

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.035



随机人群运动荷载作用下大跨度连廊的 振动响应

张琼¹, 南娜娜¹, 朱前坤^{1,2}, 杜永峰¹

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 兰州 730050; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要:基于社会力模型,研究了随机人群运动荷载作用下大跨连廊结构的振动舒适度问题。通过结合交通学领域、生物力学领域对人群运动特性及人体运动参数的统计分析,对随机人群运动进行仿真,得到不同密度工况下,任意行人在任意时刻的步速、落点位置等参数,建立随机人群荷载模型,计算不同工况密度下结构的加速度峰值。研究表明,加速度峰值与行人步速关系很大,随着行人密度增大,行人速度减小,结构加速度响应则先增大后减小。根据得到的结构加速度峰值与行人密度关系曲线,可以找出出现结构振动舒适度问题的行人密度区间。

关键词:社会力模型;随机人群荷载;步速;峰值加速度;振动舒适度

中图分类号:TU393.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0099-07

Vibration response of long-span corridor under stochastic crowd load

Zhang Qiong¹, Nan Nana¹, Zhu Qiankun^{1,2}, Du Yongfeng¹

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China;
2. Faculty of Infrastructure Engineering; Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: Based on social force model which is combined statistics and analysis of crowd motion characters and body motion parameters in the field of transportation and biodynamic, vibration comfort of long-span corridor under stochastic crowd load is studied and stochastic crowd motion is simulated. The critical parameters such as pace and landing position are obtained in different densities, the stochastic crowd model is built and the peak acceleration is calculated. The study shows, peak acceleration is closely related to the pacing frequency, and pedestrian velocity becomes large along with increase of pedestrian density while the acceleration response of structure increased initially and then decreased. By the relationship curve of structure peak acceleration and pedestrian density the pedestrian density interval in which the structure suffering vibration serviceability problems can be found.

Keywords: social force model; stochastic crowd load; walking speed; peak acceleration; vibration serviceability

收稿日期:2018-03-01

基金项目:国家自然科学基金(51508257, 51868046, 51668042); 甘肃省高等学校科研项目(2015B-34)

作者简介:张琼(1984-), 女, 主要从事行人-结构耦合振动研究, E-mail: 283322638@qq.com.

Received: 2018-03-01

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508257, 51868046, 51668042); Research Projects of Higher Education in Gansu province (No. 2015B-34)

Author brief: Zhang Qiong(1984-), main research interest: pedestrian-structure dynamic interaction; E-mail: 283322638@qq.com.

近年来,随着新型轻质材料的发展,以及人们对结构新颖、美观的追求,使得轻质、低频结构的使用越来越广泛。人群荷载作为连廊、人行桥等结构的主要荷载,是引起结构振动的主要原因,当结构自振频率较低时,易与行人步频接近而发生共振,结构振动响应超过人体对振动舒适度的要求,可能引起行人的恐慌甚至导致结构的安全问题^[1-3]。

人群荷载模型是研究人致结构振动的基础,目前对单个行人对结构的响应研究较多,但对人群荷载的研究较少,研究表明,人群对结构的作用并不是单个行人的简单叠加^[4]。行人荷载与行人步频有较大关系^[5],人群平均步速与人群密度有关,行人在不同人群密度下受到其他行人的影响不同,每个行人的移动方式及移动特征的表现也不尽相同,鉴于人群移动的复杂性以及随机性,目前,人群对结构的作用大都采用简化的计算方法,主要包括固定多人步行力法^[6]、移动多人步行力法、等效同步人数法^[7]等,这些模型都在一定程度上提供了人群对结构动力响应的计算方法。以上假设均没有考虑行人个体的差异性以及个体间的随机性。丁国等^[8]通过引入步频变异系数反映个体内的随机性,引入体重及均值步频的变化反映个体间的随机性,研究了行人荷载随机性对楼盖结构振动响应的影响,结果表明,荷载随机性对结构响应影响显著,在舒适度评价中不可忽略。杨娜等^[9]根据生物力学以及交通领域内对人体质量、行人步频、步速等参数的统计分析,得到各参数的分布形式,再利用蒙特卡洛法产生相应的伪随机数,并结合人群密度的影响作用生成考虑人群集度的随机荷载模型。上述方法考虑了行人之间步态参数分布的随机性以及个体在时间域内的差异性,但是忽略了行人之间以及行人与环境的交互作用。因此,得到的行人落点、步速等并不符合行人的实际情况,计算结果与实际结构响应可能会有较大偏差。

由 Helbing 等^[10]提出的社会力模型,将人的主观愿望、行人与行人之间、行人与环境之间的相互作用用社会力的概念表示,成功模拟了“快即是慢”“瓶颈摆动”等行人现象。笔者结合交通学以及生物力学领域内对行人步速、体重以及行人尺寸等参数的统计,考虑行人个体差异性以及个体之间的随机性,利用社会力模型模拟人群的运动过程,得到任意时刻所有的行人落点、步速等;建立基于社会力模型的人群荷载随机模型,并对不同行人密度下连廊结构动力响应进行计算,得到结构峰值加速度与行人密度的关系曲线,对随机人群荷载作用下结构振动舒

适度进行评价。

1 单人步行荷载模型

人行走时两条腿交替移动,步行荷载对结构的作用具有周期性,其对连廊等结构产生的激励主要为竖向激励,时域内步行荷载广泛采用傅里叶级数的形式^[11]。

$$F(t) = G + G \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2i\pi f_p t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: α_i 是 i 阶谐波的动力荷载因子,定义为 $\alpha_i = A_i/G$; φ_i 为第 i 阶谐波的相位角; G 为行人重量; f_p 为行人步频; n 为模型中考虑的阶数; 相位角 $\varphi_i = 0$ 。考虑前 3 阶的影响,动载因子为

$$\alpha_1 = -0.2649 f_p^3 + 1.3206 f_p^2 - 1.7597 f_p + 0.7613 \quad (2.1)$$

$$\alpha_2 = 0.07 \quad (2.2)$$

$$\alpha_3 = 0.06 \quad (2.3)$$

2 随机人群荷载模型的建立

2.1 基于社会力模型随机人群运动仿真

社会力模型认为行人的运动在社会力的作用下发生,其中包括自驱力、行人之间的作用力、行人与周边环境之间的作用力。笔者在此基础上引入了减速避让机制^[12]以及自停止机制^[13]。当行人的动态空间被其他行人占据时,当前行人会采取减速机制以避免与其他行人发生碰撞,而当周围行人对当前行人斥力过大,使行人的速度小于 0,则赋与当前行人速度为 0。自驱力

$$F_d = m_i \frac{v_e \cdot e_i - v_i}{T_a} \quad (3)$$

式中: m_i 为行人质量; v_e 为行人的期望速度; e_i 为行人期望运动方向; v_i 为行人的运行速度; T_a 为松弛时间。行人之间的相互作用力包括行人之间的心理排斥力、减速避让力和物理作用力。心理排斥力为

$$f_{ij}^{\text{soc}} = A \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B}\right) \cdot \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos \varphi_{ij}}{2}\right) n_{ij} \quad (4)$$

式中: A 为行人之间的作用强度; B 为行人之间的作用力范围; $(r_{ij} - d_{ij})$ 为行人之间的距离; λ_i 为各向异性参数; φ_{ij} 为行人间的斥力与期望运动方向的夹角。减速避让力

$$f_i^{\text{avo}} = -\delta_i(t) v_i(t) m_i \cdot \left(\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1 + \cos(\varphi_{ik})}{2}\right) n_{ij} \quad (5)$$

当 $(r_{ij} - d_{ij}) < d_a(t)$ 时,行人会受到减速避让

力。式中: $d_i = |(a + b|v_i(t)|)e_i(t) \cdot n_{ab}|$ 为按原速运动后的行人之间的位置差; $-\delta_i v_i(t) = -\frac{\delta_i(t)}{T_r}$ 为行人 i 由速度 $v_i(t)$ 减至 0 而采取的加速度; T_r 为行人反应时间; φ_{ik} 为行人 i 实际步行速度与行人 k 作用于行人 i 的排斥力的反方向的夹角。

$$F_{ij} = (K\Theta(r_{ij} - d_{ij}))n_{ij} + k\Theta(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij} t_{ij} \quad (6)$$

$$\Theta = \begin{cases} (r_{ij} - d_{ij}), & (r_{ij} - d_{ij}) \leq 0 \\ 0, & (r_{ij} - d_{ij}) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: n_{ij} 为行人 j 指向行人 i 的单位向量; t_{ij} 由单位法向量 n_{ij} 逆时针旋转 90° 得到; K 与 k 为常数; Δv_{ij} 为两行人速度的矢量差。

行人与障碍物的相互作用与行人之间的相互作用原理一致,包括行人对障碍物的心理排斥力、减速避让力以及物理作用力。

$$F_{iw}^{soc} = \left(A_w \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_w}\right) + K\Theta(r_i - d_{iw}) \right) n_{iw} +$$

$$k\Theta(r_i - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw})t_{iw} \quad (8)$$

式中: A_w 为行人与障碍物作用力强度; B_w 为行人与障碍物作用范围; $(r_i - d_{iw})$ 为行人半径与行人到障碍物的法向距离差; n_{iw} 为由障碍物指向行人的单位法向量; t_{iw} 为平行于障碍物的单位切向力; $[v_i \cdot t_{iw}]$ 为行人速度在障碍物方向上的投影。

利用 MATLAB 软件对社会力模型进行仿真,仿真环境为一个长 22.0 m、宽 3.0 m 的连廊。假定行人质量在 50~80 kg 的范围内服从均值为 65、方差为 5 的正态分布,行人期望速度与行人中老人、妇女的所占比重有关,假定在 0.7~1.4 m/s 的范围内服从均值为 1.29、方差为 0.29 的正态分布,半径在 0.2~0.3 m 的范围内服从均匀分布。其他参数的取值参考文献[13],如表 1,仿真模拟如图 1 所示。模拟结果表明,行人能够有效地对其他行人以及障碍物进行避让,将得到的密度-速度曲线与其他人实测的或模拟结果进行对比,结果吻合度较高。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of model

T_a/s	A	B	A_w	B_w	λ_i	$K/(N \cdot m^{-1})$	$k/(N \cdot m^{-1})$	a/m	b/s
0.5	2×10^3	0.08	2×10^3	0.2	0.6	1.2×10^5	2.4×10^5	0.36	1.06

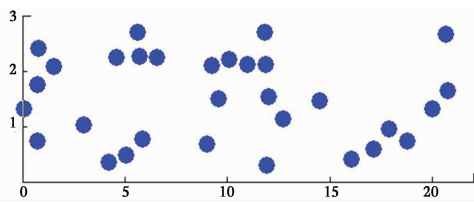


图 1 人群模拟

Fig. 1 Crowd simulated

2.2 行人速度-密度关系

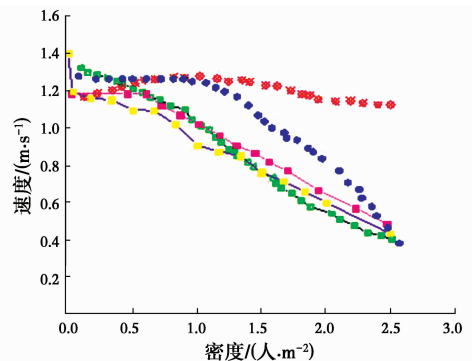
利用社会力模型分别对 2~90 人范围内选取几种不同密度工况进行仿真,行人位置分布会影响每个行人的受力,进而影响行人速度以及结构的动力响应,考虑到行人的位置分布、期望速度等的随机性以及仿真过程的波动性,每种密度工况下产生 7 组数据,计算每种工况下速度的平均值,进而得到行人速度-密度曲线,见图 2。将均值速度作为行人在某一密度下的移动速度,并与其他学者的结果进行对比,证明该社会力模型的可靠性。将得到的点进行拟合得到了密度-速度关系式

$$v = 1.28 - 0.33k \quad (9)$$

式中: k 为行人密度,即单位面积的行人数量。由图 2 速度-密度曲线可知,在行人密度小于 0.5 时行人速

度的变化并不稳定,原因是,当密度小于 0.5 时,行人处于自由运动的状态,速度具有较大的波动性,与实际情况符合;当密度大于 0.5 时,处于中密度状态,行人之间的相互作用开始变得明显,速度随着密度的增大呈稳定下降趋势。由文献[14],速度与行人步频的关系可表示为

$$f_p = 0.35v_p^3 - 1.59v_p^2 + 2.96v_p \quad (10)$$



注:—Weidmann — SF P E H and book * 原始的社会力模型
● parisi的改进社会力模型 — 课题组改进的社会力模型

图 2 速度-密度曲线

Fig. 2 Speed-density curve

2.3 随机人群荷载

随机人群荷载是单个行人荷载的组合。社会力

模型中考虑到个体内的随机性,质量在 50~80 kg 的范围内服从均值为 65、方差为 5 的正态分布,期望速度在 0.7~1.4 m/s 的范围内服从均值为 1.29、方差为 0.29 的正态分布。而行人真实速度则由社会力模型中任意时刻行人受力以及前一步速度共同决定。上述过程中,不仅在时间域内考虑了行人个体内以及个体间的随机性,并且在空间域内考虑了行人运动过程中周围环境以及与周围行人之间的相互作用。根据社会力模型,行人下一时刻的速度以及位置由当前行人受到的来自周围行人以及障碍物的力共同决定,不同密度下行人受到其他行人影响不同。计算不同密度下任意行人任意时刻的位置分布、速度等,由式(10)可得到任意时刻行人的步频,再由式(11)对随机人群中所有荷载进行叠加则可得人群随机荷载,而人体自重引起的结构动力响应相较于简谐荷载而言可忽略不计^[5]。

$$FP(t) = \sum_{p=1}^m (G + G \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2i\pi f_p t + \varphi_i)) \quad (11)$$

式中: m 为行人数量; n 为在计算中考虑的总阶数; α_i 是*i*阶谐波的动力荷载因子,定义为步行荷载傅里叶幅值谱峰值与人体体重之比; φ_i 为第*i*阶谐波的相位角; G 为行人体重; f_p 为行人步频。

图 3 与图 4 中 FP 为所有行人步行荷载之和, $G_{\text{总}}$ 为结构上所有行人的体重之和。图 3 为单个行人荷载时程曲线图,从图 3 可以明显看出人行荷载具有周期性。图 4 对比了行人同步行走荷载与随机人群荷载时程曲线,其中人数为 10 人,同步行走中将 10 人排成 3 列,前 2 列均为 4 人,第 3 列为 2 人,行、列间距一致均为 0.75 m。行走过程中行人步速均为 1.3 m/s,步频均为 1.93 Hz。经过对比可知,同步人群荷载时程与单个行人荷载时程类似,具有很明显的周期性,而随机人群荷载由于步频并不统一,无明显周期,行人行走过程中出现同步情况较少,因此,荷载峰值也比同步行走时的小。

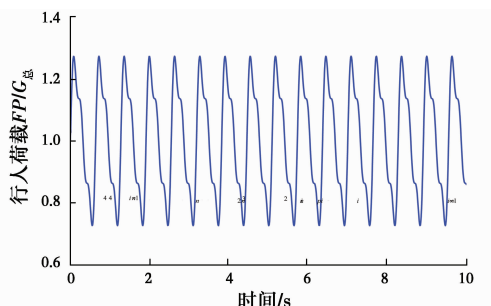


图 3 单人步行荷载曲线

Fig. 3 Single walking load curve

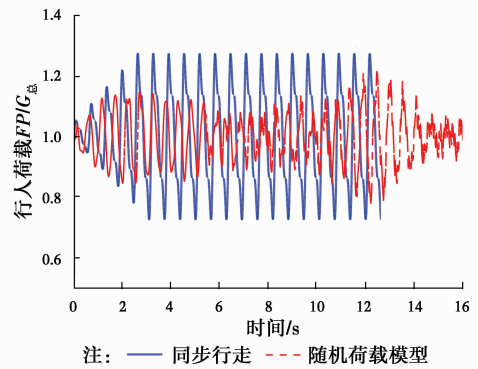


图 4 人群荷载时程曲线

Fig. 4 Crowd load time-history curve

3 连廊的振动控制方程

将连廊简化为简支梁,单位长度质量为 m 、刚度为 k 、阻尼为 c 、 I 为惯性矩、 E 为弹性模量,连廊长度为 $L=21.8$ m,宽为 3 m。

3.1 随机人群荷载下连廊的振动控制方程

在人群荷载的共同作用下,结构的振动控制方程

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \sum_{i=1}^n F_i(t) \delta(x - v_i t) \quad (12)$$

式中:下标 i 表示为第 i 行人; $\delta(x - vt)$ 为 Dirac 函数,其性质为

$$\delta(x - vt) = 0, \quad x \neq vt \quad (13.1)$$

$$\int_0^L \delta(x - vt) dx = 1 \quad (13.2)$$

$$\int_0^L f(x) \delta(x - vt) dx = f(vt) \quad (13.3)$$

3.2 控制方程的求解

结构的位移变形可表示为

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) z_i(t) \quad (14.1)$$

式中: $\varphi_i(x)$ 为振型; $z_i(t)$ 为广义坐标。结构的振动过程,以一阶模态为主,故忽略其他阶的影响,振型函数为 $\varphi_i(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}$ 。 n 为振型的阶数,本文中只考虑一阶振型。

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sin \frac{\pi x}{L} z_i(t) \quad (14.2)$$

将式(13.2)代入结构振动方程,其中,等式右边广义荷载

$$\sum_{i=1}^n F_i = \int_0^L \delta(x - v_i t) F_{p_i} \sin \frac{\pi x_i}{L} dx = \sum_{i=1}^n F_{p_i} \sin \left(\frac{\pi v_i t}{L} \right) \quad (15.1)$$

等式左边广义质量

$$\tilde{m} = \int_0^L m \sin^2 \frac{\pi x}{L} dx = \frac{mL}{2} \quad (15.2)$$

广义刚度数

$$\tilde{k} = \int_0^L EI \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) \sin^2 \frac{\pi x}{L} dx = \frac{\pi^4 EI}{2L^3} \quad (15.3)$$

则结构的振动控制方程可化为

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{z}(t) + \omega_n^2 z(t) = \frac{mL}{2} \sum_i^n F_{pi} \sin\left(\frac{\pi v_i t}{L}\right) \quad (16)$$

利用 MATLAB 平台,通过基于 Newmar $k-\beta$ 法自编的程序对控制方程进行求解,计算流程如图 5 所示。

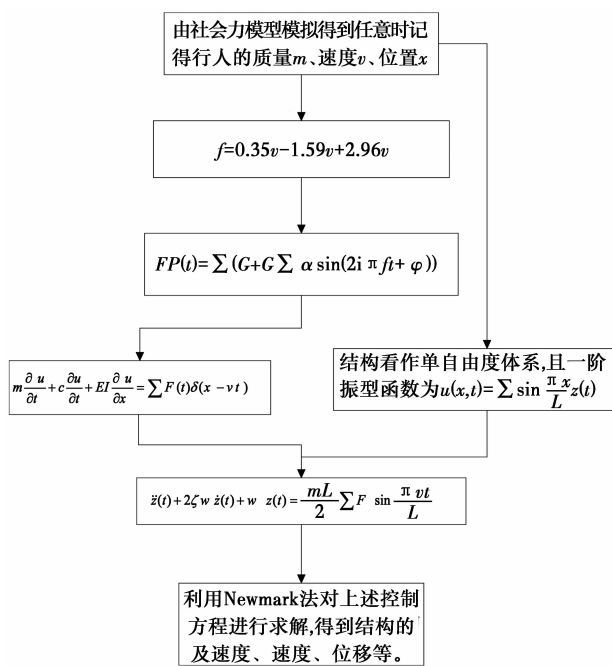


图 5 结构动力响应计算流程图

Fig. 5 Flow chart of structural dynamic response calculation

4 算例

某商贸城的钢结构连廊跨度 $L=21.8\text{ m}$, 宽度为 3.0 m , 结构的阻尼比 ξ 为 0.01 。该钢结构连廊截面竖向等效抗弯刚度为 $EI=3.268 \times 10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2$, 单位长度质量 $m=1\,063.5\text{ kg}$, 单位长度阻尼系数 c 为 $950.8\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$, 连廊上基于社会力模型的人群随机荷载分布如图 6 所示。《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范(送审稿)》中规定,连廊的第一阶竖向自振频率不宜小于 3 Hz , 不封闭连廊竖向峰值加速度限制为 0.5 m/s^2 。该结构竖向基频为 4.72 Hz , 满足频率限制的要求。当单个行人步频为结构基频的 $1/3$ 通过该连廊, 由步频和速度的关系式得行人的速度为 0.838 m/s 结构加速度峰值如图

7 所示为 0.12 m/s^2 , 小于加速度限制。

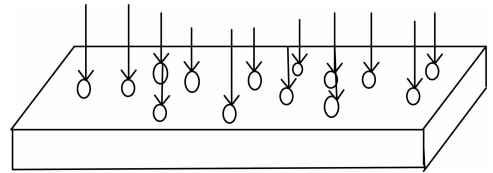


图 6 行人随机分布图

Fig. 6 Pedestrian random distribution

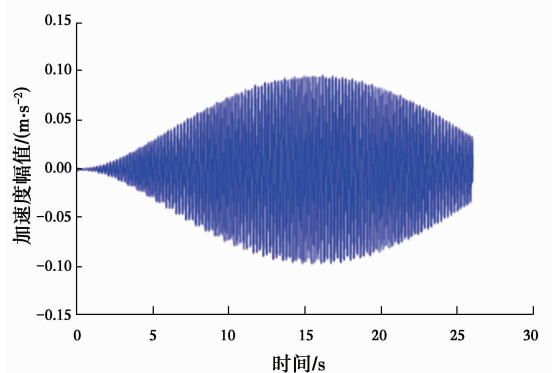


图 7 单个行人加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration time history curve of single pedestrian

《建筑楼盖结构振动舒适度技术规范(送审稿)》中指出,当行人密度为 $0.1\text{ 人}/\text{m}^2$ 是属于完全自由行走状态。当为 $0.5\text{ 人}/\text{m}^2$ 时行人较多,行人仍然能够自由选择行走,当行人密度等于 $1.0\text{ 人}/\text{m}^2$ 时,行人行走有不舒适感,人群拥挤。分别对行人密度为 $0.167, 0.333, 0.5, 1.0\text{ 人}/\text{m}^2$ 共 4 种行人密度工况下的人群荷载引起的结构响应进行计算。得到结果如图 8 所示。从图 8 可以看出当行人密度为 $0.167, 0.333, 0.5, 1.0\text{ 人}/\text{m}^2$ 时结构加速度最大响应分别为 $0.066, 0.143, 0.255, 0.535\text{ m/s}^2$, 当行人密度为 $1.0\text{ 人}/\text{m}^2$ 时,结构加速度响应大于 0.5 m/s^2 , 超过连廊振动舒适度限制。由于不同行人以及期望速度等对行人的运动特性影响较大,而在同一种行人密度工况下,行人位置分布随机,期望速度取值服从正态分布。考虑到行人的随机性以及仿真过程的波动性,同一行人密度工况下引起的结构响应不同,针对 10 种行人密度工况各产生了 8 组不同行人模拟。表 2 为在各行人情况下 8 组不同行人分布下计算得到的结构加速度峰值,其计算流程如图 5 所示,取 8 组结构加速度峰值的平均值作为对应行人密度下加速度响应的代表值,用以评估结构的振动舒适度。为了得到更加明显的变化规律,将得到的峰值加速度与人群密度进行函数关系拟合,该拟合只针对该结构。拟合曲线如图 9, $R^2=0.922$ 拟合度较高,拟合结果为

$$\ddot{y}(t) = -0.314p^2 + 0.836p - 0.0282 \quad (17)$$

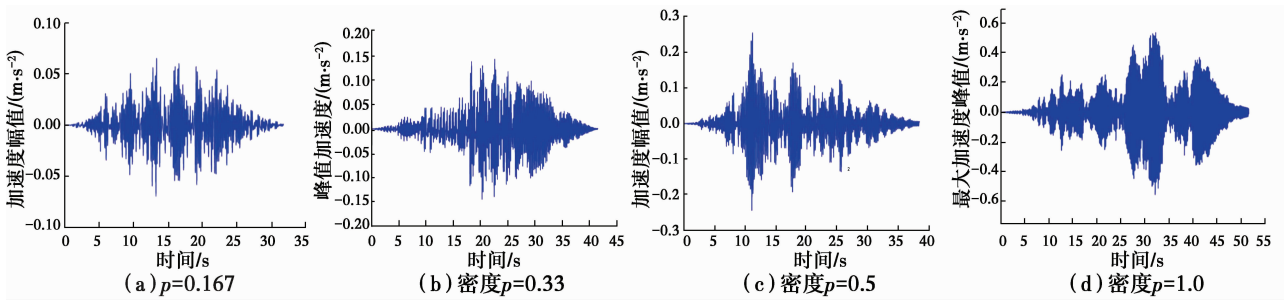


图 8 不同行人密度下加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time history curve in different pedestrian density

表 2 不同人群密度下结构加速度峰值

Table 2 Peak acceleration of structure in different pedestrian density

人群密度/ (人·m ⁻²)	结构加速度峰值/(m·s ⁻²)								均值/ (m·s ⁻²)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0.033	0.017	0.014	0.015	0.083	0.012	0.027	0.020	0.018	0.027
0.167	0.040	0.057	0.209	0.053	0.143	0.066	0.143	0.048	0.095
0.333	0.147	0.171	0.108	0.143	0.171	0.121	0.170	0.153	0.148
0.500	0.219	0.223	0.272	0.255	0.318	0.253	0.245	0.371	0.270
0.667	0.261	0.264	0.424	0.173	0.425	0.709	0.639	0.531	0.428
0.833	0.368	0.320	0.334	0.525	0.359	0.426	0.282	0.473	0.386
1.000	0.435	0.463	0.578	0.426	0.419	0.535	0.829	0.739	0.553
1.167	0.775	0.834	0.651	0.436	0.533	0.851	0.433	0.458	0.621
1.333	0.491	0.499	0.357	0.525	0.450	0.546	0.621	0.499	0.498
1.500	0.422	0.530	0.355	0.412	0.401	0.607	0.516	0.582	0.478

为了验证曲线的可靠性,分别计算 0.25、0.583、0.75、0.917 人/m² 几种行人密度工况下结构加速度峰值,与公式拟合的值进行对比,结果见表 3。通过对比实际峰值加速度与拟合公式计算得到的加速度峰值,发现结果较为吻合。由图 9 密度-加速度峰值关系曲线可知,当密度在 1.15~1.30 人/m² 之间时,速度在 0.89~0.84 m/s 范围内变化,相应的由拟合公式计算得到的速度平均值为 0.841 m/s,与之对应的步频在 1.57~1.63 Hz 范围内变化,接近结构基频的 1/3。故而结构在 1.15~1.30 人/m² 的密度范围内取最大值。当行人密度在 1.0~1.4 人/m² 时,结构加速度响应超出了舒适度限制,应该采取一定措施控制人群密度出现在这个范围的概率,或者采取减振措施。

表 3 实际与拟合的加速度峰值

Table 3 Peak acceleration of actual value and fitted

行人密度/ (人·m ⁻²)	实际得到的 峰值加速度/ (m·s ⁻²)	拟合得到的峰 值加速度/ (m·s ⁻²)	误差/%
0.25	0.158	0.161	1.90
0.583	0.356	0.352	1.12
0.75	0.414	0.422	1.93
0.917	0.434	0.474	9.29

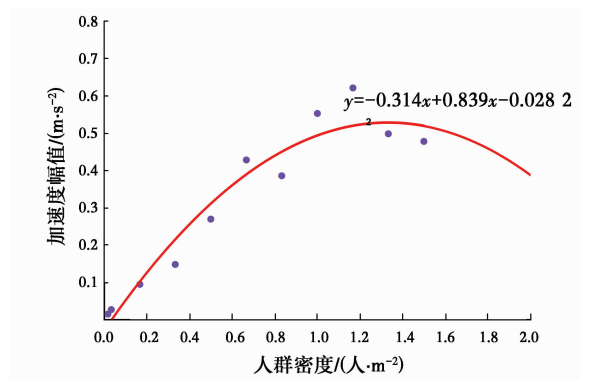


图 9 人群密度-加速度时程曲线

Fig. 9 Pedestrian density-acceleration time history curve

5 结论

1)以社会力模型为基础,结合生物力学以及交通领域内对于行人特性的研究,考虑了行人时间和空间内的随机性以及行人之间、行人与环境之间的交互性,建立了更符合实际的随机人群荷载模型。

2)人群随机荷载引起的结构振动与行人步速有较大关系,行人步速与行人密度有直接关系,可以通过行人密度与速度的关系曲线来预测不同密度下人群引起的结构加速度响应,找出人群荷载引起结构

过量振动的行人密度范围,采取措施进行减振控制。

3)人群随机荷载引起的结构动力响应,并不会一直呈现增大的趋势,当人群密度过大时,人群平均步频远小于结构基频的 $1/3$,此时可将行人荷载看作是静载,引起的动力响应很微弱。

参考文献:

- [1] 樊健生,李泉,李全旺,等.考虑人-结构相互作用的楼盖振动控制研究[J].振动与冲击,2010,29(11):230-236.
FAN J S, LI Q, LI Q W, et al. Floor vibration control considering human-structure interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 230-236. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 张家华,高承勇,秦卫红,等.大跨度楼面人群荷载作用响应分析[J].建筑结构学报,2011,32(11):177-182.
ZHANG J H, GAO C Y, QIN W H, et al. Analysis of vibration responses of long-span floor under crowd loads [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(11): 177-182. (in Chinese)
- [4] VENUTI F, RACIC V, CORBETTA A. Pedestrian-structure interaction in the vertical direction: coupled oscillator-force model for vibration serviceability assessment [C] // IX International Conference on Structural Dynamics Eurodyn, Porto, Portugal, 2014.
- [5] 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量化评估[J].工程力学,2016,33(10):97-104.
ZHU Q K, LI H N, DU Y F, et al. Quantitative evaluation of vibration serviceability of pedestrian bridge under different walking speed [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 97-104. (in Chinese)
- [6] 甄伟,盛平,张力,等.财富中心悬吊楼盖结构舒适度设计及检测[J].建筑结构,2011,41(1):52-54,34.
ZHEN W, SHENG P, ZHANG L, et al. Vibration comfort design and experiment of the suspended floor of prosper center [J]. Building Structure, 2011, 41(1): 52-54,34. (in Chinese)
- [7] 潘宁,杜文博,倪志伟,等.计算人群行走楼板响应的随机振动方法[J].建筑科学,2016,32(5):39-43.
PAN N, DU W B, NI Z W, et al. Random vibration method for calculating floor vibration response under crowd walking [J]. Building Science, 2016, 32(5): 39-43. (in Chinese)
- [8] 丁国,陈隽.行人荷载随机性对楼盖振动响应的影响研究[J].振动工程学报,2016,29(1):123-131.
DING G, CHEN J. Influences of walking load randomness on vibration responses of long-span floors [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 123-131. (in Chinese)
- [9] 杨娜,邱雪.人群集度荷载模型及人致振动模拟分析[J].北京交通大学学报,2016,40(3):88-96.
YANG N, QIU X. Crowd density load model and analysis of crowd-induced vibration [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(3): 88-96. (in Chinese)
- [10] HELBING D, BUZNA L, JOHANSSON A, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions [J]. Transportation Science, 2005, 39(1): 1-24.
- [11] PFEIL M, AMADOR N, PIMENTEL R, et al. Analytic-numerical model for walking person-footbridge structure interaction [C] // International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn, 2014.
- [12] 李珊珊,钱大琳,王九州.考虑行人减速避让的改进社会力模型[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(3):623-628.
LI S S, QIAN D L, WANG J Z. Improved social force model considering pedestrian deceleration to avoid collision [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(3): 623-628. (in Chinese)
- [13] PARISI D R, GILMAN M, MOLDOVAN H. A modification of the Social Force Model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions [J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2009, 388(17): 3600-3608.
- [14] BRUNO L, VENUTI F. Crowd-structure interaction in footbridges: Modelling, application to a real case-study and sensitivity analyses [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 323(1): 475-493.

(编辑 胡英奎)