

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.053



# 行人-扶梯荷载作用下悬挑楼盖的振动测试 与舒适度评价

潘毅<sup>a,b</sup>, 王双旭<sup>a</sup>, 郭瑞<sup>a</sup>, 刘扬良<sup>a</sup>

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031)

**摘要:**针对搭接扶梯的悬挑楼盖在行人-扶梯荷载作用下容易产生铅垂向振动,以某商业夹层中的悬挑楼盖为对象,通过现场振动测试,研究扶梯运行、行人数量、行走方向及行人运动状态对悬挑楼盖振动响应的影响,依据测试数据,评价悬挑楼盖振动的舒适度及人员感知度。研究表明:行人步频是影响悬挑楼盖振动的主要因素,而扶梯运行与否则是次要因素;多人在扶梯上以同一歩频双向行走时,对悬挑楼盖产生的振动响应较单向行走时有明显削弱的现象;采用峰值加速度对悬挑楼盖进行舒适度评价,当行人在扶梯上跑动时,悬挑楼盖的振动响应易超出舒适度限值;采用KB(Konstant Beurteilungswerte)值对悬挑楼盖进行感知度评价,当行人相对扶梯静止时,悬挑楼盖的振动不会超出感知度容许值,当行人相对扶梯走动或跑动时,悬挑楼盖的振动则会超出感知度容许值。

**关键词:**结构振动;悬挑楼盖;振动测试;振动响应;舒适度评价

**中图分类号:**TU352.1; TU393.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0085-11

## Vibration test and comfort evaluation of cantilever floor under pedestrian-escalator load

Pan Yi<sup>a,b</sup>, Wang Shuangxu<sup>a</sup>, Guo Rui<sup>a</sup>, Liu Yangliang<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Vertical vibration would be incurred easily under the pedestrian-elevator load in the cantilevered floor with erecting escalators. The cantilevered floor in a commercial interlayer is used as an example to study the vertical vibration response considering the influence from the escalator operation, the number of pedestrians and the walking direction. Based on the test data, we evaluate the comfort of the cantilevered floor and the perception of personnel. Results show that the pedestrian frequency is the primary factor affecting the vibration of the cantilevered floor, while the operation of escalator is a secondary factor. It is also found that compared with the unidirectional walking, the vibration response of the cantilevered floor becomes to be weakened obviously when people are walking on the escalator in two-way by the same step.

**收稿日期:**2018-11-03

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0802205);四川省科技计划(2019YJ0222)

**作者简介:**潘毅(1977-),男,教授,博士生导师,主要从事结构抗震鉴定与加固研究, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.  
郭瑞(通信作者),男,博士, E-mail: guor4867@swjtu.edu.cn.

**Received:**2018-11-03

**Foundation item:** National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0802205); Sichuan Science and Technology Program(No. 2019YJ0222)

**Author brief:** Pan Yi(1977-), professor, doctoral supervisor, main research interests: structural seismic appraisalment and reinforcement, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.  
Guo Rui (corresponding author), PhD, E-mail: guor4867@swjtu.edu.cn.

The peak acceleration is used to evaluate the comfort of the cantilevered floor. It is revealed that when the pedestrian runs on the escalator, the vibration response of the cantilevered floor is easy to exceed the comfort limit. And we use the *KB* (Konstant Beurteilungswerte) value to evaluate the comfort of cantilevered floor. When the pedestrian is stationary relative to the escalator, the vibration of the cantilevered floor does not exceed the perceptibility allowable value. However, when the pedestrian walks or moves relative to the escalator, the vibration of the cantilevered floor will exceed the threshold value.

**Keywords:** structural vibration; cantilevered floor cover; vibration test; vibration response; comfort evaluation

随着人们消费水平的提高,各种大型购物中心和商场等建筑被广泛修建。同时,为了追求内部空间及视觉效果,大型商场多存在中庭悬挑环廊搭接自动扶梯(简称扶梯)的现象,环廊作为商场交通的核心,由扶梯连接上下楼层,较容易聚集大量行人。因此,环廊的使用性能尤为重要。但在对环廊结构进行设计时,通常将人行荷载按静力荷载通过限制静力挠度来保证结构正常使用功能性要求,忽略了悬挑楼盖的竖向振动问题<sup>[1]</sup>。同时,由于其悬挑跨度较大、刚度较低,导致悬挑楼盖铅垂向基频降低,当人群有规律活动时,较普通梁柱结构更易在人群步行荷载下发生铅垂向振动,当这种振动达到一定程度时,会给悬挑楼盖上行人带来不舒适的感觉,甚至产生紧张或恐慌的心理<sup>[2]</sup>。因此,有必要对商场中搭接扶梯的悬挑楼盖进行振动原因分析,并对悬挑楼盖的振动进行舒适度评价。

学者们通过现场测试、模型试验及数值分析对高铁站房、人行天桥与大型体育馆等结构的振动舒适度进行了研究。Ellingwood 等<sup>[3]</sup>研究表明,当楼板的跨度  $L$ (单位:m)和楼板振动的基频  $f_1$  不满足  $f_1 \sqrt{L} \geq 24$  的要求时,应该考虑楼板的振动舒适度问题。Griffin 等<sup>[4-5]</sup>通过一系列室内试验,研究了振动频率、方向、暴露时间以及振动输入点、人体姿势等因素对人振动觉阈值的影响。马斐等<sup>[6]</sup>以西安高铁站候车大厅为研究对象,进行了现场实测,得到列车与人行荷载对结构竖向振动的影响。简方梁等<sup>[7]</sup>对造成上海虹桥车站人行走廊振动的人行荷载的各参数进行研究,得到步频对结构的加速度响应影响最大。任晓崧<sup>[8]</sup>等通过大量行人上下楼的试验,提出了人致激励下钢楼梯加速度设计反应谱的方法。杜永峰<sup>[9]</sup>等对 900 组三向楼梯荷载时程数据分析,发现行人上下楼梯时的人行荷载较楼板上行走时有显著增加。然而,现有研究大多针对人行荷载作用在静态结构上的情况,没考虑扶梯运动及行人-扶梯共同作用下结构的振动响应。

为研究行人-扶梯荷载作用对悬挑楼盖结构振动响应的影响,以某商业夹层为研究对象,通过现场测试,分析行人与扶梯荷载下悬挑楼盖振动的主要原因,揭示悬挑楼盖的振动机理及振动在悬挑楼盖中的衰减规律,并判断悬挑楼盖的振动是否符合舒适度限值及是否会引起共振。

## 1 悬挑楼盖振动舒适度评价方法

关于商业区内人员舒适度的评价,有很多相关规范,但大多仅适用于设计,对于既有建筑内人员舒适度的评价还没有明文规定。中国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)(下文简称《高规》),根据国际规范 ISO《机械振动和冲击 人体处于全身振动的评价 第 2 部分:建筑物内的振动 (1~80 Hz)》(2631—2(2003))<sup>[10]</sup>,提出了钢筋混凝土楼盖结构铅垂向频率不宜小于 3 Hz,且在不同情况下的振动限值评价标准为峰值加速度<sup>[11]</sup>,其限值如表 1 所示。

表 1 楼盖铅垂向峰值加速度限值

Table 1 Vertical peak acceleration limits of floor covers  $m/s^2$

人员活动环境	铅垂向自振频率	铅垂向自振频率
	不大于 2 Hz	不小于 4 Hz
住宅、办公	0.07	0.05
商场及室内环廊	0.22	0.15

注:楼盖结构铅垂向自振频率为 2~4 Hz 时,峰值加速度限值可按线性插值选取。

《高规》虽对舒适度的限值做出了规定,可以判断悬挑楼盖的振动是否超限,但对于不超限的情况并不能给出相应的感知评价。德国《建筑物振动 第 2 部分:对建筑物内人员的影响》(DIN 4150-2-1999)定义了等感知曲线,如图 1 所示,用来表示振动的严重程度<sup>[12]</sup>。因此,采用德国 DIN 4150-2-1999 对悬挑楼盖进行感知度评价。在频率-最大速度坐标系中,每一条曲线对应一个感知度 *KB* 值,其计算式为

$$KB = \frac{20.2A}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} = \frac{0.13Vf}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} = \frac{0.8Xf^2}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} \quad (1)$$

式中: $A$ 为加速度的最大幅值; $V$ 为速度的最大幅值; $X$ 为位移的最大幅值; $f_0$ 为基准频率,取5.6 Hz; $f$ 为振动频率,计算范围为1~80 Hz。

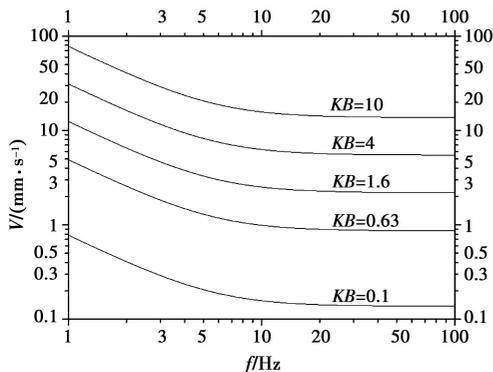


图1 DIN 4150-2 等感知度曲线

Fig. 1 Perception curve of DIN 4150-2

将现场测试得到的加速度带入式(1),即可得到感知度  $KB$  的值。同时,德国该规范中规定了人在不同类别的建筑内感受振动的  $KB$  容许值及不同感觉界限对应的  $KB$  值,如表2、表3所示。

表2 DIN 4150-2 规定的人在建筑内感受振动的  $KB$  容许值  
Table 2 Permissible  $KB$  for perceived vibration in buildings by DIN 4150-2

建筑区域	白天	夜间
纯住宅区、普通居住区、周末节假日居住区、小型生活区	0.2(0.15)	0.15(0.1)
商业区、贸易区(含办公室)	0.4	0.3

注:有水平振动且振动频率小于5 Hz 的建筑区应遵循括号中的值。

表3  $KB$  值指标与人的主观感受

Table 3  $KB$  values Indicators and people's subjective experience

$KB$ 值	主观感受
<0.1	感觉不到振动
0.1	感知临界值
0.4	$KB$ 容许值(商业区)
0.63	感知不太明显
1.6	感知明显
4	感觉强烈
>10	感觉非常强烈

## 2 悬挑楼盖振动测试

### 2.1 测试对象

测试对象为一搭接扶梯的悬挑楼盖,当扶梯上

有行人走动时,扶梯所搭接的悬挑端楼盖会出现明显的振动,而所搭接的固定端楼盖不会出现明显振动。因此,对悬挑端楼盖进行现场振动测试。

该悬挑端楼盖为钢筋混凝土框架结构体系。测试区域为图2中电梯所搭接的楼盖,由图2可以看到,每个测试区均存在一悬挑楼盖。测试一区中,扶梯I下端搭接在总悬挑长为8.018 m的混凝土楼盖上,楼盖在搭接扶梯的根部有一横梁,横梁外楼盖悬挑长度为3.918 m,上端搭接在固定端楼盖上,如图2(a)所示,扶梯I的一阶自振频率为46.2 Hz,悬挑楼盖的一阶自振频率为5.9 Hz;测试二区中,扶梯II上端搭接在悬挑7.926 m的混凝土楼盖上,同样,楼盖在搭接扶梯的根部有一横梁,横梁外楼盖悬挑长度为3.719 m,下端搭接在固定端楼盖上,如图2(b)所示,扶梯II的一阶自振频率为51.2 Hz,悬挑楼盖的一阶自振频率为5.9 Hz。

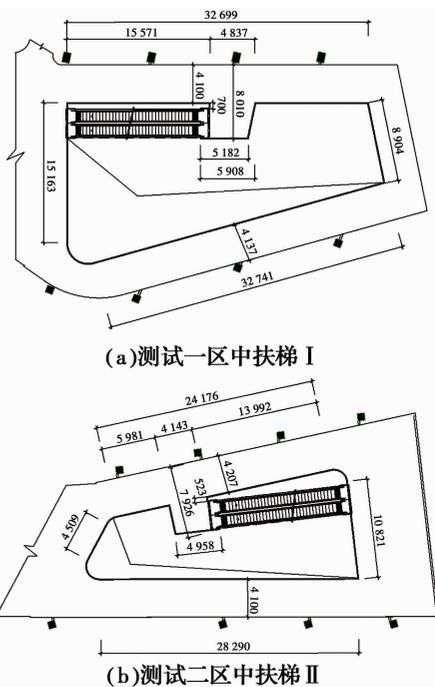


图2 测试区示意图(单位:mm)

Fig. 2 Test area schematic (unit:mm)

### 2.2 测点布置

测点选取在悬挑端楼盖振动响应较明显的区域。在悬挑端楼盖等距布置5个测点,距扶梯最远处为测点1,由远及近分别为测点1~5,成一条直线与扶梯中线延长线重合。扶梯I测点间距为1.3 m,扶梯II测点间距为1 m;在扶梯所搭接的固定端楼盖上布置1个测点(测点6),测点位于扶梯中线延长线上。扶梯I、II的测点具体布置如图3所示。

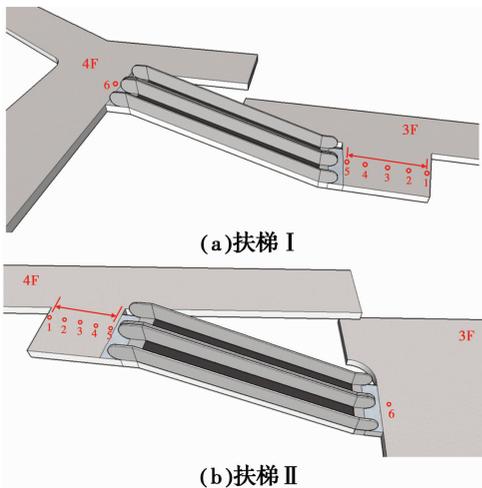


图3 测点位置

Fig. 3 Measuring point placement

由于悬挑端楼盖基频较低,且人体的铅垂向振动敏感带在4~8 Hz范围内<sup>[13]</sup>,因此,选用低频响应性能好的941B型拾振器(图4),频率范围为0.25~80 Hz,分辨率为 $4 \times 10^{-8}$  m/s,灵敏度为 $23 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}/\text{m}$ ,采样频率为256 Hz。在每个测点处分别布置一个水平和垂直向拾振器,如图5所示。信号采集仪使用INV3060A型24位智能信号采集仪。



图4 941B型拾振器



图5 传感器布置

Fig. 4 Type 941B vibration pickup

Fig. 5 Vibration absorber layout

## 2.3 测试工况

建筑物外界振动,如交通运行或测试区内人群走动等引起的振动,都将一起叠加到现场测试当中。为降低干扰,选择晚上测试区内人员较少的时间,并进行了区域清场后进行现场测试。为得知外界振动的影响,在现场正式测试之前,进行外界振动测试,然后,对扶梯启动后分工况进行测试。

1) 外界振动测试工况。将不相关人员清场后即开始外界振动测试,在每个测试区域均进行2次外

界振动测试,每次外界振动测试时长均为120 s。

2) 行人-扶梯荷载下测试工况。为考虑不同荷载对悬挑端楼盖的影响,对扶梯空载与扶梯载行人不同工况进行了测试。扶梯空载时记为工况1;在进行扶梯载行人测试时,对扶梯上行行走不同方向、不同人数和不同运动状态等8组工况进行测试,记为工况2~工况9。工况2中,站立静止为行人相对扶梯静止,行人在扶梯上的分布为前后两人间隔4个台阶;工况3~工况8中,步行为行人在扶梯上步行,行人行走的步频均为2 Hz,行人在扶梯上的分布仍为前后两人间隔4个台阶;工况9中,非匀速跑动则为行人以不同的步频在扶梯上行走或跑动。

表4 行人-扶梯荷载下测试工况

Table 4 The test conditions under Pedestrian-elevator load

工况序号	行人状态	扶梯载人数量	行人方向
1		0	
2	站立静止	4	单向
3	站立静止	8	双向
4	匀速步行	1	单向
5	匀速步行	2	单向
6	匀速步行	4	单向
7	匀速步行	4	双向
8	匀速步行	8	双向
9	非匀速跑动	4	单向

## 3 测试结果及分析

### 3.1 测试结果

在外界振动测试中,由于加速度峰值出现时间和范围并不相同,因此,加速度时程曲线仅选取峰值出现范围内的20 s数据段。如图6所示的扶梯I悬挑端楼盖与固定端楼盖的铅垂向加速度时程曲线,可以看出,峰值加速度波动均在 $15 \text{ mm}/\text{s}^2$ 范围内,且时域图波形均较平缓。因此,在后续的结果分析中不必进行降噪处理,只需对数据进行去异常值即可。

在对数据进行预处理时,使用格拉布斯准则(Grubbs),然后,进行数据处理及分析。在工况1下,扶梯I、II所搭接悬挑端楼盖铅垂向加速度与速度均较扶梯停止时有所增加,如表5所示。两部扶梯峰值加速度增值最大为 $17.40 \text{ mm}/\text{s}^2$ ,峰值速度增值最大为 $0.28 \text{ mm}/\text{s}^2$ 。由测试结果可知,电梯运行对悬挑端楼盖的振动有影响,但其影响微弱,与外界振动引起的悬挑端楼盖铅垂向加速度相当。因

此,可认为电梯运行对悬挑端振动影响不显著。

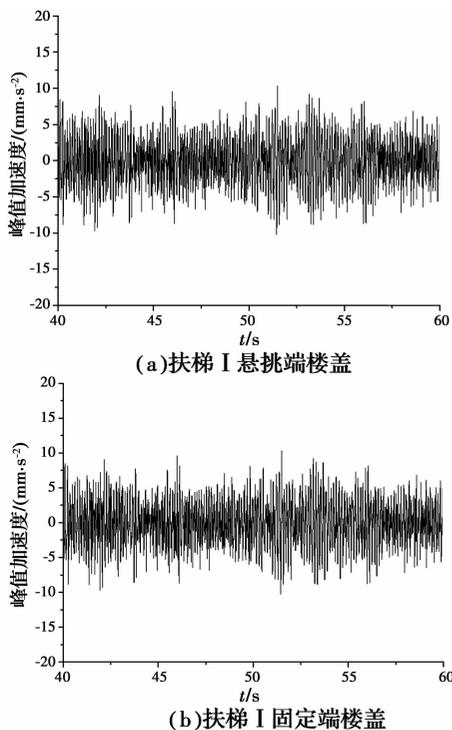


图 6 外界振动铅垂向加速度时程曲线

Fig. 6 The time domain curve of vertical acceleration under environmental vibration

表 5 扶梯运行前后悬挑端楼盖速度与加速度

Table 5 The speed and acceleration of the floor slabs before and after the elevator operation

扶梯状态	铅垂向峰值加速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ )		铅垂向峰值速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	扶梯 I	扶梯 II	扶梯 I	扶梯 II
停止运行	14.74	17.03	0.10	0.23
空载运行	17.05	34.42	0.17	0.51
运行增值	2.31	17.39	0.07	0.28

表 6 扶梯载人运行各工况峰值加速度汇总表

Table 6 Summary of peak accelerations of various conditions during Running escalator carrying pedestrians

扶梯序号	方向	类型	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
I	x	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.04	0.05	0.04	0.04	0.11	0.09	0.12	0.11
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	6.52	7.98	6.10	6.25	12.82	11.44	8.88	12.37
	y	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.06	0.07	0.13	0.13	0.13	0.12	0.08	0.35
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	9.99	13.26	10.23	11.55	15.90	13.93	11.40	20.92
	z	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.53	0.59	1.41	1.52	1.63	1.36	1.25	4.08
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	31.75	34.97	38.52	43.61	63.06	56.68	62.86	192.69
II	x	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.06	0.06	0.08	0.10	0.08	0.06	0.08	0.14
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	0.36	5.4	4.2	4.4	10.8	8.9	4.66	10.6
	y	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.06	0.11	0.09	0.21	0.30	0.21	0.30	0.51
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	6.8	11.81	11.91	14.89	19.81	17.20	18.12	22.53
	z	速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.6	0.68	0.56	1.21	2.02	1.21	2.02	3.11
		加速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$	28.51	31.96	36.09	48.91	71.33	57.63	84.16	189.32

当扶梯开始载人运行时,各工况峰值加速度与峰值速度见表 6。由表 6 可知,扶梯载有非匀速跑动的 4 人(工况 9)时,悬挑端楼盖加速度响应最为明显。其中,扶梯 I 中水平向加速度峰值为  $20.92 \text{ mm/s}^2$ ,铅垂向加速度峰值为  $192.69 \text{ mm/s}^2$ ,水平向速度峰值为  $0.35 \text{ mm/s}$ ,铅垂向速度峰值为  $4.08 \text{ mm/s}$ ;扶梯 II 中水平向加速度峰值为  $22.53 \text{ mm/s}^2$ ,铅垂向加速度峰值为  $189.32 \text{ mm/s}^2$ ,水平向速度峰值为  $0.51 \text{ mm/s}$ ,铅垂向速度峰值为  $3.11 \text{ mm/s}$ 。将不同方向(x、y 与 z 向)的数据进行对比,可得工况 2~工况 9 引起的悬挑端楼盖振动中,铅垂向加速度峰值明显大于水平向加速度峰值。限于篇幅,在此只分析铅垂向峰值加速度。

对比表 6 中工况 2、工况 3、工况 6 可得,在电梯上增加 4 位静止站立行人,悬挑端楼盖铅垂向振动峰值加速度增值仅有  $3 \text{ mm/s}^2$ 。而在电梯上原有的 4 人由静止站立变为正常行走,悬挑端楼盖铅垂向加速度增值达到  $30 \text{ mm/s}^2$ 。由对比可知,增加电梯上静止人数对悬挑端楼盖铅垂加速度的影响仅为使电梯上原有行人走动起来的十分之一。因此,后续分析中不考虑静止行人数量不同对楼盖铅垂向振动响应的影响,着重分析当电梯上行人走动时对悬挑端楼盖铅垂向加速度的影响。

为得到行人不同状态引起悬挑端楼盖振动的内在关系,需对时程数据进行快速傅里叶变换,将实测得到的振动加速度时程数据通过快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)转换成频域函数。快速傅里叶变换 FFT 即将等时距离散傅里叶变换 DFT(Discrete Fourier Transform)分解成几个短序列的离散傅里叶变换 DFT,利用旋转因子的周期性和对称性,减少离散傅里叶变换 DFT 的运算次数。

离散傅里叶变换 DFT 如式(2)所示。

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式中:  $x_n$  为时域离散加速度值;  $N$  为加速度采样数目;  $X_n$  为  $x_n$  的离散频谱。并且有

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (3)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

快速傅里叶(FFT)对 DFT 的第 1 次分解:

$$\begin{cases} X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k) \\ X(k + \frac{N}{2}) = X_1(k) - W_N^k X_2(k) \end{cases}$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (4)$$

以此类推来求解离散傅里叶 DFT 即为快速傅里叶变换 FFT。时域数据截断会导致频谱发生畸变, 即有泄露出现。为降低由此引起的截断误差, 采用汉宁(Hanning)窗  $\omega_n(t)$  作为加窗函数。

$$\omega_n(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi t}{T} & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

其谱窗为

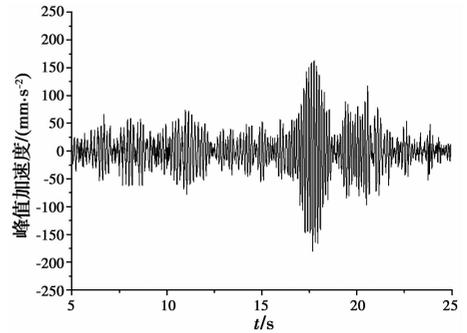
$$W_n(f) = \frac{T}{2} \times \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} + \frac{T}{4} \frac{\sin \pi (f - \frac{1}{T})}{\pi (f - \frac{1}{T})} + \frac{T}{4} \frac{\sin \pi (f + \frac{1}{T})}{\pi (f + \frac{1}{T})} \quad (6)$$

式中:  $f$  为频率;  $T$  为截断时间区间。

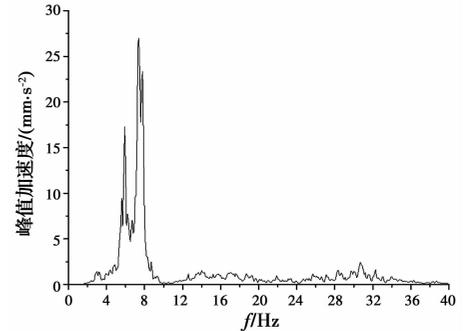
以铅垂向峰值加速度最大的工况 9 为例, 两电梯测点 5 的时域图与频谱图如图 7、图 8 所示。由时域图可以看到, 峰值加速度以零点为中心在两侧对称振荡, 随着扶梯上的人数增加, 加速度呈现出先增大后减小的多个梭形, 具有人群行走的不规则性, 出现多个随机分布的响应峰值(扶梯 I:  $192.69 \text{ mm/s}^2$ ; 扶梯 II:  $189.32 \text{ mm/s}^2$ )。由频谱图可以看到, 振动主要集中在  $5 \sim 10 \text{ Hz}$  之间, 扶梯 I 最大峰值发生在  $7.4 \text{ Hz}$  处, 加速度峰值达到  $31.80 \text{ mm/s}^2$ ; 扶梯 II 最大峰值发生在  $5.6 \text{ Hz}$  处, 加速度峰值达到  $37.54 \text{ mm/s}^2$ 。

### 3.2 测试分析

由外界振动测试与工况 1 的结果比较可知, 扶梯空载时悬挑端楼盖铅垂向峰值加速度的时域曲线波动较平稳, 与外界振动测试时域图相似。由表 5 可



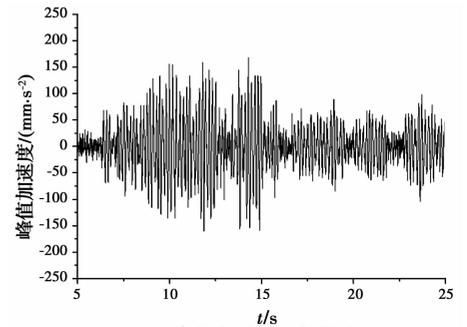
(a) 峰值加速度时域图



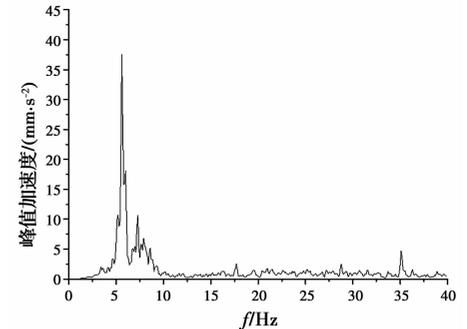
(b) 峰值加速度频谱图

图 7 扶梯 I 工况 9 测点 5 的时域图与频谱图

Fig. 7 Time domain figure and spectrum figure of No. 5 Measuring point under escalator I working condition 9



(a) 峰值加速度时域图



(b) 峰值加速度频谱图

图 8 扶梯 II 工况 9 下测点 5 的时域图与频谱图

Fig. 8 Time domain figure and spectrum figure of No. 5 Measuring point under escalator II working condition 9

知, 悬挑楼盖峰值加速度最大为  $34.42 \text{ mm/s}^2$ , 较外界振动测试时加速度增值最大为  $17.39 \text{ mm/s}^2$ , 最小为  $2.31 \text{ mm/s}^2$ , 最大的悬挑楼盖峰值加速度增值仅为非

匀速跑动时的 10%。由此可知,扶梯运行对于悬挑端楼盖振动的贡献很小,不是导致悬挑端楼盖振动的主要原因。为确定引起悬挑端楼盖振动的真正原因,从以下几方面进一步分析。

1) 行人数量对悬挑端楼盖振动响应的影响

将扶梯上的行人分别控制为 1、2、4、8 人,均以相同步频在运行的扶梯上正常行走,如图 9 所示对扶梯 I 的现场测试。获得的各工况下悬挑端楼盖振动的峰值加速度响应,如扶梯 II 的峰值加速度(表 7 所示),图 10 更直观表示了不同人数对悬挑端楼盖振动的影响。可以看出,当扶梯上行人单向行走分别为 1 人与 2 人时,悬挑端楼盖峰值加速度之比为 1:1.36;当扶梯上行人单向行走为 2 人与 4 人时,悬挑端楼盖峰值加速度之比 1:1.46。当扶梯上行人单向行走分别为 1 人与 4 人时,悬挑端楼盖峰值加速度之比为 1:1.98。当扶梯上双向 4 人行走时悬挑端楼盖峰值加速度是单人行走时的 1.56 倍;当扶梯上双向 8 人行走时悬挑端楼盖峰值加速度是单人行走时的 1.98 倍。

由实测数据可知,当扶梯上行人单向行走时,人群( $n$ 人)引起的悬挑端楼盖振动响应为单人时的 $\sqrt{n}$ 倍,与 Mouring 等<sup>[14]</sup>的研究较符合。但当扶梯上行人双向行走时,悬挑端楼盖峰值加速度较单向同人数行走有明显的削弱,因此,表示行人双向行走需要在前人研究结果的基础上乘以一个折减系数  $k$ 。折减系数  $k$  的取值在 0.6~0.8,对测试数据进行回归分析,得到的折减系数  $k$  为 0.727。

表 7 行人匀速行走导致悬挑端楼盖的峰值加速度

Table 7 The acceleration peaks of floor slabs caused by pedestrians walked at a constant speed mm/s<sup>2</sup>

工况	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
4	28.192 4	32.880	30.753	35.928	36.090
5	33.481 6	47.974	40.618	53.900	48.912 9
6	44.937	68.439	62.277	70.795	71.331 4

扶梯上人数的差异不仅会对峰值加速度的时域图产生影响,也会对频谱图产生影响,如扶梯 II 测点 5 的频谱图(图 11 所示)。当电梯上人数不同时,同一测点处的频谱曲线波动大致相同,主要影响的是 4~8 Hz 范围振动的大小。当扶梯上的行人以相同的步频行走时,悬挑端楼盖并不会产生其他频率的响应,人数的增加只会使悬挑端楼盖在 4~8 Hz 范围内的振动明显增加。峰值加速度由 1 人时的 5.91 mm/s<sup>2</sup> 增加到 2 人时的 12.5 mm/s<sup>2</sup>,增幅为



图 9 工况 6 下扶梯 I 现场测试

Fig. 9 Field test chart of No. I elevator under working condition 6

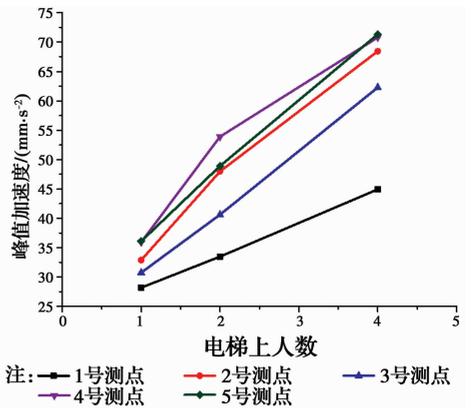


图 10 扶梯 II 载有不同人数对悬挑端楼盖振动的影响  
Fig. 10 Vibration response of floor slabs when the No. II elevator carrying different numbers of pedestrians

111.5%;增加到 4 人时的 20.23 mm/s<sup>2</sup>,增幅为 242.3%。综上所述,扶梯上人数的增加会导致悬挑端楼盖振动响应增加,且主要影响的频段为 4~8 Hz。

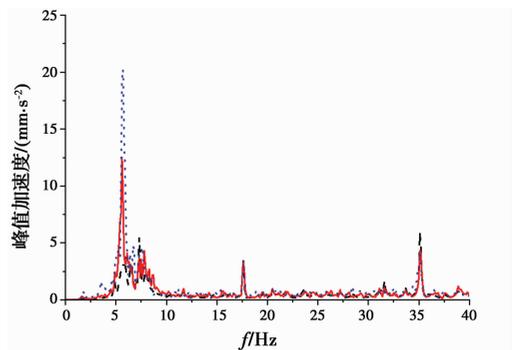


图 11 扶梯 II 载有不同人数时测点 5 频谱图  
注:--- 单向匀速 1 人 ——— 单向匀速 2 人 ···· 单向匀速 4 人

Fig. 11 The spectrum figure of No. 5 measuring point when the No. II elevator carrying different numbers of pedestrians

2) 行走方向对悬挑端楼盖振动响应的影响  
扶梯上相同人数以同步频行走,所有行人同方

向与不同方向运动对悬挑端楼盖产生的振动响应也会造成不同影响。例如,通过图12中工况6、工况7的峰值加速度比较,可以看出,扶梯上人数相同但行走方向不同时,各测点的振动规律相似,其中,工况6相比于工况7,悬挑端楼盖中各测点的峰值加速度有明显提高。其原因为工况6中所有行人的步频、相位均保持一致,但工况7中的人群分为了两组,虽人群行走步频相同,但行人行走的相位不同,同步频、同相位对悬挑端楼盖造成的振动响应大于同步频、不同相位。由此可知,当扶梯所载人数相同时,以同方向、同步频行走将比不同方向、同步频行走对悬挑端楼盖产生的振动响应更大。

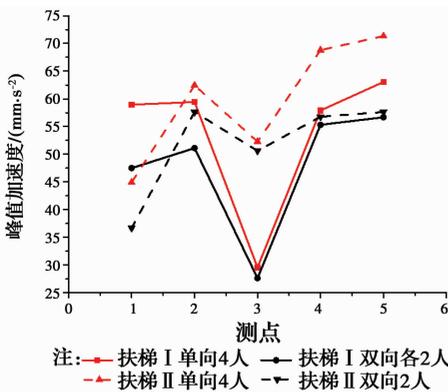


图12 扶梯上人数相同方向不同时悬挑端楼盖峰值加速度

Fig. 12 The peak acceleration of floor slabs when the same number of different pedestrians are on the escalator

### 3) 运动形态对悬挑端楼盖振动响应的影响

扶梯上载有相同人数的情况下,人群静止、在扶梯上匀速行走和非匀速跑动将会对悬挑端楼盖振动响应造成不同的影响。如表8所示,虽然扶梯I上均载有4人,但悬挑端楼盖的铅垂向峰值加速度相差达 $160.94 \text{ mm/s}^2$ ,铅垂向峰值速度相差 $3.46 \text{ mm/s}$ 。当行人在扶梯上匀速行走(工况6)或非匀速跑动(工况9)时,悬挑端楼盖的铅垂向峰值加速度较行人站立静止时(工况2)分别增加了 $98.6\%$ 和 $506.9\%$ 。而行人在扶梯上非匀速跑动(工况9)时,悬挑端楼盖的铅垂向加速度较行人匀速行走(工况6)增加了 $205.6\%$ 。且行人在扶梯上非匀速跑动时,悬挑楼板的铅垂向峰值加速度达到 $192.69 \text{ mm/s}^2$ ,已经超出了《高规》规定的商场楼盖铅垂向加速度限值 $150 \text{ mm/s}^2$ 。由此可以判断,行人在扶梯上跑动导致了悬挑端楼盖峰值加速度超限,行人的运动形态是导致悬挑端楼盖振动响应是否超限的主要因素。

### 4) 测点位置对悬挑端楼盖振动响应的影响

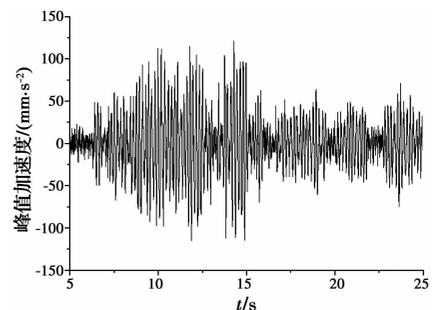
在悬挑端楼盖,距扶梯长度不同,对悬挑端楼盖的振动响应也有所不同<sup>[15]</sup>。行人在扶梯上运动引

起的振动先从扶梯传到悬挑端楼盖上,形成点振源,再通过悬挑端楼盖向外传播。例如扶梯II上载有非匀速跑动的行人时,在距离扶梯分别为 $0 \text{ m}$ (测点5)和 $4 \text{ m}$ (测点1)的测点峰值加速度如图13所示。两测点处的时程曲线形状相似,均呈现由大到小的梭形,但测点5处峰值加速度为 $189.32 \text{ mm/s}^2$ ,测点1处的铅垂向峰值加速度较测点5处降低了 $54.7\%$ ,有明显的衰减现象。扶梯II的其他工况随距离增加振动响应的衰减情况如图14所示,可见,测点距离扶梯越远,振动响应越小,其中,测点3除外。因悬挑端楼盖在测点3附近存在一根挑梁,增加了悬挑端楼盖的刚度,从而降低了测点3处楼盖的振动响应。综上所述,当悬挑端楼盖位置距振源越远时,悬挑端楼盖振动响应衰减越明显。

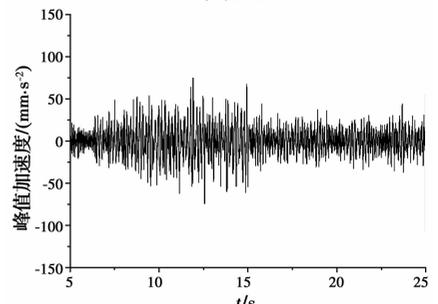
表8 不同运动状态下悬挑端楼盖速度与加速度

Table 8 The velocity and acceleration of the floor slab under different motion states

工况	铅垂向峰值加速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ )		铅垂向峰值速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
	扶梯 I	扶梯 II	扶梯 I	扶梯 II
2	31.75	28.51	0.62	0.68
6	63.05	71.33	1.62	2.02
9	192.69	189.32	4.08	3.11



(a) 测点5



(b) 测点1

图13 扶梯II工况7下峰值加速度时域图

Fig. 13 Time domain figure of the peak acceleration of the escalator II under working condition 7

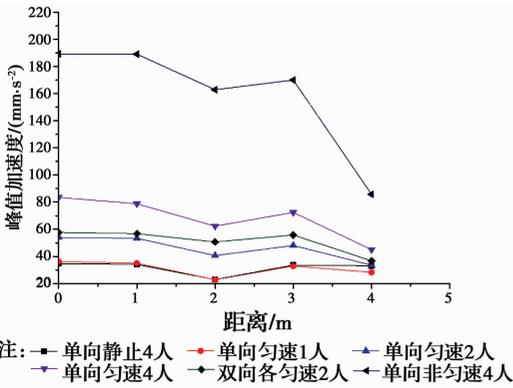


图 14 扶梯 II 附近悬挑端楼盖铅垂向峰值加速度衰减图  
Fig. 14 Peak Attenuation of Vertical Acceleration in the floor Slab near the escalator II

5) 人致激励对悬挑端楼盖共振的影响

考虑行人-扶梯荷载作用下悬挑端楼盖的安全性,有必要判断人致激励是否会引起悬挑端楼盖的共振。由图 15 可知,加速度频谱在 5.4、7.4 Hz 附近有峰值出现,可见测点布置区域悬挑端楼盖一阶基频为 5.7 Hz、二阶基频 7.4 Hz<sup>[16]</sup>。随着人群在扶梯上运动频率增加,悬挑楼盖的低频振动逐渐增大。

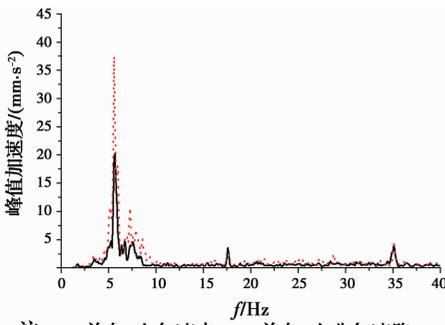


图 15 扶梯 II 各工况下测点 5 频谱图  
Fig. 15 The spectrum figure of No. 5 measuring point at the escalator II under various working conditions

当行人的运动频率快接近基频时,结构在基频处的振动响应有较大增加,当行人以正常步行的频率在扶梯上行走时,悬挑端楼盖在 5.7 Hz 处峰值加速度为 20 mm/s<sup>2</sup>。当测试行人相对扶梯跑动时,悬挑端楼盖在 5.7 Hz 处峰值加速度为 37 mm/s<sup>2</sup>。人正常步行频率介于 1.6~2.4 Hz,人跑动频率介于 2.0~3.5 Hz<sup>[17]</sup>,取最大的跑动频率 3.5 Hz,频率比  $\beta$  最大为 0.467,远远小于共振区(0.75 $\leq\beta\leq$ 1.25)的下限。频率比  $\beta$  如式(7)所示。综上所述,当人群在扶梯上行走时会引起悬挑端楼盖在基频处出现较大响应,但并不会导致结构发生共振。

$$\beta = \bar{\omega} / \omega \quad (7)$$

式中: $\beta$ 为频率比; $\bar{\omega}$ 为荷载圆频率; $\omega$ 为固有自由振动频率。

4 行人和扶梯荷载作用下舒适度评价

将两部扶梯所在处的悬挑端楼盖基频与中国的《高规》限值作对比,因悬挑端楼盖的铅垂向基频为 5.7 Hz,大于规范所规定的混凝土悬挑端楼盖铅垂向频率不小于 3 Hz 的限值,且适用于表 1 的不小于 4 Hz 的范围,因此,取悬挑端楼盖铅垂向加速度限值为 150 mm/s<sup>2</sup>。根据实测数据对测试的各个工况下悬挑端楼盖振动进行舒适度评价,结果如图 16 所示。由图 16 可知,当行人相对扶梯跑动(工况 9)时,扶梯所搭接的悬挑端楼盖的铅垂向加速度已经超过了《高规》的限值(150 mm/s<sup>2</sup>),但是其余工况均未超出规范所规定的限值,再次验证导致悬挑端楼盖振动超过限值的主要原因是行人在扶梯上的跑动。

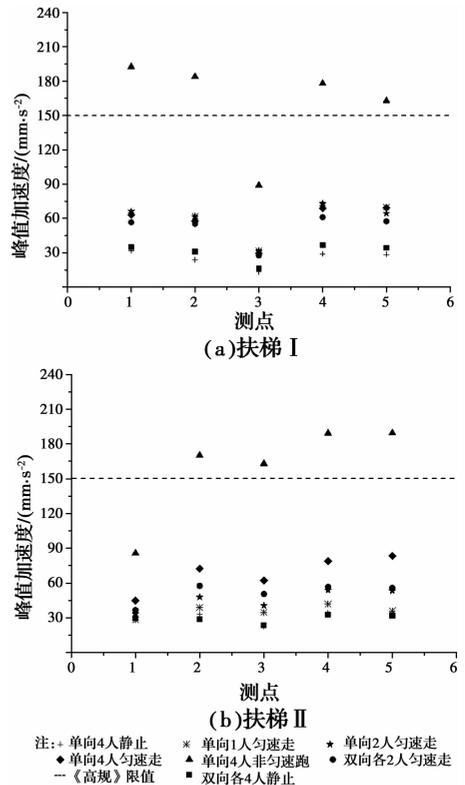


图 16 《高规》规定的舒适度限值  
Fig. 16 Comfort limits specified in the JGJ3-2010

由《高规》可以判断,行人相对扶梯跑动(工况 9)时,悬挑端楼盖的振动已经超出了舒适度的限值,其余工况没有超出限值。然而《高规》不能判断各工况下悬挑端楼盖振动程度,因此,使用《建筑物振动 第2部分:对建筑物内人员的影响》(DIN 4150-2-1999)对悬挑端楼盖振动进行感知评价。用加速

度计算感知度  $KB$  值, 扶梯 I、II 的  $KB$  值如表 9 所示。

由表 9 可知, 当行人在扶梯上跑动时, 会导致悬挑端楼盖上人员感知明显, 其余工况下悬挑端楼盖上人员感知不太明显。德国 DIN 4150-2-1999 中规定的商场建筑内容许值为 0.4, 所以, 扶梯 I、II 在工况 1~工况 2 下悬挑端楼盖振动均在容许范围内; 两部扶梯在工况 4~工况 6 下, 随着扶梯上匀速行走的行人增加, 感知度  $KB$  值也增加, 悬挑端楼盖的振动符合人数增加规律, 但均为感知不明显的程度; 由工况 6~工况 7 的感知度  $KB$  值可知, 单向运动较双向运动对悬挑端楼盖的振动较大; 对于感知度的分析与测试分析得出的规律相似。

表 9 各工况下悬挑端楼盖的感知度

Table 9 Perception of the floor Slab under various working conditions

工况	扶梯 I			扶梯 II		
	$KB$ 值	感知程度	超限情况	$KB$ 值	感知程度	超限情况
1	0.20	感知不太明显	×	0.27	感知不太明显	×
2	0.39	感知不太明显	×	0.34	感知不太明显	×
3	0.43	感知不太明显	√	0.40	感知不太明显	√
4	0.47	感知不太明显	√	0.44	感知不太明显	√
5	0.54	感知不太明显	√	0.70	感知不太明显	√
6	0.77	感知不太明显	√	1.01	感知不太明显	√
7	0.69	感知不太明显	√	0.70	感知不太明显	√
8	0.78	感知不太明显	√	1.05	感知不太明显	√
9	2.35	感知明显	√	2.70	感知明显	√

注: ×表示未超出容许值; √表示已超出容许值。

## 5 结论

1) 在行人-扶梯荷载作用下, 悬挑楼盖的振动响应主要集中在 4~8 Hz 范围内, 行人步频是影响悬挑楼盖振动响应的主要因素, 而扶梯运行与否则是次要因素。

2) 行人在扶梯上以同一步频双向行走时, 对悬挑楼盖产生的振动响应较单向行走时有明显削弱的现象。  $n$  人双向行走引起的楼盖振动响应为单人作用下的  $k$  倍,  $k\sqrt{n}$  值建议取 0.6~0.8。

3) 当行人在扶梯上静止不动或正常行走时, 悬挑楼盖上的行人对振动感知不明显, 而当行人相对扶梯跑动时, 悬挑楼盖上的行人会明显感知振动。因此, 行人在扶梯上跑动会导致结构振动显著超出感知度的指标, 对行人的安全感知不利。

## 参考文献:

- [1] 郑粤, 罗峥, 赵轩, 等. 商场中庭悬挑环廊舒适度分析及评价[J]. 建筑结构, 2017, 47(6): 44-49.  
ZHENG Y, LUO Z, ZHAO X, et al. Serviceability analysis and evaluation on cantilever ring corridors of commercial atriums [J]. Building Structure, 2017, 47(6): 44-49. (in Chinese)
- [2] SHAHABPOOR E, PAVIC A, RACIC V, et al. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 387: 207-225.
- [3] ELLINGWOOD B, TALLIN A. Structural serviceability: floor vibrations [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(2): 401-418.
- [4] 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]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(2): 357-370.
- [5] AHN S J, GRIFFIN M J. Effects of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shocks [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311(2): 485-497.
- [6] 马斐, 张志强, 张晓峰, 等. 高铁站房大跨钢楼盖行车和人群荷载激励下振动响应实测与分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 109-119.  
MA F, ZHANG Z Q, ZHANG X F, et al. Vibration response measurement and analysis of large-span steel floor structure at high-speed rail station under moving train and crowd excitations [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1): 109-119. (in Chinese)
- [7] 简方梁, 吴定俊, 李奇. 上海虹桥车站人行走廊人致振动分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 136-140.  
JIAN F L, WU D J, LI Q. Human-induced vibration analysis of pedestrian suspension corridor in Shanghai Hongqiao station [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 136-140. (in Chinese)

- [8] 任晓崧, 钟源, 郭雪峰, 等. 人致激励下钢楼梯加速度设计反应谱研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 185-192.  
REN X S, ZHONG Y, GUO X F, et al. A study on acceleration design response spectrum for steel stairs under pedestrian loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 185-192. (in Chinese)
- [9] 杜永峰, 刘路路, 朱前坤, 等. 上下楼梯时人行荷载模型参数的试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 220-228.  
DU Y F, LIU L L, ZHU Q K, et al. Tests for parameters of pedestrian load model during human walking up and down stairs [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(21): 220-228. (in Chinese)
- [10] 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的的评价 第2部分: 建筑物内的振动(1Hz~80Hz):GB/T 13441.2—2008/ISO 2631-2:2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2: Vibration in buildings(1 Hz to 80 Hz):GB/T 13441.2 - 2008/ISO 2631-2:2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [11] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Technical specification for concrete structures of tall building:JGJ 3-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- [12] Structural vibration-Part-2: Human exposure to vibration in buildings: DIN 4150-2[S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1999.
- [13] 黄音, 徐嘉敏, 徐诗童, 等. 跳跃荷载作用下体育馆大跨预应力次梁楼盖振动模拟分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 61-65.  
HUANG Y, XU J M, XU S T, et al. Simulation analysis of long-span prestressed secondary beams floor system in gymnasium under jumping loads [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 61-65. (in Chinese)
- [14] MOURING S E, ELLINGWOOD B R. Guidelines to minimize floor vibrations from building occupants [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(2): 507-526.
- [15] 汪益敏, 曾泽民, 邹超, 等. 地铁车辆段试车线列车振动影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1-8.  
WANG Y M, ZENG Z M, ZOU C, et al. Experimental investigation into train-induced vibrations of test-line at metro depot [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(12): 1-8. (in Chinese)
- [16] 刘海鑫, 李辉, 康军立, 等. 桥建合一车站列车振动舒适度评价方法研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(Sup2): 136-139.  
LIU H X, LI H, KANG J L, et al. The evaluation method of vibration comfortable level in bridge-architecture composite station [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35 (Sup2): 136-139. (in Chinese)
- [17] 操礼林. 高铁候车厅大跨楼盖人致振动响应分析与减振控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
CAO L L. Research on human-induced vibration response and vibration control of long-span floor in high-speed railway waiting hall [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

(编辑 胡玥)