文章编号：1674-2974（2024）01-0043-12 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024005

人行悬索桥的步行参数研究

李宇[1†]，冯朴[1]，李琛[2]，王峰[1]
（1. 长安大学 公路学院，陕西 西安 710064；
2. 长安大学 建筑学院，陕西 西安 710064）

摘 要：以九峰山人行悬索桥为观测点，采用视频记录与人工筛选相结合的方法获取了2 236个行人样本的实测数据，进而统计得到人行悬索桥上的行人步行参数（步频、步幅和步速）的分布特性和统计值，并给出了人行悬索桥上的步频-步速、步幅-步速和步频-步幅之间的转换关系式，得到以下结论：1）在人行悬索桥上，全部行人的步行参数都服从正态分布，即步频~N（1.726，0.258）Hz、步幅~N（0.596，0.094）m、步速~N（1.013，0.260）m/s，它们的合理性也在某工程实例的应用中得以验证；2）人行悬索桥上的行人步行参数的均值（标准差）要小于（大于）其他行走环境所统计得到的行人步行参数的均值（标准差）；3）中国人的步频和步幅的均值（标准差）都小于（大于）西方人的步频和步幅的均值（标准差）.因此，在设计我国的人行悬索桥时，不能直接采用其他人种和行走环境的行人步行参数的统计值，而应采用适合于人行悬索桥的步行参数.

关键词：人行悬索桥；步频；步幅；步速；统计分析
中图分类号：U448.27 **文献标志码**：A

Study on Pedestrian Walking Parameters of Suspension Footbridge

LI Yu[1†], FENG Pu[1], LI Chen[2], WANG Fei[1]
（1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710064, China）

Abstract: Taking the Jiufengshan suspension footbridge as the observation site, the measured data of 2 236 pedestrian samples were obtained by video recording and manual screening, and then the distribution characteristics and statistical values of pedestrian walking parameters (step frequency, step length, and walking speed) on the suspension footbridge were statistically obtained. Moreover, the relations among step frequency, step length, and walking speed were also proposed. The conclusions are as follows. 1) On the suspension footbridge, the walking parameters of all pedestrians obey the normal distribution, i.e. step frequency~N(1.726, 0.258) Hz, step length~N(0.596, 0.094) m, and walking speed~N(1.013, 0.260) m/s, and their rationality is also verified in some engineering applications; 2) the mean values (standard deviations) of walking parameters on the suspension footbridge are less (greater) than the mean values (standard deviations) of walking parameters obtained from other

* **收稿日期**：2022-12-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51808053），National Natural Science Foundation of China（51808053）；陕西省自然科学基础研究计划资助项目（2022JQ-507，2023-JC-YB-438），Natural Science Basic Research Program of Shaanxi（2022JQ-507，2023-JC-YB-438）
作者简介：李宇（1982—），男，福建福州人，长安大学副教授，硕士生导师，博士后
† 通信联系人，Email：liyu@chd.edu.cn

walking environments; 3) the mean values (standard deviations) of Chinese step frequency and length are less (greater) than that of Westerners. Therefore, in the design of suspension footbridges in China, the statistical values of walking parameters of other races and walking environments cannot be directly used, while the walking parameters suitable for suspension footbridges should be used.

Key words: suspension footbridge; step frequency; step length; walking speed; statistical analysis

对于人行桥的人致振动问题,其研究基础是步行力模型[1].而行人步行参数则是步行力模型最关键的参数,可定义为:步频f(行人在单位时间内行走的步数)、步幅l(行人行走时每步跨越的长度,取后脚尖到前脚尖的距离)、步速v(因为步行并非匀速,因此取单个行人的平均步行速度).

目前,许多学者在人行道、大型体育场、大型商场、客运站等人流量较大的地点开展了行人步行参数的研究.Galbraith等[2]研究表明:步频越快,竖向步行力曲线的峰值就越大,而且双峰越接近.Matsumoto等[3]随机抽取505个行人自由行走的步频样本,统计得到行人步频服从$N(1.990, 0.173)$Hz的正态分布.Kerr和Bishop[4]对40个自由行走的行人步频样本进行分析,得到的平均步频约为1.901 Hz.Pachi和Ji[5]对两座人行桥的行人步频进行400次样本统计,得出步频服从$N(1.830, 0.110)$Hz的正态分布.Zivanovic等[6]利用视频监控获得2 000余人在桥面自由行进的过程,统计得行人步频服从$N(1.870, 0.186)$Hz的正态分布.李红利[7]、陈政清等[1]根据湖南大学某教学楼门口的学生自由出入的视频观测结果,统计得到行人步频服从$N(1.825, 0.221)$Hz的正态分布,行人步幅服从$N(0.715, 0.078)$m的正态分布.综上所述,行人步行参数呈现窄带的正态分布特征.不同的种族特征、相异的行走环境、行人各自的出行目的等因素,都会影响行人的步行参数,进而使其分布特性存在较大的差异.

然而,上述研究成果主要是集中在大型商场、体育场等建筑或刚度较大的人行桥(如梁式桥)[8-14].而人行悬索桥则属于柔性体系,其人致振动响应相比其他桥型要大得多,进而会影响到行人的步行参数.因此,本文针对某人行悬索桥的行人步行参数进行实地观测和统计分析.

1 行人步行参数的现场实测

1.1 观测地点

九峰山人行悬索桥(图1)位于南平市延平区滨江公园与九峰山森林公园之间,连接市中心与水南区,专供两岸居民通行和游览.该桥主跨为200 m,混凝土桥面板架设在纵、横钢梁上,桥面宽度扣除护栏约3.8 m.该桥的人流量较大,因此本文选择该桥作为行人步行参数的观测地点.另外,该桥的动力特性如表1所示.



图1 九峰山人行悬索桥

Fig.1 Jiufengshan suspension footbridge

1.2 现场实测方法

如图2所示,本文采用视频记录与人工筛选相结合的方法来获取行人步行参数.

1)观测区域:靠近九峰山森林公园一侧的第1根到第3根吊杆之间的区域(图2的两根观测线,间距为8.0 m),其桥梁振动幅度极小,不会影响行人步行参数的观测;另外,该区域旁边有观景平台,便于安装观测设备,且不会影响交通.因此,本研究选取该区域作为观测区域.(注意:跨中至1/4跨区域内可以观测到明显的桥梁振动,这对行人步行参数的观测和统计有一定的影响;而且该区域的空间较小,不

表 1　该人行悬索桥的动力特性

Tab.1　Dynamic characteristics of the suspension footbridge

振型号	频率/Hz	振型描述
1	0.142	主梁一阶正对称侧弯
2	0.284	主梁一阶反对称竖弯
3	0.342	主梁一阶反对称侧弯
4	0.374	主梁一阶正对称竖弯
5	0.532	主梁二阶正对称竖弯
6	0.557	主梁二阶反对称竖弯
7	0.696	主梁二阶正对称侧弯
10	1.016	主缆侧弯
13	1.145	一阶正对称扭转
15	1.156	主缆侧弯
17	1.224	主梁二阶反对称侧弯
21	1.642	主缆侧弯
22	1.708	主梁一阶反对称扭转



(a)观测区域



(b)观测设备

图 2　行人步行参数的现场实测

Fig.2　Field observation on the pedestrian walking parameters

便于安装观测设备.因此,本研究没有选取跨中至1/4跨区域作为观测区域.)

2)观测人群:涵盖了青年到老年的年龄段.根据录像中行人的头发颜色、面部容貌和行走动作,将观测样本区分为年轻男性、年轻女性和老年人(60岁以上的男女).

3)观测时段:春节至元宵节间的9:00~18:00.

4)观测工具:相对于摄像机,高像素手机(视频录制精度达1 600万像素)可以保证视频中的行人清晰可见,且便于携带和架设,不容易引起行人注意(即不影响行人的自由行走).

5)观测方法:将高像素手机放置于桥塔旁边的观景平台,从侧面可清晰地观测到行人步伐;并在观测线上贴上黄色胶带,利用其颜色醒目与反光特性,以准确判断行人脚步是否进入观测段.

1.3　观测结果处理

将拍摄的视频导入计算机,通过视频剪辑软件的暂停、播放和逐帧移动的功能,可以准确地记录行人的性别和年龄段、行人在观测段走过的步数 a、行人进入试验区时脚尖穿过标志线的时刻 T_1 和脚步完全落下的时刻 T_2、行人离开试验区时脚尖越过标志线的时刻 T_3 和脚步完全踏实的时刻 T_4.

根据记录的摄像资料,本研究共获得2 897个行人样本.再从中剔除了相貌不太清晰、步伐不易判断等不良样本后,本研究最终获得2 236个行人样本的 a 和 T_1~ T_4,其中:年轻男性979人、年轻女性1 012人、老年人245人.然后,可以按照式(1)计算步频 f、步速 v、步幅 l:

$$f=\frac{T_4-T_2}{a}v=\frac{L}{T_3-T_1}l=\frac{v}{f} \tag{1}$$

式中:L 为试验段长度,取 L=8 m.结果如图3所示.

2　人行悬索桥的步行参数的统计分析

2.1　K-S检验、偏度和峰度[15]

2.1.1　K-S检验

K-S检验:以累计分布函数为基础,检验两个经验分布是否相同,或者一个经验分布与另一个理想分布是否相同.

对于样本大小为 n 的样本空间,先假设样本点与某一分布(分布函数为 $F_X(x)$,是平滑曲线)相符.再根据已有样本点得到样本的经验分布函数 $\widehat{S}_N(x)$(阶梯状折线).最后,$F_X(x)$ 与 $\widehat{S}_N(x)$ 的最大差值称为K-S检验法的统计值 D:

$$D=\max_{-\infty<x<+\infty}\left|\widehat{S}_N(x)-F_X(x)\right| \tag{2}$$

式中:$\widehat{S}_N(x)=0$ 和 $\widehat{S}_N(x)=1$ 处,D=0.

在此基础上,确定显著性水平 α,查K-S分布临界值表,可得到对应的临界值 $D_{n,\alpha}$.再对比统计观测值 D 与临界值 $D_{n,\alpha}$,当 $D\leqslant D_{n,\alpha}$ 时,可认为样本符合假定分布;否则,拒绝原假设.

2.1.2　偏度 S_k

偏度 S_k 是描述变量分布的偏斜方向和程度:

$$S_{\mathrm{k}}(x)=E\left[\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)^3\right] \tag{3}$$

式中:x_i为样本参数;μ为样本均值;σ为样本标准差.

对于正态分布,当S_{k}=0时,均值两侧的样本数量对称;当S_{k}<0时,称为负偏离或左偏态,均值左侧的数据比右侧的少,即图形上的左侧尾部比右侧的长;当S_{k}>0时,称为正偏离或右偏态,均值右侧的数据比左侧的少,即图形的右侧尾部比左侧的长.

2.1.3 峰度K_{u}

峰度K_{u}是描述分布形态陡缓程度的计量:

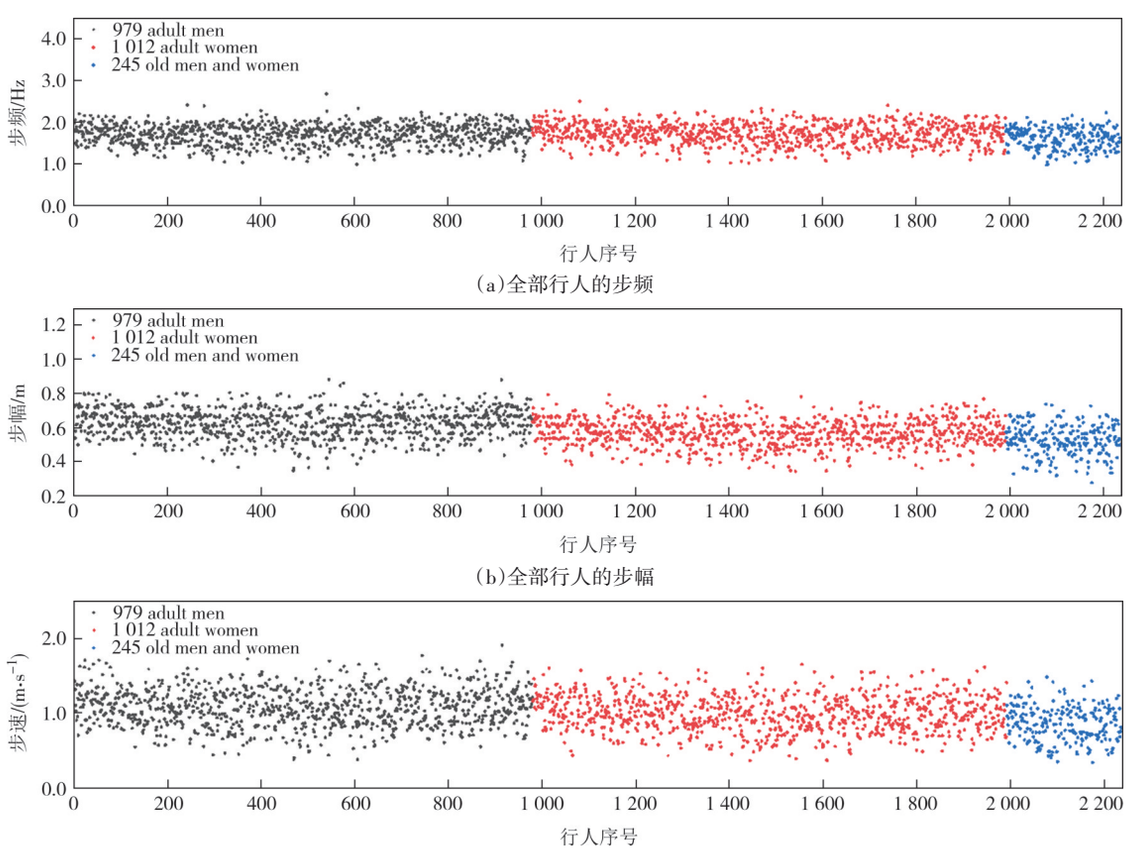
$$K_{\mathrm{u}}=\frac{1}{(n-1)\sigma^4}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^4 \tag{4}$$

式中:各项参数的定义与偏度S_{k}相同.

对于正态分布,K_{u}=3.当K_{u}>3时,表示该组数据的分布较为陡峭,称为尖顶峰;当K_{u}<3时,表示该组数据的分布较平坦,称为平顶峰.可见,分布的K_{u}与3的偏离程度越大,该分布的陡缓程度和正态分布的偏离程度就越大.

2.2 步频分布

用SPSS软件对图3行人步频(f)进行K-S检验,计算f分布的偏度$S_{\mathrm{k},f}$和峰度$K_{\mathrm{u},f}$.从表2可知:



(a)全部行人的步频

(b)全部行人的步幅

(c)全部行人的步速

图3 现场实测数据的处理

Fig.3 Processing results of the filed observation data

表2 f的K-S检验(显著性水平0.01)与分布特性

Tab.2 K-S tests and distribution characteristics of f

样本类型	年轻男性	年轻女性	老年人	全部行人
$S_{\mathrm{k},f}$	−0.095	−0.147	−0.218	−0.095
$K_{\mathrm{u},f}$	3.218	2.780	2.357	2.778
maxD_n	0.052	0.035	0.066	0.034
$D_{n,\alpha}$	0.053	0.049	0.105	0.041
K-S检验	通过	通过	通过	通过

1)在显著性水平0.01条件下,不同分组的f都能满足正态分布的K-S检验.

2)各分组的$S_{k,f}$<0,即各分组的f分布都呈左偏态;老年人的$K_{u,f}$最小(2.357<3),即老年人的f分布较平坦;年轻男性$K_{u,f}$最大(3.218>3),即年轻男性的f分布较为陡峭(这也可从图4中看出).

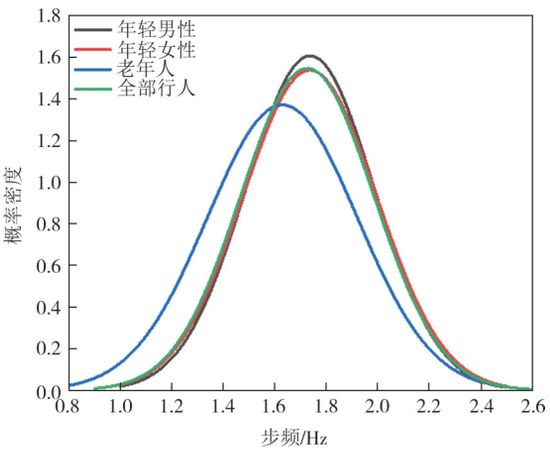


图4　f分布的拟合曲线

Fig.4　Fitting curves of the distributions of f

在此基础上,绘制f分布直方图,用Matlab的Curve Fitting Tool进行拟合分析,可获得具有95%置信区间的正态分布概率密度函数(图4和图5),从中可知:

1)在人行悬索桥上,年轻男性的f~N(1.737, 0.248)Hz,年轻女性的f~N(1.736, 0.259)Hz,老年人的f~N(1.629, 0.291)Hz,全体行人的f~N(1.726, 0.258)Hz.

2)在人行悬索桥上,年轻男、女性的μ_f和σ_f相差不大,可见,年轻男、女性的f统计结果接近,即性别对年轻人的f影响很小;老年人的μ_f要小于年轻人的μ_f,而老年人的σ_f则要大于年轻人的σ_f,可见,年轻人的步伐快于老年人,年轻人的f离散程度也小于老年人,即年龄对f的影响很大.

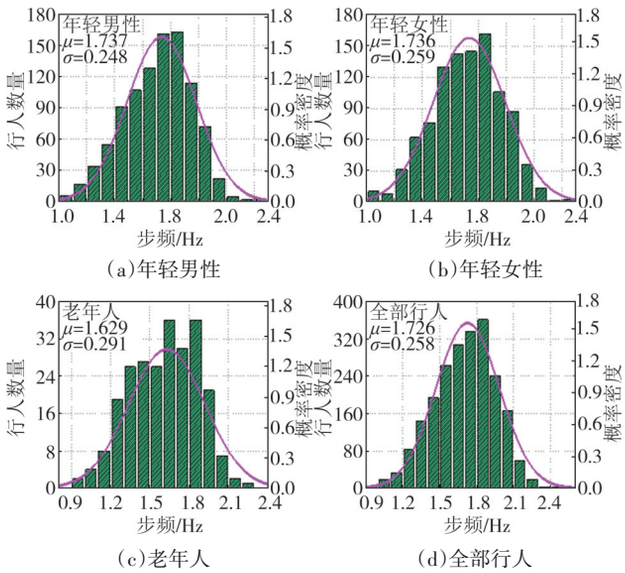


图5　不同性别和年龄段的f分布

Fig.5　Distribution of f with different gender and age

将本文人行悬索桥上f的统计值与其他学者在其他场地获得的f的统计值进行对比(表3)后可知:

1)对比本文与Živanović等[6]和Wheeler[18]的f统计值可知,中国人的μ_f小于西方人的μ_f,而中国人的σ_f则大于西方人的σ_f.可见,不同人种的f统计值差别较大,不能将国外学者所统计的西方人的f统计值直接用于中国的人行桥设计中.

表3　f统计值的对比

Tab.3　Comparison of the statistical values of f

样本来源	观测地点	观测对象	样本大小	分布类型	μ_f/Hz	σ_f/Hz
本文	九峰山人行悬索桥(L = 200 m)	年轻男性	979	正态分布	1.737	0.248
		年轻女性	1 012	正态分布	1.736	0.259
		老人	245	正态分布	1.629	0.291
		总体	2 236	正态分布	1.726	0.258
李红利[7]、陈政清等[1]	湖南大学教学楼	男生	7 544	正态分布	1.834	0.222
		女生	4 749	正态分布	1.811	0.217
		全部	12 293	正态分布	1.825	0.221
Pachi et al[5]	Merchant人行桥(L=20 m)	男人	200	正态分布	1.800	0.110
	Lowry人行桥(L=91.2 m)	女人	200	正态分布	1.860	0.110
Pachi et al[5]	Arndale购物中心	男人	200	正态分布	1.970	0.120
	Triangle购物中心	女人	200	正态分布	2.030	0.140
Živanović et al[6]	谢菲尔德大学	年轻学生	1 976	正态分布	1.870	0.186
Kasperski et al[16]	行人结构	全体行人	250	正态分布	1.820	0.120
Matsumoto et al[17]	某简支梁人行桥(L=48.5 m)	全体行人	505	正态分布	1.990	0.173

2)对比本文与李红利[7]的f统计值可知,当测试对象为同一人种时,本文的μ_f要小于李红利的μ_f,而本文的σ_f则要大于李红利的σ_f,这是因为采样对象与采样地点的不同.李红利统计的对像为湖南大学的在校大学生,且几乎全为年轻男性,其测点设于教学楼前的混凝土地面;而本文采样对象为人行悬索桥两岸的居民,采样对象的年龄跨度较大,测点为柔性体系的人行悬索桥.可见,采样对象与采样地点对f的统计值影响很大.

3)进一步分析可知,人行悬索桥上的μ_f要小于其他行走环境的μ_f,而人行悬索桥上的σ_f要大于其他行走环境的σ_f.这是因为行人步伐所激起的人行悬索桥的振动(柔性体系、刚度较小,人致振动大)将会影响行人心理,进而减缓前进的脚步.

可见,只有在人行悬索桥上进行专门的f实测,才能准确计算人行悬索桥的人致振动.

2.3 步幅分布

用SPSS软件对图3行人步幅(l)进行K-S检验,计算l分布的偏度$S_{k,l}$和峰度$K_{u,l}$.从表4可知:

1)在显著性水平0.01的条件下,不同分组的l都能满足正态分布的K-S检验.

2)各分组的$S_{k,l}$<0,即各分组的l分布都呈左偏态;全部行人的$K_{u,l}$最小(2.439<3),即全部行人的l分布较平坦;年轻女性$K_{u,l}$最大(2.938<3),即年轻女性的l分布较为陡峭(这也可从图6中看出).

表4 l的K-S检验(显著性水平0.01)与分布特性

Tab.4 K-S tests and distribution characteristics of l

样本类型	年轻男性	年轻女性	老年人	全部行人
$S_{k,l}$	−0.050	−0.185	−0.194	−0.050
$K_{u,l}$	2.539	2.938	2.768	2.439
maxD_n	0.053	0.035	0.062	0.034
$D_{n,\alpha}$	0.055	0.049	0.105	0.036
K-S检验	通过	通过	通过	通过

在此基础上,绘制l分布直方图,用Matlab的Curve Fitting Tool进行拟合分析,以获得具有95%置信区间的正态分布概率密度函数(图6和图7),从中可知:

1)在人行悬索桥上,年轻男性的l~N(0.637, 0.084) m,年轻女性的l~N(0.575, 0.087) m,老年人的l~N(0.531, 0.088) m,全体行人的l~N(0.596, 0.094) m.

2)在人行悬索桥上,年轻男性μ_l最大,其次为年轻女性μ_l,而老年人μ_l最小,但各组行人σ_l相差不大.可见,年轻男性的步幅最长,其次为年轻女性的步幅,而老年人的步幅最短,但他们l的离散程度大抵相同,即性别和年龄对行人l的影响都很大.

将本文人行悬索桥上l的统计值与其他学者在其他场地获得的l的统计值进行对比(表5)后可知:

1)对比本文与Živanović等[6]的l统计值后可知,中国人的μ_l小于西方人的μ_l,而中国人的σ_l则大于西方人的σ_l.这是因为西方人一般比亚洲人高大,相应地步幅也就大.可见,不同人种的l统计值差别较大,不能将国外学者所统计的西方人的l统计值直接用于中国的人行桥设计中.

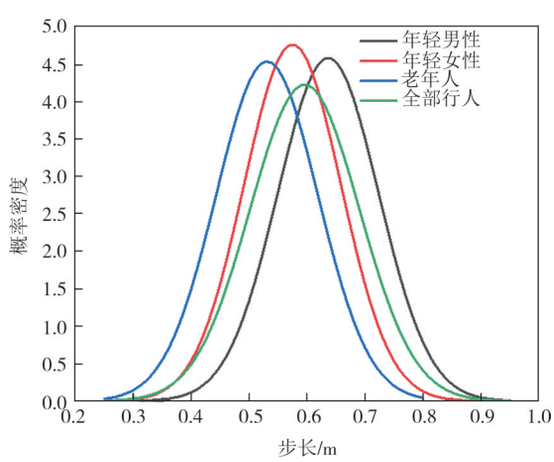
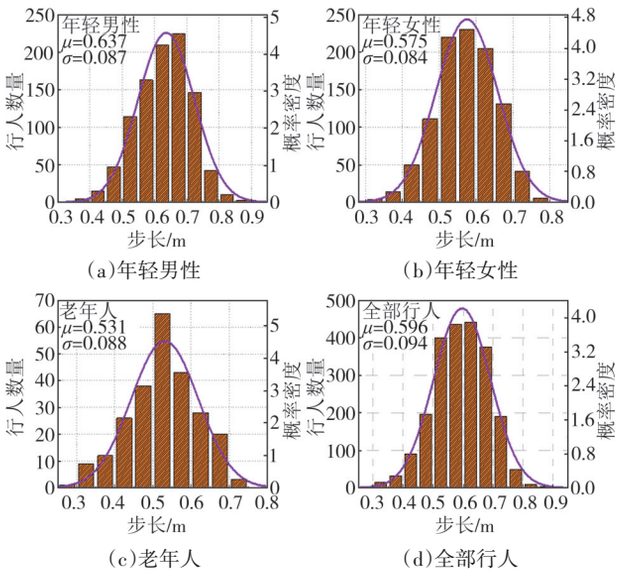


图6 l分布的拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of the distributions of l

2)对比本文与李红利[7]的l统计值可知,当测试对象为同一人种时,本文统计的μ_l要小于李红利统计的μ_l,而本文统计的σ_l则要大于李红利统计的σ_l.这主要是因为采样对象、采样地点、行走目的的不同:相对于坚硬的混凝土地面,本文柔性的人行悬索桥振动较大,会减缓行人的l;相对于年轻的大学生,本文年龄跨度较大,样本对象的l必然较小;相对于



(a)年轻男性　(b)年轻女性　(c)老年人　(d)全部行人

图 7　不同性别和年龄段的 l 分布

Fig.7　Distribution of l with different gender and age

湖南大学课前进入教学楼或者课后赶往食堂的年轻学生,本文人行悬索桥上出行或散布的居民的 l 势必会减小.可见,采样对象、采样地点、行走目的不同时,所统计的 l 也不一样.

3)进一步分析可知,人行悬索桥上的 μ_l 要小于其他行走环境所统计的 μ_l,而人行悬索桥上的 σ_l 要大于其他行走环境所统计的 σ_l.这是因为行人步伐所激起的人行悬索桥(柔性体系、刚度较小)的振动会影响行人的心理,进而减缓前进的脚步.

因此,只有在人行悬索桥上进行专门的 l 实测,才能准确计算人行悬索桥的人致振动.

2.4　步速分布

用SPSS软件对图3行人步速(v)进行K-S检验,计算 v 分布的偏度 $S_{k,v}$ 和峰度 $K_{u,v}$.从表6可知:

表 5　l 统计值的对比

Tab.5　Comparison of the statistical values of l

样本来源	观测地点	观测对象	样本大小	分布类型	μ_l/m	σ_l/m
本文	九峰山人行悬索桥(L = 200 m)	年轻男性	979	正态分布	0.637	0.084
		年轻女性	1 012	正态分布	0.575	0.087
		老人	245	正态分布	0.531	0.088
		总体	2 236	正态分布	0.596	0.094
李红利[7]、陈政清等[1]	湖南大学教学楼	男生	7 544	正态分布	0.739	0.074
		女生	4 749	正态分布	0.677	0.067
		全部	12 293	正态分布	0.715	0.078
Pachi et al[5]	Merchant人行桥(L=20 m)	男人	200	正态分布	0.75	—
	Lowry人行桥(L=91.2 m)	女人	200	正态分布	0.67	—
Pachi et al[5]	Arndale购物中心	男人	200	正态分布	0.74	—
	Triangle购物中心	女人	200	正态分布	0.68	—
Živanović et al[6]	谢菲尔德大学	年轻学生	1 976	正态分布	0.71	0.071
Kasperski et al[16]	行人结构	全体行人	250	正态分布	0.75	0.07
Wheeler[18]	—	全体行人	—	—	0.75	—

表 6　v 的K-S检验(显著性水平0.01)与分布特性

Tab.6　K-S tests and distribution characteristics of v

样本类型	年轻男性	年轻女性	老年人	全部行人
μ_v	1.078	0.990	0.857	1.013
σ_v	0.263	0.244	0.264	0.260
$S_{k,v}$	0.153	−0.079	0.089	0.153
$K_{u,v}$	2.885	2.905	2.441	2.815
maxD_n	0.030	0.022	0.051	0.019
$D_{n,\alpha}$	0.053	0.049	0.105	0.034
K-S检验	通过	通过	通过	通过

1)在显著性水平0.01的条件下,不同分组的 v 都能满足正态分布的K-S检验.

2)年轻女性的 $S_{k,v}$<0,其 l 分布呈左偏态;其他分组的 $S_{k,v}$>0,它们的 l 分布呈右偏态;年轻女性 $K_{u,v}$ 最大(2.905<3),即年轻女性的 l 分布较为陡峭;老年人的 $K_{u,v}$ 最小(2.441<3),即老年人的 v 分布较平坦(这

也可从图8中看出).

在此基础上,绘制 v 分布直方图,用 Matlab 的 Curve Fitting Tool 进行拟合分析,以获得具有95%置信区间的正态分布概率密度函数(图8和图9),从中可知:

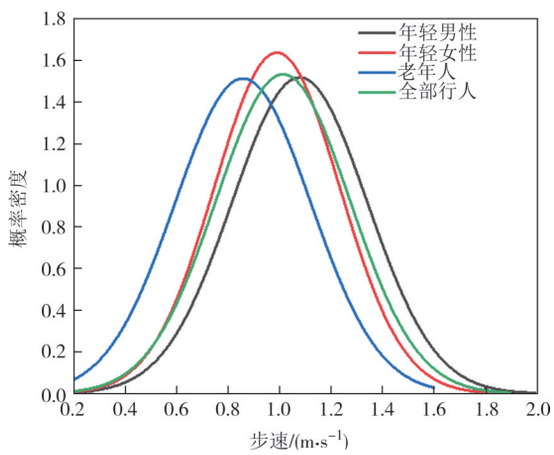


图8 v 分布的拟合曲线

Fig.8 Fitting curves of the distributions of v

1)在人行悬索桥上,年轻男性的 v~N(1.078, 0.263) m/s,年轻女性的 v~N(0.990, 0.244) m/s,老年人的 v~N(0.857, 0.264) m/s,全部行人的 v~N(1.013, 0.260) m/s.

2)在人行悬索桥上,年轻男性 μ_v 最大,其次为年轻女性 μ_v,而老年人 μ_v 最小,但各组行人 σ_v 相差不大.可见,年轻男性的步速最快,其次为年轻女性的步速,而老年人的步速最慢,但他们 v 的离散程度大抵相同,即性别和年龄对行人 v 的影响都很大.

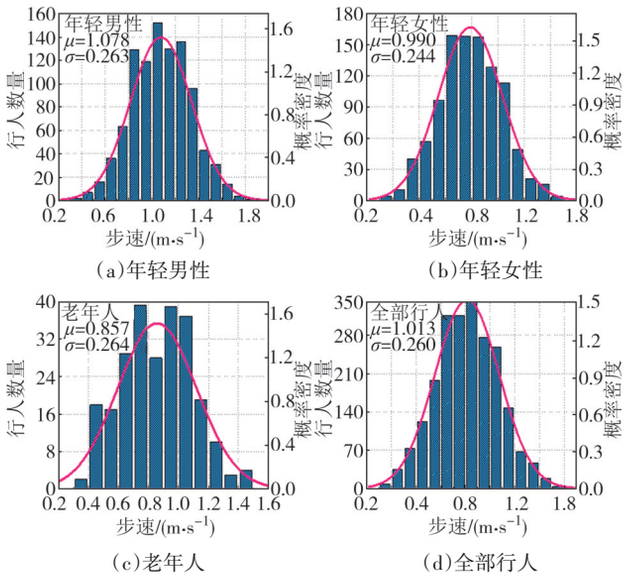


图9 不同性别和年龄段的 v 分布

Fig.9 Distribution of v with different gender and age

将本文人行悬索桥上 v 的统计值与其他学者在其他场地获得的 μ_v 进行对比(表7)后可知:人行道上的 μ_v,最小的 1.200 m/s,最大的 1.390 m/s,即基本上都在 1.300 m/s 附近;但本文观测的人行悬索桥上的 μ_v=1.013 m/s,这与人行道上实测得到的 μ_v 差距较大.可见,人行悬索桥上的 μ_v 要小于普通路面上的 μ_v,即行走环境对 v 有较大的影响.

表7 v 统计值的对比

Tab.7 Comparison of the statistical values of v

样本来源	观测地点	观测对象	样本大小	分布类型	μ_v/(m·s^{-1})	σ_v/(m·s^{-1})
本文	九峰山人行悬索桥(L = 200 m)	全体行人	2 236	正态分布	1.013	0.260
Pachi et al[5]	Merchant 人行桥(L=20 m)	男人	200	正态分布	1.350	0.130
	Lowry 人行桥(L=91.2 m)	女人	200	正态分布	1.250	0.120
Pachi et al[5]	Arndale 购物中心	男人	200	正态分布	1.460	0.120
	Triangle 购物中心	女人	200	正态分布	1.370	0.130
Živanović et al[6]	谢菲尔德大学	年轻学生	1 976	正态分布	1.327	0.126
Wheeler[18]	—	全体行人	—	—	1.500	—
裴玉龙等[19]	哈尔滨某人行道	全体行人	—	正态分布	1.390	—
景超[20]	长春某人行道	全体行人	—	正态分布	1.250	—
张惠玲等[21]	重庆某人行道	全体行人	—	正态分布	1.200	—

产生上述现象的原因主要是:

1)普通路面一般比较坚实,不会影响行人正常行进的步伐;而人行悬索桥为柔性体系(自身刚度较小),行人的步伐会激起较大的桥梁振动,这就会使行人产生不安的心理,进而降低自身的行进速度.

2)人行道作为通行路径,行人的行走目标明确(一般情况下行人不会停驻)且行走状态一致;而人行悬索桥除了作为行人通道外,还可供行人驻足观

景,尤其是景区人行悬索桥(多建于深沟峡谷之上)的周围景色秀丽,这将吸引行人的注意力而使行人不知不觉地降低了步行速度.

综上所述,人行悬索桥上的v不同于其他行走环境的v.因此,在计算人行悬索桥的人致振动时,不能简单地用其他行走环境的v来代替.

2.5　步频、步幅和步速之间的关系

当步速(v)为0.45~1.65 m/s时,从图3中选出同一步速所对应的步频(f)和步幅(l),并绘制相应的散点图,再将对应相同v的散点连接成线,可得到行人等速步行线分布云图.如图10所示:f和l的散点分布在一个类似于倾斜椭圆的区域;当v增加时,f和l也同步增加.

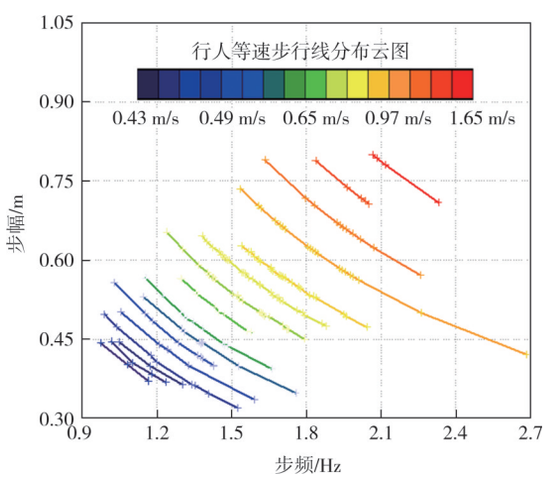


图10　行人等速步行线分布云图

Fig.10　Nephogram with constant walking speed

再以v为变量,绘制带误差棒的f和l的散点图,进而得到它们的拟合曲线.如图11所示:随着v的变化,f和l都表现出明显的非线性.

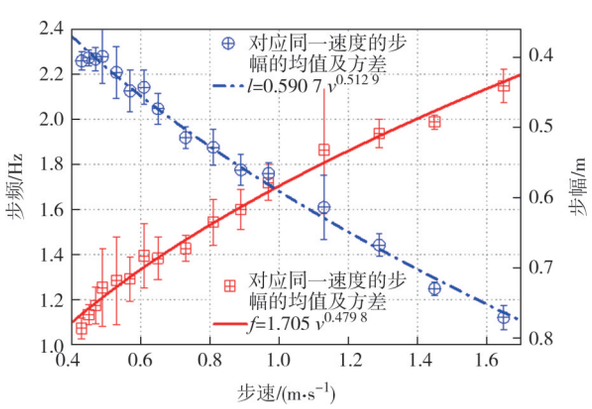


图11　步频、步幅随步速的变化

Fig.11　Step frequency and length with different walking speed

进一步以l为变量,以f为因变量,绘制它们的散点图,进而得到对应同一速度的f和l的均值之间的拟合曲线(图12).

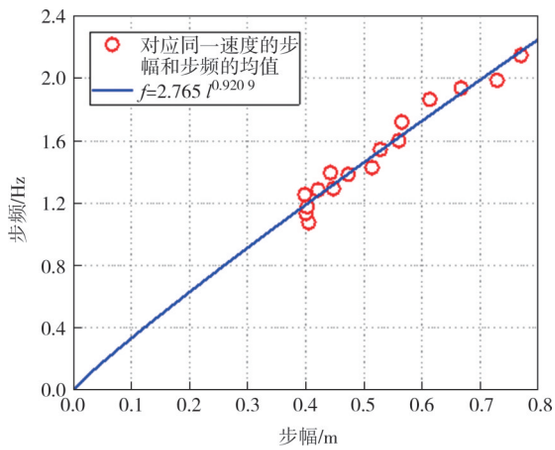


图12　步频和步幅的相互关系

Fig.12　Relation between step frequency and length

根据图11-12中的拟合曲线,最终可得到人行悬索桥上的步频-步速、步幅-步速、步频-步幅的对应关系:

$$\begin{cases} f = 1.705\,v^{0.479\,8} \\ f = 2.765\,l^{0.920\,9} \\ l = 0.590\,7\,v^{0.512\,9} \end{cases} \tag{5}$$

3　工程实例应用

3.1　工程简介

某景区的人行桥是一座主跨369 m的单跨悬索桥,如图13所示:主缆的矢跨比为1/18;主梁为纵横型钢组合体系(5道20b型工字钢的纵梁,横向间距0.55 m;28b型工字钢的横梁,纵向间距3.0 m),其下部设有抗风缆;桥面板为5 cm厚的木板,并通过高强螺栓与纵梁相连.

3.2　有限元模型

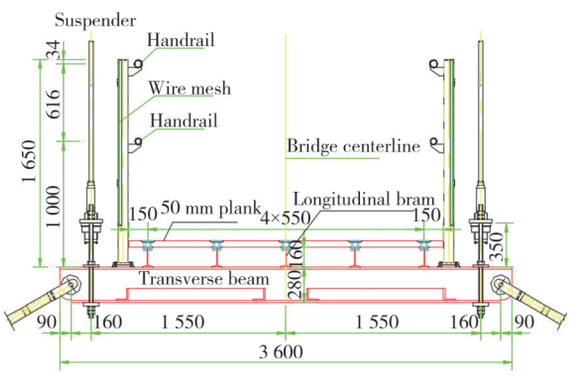
在保证质量和刚度与实桥一致的前提下,采用ANSYS建立该桥的有限元模型(图14),方法如下:用Beam4单元模拟主梁、主塔、刚臂等;用Link10单元模拟主缆、吊杆、抗风缆等;用MASS21单元模拟二期荷载和索夹的质量.

3.3　人致振动的计算

行人步行力的动载部分[$F(t)$]可以展开为傅里叶级数,即[1,6,22]:



(a)效果图



(b)横断面图

图 13 某人行悬索桥(单位:mm)

Fig.13 A suspension footbridge (unit: mm)

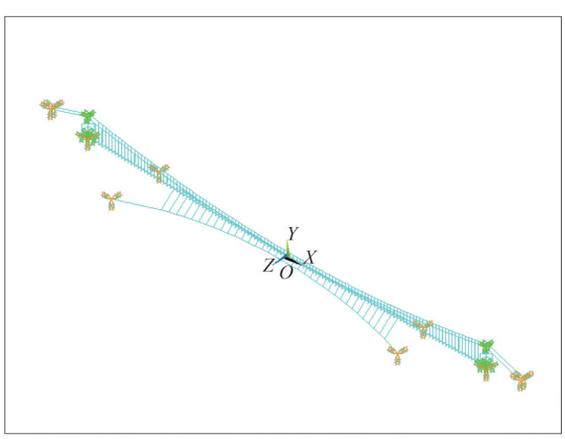


图 14 有限元模型

Fig.14 FE model

$$F(t) = G\sum_{k=1}^{m}\alpha_k \cos(2\pi k f_k t + \varphi_k) \tag{6}$$

式中:G为单个行人的重量;α_k、φ_k和f_k分别为第k阶谐波的动载因子、初相位和步频;m为参与计算的谐波数量.

假设该人行悬索桥上一直有行人上下桥,且桥上始终保持有n个行人(桥面长度L=369 m),每个行人的初始位置x_i遵循均匀分布,所有行人以各自的步速v_i从桥的一端走到另一端,并用δ函数来表示行人是否在桥上,即[23-24]:

$$\begin{cases}\delta(L - x_i - v_i t) = 1, L - x_i - v_i t \geqslant 0\\ \delta(L - x_i - v_i t) = 0, L - x_i - v_i t < 0\end{cases} \tag{7}$$

式中:δ=1表示行人在桥上;δ=0表示行人走出桥面.

一般情况下,可以用一阶谐波(即k=1)来描述单个行人步行力的动载部分,这可以满足工程应用精度[1,6,25].因此,将式(6)和式(7)相结合,可得在人行桥上移动的第i个行人的竖向和横向的步行力[$F_{\mathrm{V},i}(t)$和$F_{\mathrm{L},i}(t)$]为[23-24]:

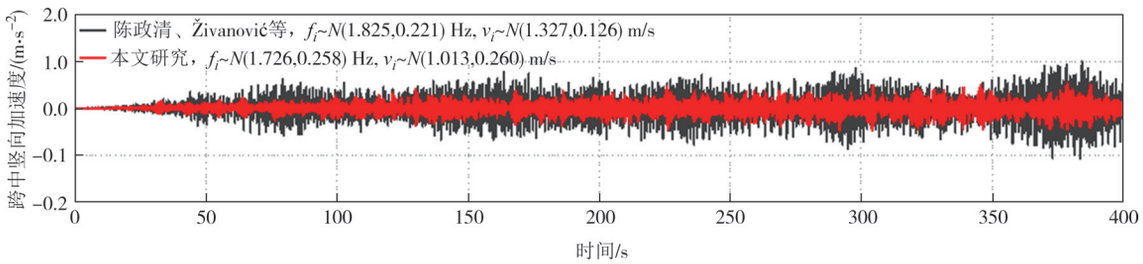
$$\begin{cases}F_{\mathrm{V},i}(t) = \alpha_{\mathrm{V}} G_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)\delta(L - x_i - v_i t)\\ F_{\mathrm{L},i}(t) = \alpha_{\mathrm{L}} G_i \cos(\pi f_i t + \varphi_i)\delta(L - x_i - v_i t)\end{cases} \tag{8}$$

式中:α_{V}和α_{L}分别为竖向和横向的步行力第1阶谐波的动载因子,可以参考《德国人行桥设计指南(EN03-08)》[22]的表4-7取值;G_i为第i个行人的重量,假设每个行人的重量相同,并采用《国民体质标准》[26]中30~34岁的成人体重(69.8 kg),则G_i=684.04 N;φ_i为第i个行人的初始相位,遵循[0, 2π]的均匀分布[1,6,25];f_i为第i个行人的步频,分别采用第2.2节得到的N(1.726, 0.258)Hz和陈政清等[1,7]得到的N(1.825, 0.221)Hz(表3),并进行对比计算;v_i为第i个行人的步速,分别采用第2.4节得到的N(1.013, 0.260)m/s和Živanović等[6]得到的N(1.327, 0.126)m/s(表7),并进行对比计算.

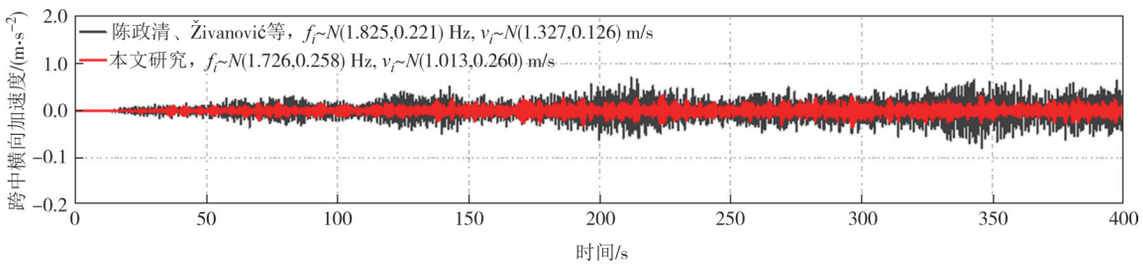
取n=500个行人,再根据式(8)的各个随机参数的概率分布,使用蒙特卡罗法生成人群的随机采样序列,以获得n个行人的步行力向量[$F_{\mathrm{V}}(t)$和$F_{\mathrm{L}}(t)$],并将它们施加到有限元模型(图14)中,进而计算了该人行悬索桥的人致振动.从图15中可知:

1)按照本文的步行参数和按照陈政清、Živanović等的步行参数,分别计算的人行悬索桥的人致振动,在变化趋势和数值范围上,保持较为接近的规律.这说明本文得到的步行参数是合理的,是可以应用于工程计算的.

2)按照本文的步行参数计算的跨中竖向和横向加速度,都要小于按照陈政清、Živanović等的步行参数计算的跨中竖向和横向加速度.这主要是因为柔性人行悬索桥上行人的步频和步速的平均值都要小于硬性地面上行人的步频和步速的平均值.



(a)跨中竖向加速度时程



(b)跨中横向加速度时程

图 15　不同步行参数的人致振动的对比

Fig.15　Comparison of human-induced vibration with different walking parameters

4　结 论

本文以九峰山人行悬索桥为观测点，采用高精度摄像手机进行了实地观测，获取了 2 236 个行人样本，进而研究了行人的步频、步幅、步速等参数的分布特性及统计值，得到如下结论.

1)在人行悬索桥上，全部行人的步频、步幅、步速都服从正态分布，即步频~N(1.726，0.258)Hz、步幅~N(0.596，0.094)m、步速~N(1.013，0.260)m/s，并给出了人行悬索桥上的步频-步速、步幅-步速、步频-步幅之间的转换关系式.然后，通过工程实例的应用，验证了本文所得到人行悬索桥的步行参数的合理性.

2)人行悬索桥上的行人的步频、步幅和步速的均值要小于其他人种和行走环境所统计得到的行人步频、步幅和步速的均值，而人行悬索桥上的行人步频、步幅和步速的标准差都要大于其他行走环境所统计得到的行人步频、步幅和步速的标准差.这是因为行人行走时所激起的人行悬索桥(柔性体系、刚度较小)的振动将会影响行人的心理，进而减缓前进的脚步.因此，不能将其他行走环境的步行参数统计值直接用于人行悬索桥的设计中.

3)中国人的步频和步幅的均值都小于西方人的步频和步幅均值，而中国人的步频和步幅标准差则都大于西方人的步频和步幅标准差.这是因为西方人的体格和身高一般都要强于亚洲人，所以西方人的行走步伐一般要快于亚洲人.因此，不能将国外学者所统计的西方人的步行参数统计值直接用于中国的人行桥设计中.

综上所述，在研究人行悬索桥的人致振动问题时，首先要进行人行悬索桥上的行人步行参数的实测和统计，而不能直接采用其他人种和行走环境的行人步行参数来代替.由于本文是首次探索柔性人行悬索桥上的行人的步行参数，因此必然存在着许多不足之处，这些都有待于后续科研的开展.

参考文献

[1]　陈政清，华旭刚. 人行桥的振动与动力设计 [M]. 北京：人民交通出版社，2009.
CHEN Z Q，HUA X G. Vibration and dynamic design of footbridges [M]. Beijing：China Communications Press，2009.(in Chinese)

[2]　GALBRAITH F，BARTON M. Ground loading from footsteps [J]. Journal of the Acoustic Society of America，1970，48(5)：1288-1292.

[3]　MATSUMOTO Y，SATO S，NISHIOKA T，et al. A study on design of pedestrian over-bridges [J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers，1972，4：63-70.

[4]　KERR S C，BISHOP N. Human induced loading on flexible staircases [J]. Engineering Structure，2001，23(1)：37-45.

[5]　PACHI A，JI T. Frequency and velocity of people walking [J]. The Structure Engineer，2005，83(3)：36-40.

[6]　ŽIVANOVIĆ S，PAVIE A，REYNOLDS P. Probability-based

prediction of multi-mode vibration response to walking excitation [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 942-954.

[7] 李红利. 基于响应谱方法的人行桥人致振动响应的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
LI H L. Response spectrum method based research on the footbridge vibrations response due to pedestrian walking [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)

[8] TUBINO F. Probabilistic assessment of the dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 417: 80-96.

[9] 张梦诗, 陈隽, 徐若天. 竖向行人谁吉构相互作用中的行人MD及SMD模型参数识别 [J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 814-821.
ZHANG M S, CHEN J, XU R T. MD and SMD model parameters of pedestrians for vertical humarrstructure interaction [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 814-821. (in Chinese)

[10] TOSO M A, GOMES H M, SILVA F T, et al. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 72/73: 590-606.

[11] ALONSO J F J, SAEZ A, CAETANO E, et al. Vertical crowd-structure interaction model to analyze the change of the modal properties of a footbridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016: C4015004.

[12] CÁSSIO G, ELSA C, CARLOS M, et al. Biodynamic modelling of human rhythmic activities [J]. Procedia Engineering, 2017, 199(12): 2802-2807.

[13] COLIN C C, EHSAN A. Formulation of human-structure interaction system models for vertical vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 377: 346-367.

[14] 王彩锋, 高世桥, 牛少华, 等. 行人SMD模型参数对人群-结构耦合动力特性的影响 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 91-97.
WANG C F, GAO S Q, NIU S H, et al. Influences of pedestrian SMD model parameters on dynamic characteristics of crowd-structure interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3): 91-97. (in Chinese)

[15] 王学民. 偏度和峰度概念的认识误区 [J]. 统计与决策, 2008(12): 145-146.
WANG X M. Misunderstanding of skewness and kurtosis [J]. Statistics and Decision Making, 2008 (12): 145-146. (in Chinese)

[16] KASPERSKI M, SAHNACI C. Service ability of pedestrian structures [C]//Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference. Orlando, Florida, 2007.

[17] MATSUMOTO Y, NISHIOKA T, SHIOJIRI H, et al. Dynamic design of footbridges [C]//Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering, 1978:1-15.

[18] WHEELER J E. Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges [J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(ST9), 2045-2065.

[19] 裴玉龙, 冯树民. 城市行人过街速度研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (9): 104-107.
PEI Y L, FENG S M. Research on design speed of urban pedestrian crossing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (9): 104-107. (in Chinese)

[20] 景超. 行人过街交通特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
JING C. Study on pedestrian crossing characteristics [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[21] 张惠玲, 王益, 敖谷昌. 信号交叉口行人过街速度的时空特征分析 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(6): 1879-1889.
ZHANG H L, WANG Y, AO G C. Temporal and spatial characteristics analysis on pedestrian speed at signalized intersection [J]. Journal of Guangxi University (Natural Sciences), 2016, 41(6): 1879-1889. (in Chinese)

[22] Design of footbridges guidelines: EN03-08 [S]. Berlin: Research Fund for Coal and Steel, 2008.

[23] YOUNG P. Improved floor vibration prediction methodologies [C]// Proceedings of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration-Current Developments in Research and Practice.London, UK, 2001.

[24] 汪宏莉, 韩延柏, 赵泽霖.《国民体质标准》中身高标准体重与代谢综合征关系 [J]. 中国公共卫生, 2012, 28(7), 958-960.
WANG H L, HAN Y B, ZHAO Z L. Relationships between weight-for-height of National Physical Fitness Evaluation Standard and metabolic syndrome [J]. China Public Health, 2012, 28(7): 958-960. (in Chinese)

[25] LI Y, XIAO J X, LI C, et al. Investigations on the influence of pedestrians on the buffeting of a long-span suspension footbridge [J]. International Journal of Steel Structures, 2023, 23 (7): 1322-1340.

[26] 李宇, 王佳豪, 范陆, 等. 静态均布人群对大跨人行悬索桥气动参数的影响 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 74-84.
LI Y, WANG J H, FAN L, et al. Effect of static distributed pedestrians on the aerodynamic parameters of a long-span pedestrian suspension bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(5): 74-84. (in Chinese)