

基于风致抖振分析的多跨斜拉桥行人舒适性评价分析

姚青¹, 刘彤¹, 陈增²

[1.上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065; 2.上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海市 200240]

摘要: 首先,从随机风场模拟方法和抖振风荷载计算两方面介绍了风致抖振分析的基本理论;然后,以南昌市朝阳大桥为工程背景,利用 MATLAB 自编程序依据上述随机风场模拟方法建立成桥阶段设计基准风速下标准断面的脉动风速模拟,将抖振惯性力公式计算所得的抖振风荷载施加在主桥模型上,对大桥的行人舒适性作出分析与评价;最后,对南昌市朝阳大桥的人非通道和观景平台提出了行人交通管控措施。

关键词: 多跨斜拉桥;行人舒适性;风致抖振;随机风场模拟;抖振风荷载

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)05-0252-04

0 引言

随着社会发展与进步,大众对桥梁的人文景观功能需求加深,越来越多的大型桥梁考虑设置人行与非机动车道通道系统(简称人非系统)或者观景平台。为保障行人安全,有关外荷载对桥梁结构产生的振动如车致振动、风致振动的研究及人非系统行人舒适性研究显得尤为重要。目前对行人舒适性的研究还大多集中于人行天桥,包括车致振动、人致振动等作用下的行人舒适度评价^[1-8],而对于大型桥梁,目前主要研究的是行车舒适性^[9-14],针对大型桥梁人非系统行人舒适度的研究则较少。因此本文以南昌市朝阳大桥为背景工程,对多跨斜拉桥的人非系统在风致抖振作用下的行人舒适度进行了分析与评价,以期同类型桥梁的评价提供参考依据。

1 抖振分析基本理论

1.1 随机风场模拟

风荷载一般用风速来表示。空间中某一点的风速通常用一个标准的随机过程来描述^[15],采用功率谱密度函数(PSD)来反映风在某一特定空间内的特性,当结构尺寸较大时,风场会随着空间位置的改变而产生不可忽略的变化。此时风场是一个时变场,即风速 V 不仅是空间坐标的函数,同时也与时间相关:

$$V=V(x_1, x_2, x_3, t) \quad (1)$$

可见, $V=V(x_1, x_2, x_3, t)$ 是一个所谓的单变量

(1V-4D)随机场。令 $x_j, y_j, z_j, j=1, 2, \dots, n$ 为空间中的 n 个点, $V_j(t)=V(x_j, y_j, z_j, t)$ 为一维单变量(1V-1D)随机过程。 $V(t)$ 为一个零均值正态随机向量过程,可采用一个对称、正定矩阵的双边功率谱密度矩阵 $S_V(\omega)$ 来描述:

$$S_V(\omega)=\begin{bmatrix} S_{V_1V_1}(\omega) & S_{V_1V_2}(\omega) & \cdots & S_{V_1V_n}(\omega) \\ S_{V_1V_2}(\omega) & S_{V_2V_2}(\omega) & \cdots & S_{V_2V_n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{V_1V_n}(\omega) & S_{V_2V_n}(\omega) & \cdots & S_{V_nV_n}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于空间某个点,根据谱表现(Spectral Representation)定律,Shinozuka 等^[16]给出了一维单变量(1V-1D)零均值平稳随机过程的数值模拟公式:

$$V(t)=\sqrt{2} \sum_{j=0}^{N-1} A_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (3)$$

式中: $A_j=\sqrt{(2S_{VV}(\omega_j)\Delta\omega)}$, $\omega_j=j\Delta\omega$; $\Delta\omega=\omega_u/N$, $j=0, 1, 2, \dots, N-1$; $A_0=0$, $S_{VV}(\omega_0=0)=0$; ω_u 为截断频率。

进一步,在一维单变量随机过程模拟研究的基础上,Deodatis^[17]进行了平稳、多变量随机过程的模拟研究。为了模拟目标一维多变量(1D-nV)平稳随机过程 $V_j^\circ(t)$, $j=1, 2, \dots, n$, 首先可对目标双边功率谱密度矩阵 $S_{V^\circ}(\omega)$ 进行分解:

$$S_{V^\circ}(\omega)=H(\omega)H^T(\omega) \quad (4)$$

上述分解可以通过 Cholesky 方法获得 $H(\omega)$ 为下三角矩阵,且有如下形式:

$$H(\omega)=\begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$H^T(\omega)$ 为其共轭转置矩阵。对矩阵 $S_{V^\circ}(\omega)$ 进行分解,便可用下式对 $V_j^\circ(t)$, $j=1, 2, \dots, n$ 进行仿真:

收稿日期: 2020-11-06

作者简介: 姚青(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁工程施工工作。

$$V_j(t)=2\sum_{m=1}^j\sum_{l=1}^n|H_{jm}(\omega_{ml})|\sqrt{\Delta\omega}\cdot\cos[\omega_{ml}t-\theta_{jm}(\omega_{ml})+\phi_{ml}] \quad (6)$$

式中: $j=1,2,\cdots,n$; $\Delta\omega=\omega_u/N$, 其中的 ω_u 为截断频率; ω_{ml} 为双索引频率; ϕ_{ml} 为在区间 $[0,2\pi]$ 上均匀分布的随机相位角。

为增大模拟样本的周期,双索引频率为:

$$\omega_{ml}=(l-1)\Delta\omega+\frac{m}{n}\Delta\omega,l=1,2,\cdots,N \quad (7)$$

1.2 抖振风荷载

抖振是结构在紊流风作用下的随机性强迫振动,目前研究最多的是大气来流紊流引起的结构抖振,尾流抖振现象尚无比较有效的解析模型。近几十年来,国内外学者对大气紊流引起的抖振响应进行了大量研究,抖振分析理论主要有 Davenport 提出的抖振分析理论与 Scanlan 提出的颤抖振分析理论。本文所讨论的是关于来流紊流引起的抖振响应问题。对于斜拉索来说,抖振的振幅较小,一般不会对斜拉索产生非常严重的危害,主要是疲劳作用缩短斜拉索的使用寿命。

《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)将平均风作用和风的背景脉动两部分荷载合并,称为静阵风荷载。静阵风荷载可根据规范的规定计算,而由脉动风诱发抖振产生的抖振惯性力时程是多个互相关的随机过程。分析计算抖振惯性力时程的关键在于脉动风荷载的模拟,因此需要先模拟桥梁周围的脉动风速场,即单独模拟顺风向脉动风速和竖向向脉动风速,然后共同作用在结构上,即可转换为抖振惯性力时程。

获得桥梁单元上各模拟作用点的脉动风速时程后,即可得到作用在单元上各模拟作用点的抖振惯性力时程。基于准定常理论,Scanlan 在 Davenport 抖振理论的基础上考虑平均气动刚度的影响以及气动耦合效应,提出作用在桥梁上抖振惯性力公式为:

$$F_H=\frac{1}{2}\rho U^2 H C_H(\alpha) X_{Hu} \frac{u(t)}{U} \quad (8)$$

$$F_V=\frac{1}{2}\rho U^2 B \left[C_V(\alpha) X_{Vu} \left(2 \frac{u(t)}{U} \right) + C'_V(\alpha) X_{Vw} \frac{w(t)}{U} \right] \quad (9)$$

$$F_M=\frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \left[C_M(\alpha) X_{Mu} \left(2 \frac{u(t)}{U} \right) + C'_M(\alpha) X_{Mw} \frac{w(t)}{U} \right] \quad (10)$$

式中: F_H, F_V, F_M 分别为阻力、升力、升力矩; C_H, C_V, C_M 分别为体轴下风偏角为 α 的阻力系数、升力系数、升力矩系数; U 为按照规范考虑梯度风效应计算的不同高度构件的设计基准风速; $C'_V(\alpha), C'_M(\alpha)$ 分别

为静风升力系数和升力矩系数对风攻角的导数; $X_{Hu}, X_{Vu}, X_{Vw}, X_{Mu}, X_{Mw}$ 分别为时域内气动导纳函数; u, w 分别为横桥向和竖向脉动风分量; H 为计算迎风面高度; B 为桥宽。

2 工程实例分析

2.1 随机风场模拟

南昌市朝阳大桥主桥跨径布置为 79 m+5 × 150 m+79 m,桥型布置采用 6 塔单索面斜拉桥,斜拉索锚固点布设在箱梁的中室,张拉端位于梁体内,主桥立面布置图和主跨边跨结构示意图见图 1、图 2。主桥采用双层布置:上层桥面宽 37.0 m,布置双向 8 车道;下层为非机动车道和人行道,单侧净宽 7 m。主梁采用单箱 5 室大悬臂等截面预应力混凝土箱梁,顶部为机动车道,下部在箱梁两侧顺底板悬挑出去设人非通道,其箱梁横断面图见图 3。

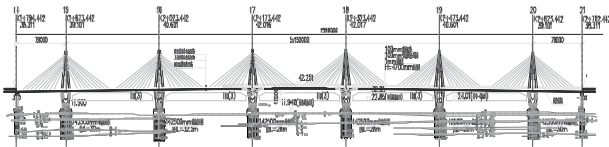


图 1 主桥立面布置图(单位:mm)

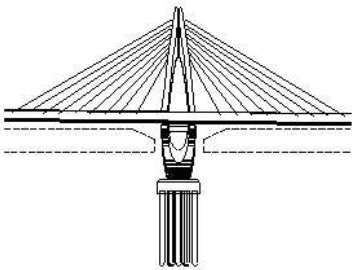


图 2 主跨边跨结构示意图

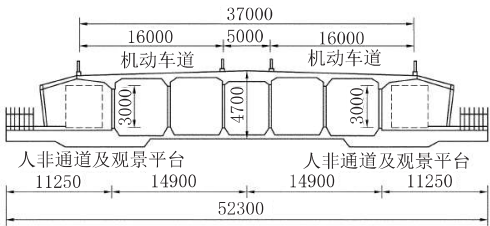


图 3 箱梁横断面示意图(单位:mm)

2.2 脉动模拟计算

利用 MATLAB 编制的计算程序,可以获得成桥阶段设计基准风速下主梁标准断面脉动风成分的 Simiu 顺风向谱及竖向风谱(见图 4)。

2.3 不同风速下的人非系统加速度响应

本文研究了设计基准风速分别取 5 m/s、7.5 m/s、10 m/s、12.5 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 时的人非系统最大竖向和侧向加速度响应。以风速 5 m/s、7.5 m/s、25 m/s 为例,得到结果如图 5 ~ 图 10 所示。

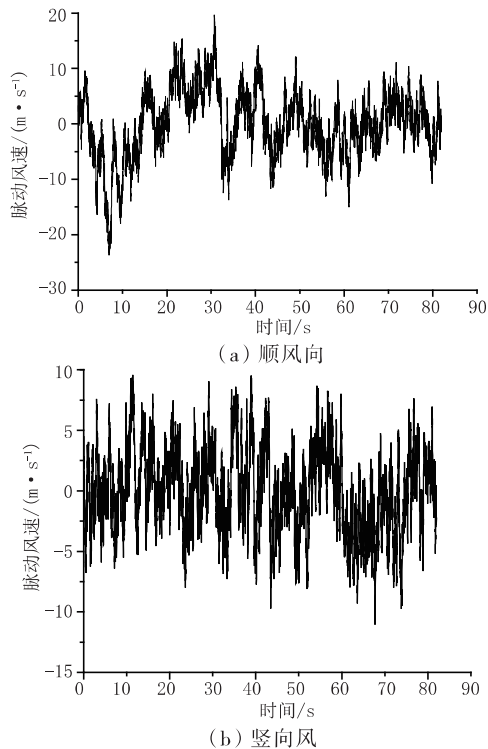


图4 标准断面顺风向与竖向风脉动风速模拟

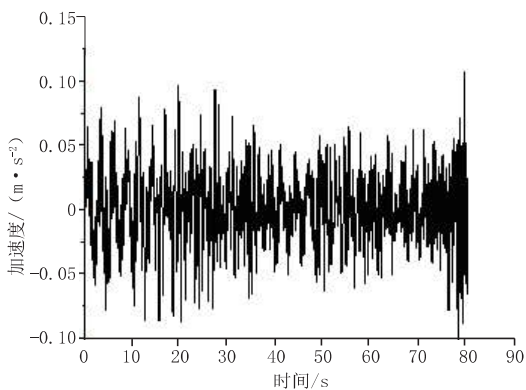


图5 风速 5 m/s 最大竖向加速度

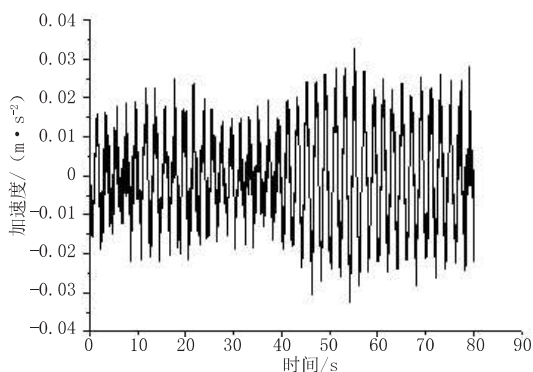


图6 风速 5 m/s 最大侧向加速度

2.4 不同风速下的加速度响应对比

将设计基准风速 5 m/s、7.5 m/s、10 m/s、12.5 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 时的人非系统最大竖向和侧向加速度响应做统计对比,根据德国人行桥设计指南 EN03 中所规定的舒适度评价指标(见表 1),得

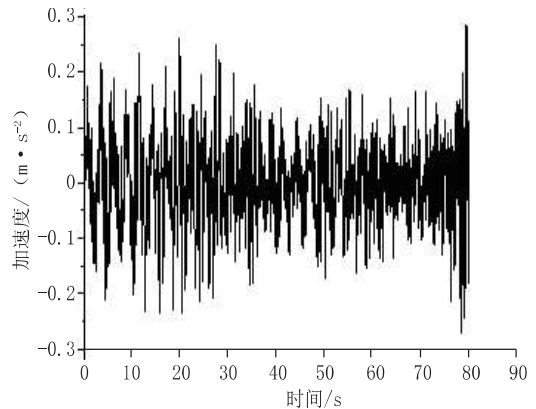


图7 风速 7.5 m/s 最大竖向加速度

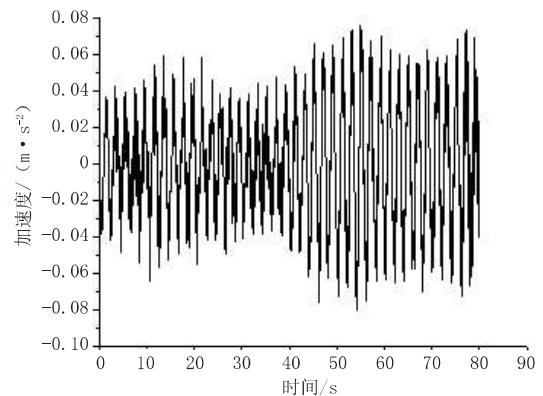


图8 风速 7.5 m/s 最大侧向加速度

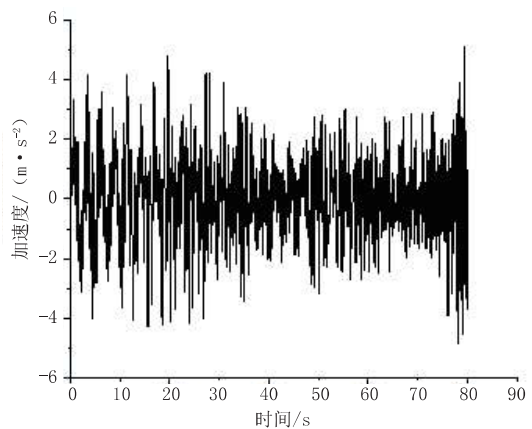


图9 风速 25 m/s 最大竖向加速度

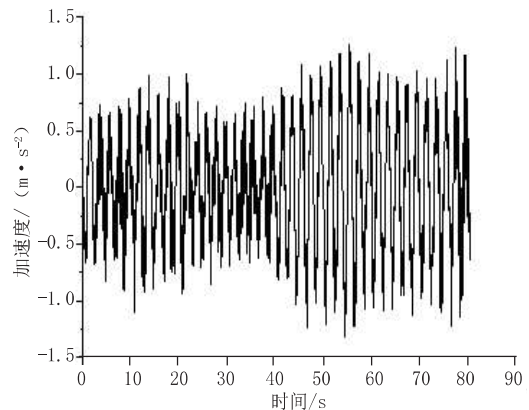


图10 风速 25 m/s 最大侧向加速度

到结果见图 11。由图 11 可知,设计基准风速低于 10 m/s 时,行人舒适度能满足“最好”的需求;风速超

表1 EN03中舒适性标准

舒适级别	舒适度	竖向加速度限值 $/(m \cdot s^{-2})$	侧向加速度限值 $/(m \cdot s^{-2})$
CL1	最好	<0.50	<0.10
CL2	中等	$0.50 \sim 1.00$	$0.10 \sim 0.30$
CL3	差	$1.00 \sim 2.50$	$0.30 \sim 0.80$
CL4	不可接受	>2.50	>0.80

过 10 m/s 时,行人舒适度开始变为“中等”;达到 12.5 m/s 时,行人舒适度开始变为“差”;超过 17.5 m/s 后,行人舒适度变为“不可接受”。因此 0~10 m/s 的风速满足行人舒适性的要求,设计基准风速超过 17.5 m/s(8 级风)后,应严格控制行人通行。

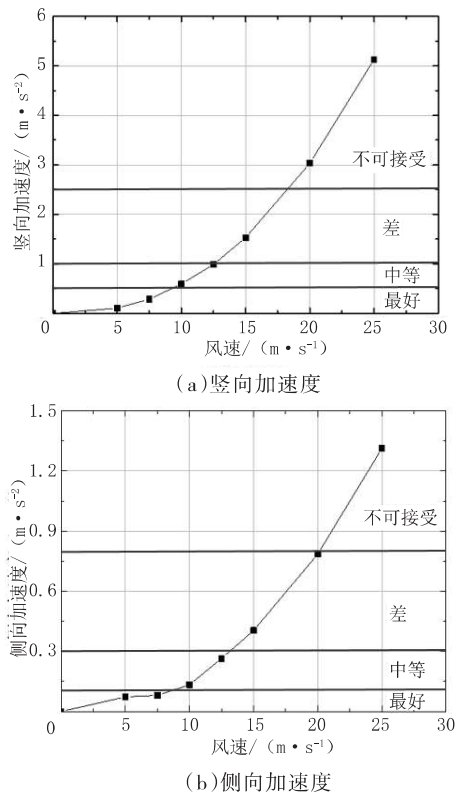


图 11 不同设计风速下的最大竖向与侧向加速度对比及舒适度等级

2.5 建议策略

根据上述分析结果不难看出,风致桥梁竖向振动加速度舒适性比风致桥梁侧向加速度先达到最不利控制要求,因此竖向振动成为了抖振舒适性的控制振动。

由上述结果可以看出,当设计风速达到 15 m/s 时,振动舒适性进入“差”的等级,当设计风速达到

17.5 m/s 时,振动舒适度进入“不可接受”的等级,因此从风致振动舒适性的角度出发,当地面风力达到 8 级时,建议进行行人交通管控措施,以避免行人出现不利振动反应。

3 结 语

本文通过自编制 MATLAB 程序对随机风场模拟并计算抖振风荷载,分析了南昌市朝阳大桥人非系统与观景平台在抖振风荷载下的加速度响应,并据此对行人舒适性做出评价,给出了相应的建议策略:当地面风力达到 8 级时,应进行行人交通管控措施,以避免行人出现不利振动反应。

参考文献:

[1] 吴金虎,卢家森,陆元春. 苏州龙安路人行天桥行人舒适度研究与人行桥共振分析[J]. 钢结构, 2014, 29(12): 32-35, 64.

[2] 马如进,田雨,陈艾荣. 悬挂式人行桥基频估算及考虑车致振动效应的行人舒适性评价[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1):45-50.

[3] 王玉凯. 铁路跨线钢箱梁人行天桥舒适度评价与振动控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.

[4] 刘寅. 人行天桥振动舒适度评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

[5] 陈阶亮. 行人激励下人行天桥的振动舒适性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[6] 袁旭斌. 人行桥人致振动特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[7] 徐欣. 人行悬索桥舒适度评价及控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[8] 王彦军, 范存新. 过桥车辆对行人舒适度影响的评价[J]. 天中学刊, 2010, 25(2): 19-21, 84.

[9] 孙全胜, 张立东, 张盛然. 车辆速度对大跨斜拉桥行车舒适性的影响分析[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 114-117.

[10] 何涛. 风载作用下斜拉桥车桥耦合振动及行车舒适性研究 [D]. 厦门: 厦门理工学院, 2016.

[11] 耿波, 袁佩, 尚军年. 公轨两用部分斜拉桥耦合振动分析与行车舒适度评价[J]. 公路交通技术, 2014(6):5-10.

[12] 李雪红, 周叶波, 王仁贵, 等. 大跨斜拉桥行车振动舒适性评价[J]. 公路, 2011(11):95-98.

[13] 王英杰. 考虑车体柔性的车-桥动力响应分析及行车舒适性影响因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

[14] 韩万水. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[15] DI PAOLA M. Digital simulation of wind field velocity[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 91-109.

[16] SHINOZUKA M, DEODATIS G. Simulation of stochastic processes by spectral representation [J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4): 191-204.

[17] DEODATIS G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(8): 778-787.