并不能完全正确地体现低频噪声对于人们的主观感受。心理声学是以人的感受为衡量标准,主要涉及响度、尖锐度、波动度、粗糙度等多项指标^[17]。

3.1 响度 N

响度表示人耳感受到的声音的强弱,单位是 sone。响度和声音强度的大小不是简单的线性关系,而与声音的振幅、频率等因素都相关,是声品质评价体系中的重要特征量。

3.1.1 各频段响度分布

本文将录制的波形文件输入 Artemis 软件,采用 ISO 532 中的响度计算方法(快速傅里叶瞬时响度计算),即 Zwicker 提出的理论计算方法,即式(3)、(4),得出该噪声样品在 0~24 Bark 上的累积响度值 N:

$$N' = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (3)$$

$$N = \int_0^{24} N' \quad (4)$$

其中: N' 为特征响度值(sone/Bark), E_{TQ} 为安静条件下听阈对应的激励,参考声强为 $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,其对应的激励为 E_0 , E 是信号对应的激励。

设备噪声的响度图显示:空调噪声主要集中在 0~4 Bark 范围内,而水泵噪声的主要响度值集中于 16~20 Bark 范围内。

有研究者发现人耳结构大致会对 24 个频率点

表 3 不同设备噪声样品累计百分数 A 计权声压级
Table 3 The cumulative A-weighting SPLs of different equipment noise samples

声源	声道	L_{90} /dB(A)	L_{50} /dB(A)	L_{10} /dB(A)	L_{max} /dB(A)
水泵-1	L	66.1	68.1	69.8	74.1
	R	66.1	67.7	69.4	74.3
水泵-2	L	64.9	66.5	69.2	71.9
	R	64.8	66.5	68.6	71.8
排风扇	L	66.4	66.8	67.5	68.9
	R	66.6	67.0	67.5	68.5
配电器	L	62.8	63.0	63.3	66.9
	R	67.4	67.8	68.0	69.7
室外空调机-G	L	70.4	71.5	72.4	74.3
	R	70.0	72.1	72.7	73.6
室外空调机-1	L	76.6	77.4	81.1	87.6
	R	76.6	77.1	79.0	84.6
室外空调机-2	L	78.8	79.3	80.9	88.6
	R	80.0	80.7	83.3	90.6

产生共振，因此提出将声音信号分为从 1~24、共 24 个临界频带，即 Bark 域。临界带宽与中心频率之间的关系如式(5)和式(6)^[21]：

$$z=13 \arctan(0.76 f)+3.5 \arctan\left(\frac{f}{7.5}\right)^2 \quad (5)$$

$$\Delta f_G=\left[25+75(1+1.4 f)^2\right]^{0.69} \quad (6)$$

式中： z 为临界带宽， Δf_G 为中心频率为 f 处 1 Bark 临界带宽的频带。低频对应的频带为 0~3.4 Bark，中频对应 3.5~15.2 Bark，15.2 Bark 以上为高频，各频段响度积分如图 4 和表 4 所示。

从表 4 可以看出，水泵的响度积分分布约一半集中于高频段，但中频段也有 38%~42%。排风扇、配电器和室外空调机的响度积分分布主要集中于中频段。

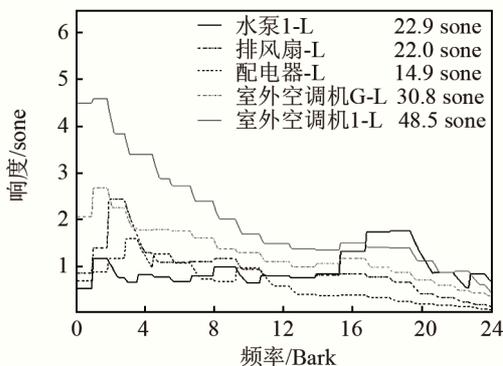


图 4 不同设备噪声左声道响度积分分布
Fig.4 Loudness integral distribution of different equipment noise samples

3.1.2 累积百分数响度分布

ISO532 中用响度计所得到的数值与瞬时响度相对应，然而对于随着时间不断变化的声音，除了

分析响度-频率和响度-时间函数外，还可以进行累积百分数响度计算。

图 5 为设备噪声的累积百分数响度分布，由图可见，设备噪声在测量阶段的响度值几乎相同，水泵排风扇等平均响度值与 N_{10} (10%时间超过该响度)近似，而空调等频率变化较频繁的设备平均响度值与 N_{15} (15%时间超过该响度)相近。

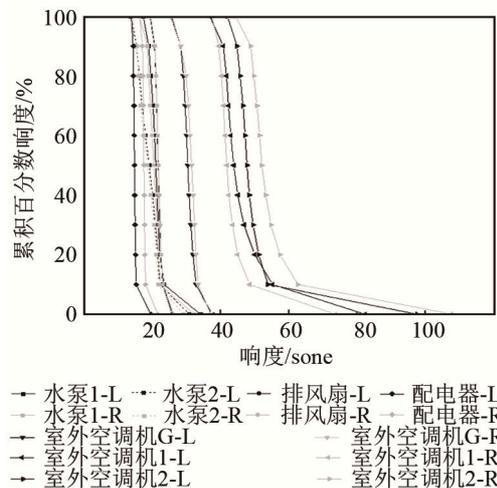


图 5 不同设备噪声的累积百分数响度分布
Fig.5 Cumulative loudness percentage distributions of different equipment noise samples

3.2 尖锐度 S

尖锐度表示声音尖锐的程度，记为 S ，单位为 $acum$ 。采用基于 Zwicker 的特征响度计算模型来计算尖锐度，其计算公式为

$$S=0.0043 \frac{\int_0^{24} N' \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24} N' \cdot dz} \quad (7)$$

其中： $g(z)$ 为附加系数，是临界频带的函数。

表 4 不同设备噪声样品响度积分分布
Table 4 The loudness integral distribution of different equipment noise samples

声源	声道	N/ sone	响度/sone			比例/%		
			低频	中频	高频	低频	中频	高频
水泵-1	L	22.9	2.8	9.3	10.8	12.12	40.78	47.05
	R	22.2	2.6	9.1	10.5	11.74	41.11	47.27
水泵-2	L	20.5	2.5	7.8	10.2	12.21	37.97	49.93
	R	20.1	2.3	7.6	10.3	11.51	37.67	51.01
排风扇	L	22.0	5.7	11.7	4.6	25.68	53.35	20.92
	R	22.0	5.7	11.9	4.4	26.09	54.19	19.79
配电器	L	14.9	3.5	9.3	2.1	23.76	62.70	13.87
	R	17.7	3.6	12.0	2.2	20.08	67.62	12.18
室外空调机-G	L	30.8	7.7	16.2	6.8	25.05	52.75	22.12
	R	31.5	8.4	16.4	6.6	26.77	52.21	21.09
室外空调机-1	L	48.5	14.2	24.3	10.0	29.27	50.08	20.70
	R	44.4	12.6	22.5	9.2	28.48	50.77	20.76
室外空调机-2	L	50.1	16.0	25.3	8.8	32.03	50.46	17.52
	R	57	18.0	28.6	10.4	31.52	50.22	18.20

3.3 波动强度 F 和粗糙度 R

波动强度 F 和粗糙度 R 表示声音高低起伏的程度，单位分别是 vacil 和 asper。声源级为 60 dB、频率为 1 kHz 的纯音在调制频率为 4 Hz 调制信号的 100% 调幅作用下产生的波动度为 1 vacil，声源级为 60 dB、频率为 1 kHz 的纯音在调制频率为 70 Hz 的 100% 调幅作用下粗糙度为 1 asper。 F 和 R 分别采用式(8)和式(9)进行计算：

$$F = C_f \cdot \frac{\int_0^{24} \Delta L \cdot dz}{\frac{f_{mod} + 4}{4} f_{mod}} \quad (8)$$

$$R = C_r \cdot f_{mod} \cdot \int_0^{24} \Delta L \cdot dz \quad (9)$$

式中： C_f 和 C_r 是计算系数，分别为 0.008 和 0.000 3， ΔL 表示单位为 dB 的调制深度， f_{mod} 为调制频率。

3.4 烦恼度 P_A

声质量评价理论的烦恼度计算公式与噪声尖锐度和粗糙度相关，单位为 au。烦恼度的 Zwicker 计算公式为

$$\begin{cases} P_A = N_s \cdot (1 + \sqrt{\omega_s^2 + \omega_{FR}^2}) \\ \omega_s = (S - 1.75) \cdot 0.25 \lg(N_s + 10) \\ \omega_{FR} = \frac{2.18}{N_s^{0.4}} (0.4F + 0.6R) \end{cases} \quad (10)$$

其中： N_s 表示以 sone 为单位响度的百分比，当 $S \leq 1.75$ acum 时， ω_s 为 0，各噪声声品质指标和烦恼度评价价值如表 5 所示。

4 讨论

4.1 现场测量值与 ArtemiS 频谱分析数据差异

SQuadriga 采集的噪声样品经 HEAD ArtemiS 软件分析得出的结果与 NOR140 噪声分析仪的现场测试结果相近，基本能够还原采样现场设备噪声的干扰状况，这是后续分析的前提条件。Artemis 分析出的数值与 NOR140 所测量的总声压级结果差值约等于 1 dB，大多数情况下，NOR140 结果数值偏小，这可能与 NOR140 使用防风罩减少背景噪声干扰有关。

NOR140 现场测试和设备噪声样品左、右声道两种不同途径计算所得的声能量分布结果大部分相近。水泵-2 中 NOR140 测量数据低频占比较大，但其他组数据显示水泵噪声低频占比与高频数据差别不大；配电器左声道与 NOR140 结果相近，右声道结果出现异常，总声压级较大，且中频能量占比比低频能量高出 50%。这可能是测量时耳部两个麦克风与声源传播位置成一条直线关系，头部对左侧麦克风造成遮挡；或者墙角对右侧麦克风有多次反射的作用，造成左右声道录制结果存在偏差。

4.2 不同建筑设备噪声源特性

从水泵的噪声频谱峰值与声能量占比的结果(表 2)来看，水泵产生的噪声属于以高频成分为主的噪声，但是低频能量占比仅次于高频，达到 30% 以上；如表 4 所示，水泵产生的中频噪声对人烦扰的

表 5 不同设备噪声样品烦恼度评价
Table 5 The annoyance evaluation of different equipment noise samples

声源	声道	L_p /dB(A)	N/sones	S/acum	F/vacil	R/asper	P_A /au
水泵-1	L	68.4	22.9	4.11	0.014 3	0.418	47.85
	R	68.1	22.2	3.99	0.013 2	0.365	46.57
水泵-2	L	67.2	20.5	4.15	0.014 3	0.304	43.67
	R	67.0	20.1	4.08	0.013 2	0.245	42.04
排风扇	L	66.9	22.0	2.19	0.015 3	1.23	35.29
	R	67.0	22.0	2.13	0.014 4	1.29	35.62
配电器	L	63.1	14.9	1.59	0.008 51	0.486	18.96
	R	67.8	17.7	1.55	0.008 00	0.688	23.56
室外空调机-G	L	71.5	30.8	2.59	0.015 5	2.10	59.58
	R	71.9	31.5	2.51	0.014 9	2.11	59.38
室外空调机-1	L	78.9	48.5	3.01	0.036 9	3.59	125.23
	R	77.7	44.4	2.83	0.028 7	3.14	102.37
室外空调机-2	L	79.9	50.1	2.71	0.025 8	3.53	114.68
	R	81.8	57.0	2.94	0.033 3	4.10	143.95

贡献达到了 40%以上, 仅略低于高频。

排风扇、配电器及室外空调机低频能量占比较高, 且声级峰值多处于低频段, 如室外空调机低频能量占比达到了 90%以上, 可以说是低频噪声源; 但是表 2 和表 4 显示, 配电器噪声中 35%的中频成分对人烦恼的贡献占比达到了 60%以上, 排风扇和室外空调机达到了 50%以上, 排风扇中频能量占比低于 20%, 而室外空调机的中频成分则低于 10%。

4.3 能量算法与响度积分差异

能量算法结果显示, 大多数设备噪声的低频成分是可观的, 中频成分与之相差甚远。然而, 考虑到人耳对噪声的感知能力, 少量的中频成分却更能使人烦躁。例如室外空调机噪声的中频能量占比不到 10%, 所造成的响度积分占比却高达 50%以上。能量计算仅表示噪声各频段能量的分布, 噪声最高声级对应的频段也仅与噪声本身相关。响度是考虑了人耳对声音的感知作用——频率越高越为敏感。人耳对声音感知的大小并不完全等同于人所产生的对应的烦恼度, 也和声音的锐利程度与波动强度有关。环境噪声引发的烦恼度与 Zwicker 响度级大小相关性最大, 而响度级一定程度上依赖于声音等效连续 A 声级, 同时也与噪声的频率分布密切相关, 在低频与高频范围内, 还分别与噪声的波动强度、粗糙度以及尖锐度等因素有关。

4.4 A 声级与声品质各项指标

从表 5 中可以看出, 水泵-1 和排风扇响度基本相等, 水泵-2 和排风扇的 A 声级相近, 但是水泵噪

声的尖锐度比排风扇噪声样品高出 1 倍。这是因为尖锐度主要与高频相关, 而水泵的主要频谱能量集中于高频。配电器的 A 声级在所有噪声样品中最小, 但是水泵噪声样品的粗糙度比其他设备噪声更小, 低频噪声成分相比高频噪声成分, 更容易有粗糙感。空调机-G 噪声的 A 声级比排风扇的 A 声级高出 5 dB, 但是响度值却高出近 9 sones, 尖锐度与波动强度值相近, 但是室外空调机噪声的粗糙度较高, 导致了整体的烦恼度高出 40 au。声音的尖锐程度和声音的高低起伏程度可以用尖锐度、粗糙度及波动强度表示, A 声级并不能反映声音的这些特性。几种噪声源的 A 声级数值相近, 但是不同设备噪声给人的主观感受是不一样的, 而响度等指标更能体现各类噪声的差异性, 从而为针对不同特性的设备噪声采用恰当的降噪措施提供可能。

5 结 论

根据对 4 种建筑设备噪声情况的调查, 并进行了现场音频录制与软件频谱分析。最大声压级所在频段及噪声能量分布两种评价指标显示, 在所测试的 4 种噪声源中, 变频水泵噪声的主要成分为高频。除变频水泵外, 设备噪声的声压级峰值多处于低频段, 噪声源以低频成分为主, 其中室外空调机噪声频谱的高频成分存在小型峰值。

考虑到人耳对不同频段的感知能力, 中频噪声虽然不是主要的噪声成分, 但对烦恼度的贡献是最

大的, 其次是低频噪声。从响度、尖锐度和烦恼度等心理声学评价指标来看, 室外空调机噪声的各项指标皆最高, 是最令人烦恼的设备噪声, 变频水泵噪声的尖锐度较大, 排风扇噪声的粗糙度较大。响度累积积分分布中, 变频水泵噪声中高频占比最大, 其余设备噪声源的中频响度积分值较高。

本文所采用的 Zwicker 提出的计算模型, 是现在使用最为广泛的计算模型。但是个体主观响度、声舒适度具有一定的差异性, 希望后续能够针对更多的设备噪声类型进行探讨, 同时进行基于大量志愿者的噪声主观感受评价研究。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年噪声污染防治报告[EB/OL]. <http://dqhj.mee.gov.cn/zshjgl/201906/P020190626585445336153.pdf>, 2019-06-26.
- [2] RYLANDER R. Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance[J]. *Sound and Vibration*, 2004, **27**(3): 471-478.
- [3] WAYE K P, BENGTSSON J, RYLANDER R, et al. Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance[J]. *Life Sciences*, 2002, **70**(7): 745-758.
- [4] TAKAHASHI Y, YONEKAWA Y, KANADA K, et al. A pilot study on the human body vibration induced by low frequency noise[J]. *Industrial Health*, 1999, **37**(1): 28-35.
- [5] ALVES JULIANA A, SILVA LIGIA T, REMOALDO PAULA C. Impacts of low frequency noise exposure on well-being: a case-study from portugal[J]. *Noise & health*, 2018, **20**(95): 131-145.
- [6] CARTER N L, BEH H C. The effect of intermittent noise on cardiovascular functioning during vigilance task performance[J]. *Psychophysiology*, 1989, **26**(5): 548-559.
- [7] BABISCH W. Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis[J]. *Noise & Health*, 2014, **16**(68): 1-9.
- [8] BERGLUND B, LINDVALL T, SCHWELA D H. Guidelines for Community Noise[R]. World Health Organisation, 2000.
- [9] 贾丽, 卢向明, 翟国庆, 等. 用社会声学调查方法研究居住区噪声烦恼阈值[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(10): 955-960.
JIA Li, LU Xiangming, ZHAI Guoqing, et al. Research on the threshold of noise annoyance in residential areas by using social acoustic survey[J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 2008, **28**(10): 955-960.
- [10] 毛东兴. 响度感知特征研究进展[J]. *声学技术*, 2009, **28**(6): 693-696.
Mao Dongxing. Research progress of loudness perception characteristics[J]. *Technical Acoustics*, 2009, **28**(6): 693-696.
- [11] 翟国庆, 张邦俊, 董美萍. 室内窄频带低频噪声烦恼度与治理对策研究[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2002, **29**(1): 87-93.
ZHAI Guoqing, ZHANG Bangjun, TONG Meiping. Research on the annoyance of indoor narrow-band low-frequency noise and countermeasures[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2002, **29**(1): 87-93.
- [12] CANIATO M. Assessment criterion for indoor noise disturbance in the presence of low frequency sources[J]. *Applied Acoustics*, 2016, **113**: 22-33.
- [13] German Standard DIN 45680-Measurement and evaluation of low-frequency noise immissions in the neighbourhood[S]. Berlin: German Institute of Standards, 1997.
- [14] MARIANNA M. Assessment of low-frequency noise in dwellings. New Polish recommendations[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, **105**(2): 67-74.
- [15] GB12348-2008. 工业企业厂界环境噪声排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [16] GB22337-2008. 社会生活环境噪声排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [17] BRONER N. The effects of low-frequency noise on people-A review[J]. *Sound and Vibration*, 1978, **58**(4): 483-500.
- [18] ZWICKER E, FASTL H. Psychoacoustics: facts and models[J]. *Physics Today*, 1999, **54**(6): 64-65.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年噪声污染防治报告[EB/OL]. <http://dqhj.mee.gov.cn/dqmyy-zshjgl/zshjgl/201808/W020180903349599583171.pdf>, 2018-08-03.
- [20] 俞鹏, 翟国庆, 黄逸凡, 等. 城市居住区设备噪声频率特性分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 491-495.
YU Peng, ZHAI Guoqing, HUANG Yifan, et al. Analysis of noise frequency characteristics of equipment in urban residential areas[J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(4): 491-495.
- [21] 范蓉平, 孟光. 基于心理声学响度分析的高速列车车内噪声评价[J]. *振动与冲击*, 2005, **24**(5): 46-48.
FAN Rongping, MENG Guang. Evaluation of high-speed train interior noise based on psychoacoustic loudness analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, **24**(5): 46-48.