

引用格式：刘李娜，何颖，黄煜，等. 一类机械噪声对全身振动不舒适度的正负掩蔽效应[J]. 声学技术, 2021, 40(5): 652-656. [LIU Lina, HE Ying, HUANG Yu, et al. The positive and negative masking effects of a typical mechanical noise on vibration-induced discomfort[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 652-656.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.010

一类机械噪声对全身振动不舒适度的正负掩蔽效应

刘李娜¹, 何 颖¹, 黄 煜², 张 建¹, 李聪聪³

(1. 中国人民解放军海军特色医学中心, 上海 200433; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室,
振动、冲击、噪声研究所, 上海 200240; 3. 海军青岛特勤疗养中心, 山东青岛 266072)

摘要: 船舶、车辆或飞机舱室内往往同时存在振动和噪声。振动会引起人体不舒适, 而噪声可能会增大或减小振动引起的不适感。通过对比实验, 研究了无声波激励(60dB(A)背景噪声)以及舱室内一类典型机械振动噪声激励(幅值为70、85 dB(A))下, 低频随机垂直全身振动(加速度均方根值为1.5、2.0 和 2.5 m·s⁻²)引起的不舒适度。每组振动和声波持续时间为2 min, 12名被试每隔30 s 判断振动不舒适度的幅值。结果表明, 相对于无声波激励的条件, 幅值为70dB(A)的噪声增大了振动不舒适度, 而 85 dB(A)的噪声却减小了振动不舒适度。该现象说明噪声对振动引起的不适感具有抑制或者增强的“正负”掩蔽作用: 较高幅值的噪声对振动不舒适度具有正掩蔽(抑制)效应, 较低幅值的噪声对振动不舒适度具有负掩蔽(增强)效应。该掩蔽效应随人体暴露于噪声和振动环境中的时长增大而逐渐减小。

关键词: 噪声和振动; 掩蔽效应; 主观反应

中图分类号: TB533+.2 O428 X827 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2021)-05-0652-05

The positive and negative masking effects of a typical mechanical noise on vibration-induced discomfort

LIU Lina¹, HE Ying¹, HUANG Yu², ZHANG Jian², LI Congcong³

(1. Naval Medical Centre of PLA, Shanghai 200240, China; 2. Institute of Vibration, Shock and noise/State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration/School of Mechanical Engineering/Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Navy Qingdao Special Service Rest Centre, Qingdao 266072, Shandong, China)

Abstract: The vibration and noise usually occur simultaneously inside the cabin of ship, vehicle and airplane. The vibration causes human body discomfort, while the noise can increase or reduce such uncomfortable feeling. The influence of a typical cabin mechanical noise on the subjective judgment of the discomfort magnitude caused by whole-body vertical vibration is investigated. The low frequency random vibration at three accelerations (RMS is 1.5, 2.0 and 2.5 m·s⁻²) combined respectively with the mechanical noise of 70 and 85 dB(A) or only the background noise of 60 dB(A) are applied to the subjects over two minutes for tests. Each of the 12 subjects gave an estimate of the discomfort magnitude caused by vibrations every 30 s. The results show that the discomfort magnitude increases in 70 dB(A) noise and decreases in 85 dB(A) noise, which indicates the double-way masking effects of noise on the discomfort perception caused by vibration: the positive masking (attenuation) effect appears at relatively high noise level and negative masking (enhancement) at relative low noise level; With the increase of the exposure time of human body in the vibration and noise environment, the masking effect of noise on the vibration-induced discomfort decreases.

Key words: noise and vibration; masking effects; subjective response

0 引言

噪声和振动是车辆、船舶和飞机舱室内部影响

收稿日期: 2020-10-23; 修回日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072242)、上海市自然科学基金资助项目(19ZR1424500)。

作者简介: 刘李娜(1980—), 女, 江苏南京人, 硕士, 研究方向为航海医学。

通信作者: 张建, E-mail: ywjzjk@163.com

人体舒适性的两个重要环境因素^[1-4]。当人们同时暴露于噪声和振动时, 其中一种环境压力(例如噪声或振动)引起的主观感觉可能受到另一种环境压力的影响(例如振动或噪声)^[5]。这种影响包括了噪声或振动在舒适性主观评价过程中的拮抗或协同作用^[5-9]。有学者提出, 当噪声的声压级大于 65 dB(A)(欧盟环境标准规定的白天噪声水平)^[10]或振动的加速度大于 0.32 m·s⁻²(BS6841: 1987, ISO2631-1: 1997)^[11-12]时, 噪声对振动引起的不舒适度具有“掩

蔽效应”，而振动对噪声引起的不舒适度没有影响^[9]。另一方面，部分学者观察到噪声在振动不舒适度评价过程中的协同作用，这可能是因为实验中噪声激励相对于振动激励的幅值较大^[13-14]。

噪声对振动不舒适度的掩蔽比起能量掩蔽更像是一种信息掩蔽^[15]。能量掩蔽可以等同于一种外周掩蔽，例如噪声抑制了音调的听觉。信息掩蔽则可以等同于中枢掩蔽，例如噪声引起的不舒适度和振动引起的不适感可能通过不同的感知机制，然后在神经中枢进行判断。信息掩蔽是一种正反两方面的掩蔽，包括一种刺激对另一种刺激的抑制(即正掩蔽)，和一种刺激对另一种刺激的增强(即负掩蔽)。前人研究发现，噪声对其他感知通道的弱激励(例如手指触觉)具有负掩蔽(增强)效应，而对强激励的感知可能具有正掩蔽(抑制)效应，并且当其他感知通道的激励幅值较大时，噪声的负向掩蔽效应会消失^[16-18]。然而，并没有明确证据表明噪声对振动舒适性的负掩蔽效应。在以往的研究中，通常使用相对幅值较高的噪声激励和幅值较低的振动激励进行主观评价实验。本文拟在研究中采用幅值较高的振动激励(加速度均方根值为 $1.5\sim2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)，通过主观评价实验确定噪声对振动不舒适度是否具有正负掩蔽效应。

1 方法

1.1 被试

12位平均年龄24岁(年龄范围22~30岁)，平均身高171 cm(身高范围162~180 cm)，平均体重60 kg(体重范围从48~72 kg)且听力正常的被试自愿参与这次实验。被试均为上海交通大学的学生，所有被试均提交了参与实验的知情同意书。

1.2 实验装置

实验在机械系统与振动国家重点实验室中进行。带有垂直平靠背的刚性钢制座椅通过刚性连接安装于最大位移为±0.5 m的电磁垂直振动器(LDS，英国，型号V8-640T LPT1220/SPA56K)上。被试保持正坐，双脚平踩在振动台上，如图1所示。

振动激励通过LMS SCADASIII系统产生并控制(SIEMENS，德国，型号SC310)，采样频率为512 Hz。垂直振动加速度通过安装在座椅上的压阻式加速度传感器(无锡厚德，中国，型号HD-YD-216)进行检测。

噪声激励通过Adobe Audition 6(Adobe Systems，美国)软件和MAYA44 USB2.0音频/MIDI界



图1 在实验台上的被试者
Fig.1 Subject on the experiment rig

面(ESI Audiotechnik，德国)生成和控制，再通过一副耳机(Etymotic er4p，美国)传入至被试耳中。通过ArtimiS SUITE软件(Head Acoustics，Germany)的HEAD HMS IV假人和Brüel&Kjær声级计(Type 2250)对回放设备以及实验室中的背景噪声进行校准和测量。当振动台运转时，背景噪声的声压级大约为78 dB(A)，而耳罩和耳机的降噪等级分别为22 dB(A)和25 dB(A)。

1.3 实验激励

实验所用的机械噪声激励录制于有电磁机械设备运行的某工作舱内，频谱如图2所示，主要为500 Hz以下低频宽带噪声。基于采集到的噪声激励频谱，将声压级(Sound pressure level, SPL)^[19]幅值设置为70和85 dB(A)。振动激励为5~10 Hz低频窄带随机振动，其 W_k 计权^[12]幅值分别为1.5、2.0和2.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。噪声和振动激励的持续时间为120 s，在开始和结束时都有2 s的正弦衰减。当受测者坐于实验装置上并佩戴耳机和耳罩时，背景振动无法察觉。通过人工头佩戴耳塞和降噪耳机测得，耳部位置的背景噪声约为60 dB(A)，其频谱如图2所示，由此可见500 Hz以下背景噪声的声压级远小于激励声压级。

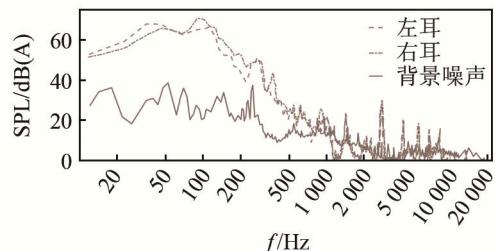


图2 声音激励及背景噪声频谱(A计权)
Fig.2 Frequency spectrums of the sound excitation and the background noise (A-weighted)

1.4 实验步骤

被试以舒适的正坐姿势，采用绝对幅度估计法(Absolute Magnitude Estimate, AME)评价不舒适度，

即可以使用任何正数评价振动激励引起的不舒适度^[20]。

对每个被试进行一次实验。被试随机经历 3 个振幅(加速度均方根值 1.5、2.0 和 2.5 m·s⁻²)的振动激励与 3 个声压级(无噪声、70 和 85 dB(A))的噪声激励组成的 9 组激励组合。对于每组组合激励，被试在第 30、60、90、120 s 时给出振动的不舒适度幅值。判断时机由研究人员通过高举写字板提醒被试。值得注意的是，0 dB(A)噪声激励条件下，被试实际上暴露于约 60 dB(A)的背景噪声中。

在开始实验之前，研究人员向被试提供书面说明，并通过判断线条长短以及低、中、高三组激励组合来对被试进行培训。当被试准备好后，实验正式开始。

1.5 数据处理

根据斯蒂文斯幂定律^[21]，振动不舒适度的主观评价值 ψ_v 与振动的物理振幅 φ_v 关系为

$$\psi_v = k_v \varphi_v^{n_v} \quad (1)$$

其中， k_v 是常数， n_v 是不舒适度的增长率。以对数形式表示，式(1)可以写成如下形式：

$$\lg(\psi_v) = \lg(k_v) + n_v \lg(a_{rms}) \quad (2)$$

其中： a_{rms} 是 W_k 计权的加速度均方根值^[12]。

针对小样本被试情况，采用非参数统计方法分析数据以避免正态分布的假设。通过中位数(Median)和四分位距(InterQuartile Range, IQR)，即上四分位数 QU 与下四分位数 QL 之差确定实验数据的离散程度。将每位被试的每个不舒适度评价值除以所有被试不舒适度评价值的中位数，并乘以倍率系数进行归一化^[22]。假设振动不舒适度相对于加速度均方根值的增长率为 0.97^[9]，此时 1.5、2.0、2.5 m·s⁻² 的振动加速度均方根值对应的不舒适度幅度的比率为 3:4:5。因此将倍率系数设定为“100”。通过数据归一化，将每个被试的幅度估计值放在相似的范围内进行统计分析和比较。

2 结 果

在无噪声、70 和 90 dB(A)的 3 种不同噪声条件下，加速度均方根值为 1.5、2.0 和 2.5 m·s⁻² 的振动激励在不同时刻引起的不舒适度的中位数如表 1 所示。根据实验每种条件下实验数据的上四分位数(QU)、下四分位数(QL)及 IQR，剔除异常值，即小于($QL - 1.5IQR$)或大于($QU + 1.5IQR$)的值。实验数据共计 432 个(12 名被试，9 种激励组合，4 个时长)，剔除 3 个异常点，占所有数据的 0.7%。将不舒适

度值作为应变量，持续时间 $\lg(t/t_0)$ 作为自变量，在图 3 的对数坐标轴中表示，其中 $t_0=1$ s。

表 1 伴随不同噪声情况下振动引起的不舒适度值 ψ_v (12 位被试的中位数)

Table 1 Estimates of the discomfort magnitude caused by vibration under accompanying different noises (ψ_v -medians for 12 subjects)

振动加速度均方根/(m·s ⁻²)	背景噪声/dB(A)	ψ_v		
		30 s	60 s	90 s
1.5	无噪声	69.0	80.8	90.8
	70	80.3	90.2	100.3
	85	60.2	70.9	82.8
2.0	无噪声	110.0	140.3	160.5
	70	120.3	150.6	175.4
	85	100.2	120.9	140.0
2.5	无噪声	165.1	189.9	218.3
	70	170.4	208.2	225.0
	85	150.4	175.1	198.4
		220.0		

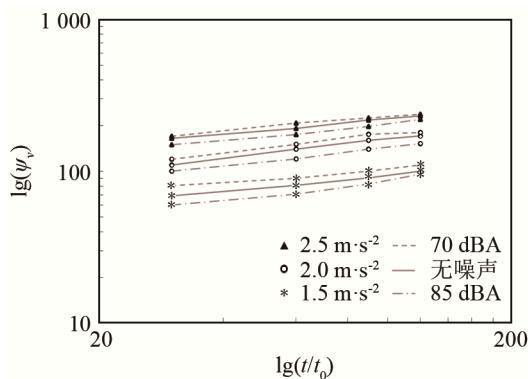


图 3 不同噪声组合下的振动不舒适度($\lg(\psi_v)$)随暴露时长($\lg(t/t_0)$)的变化

Fig.3 Variations of the discomfort magnitude ($\lg(\psi_v)$) for different combinations of vibration and noise with exposure time ($\lg(t/t_0)$)

将不舒适度以及持续时间 t/t_0 在对数坐标系中进行线性回归，可以得到斜率、截距以及振动不舒适度的对数值(即 $\lg(\psi_v)$)和持续时间的对数值(即 $\lg(t/t_0)$)之间的相关系数。对每个被试的数据进行上述线性回归处理，统计结果显示随着激励时长的增加，振动不舒适度显著增加($p<0.01$, Friedman 检验)，并且在每对振动(1.5、2.0 和 2.5 m·s⁻²)和噪声(70 和 85 dB(A)以及无噪声)激励组合的斜率没有显著区别($p>0.22$, Wilcoxon 检验)。群体斜率的中位数为 0.3，与标准中振动剂量值(Vibration Dose Value, VDV)定义的时间增长率 0.25(即时长每增加一倍，提高 1.5 dB)基本一致^[11-12]。

分别检验不同持续时长(即 30、60、90 和 120 s)，不同噪声激励组合下每个振动激励(即 1.5、2.0 和 2.5 m·s⁻²)引起的不舒适度的区别。结果显示 70dB(A)的噪声显著提高了所有时长下 1.5 和

$2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 的振动激励引起的不舒适度($p < 0.5$, Wilcoxon), 但 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 120 s 的振动不舒适度除外($p = 0.13$, Wilcoxon)。尽管从表 1 中可以看出, 70 dB(A)噪声组合下的振动不舒适度中值略大于无噪声下的振动不舒适度, 但 70 dB(A)的噪声对于 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 的振动不舒适度没有显著的影响($p > 0.2$, Wilcoxon)。除 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 、120 s 的振动不舒适度外($p = 0.11$, Wilcoxon), 85 dB(A)的噪声显著降低了在其他所有时长下 1.5、2.0 和 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 的振动激励引起的不舒适度($p < 0.05$, Wilcoxon)。

3 讨论

图 3 以及统计检验结果显示, 当被试在较高幅值的噪声中(85 dB(A)), 振动引起的不舒适度减小; 当被试在较低幅值的噪声中(即 70 dB(A)), 振动引起的不舒适度增大。这可以用掩蔽效应解释: 当被试专注于判断振动不舒适度时, 较高的噪声水平可能掩蔽了被试对振动不舒适度的感知, 而较低的噪声水平则可能增强了他们对振动不舒适度的感知。这说明噪声可以对垂直全身振动产生抑制或增强的正反两方面作用, 可视为噪声对振动的正反掩蔽效应。

噪声对振动不舒适度的抑制或增强作用分别与前人研究一致^[5-6,9]。Howarth 等指出了噪声对振动不舒适度的协同效应(即“负向掩蔽”), 即较低幅值的噪声(如 65 dB(A))增加了较低幅值振动(如 $0.125 \text{ m}\cdot\text{s}^2$)的不舒适度^[6]。Huang 等^[5,9]指出了噪声对振动不舒适度的拮抗效应(即“正掩蔽”), 但并没有发现“负向掩蔽”。这可能是因为他们虽然采用了和本实验幅值相近的噪声激励(64、82 dB(A)), 但采用的振动幅值($0.079 \sim 1.262 \text{ m}\cdot\text{s}^2$)远小于本实验(1.5、2.0、 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$)。噪声是否对振动的主观感知(如舒适性和烦恼度等)有负向掩蔽效应, 可能取决于噪声和振动的物理强度(如声压级和加速度均方根值), 但是它们之间的关系是相对而模糊的: 根据等舒适性曲线^[5], 本次实验中 70 dB(A)噪声的主观强度远低于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 振动的主观强度, 噪声对振动具有负向掩蔽效应; 在文献[6]的研究中, 65 dB(A)噪声的主观强度略高于 $0.125 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 的振动, 噪声对振动也有负向掩蔽效应。

噪声对振动不舒适度的掩蔽效应随着振动幅度的增大而减小, 并且在较高的幅值下, 负向掩蔽效应消失, 例如, 在 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 时, 70 dB(A)的噪声对振动引起的不舒适度没有显著影响。这跟前人结果一致^[5,9,16-18]。然而, 文献[6]发现了噪声对

$0.125 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 振动具有负向掩蔽效应, 却对低于 $0.125 \text{ m}\cdot\text{s}^2$ 的振动没有该效应。

噪声对振动不舒适度的掩蔽效应随着持续时间的增加而减小, 但在最初的 60 s 内几乎不随时间变化而变化(图 3 中向右移动)。这与前人研究结论一致: 当持续时间大于 32 s 后, 噪声对振动不舒适度的掩蔽效应不再随时间变化而变化^[23]。

4 结论

当人同时暴露于噪声和振动环境下时, 噪声对振动引起的不舒适度具有正、负掩蔽效应, 即抑制或增强的正反两方面作用。与无噪声的情况相比, 较高幅值的噪声通过“正掩蔽”的抑制作用, 减小了全身振动引起的不舒适度; 而较低幅值的噪声通过负掩蔽的增强作用, 增大了振动引起的不舒适度。随着振动加速度的增大, 噪声的掩蔽效应对振动不舒适度的影响减小。

在噪声和振动同时存在的场合, 任何预测噪声或振动的不舒适度模型, 需要同时考虑两者之间的掩蔽效应。不同类型、不同幅值的噪声和振动之间的正负掩蔽效应, 及其与物理幅值之间的量化关系, 是今后研究的重点。

参考文献

- [1] 王岩松, 刘宁宁, 郭辉, 等. 车内噪声综合烦躁度模糊综合评价[J]. 声学技术, 2015, 34(5): 437-443.
WANG Yansong, LIU Ningning, GUO Hui, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for comprehensive annoyance of vehicle interior noise[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(5): 437-443.
- [2] 俞悟周, 毛东兴, 王佐民, 等. 轿车车内噪声的主观评价[J]. 声学技术, 2002, 21(4): 181-184, 187.
YU Wuzhou, MAO Dongxing, WANG Zuomin, et al. Subjective evaluation of automobile interior noise[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(4): 181-184, 187.
- [3] 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.
- [4] 周静. 飞机客舱噪声品质的评价与建模[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [5] HUANG Y, GRIFFIN M J. The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131(6): 4558-4569.
- [6] HOWARTH H V C, GRIFFIN M J. Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 143(3): 443-454.
- [7] HOWARTH H V C, GRIFFIN M J. The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(5): 2317-2323.
- [8] PAULSEN R, KASTKA J. Effects of combined noise and vibration on annoyance[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 181(2): 295-314.
- [9] HUANG Y, GRIFFIN M J. The discomfort produced by noise and whole-body vertical vibration presented separately and in combi-

- nation[J]. *Ergonomics*, 2014, **57**(11): 1724-1738.
- [10] The European Parliament and the Council of the European Union. Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise: Directive 2002/49/EC[S]. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union, 2002.
- [11] British Standards Institution. Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock: BS6841: 1987[S]. London: British Standard, 1987.
- [12] International Organization for Standardization. Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part 1: General Requirements: ISO2631-1:1997[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [13] SEIDEL H, ERDMANN U, BLUETHNER R, et al. Evaluation of simultaneous exposures to noise and whole body vibration by magnitude estimation and cross-modality matching - An experimental study with professional drivers[EB/OL]. 1990.
- [14] HOWARTH H V C, GRIFFIN M J. The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, **89**(5): 2317-2323.
- [15] DURLACH N I, MASON C R, KIDD G Jr, et al. Note on informational masking[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, **113**(6): 2984-2987.
- [16] COLLINS J J, IMHOFF T T, GRIGG P. Noise-enhanced tactile sensation[J]. *Nature*, 1996, **383**(6603): 770.
- [17] COLLINS J J, IMHOFF T T, GRIGG P. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation[J]. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 1997, **56**(1): 923-926.
- [18] COLLINS J J, PRIPLATA A A, GRAVELLE D C, et al. Noise-enhanced human sensorimotor function[J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2003, **22**(2): 76-83.
- [19] International Organization for Standardization. Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures: ISO1996-1: 2003[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [20] HUANG Y, GRIFFIN M J. Comparison of absolute magnitude estimation and relative magnitude estimation for judging the subjective intensity of noise and vibration[J]. *Applied Acoustics*, 2014, **77**: 82-88.
- [21] STEVENS S S. Psychophysics: introduction to its perceptual, neural, and social prospects[M]. London: Routledge, 1986.
- [22] STEVENS S S. On the averaging of data[J]. *Science*, 1955, **121**(3135): 113-116.
- [23] HUANG Y, GRIFFIN M J. The relative discomfort of noise and vibration: effects of stimulus duration[J]. *Ergonomics*, 2014, **57**(8): 1244-1255.