

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.010

人体承受全身振动响应研究综述

赵健业, 杨宜谦

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要:综述了姿态、振动方向、性别、年龄、身高、振动持续时间和噪声对人体承受全身振动响应的影响以及人体振动不舒适度实验室和现场研究的进展情况,指出了需要进一步研究和完善的问题。

关键词:人体全身振动; 振动响应; 振动不舒适度

中图分类号:X827 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0044-10

Review of human body response to whole-body vibration

Zhao Jianye, Yang Yiqian

(Railway Engineering Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: This paper aims at reviewing the effects of posture, direction of the vibration, gender, age, stature, duration of the vibration and noise on human body response to whole-body vibration, as well as laboratory and field studies dealing with the discomfort caused by whole-body vibration. And the problems requiring further investigation are proposed.

Key words: whole-body vibration; response to vibration; discomfort caused by vibration

随着中国经济事业的迅速发展和城市规模的日益扩大,人们对生产、生活的环境质量要求不断提升,振动对人体的影响已经越来越成为一个不可忽视的科学问题。振动破坏了人类与外界环境之间的和谐关系,国际上已经将其列为七大环境公害之一。

全身振动属于振动中的一种常见类型,它是指人作为整体,通过支撑面(如座椅、床板等)传递到人体的振动。交通运输工具、工业机械、农业设备等都会使人体暴露于全身振动的环境中,影响人体的舒适度、工作效率乃至健康。因此研究如何科学、合理地评价人体全身振动响应是很有意义的。

本文分析了姿态、振动方向、性别、年龄、身高、振动持续时间和噪声对人体全身振动响应的影响,并总结了人体振动不舒适度的研究进展。

1 人体振动响应的姿态和方向差异

1.1 坐姿的人体振动响应

最普遍的全身振动发生在坐姿,例如人们搭乘各类交通工具或者在建筑物中工作学习。因此受测人员处于坐姿状态的振动实验占全身振动实验的大部分。这些研究采用两种方法:画出感知阈值与频率的关系图,画出等强度曲线和频率的关系图。通常在实验室中采用单轴正弦振动,因为采用复合多轴刺激存在难度^[1]。

Morioka 等^[2]对 12 名处于坐姿的受测者进行了实验。实验为了测试脚部振动情况下的绝对感知阈值,并且量化脚部振动造成的不舒适度。当坐姿状态下人体脚部接触振动表面时,垂向和水平向振

收稿日期:2016-11-28

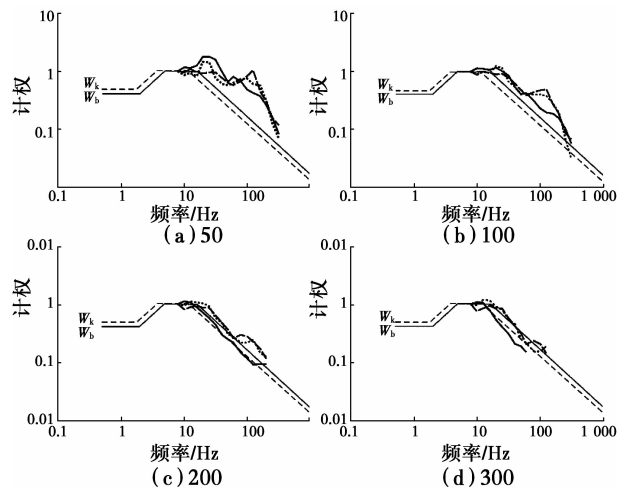
基金项目:国家自然科学基金(51378500)

作者简介:赵健业(1991-),男,硕士生,主要从事桥梁工程、环境振动、振动和噪声控制研究,(E-mail)694209087@qq.com。

杨宜谦(通信作者),男,博士,研究员,(E-mail)yqyang@yeah.net。

动绝对阈值都呈一个依靠频率的 U 型图案(图 1)。并且人体此时对 80 Hz 以上的频率最为敏感,这也说明振动感知用到了帕西尼通道。在频率低于 50 Hz 时,脚部垂向振动的感知阈值要比水平向的感知阈值低。

频率范围在 8~315 Hz 时,依靠频率的等舒适度曲线主要取决于振动量级。在低量级时,等舒适度曲线和绝对感知阈值曲线的形状类似。随着振动量级的增加,等舒适度曲线以固定的速度变化。这表明在脚部承受振动的情况下,振动造成的不舒适取决于多种心理和生理因素。实验中还得出穿鞋与否以及受测者的性别对感知阈值的影响很小。



注: — 前后向 - - - 侧向 ··· 垂向
定义加速度为 5 ms⁻² r.m.s, 频率为 50 Hz 时的等效舒适度为 100, 频率在 8 Hz 时的等效舒适度定义为: (a)50 (b)100 (c)200 (d)300 结果与频率计权 W_k (BS 6841:1987^[3]) 和 W_k (ISO 2631-1:1997^[4]) 进行对比。

图 1 振动轴向对频率计权的影响

Donati 等^[5]发现坐姿受测者暴露于前后向振动时,相较于 2 Hz 和 3 Hz,处于 1 Hz 时更不敏感。Corbridge 等^[6]发现坐姿受测者处于侧向振动时,人体对 1.25~2 Hz 的振动最为敏感。Miwa^[7]发现坐姿情况下,当频率大于 3.15 Hz 时,人体对侧向加速度的敏感性下降。

Morioka 等^[8]全面调查了频率 2~315 Hz,速度均方根 0.02~1.25 ms⁻¹ 的振动对等舒适度的影响。他们得出等舒适度曲线取决于振动量级,并且不存在单一频率计权直线可以准确地表述全身振动所造成的不舒适度。

人体暴露于水平向振动的生物动力学响应是非线性的,动态等效质量的共振频率随着振动振级的增加而不断减少^[9-12]。

坐姿状态下人体暴露于前后向振动,第 1 个共

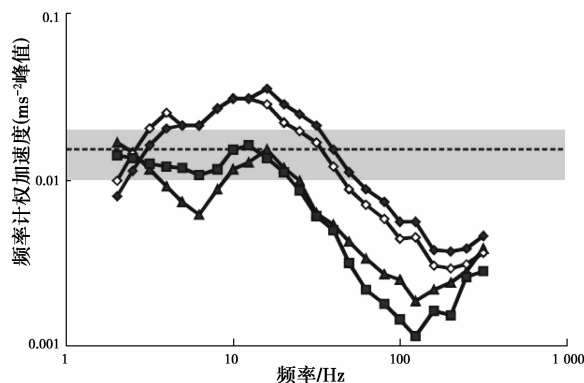
振频率在 1 Hz 附近,共振频率不受振级影响^[9]。第 2 个共振频率在 1~3 Hz,并且随着振级的增加共振频率不断降低^[9-11]。第 3 个共振频率在 3~5 Hz,也表现出非线性特征,低振级相比高振级更容易检测到第 3 个共振频率。

坐姿状态下人体暴露于侧向振动,第 1 个共振频率在 0.7 Hz 附近,共振频率不受振级影响。第 2 个共振频率在 1.5~3 Hz,并且随着振级的增加共振频率不断降低^[9-11]。第 3 个共振频率在 5~6 Hz,随着振级的增加共振频率不断降低^[11-12]。

坐姿状态下人体暴露于垂向振动,主观响应被证明与动力学响应相关^[13-14]。Griffin 等^[13]发现主观响应在低于 6.3 Hz 和高于 16 Hz 时和头部的传递性相关。Matsumoto 等^[14]发现在 3.15~8 Hz 时,主观响应和机械阻尼以及动态等效质量相关。

坐姿状态下人体暴露于 1.6~10 Hz 的垂向和水平向全身振动时,不舒适度和动态等效质量都受到振动频率和振级影响,并且受测者的动态等效质量和主观不舒适度也存在联系^[15]。

坐姿状态下垂向和水平向振动的绝对感知阈值不同。当频率大于 10 Hz 时,垂向振动的感应最为敏感。当频率小于 3.15 Hz 时,前后向振动的感应最为敏感。当频率大于 80 Hz 时,垂向和水平向振动的绝对感知阈值都呈 U 型分布(图 2)。这表明当处于高频时,前后、侧向、垂向 3 种方向的振动感知通过相同的渠道。低于 20 Hz 的振动感知可能通过其他的触觉渠道。暴露于垂向振动的坐姿受测者,非计权加速度相较于计权加速度更能准确地反应绝对振动感知阈值^[16]。



注: —■— 前后向感知阈值* W_d - -○- 侧向感知阈值* W_d
···△··· 垂向感知阈值* W_d - ·-◇- 垂向感知阈值* W_k
坐姿状态下对应三个轴向振动的频率计权中位感知阈值(峰值 ms⁻²); 频率高于 100 Hz 是推测得出的。---(灰色区域)是根据 BS 6841:1987^[3] 和 ISO 2631-1:1997^[4] 中坐姿状态下的规定推得的四分位感知阈值。

图 2 坐姿状态下垂向和水平向振动的绝对感知阈值

1.2 站姿的人体振动响应

以前的学术研究表明:当人体处于站姿状态下并暴露于垂向振动时,主要的共振频率在 5 Hz 附近^[17-19],部分受测者在 10~15 Hz 时有第 2 个共振频率。但是 Miwa 在实验中发现站姿状态下共振频率为 7 Hz 和 20 Hz。Fairley 等^[20]研究中发现站姿状态下与坐姿状态下的人体共振频率相同,都是 5 Hz。

Coermann^[17]提出当腿紧绷直立时人体共振频率为 5.9 Hz;而当腿弯曲时人体共振频率降至 2 Hz,但是没有提供实验数据证明。

Miwa^[21]研究了人体处于多种站姿下的共振频率。当膝盖弯曲时,有 3 个共振频率分别为 3 Hz、20 Hz 和 60 Hz。他指出在腿部直立状态下上半身的放松或者挺直状态对振动的感知影响很小。实验中还发现当单腿直立时共振频率为 5 Hz,比双腿直立时的共振频率 7 Hz 要低。

Paddan 等^[22]在实验中发现当腿部直立时,共振频率为 5 Hz(处于“腿部锁定”状态);当腿部弯曲时,共振频率降至 3 Hz。其他研究中也得到了相同的结果,但是没有考虑振动过程中头部转动的潜在影响^[23-24]。

Matsumoto 等^[25]发现:人体处于正常站姿状态下,当振幅为 $1 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 时,第 1 个共振频率在 5.5 Hz 附近,第 2 个共振频率在 9~14 Hz。同样在振幅为 $1 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 时,膝盖弯曲的受测者共振频率降至 2.75 Hz,这可能是由于屈腿和上半身围绕髋关节的弯曲导致身体所受到的振动加剧所造成的。人体处于单腿站立、振幅为 $1 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 时,共振频率在 3.75 Hz 附近。处于正常站姿状态下,当振幅从 $0.125 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 增加到 $2.0 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 时,共振频率从 6.75 Hz 降至 5.25 Hz,出现所谓的“软化”效果。同样当处于腿部弯曲状态时,振幅从 $0.125 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 增加到 $2.0 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$ 时,共振频率从 3 Hz 降至 2.5 Hz。单腿站立时,变化趋势是相同的。

Thuong 等^[26]发现:人体处于站姿状态下,暴露于 0.5~16 Hz 的前后向和侧向振动时,感知的增长率、等舒适度曲线轮廓、造成不舒适原因都是相似的。对于这两种轴向振动状态,振动不舒适度是以 3.15 Hz 为分界线的。当频率低于 3.15 Hz 时,缺失平衡是造成不舒适的主要原因,此时频率计权和低频率的固定速度相符。当频率高于 3.15 Hz 时,频率计权和高频率的固定加速度相符。这种情况和标准^[3-4]中基于坐姿规定的频率计权 W_d 不符。

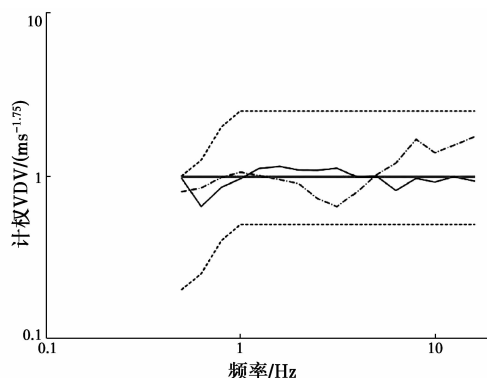
站姿状态下人体暴露于垂向振动的等舒适度曲线和标准^[3-4]中指出的频率计权 W_b 基本相符,但在频率低于 1.6 Hz 时,两者有区别。人体对 4~16 Hz 的垂向振动尤为敏感,尤其是在 6.3 Hz 附近的低幅加速度最为敏感。

与标准^[3-4]对比后得出:站姿和坐姿状态下,人体暴露于垂向振动时的响应是近似的,但是暴露于水平向振动时的响应是不同的。三轴向振动相应于低频和高频所造成不舒适机理是不同的。

BS 6841:1987^[3]和 ISO 2631-1:1997^[4]中指出:人体处于站姿状态下,当振幅相同时,前后向和侧向不舒适度是近似的。当频率在 3.15 Hz 以上时,垂向振动造成的不舒适度要比水平向大。而在频率低于 3.15 Hz 时,垂向振动造成的不舒适度较水平向小。标准^[3-4]中测定坐姿和站姿状态下不舒适度所使用的方法是相同的。

Thuong 等^[27]发现:人体处于站姿状态下振动不舒适度与现行的标准^[3-4]以及坐姿状态下均不相同。当振动周期为 6 s,振动频率在 4 Hz 附近时,站姿人体对于前后向振动较侧向振动更为敏感,这可能是因为前后向振动时,姿势更不稳定。标准^[3-4]中同样低估了垂向振动对站姿人体造成的不舒适度。

Patelli 等^[28]发现:站姿状态下人体暴露于垂向振动,频率在 2~3 Hz 时,屈腿会造成不舒适度的增加;当频率大于 5 Hz 时,屈腿会减缓不舒适度。当腿部直立时,频率计权 W_b 可以有效地评估垂向振动。当腿部弯曲站立时,频率在 2~3 Hz 时 W_b 低估了不舒适度;频率大于 5 Hz 时, W_b 高估了不舒适度。无论腿部直立还是弯曲,垂向振动造成的不舒适度都取决于振动的幅值(图 3)。



注: --- 区间 — 腿部直立 -- 腿部弯曲
所对应的主观振级 $\psi=100$ 的曲线(14名受测者的中位值)
区间(---)表示受测者中感受到的最大和最小振级。

图 3 ‘腿部直立’和‘腿部弯曲’状态下,
受测者相较于 W_b (VDV 值)

1.3 卧姿的人体振动响应

卧姿反映了夜间居住建筑内人群的实际情况。另外例如旅客在轮船或飞机上睡觉时的俯卧、仰卧或半仰卧姿势;把病人运到医院或转院、战争运送伤员时,采用仰卧姿势^[29]。

Maeda 等^[30]发现:仰卧、俯卧、左侧卧、右侧卧 4 种不同姿态下感知阈值没有明显不同。频率高于 4 Hz 时, y 方向振动和 z 方向振动的感知阈值基本相同, 频率低于 4 Hz 时, 人体对 y 方向的振动感知要比在 z 方向的振动感知敏感。卧姿基本中心坐标系见(图 4)。

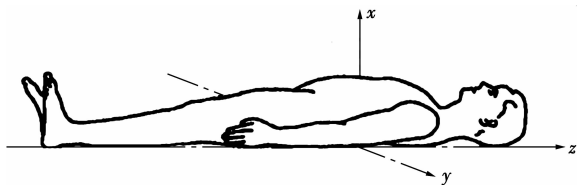


图 4 卧姿状态下,基本中心坐标系定义

Yonekawa 等^[31]的实验显示:受测者处于卧姿状态并暴露于垂向振动时,1~4 Hz 的感知阈值大约在 $0.04 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$;而在 4~8 Hz 时,感知阈值显著地降低;在 8 Hz 处达到最低值 $0.01 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$;随后随着频率的增大,感知阈值缓慢地提高。对于水平向振动,振动频率在 1~4 Hz 时,感知阈值随着频率增大而降低;振动频率达到 4 Hz 时,感知阈值达到最低值 $0.01 \text{ ms}^{-2} \text{ r. m. s}$;振动频率大于 4 Hz 以后,感知阈值随着频率的增大而提高。频率在 8 Hz 以上时,垂向振动比水平向振动更容易感知,当振动频率低于 4 Hz 时则相反。

2 人体振动响应的性别、年龄、身高差异

20 世纪初,就有科研工作者开始探索年龄对振动感知阈值的影响。Pearson^[32]发现:随着年龄的增加,振动感知阈值也不断提高。Arezzo 等^[33]发现:阈值与年龄几乎成线性关系。但其他研究^[34-37]发现:阈值的对数转换值和年龄呈线性关系。即使测试装备相同,测试方法不同也会使测试结果不一致^[38]。

Skov 等^[39]对 1 663 名美国工人做脚趾触碰振动实验得出:年龄从 30 岁到 80 岁每增长一岁,脚趾感知阈值就上升 3.5 个单位(微米的对数值)(图 5)。身高每增加 1 英尺,脚趾感知阈值就上升 1.9

个单位(图 6)。

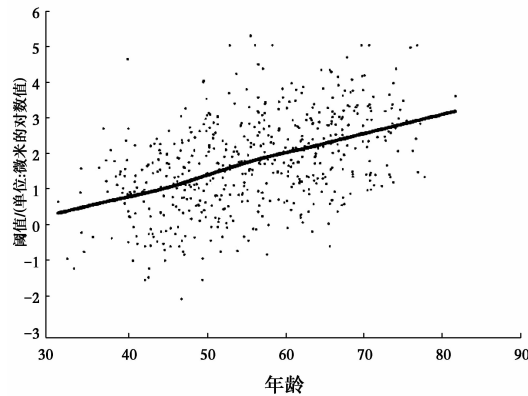


图 5 脚趾感知阈值与年龄的关系

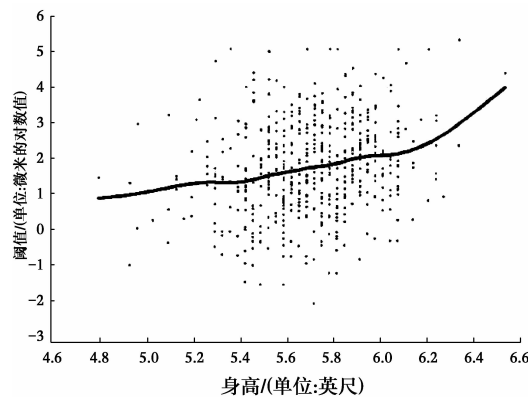


图 6 脚趾感知阈值与身高的关系

在性别差异上,Griffin 等^[40]和 Matsumoto 等^[41]先后做了类似实验,得出一致结论:振动感知阈值没有明显的性别差异。而在年龄差异上,Matsumoto 等^[41]的实验指出:振动感知阈值随着年龄的增大而明显提高。

3 振动持续时间对人体振动响应的影响

感知阈值随着振动持续时间增加 1 s 会有轻微下降,而随着持续时间的进一步增加基本不会再下降。因此在研究感知阈值时不需要采用 r. m. s 的平均值或者任何特定的时间常数。当确定峰值时,不应采用 r. m. s 的平均值^[42]。虽然感知阈值随着持续时间增加不再降低,但在振动量高于阈值的状况下由此产生的不舒适度可能会继续增加^[43]。

Miwa 等^[44]研究了平躺姿态下的振动感知阈值。10 名没有振动感知问题历史的男性参与了实验。实验中使用的正弦振动包括连续振动,单周期冲击和多周期冲击。频率随机变化范围:1、2、4、8、

16、31.5、63、100 Hz。向被测人员输入的振动分 3 种:10 s 连续振动,3 个中间间隔 5 s 的单周期冲击或者是 2 个中间间隔 5 s 的多周期冲击。而多周期冲击的持续时间不超过 4 s,不同的多周期冲击的持续时间由频率决定,每个冲击包含的周期以 2,4,8...递增,直到持续时间达到 4 s,即 1 Hz 的冲击持续时间选择 2 s 和 4 s,而 8 Hz 的冲击则可以分别使用 0.25、0.5、1、2、4 s 来测试。在持续时间不超过 4 s 时,冲击振动的感知阈值随着持续时间的增加而略微降低,当持续时间超过 4 s 时,冲击振动的感知阈值与连续振动相一致。Miwa 指出,其研究所确定的阈值曲线通过使用时间常数 $\tau=0.25$ s (MTVV) 可以最近似地拟合出来,尽管合适的积分时间随着频率的变化在 0.125~2 s 变化。

Matsumoto 等^[41]同样进行了类似的实验以研究仰卧被试者承受垂向全身振动的感知阈值。他指出不同振动持续时间和频率下,采用 VDV 和 MTVV 评价感知阈值对比分析表明,前者比后者较小程度上依赖于振动持续时间,较大程度上依赖于频率。积分时间的影响分析表明,积分时间对两种方法评价的感知阈值的影响都很小,积分时间取在 0.63~0.8 s (当振动时间大于 0.5 s 时),与振动持续时间合理对应。

4 噪声对人体振动响应的影响

在实际生活中,振动并不单独存在,人们常常同时受到振动和噪声的影响。

Howarth 等^[45]为了研究振动和噪声的综合影响,将 24 名被测人员暴露在 3 种环境中(只有振动、只有噪声、振动与噪声组合激励),噪声通过扬声器制造,振动通过固结于振动台上的椅子传导。被测人员紧靠座椅靠背,脚放在硬质脚垫上。六种不同强度($L_{AE}:54\sim79$ dB(A))的噪声和六种不同强度($r.m.s.:0.02\sim0.125$ ms⁻²)的振动,实验室的背景底噪为 42 dB(A)。当振动强度小时,噪声的存在降低了人体对振动的敏感度,抱怨减少;但在振动强度很大时,噪声的存在增加了人体对振动的不舒适和抱怨;而振动对于噪声的评价没有显著影响。当振动和噪声同时存在时,振动和噪声两项中任意提高一项,都会增加被测人员的烦恼。

Howarth 等^[46]为了进一步研究振动和噪声对人的影响,将 20 名被测人员暴露于模拟铁路振动

(VDV:0.056~0.40 ms^{-1.75})和噪声($L_{AE}:52.5\sim77.5$ dB(A))同时存在的环境中,并改变激励的持续时间和频谱。结果证明在评估人体响应时,将振动和噪声综合考虑更合适。实验得出了振动和噪声的主观等效关系式: $L_{AE}=89.2+29.3lg(VDV)$,可以判断两者的相对大小。

Meloni 等^[47]的实验装置与 Griffin 团队有所区别。Meloni 的实验中,被测人员端坐在固结于振动台的椅子上,振动通过椅子传递,噪声通过耳机来传递。振动模拟距铁路 5 m 处列车通过的信号。实验背景底噪为 42 dB(A),噪声变化分四种(无变化、52、62 和 72 dB(A)),振动也分四种强度(无振动,1/2 倍,1 倍和 2 倍原始信号)。实验得出结论:两种激励存在遮蔽效应,噪声(L_{AE} 大于 64 dB(A))越大,振动阈值越高。现实中两种激励同时存在,振动或噪声的单一感知测量是不可靠的。

Paulsen 等^[48]的实验得出了在低噪声强度(30~60 dB(A))条件下,振动和噪声的主观等效关系式。关系式中振动和噪声的关联斜率是 Griffin 等结论的一半。Paulsen 等认为差异出在激励的强度低、背景的噪声低和刺激信号的不同。

Knall^[49]总结了一个德国临近城际轨道的场地研究。他分析了 3 个因素单独和综合影响:振动等级(KB_{Fmax} 和 KB_{FTm})、列车的频率以及噪声等级(L_{AFmax} 和 L_{eq})。据 556 户居民反映:相较于振动,噪声更让人烦恼。研究中发现烦恼度不是匀速增长,而是呈阶梯式增长。

Öhrström 等^[50-51]探究了轨道振动和噪声的综合影响。实验中包含两个参量:振动等级(“轻微” [<1 mm/s] 或 “强烈” [>2 mm/s]) 和列车通行量。调查的居民共 2 833 人,大部分居住在独栋联排的房屋中;房屋很少有卧室窗口面向轨道的情况,位于距离轨道 10 m 到 300 m 处。图 7 证明在强地面振动区烦恼度更高。

在“轻微”振动区域,当暴露于低于 L_{AFmax} 80 dB(A) 和 L_{Aeq} 45 dB(A) 的轨道噪声时,烦恼的人数少于 5%。在“强烈”振动区域,相同烦恼度对应的声级比“轻微”振动区域要低 10 dB(A)。

Findeis 等^[52]对德国勃兰登堡道路附近居民进行调查发现:当 KB_{FTm} 值从 0.10 增加到 0.13 时,抱怨呈跳跃式增长。这很好地证明了振动和噪声会综合影响居民,同时也解释了当振动等级低于感知阈

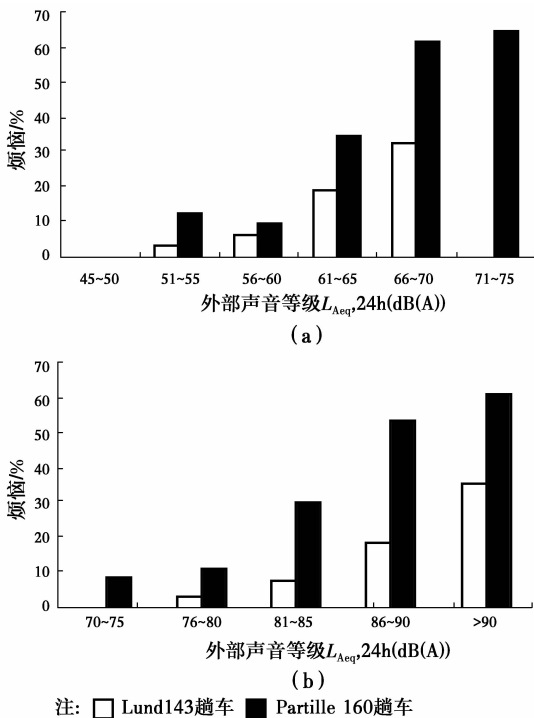


图 7 区域内不同噪声等级、振动强度 (强振 (Partille 区域)或弱振 (Lund 区域))所对应的烦恼度

值 ($KB=0.1$) 时居民还会产生抱怨的原因;在这种情况下,地激噪声会令人产生烦恼。他们根据频率和振幅划分了振动响应区域,并提出应该重视高于 20 Hz 的振动(图 8)。

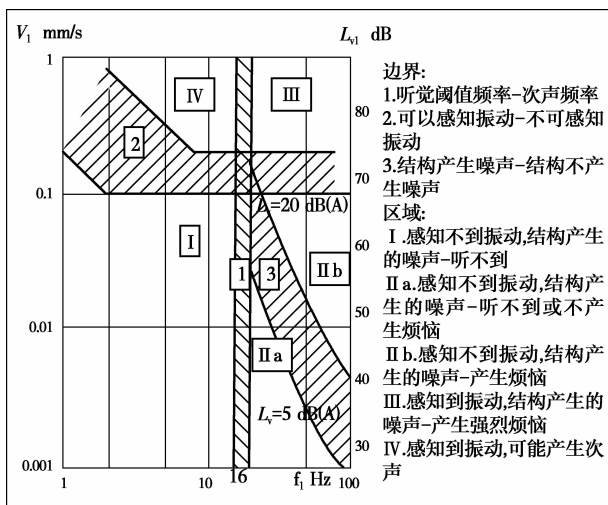


图 8 住宅的振动感知分级

Sato 等^[53]研究了噪声对振动感知阈值的影响。共有 10 名被试者坐在固定于垂向振动台的椅子上,自行调节振级来确定阈值。采用 4 种正弦波形的振动以及随机振动作为刺激,同时采用 10 dB(A) 作为

调节量的随机噪声作为刺激。实验发现阈值随着噪声级的增加而提高。文中还对同一频率下听觉与振动感觉之间的相互影响提出了建议。

Huang 等^[54]研究了振动和噪声的相互影响,他们将 20 名受测人员暴露在 7 种噪声 ($L_{AE}: 70 \sim 88$ dB(A)), 7 种振动 ($VDV: 0.092, 0.146, 0.231, 0.366, 0.581, 0.92$ 和 1.458 $ms^{-1.75}$) 同时存在的 49 种不同情形下,得到振动与噪声相互影响的关系和主观等效关系式。实验指出:在评价噪声时,高强度的振动会掩饰低强度的噪声所带来的不适;在评价振动时,高强度的噪声也会掩饰低强度振动对实验者带来的不适。噪声对振动判断的影响要强于振动对噪声的影响。本实验还给出了振动与噪声的主观等效关系式: $L_{AE} = 84.6 + 31.5 \lg(VDV)$ 。

ONORMS 9012(2010)^[55]规定了人体暴露于受轨道和道路振动影响的建筑中,噪声 (L_{Aeq}) 和振动 (W_m) 的综合影响。Steinhauser^[56]在以前研究的基础上,定义了振动区域,同时提出 SBN 评估方法还需要进一步研究(图 9)。在它之外还存在着遮蔽效应和感知不到/听不到的量级。该结论是从奥地利核心标准^[55](最大加速度 E_{max}) 中得出的,轨道交通一般不考虑该(灰色)区域。

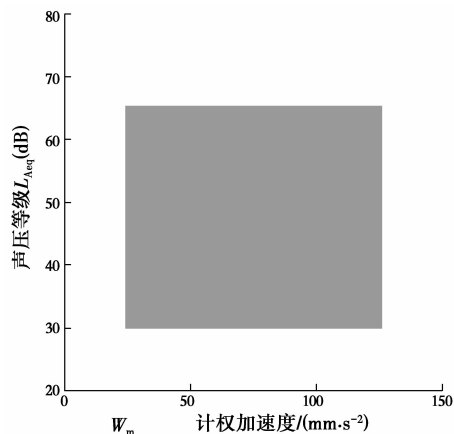


图 9 需要进一步研究结构振动和噪声综合效应的区域(灰色)

5 人体振动不舒适度研究进展

大多数研究都是用振幅来定义人体振动相对不舒适度。参照振动的不舒适度量为 100,受测者通过对比感受到的振动和参照振动的量级,来估算所受振动不舒适度量值。例如:如果受测者感觉实验振动造成的不舒适度是参照振动的一半,那么实

验振动的不舒适度量值就是 50。振幅估算通常在兴趣变量单一时使用;如果实验存在多个兴趣变量,或者实验前不确定兴趣变量,则采用对照法进行测定^[57-58]。

主客观振动量级的关系可以用来构筑不舒适度对频率的依赖曲线。这些相应的频率计权等舒适曲线在 BS 6841:1987^[3] 和 ISO 2631-1:1997^[4] 中都有相应描述。

Steven^[59] 的振级函数 $\Psi = k\phi^n$, 通常被用来表述主观感受振级 Ψ 和客观振级 ϕ 之间的关系。指数 n 代表主观振动感受相应于客观振动量级的变化梯度, 当其值大于 1 时, 代表主观振动感受增长速度要比客观振动量级增长速度快。

Howarth 等^[57] 研究了单一冲击振动不舒适度的影响因素, 包括冲击频率、延续时长以及冲击方向。实验采用四次方振动剂量法 (VDV) 进行测量。结果显示: 在相同振幅的情况下 (用 VDV 法进行演算), 由冲击振动造成的不舒适度在 1 Hz 时达到了峰值。但该结果可能不够准确, 因为 1 Hz 较 4 Hz 和 16 Hz, 更容易引起位移, 这种视觉影响可能会干扰受测者主观判断。当频率在 1 Hz 附近, VDV 值相同的情况下, 随着阻尼系数不断降低, 振动造成的不舒适度不断增加。实验还证明: 随着冲击振动次数的增加, 四次方剂量法评估不舒适度的结果更准确。

Matsumoto 等^[58] 在实验中发现连续振动的振级改变相较于冲击振动更容易被受测者发现。受测者暴露于连续振动时, 两个振动的相位差不同所造成的不舒适度区别不大。但是相较于 0 度, 180 度相位差所造成的不舒适度要少很多。受测者暴露于冲击振动时, 冲击个数对受测者不舒适度影响明显。冲击振动成分的相位差不同会导致主观上感知冲击振动的时间变长, 从而更难区分相邻的独立冲击振动。相对于振幅较低的多次冲击振动, 人体更能忍受单次高振幅冲击。这和之前的实验研究结论不一致, 需要进一步研究。

Matsumoto 等^[14] 探究了振动幅值对于连续正弦振动和冲击振动感知的主客观影响。连续振动的情况下, 频率在 3.15~4 Hz 时, 振幅增加会导致不舒适度的显著增加; 而在 5~8 Hz 时, 振幅增加不会造成不舒适度的显著不同。这种现象应归因于人体非线性动力学响应。

Ahn 等^[60] 检测了人体暴露于不同频率、振幅、衰减率的垂向冲击振动相应的主观感受。随着冲击振动频率的增加, 不舒适度的增长速度不断减缓。等舒适度曲线主要依赖于冲击的幅度。在 VDV 值高于 $0.35 \text{ ms}^{-1.75}$ 时, 频率计权法 W_b 会低估频率低于 2 Hz 的冲击振动所造成的不舒适度。实验还发现: 人体上半身对较低频率 (0.5~1.25 Hz) 的冲击振动敏感; 下半身对较高频率 (6.3~16 Hz) 的冲击振动敏感。

Subashi^[15] 探究了人体暴露于前后和侧向全身振动时, 振动频率和振动幅值对主观响应的影响。两种振动方向下不舒适度在频率 2.5 Hz 附近达到峰值, 这和正弦振动情况下人体动态等效质量的峰值是相近的 (前后振动时, 动态等效质量在 2.5 Hz 处达到峰值; 侧向振动时, 动态等效质量在 2 Hz 处达到峰值)。基于以前水平和垂向振动情况下人体动力学研究以及动态等效质量研究 (Fairley 等^[9]; Kitazaki 等^[61]), 作者推测在这些频率附近, 不舒适度达到峰值是由于臀部组织剪切变形、振动以及上半身弯曲所造成的。

6 结论与展望

1) 关于振动响应的研究不断深入, 研究的方向也在不断扩展。

2) 人体处于各个姿态下, 对不同振动方向的感知阈值基本相近, 但最敏感的频率范围不同。振动感知阈值与人的性别以及穿鞋与否没有显著关联; 在年龄差异上, 振动感知阈值随着年龄的增大而明显提高; 在身高上, 振动感知阈值随着身高的增加而提高。感知阈值随着振动持续 1s 会有轻微下降, 而随着持续时间进一步增加基本不会再降低。

3) 研究表明: 以加速度表示的振动感知阈值在 8 Hz 以上频率范围几乎是恒定的; 振动绝对感知阈值与标准中的频率计权是相矛盾的, 频率计权可能低估了人体对振动的敏感度, 因此频率计权曲线应该更平坦。

4) 噪声的存在会影响振动感知阈值。现实中多种激励同时存在的情况下, 振动和噪声的单一感知测量是不可靠的, 因此对振动和噪声的综合评价很有必要。

5) 随着生活水平日益提高, 人们对居住环境中振动造成的不舒适抱怨不断增多, 对建筑内人体振

动不舒适度的研究精确度提出了更高要求。

6)人的种族对振动感知阈值的影响目前未知,应借鉴国外的现有成果研究中国人的人体振动响应特性,从而制定出适合国人的振动评价方法。

参考文献:

- [1] 杨宜谦. 人体全身振动的感知阈值[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(S1): 54-60.
- [2] MORIOKA M, GRIFFIN M J. Magnitude dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the foot for seated persons [J]. J. Sound and Vib. , 2010, 329(14): 2939-2952.
- [3] Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock; BS 6841: 1987 [S].
- [4] Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements; ISO 2631-1: 1997 [S].
- [5] DONATI P, GROSJEAN A, MISTROT P, et al. The subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration in the sitting position (an experimental study using the 'floating reference vibration' method) [J]. Ergonomics, 1983, 26(3): 251-273.
- [6] CORBRIDGE C, GRIFFIN M J. Vibration and comfort: vertical and lateral motion in the range 0.5-5.0 Hz [J]. Ergonomics, 1986, 29(2): 249-272.
- [7] MIWA T. Evaluation methods for vibration effect. Part 1: measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations [J]. Industrial Health, 1967, 5: 183-205.
- [8] MORIOKA M, GRIFFIN M J. Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration [J]. J. Sound and Vib. , 2006, 298(3): 755-772.
- [9] FAIRLEY T E, GRIFFIN M J. The apparent mass of the seated human body in the fore-and-aft and lateral directions [J]. J. Sound and Vib. , 1990, 139(2): 299-306.
- [10] NAWAYSEH N, GRIFFIN M J. Non-linear dual-axis biodynamic response to fore-and-aft whole-body vibration [J]. J. Sound and Vib. , 2005, 282(3/4/5): 831-862.
- [11] HOLMLUND P, LUNDSTRÖM R. Mechanical impedance of the human body in the horizontal direction [J]. J. Sound and Vib. , 1998(215): 801-812.
- [12] MANSFIELD N J, LUNDSTRÖM R. The apparent mass of the human body exposed to non-orthogonal horizontal vibration [J]. Journal of Biomechanics, 1999, 32(32): 1269-1278.
- [13] GRIFFIN M J, WHITHAM E M. Individual variability and its effect on subjective and biodynamic response to whole-body vibration [J]. J. Sound and Vib. , 1978, 58(2): 239-250.
- [14] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Nonlinear subjective and biodynamic responses to continuous and transient whole-body vibration in the vertical direction [J]. J. Sound and Vib. , 2005, 287(4-5): 919-937.
- [15] SUBASHI G H M J, NAWAYSEH N, MATSUMOTO Y, et al. Nonlinear subjective and dynamic responses of seated subjects exposed to horizontal whole-body vibration [J]. J. Sound and Vib. , 2009(321): 416-434.
- [16] MORIOKA M, GRIFFIN M J. Thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral and vertical vibration by seated persons [J]. Journal of Euro noise acoustics, 2008, 123(5): 36-67.
- [17] COERMANN R R. The mechanical impedance of the human body in sitting and standing positions at low frequencies [J]. Human Factors, 1962, 4(10): 227-253.
- [18] EDWARDS R G, LANGE K O. A mechanical impedance investigation of human response to vibration [R]. Aerospace Medical Research Laboratories, Ohio, Wright-Patterson Air Force Base, 1964.
- [19] FAIRLEY T E. Predicting the dynamic performance of seats [D]. University of Southampton, 1986.
- [20] FAIRLEY T E, GRIFFIN M J. The apparent mass of the seated human body: vertical vibration [J]. Journal of Biomechanics, 1989, 22(2): 81-94.
- [21] MIWA T. Mechanical impedance of human body in various postures [J]. Industrial Health, 1975, 13(1): 1-22.
- [22] PADDAN G S, GRIFFIN M J. The transmission of translational floor vibration to the heads of standing subjects [J]. J. Sound and Vib. , 1993, 160(3): 503-521.
- [23] KOBAYASHI F, NOKAGAWA T, KANADA S, et al. Measurement of human head vibration [J]. Industrial Health, 1981, 19(3): 191-201.
- [24] RAO B K N. Bio-dynamic response of human head during whole-body vibration conditions [J]. Shock and Vibration Bulletin, 1982, 52: 89-99.

- [25] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Dynamic response of the standing human body exposed to vertical vibration influence of posture and vibration magnitude [J]. *J. Sound and Vib.*, 1998, 212(1): 85-107.
- [26] THUONG O, GRIFFIN M J. The vibration discomfort of standing persons: 0.5-16Hz fore-and-aft, lateral, and vertical vibration [J]. *J. Sound and Vib.*, 2011, 330(4): 816-826.
- [27] THUONG O, GRIFFIN M J. The vibration discomfort of standing people: Relative importance of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration [J]. *Applied Ergonomics*, 2012, 43(5): 902-908.
- [28] PATELLI G, MORIOKA M, GRIFFIN M J. Effect of bending the legs on the discomfort caused by vertical vibration when standing [R]. England, University of Southampton, ISVR. 2015.
- [29] BELLMAN M A. Perception of whole-body vibration: From basic experiments to effects of seat and steering wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles [D]. Oldenburg, Niedersachsen; University Oldenburg, 2002.
- [30] MAEDA S, YONEKAWA Y, KANANDA K, et al. Whole-body vibration perception thresholds of recumbent subjects-Part 2: Effect of vibration direction [J]. *Industrial Health*, 1999, 37(4): 404-414.
- [31] YONEKAWA Y, MAEDA S, KANANDA K, et al. Whole-body vibration perception thresholds of recumbent subjects- Part 1: Supine posture [J]. *Industrial Health*, 1999, 37(4): 398-403.
- [32] PEARSON G H J. Effect of age on vibratory sensibility [J]. *Arch Neurol Psychiatry*, 1928, 20(3): 482-496.
- [33] AREAAO J C, SCHAUMBURG H H, PETERSEN C A. Rapid screening for peripheral neuropathy: A field study with the Optacon [J]. *Neurology*, 1983, 33(33): 626-629.
- [34] BLOOM S, Till S, SÖNKSEN P, et al. Use of a biothesiometer to measure individual vibration thresholds and their variation in 519 nondiabetic subjects [J]. *J. Br Med.*, 1984, 288(6433): 1793-1795.
- [35] MUIJSER H, HOOISMA J, HOOGENDIJK E M G, et al. Vibration sensitivity as a parameter for detecting peripheral neuropathy [J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 1986, 58(4): 287-299.
- [36] GERR F, HERSHMAN D, LETZ R. Vibrotactile threshold measurement for detecting neurotoxicity: Reliability and determination of age- and height standardized normative values [J]. *Arch Environ Health*, 1990, 45(3): 148-154.
- [37] GERR F, LETZ R. Covariates of human peripheral nerve function. II. Vibrotactile and thermal threshold [J]. *Neurotoxicol Teratol*, 1994, 16(1): 105-112.
- [38] WENEMARK M, LUNDSTRÖM R, HAGBERG M, et al. Vibrotactile perception thresholds as determined by two different devices in a working population [J]. *Scand J Work Environ Health*, 1996, 22(3): 204-210.
- [39] SKOV T, STEENLAND K, DEDDENS J. Effect of age and height on vibrotactile threshold among 1,663 U. S. workers [J]. *American Journal Of Industrial Medicine*, 1998, 34(5): 438-444.
- [40] PARSONS K C, GRIFFIN M J. Whole-body vibration perception thresholds [J]. *J. Sound and Vib.*, 1988, 121(2): 237-258.
- [41] MATSUMOTO Y, IWANE Y, IWATA Y, et al. Factors affecting perception threshold of vertical whole-body vibration in recumbent subjects: Gender and age of subjects, and vibration duration [J]. *J. Sound and Vib.*, 2011, 330(8): 1810-1828.
- [42] Guide to evaluation of human exposure to vibration; BS 6472-1:2008 [S].
- [43] Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings(1 to 80 Hz); ISO 2631-2: 2003 [S].
- [44] MIWA T, YONEKAWA Y, KANANDA K. Thresholds of perception of vibration in recumbent men [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984, 73(3): 849-854.
- [45] HOWARTH H V C, GRIFFIN M J. Subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects [J]. *J. Sound and Vib.*, 1990, 143(3): 443-454.
- [46] 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.
- [47] MELONI T, KRÜEGER H. Wahrnehmung und empfindung von kombinierten belastungen durch lärm und vibration [J]. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 1990, 37: 170-175.
- [48] PAULSEN R, KASTKA J. Effects of combined noise and vibration on annoyance [J]. *J. Sound and Vib.*, 1995, 181(2): 295-314.

- [49] KNALL V. Railway noise and vibration: effects and criteria [J]. *J. Sound and Vib.*, 1996, 193(1): 9-20.
- [50] ÖHSTRÖM E, SKÖNBERG A. A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: annoyance and activity disturbance effects [J]. *J. Sound and Vib.*, 1996, 193(1): 39-47.
- [51] ÖHSTRÖM E. Effects of exposure to railway noise-A comparison between areas with and without vibration [J]. *J. Sound and Vib.*, 1997, 250(4): 555-560.
- [52] FINDEIS H, PETERS E. Disturbing effects of low-frequency sound immissions and vibrations in residential buildings [J]. *Noise and Health*, 2004, 6(23): 29-35.
- [53] SATO T, MAEDA S, YANO T. Effects of noise exposure on whole body vibration perception threshold [J]. *Noise and Health*, 2004, 6(23): 29-35.
- [54] 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.
- [55] Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden-Schwingungen und sekundärer Luftschall: ÖNORMS 9012:2010 [S].
- [56] STEINHAUSER P. Zur Kombinationswirkung von Schall und Erschütterungen, Österreichische Akademie der Wissenschaften [J]. *Sitzungsberichte Abt. II*, 2007, 216: 127-134.
- [57] HOWARTH H V C, GRIFFIN M J. Subjective reaction to vertical mechanical shocks of various waveforms [J]. *J. Sound and Vib.*, 1991, 147 (4): 395-408.
- [58] MATSUMOTO Y, GRIFFIN M J. Effect of phase on discomfort caused by vertical whole-body vibration and shock - experimental investigation [J]. *Journal Acoustical Society of America*, 2002, 111 (3): 1280-1288.
- [59] STEVENS S S. *Psychophysics, Introduction to in Perceptual, Neural and Social Prospects* [M]. New York: Wiley Press, 1975.
- [60] AHH S J, GRIFFIN M J. Effects of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shocks [J]. *J. Sound and Vib.*, 2008, 311(1/2): 485-497.
- [61] KITAZAKI S, GRIFFIN M J. A modal analysis of whole-body vertical vibration using a finite element model of the human body [J]. *J. Sound and Vib.*, 1997, 200(1): 83-103.

(编辑 吕建斌)