

非平稳台风-桥分析系统

刘焕举, 武隽, 韩鹤翔, 徐鹏飞, 丁彬元

长安大学公路学院, 西安 710064

摘要 从风场模拟、验证和荷载处理3个方面考虑台风非平稳特性, 构建了台风-桥分析系统。构建了台风风场模拟验证系统方法, 基于非平稳风速模拟方法建立台风风场模拟方法, 并引入非均匀调制进化谱对模拟风场进行验证; 基于良态风荷载处理方法, 建立了台风荷载处理方法, 并采用APDL语言进行ANSYS二次开发, 建立台风-桥时域分析系统; 采用建立的分析系统对台风作用下某斜拉桥桥梁响应进行分析。结果表明, 模拟功率谱和验证进化谱吻合良好, 提出的台风风场模拟和验证系统方法合理有效; 模拟台风风速与台风作用下的桥梁响应时程曲线均与时变平均风速变化趋势相同, 且波动幅度随时变平均风速的减小而减小; 基于平稳特性经典风谱直接对台风风场进行模拟不合适。

关键词 非平稳; 荷载处理方法; 台风-桥系统; 非均匀调制函数; 进化谱

随着桥梁理论计算和施工技术的发展, 桥梁结构逐步趋向于大跨化和轻型化。大跨桥梁承载着较大的交通量, 一旦垮塌, 会造成大量的人员伤亡和财产损失; 而大跨桥梁有塔高、跨度大、轻质和弱阻尼等特点, 对风十分敏感。沿海地区台风频发, 对台风环境下的桥梁安全进行评估势在必行, 其中台风-桥分析系统的建立是关键。

风作用下桥梁响应一般采用数值模拟或实测方法进行分析获取。基于实测方法^[1-2]获取的桥梁响应可信度较高, 但存在花费较大、过程易受环境影响等不足, 且实测结果一般用作灾后分析, 无法用于灾害前的预测评估。数值模拟方法主要包括依据作用-响应关系直接对响应进行预测或建立风-桥耦合振动分析系统2种方法。依据作用-响应关系直接对响应进行预测方法^[3], 对桥型、桥梁跨径及部件等特性考虑不足, 因此主要用于响应极值预测, 方法的通用性也值得商榷。建立风-桥分析系统, 实现风环境下桥梁分析是有效途径。目前建立的分析系统^[4-6]主要针对良态风, 台风具有典型的非平稳性, 平均风速具有时变性, 良态风分析系统中的风场模拟和风荷载处理部分都不能直接采用。目前开展的台风风场研究中^[7-8], 主要集中于风场模拟, 或集中于验证风谱-进化谱的研究, 鲜有系统建立台风风场模拟验证方法, 在台风风场模拟研究成果的基础上, 建立台风风场模拟验证系统方法, 并开展台风荷载处理研究, 构建台风-桥分析框架, 对台风作用下桥梁响应预测及评价十分必要。

本文首先建立台风风场模型, 采用离散3次样条曲线方法获取时变平均风速, 并基于非平稳风速模拟方法实现台风

风场模拟, 引入非均匀调制功率谱, 对模拟风场进行验证; 其次, 基于良态风荷载形成方法, 考虑台风非平稳特性, 建立台风荷载处理方法; 再次, 基于通用软件ANSYS, 采用APDL语言进行二次开发, 建立台风-桥分析系统; 最后, 采用建立的分析系统, 对台风作用下的桥梁响应进行分析。

1 台风风场模拟

1.1 台风风场模型

目前的台风气象资料中, 多是已知台风经过区域某测点多个时间间隔 T_0 (T_0 为15 min、1 h或6 h等)的平均风速数据, 如何利用这些气象数据对台风风场进行模拟, 是台风风速模拟面临的主要问题。由于台风尺寸较大, 即使是最内侧的台风中心到台风眼, 半径一般也在20~60 km, 桥梁跨径与之相比很小, 因此在进行台风风场模拟时, 忽略沿桥梁跨度方向上的台风方向和平均风速的变化。

在台风风场模拟时, 采用台风风场模型

$$U^0(t) = U(t) + u(t) \quad (1)$$

式中, $U^0(t)$ 为 t 时刻台风风速; $U(t)$ 为时变平均风速; $u(t)$ 为脉动风速。

因此台风风场模拟分为时变平均风速的模拟和脉动风速的模拟两部分。

1.2 台风风场模拟

1) 时变平均风速模拟。考虑到曲线的平滑性和风速变化率的连续性, 采用三次自然样条曲线插值方法对台风时变平均风速进行模拟如下: 以气象资料中的 n 个时间间隔为 T_0

收稿日期: 2017-04-04; 修回日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51408053); 中央高校基本科研业务费专项(310821171002)

作者简介: 刘焕举, 博士研究生, 研究方向为风-车-桥耦合振动及可靠度, 电子信箱: huanjull@163.com; 武隽(通信作者), 副教授, 研究方向为桥梁动力和疲劳、桥梁可靠度及桥梁损伤检测, 电子信箱: wuhanjunzi@gmail.com

引用格式: 刘焕举, 武隽, 韩鹤翔, 等. 非平稳台风-桥分析系统[J]. 科技导报, 2017, 35(21): 68-73; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.21.008

的平均风速数据 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 为型值点, 构筑允差为 0 的三次自然样条曲线, 并离散成 p 个足够短时间间隔 Δt 的点序列, 其中 $p=nT_0/\Delta t$ 。由于 Δt 足够短, 每个 Δt 对应的样条曲线段上任意时间点的平均风速均可视为 Δt 内的平均风速, 例如在 $t \sim t+\Delta t$, 时变平均风速可表示为 $U(t)$ 。通过上述方法, 气象资料中的 n 个时间间隔为 T_0 的平均风速转换为含有 p 个平均风速的时变平均风速序列, 实现了时变平均风速模拟。

2) 脉动风速模拟。台风与良态风相比, 台风风速变化较快, 平均风速具有明显时变性, 因此在对台风风场进行模拟时, 首先通过更新风功率谱中的平均风速, 获取时变风功率谱; 然后把每个足够短时间间隔 Δt 内的脉动风速视为平稳随机过程, 采用谐波合成法^[4]对各时间间隔 Δt 内的脉动风速进行模拟。不同方向的脉动风模拟方法相同, 在进行模拟时, 只需替换相应的风功率谱即可。

z 高度处的节点 i 在 $t \sim t+\Delta t$ 内的脉动风速为

$$x_i(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |H_{ij}(\omega_{jk}, t)| \cos(\omega_{jk}t - \theta_{ij}(\omega_{jk}, t) + \phi_{jk}) \quad (2)$$

式中, $x_i(t)$ ($x=u, v, w; i=1, 2, \dots, m$) 为 i 点水平顺风向、水平横风向及竖向脉动风速; N 为一充分大正整数; $\Delta\omega=\omega_w/N$, 为频率增量, ω_w 为截止圆频率; ϕ_{jk} 为均匀分布于 $(0, 2\pi)$ 间的随机相位角; $H_{ij}(\omega_{jk}, t)$ 是对风功率谱 $S(\omega, t)$ 进行 Cholesky 分解所得矩阵 $H(\omega_{jk}, t)$ 中元素; ω_{jk} 为双索引频率, $\omega_{jk}=(k-1)\Delta\omega + \frac{j}{m} \Delta\omega$ 。

$\theta_{ij}(\omega_{jk}, t)$ 为 $H_{ij}(\omega_{jk}, t)$ 的复角, $\theta_{ij}(\omega_{jk}, t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_{ij}(\omega_{jk}, t)]}{\text{Re}[H_{ij}(\omega_{jk}, t)]} \right\}$,

$H(\omega_{jk}, t)$ 可通过对风功率谱 $S(f)$ 进行 Cholesky 分解获取。

在模拟过程中, 水平顺风向风功率谱和横风向风功率谱常采用 Simiu 谱^[9], 竖向风功率谱采用 Lumley-Panofsky 谱^[10]。由于篇幅限制, 下面只对水平顺风向进行说明, 则该时间间隔 $t \sim t+\Delta t$ 内的风功率谱为

$$\frac{nS_u(f)}{U_z(t)^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (3)$$

式中, $S_u(f)$ 分别为水平顺风向、水平横风向和竖向风场的风功率谱密度函数; $f=nz/U_z(t)$ 为相似率坐标, z 为节点离地面的高度, $U_z(t)$ 为时间间隔 $t \sim t+\Delta t$ 内高度 z 处的时变平均风速, n 为粗糙度系数; $U_z(t)=KU_z(z)/\ln(z/z_0)$ 为该时间间隔内的时变摩擦风速, $K=0.4, z_0$ 为地面粗糙长度。

1.3 模拟风场验证

模拟风场一般通过功率谱进行验证, 台风非平稳特性较为明显, 可采用进化谱进行验证。

在时间间隔 $t \sim t+\Delta t$ 内, 相应于水平顺风向脉动风 Kaimal 谱与时间频率有关的非均匀调制函数为^[7]

$$A(\omega, t) = \frac{\bar{U}}{U(t)} \frac{\left[1 + 50 \frac{\omega z}{2\pi \bar{U}}\right]^{-5/3}}{\left[1 + 50 \frac{\omega z}{2\pi U(t)}\right]^{-5/3}} \quad (4)$$

式中, \bar{U} 为 nT_0 时间段内统计的平均风速, $\bar{U}=(U_1+U_2+\dots+U_n)/n$; $U(t)$ 为在 $t \sim t+\Delta t$ 时间间隔内的时变平均风速; $A(\omega, t)$ 为非均

匀调制函数。

在时间间隔 $t \sim t+\Delta t$ 内的进化谱 $G(\omega, t)$ 为^[7]

$$G(\omega, t) = A^2(\omega, t)S(\omega) \quad (5)$$

式中, $S(\omega)$ 为功率谱密度函数, 其表达式为

$$S(\omega) = \frac{200zU(t)^2}{U_z(t) \left(1 + 50 \frac{z\omega}{2\pi U_z(t)}\right)^{3/5}} \quad (6)$$

将整个模拟时长 nT_0 内的各个时间间隔的进化谱按时间序列集成起来, 构成整个模拟时长内的进化谱, 进化谱为时间 t 和频率 ω 的函数, 为实现对模拟台风风速的验证, 把进化谱化为在时间上积分为频率 ω 的函数

$$\begin{aligned} G_{nT_0}(\omega) &= \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} |A(\omega, t)|^2 S(\omega) dt \\ &= \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} |A(\omega, t)|^2 dt S(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

$G_{nT_0}(\omega)$ 即为用于台风模拟验证的进化谱。

2 台风荷载处理

良态风作用下, 桥梁风荷载可处理为 3 部分: 平均风产生的静风力、脉动风引起的抖振力及风-桥气动耦合产生的自激力。台风荷载也由这 3 部分组成, 因此台风荷载处理过程中, 仍沿用良态风荷载处理方法。良态风风速是稳态的随机过程, 平均风速变化非常缓慢, 把平均风速视为常数, 静风荷载为常量, 而台风平均风速具有时变性, 变化量较大不容忽略, 因此台风荷载处理过程中, 对良态风荷载处理方法中的平均风速变量做了改进。

2.1 台风时变静风力

桥梁结构单位展长的时变静风升力、阻力和扭矩为

$$\begin{cases} L_{st}(t) = C_L q(t)B \\ D_{st}(t) = C_D q(t)B \\ M_{st}(t) = C_M q(t)B^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $L_{st}(t), D_{st}(t)$ 和 $M_{st}(t)$ 分别为单位展长的时变静风升力、阻力和扭矩。 B 为桥面板参考宽度; $q(t)=1/2\rho U_z^2(t)$ 为气流动压, ρ 为空气密度; C_L, C_D 及 C_M 表示桥梁的三分力系数, 可通过风洞试验获取。

2.2 台风抖振力

桥梁单位展长的抖振力可表示为

$$\begin{cases} L_b(t) = q(t)B \left[2C_L \frac{u(t)}{U_z(t)} + (C_L' + C_D) \frac{\omega(t)}{U_z(t)} \right] \\ D_b(t) = q(t)B \left[2C_D \frac{u(t)}{U_z(t)} + C_D' \frac{\omega(t)}{U_z(t)} \right] \\ M_b(t) = q(t)B^2 \left[2C_M \frac{u(t)}{U_z(t)} + C_M' \frac{\omega(t)}{U_z(t)} \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中, $L_b(t), D_b(t)$ 及 $M_b(t)$ 分别表示脉动风产生的升力、阻力和扭矩; C_L', C_D' 及 C_M' 为三分力系数对风攻角的导数。

2.3 台风自激力

基于准定常理论, 主梁断面任意时刻的运动状态如图 1 所示。图 1 中, $y(t), z(t), \dot{\theta}(t)$ 分别为桥梁节点在横向、竖向及扭转方向的速度; $\alpha_s(t)$ 为有效风攻角, $\alpha_s(t)=\psi(t)-\theta(t)$; $\psi(t)$ 为相

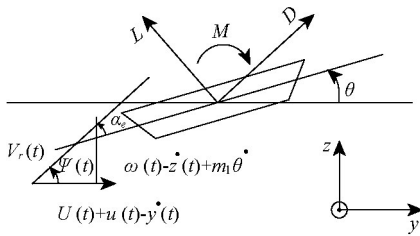


图1 主梁断面运动状态

Fig. 1 Kinestate of the girder section

对风速与水平面之间的夹角; $\theta(t)$ 桥梁横断面扭转角度; $V_r(t)$ 为相对风速, $V_r(t) = \sqrt{[U(t) + u(t) - \dot{y}(t)]^2 + [\omega(t) - \dot{z}(t) + m_1 \dot{\theta}]^2}$; m_1 为主梁特征长度。

本文自激力采用单元气动刚度矩阵和单元气动阻尼矩阵形式表达,并基于 ANSYS 程序进行模拟^[11]。则在图中直角坐标系下,采用泰勒级数展开后的气动力采用下式表示

$$\begin{cases} F_y(t) = \frac{1}{2} \rho U^2(t) A_n C_{Dn} + \frac{1}{2} \rho U(t) B [2 \frac{A_n}{B} C_{Dn} u(t) + (\frac{A_n}{B} C'_{Dn} - C_{L1}) \omega(t)] - \\ \frac{1}{2} \rho U(t) B [2 \frac{A_n}{B} C_{Dn} \dot{y}(t) + (\frac{A_n}{B} C'_{Dn} - C_{L1}) \dot{z}(t) - \\ m_1 (\frac{A_n}{B} C'_{Dn} - C_{L1}) \dot{\theta}(t) + U(t) \frac{A_n}{B} C'_{Dn} \theta(t)] \\ F_z(t) = \frac{1}{2} \rho U^2(t) B C_{L1} + \frac{1}{2} \rho U(t) B [2 C_{L1} u(t) + (\frac{A_n}{B} C_{Dn} + C'_{L1}) \omega(t)] - \\ \frac{1}{2} \rho U(t) B [2 C_{L1} \dot{y}(t) + (\frac{A_n}{B} C_{Dn} + C'_{L1}) \dot{z}(t) - \\ m_1 (\frac{A_n}{B} C_{Dn} + C'_{L1}) \dot{\theta}(t) + U(t) C'_{L1}] \\ M_x(t) = -\frac{1}{2} \rho U^2(t) B^2 C_{M1} - \frac{1}{2} \rho U(t) B^2 [2 C_{M1} u(t) + C'_{M1} \omega(t)] + \\ \frac{1}{2} \rho U(t) B [2 B C_{M1} \dot{y}(t) + B C'_{M1} \dot{z}(t) - B m_1 C'_{M1} \dot{\theta}(t) + \\ U(t) B C'_{M1}] \end{cases} \quad (10)$$

式中, $F_y(t)$ 、 $F_z(t)$ 、 $M_x(t)$ 分别表示横桥向、竖向和扭转气动力,各气动力的第 1 项表示静风力,第 2 项表示抖振力,第 3 项表示自激力。

静风力和抖振力在式(8)和式(9)中已采用经典方法获取,因此只取第 3 项自激力。将单位展长的自激力转换为单元两端的集中力,则单元自激力可以表示为

$$\begin{cases} F_{se}^i(t) = -C^0 \dot{\delta}_i(t) \frac{L_e}{2} - K^0 \delta_i(t) \frac{L_e}{2} \\ F_{se}^j(t) = -C^0 \dot{\delta}_j(t) \frac{L_e}{2} - K^0 \delta_j(t) \frac{L_e}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中,单元两端分别表示为 i 端和 j 端, $F_{se}(t)$ 表示自激力, $\delta(t)$ 表示位移, L_e 为单元 e 的长度,单元的气动刚度矩阵

$$K_e^0 = \begin{bmatrix} K^0 \frac{L_e}{2} & 0 \\ 0 & K^0 \frac{L_e}{2} \end{bmatrix}, \text{ 气动阻尼矩阵为 } C_e^0 = \begin{bmatrix} C^0 \frac{L_e}{2} & 0 \\ 0 & C^0 \frac{L_e}{2} \end{bmatrix}。 \text{ 其}$$

中, K^0 为单位长度的气动刚度矩阵; C^0 为单位长度的气动阻尼矩阵。

ANSYS 通用软件中的 Matrix27 单元是一种没有定义集

合形状的任何单元,相比于 ANSYS 中的其他单元,其质量、刚度和阻尼矩阵可以由用户自设,且输入的矩阵形式可以是对称的或非对称的。自激力是风与桥梁气动耦合产生,随自身运动、桥梁的刚度和阻尼在不断变化,因此基于上述单元气动刚度矩阵和单元气动阻尼矩阵的形式来表达自激力的形式,选取 ANSYS 通用分析软件 matrix27 单元对桥梁自激力进行模拟。将式(11)的气动刚度和气动阻尼矩阵代入 matrix27 单元矩阵,实现桥梁自激力的模拟。

3 台风-桥分析系统建立

既有风-(车)-桥分析系统主要用于良态风环境下的风-桥耦合作用分析,这是由于风场模拟和风荷载处理都是基于具有平稳特性的良态风。台风具有明显的非平稳特性,在分析过程中,要把平均风速的时变性纳入考虑。本研究组首先建立了大跨桥梁三维台风风场模拟验证系统方法,进而基于经典风荷载理论,建立了静风力和抖振力荷载计算方法,对良态风荷载处理方法中的平均风速变量设为时变平均风速进行处理,并引入基于气动阻尼矩阵和气动刚度矩阵的自激力表示方法^[9],采用 ANSYS 通用软件中的 Matrix27 单元对自激力进行了模拟。基于大型计算软件 MATLAB 和 ANSYS 为分析平台,编制了台风-桥分析系统,建立的系统可考虑台风的非平稳特性,为台风作用下的桥梁分析和台风-车-桥分析系统的建立提供和分析平台和基础。

4 算例分析

为了检验建立台风-桥梁耦合振动分析系统的适用性,选取一座典型斜拉桥为工程背景,对该桥 3 维台风风场进行模拟、验证,并对该风场作用下的桥梁响应进行分析。

4.1 背景桥梁

选取桥址处于台风频发区域的一座主跨为 448 m 的典型斜拉桥为工程背景,进行背景桥梁台风风场模拟,并对台风作用下该桥梁响应进行计算分析,斜拉桥有限元模型如图 2 所示。

由于是检验建立的分析系统的适用性,因此选取典型台风 Wilma 的实测数据。本文截取 2005-10-24T09:00-10:30 平均风速数据,本段数据包括 7 个平均风速数据点,其中每个风速数据点的平均风速为以该时间点为中心的 15 min 风速的平均值,为与实际意义吻合,去除第 1 个和最后 1 个数据,取中间 5 个数据点,时间跨度为 4500 s(450~4950 s),采用三次样条曲线把数据点连接起来并离散样条曲线,如图 3 所示,该时段的统计平均风速为 $\bar{U} = 22.66$ m/s。

4.2 风场模拟

采用图 3 中的平均风速数据,并依据台风时变平均风速获取和脉动风速模拟方法,对全桥风场进行模拟。模拟计算参数如下:跨度: $L=908$ m,主梁离地高度: $z=54$ m;地面粗糙度: $z_0=0.03$;模拟点数: $m=117$;截止频率: $\omega_{up}=4\pi$ rad/s;频率等

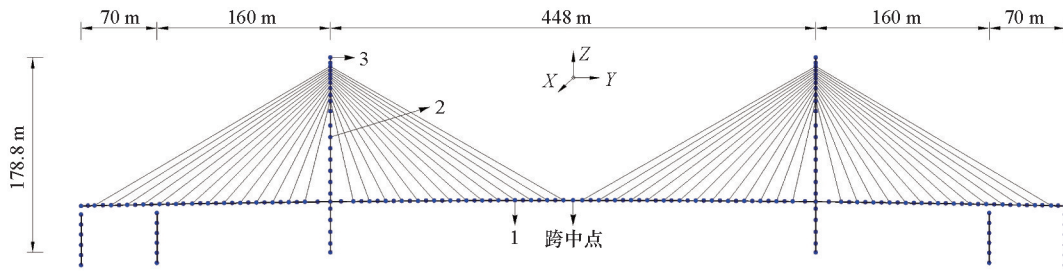


图2 沿海某斜拉桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of coastal cable-stayed bridge

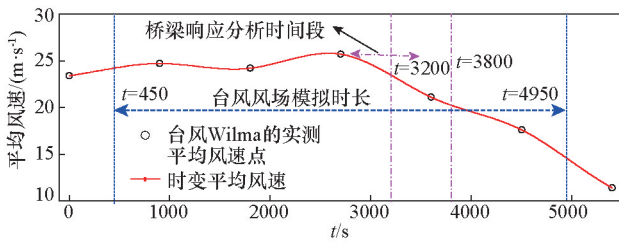
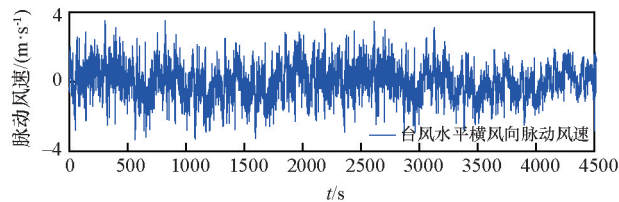


图3 台风Wilma实测数据

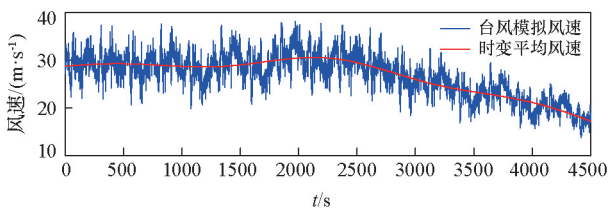
Fig. 3 Measured data of typhoon Wilma

分数: $N=1024$; 模拟采样时距: $dt=0.5$ s; 模拟时长: 4500 s; 目标谱采用式(7)表达的进化谱 $G(\omega)$; 风剖面采用指数律模型, 指数 α 取 $0.03^{[12]}$ 。

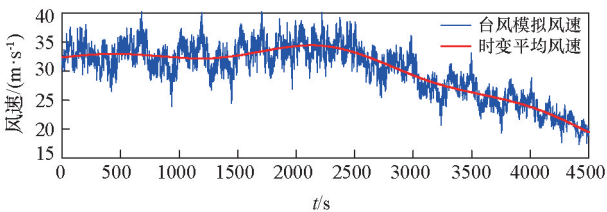
限于篇幅,在此只给出具有代表性的第1和第3共2个模拟点的风速和脉动风速时程(图4)。



(a) 第1点水平风向向脉动风速



(b) 第1点台风风速



(c) 第3点风速时程

图4 典型模拟点的脉动风速和风速时程

Fig. 4 Fluctuating wind speed and wind speed time history at each simulation point

由图4(a)可知,脉动风速整体均在0轴线上波动,振幅随平均风速的减小呈减小趋势。由图4可知,随着高程增长,台风风速不断增大;台风风速围绕时变平均风速上下波动,随着时变平均风速的变小波动幅度变小。

获取各节点脉动风速后,采用快速傅里叶变换技术(FFT)对风速进行处理,获取模拟功率谱。并基于非均匀调制函数,获取非均匀调制功率谱。图5给出了第1点的横向功率谱与相应进化谱的对比。

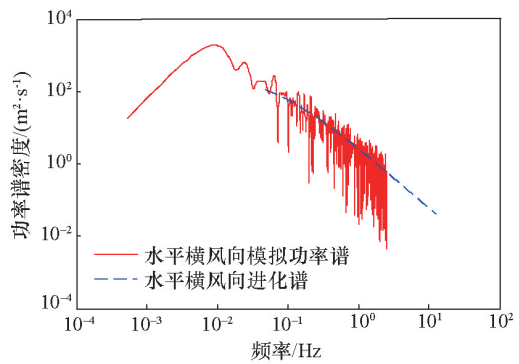


图5 第1点的模拟功率谱与进化谱对比

Fig. 5 Comparison of the simulated power spectrum and the evolutionary spectrum at point 1st

由图5可知,模拟功率谱与相应进化谱除频率非常低的点上稍有差别外,总体吻合较好,而对于大跨桥梁,这些低频段的风速对桥梁总体振动响应影响较小,因此对于应用于桥梁分析,该模拟精度满足要求。

4.3 台风作用下的桥梁响应分析

把模拟的桥梁台风风速输入至台风-桥梁分析系统,对台风作用下的桥梁响应进行分析。考虑到计算的时效性,截取 600 s(3200~3800 s)的台风风速,进行桥梁跨中位移和典型索力响应的分析。

图6和7分别给出了桥梁跨中的3向(竖向、横向及扭转)位移和典型索(最长索和最短索)的索力变化时程。由图可知:1) 桥梁响应(位移和索力)时程整体与平均风速具有相同的变化趋势;2) 响应曲线的波动幅度随平均风速的减小呈减小趋势。这主要是由于桥梁响应趋势主要由平均风速控制,而响应曲线波动幅度主要受脉动风速的影响。这与良态风作用下桥梁响应曲线围绕平衡位置上下波动,且波动幅度较

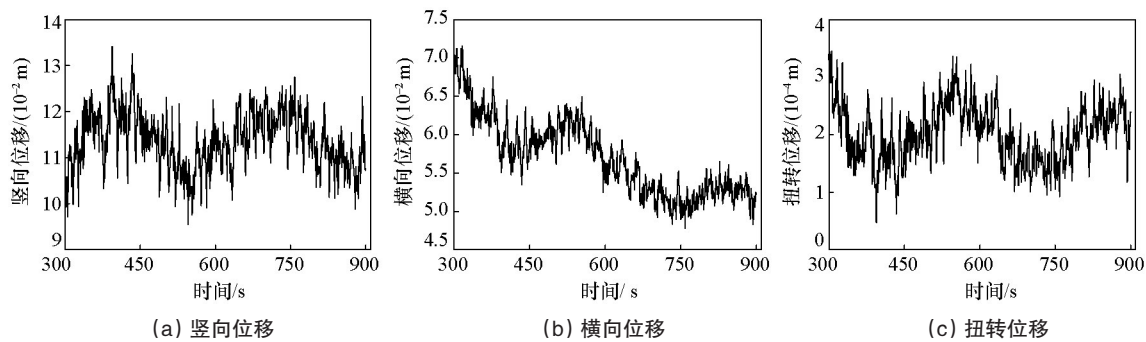


图6 跨中位移时程

Fig. 6 Time history of mid-span displacement

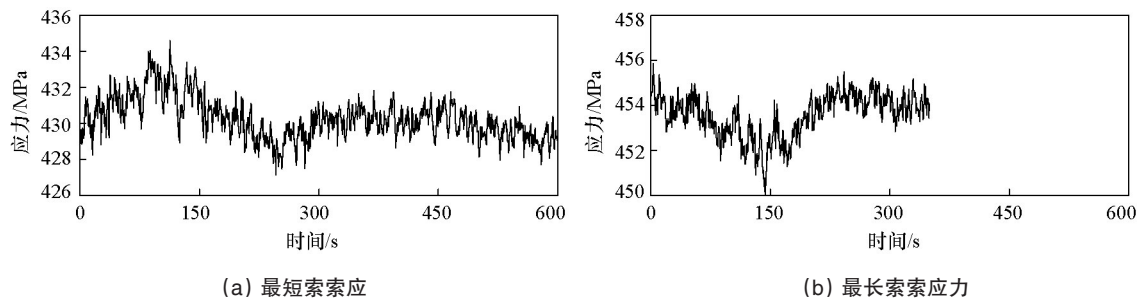


图7 典型索力时程

Fig. 7 Typical time history of cable force

为均衡的规律不同,也进一步证明不能采用良态风的经典风谱对台风进行模拟。

5 结论

建立了台风-桥耦合振动分析系统,为非平稳台风风场作用下的桥梁响应动态分析提供计算平台;系统提出了台风风场模拟和验证系统方法,为3维台风风场的模拟提供了有效方法。研究表明:1) 基于非平稳风速模拟方法的风场模拟和基于进化谱的风场验证方法均考虑了台风非平稳特性,模拟功率谱和验证进化谱吻合良好,模拟方法合理有效。2) 模拟台风风速与台风作用下的桥梁响应时程曲线均与时变平均风速变化趋势相同,且波动幅度随平均风速的减小而减小,因此基于平稳特性的经典风谱直接对台风风场进行模拟不合理。

该研究不足之处是建立的分析系统每一时步均需进行cholesky分解,计算量过大等。在保证精度前提下简化方法有待于进一步研究。

参考文献(References)

[1] Wang H, Li A Q, Xie J, et al. Field measurement of the buffeting response of a super-long-span cable-stayed bridge under typhoon[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 71-78.
[2] Miyata T, Yamada H, Katsuchi H, et al. Full-scale measurement of Akashi-Kaikyo Bridge during typhoon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 1517-1527.

[3] Hu L, Xu Y L. Extreme value of typhoon-introduced non-stationary buffeting response of long-span bridges[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 36: 19-27.
[4] Han W S, Ma L, Cai C S, et al. Nonlinear dynamic performance of long-span cable-stayed bridge under traffic and wind[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 249-274.
[5] Li Y L, Qiang S Z, Liao H L, et al. Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(6): 483-507.
[6] Chen S R, Wu J. Dynamic performance simulation of long-span bridge under combined loads of stochastic traffic and wind[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 13(3): 219-230.
[7] 李锦华, 李春祥, 申建红. 非平稳脉动风速的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 18-23.
Li Jinhua, Li Chunxiang, Shen Jianhong. Simulation of non-stationary fluctuating wind velocity[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 18-23.
[8] Zhang W. Bridge fatigue damage assessment under vehicle and non-stationary hurricane wind[C]//The 12th Americas Conference on Wind Engineering. Seattle, Washington: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013.
[9] Huang G Q, Zheng H T, Xu Y L, et al. Spectrum models for nonstationary extreme winds[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(10): 04015010.
[10] 李永乐. 风-车-桥系统非线性空间耦合振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
Li Yongle. Nonlinear three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
[11] 曾宪武, 韩大建. 大跨桥梁风致抖振时域分析及在ANSYS中的实现

[J]. 桥梁建设, 2004(1): 9-12.
Zeng Xianwu, Han Dajian. Time-domain analysis of wind-induced buffet on long-span bridges and implementation of analysis in ANSYS[J]. Bridge Construction, 2004(1): 9-12.
[12] 王旭, 黄鹏, 顾明. 台风“梅花”近地风剖面变化[J]. 同济大学学报(自

然科学版), 2013, 41(8): 1165-1171.

Wang Xu, Huang Peng, Gu Ming. Variation of wind profiles near ground during typhoon "Muifa"[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1165-1171.

An analytical system for nonstationary typhoon-bridge

LIU Huanju, WU Jun, HAN Hexiang, XU Pengfei, DING Binyuan

Department of Bridge Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract The non-stationary characteristics of typhoon are considered in three aspects as wind field simulation, validation and load treatment, and a typhoon-bridge analysis system is established. Firstly, the simulation and validation method for typhoon field is proposed, in which the simulation is based on the non-stationary wind speed simulation method and the validation is fulfilled by introducing the non-uniform modulation evolution spectrum. Secondly, the typhoon load treatment method is established by means of the treatment method for normal wind. APDL language is used to develop the ANSYS into a time domain wind-vehicle analysis system. Finally, the response of a cable-stayed bridge is analyzed by the developed analysis system. The results show that the simulated power spectrum agrees well with the validated evolution spectrum, and that the simulation and validation method is rational and effective. It is also shown that the time history curves of bridge response under typhoon and the simulated typhoon wind speed have the same trend as the time-varying mean wind speed, and the fluctuation amplitude decreases with the decrease of the mean wind speed. The classical wind spectrum based on stationary characteristics is not suitable for typhoon simulation.

Keywords nonstationary; load treatment method; typhoon-bridge system; non-uniform modulation function; evolutionary spectrum

(编辑 王志敏)