

柔性人行悬索桥在不同人流量下人致振动分析

张彦玲¹, 张建林^{1,2}, 李运生¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 为了研究运营过程中不同人流量对于柔性人行悬索桥自振特性及人致振动响应的影响, 以某地锚式(70+360+60) m 柔性人行悬索桥为工程实例, 采用 Midas/Civil 软件建立了有限元模型, 计算了不同人流量下该人行悬索桥的自振频率. 参考德国人行桥规范 EN03-2007, 计算了同步人群谐波荷载下主梁的竖向及侧向加速度, 并进行了行人舒适度评价. 计算结果表明: 柔性人行悬索桥自振基频较低, 行人步频所对应的均为较高阶的振动模态; 考虑人群质量后, 主梁的各阶自振频率和行人谐波荷载下的加速度均较未考虑时减小, 且随着人流量的增加, 主梁的最大竖向及侧向加速度极值均随之增大. 人群质量对主梁竖向和侧向加速度的影响不同, 其结果与行人竖向和侧向谐波荷载不同的折减系数规律相关; 考虑人群质量后, 该悬索桥在人流量为 0.5 人/m² 时, 行人处于很舒适状态, 在 1.0~2.0 人/m² 处于中等舒适状态.

关键词: 柔性人行悬索桥; 人流量; 自振特性; 人致振动; 行人舒适度

中图分类号: U441.3; U448.11

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0779-09

Analysis of human-induced vibration for flexible suspension footbridge under different pedestrian flow

ZHANG Yanling¹, ZHANG Jianlin^{1,2}, LI Yunsheng¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: In order to study the influence of different pedestrian flow on the natural vibration characteristics, vertical and lateral acceleration of suspension footbridges during operation, the finite element model of a (70+360+60) m ground-anchored suspension footbridge was established using Midas/Civil software, and the natural vibration frequencies were calculated. Based on the German pedestrian bridge standard EN03-2007, the vertical and lateral acceleration of the main girder under the synchronous crowd harmonic load were obtained, and the pedestrian comfort was evaluated. Results indicate that the natural vibration frequencies of the flexible suspension footbridge are rather low due to the flexibility of the bridge, which makes the pedestrian step frequency close to high-order vibration modes. Pedestrian mass makes the natural frequencies and the acceleration of the main girder decrease, and the maximum vertical and lateral acceleration improve with the increasing of the pedestrian mass. The pedestrian mass has different influence on the vertical and lateral acceleration of the main girder, which is related with the different reduction factor of the vertical and lateral pedestrian harmonic load. Considering the pedestrian mass, the suspension footbridge in this paper is in very comfort state under the pedestrian flow of 0.5 P/m², and in medium comfort state under the pedestrian flow of 1.0~2.0 P/m².

Key words: flexible suspension footbridge; pedestrian flow; natural vibration characteristics; human-induced vibration, pedestrian comfort

近年来, 随着景区人行玻璃悬索桥的兴起, 国内外人行悬索桥日益增多. 为了保证人行桥的刚度和行人舒适度, 一般规范中都要求其竖向频率大于 3 Hz^[1], 但人行悬索桥本身是极为柔性的结构, 其自振频率明显无法满足要求, 因此, 关于人行悬索桥运营过程中的舒适度问题变得极为重要, 尤其是对于自重相对较小的柔性悬索桥, 人流量对其自振

频率存在较大影响, 直接关系到结构的人致振动响应.

规范仅从自振频率对结构提出了要求, 无法保证设计的合理性与有效性^[2]. 一些学者对人行桥的人致振动及其减振方法进行了大量的研究. 操礼林等^[3]研究了不同人流密度对于行人步频及阻尼比的影响, 并考虑了随机人流密度下竖向加速度峰值问

题;李泉等^[4]对双向行走激励条件下人行桥的随机振动问题进行了研究.李泽民等^[5]对于人行桥单人步频进行真实模拟,对比了不同规范下主梁共振峰值加速度,并通过试验验证该法准确性;谢旭^[6]、CAPRANI^[7]分别对人-桥竖向耦合振动计算方法进行了研究;贾布裕^[8]、Bocian^[9]、Carroll^[10]分别通过理论及试验方法通过对人行桥的横向人致振动响应进行了分析行人的随机性进行了研究,提出了考虑行人横向随机性的非线性模型,并通过伦敦千禧桥北边跨的分析验证了理论的正确性;Elsa Caetano^[11]通过对佩德罗伊内斯人行桥进行动力性能分析,利用一组13个行人的同步作用方式进行人致振动分析,确定了其竖向及侧向加速度峰值,并通过试验确定了横向“锁定”效应的触发人数.

在舒适度和寿命评估方面,钱骥、孙立民^[12]以国内某大跨人行桥为例,考虑人桥相互作用影响,提出了大跨度人行桥舒适性指标;乔云强^[13]以主跨400 m的合川渠江景观大桥为工程背景,计算了人群荷载及跑步荷载作用下的桥梁人致振动,对其进行了舒适度评价,对单主缆悬索桥的减振控制设计提供参考;朱前坤^[14]则对不同行走步速下人行桥振动舒适度定量化评估;Eleonora Lai^[15]通过对某钢结构人行悬索桥进行了动态测试及数值模拟,并对桥梁的使用寿命进行了评估.

以上文献主要探讨了普通人行桥人致振动问题以及单独振动作用方式下人行悬索桥结构舒适度,对于不同人流密度下柔性人行悬索桥舒适度的影响问题研究不多.本文结合一座(70+360+60) m人行悬索桥工程实例,分析不同人流密度下结构的人致振动舒适性问题.

1 工程概况

某景区人行玻璃悬索桥为双塔三跨连续人行玻璃悬索桥,加劲梁桥跨布置为70 m+360 m+60 m,主缆布置为90 m+360 m+90 m,桥梁有效通行宽度4.0 m,桥梁布置图如图1所示,横断面构造图如图2所示.

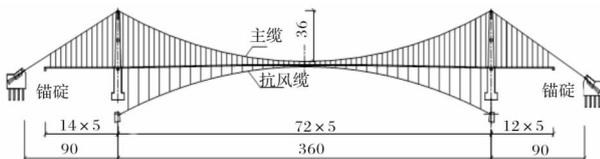


图1 桥梁布置图(单位:m)

Fig. 1 Bridge layout(unit: m)

其中,主缆为空间缆索面结构,主缆竖向矢跨比为1/10,矢高36 m,横桥向矢跨比为1/100,

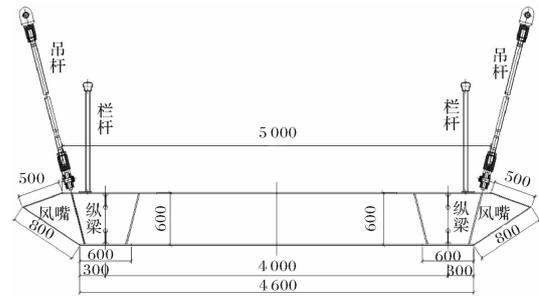


图2 主梁横断面构造图(单位:mm)

Fig. 2 Cross section of the main girder(unit: mm)

塔顶处主缆横向间距为13 m.该结构采用两根主缆,每根主缆采用19股91丝 $\phi 5.1$ mm的镀锌高强度平行钢丝成品索,抗拉强度不小于1 670 MPa.吊杆布置沿顺桥向间距为5 m,不同位置采用不同材料的吊杆,边跨及中跨边侧部分采用柔性吊索,为61丝 $\phi 5$ mm的平行钢丝成品索;中跨中间部分采用刚性吊杆,为 $\phi 60$ mm的Q345钢吊杆.

为提高加劲梁稳定性,在加劲梁两侧增设抗风缆.其中抗风缆跨度360 m,面内矢跨比为1/10,抗风拉索采用平行布置,仅布置在中跨部分,自桥塔起每隔10 m布置一根抗风拉索,抗风缆与风拉索形成平面与水平面夹角 43.5° .每侧抗风缆均采用3股91丝 $\phi 5.1$ mm的镀锌高强度平行钢丝成品索,每根抗风拉索都采用1根 $\phi 30$ mm的ZAA6-7+WSC 1 770钢丝绳.

桥塔采用C40钢筋混凝土,门式框架结构,上设两道横梁,其中一道为Q345钢管组成的桁架体系,另一道为钢筋混凝土结构.加劲梁由纵梁及横梁组成,均为箱形截面,材料为Q345钢,梁高0.6 m,全宽5 m,每隔5 m划分为一个标准节,两纵梁间桥面板为三层夹胶钢化玻璃.

2 有限元模型及自振特性分析

2.1 有限元模型

利用Midas/Civil软件建立地锚式人行悬索桥模型,采用索单元模拟主缆、吊杆、抗风缆及抗风拉索,采用梁单元模拟桥塔与加劲梁.以Midas建模助手初步生成的悬索桥模型为基础,进行主缆精确线形.

首先,按照加劲梁和桥塔的实际截面建立单元,将主缆两端的锚固点、主塔底部均按固结处理,左侧桥塔处主梁按固定铰支座处理,主梁端部与右侧桥塔处主梁按活动铰支座处理;其次,在已建悬索桥模型的基础上建立抗风缆及抗风拉索单

元,并将抗风缆两端按固结处理;最后,将结构的二期恒载施加在主梁上,使得模型达到与实际成桥一致的状态。

在新形成的悬索桥模型上,参考全精确解析算法^[16],重新精确分析计算悬索桥的主缆线形和内力。在保证设计跨度和矢高的条件下,进行自重及二期恒载作用下主缆与抗风缆共同的迭代找形,迭代精度达到要求后,从中得到主缆及抗风缆的线形和内力。最终得出的该悬索桥全桥有限元模型如图3所示,其中全桥模型共计节点720个,梁单元579个,索单元528个。

2.2 自振特性分析

根据图3所示的有限元模型,采用Midas/civil有限元软件进行特征值分析,可以得出结构各阶模

态下自振频率。由于人行悬索桥主梁自重较小,人群荷载所占比重较大,因此,需要考虑人群质量对于结构自振频率的影响。

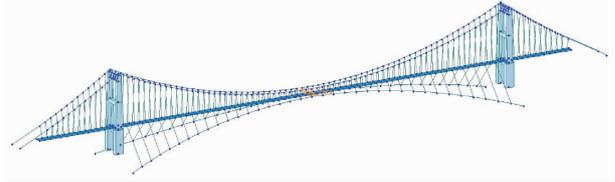


图3 悬索桥全桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of suspension bridge

计算时,对于随机人流密度按照0.5人/m²、1人/m²、1.5人/m²、2人/m²的通行方式将人群荷载计入结构自重后进行特征值分析,得到上述行人步频范围的主梁竖弯及侧弯自振频率如表1所示。

表1 不同人流量下的结构自振频率/Hz

Tab. 1 Natural vibration frequency under different pedestrian flow/Hz

阶数	振动模式	不考虑人群作用	0.5人/m ²	1人/m ²	1.5人/m ²	2人/m ²
2		0.517	0.513	0.510	0.508	0.506
3	主梁侧弯	0.783	0.756	0.747	0.734	0.725
4		1.140	1.097	1.063	1.031	1.002
14		1.326	1.345	1.257	<1.25	<1.25
15		1.400	1.363	1.328	1.297	1.267
16		1.547	1.504	1.465	1.429	1.396
17	主梁竖弯	1.728	1.635	1.599	1.564	1.529
18		1.795	1.753	1.727	1.646	1.610
19		1.990	1.933	1.882	1.836	1.792
20		2.210	2.149	2.092	2.040	1.992
21		>2.3	>2.3	>2.3	2.259	2.196

由表1可以看出,柔性人行悬索桥自振基频较低,行人竖向步频所对应的均为较高阶的竖弯模式,但侧向步频对应的主梁侧弯模式阶数较低。当其他条件不变时,在不同人流量下,结构同一模式下的自振频率不同,且随着人流量的增加,结构相同模式下的自振频率减小。其中,相较于不考虑人群荷载作用的工况,考虑2人/m²人流密度后,符合要求的结构竖弯模式频率最大降低了11.5%,侧弯模式频率最大降低了12.1%,可见人流量对柔性结构自振特性的影响不可忽视。

3 柔性悬索桥人致振动响应研究

对比分析其他国家人行桥舒适度评价标准和规范发现,限制动力响应值法相比频率调整法更适合现代大跨轻型人行桥设计。本文的主要目的是进行人致振动分析,当行人步频接近桥梁振动模式频率时,桥梁发生共振,为最不利情况。Zivanovic研

究^[17]表明,行人正常行走的一阶步频在1.6~2.4 Hz之间,二阶步频一般在3.2~4.8 Hz之间;侧向一阶步频一般为0.8~1.2 Hz,二阶步频在1.6~2.4 Hz之间。考虑到至今没有行人步行二阶谐波荷载引起实桥大幅振动的例子,本文结合德国EN03规范^[18],仅对一阶谐波荷载进行分析。德国EN03规范在对行人谐波荷载进行计算时,根据行人步频定义了荷载折减系数,见图4及图5,因此结合文献^[17]和图4及图5,取结构主梁竖向自振频率在1.25~2.3 Hz之间,侧向自振频率在0.5~1.2 Hz之间的区段作为相应的行人步频进行分析。

3.1 行人谐波荷载模型

人致振动对于人行桥而言极为重要,直接关系到行人的安全以及舒适性,因此在进行人行悬索桥的自振频率分析后,施加行人荷载,进一步分析其人致振动响应。鉴于我国关于人行桥人致振动方面

的规范尚不完善, 本文参考德国 EN03 规范^[18]中规定的人致振动计算方法进行分析. 计算时将行人荷载模拟为均布谐波荷载, 将行人步频范围内的结构自振频率作为行人谐波荷载频率, 根据相应的振型模态施加到结构对应的有限元模型上^[15], 进行时域分析得到结构的最大加速度, 并根据最大加速度进行行人舒适度分析.

由于人流的随机性, 行人流密度也是一个变量, 在不同的行人流密度下, 结构的最大加速度不同. 德国 EN03 规范根据行人流密度确定行人流等效人数, 即将 n 个随机行人组成的行人流等效为密度为 n' 的完全同步的行人组成的理想行人流. 当行人密度为低密度人流 (<1 人/ m^2) 时, 完全同步行人流密度 $n' = 10.8 \sqrt{\xi \times n} / S$, 其中 ξ 为结构阻尼比, 本桥取 0.02, S 为桥面加载面积; 当行人密度为高密度人流 (≥ 1 人/ m^2) 时, 完全同步行人流密度 $n' = 1.85 \sqrt{n} / S$, 其中 S 为桥面加载面积.

基于理想行人流, 德国 EN03 规范规定竖向均布行人谐波荷载模型 $p_v(t)$ 如式(1)所示, 侧向均布行人谐波荷载模型 $p_h(t)$ 如式(2)所示^[18].

$$p_v(t) = 280 \cos(2\pi f_v t) \times n' \times \psi_v \quad (1)$$

$$p_h(t) = 35 \cos(2\pi f_h t) \times n' \times \psi_h \quad (2)$$

式中: $p_v(t)$ 、 $p_h(t)$ 分别为竖向及侧向均布谐波荷载, N/m^2 ; f_v 、 f_h 分别为所分析的竖弯模态与侧弯模态的频率, Hz; n' 为完全同步行人流密度, 当人流密度为 0.5 人/ m^2 时, $n' = 0.024$; 1 人/ m^2 时, $n' = 0.042$; 1.5 人/ m^2 时, $n' = 0.051$; 2 人/ m^2 时, $n' = 0.059$; ψ_v 、 ψ_h 分别为考虑步频

接近频率变化范围临界值的概率而引进的竖向及侧向折减系数, 按图 4 及图 5 取值.

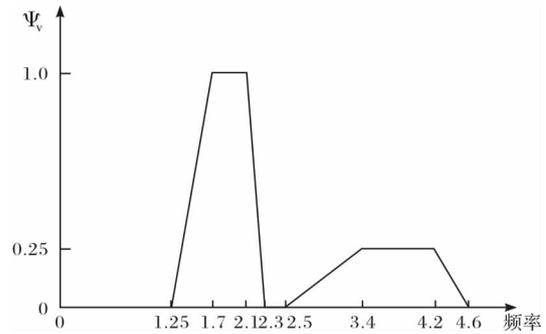


图 4 竖向折减系数

Fig. 4 Vertical reduction factor

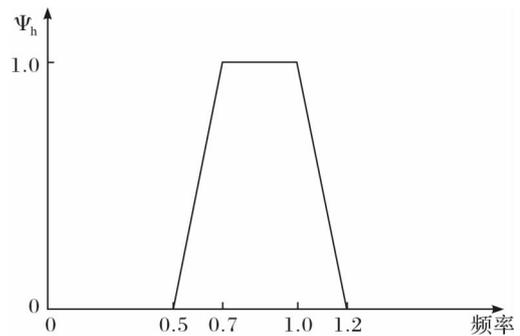


图 5 侧向折减系数

Fig. 5 Lateral reduction factor

3.2 人致振动响应分析

根据 3.1 节定义的行人谐波荷载, 在表 1 的频率范围内, 取各阶自振频率为相应的行人步频, 根据式(1)、(2)和图 4、5, 可得任意行人步频下谐波荷载的计算参数, 见表 2.

表 2 行人谐波荷载计算参数

Tab. 2 Parameters of the harmonic pedestrian load

阶数	振动模态	不计人群质量		0.5 人/ m^2		1 人/ m^2		1.5 人/ m^2		2 人/ m^2	
		f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n
2		0.517	0.085	0.513	0.065	0.510	0.050	0.508	0.040	0.506	0.030
3	主梁侧弯	0.783	1.000	0.756	1.000	0.747	1.000	0.734	1.000	0.725	1.000
4		1.140	0.300	1.097	0.515	1.063	0.685	1.031	0.845	1.002	0.990
13		f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n	f_n /Hz	ψ_n
14		1.326	0.169	1.345	0.211	1.257	0.016	<1.25	0.000	<1.25	0.000
15		1.400	0.333	1.363	0.251	1.328	0.173	1.297	0.104	1.267	0.038
16		1.547	0.660	1.504	0.564	1.465	0.478	1.429	0.398	1.396	0.324
17	主梁竖弯	1.728	1.000	1.635	0.856	1.599	0.776	1.564	0.698	1.529	0.620
18		1.795	1.000	1.753	1.000	1.727	1.000	1.646	0.880	1.610	0.800
19		1.990	1.000	1.933	1.000	1.882	1.000	1.836	1.000	1.792	1.000
20		2.210	0.450	2.149	0.755	2.092	1.000	2.040	1.000	1.992	1.000
21		>2.3	0.000	>2.3	0.000	>2.3	0.000	2.259	0.205	2.196	0.520

将表 2 中的计算参数带入式(1)和(2), 可得任

意行人步频下的谐波荷载. 以人流量为 1.5 人/ m^2 ,

行人步频对应第 18 阶竖弯和第 3 阶侧弯频率时为例, 可得不考虑与考虑人群质量时的竖向均布行人谐波荷载分别为 $p_{v无}(t) = 14.33\cos(11.275t)$, $p_{v人}(t) = 14.33\cos(10.344t)$; 侧向均布行人谐波荷载分别为 $p_{h无}(t) = 1.79\cos(4.92t)$, $p_{h人}(t) = 1.79\cos(4.61t)$. 由此得到主梁跨中在相应的行人谐波荷载下的加速度时程曲线如图 6 和图 7 所示. 图 6 为人流密度为 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$, 行人竖向步频对应第 18 阶竖弯频率 1.646 Hz 时主梁跨中节点的竖向加速度时程曲线; 图 7 为人流密度为 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$, 行人侧向步频对应第 3 阶侧弯频率 0.734 Hz 时主梁跨中节点的侧向加速度时程曲线, 从中可以得到主梁跨中节点处相应的加速度峰值.

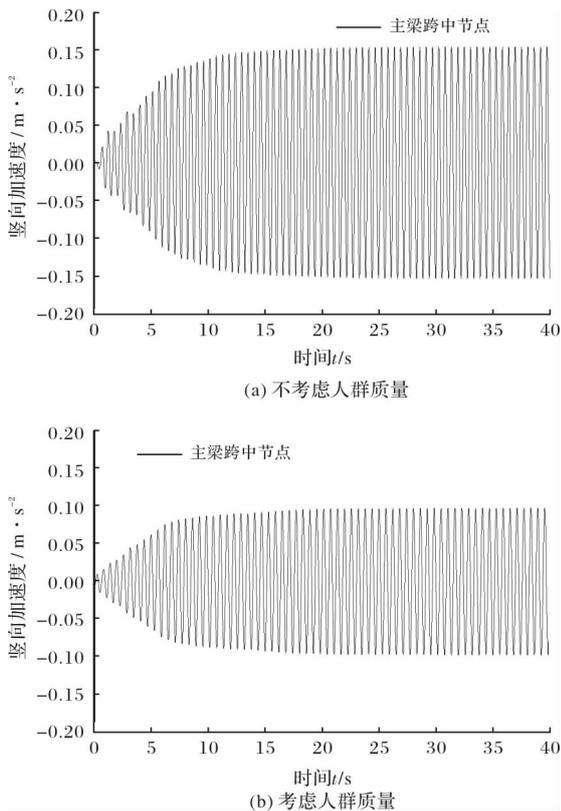


图 6 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 时的主梁跨中竖向加速度时程 ($f_v = 1.646 \text{ Hz}$)

Fig. 6 Time-midspan vertical acceleration of the main girder under $1.5 \text{ p}/\text{m}^2$

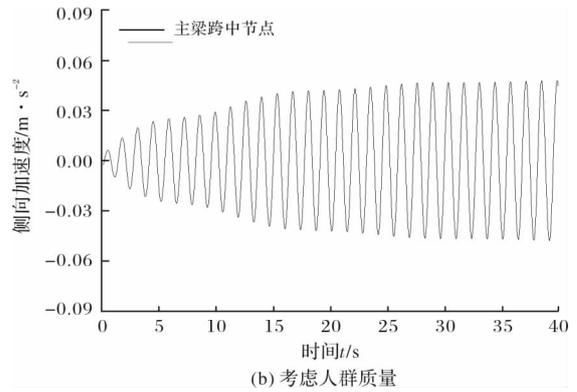
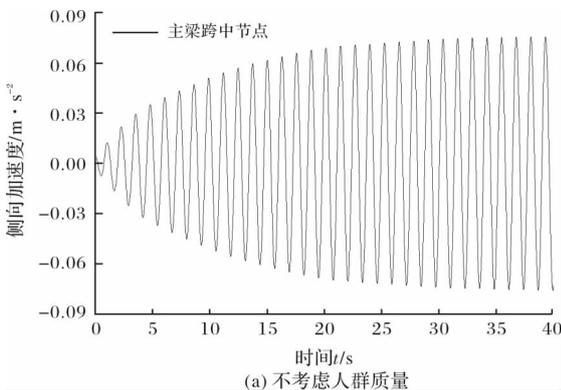


图 7 $1.5 \text{ 人}/\text{m}^2$ 时的主梁跨中侧向加速度时程 ($f_h = 0.734 \text{ Hz}$)

Fig. 7 Time-midspan lateral acceleration of the main girder under $1.5 \text{ p}/\text{m}^2$

分别计算在 $0.5 \sim 2 \text{ 人}/\text{m}^2$ 的通行人流密度下, 在不同的行人步频时, 计入人群质量与不计人群质量时主梁各节点的加速度时程曲线. 针对每一种行人步频, 取出各时程曲线中的加速度最大值, 称其为加速度峰值, 并对主梁所有节点的加速度峰值进行比较, 得到所有加速度峰值的最大值, 称其为主梁的最大加速度, 则主梁在不同步频下的最大加速度如图 8 和图 9 所示.

由图 8~9 可以看出,

(1) 人群质量对于各阶模态下主梁的最大加速度存在很大影响. 总体而言, 考虑人群质量后, 对应于各阶自振频率的人行谐波荷载所引起的主梁最大加速度降低, 但仍旧存在部分最大加速度增大的例子, 如第 20 阶竖弯模态、第 4 阶侧弯模态等, 主要是由于主梁总质量增加后, 结构自振频率降低, 使得折减系数增加, 行人谐波荷载相应增大, 从而使主梁最大加速度增大.

(2) 同一人流量下, 主梁在对应不同模态的行人步频下的最大加速度均有所不同, 主要原因有三个: 一是不同步频下行人谐波荷载的折减系数不同; 二是产生最大加速度的位置不一定相同; 三是行人谐波荷载针对不同的模态加载时, 其加载频率和加载方式也不一样. 对于第三点, 以不计人群质量时第 17、18、19 阶主梁竖弯模态为例, 其频率均在 $1.7 \sim 2.1 \text{ Hz}$ 之间(表 1), 因此根据图 4, 竖向折减系数相同, 均为 1.0, 但第 17、18、19 阶竖弯振型及相应的加载方式不同(见图 10), 例如根据第 17 阶模态分布所选取的行人谐波荷载步频与第 17 阶频率相同, 分布形式与其本身模态形状最接近, 因此第 17 阶模态参与质量最大, 对结构加速度响应的贡献也最大; 而根据第 18、19 阶模

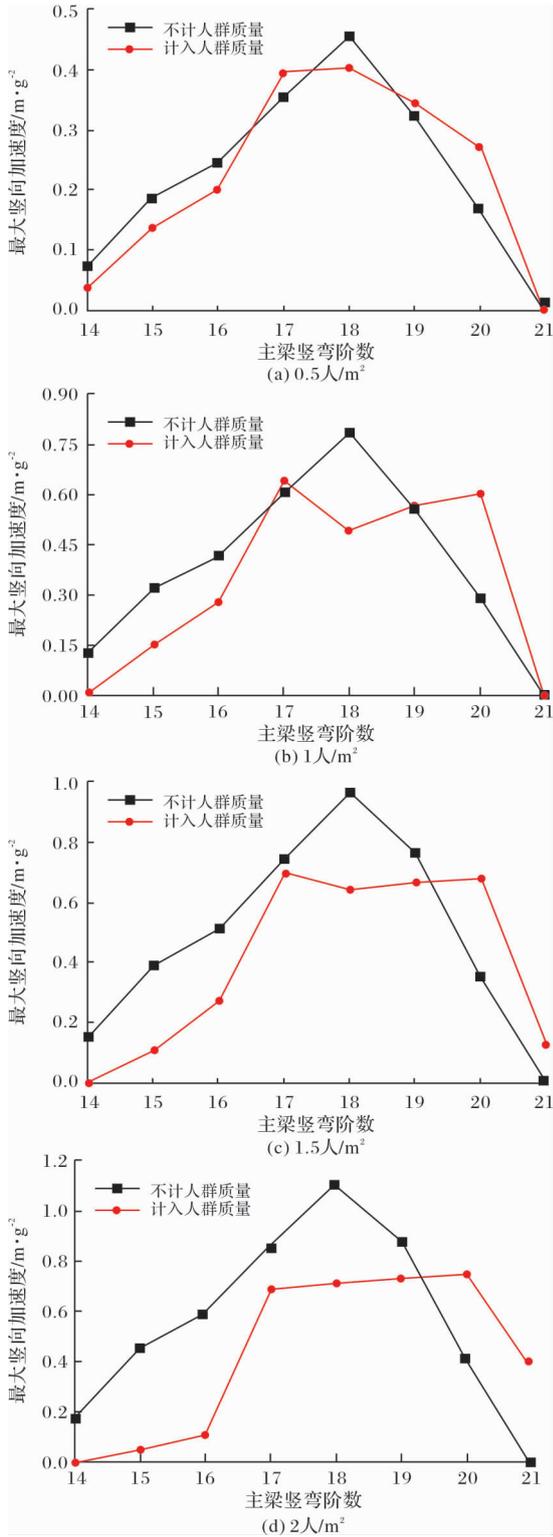


图8 不同人流量下的主梁最大竖向加速度

Fig. 8 Maximum vertical acceleration of the main girder under pedestrian flow

态所选取的行人谐波荷载则分别使得第18、19阶模态的参与质量最大,因此即使没有折减系数的影响,在同一人流量下,根据不同模态选取的行人谐波荷载除了激励步频不同外,各振型的参与质量也不同,造成主梁的最大加速度值(主梁所有节点加速度峰值中的最大值)也不同。

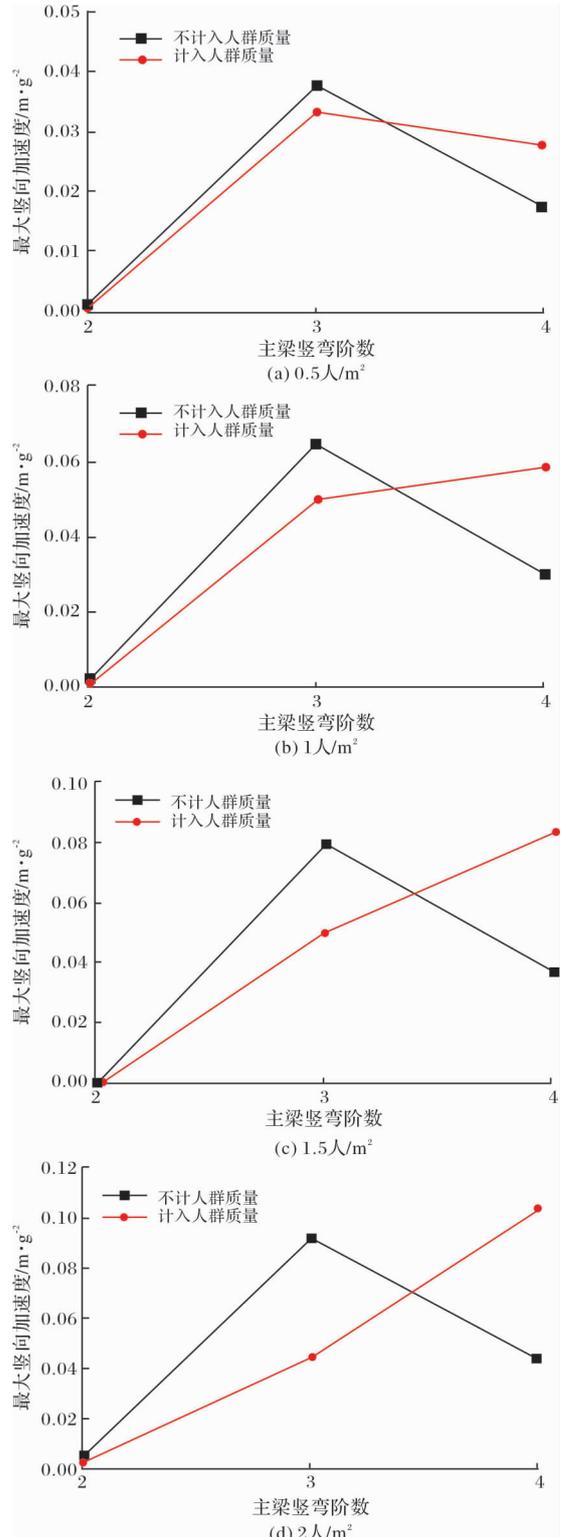
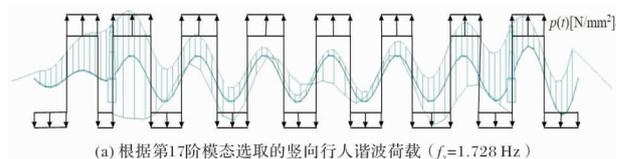


图9 不同人流量下的主梁最大侧向加速度

Fig. 9 Maximum lateral acceleration of the main girder under different pedestrian flow



(a) 根据第17阶模态选取的竖向行人谐波荷载 ($f=1.728$ Hz)

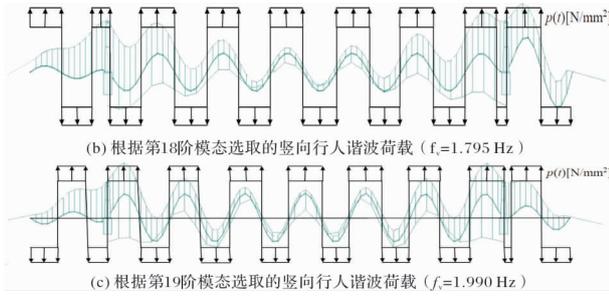


图 10 行人谐波荷载加载方式

Fig. 10 Loading of harmonic pedestrian load

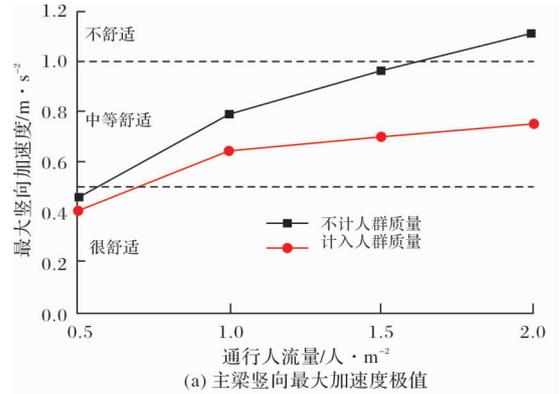
由图 11 可以看出, 按 $0.5 \sim 2$ 人/ m^2 人流密度运营时, 随着人流量的增加, 主梁的最大竖向及侧向加速度极值均随之增大. 不计人群质量时, 0.5 人/ m^2 人流量下主梁的最大竖向加速度极值为 0.458 m/s^2 , 2 人/ m^2 时为 1.11 m/s^2 , 增大了约 1.42 倍; 计入人群质量时, 0.5 人/ m^2 人流量下主梁的最大竖向加速度极值为 0.403 m/s^2 , 2 人/ m^2 时为 0.747 m/s^2 , 仅增大了约 0.85 倍. 由此可知, 人群质量的增加对主梁竖向最大加速度极值有抑制作用. 但由图 10(b)可知, 人群质量的增加反而增大了主梁的侧向加速度最大值, 这是由于行人竖向和侧向谐波荷载不同的折减系数规律造成的.

取出不同行人步频下图 8、图 9 各图中的最大加速度极值, 如图 11 所示.

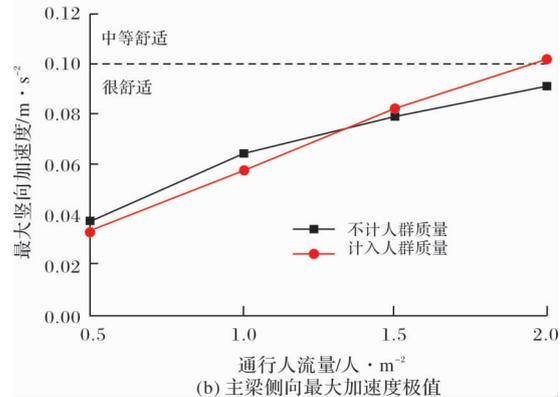
3.3 行人舒适度评价

行人的舒适度可通过主梁的加速度来衡量. 参考德国 EN03-2007 规范^[18], 其各舒适度指标如表 3 所示.

根据表 3 和图 11, 结合主梁在不同人流量下的最大加速度极值, 可对该人行悬索桥运营过程中的行人舒适度进行评价. 评价结果见表 4.



(a) 主梁竖向最大加速度极值



(b) 主梁侧向最大加速度极值

图 11 主梁最大加速度极值随人流量的变化

Fig. 11 Ultimate value of the maximum acceleration of the main girder vs. pedestrian flow

表 3 人行桥加速度舒适度指标

Tab. 3 Comfort indexes of the acceleration for the pedestrian bridge

舒适度	竖向加速度 限值/ $m \cdot s^{-2}$	侧向加速度 限值/ $m \cdot s^{-2}$
很舒适	≤ 0.5	≤ 0.1
中等舒适	$0.5 \sim 1.0$	$0.1 \sim 0.3$
不舒适	$1.0 \sim 2.5$	$0.3 \sim 0.8$
不可忍受	> 2.5	> 0.8

表 4 本文人行悬索桥行人舒适度评价结果

Tab. 4 Comfort assessment for the pedestrian suspension bridge in this paper

	不计人群质量				综合评价	考虑人群质量				综合评价
	竖向		侧向			竖向		侧向		
	加速度	评价结果	加速度	评价结果		加速度	评价结果	加速度	评价结果	
0.5 人/ m^2	0.458	很舒适	0.038	很舒适	很舒适	0.403	很舒适	0.033	很舒适	很舒适
1.0 人/ m^2	0.785	中等舒适	0.065	很舒适	中等舒适	0.642	中等舒适	0.058	很舒适	中等舒适
1.5 人/ m^2	0.962	中等舒适	0.079	很舒适	中等舒适	0.696	中等舒适	0.082	很舒适	中等舒适
2.0 人/ m^2	1.110	不舒适	0.091	很舒适	不舒适	0.747	中等舒适	0.102	中等舒适	中等舒适

由表 4 可以看出, 不计人群质量时, 在 0.5 人/ m^2 人流量下, 主梁的竖向加速度极值 < 0.5 m/s^2 , 行人处于很舒适状态; 在 $1 \sim 1.5$ 人/ m^2 人流量下, 主梁的竖向加速度极值处于

0.5 m/s^2 和 1.0 m/s^2 之间, 在中等舒适状态; 在 2 人/ m^2 人流量下, 主梁的竖向加速度极值超过 1.0 m/s^2 , 行人处于不舒适状态; 但在所有人流量下, 主梁侧向加速度极值均小于 0.1 m/s^2 , 行人

均处于很舒适状态. 计入人群质量后, 在 $0.5 \sim 1.5$ 人/ m^2 人流量区间, 主梁的竖向和侧向舒适度评价均未发生变化, 但在 2 人/ m^2 人流量下, 行人在竖向和侧向均处于中等舒适状态. 总体来说, 行人在侧向的舒适度评价较好, 但超过 1.0 人/ m 后, 就不再是很舒适的状态, 也反映出该桥的竖向刚度与侧向刚度相比较弱. 由于考虑人群质量后的结果更符合实际, 因此其综合评价应采用考虑人群质量后的结果.

4 结论

本文以 $(70+360+60)$ m 连续人行玻璃悬索桥为工程背景, 利用 Midas/Civil 软件建立了有限元模型, 并对其进行了特征值分析及人致振动响应分析; 同时, 对自振频率是否计入人群自重进行了探讨, 并对不同人流量下结构舒适性问题进行了研究, 主要结论如下:

(1) 柔性人行悬索桥自振基频较低, 行人竖向步频所对应的均为较高阶的竖弯模态, 但侧向步频对应的主梁侧弯模态阶数较低. 考虑人群质量后, 随着人流量增加, 主梁总质量增大, 各阶自振频率随之降低, 由无人群到 2 人/ m^2 , 在一阶行人步频范围内, 竖弯频率最大降低 11.5% , 侧弯频率最大降低 12.1% ;

(2) 考虑人群质量后, 主梁的最大竖向及侧向加速度普遍降低, 但在人行步频敏感区域边界附近, 由于行人谐波荷载折减系数发生变化, 会产生相反的影响;

(3) 随着人流量的增加, 主梁的最大竖向及侧向加速度极值均随之增大. 人群质量的增加对主梁竖向最大加速度极值有抑制作用, 但对于侧向最大加速度极值有增强作用, 这是由于行人竖向和侧向谐波荷载不同的折减系数规律造成的;

(4) 考虑人群质量后, 该人行悬索桥在人流量为 0.5 人/ m^2 时, 行人处于很舒适状态, 在 $1.0 \sim 2.0$ 人/ m^2 可以视作中等舒适状态. 侧向舒适度高于竖向舒适度. 因此, 人流量应控制在 1 人/ m^2 左右, 使行人处于舒适行走状态.

参考文献 References

[1] 北京市市政工程研究院. 城市人行天桥与人行地道技术规范: CJJ69-95[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.

Beijing Municipal Engineering Research Institute. Technical specifications of urban pedestrian overcrossing and underpass: CJJ69-95[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd, 1996.

[2] 聂建国, 陈宇, 樊健生. 步行荷载作用下单跨人行桥振动的均方根加速度反应谱法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 109-116, 130.

NIE Jianguo, CHEN Yu, FAN Jiansheng. RMS acceleration response spectrum method for single-span foot bridges under pedestrian load[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 109-116, 130.

[3] 操礼林, 曹栋, 张志强, 等. 随机人群行走下人行桥动力特性参数及加速度响应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 1028-1035.

CAO Lilin, CAO Dong, ZHANG Zhiqiang, et al. Dynamic characteristic parameter and acceleration response of footbridge under random crowd walking [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(6): 1028-1035.

[4] 李泉, 樊健生, 聂建国. 双向行走激励条件下人行桥的随机振动问题研究 [J]. 工程力学, 2010, 27(7): 74-81.

LI Quan, FAN Jiansheng, NIE Jianguo. Random vibration of footbridge generated by crowds' two-way walking [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 74-81.

[5] 李泽民, 吴冬雁, 刘宣含, 等. 真实步伐荷载作用下人行桥振动及共振加速分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(6): 164-168.

LI Zemin, WU Dongyan, LIU Xuanhan, et al. Vibration and resonance response analysis of footbridges under actual walking load [J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(6): 164-168.

[6] 谢旭, 钟婧如, 张鹤, 等. 人-桥竖向耦合振动计算方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35: 108-114.

XIE Xu, ZHONG Jingru, ZHANG He, et al. Calculation method for human-bridge vertically coupled vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35: 108-114.

[7] CAPRANI C C, AHMADI E. Formulation of human structure interaction system models for vertical vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 377: 346-367.

[8] 贾布裕, 颜全胜, 余晓琳, 等. 考虑行人随机性的人行桥人致横向振动稳定性分析[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 155-164.

- JIA Buyu, YAN Quansheng, YU Xiaolin, et al. Stability analysis on pedestrian-induced lateral vibration of footbridges considering pedestrian stochastic excitation[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(1):155-164.
- [9] BOCIAN M, MACDONALD J H G, BURN J F, et al. Experimental identification of the behaviour of and lateral forces from freely-walking pedestrians on laterally oscillating structures in a virtual reality environment [J]. *Engineering Structures*, 2015, 105: 62-76.
- [10] CARROLL S P, OWEN J S, HUSSEIN M F M. Experimental identification of the lateral human-structure interaction mechanism and assessment of the inverted-pendulum biomechanical model[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2014, 333(22): 5865-5884.
- [11] ELSA Caetano, ÁLVARO Cunha, FILIPE Magalhães, et al. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behavior [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32: 1069-1081.
- [12] 钱骥, 孙利民. 大跨径人行桥人致振动舒适性评估及减振措施[J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(5): 677-681.
- QIAN Ji, SUN Limin. Comfort evaluation and vibration reduction design of long span footbridges [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(5): 677-681.
- [13] 乔云强, 吴桂楠. 单主缆悬索桥人致振动研究及减振控制[J]. *世界桥梁*, 2018, 46(2): 68-73.
- QIAO Yunqiang, WU Guinan. Study of human-induced vibration on suspension bridge with one main cable and vibration mitigation control [J]. *World Bridges*, 2018, 46(2): 68-73.
- [14] 朱前坤, 李宏男, 杜永峰, 等. 不同行走步速下人行桥振动舒适度定量化评估 [J]. *工程力学*, 2016, 33(10):97-104.
- ZHU Qiankun, LI Hongnan, DU Yongfeng, et al. Quantitative evaluation of vibration serviceability of pedestrian bridge under different walking speed [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(10):97-104.
- [15] Eleonora Lai, Carmelo Gentile, Maria Gabriella Mulas. Experimental and numerical serviceability assessment of a steel suspension footbridge [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 132: 16-28.
- [16] 景天虎, 李桅, 李青宁, 等. 悬索桥主缆线形确定的常用精确解析算法比较及电算高效实现方法研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 43(6): 821-830.
- JING Tianhu, LI Wei, LI Qingning, et al. Comparison on common precise numerical analytical algorithms to determine main cables curve shape in suspension bridges and study on highly effective methods of computation [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2011, 43(6): 821-830.
- [17] ŽIVANOVES, Pavic A, Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279: 1-74.
- [18] Research Fund for Coal and Steel. HiVoSS: Design of Footbridges [S]. Guideline EN03, Germany: Hivoss, 2008.

(编辑 吴海西 沈波)