

# 人体全身振动的感知阈值

杨宜谦

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘要:** 综述了人体全身振动感知阈值的标准和指南以及实验室和现场研究的进展情况, 并进行了对比分析。介绍了振动感知的机理、绝对阈值、差别阈限和描述符, 分析了频率、姿势、方向、持续时间、性别、年龄和噪声对人体全身振动感知阈值的影响, 最后指出了需要进一步研究的问题。

**关键词:** 人体全身振动; 感知阈值; 振动感知

**中图分类号:** X827

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-4764(2012)S2-0054-07

## Whole-body Vibration Perception Thresholds

YANG Yi-qian

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

**Abstract:** This paper aims at providing a basic state-of-the-art of standards and guidelines, as well as laboratory and field studies dealing with whole-body vibration perception thresholds, and comparative analysis is given. Mechanisms of vibration perception, absolute thresholds of perception, difference thresholds and descriptors are introduced. The effects of frequency, posture, direction, duration, gender, age and noise on whole-body vibration perception thresholds are reviewed. And the problems requiring further investigation are proposed.

**Key words:** whole-body vibration; perception thresholds; vibration sensing

交通(含铁路、城市轨道交通和公路)、施工(含基础挖掘、隧道开凿、打桩、强夯、爆破等)、工业、地震引起的振动通过大地和建筑结构(墙、柱和楼板)传播到附近的建筑物<sup>[1-5]</sup>。这些振动源的特征不同:连续或不完全连续振动,如工业类;永久性的间歇振动,如交通类;有限持续时间的(非永久性的、独立的或偶发的)振动,如施工类<sup>[2]</sup>。人们对不同振源的感受是不同的<sup>[2]</sup>。

人体全身振动的感知阈值在制订环境振动和建筑物室内振动标准时很重要。而精密仪器设备、精密加工、地震学、火山学更关注低于感知阈值的振动<sup>[3-5]</sup>,而引起建筑物损伤的振动水平一般要远高于人体振动感知阈值<sup>[4]</sup>。

许多国家的经验表明,只要居住建筑的振动稍微超过人的感知水平时,就会引起居住者产生不满(这与噪声有明显区别)。人对建筑物内振动的反应很复杂,人对振动的感知有时并非来自振动本身,而是来自振动的二次影响,例如:结构噪声;家具、窗户、装饰物和建筑附属设施发出的嘎嘎声;视觉影响(如叶子的摆动、室内物品的移动、悬挂物体的晃动)所引起的。人对振动的反应多种多样,包括睡眠障碍、危害精细活动、烦恼、烦躁和恐惧<sup>[1-2,4-7]</sup>。

大量实验室实验研究结果表明,振动感知阈值的个体间差异和个体内差异较大<sup>[8-12]</sup>,个体间差异约为 $2:1$ <sup>[5]</sup>。个体觉察振动的敏感性受许多内部和外部因素的影响:振动大小、频率和持续时间、姿势(坐、站、卧)、方向(垂向、水平向、旋转)、接振位置(手、座椅、脚、背)、活动(休息、阅读、视觉)、振动发生的频繁程度、环境噪声、环境温度、环境湿度等。

根据分析方法的不同,振动感知阈值可分为两类:绝对阈值和差别阈限。

本文综述了全身振动感知阈值的标准和指南以及实验室和现场研究的进展情况,并进行了对比分析。介绍了感知机理、绝对阈值、差别阈限和描述符,分析了频率、姿势、方向、持续时间、性别、年龄和噪声对感知阈值的影响。

### 1 振动感知的机理

人体没有一个单独的振动感觉器官,而是将视觉、前庭觉、躯体觉和听觉系统的信号组合起来感觉振动,其中的任何一个系统都可以以不止一种的方式感觉振动。

对于大位移、低频振动,人们可以通过视网膜上物体相对位置的变化而清晰地看见运动。视觉系统也可以在振动环境中通过观察其他物体的运动来感觉振动。例如:汽车的后视镜的振动导致图像模糊;窗帘和电灯的摇摆;饮料表面出现波纹。另外,眼球会在 $30\sim 80$  Hz发生共振,引起视觉模糊<sup>[13]</sup>。

前庭是内耳中保持平衡的器官,由三个半规管和球囊、椭圆囊组成,其中均充满着内淋巴液,均属于静态平衡。利用内淋巴液的惯性,三个半规管感知身体旋转的角加速度,球囊和椭圆囊分别感知垂向和水平向直线加速度,球囊和椭圆囊统称为耳石器官。半规管是三个互相垂直的半圆形小管,代表空间的三个面,当头旋转时,内淋巴液因惯性而向与旋转相反的方向移位,使得胶质性的终帽发生弯曲变形,刺激毛细胞及其基部的神经末梢。在耳石膜中的钙质耳石晶

体附着在胶质覆膜上,比周围组织重,因此在直线加速度时会发生位移,导致毛细血管的纤毛束转向,产生感觉信号。

躯体系统可以分为三部分:运动觉、内脏的和肤觉。运动觉采用分布在关节、肌肉和肌腱中的本体感受器的信号反馈给大脑。类似地,内脏感觉采用腹部的感受器。肤觉由皮肤内的四类神经末梢组合反应组成。皮肤由表皮和真皮构成。Ruffini 末梢分布在真皮中,感受高频振动(100~500 Hz)和侧面拉伸、压力。Pacinian 小体也分布在真皮中,感受 40~400 Hz 频率范围的振动。Merkel 盘分布在表皮中,感受频率低于 5 Hz 的垂直压力。Meissner 小体也分布在表皮中,感受 5~60 Hz 的振动。

最后是听觉系统。在大多数交通工具中,暴露于瞬态振动和冲击时可以听到交通工具结构辐射的声音。20 Hz 以上的振动物体表面起到了扬声器的作用,直接扰动空气,导致人耳产生听觉感知。人体感知的声音还有一种途径,即振动通过颅骨传递到听觉神经而产生感知,人“听见”传到颅骨的振动的阈值只相当于皮肤振动感知阈值的大约 1/10<sup>[11]</sup>。

## 2 绝对阈值

### 2.1 基于加速度的感知阈值

国际标准 ISO 2631-1:1985<sup>[8]</sup>指出,垂向和水平向振动的感知阈值约为 0.01 m/s<sup>2</sup> 计权均方根值,许多人的个体阈值可能更低。

英国标准 BS 6841:1987<sup>[10]</sup>指出,50%的警觉、健康的人可以觉察到峰值大约为 0.015 m/s<sup>2</sup> 计权振动(对于正弦振动,这约等于 0.01 m/s<sup>2</sup> 均方根值<sup>[5,7]</sup>),当中值的感知阈值大约为 0.015 m/s<sup>2</sup> 时,反应的四分位可扩展到约 0.01~0.02 m/s<sup>2</sup>。这个标准化的阈值可同时适用于垂向和水平向振动<sup>[5]</sup>。

ISO 2631-1:1997<sup>[9]</sup>指出,50%的警觉、健康的人可以觉察到峰值为 0.015 m/s<sup>2</sup> 的 W<sub>k</sub> 计权垂向振动,当中值的感知阈值大约为 0.015 m/s<sup>2</sup> 时,反应的四分位可扩展到约 0.01~0.02 m/s<sup>2</sup>。

BS 6472-1:2008<sup>[4]</sup>指出,50%的处于站姿或坐姿的典型人群可以觉察到峰值为 0.015 m/s<sup>2</sup> 的 W<sub>b</sub> 计权垂向振动,反应的四分位可扩展到约 0.01~0.02 m/s<sup>2</sup>。

BS 6472:1992<sup>[7]</sup>和 BS 6472-1:2008 指出,对于垂向和水平向的连续振动,感知阈值的 VDV 为 0.2 m/s<sup>1.75</sup>。

德国工程师协会标准 VDI 2057 Blatt1:2002<sup>[14]</sup>给出的感知阈值见表 1 所示。

表 1 振动大小和感知(正弦振动)

计权均方根加速度/m·s <sup>-2</sup>	感知
< 0.01	无法感知
0.015	感知阈值
0.015~0.02	勉强感知
0.02~0.08	容易感知
0.08~0.315	强烈感知
> 0.315	极端感知

有差别的,而且 BS6472:1992 与 BS 6472-1:2008 的计权方向有差别。

ISO 2631-2:1989<sup>[1]</sup>、BS 6472:1984<sup>[6]</sup>和 BS 6472:1992 给出了建筑物内 1~80 Hz 的振动加速度和速度基础曲线(加速度基础曲线见图 1,速度基础曲线见图 4),三本标准的垂向和水平向的基础曲线是一样的,但倍乘系数有细微差异。另外 ISO 2631-2:1989 还给出了组合向的基础曲线。当振动位于基础曲线以下时,一般而言,居住者对振动没有负面评论、感觉、抱怨<sup>[1]</sup>或抱怨低<sup>[6-7]</sup>。基础曲线不考虑结构噪声。虽然 ISO 2631-2:1989 的替代版本 ISO 2631-2:2003<sup>[2]</sup>删除了基础曲线,但是美国、法国、瑞典、中国的相关标准中仍然采用基础曲线。

从图 1 中的加速度基础曲线可以看出,垂向加速度在 4~8 Hz 最敏感,为 0.005 m/s<sup>2</sup> 均方根值;水平向和组合向加速度在 1~2 Hz 最敏感,为 0.003 6 m/s<sup>2</sup> 均方根值。意大利标准 UNI 9614:1990<sup>[15]</sup>将垂向计权加速度均方根值 0.005 m/s<sup>2</sup> 和水平向 0.003 6 m/s<sup>2</sup> 认定为感知阈值。日本建筑研究所标准 AIJES-V001:2004<sup>[16]</sup>提出的基于最大垂向均方根加速度的 V-10 曲线比加速度基础曲线略高,10 表示感知概率为 10%。

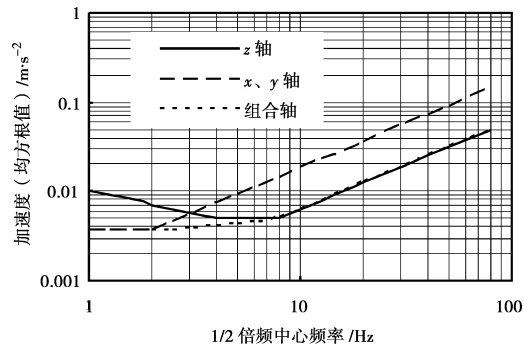


图 1 建筑物内振动加速度基础曲线

建筑物内振动的人体反应满意值是基础曲线乘以倍乘系数。倍乘系数取决于建筑物的使用功能类型和振动是连续的(大于 16 h/d)、间歇的或冲击振动(持续时间<2 s)。ISO 2631-2:1989 的倍乘系数见表 2 所示,BS 6472:1984、BS6472:1992 的细微差异见表 2 的注。倍乘系数的范围从连续振动的 1(关键性工作区,例如医院手术室、精密实验室)到瞬态振动的 128(办公室、车间)。

表 2 建筑物振动的人体反应满意值的倍乘系数<sup>[1,6-7]</sup>

建筑物的使用功能类型	时间	连续振动或间歇振动	每天发生几次的短暂瞬态振动激励
关键性工作区 (例如医院手术室、精密实验室)	昼间和夜间	1	1
居住建筑	昼间	2~4	30~90(60~90)
	夜间	1.4	1.4~20(20)
办公室	昼间和夜间	4	60~128(128)
车间	昼间和夜间	8	90~128(128)

注:1. 括号内的数字来自于 BS6472:1984 和 BS6472:1992,其他均来自于 ISO 2631-2:1989;2. BS6472:1984 和 BS6472:1992 将“间歇振动”归到最后一列;3. BS6472:1992 将“几次”确定为“不多于 3 次”。

需要注意的是,ISO、英国和德国标准的频率计权曲线是

基础曲线与感知阈值在形状上有所不同<sup>[7]</sup>。对 ISO 2631-2:1989 和 BS 6841:1987 的感知阈值(计权均方根加速度  $0.01 \text{ m/s}^2$ )分别按照各自的计权曲线进行反计权,可得到各自的未计权的感知阈值曲线。

在垂向,未计权的感知阈值曲线与基础曲线乘以 2(居住建筑昼间的下限)进行比较可以看出(图 2):BS 6841:1987 中,两者在  $4\sim 8\text{ Hz}$  是重合的;在  $1\sim 4 \text{ Hz}$ ,后者比前者低;在  $8\sim 80 \text{ Hz}$ ,后者比前者高;ISO 2631-2:1989 中,两条曲线是重合的。

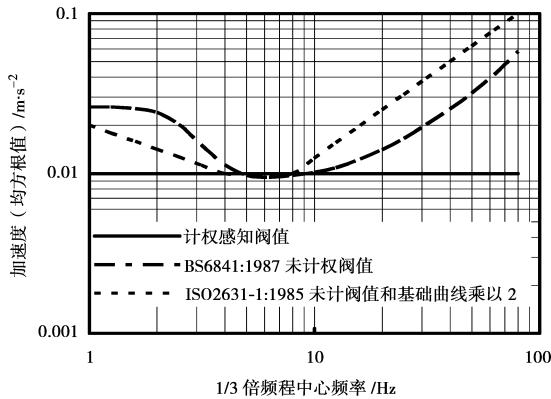


图 2 垂向阈值曲线与基础曲线乘以 2

在水平向,未计权的感知阈值曲线与基础曲线乘以 2 进行比较可以看出(图 3),后者低于前者。

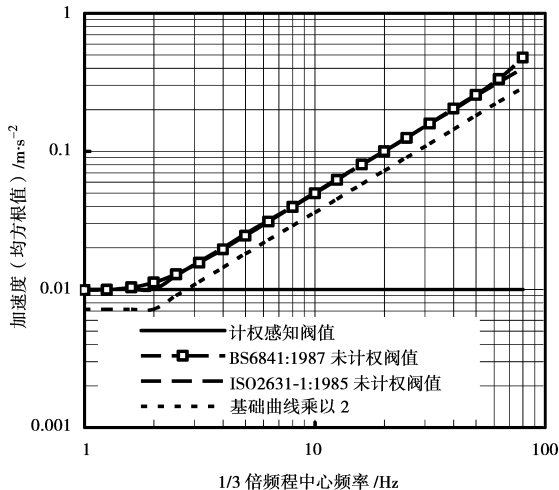


图 3 水平向阈值曲线与基础曲线乘以 2

美国环境科学技术学会标准 IEST-RP-CC 012. 2: 2007<sup>[17]</sup> 在规范安装精密仪器、振动敏感设备的洁净室振动要求时,对比分析了 ISO2631-2:1989,并对其倍乘系数进行了振动感觉描述。美国联邦铁路管理局 FRA (2005)<sup>[18]</sup> 的噪声和振动影响评价指南引用了该标准 1993 版的描述,并进行了补充,见表 3 所示。

ISO 6897:1984<sup>[19]</sup> 和 BS 6611:1985<sup>[20]</sup> 是两部技术等同的标准,给出了高层建筑或固定式海洋结构物的低频水平向振动 ( $0.063\sim 1 \text{ Hz}$ ) 的评价指南。这两部标准给出了五年一遇的暴风持续 10 min 时的建筑物振动满意值, $0.063 \text{ Hz}$  时为  $0.0815 \text{ m/s}^2$  均方根值, $1 \text{ Hz}$  时减小为  $0.026 \text{ m/s}^2$  均方根值。这些值并没有考虑由视觉和听觉感受的振动。

表 3 建筑物内振动和感觉

建筑物的使用功能类型 <sup>[1]</sup>	倍乘系数 <sup>[1]</sup>	人的感觉 <sup>[4,17-18]</sup>
关键性工作区(例如医院手术室、精密实验室)	1	不能觉察到振动,但是在非常安静的房间内可能听见固体传播的噪声
居住建筑(夜间)	1.4	几乎不能觉察到振动,适合于睡眠
居住建筑(昼间)	2	可感觉到振动
办公室	4	明显可感觉到振动
车间	8	

## 2.2 基于速度的感知阈值

图 4 是 ISO 2631-2:1989、BS 6472:1984 和 BS 6472:1992 给出的建筑物内  $1\sim 80 \text{ Hz}$  的振动速度基础曲线。可以看出,垂向速度在  $8\sim 80 \text{ Hz}$  最敏感,为均方根值  $0.0995 \text{ mm/s}$ ;水平向速度在  $2\sim 80 \text{ Hz}$  最敏感,为均方根值  $0.287 \text{ mm/s}$ ;组合向速度在  $8\sim 80 \text{ Hz}$  最敏感,为均方根值  $0.0995 \text{ mm/s}$ 。

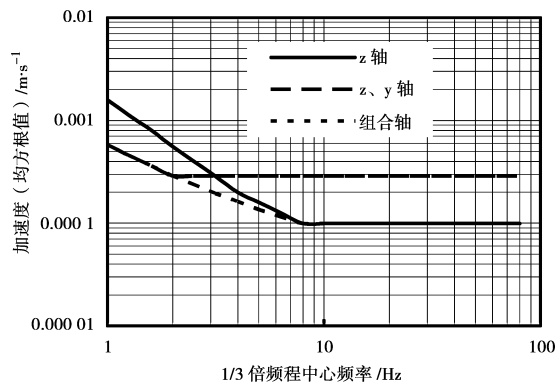


图 4 建筑物内振动速度基础曲线

美国联邦交通管理局 FTA<sup>[21]</sup> 和联邦铁路管理局 FRA (2005) 的噪声和振动影响评价指南采纳 Tokita<sup>[22]</sup>、Nelson 和 Saurenman<sup>[23]</sup> 的研究成果,指出:虽然感知阈值大约为  $0.045 \text{ mm/s}$  未计权均方根值,但是当振动不超过  $0.08 \text{ mm/s}$  时,人对振动的反应通常不会太明显。当居住建筑的振动达到  $0.143 \text{ mm/s}$ ,且每小时的振动事件大于 4 次时,大多数人会烦恼,是不能接受的。如果居住建筑的振动达到  $0.452 \text{ mm/s}$ ,大多数人会因为振动而产生强烈不满,除非每天的振动事件不超过 70 次。

BS 5228-2:2009<sup>[24]</sup> 指出,振动感知阈值的速度峰值的典型范围是  $0.14\sim 0.3 \text{ mm/s}$ ,见表 4 所示,采用振动速度峰值的原因容易测量。

表 4 振动大小和感觉<sup>[24]</sup>

速度峰值/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	人的感觉
0.14	在最敏感的情况下,振动可能是刚刚能被感知的。在低频范围,人对振动不敏感
0.3	在居住建筑中,振动可能是刚刚能被感知的
1.0	在居住建筑中很可能产生抱怨,但是如果事先给居住者预告并解释,还是可以容忍的
10	可能是无法容忍的,除非极其短暂的振动持续时间

德国标准 DIN 4150-2:1999<sup>[25]</sup>指出,对于大多数人,感知阈值的  $KB_{F_{max}}$  值在 0.1~0.2 之间,当  $KB_{F_{max}}$  达到 0.3 时,人在家休息时可以清晰地感知振动,因此是不舒适的。Steinhauser 和 Steinhauser<sup>[26]</sup>给出了  $W_m$  计权振动加速度  $a_w$  ( $\text{mm}/\text{s}^2$ )与  $KB$ (无量纲)的比例关系:  $KB=0.028 \cdot a_w$  (注意,  $a_w$  的时间常数是 1 s,而  $KB$  是 0.125 s)。因此,  $KB=0.1$  时,  $a_w=0.00357 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $KB=0.2$  时,  $a_w=0.00714 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

### 3 差别阈限(最小可觉差)

1846 年,心理物理学的奠基者德国教授 E. H. Weber 在研究肌肉的感觉机能对于轻重不同的重物能分辨到什么程度时,用 3 套不同重量的重物对 4 个被试者进行了实验,发现辨别不是取决于 2 个重物重量差异的绝对值,而是取决于这一绝对值与标准重量值的比例。也就是说刺激差别量与标准刺激之比必须达到一定的大小,才能引起差别感觉。这个比例虽然随着被试的感觉道不同而变化,但对于一定的感觉道来说却是一个小于 1 的常数,因此可以为每一种感官确定这一常数。该理论被大量实验证明,并广泛应用到人的各种感觉道的差别阈限的研究。这一表明心理量和物理量之间关系的定律被称为 Weber 定律。Weber 定律用公式表示为:  $\Delta I/I=k$ ,其中  $\Delta I$  为刺激的差别阈限或最小可觉差(JND),  $I$  为标准刺激强度或原刺激强度,  $k$  为 Weber 分数或 Weber 比例。差别阈限的定义是刚刚能引起差别感觉的刺激之间的最小强度差。差别阈限的操作性定义是有 50% 的次数能觉察出差别, 50% 的次数不能觉察出差别的刺激强度的增量<sup>[27]</sup>。

振动的差别阈限的研究不多。Mansfield 和 Griffin<sup>[28]</sup>研究了在各种公路刺激下的模拟汽车内坐姿振动,差别阈限约为 13%。Morioka 和 Griffin<sup>[29]</sup>测量了坐姿被试者暴露于垂向正弦振动,测试分为 2 种振动大小(0.1  $\text{m}/\text{s}^2$  和 0.5  $\text{m}/\text{s}^2$  均方根值)和 2 个频率(5 Hz 和 20 Hz),发现 Weber 分数在 10% 左右,与振动大小和频率没有明显关系。Bellmann<sup>[30]</sup>测量了暴露于垂向振动的被试者,加速度为 0.063  $\text{m}/\text{s}^2$ ,频率为 5~50 Hz,发现 Weber 分数的中位数是 19%,且与频率无关。Matsumoto 等<sup>[31]</sup>发现,对于 6 个频率(4 Hz、8 Hz、16

Hz、31.5 Hz、63 Hz 和 80Hz)、均方根值 0.7  $\text{m}/\text{s}^2$  的振动, Weber 分数较低(5.2%~6.5%)。这些研究结果的明显差异可能是由于不同的实验方法和实验范围造成的。

Said 等<sup>[32]</sup>在实验室中用 20 名被试者(10 名男性和 10 名女性)研究了在噪声环境中的振动辨别能力。在 3 种声级下(30 dB(A)以下、45 dB(A)和 55 dB(A)),20 名参与者承受两种振动刺激:基准振动和高 25% 的对比振动,要求回答“相同”或“不同”。振动基准大小分四种,其  $KB_{F_{max}}$  值分别为 0.2、0.4、0.8 和 1.6。敏感度指标  $d'$  在 0.96 和 1.2 之间,这表示回答正确的比例在 56% 和 60% 之间<sup>[33]</sup>。但是强调  $KB_{F_{max}}$  值增加 25% 不一定导致  $KB_{F_{Tr}}$  值增加 25%。背景噪声级越低,越多的人能觉察到振动的 25% 变化量(2 dB)。

### 4 振动感知的频率差异

频率计权适用于在人体接触面测量的振动。在多数情况下,频率高于 10 Hz 的振动被椅子、床等减小,但是低于 10 Hz 的振动却被放大。如果在楼板上测量振动,但振动暴露却是经由椅子或床,这时频率计权可能在高频范围过于严格<sup>[10]</sup>。

对于全身振动,目前 ISO 和各国使用的频率计权出自于以下标准:ISO 2631-1:1985、ISO 2631-1:1997、ISO 2631-2:2003、BS 6841:1987、JIS C 1510:1995<sup>[34]</sup>、DIN 45669-1:2010<sup>[35]</sup>,见图 5(注:DIN 45669-1:2010 的  $KB$  计权转换为加速度)。BS 6841:1987 的  $W_b$  计权(垂向)在一定程度上与 ISO 2631-1:1997 的  $W_k$  计权(垂向)有所不同,但其  $W_d$  计权(水平向)与 ISO 2631-1:1997 的  $W_d$  计权(水平向)相同。ISO 2631-2:2003 只给出了组合方向的频率计权  $W_m$ (考虑到建筑物内人的姿势可能不需明确),DIN 45669-1:2010 的  $KB$  计权(转换为加速度)与 ISO 2631-2:2003 的  $W_m$  计权非常相似。当描述符为速度时(例如挪威标准 NS 8176:2005<sup>[36]</sup>),它的计权是与加速度  $W_m$  计权一致的。Turunen-Rise 等<sup>[37]</sup>给出了速度和加速度的关系:  $v_w=a_w/35.7$ 。计权曲线中最敏感的振动频率范围见表 5 所示。

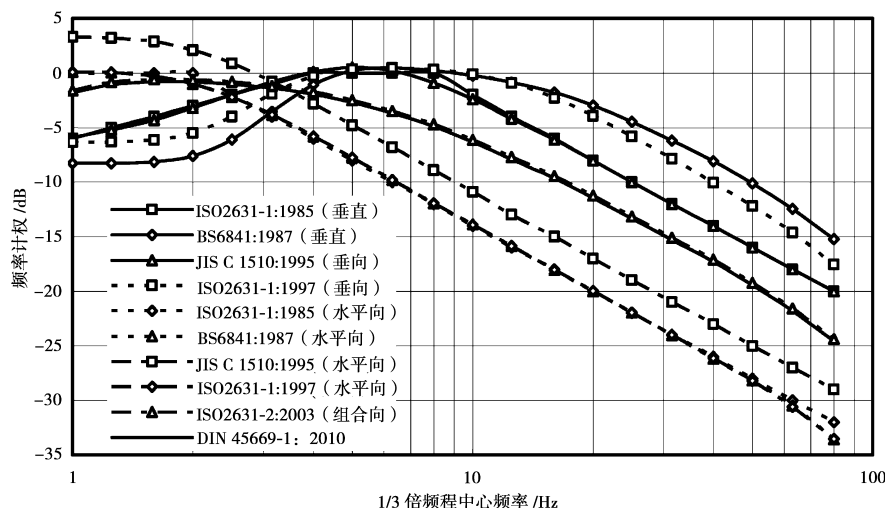


图 5 人体暴露于全身振动——频率计权

最近的研究表明,以加速度表示的感知阈值在 8 Hz 以上频率范围几乎是恒定的<sup>[30,38-40]</sup>。这一点与 ISO 和各国的

标准是矛盾的,这些标准中的计权曲线可能低估人体对振动的实际敏感度。BS 6841:1987 指出,频率计权在高频范围内

会低估可感知性,特别是对水平向振动。BS 6472-1:2008 指出,当振动水平明显高于感知阈值时,BS 6841:1987 中的  $W_b$  是最恰当的垂向频率计权,但是当振动水平等于或略高于感知阈值时,在高频范围内,  $W_b$  计权低估了振动。另外,频率计权假设与振动大小无关,应用的范围包括感知、舒适、疲劳——工效降低、健康和安,如此宽广,这种近似法是有争议的<sup>[5]</sup>。Morioka 和 Griffin<sup>[40]</sup>指出,对于坐姿被试者承受垂向振动来说,未计权加速度是比计权加速度更好的评价量。

表 5 六种代表性计权曲线中最敏感的振动频率范围  
(1/3 倍频程中心频率)

标准	垂向/Hz	水平向/Hz
ISO 2631-1:1985	4~8	1~2
ISO 2631-1:1997	4~12.5	0.63~2
ISO 2631-2:2003 DIN 45669-1:2010	1.25~3.15(组合向)	
BS 6841:1987	4~12.5	1~2
JIS C 1510:1995	4~8	1~2

## 5 振动感知的姿势和方向差异

### 5.1 坐姿的振动感知

大多数暴露于全身振动发生在坐姿,例如人们开车时或交通工具中的乘客。因此,大多数全身振动感知研究中采用的被试者处于坐姿。这些研究采用 2 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。通常是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方法学的难度。

对于垂向振动,最容易觉察的振动是在 5 Hz 左右<sup>[12,41-42]</sup>。5 Hz 的正弦振动,可觉察约  $0.01 \text{ m/s}^2$  均方根值,相当于位移约  $0.01 \text{ mm}$  均方根值。1 Hz 以下,可觉察约  $0.03 \text{ m/s}^2$  均方根值;100 Hz 时,可觉察约  $0.1 \text{ m/s}^2$  均方根值。低于 0.5 Hz,可能看见运动,但不能被其他生理系统感知。

对于水平向振动,最容易觉察的振动是在 2 Hz 以下<sup>[12,42-43]</sup>。在最敏感的频率下,可觉察  $0.01 \text{ m/s}^2$  均方根值正弦水平向振动。对于 1 Hz 而言, $0.01 \text{ m/s}^2$  均方根值相当于位移为  $0.25 \text{ mm}$  均方根值。高于 2 Hz 左右时,敏感度下降,80 Hz 时的阈值提高到大约  $0.4 \text{ m/s}^2$  均方根值。

### 5.2 站姿的振动感知

站姿的全身振动暴露主要发生在交通拥挤时刻,人站在列车、有轨电车或公共汽车里。总的来说,站姿的感知阈值与坐姿相似,虽然有一些研究表明,站姿时的水平向敏感度下降<sup>[12]</sup>。不管怎样,由于手和脚的解剖结构是相似的,以及“振动白趾”的少量研究实例<sup>[44]</sup>,手传振动的研究方法也适用于脚的振动感知评价。有一些文献研究了糖尿病人脚趾的振动感知阈值,但在这些研究中脚并不支撑人体重量。在脚的振动感知阈值的研究中,尚未见到采用与全身振动研究相似的方法。

### 5.3 卧姿的振动感知

卧姿代表着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、战争运输伤员时,采用仰卧姿势。但是卧姿的感知研究比坐姿和站姿少<sup>[12,43,45-50]</sup>。通常,垂向振动比水平向振动更容易感知,但是在很低的频率下却相反<sup>[4]</sup>。

卧姿的感知阈值与坐姿相似。需要指出的是,支承表面的垂向振动最容易被觉察的是在 5 Hz 左右,不用考虑对应于生物力学坐标系中的  $z$  轴(坐姿)、 $x$  轴(俯卧或仰卧)或  $y$  轴(侧卧)运动<sup>[47-48]</sup>。

## 6 振动感知的持续时间差异

感知阈值随着振动持续时间增加到 1 s 会有轻微下降,而随着持续时间的进一步增加基本不再下降。因此研究感知阈值时基本不需要采用均方根值的平均值或任何特定的时间常数。当确定峰值时,不应采用均方根值的平均值。但是,当振动水平高于阈值时,人的烦恼会随着振动持续时间的增加而增加<sup>[9-10]</sup>。

Matsumoto 等<sup>[51]</sup>进行了实验室实验以研究仰卧被试者承受垂向全身振动的感知阈值。12 名年轻男性参加了振动持续时间的影响实验,采用频率为 2 Hz、4 Hz、8 Hz、16 Hz、31.5 Hz 和 63 Hz 的恒定幅值正弦振动,经过 Hanning 窗调制,持续时间分别为 0.5 s、1 s、2 s 和 4 s。当持续时间增加时,峰值振动加速度的感知阈值降低。不同振动持续时间和频率下,采用四次方振动剂量值(VDV)和运行均方根加速度(MTTV)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,积分时间取值在 0.63~0.8 s 之间(当振动持续时间大于 0.5 s 时),与振动持续时间合理对应(需要指出的是日本标准 JIS C 1510 规定的时间常数是 0.63 s)。

## 7 振动感知的性别和年龄差异

Matsumoto 等<sup>[51]</sup>进行了实验室实验以研究仰卧被试者承受垂向全身振动的感知阈值。36 名被试者分成 3 组(年轻女性 12 名、年轻男性 12 名、老年男性 12 名)参加了实验。振动持续时间为 4 s,恒定幅值,频率为 2 Hz、4 Hz、8 Hz、16 Hz、31.5 Hz 和 63 Hz(升降法)。研究表明,振动感知阈值没有明显的性别差异,然而阈值随着年龄的增大而明显增大。

## 8 噪声对振动感知的影响

人在自然环境中常常同时承受振动、空气噪声和结构噪声。

Howarth 和 Griffin<sup>[52-54]</sup>在实验室中 3 次研究了噪声和振动的相互影响,Griffin<sup>[11]</sup>对此进行了综述。在 1991 年的实验中,20 名被试者暴露于模拟的铁路振动(VDV 在  $0.056 \sim 0.40 \text{ m/s}^{1.75}$  之间)和噪声( $L_{AE}$  在  $52.5 \sim 77.5 \text{ dB(A)}$  之间)同时存在的环境中。研究表明,振动对噪声判断力的影响很小,但是噪声对振动判断力的影响可能很大也可能不大,取决于噪声和振动的相对大小,给出了噪声和振动的主观等效关系,以判断两者的相对大小: $L_{AE} = 29.31 \text{ gVDV} + 89.2$ 。

Meloni 和 Krueger<sup>[55]</sup>进行了噪声和振动组合的感知和感觉的实验室研究。研究表明,存在掩蔽效应,噪声越大

( $L_{Aeq}$  大于 64dB), 振动感知阈值越高。在现实的多种感觉同时存在的情况下, 噪声或振动的单一感觉判断的感知测量是不可靠。

Findeis 和 Peters<sup>[56]</sup> 在勃兰登堡的公路交通振动测量表明, 当  $KB_{FTM}$  值为 0.10~0.13 时, 抱怨激增。强有力的证据表明噪声和振动对居民的综合烦恼具有组合影响。只有这样才能解释尽管振动水平低于感知阈值( $KB=0.1$ )却产生的抱怨, 此时引起烦恼的原因是存在结构噪声。给出了人体不同振动感觉的划分区域, 依赖于频率和大小(速度), 建议需要特别关注 20 Hz 以上频率范围。

Sato 等<sup>[57]</sup> 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, 自行调节振动级来确定阈值。采用 4 种正弦波形的振动以及随机振动作为刺激, 同时采用以 10 dB(A) 作为调节量的随机噪声作为刺激。试验发现阈值随着噪声级的增加而增加。这意味着随着噪声级的增加, 人体对振动的敏感度下降了。尽管此中的原因尚不明晰, 但文中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。

## 9 结语

通过对人体全身振动感知阈值的标准和指南以及实验室和现场研究的对比分析可以看出:

1) 最近的实验室和现场研究有助于澄清以下概念的区别: 绝对感知阈值、差别阈限(振动水平的最小可觉差)、主观烦恼(与生活质量有关, 不舒适)和打扰(与睡眠质量有关, 睡眠打扰)。振动感知与主观烦恼和打扰是完全不同的。振动感知阈值的个体间差异和个体内差异较大。噪声的存在会使振动感知阈值提高。

2) 最近的研究表明, 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, 频率计权可能低估人体对振动的敏感度, 因此频率计权曲线应该更平坦。差别阈限(Weber 比例)与振动大小和频率无明显关系。当以中位觉察差别阈限描述时, 人体可以明显觉察到振动大小的 25% 变化(约 2 dB)。

3) ISO 和各国标准和指南中, 采用了不同的描述符(最大运行均方根值、均方根等效值和四次方振动剂量值)、不同的物理量(加速度或速度)和不同的频率计权来描述振动感知阈值。

4) 大多数国家环境和建筑物室内振动限值标准源自于感知阈值; 但是少数国家(包括中国)限值标准源自于可接受烦恼度, 由暴露—反应关系的现场研究得出。关于振动水平最小可觉差, 限值标准大多认为人体可以感觉到的振动最小差别为 40% 变化(约 3 dB), 高于实验室研究结果的 25% 变化(约 2 dB)。

### 参考文献:

[1] ISO 2631-2:1989 Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz) [S].  
[2] ISO 2631-2:2003 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [S].

[3] ISO 4866:2010 Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures [S].  
[4] BS 6472-1:2008 Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting [S].  
[5] Mansfield N. J. Human response to vibration [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.  
[6] BS 6472:1984 Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [S].  
[7] BS 6472:1992 Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) [S].  
[8] ISO 2631-1:1985 Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements [S].  
[9] ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements [S]. ISO 2631-1:1997/Amd 1:2010.  
[10] BS 6841:1987 Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [S].  
[11] Griffin M. J. Handbook of Human Vibration [M]. London: Elsevier Academic Press, 1990.  
[12] Parsons K C, Griffin M J. Whole-body vibration perception thresholds [J]. J. Sound and Vib., 1988, 121(2):237-258.  
[13] Stott J R R, Viveash J P, King, SK. The transmission of vibration from the hand to the head and its effects on visual stability [C]// Proc. of U. K. Informal Group on Human Response to Vib. Army Personnel Research Establishment, Ministry of Defence, Farnborough, Sept. 2-22, 1993.  
[14] VDI 2057 Blatt 1:2002 Human exposure to mechanical vibrations - Whole-body vibration [S].  
[15] UNI 9616:1990 Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo [S].  
[16] AIJES-V001:2004 Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration [S]. Architectural Institute of Japan.  
[17] IEST-RP-CC012. 2:2007 Considerations in cleanroom design [S]. US Institute of Environmental Sciences and Technology.  
[18] High-speed ground transportation - noise and vibration impact assessment [R]. US Department of Transportation - Federal Railroad Administration FRA, 2005.  
[19] ISO 6897:1984 Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz) [S].  
[20] BS 6611:1985 Evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and offshore structures, to low frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz) [S].  
[21] Transit noise and vibration impact assessment [R]. US Department of Transportation-Federal Transit Administration FTA, 2006.  
[22] Tokita Y. Vibration pollution problems in Japan [C]// Inter-Noise 75. Sendai, Japan, 1975:465-472.  
[23] Nelson J. T., Saurenman H. J. State-of-art review: Prediction and control of groundborne noise and vibration from rail transit trains [R]. Washington: U. S. Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration, 1983.  
[24] BS 5228-2:2009 Code of practice for noise and vibration control

- on construction and open sites-Part 2 Vibration [S].
- [25] DIN 4150-2:1999 Vibrations in buildings - Part 2: Effects on persons in buildings [S].
- [26] Steinhauser P, Steinhauser S. Erschütterungsbeurteilung nach ? NORM S 9012 im vergleich zur internationalen normung [J]. L? rmbek? mpfung. 2010,5(5):206-212.
- [27] Coren S, Ward L M, Enns J T. Sensation and perception [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [28] Mansfield N J, Griffin M J. Difference thresholds for automobile seat vibration [J]. Appl. Ergonomics, 2000, 31(3):255 - 261.
- [29] Morioka M, Griffin M J. Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration: Effect of frequency and magnitude [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107(1): 620-624.
- [30] Bellmann MA 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: Universitt Oldenburg, 2002.
- [31] Matsumoto Y, Maeda S, Oji Y. Influence of frequency on difference thresholds for magnitude of vertical sinusoidal whole-body vibration [J]. Industrial Health, 2002,40(4):313-319.
- [32] Said A, Fleischer D, Kilcher H, et al. Zur bewertung von erschütterungsimmissionen aus dem schienenverkehr [J]. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 2001,48(6):191-201.
- [33] Macmillan N A, Creelman C D. Detection theory: A user's guide [M]. 2nd ed. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2005.
- [34] JIS C 1510:1995 Vibration level meters (reaffirmed 2010) [S].
- [35] DIN 45669-1:2010: Messung von schwingungsimmissionen - Teil 1: Schwingungsmesser, anforderungen, prüfung [S].
- [36] NS 8176:2005 Vibration and shock - Measurement of vibration in buildings from land-based transport and guidance to evaluation of its effects on human beings [S].
- [37] Turunen-Rise I H, Brekke A, Hårvik L, et al. Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system [J]. Appl. Acoust., 2003,64(1):71-87.
- [38] Bellmann M A, Remmers H, Mellert V. Grundlegende experimente zur wahrnehmung von vertikalen ganzkörpervibrationen [J]. Humanschwingung. VDI - Bericht, 2004, 1821: 251-270.
- [39] 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.
- [40] Morioka M, Griffin M J. Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot [J]. J. Sound and Vib., 2008,314(1-2): 357-370.
- [41] Benson A J, Dilnot S. Perception of whole-body linear oscillation [C]. Proc. of U. K. Informal Group on Human Response to Vib. Heriot-Watt University, Edinburgh, 1981:9-11.
- [42] Howarth H V C, Griffin M J. The frequency dependence of subjective reaction to vertical and horizontal whole-body vibration at low magnitudes [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988,83(4):1406-1413.
- [43] Matsumoto Y, Kunimatsub S, Ishikawa T, et al. Recent research activities for the assessment of vibration in living environment with respect to human perception in Japan [C]//Proc. of Acoustics'08 Paris, June 29-July 4, 2008: 4313-4318.
- [44] Pelmeur P L, Wasserman D E. Hand-arm vibration. A comprehensive guide for occupational health professionals [M]. 2nd ed. Beverly Farms, MA: OEM Press, 1998.
- [45] Miwa T. Evaluation methods for vibration effect. Part 9. Response to sinusoidal vibration at lying posture [J]. Industrial Health, 1969, 7(2):116-126.
- [46] Miwa T, Yonekawa Y, Kanada K. Thresholds of perception of vibration in recumbent men [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1984, 75(3): 849-854.
- [47] Yonekawa Y, Maeda S, Kanada K, et al. Whole-body vibration perception thresholds of recumbent subjects - Part 1: Supine posture [J]. Industrial Health, 1999,37(4):398-403.
- [48] Maeda S, Yonekawa Y, Kanada K, et al. Whole-body vibration perception thresholds of recumbent subjects - Part 2: Effects of vibration direction [J]. Industrial Health, 1999,37(4): 404-414.
- [49] Okamoto N, Hirao Y, Yamamoto K, et al. Examination about whole-body vibration perception thresholds, Difference by the postures [C]//Proc. INCE/J Ann. Meet. 2001: 97-100.
- [50] Matsumoto Y, Iwane Y, Iwata Y, et al. An investigation of perception thresholds of vertical whole-body transient vibration [C]//Proc. 14th Japan Conf. on Human Response to Vib. 2006:72-83.
- [51] Matsumoto Y, Maeda S, Iwane Y, et al. Factors affecting perception thresholds 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.
- [52] Howarth H V C, Griffin M J. The relative importance of noise and vibration from railways [J]. Appl. Ergonomics, 1990,21(2):129-134.
- [53] Howarth H V C, Griffin M J. The subjective response to combined noise and vibration: summation and interaction effects [J]. J. Sound and Vib., 1990,143(3):443-454.
- [54] 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.
- [55] Meloni T, Krueger H. Wahrnehmung und empfindung von kombinierten belastungen durch l? rm und vibration [J]. Zeitschrift für L? rmbek? mpfung, 1990,37:170-175.
- [56] 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.
- [57] Sato T, Maeda S, Yano T. Effects of noise exposure on whole-body vibration perception threshold [J]. J. of South China Univ. of Tech. (Natural science ed.), 2007, 35(suppl.): 108-111.