

DOI:10.11784/tdxbz202503023

# 频域掩蔽效应对坐姿人体振动舒适性影响的主观评价研究

毕凤荣<sup>1</sup>, 杨晰予<sup>1</sup>, 张宇航<sup>1</sup>, 林泽峰<sup>2</sup>, 林杰威<sup>1</sup>

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 浙江大学能源与动力工程学院, 杭州 310058)

**摘要:** 人体对环境振动的主观感知会因为另一振动激励的出现而改变, 称为振动掩蔽效应。掌握掩蔽效应对人体振动感知的影响规律对于优化环境振动、调控振动感知和提升人因工效有重要的理论意义。本文开展了人体振动主观评价实验, 研究坐姿人体对垂向振动感知的频域掩蔽效应, 提出了新评价指标——掩蔽效率及其计算方法, 揭示掩蔽振动与目标振动间的幅值比、频率差等变量对掩蔽效应的影响规律。结果表明: 在幅值比不变的条件下, 当掩蔽振动的不舒适程度低于目标振动时, 掩蔽效率随频率差的增加而升高, 人体对目标振动的不舒适感知逐渐降低; 而在固定频率差条件下, 存在最大化掩蔽效率的最优幅值比, 随着目标信号幅值的增加呈现递增趋势, 且该参数处的掩蔽效率随幅值增加呈现递减趋势, 表明人体对振动的感知存在非线性。

**关键词:** 全身振动; 振动舒适性; 频域掩蔽; 主观评价; 人体振动感知

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)08-0777-08

## Impact of Frequency-Domain Masking Effect on Seated Human Vibration Comfort: A Subjective Evaluation

Bi Fengrong<sup>1</sup>, Yang Xiyu<sup>1</sup>, Zhang Yuhang<sup>1</sup>, Lin Zefeng<sup>2</sup>, Lin Jiewei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Human body's subjective perception of environmental vibrations can be altered by introducing another vibrational stimulus—the vibration masking effect. Understanding the impacts of the masking effects on human vibration perception is theoretically relevant for optimizing environmental vibrations, regulating vibration perception, and enhancing human-factor ergonomics. A subjective evaluation experiment on human vibration perception was conducted, investigating the frequency-domain masking effect of vertical vibration on seated human subjects. A novel evaluation metric—the masking beneficial index (MBI)—and its calculation method were proposed, revealing the influence laws of key variables, such as the amplitude ratio between the masking vibration and the target vibration and their frequency difference, on the masking effect. Results reveal that under constant amplitude ratios, masking efficiency increases with the frequency difference when masking vibrations induce lower discomfort than target vibrations, thereby correlating with reduced discomfort perception of target vibrations. Under fixed frequency differences, an optimal amplitude ratio maximizing masking efficiency is observed, which increases with the target signal amplitude, whereas the efficiency at this ratio decreases with the increasing amplitude, demonstrating nonlinearity in human vibration perception.

**Keywords:** whole-body vibration; vibration comfort; frequency-domain masking; subjective evaluation; human vibration perception

环境振动影响人体舒适性、工作效率和身体健康<sup>[1-2]</sup>. 掌握环境振动激励对人体舒适性的影响规

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-04-09.

作者简介: 毕凤荣 (1965—), 男, 博士, 教授, fr\_bi@tju.edu.cn.

通信作者: 林杰威, linjiewei@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52475119).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52475119).

律,有助于改善人机设计、减轻不适和疲劳,保障工作安全<sup>[3-4]</sup>。机械振动对舒适性的影响因素繁多,包括频率、强度、方向、人机界面支撑等振动激励特征<sup>[5]</sup>。此外,在振动环境下,人体生物动力学特性呈现出显著的非线性响应特征<sup>[6]</sup>,这一特性影响振动感知机制,因此研究多频段振动的掩蔽效应及规律,对人机环境设计和振动控制具有重要理论意义。

掩蔽效应是指当两种刺激共存时,某一刺激会降低人体对另一刺激的感知能力,其机理涉及复杂的心理和生理机制<sup>[7-8]</sup>,可用于描述和模拟人体对不同模态的反应,在听觉、视觉、触觉等模态的感知模式中起重要作用<sup>[9-12]</sup>。根据 2 个刺激的时间关系,该效应可分为同时掩蔽与非同时掩蔽,在振动感知领域,频域掩蔽效应的研究主要分为两类。第 1 类聚焦于掩蔽刺激对目标刺激感知阈值的影响<sup>[13]</sup>。Gescheider 等<sup>[14]</sup>通过触觉掩蔽函数模型精准测量感知阈值,揭示了触觉前向掩蔽现象中的信息通道独立性特征;Morioka 等<sup>[15]</sup>研究发现,使用 4.00 Hz 随机振动作为掩蔽刺激时,人体对 4.00 ~ 31.50 Hz 单频振动的感知阈值显著提高,且随频率差增大而效应减弱。第 2 类研究通过掩蔽效应提升舒适性。Basri 等<sup>[16]</sup>发现,施加 2 倍振幅的 3.00 Hz 低频垂直振动可有效掩蔽 6.00 Hz 高频振动,显著提高舒适度。

尽管频域掩蔽效应已被探讨,但其对人体主观感受的影响规律尚不明确。本文通过垂向激励下的坐姿人体振动评价实验,研究振动幅值、频率差及幅值比对感知的影响,揭示频域掩蔽效应在人体振动感受中的作用机制,为提升人体舒适性和人因工效提供理论依据。

## 1 掩蔽效应影响因素的实验设计

本实验包括两个部分:一是在目标信号与掩蔽信号的幅值比固定的条件下,分别研究不同的目标信号强度下,掩蔽信号与目标信号之间的频率差对掩蔽效应的影响,以揭示信号强度及频率差对主观感受的影响;二是通过在固定频率差条件下研究目标信号的强度及掩蔽信号与目标信号之间的幅值比对掩蔽效应的影响,进一步揭示信号强度及幅值比对主观感受的影响规律。

本实验借鉴了以往关于听觉及触觉的实验设计,采用对照实验的方案探讨掩蔽效应对舒适度的影响,实验设计如表 1 所示。实验组为掩蔽信号和目标信号的叠加,而对照组为单频目标信号。首先是反映“频率差”因素对掩蔽效应影响的实验研究。选取频

率为 1.60 Hz,强度分别为  $0.45 \text{ m/s}^2$ 、 $0.60 \text{ m/s}^2$  和  $0.90 \text{ m/s}^2$  的单频振动作为掩蔽信号,选取相同幅值频率为 2.50 Hz ~ 12.50 Hz 三分之一倍频程中心频率的单频振动为目标信号<sup>[17]</sup>,进行实验。其次为探究幅值比对于频域掩蔽效应的影响研究。选取频率为 1.60 Hz 及 3.00 Hz 的振动激励作为掩蔽信号,选取频率为 5.00 Hz 及 6.40 Hz 的信号作为目标信号测试幅值比为 1/3、1/2、2/3、1/1、3/2、2/1、5/2 时的频域掩蔽效应。

表 1 掩蔽效应影响因素的实验设计

Tab.1 Experimental design of influencing factors on masking effect

| 频率差实验信号 | 频率/Hz                                            | 强度/( $\text{m/s}^2$ )                                              |
|---------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 掩蔽信号    | 1.60                                             | 0.45, 0.60, 0.90                                                   |
| 目标信号    | 2.50, 3.15, 4.00, 5.00, 6.30, 8.00, 10.00, 12.50 | 0.45, 0.60, 0.90                                                   |
| 幅值比实验信号 | 频率/Hz                                            | 强度/幅值比                                                             |
| 掩蔽信号    | 1.60, 3.00                                       | 1/3, 1/2, 2/3, 1/1, 3/2, 2/1, 5/2                                  |
| 目标信号    | 5.00, 6.40                                       | $0.45 \text{ m/s}^2$ , $0.60 \text{ m/s}^2$ , $0.90 \text{ m/s}^2$ |

### 1.1 实验设备

垂向振动主观评价实验在天津大学机械工程学院 6 自由度振动台上开展,如图 1 所示,刚性座椅固定于振动平台上,振动平台直径 1 m,运动范围为垂向[-16 cm, 16 cm]、前后和侧向[-30 cm, 30 cm]、侧倾和俯仰[-9°, 9°]、横摆[-12°, 12°];由电力驱动,能够在垂向峰的峰值 8 cm 的运动条件下提供[-10  $\text{m/s}^2$ , 10  $\text{m/s}^2$ ]的振动加速度。刚性座椅的传递率在 20.00 Hz 以内始终为 1,在测试频率范围内不对平台至人体的振动传递产生影响<sup>[18]</sup>。



图 1 实验现场

Fig.1 Experiment site

### 1.2 被试者

共 18 名受试者参与实验,包括 9 名男性与 9 名女性,身高范围为 155 ~ 185 cm,体重范围为 38 ~

115 kg. 所有受试者在测试前均签署了知情同意书. 受试者端坐于座椅上, 上半身保持正坐, 不倚靠靠背, 眼睛平视前方. 在实验过程中, 受试者双手自然放于腿上, 不接触扶手, 固定在振动台表面的脚踏板可以调整高度, 以确保受试者大腿与座椅表面平行, 小腿垂直.

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 评价方法

为更好地适应不适感随掩蔽效应的发生而产生的非线性变化, 采用相对幅值估计法进行主观感受的评分. 选取强度为  $0.60 \text{ m/s}^2$  频率为  $5.00 \text{ Hz}$  的振动作为参照 (100 分), 以参照为标准对其他振动激励的不适感进行打分. 若一个振动的不适感是参考振动的两倍, 则分数为 200, 反之亦然.

定义频率不高于  $3.15 \text{ Hz}$  的振动引起的主观感受为绵柔感, 定义频率不低于  $4.00 \text{ Hz}$  的振动主观感受为颤动感<sup>[15]</sup>. 受试者选择造成不舒适的主要原因有绵柔感、颤动感或绵柔感 + 颤动感.

#### 1.3.2 振动特征

本文选用  $1.60 \sim 12.50 \text{ Hz}$  三分之一倍频程中心频率的单频振动及单频振动的叠加作为研究对象, 每个振动共持续  $6 \text{ s}$  (图 2), 其中前、后各有  $1 \text{ s}$  的余弦过度. 信号间隔  $8 \text{ s}$ .

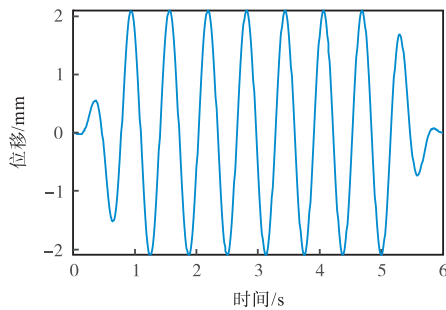


图 2 信号特征

Fig.2 Signal characteristics

#### 1.3.3 实验流程

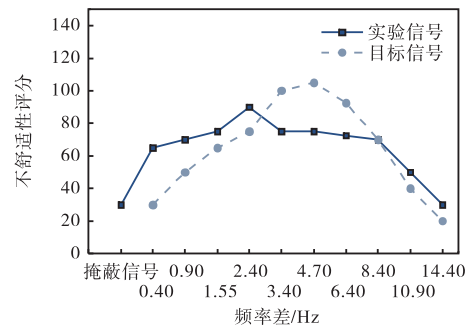
实验过程中共 154 个信号随机出现, 以避免霍桑效应<sup>[16]</sup>的影响. 为提高主观评价的准确性, 每隔 5 个信号重复播放一次参照信号. 为降低疲劳对评分的影响, 设定每  $30 \text{ min}$  休息  $10 \text{ min}$ , 总实验时长为  $150 \text{ min}$ .

## 2 频率差对掩蔽效应的影响

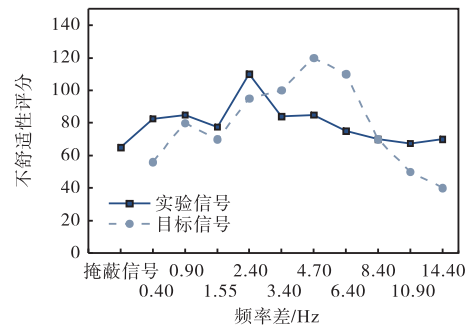
### 2.1 不适感程度评价结果

从 18 名受试者的主观评价中位数分析 (图 3) 可

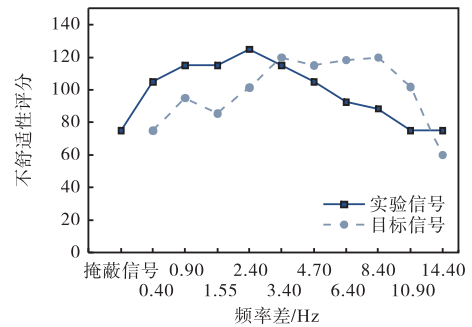
以看出, 目标振动舒适性评分曲线与既有振动频率-舒适性关系研究结论一致<sup>[19]</sup>: 当频率差低于  $2.40 \text{ Hz}$  时, 主观不适度随其强度增加而上升, 在  $2.40 \text{ Hz}$  时达到峰值. 当频率超过  $2.40 \text{ Hz}$  时, 目标信号和掩蔽信号同时出现时的不适度显著低于单一目标信号, 表明掩蔽效应有效产生. 值得注意的是, 当目标信号强度为  $0.45$ 、 $0.60 \text{ m/s}^2$  且频率差为  $10.90$ 、 $14.40 \text{ Hz}$ , 或强度为  $0.90 \text{ m/s}^2$  且频率差为  $14.40 \text{ Hz}$  时, 因目标信号固有不适感强于掩蔽信号, 导致实验信号不适度反而高于对照组. Friedman 检验证实掩蔽信号的叠加对主观舒适度具有统计学显著影响 ( $p < 0.05$ ).



(a) 信号强度为  $0.45 \text{ m/s}^2$



(b) 信号强度为  $0.60 \text{ m/s}^2$



(c) 信号强度为  $0.90 \text{ m/s}^2$

图 3 频率差对掩蔽效应影响实验的评分结果

Fig.3 Rating results from the experiments on the impact of frequency differences on the masking effect

表 2 中为不同频率目标信号与实验信号间的 Friedman 检验结果, 当掩蔽信号频率小于  $10.00 \text{ Hz}$

时,叠加掩蔽信号对主观评价结果影响显著,当频率差大于等于 10.00 Hz 时,目标信号对主观评价结果影响不显著。

表 2 频率差对掩蔽效应影响实验的 Friedman 检验结果

Tab.2 Friedman test results of the experiments on the impact of frequency differences on the masking effect

| 频率/Hz | 信号强度为<br>0.45 m/s <sup>2</sup> | 信号强度为<br>0.60 m/s <sup>2</sup> | 信号强度为<br>0.90 m/s <sup>2</sup> |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2.50  | 0.020                          | 0.013                          | 0.007                          |
| 3.15  | 0.002                          | 0.004                          | 0.016                          |
| 4.00  | 0.041                          | 0.017                          | 0.026                          |
| 5.00  | 0.013                          | 0.044                          | 0.045                          |
| 6.30  | 0.025                          | 0.007                          | 0.017                          |
| 8.00  | 0.049                          | 0.032                          | 0.035                          |
| 10.00 | 0.113                          | 0.117                          | 0.149                          |
| 12.50 | 0.244                          | 0.128                          | 0.325                          |
| 16.00 | 0.122                          | 0.225                          | 0.125                          |

## 2.2 语义评价结果

为区分掩蔽信号与目标信号对主观不舒适度的贡献度,构建堆叠图(图 4)展示不同诱因的占比分布。3 组数据中主观评价随目标信号频率变化的趋势具有一致性:当目标信号频率差低于 3.40 Hz 时,绵柔感为主要影响因素(占比大于 50%);当频率差超过 3.40 Hz 后,该因素影响持续增强,同时目标信号引发的不适感随频率差增大呈减弱趋势。此现象表明,随着目标与掩蔽信号频率差异扩大,目标信号对整体不适感的贡献逐渐被抑制。

## 2.3 结果讨论

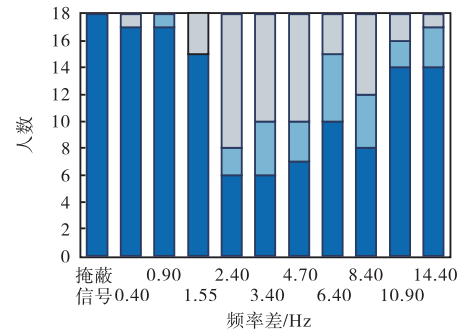
在郭智等<sup>[20]</sup>对振动中时域掩蔽效应对主观感受影响的研究中曾使用掩蔽度衡量同一影响因素下不同掩蔽能力的强弱,掩蔽度曲线为掩蔽效应发生的临界点,而在本次实验中,由于同时出现的两个振动信号间必然会互相掩蔽,故定义掩蔽效率作为参照。

定义掩蔽效率为

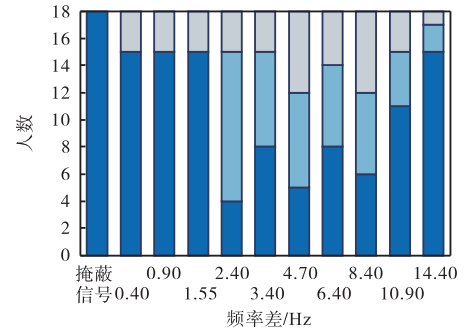
$$k = \frac{P_s - P_m}{100} \times 100\%$$

式中: $k$  为掩蔽效率; $P_s$  为实验信号评分; $P_m$  为目标信号评分。通过定义明确掩蔽效应对舒适性的影响。

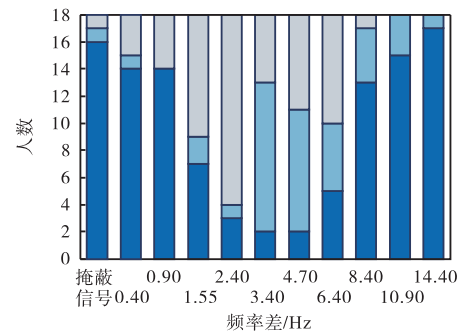
在幅值比固定为 1/1 的情况下,信号强度分别为 0.45 m/s<sup>2</sup>、0.60 m/s<sup>2</sup>和 0.90 m/s<sup>2</sup>时,频率差对掩蔽效率的影响如图 5 所示。随着频率差的增大,掩蔽效率逐渐上升。特别地,当信号强度为 0.45 m/s<sup>2</sup>时,掩蔽效率于频率差为 4.70 Hz 时达到峰值,随后掩蔽效率逐渐降低;当信号强度为 0.60 m/s<sup>2</sup>时,掩蔽效率在频率差为 6.40 Hz 时达到峰值;而在信号强度为 0.90 m/s<sup>2</sup>时,掩蔽效率在 8.40 Hz 处达到最高,随后,掩蔽效率



(a) 信号强度为 0.45 m/s<sup>2</sup>



(b) 信号强度为 0.60 m/s<sup>2</sup>



(c) 信号强度为 0.90 m/s<sup>2</sup>

■ 绵柔感 ■ 绵柔感+颤动感 ■ 颤动感

图 4 频率差对掩蔽效应影响实验的语义评价结果

Fig.4 Subjective responses from the experiments on the impact of frequency differences on the masking effect

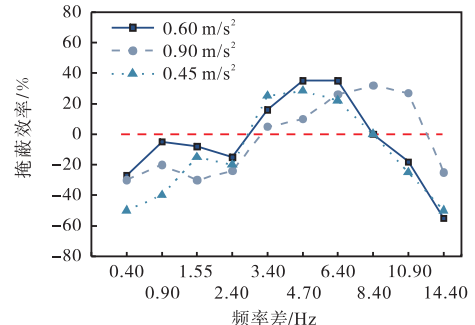


图 5 频率差对掩蔽效率的影响

Fig.5 Effect of frequency difference on masking efficiency

逐渐降低,根据图 2 及图 3 可知当目标信号频率小于 3.40 Hz 时造成掩蔽效率为负的原因是频率差较低,掩蔽信号与目标信号间的不适感发生叠加,当频率差

大于 8.40 Hz 造成掩蔽效率降低的原因并不是掩蔽效应未发生,而是掩蔽信号的不舒适程度高于目标信号,导致实验信号的不舒适程度高于目标信号。

可以看出,在掩蔽信号与目标信号幅值相同的条件下,当信号强度为  $0.45 \text{ m/s}^2$  且频率差为 3.40 ~ 10.90 Hz 时,通过叠加掩蔽信号可显著提高舒适性;当信号强度为  $0.6 \text{ m/s}^2$  且频率差为 3.40 ~ 6.40 Hz 时,通过叠加 1.60 Hz 的掩蔽信号可显著提高舒适性;对于信号强度为  $0.90 \text{ m/s}^2$  的情况,当频率差介于 3.40 ~ 10.90 Hz 时,叠加 1.60 Hz 掩蔽信号均可有效提升舒适性。

### 3 幅值比对掩蔽效应的影响

#### 3.1 不适感评价结果

从图 5 可以发现,掩蔽信号舒适性曲线趋势符合振幅对舒适性的一般影响规律<sup>[3]</sup>。Friedman 检验结果如表 3 和表 4 所示,掩蔽信号强度对舒适性评分具有统计学显著性影响。

图 6 数据显示,当实验信号与掩蔽信号频率差固定时,各组实验信号幅值下,不舒适度均随幅值比增加呈现先降后升趋势,并存在明确的最低评分值;同时,实验组与对照组的不适感差异度随幅值比增大显著衰减。表 5 汇总了不同频率差与实验信号强度条件下,各最低评分对应的幅值比参数。

表 3 幅值比对掩蔽效应影响实验的 Friedman 检验结果 (1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz)

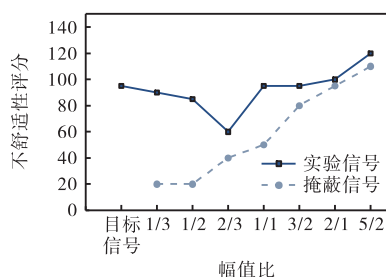
Tab.3 Friedman test results of the experiments on the impact of amplitude ratio on the masking effect (1.60 Hz masking 5.00 Hz)

| 幅值比 | 信号强度为<br>$0.45 \text{ m/s}^2$ | 信号强度为<br>$0.60 \text{ m/s}^2$ | 信号强度为<br>$0.90 \text{ m/s}^2$ |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1/3 | 0.314                         | 0.113                         | 0.087                         |
| 1/2 | 0.112                         | 0.051                         | 0.055                         |
| 2/3 | 0.041                         | 0.051                         | 0.821                         |
| 1/1 | 0.012                         | 0.043 5                       | 0.047                         |
| 3/2 | 0.008                         | 0.023                         | 0.039                         |
| 2/1 | 0.001                         | 0.026                         | 0.044                         |
| 5/2 | 0.017                         | 0.030                         | 0.005                         |

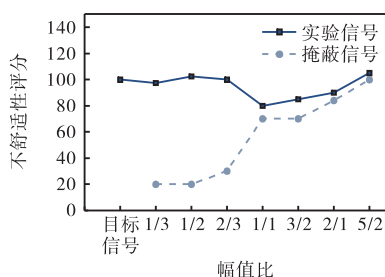
表 4 幅值比对掩蔽效应影响实验的 Friedman 检验结果 (3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz)

Tab.4 Friedman test results of the experiments on the impact of amplitude ratio on the masking effect (3.00 Hz masking 6.40 Hz)

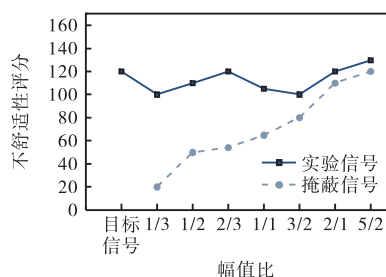
| 幅值比 | 信号强度为<br>$0.45 \text{ m/s}^2$ | 信号强度为<br>$0.60 \text{ m/s}^2$ | 信号强度为<br>$0.90 \text{ m/s}^2$ |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1/3 | 0.716                         | 0.417                         | 0.249                         |
| 1/2 | 0.002                         | 0.004                         | 0.016                         |
| 2/3 | 0.009                         | 0.033                         | 0.046                         |
| 1/1 | 0.004                         | 0.028                         | 0.038                         |
| 3/2 | 0.016                         | 0.022                         | 0.041                         |
| 2/1 | 0.013                         | 0.031                         | 0.007                         |
| 5/2 | 0.043                         | 0.025                         | 0.036                         |



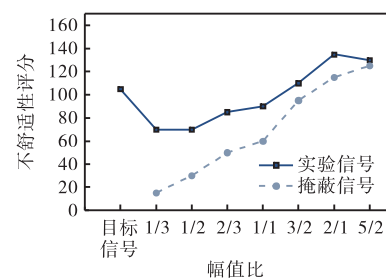
(a) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz,  $0.45 \text{ m/s}^2$



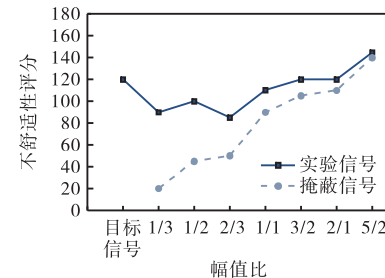
(b) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz,  $0.60 \text{ m/s}^2$



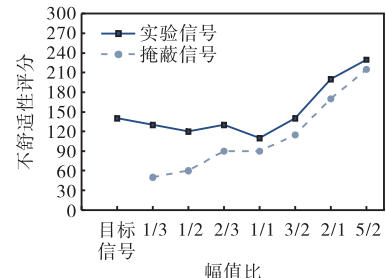
(c) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz,  $0.90 \text{ m/s}^2$



(d) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz,  $0.45 \text{ m/s}^2$



(e) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz,  $0.60 \text{ m/s}^2$



(f) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz,  $0.90 \text{ m/s}^2$

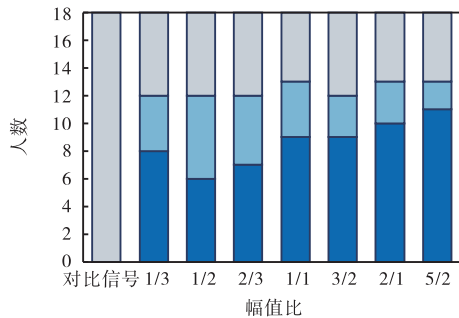
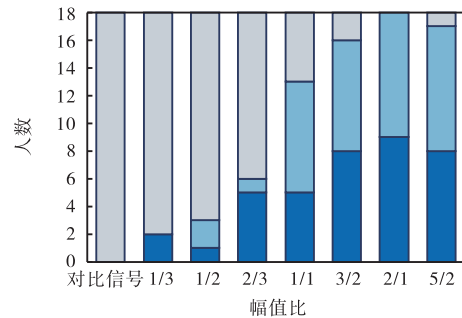
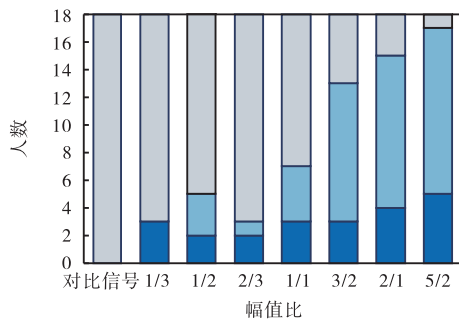
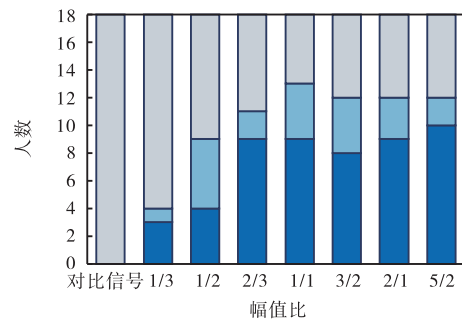
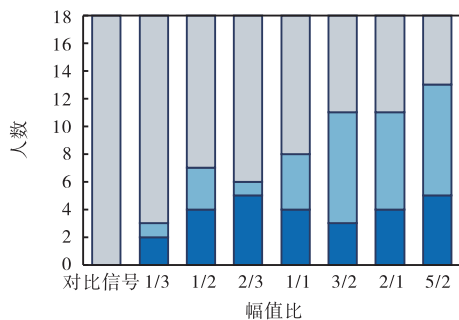
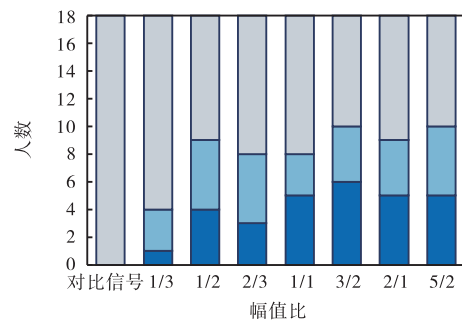
图 6 幅值比对掩蔽效应影响实验的评分结果

Fig.6 Rating results from the experiments on the impact of amplitude ratio on the masking effect

表 5 实验中最低不舒适性评分对应的幅值比

Tab.5 Amplitude ratios corresponding to the lowest discomfort rating results

| 信号强度/<br>(m/s <sup>2</sup> ) | 目标信号<br>频率/Hz | 掩蔽信号<br>频率/Hz | 最小舒适度<br>幅值比 |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| 0.45                         | 1.60          | 5.00          | 2/3          |
| 0.60                         | 1.60          | 5.00          | 1/1          |
| 0.90                         | 1.60          | 5.00          | 3/2          |
| 0.45                         | 3.00          | 6.40          | 1/2          |
| 0.60                         | 3.00          | 6.40          | 2/3          |
| 0.90                         | 3.00          | 6.40          | 1/1          |

(a) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz, 0.45 m/s<sup>2</sup>(b) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz, 0.60 m/s<sup>2</sup>(c) 1.60 Hz 掩蔽 5.00 Hz, 0.90 m/s<sup>2</sup>(d) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz, 0.45 m/s<sup>2</sup>(e) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz, 0.60 m/s<sup>2</sup>(f) 3.00 Hz 掩蔽 6.40 Hz, 0.90 m/s<sup>2</sup>

■ 绵柔感 ■ 绵柔感+颤动感 ■ 颤动感

图 7 幅值比对掩蔽效应影响实验的主观感受

Fig.7 Subjective responses from the experiments on the impact of amplitude ratio on the masking effect

变化:随着幅值比提升,绵柔感的影响权重持续增强,尤其在较高幅值比条件下,受试者对该感知维度的敏感性显著提升.然而,颤动感始终在感知评价中保持持续性主导作用.这表明,虽然掩蔽信号通过幅

从表 5 中可以看出,随着信号强度的增加,实验信号的最小舒适度所对应的幅值比也会增大,两者呈现正相关的趋势.

### 3.2 语义评价结果

堆叠图中色块代表造成不舒适的不同主要原因的人数(图 7),使用 Friedman 方法进行检验,显示主观感受随着振动频率的变化产生了明显的变化( $p < 0.05$ ).

图 7 数据表明,语义评价结果随幅值比呈现动态

值比提升可增强其感知干预效果,但目标信号引发的颤动感仍是影响舒适度的关键因素.值得注意的是,在部分高幅值比工况下,目标信号的主观感受仍对舒适性评价起决定性作用.

### 3.3 结果讨论

不同幅值条件下掩蔽效率随幅值比变化的特性如图 8 所示。结果表明:掩蔽效率随幅值比增大呈先升后降趋势——在达到峰值后,因掩蔽信号引发的不适度加剧导致效率衰减,该拐点由于掩蔽信号的强度或频率达到一个临界点,使得掩蔽效应变得非常强烈,甚至完全掩盖了目标信号,对应掩蔽过度临界状态<sup>[21]</sup>。结合图 6、7 的解析可知,效率峰值前阶段的提升源于掩蔽效应的主导作用;而峰值后效率衰减则归因于掩蔽信号与目标信号舒适性差异的弱化。值得注意的是,如表 6 数据所示,各目标信号幅值工况下均存在使掩蔽效率最大化的最优幅值比参数,且该参数数值随目标信号强度的增大呈系统性递增规律。

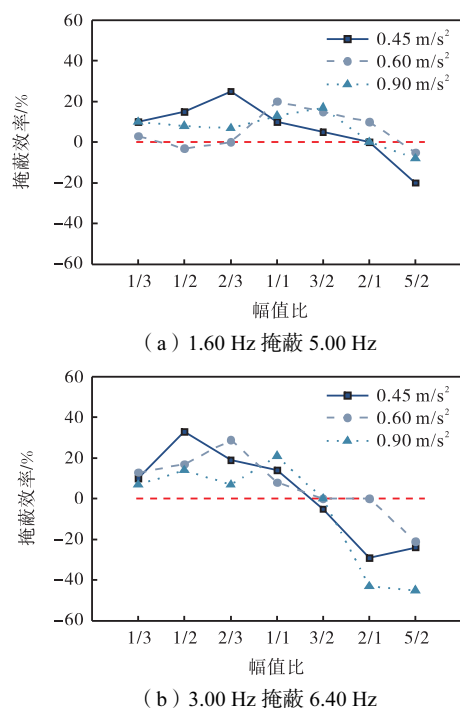


图 8 幅值比对掩蔽效应影响实验的掩蔽效率曲线

Fig.8 Masking efficiency curves from the experiments on the impact of amplitude ratio on the masking effect

表 6 幅值比对掩蔽效应影响的最佳掩蔽幅值比

Tab.6 Optimal masking amplitude ratio for the impact of amplitude ratio on the masking effect

| 幅值/(m/s <sup>2</sup> ) | 频率/Hz | 最佳掩蔽幅值比 |
|------------------------|-------|---------|
| 0.45                   | 5.00  | 2/3     |
| 0.60                   | 5.00  | 1/1     |
| 0.90                   | 5.00  | 3/2     |
| 0.45                   | 6.40  | 1/2     |
| 0.60                   | 6.40  | 2/3     |
| 0.90                   | 6.40  | 1/1     |

## 4 结 论

本文设计并实施了频率差及幅值比对人体振动

主观感受影响的实验,揭示了掩蔽信号与目标信号的强度、两者频率差及幅值比对频域掩蔽效应的影响规律;提出掩蔽效率的定义和计算方法,量化了掩蔽效应对人体主观舒适性的调控作用。基于研究结果得出以下结论。

(1) 当掩蔽信号不舒适度低于目标信号时,随着频率差增大,掩蔽效率逐步提升(人体对目标信号的感知随之减弱)。

(2) 存在显著提升掩蔽效率的最佳幅值比参数,且在相同目标频率与频率差条件下,该最佳幅值比随信号强度的增大呈递增趋势,而最佳幅值比处的掩蔽效率随幅值的增加呈递减趋势。

### 参考文献:

- [1] 刘 玄, 陈立锋, 许芃芃. 车载部件振动特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(12): 51-55.  
Liu Xuan, Chen Lifeng, Xu Pengpeng. Study on vibration characteristics of vehicle components[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(12): 51-55 (in Chinese).
- [2] 兀光波, 徐小青, 考希宾, 等. 装甲车辆舱室振动环境现状及其对乘员作业工效的影响[J]. 人类工效学, 2015, 21(1): 84-86.  
Wu Guangbo, Xu Xiaoqing, Kao Xibin, et al. Current status of vibration environment in armored vehicle compartments and its impact on crew operation efficiency[J]. Human Factors and Ergonomics, 2015, 21(1): 84-86 (in Chinese).
- [3] Lin J W, Li M, Lin Z F, et al. Equivalent magnitude-dependent discomfort under vertical vibration up to 100 Hz[J]. Ergonomics, 2023, 66(10): 1415-1423.
- [4] Gao K Z, Zhang Z F, Luo Q, et al. Evaluation of subjective discomfort of the seated human body exposed to vertical vibration using dynamic body pressure[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2023, 42(1): 438-451.
- [5] Liu X, Chen L F, Xu P P. Study on vibration characteristics of vehicle components[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(12): 51-55.
- [6] Duarte M L M, de Araújo P A, Horta F C, et al. Correlation between weighted acceleration, vibration dose value and exposure time on whole body vibration comfort levels evaluation[J]. Safety Science, 2018, 103: 218-224.
- [7] Breitmeyer B G. Visual Masking: An Integrative Approach[M]. Oxford: University Press, 1985.

- [8] Di Lollo V, Enns J T, Rensink R A. Competition for consciousness among visual events: The psychophysics of reentrant visual processes[J]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2000, 129(4): 481-507.
- [9] Li Z P. A new framework for understanding vision from the perspective of the primary visual cortex[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2019, 58: 1-10.
- [10] Gaskell H, Henning G B. Forward and backward masking with brief impulsive stimuli[J]. *Hearing Research*, 1999, 129(1): 92-100.
- [11] Zhou Z, Griffin M J. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: Discomfort caused by sinusoidal vibration[J]. *Ergonomics*, 2014, 57(5): 714-732.
- [12] 谢志文. 心理声学掩蔽效应的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- Xie Zhiwen. Research on Mask Effect of Psychoacoustics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005(in Chinese).
- [13] Griffin M J, Whitham E M, Parsons K C. Vibration and comfort I. Translational seat vibration[J]. *Ergonomics*, 1982, 25(7): 603-630.
- [14] Gescheider G A, O'Malley M J, Verrillo R T. Vibrotactile forward masking: Evidence for channel independence[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983, 74(2): 474-485.
- [15] Morioka M, Griffin M J. Masking of thresholds for the perception of fore-and-aft vibration of seat backrests[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 50: 200-206.
- [16] Basri B, Griffin M J. Equivalent comfort contours for vertical seat vibration: Effect of vibration magnitude and backrest inclination[J]. *Ergonomics*, 2012, 55(8): 909-922.
- [17] 林杰威, 李 蒙, 郭 智, 等. 垂向振动下坐姿人体局部频率敏感特性研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2024, 57(5): 482-488.
- Lin Jiewei, Li Meng, Guo Zhi, et al. Research on local frequency-dependence of seated human body under vertical vibration[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2024, 57(5): 482-488(in Chinese).
- [18] Mccarney R, Warner J, Iliffe S, et al. The Hawthorne effect: A randomised, controlled trial[J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2007, 7(1): 30.
- [19] Zhou Z, Griffin M J. Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: Discomfort caused by sinusoidal vibration[J]. *Ergonomics*, 2014, 57(5): 714-732.
- [20] 郭 智, 林杰威, 杨晰予, 等. 时域掩蔽效应对人体振动不舒适感的影响研究[C]//第一届全国人因振动工程理论及技术应用学术会议. 杭州, 中国, 2023: 1-8.
- Guo Zhi, Lin Jiewei, Yang Xiyu, et al. Research on the effect of temporal masking on human vibration discomfort[C]//1st National Conference on Human Factors in Vibration Engineering Theory and Technical Applications. Hangzhou, China, 2023: 1-8(in Chinese).
- [21] 曾祥丽, 刘维荣, 龚树生, 等. 正常人中枢掩蔽测试结果分析[J]. *临床耳鼻咽喉科杂志*, 2001, 15(11): 507-509.
- Zeng Xiangli, Liu Weirong, Gong Shusheng, et al. An analysis of the results of central masking effect on healthy ears[J]. *Journal of Clinical Otorhinolaryngology*, 2001, 15(11): 507-509(in Chinese).

(责任编辑: 王晓燕)