

基于 AR 法的沿海地区强台风风场模拟研究

章子华, 周易, 诸葛萍

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 台风风场模拟是研究各类高耸构筑物、大跨度桥梁和大型空间结构风致破坏机理的重要基础。基于不随高度变化的台风功率谱、自回归法和竖向相关性简化表达式模拟了沿海地区的强台风风场模型; 得出了给定平均风速条件下, 不同高度处的脉动风风速时程曲线。结果表明, 模拟谱的功率谱密度与目标谱较为一致, 模拟风速可用于结构的风振响应分析。

关键词: 强台风; 高耸结构; 脉动风; 风场模拟; 自回归法

中图分类号: TU359

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0088-04

台风是影响我国沿海及部分内陆地区的主要灾害性天气之一, 具有历时短、强度大、破坏性强的特点。台风登陆后会给沿海地区带来暴雨、大风、风暴潮等, 引发的灾害包括大风造成建筑物的破坏, 强降水引起洪涝, 引发山体滑坡、泥石流等地质灾害。对于电视塔、输电塔、风力发电结构等高耸构筑物以及大跨度桥梁、大型空间结构而言, 由于其柔性较大, 自振频率与脉动风卓越频率接近, 风振效应尤为显著, 在台风作用下更容易发生致命性破坏(图 1)。



电线杆倒塌



输电塔失稳



风电结构塔筒弯折



单柱型广告牌破坏

图 1 台风对高耸结构的破坏

近年来, 登陆我国东南沿海地区的台风呈现

增多增强的态势。2003 年, 台风“杜鹃”登陆广东, 造成汕尾红海湾风电场 25 台风力发电机组中的 13 台损坏, 损失达上千万^[1]。2004 年, 台风“云娜”在浙江省温岭石塘登陆, 台州、温州电网遭到严重破坏, 1 条 500 kV 输电线路导线落地, 5 条 220 kV 输电线路的 13 基塔倒塌, 7 条 110 kV 输电线路倒杆 8 处, 2106 条 10 kV 输电线路倒杆、21532 斜杆^[2]。2006 年, 最大风力达 17 级($68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的超强台风“桑美”造成苍南鹤顶山风电场 28 台风力发电机组全部受损, 其中 5 台倒塌^[3]。由此可见, 台风造成的经济损失严重, 对各类结构尤其是高耸构筑物的生存构成了严重威胁。

为了研究各类结构在台风作用下的动力响应和破坏机理, 需要根据台风特性模拟台风风速时程, 并在此基础上获得风荷载时程。目前, 风速时程的模拟方法主要有谐波叠加法和线性滤波法两类, 且在以往的台风风场模拟和结构风振研究中, 这两种方法均有被采用。例如, 徐旭等^[4]采用不同的台风风速谱, 基于谐波叠加法并引入快速傅里叶变换(FFT)技术, 模拟了与电视塔塔高竖向相关的 43 条脉动风速时程样本。胡雪莲等^[5]利用 AIC 准则确定 AR 模型阶数, 采用 AR 模型模拟了作用于大跨度桥梁的随机风荷载。

笔者采用与高度无关的台风风谱模型, 基于

自回归法和竖向相关性简化表达式, 模拟了沿海地区的强台风风场, 给出不同高度处的风速时程曲线并验证其准确性。

1 风速条件

据中国气象局规定, 热带气旋按中心附近地面最大风速划分为六个等级, 其中易产生大规模破坏的有: (1)台风: 底层中心附近最大平均风速 $32.7 \sim 41.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 即 12~13 级; (2)强台风: 底层中心附近最大平均风速 $41.5 \sim 50.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 即 14~15 级; (3)超强台风: 底层中心附近最大平均风速 $\geq 51.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 即 16 级以上。

据中国气象网资料, 2010~2012 年台风级别以上次数分别为 8、9、15 次。近 5 年对宁波地区影响较大的台风: (1)2009 年台风“莫拉克”, 中心最大风力 12 级; (2)2010 年台风“圆规”, 中心最大风力 13 级; (3)2011 年台风“梅花”, 中心最大风力 16 级; (4)2012 年台风“海葵”, 中心最大风力 11 级; (5)2013 年台风“菲特”, 中心最大风力 14 级。本次研究选取台风级别为强台风, 取 10 m 高度处平均风速 $v_{10} = 41.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行模拟。

2 脉动风功率谱

2.1 Davenport 谱

我国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 和很多国家的建筑标准都采用了 Davenport 沿高度不变的脉动风速谱^[6], 其计算式为:

$$\begin{cases} S_v(f) = 4k v_{10}^{-2} x^2 / (n(1+x^2)^{4/3}), \\ x = 1200n / \bar{v}_{10}, \\ n = \omega / 2\pi, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $S_v(n)$ 为脉动风速功率谱; k 为地面粗糙系数; v_{10} 为该地 10 m 高度处的平均风速; n 为脉动风频率; x 为湍流积分尺度系数。

尽管 Davenport 的脉动风谱是我国规范采用的计算谱, 并且它是根据大量不同地点、不同气候环境的风速统计资料回归得到的, 具有一定的代表性, 但特定地区的台风脉动风速谱与普通脉动风速谱有所区别, 需要根据该地区的台风实测资料拟合合适的台风风谱模型。

2.2 田浦谱

田浦等^[7]提出随高度变化的台风水平风速谱

的经验公式为:

$$\begin{cases} S_v(n, z) = (z/10)^{-0.5\alpha} 4.8k v_{10}^{-2} x / (n(2+x^2)^{7/8}), \\ x = 300nz^\alpha / v_{10}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, $S_v(n, z)$ 为 z 高度处的脉动风速功率谱; z 为离地高度; 其余各项同(1)式。

2.3 石沅谱

石沅等^[8]用计算机拟合给出的不随高度变化的台风水平风速谱经验公式为:

$$S_v(n) = 5.46k v_{10}^{-2} x^{2.4} / (n(1+1.5x^2)^{1.4}), \quad (3)$$

式中各参数同(1)式。

因缺乏实测台风风速资料, 笔者暂采用石沅等提出的基于上海地区实测台风风速的风谱模型。该模型实质上是根据台风特性, 对 Davenport 风谱模型进行了修正。

3 脉动风场模拟方法

自然风可以分为平均风和脉动风两部分。对于承受风荷载的结构而言, 平均风引起静力效应, 而脉动风部分则引起动力放大效应。因此, 脉动风对结构分析更为重要。根据大量实测的风速样本统计可知, 其脉动风部分可用具有零均值的高斯平稳随机过程来模拟, 具有明显的各态遍历性。如前所述, 该随机过程可以采用谐波叠加法、线性滤波法等方法人工模拟。

3.1 谐波叠加法

谐波叠加法基于三角级数求和, 包括 Constant Amplitude Wave Superposition(CAWS)法、Weighted Amplitude Wave(WAWS)等。Shinozuka 等^[9]提出用 WAWS 法模拟平稳随机场的基本理论, 解决多变量均匀高斯随机过程:

$$u_j(t) = \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jk}(\omega_l)| \sqrt{2\Delta\omega} \cdot$$

$$\cos(\omega_l t + \phi_{kl} + \theta(\omega_l)), j=1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

式中, $H_{ik}(\omega_l)$ 为互功率谱密度矩阵 $S(\omega_l)$ 的 Cholesky 分解矩阵 $H(\omega_l)$ 中的元素, ϕ_{kl} 为两个不同作用点之间的相位角, θ_{ik} 为介于 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机数, m 为模拟的点数。

谐波叠加法虽然是一个模拟随机风场的有效方法, 但当模拟点数较多时, 该方法叠加计算量大、精度差、效率低、耗费大量机时; 而在计算中综合快速傅里叶变换(FFT)技术可大大提高该方法

的计算效率^[10].

3.2 线性滤波法

线性滤波法基于线性滤波技术, 还包括自回归法(Auto Regressive, AR)、滑动平均法(Moving Average, MA)、自回归滑动平均法(Auto Regressive Moving Average, ARMA)等. AR 法可考虑各个模拟点的空间相关性, 但 AR 法并不能像 WAWS 法一样无条件收敛, 时间步太小会降低计算精度^[11].

空间中 M 个点相关脉动风速时程 $V(X, Y, Z, t)$ 列向量的 AR 模型可表示为:

$$V(X, Y, Z, t) = -\sum_{k=1}^p \Psi_k V(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t), \quad (4)$$

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_m]$; (x_i, y_i, z_i) 为空间点 i 的坐标, $i = 1 \sim m$; p 为 AR 模型阶数; Δt 为模拟时程风速步长; Ψ_k 为 AR 模型自回归系数矩阵; $k = 1 \sim p$; $N(t)$ 为均值为零且具有给定协方差的正态分布随机过程向量:

$$N(t) = L \cdot n(t), \quad (5)$$

式中, $n(t) = [n_1(t), \dots, n_m(t)]^T$, $n(t)$ 为均值为 0 且方差为 1, 彼此相互独立的正态随机过程, $j = 1 \sim p$; L 为 m 阶下三角矩阵, 通过 $m \times m$ 协方差矩阵 R_N 的 Cholesky 分解确定.

4 空间相关系数

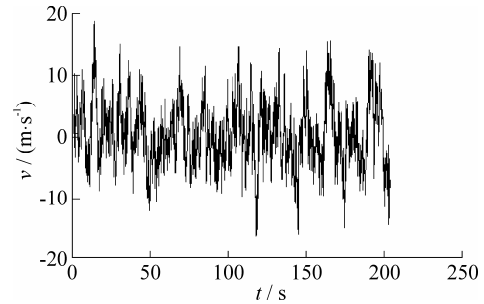
强风观测表明, 空间上各点的风速和风向并不是同步的, 当某点达到最大风速时, 离该点的距离越远, 则同时承受该风速的概率就越小. 脉动风的空间相关性主要包括侧向左右相关和竖向上下相关, 必要时还应包括前后相关. 对于高耸结构而言, 在空间上竖向相关性较为显著, 水平相关性不明显, 笔者采用 Shiotani 等^[12]提出的脉动风空间相关性简化表达式: $\rho_{ij}(z_i, z_j) = \exp(-|z_i - z_j|/L_z)$, 其中, 根据试验统计分析可取 $L_z = 60$.

不同空间点的脉动风风速功率谱密度之间存在如下关系: $S_{ij} = \sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)}\rho_{ij}$, 式中, $S_{ii}(\omega)$ 、 $S_{jj}(\omega)$ 为点 i 和点 j 的脉动风自功率谱; S_{ij} 为点 i 和点 j 的互功率谱密度; ρ_{ij} 为点 i 和点 j 的相关性系数.

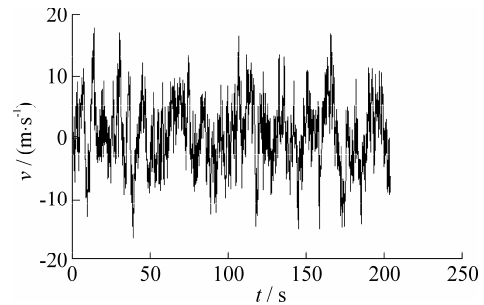
5 脉动风谱的生成和验证

根据上述理论, 基于 MATLAB 平台编制程序生成具有竖向相关性的不同高度处的脉动风速时

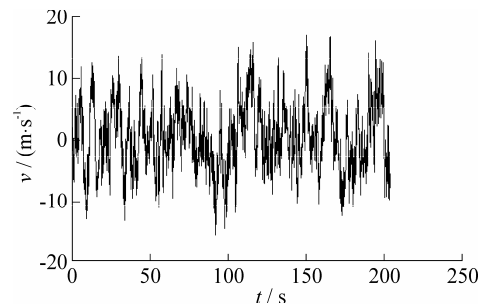
程曲线. 其中, 取自回归阶数 $p = 4$, 模拟空间点数为 7, 高度 $h = 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65$ m. 时间步长 $\Delta t = 0.1$ s, 地面粗糙度系数 $k = 0.00215$. 限于篇幅, 仅给出 15 m、35 m 和 55 m 高度处的模拟台风脉动风时程曲线(图 2(a)~(c)).



(a) 15 m 高度处脉动风速时程



(b) 35 m 高度处脉动风速时程



(c) 55 m 高度处脉动风速时程

图 2 不同高度处模拟脉动风速时程

由图可见, 在当前的模拟条件下, 不同高度点的最大风速在不同时刻出现. 脉动风速在 $-20 \sim 20$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间波动, 呈现高斯平稳随机过程的特性. 根据风速风压关系, 考虑脉动风速后, 动风荷载可达平均风引起的静风荷载的 2 倍以上.

为验证模拟风谱的准确性, 可取不同高度处的模拟风谱和目标风谱((3)式)的功率谱密度进行比较. 以 55 m 高度处为例, 其模拟功率谱和目标功率谱如图 3 所示. 由图可知, 在整个模拟频域范围内, 模拟功率谱与目标功率谱基本吻合, 说明本方

法获得的模拟谱的能量分布与实际风谱基本一致。

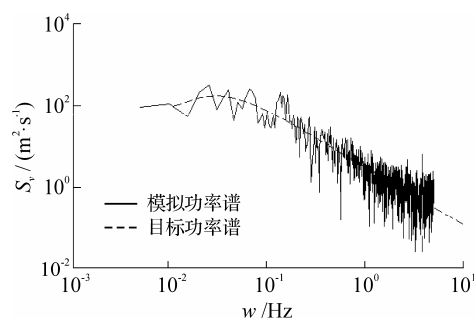


图3 55 m 处模拟脉动风功率谱与目标功率谱的比较

6 结论与建议

采用不随高度变化的台风脉动风谱模型, 基于线性滤波法和简化的竖向相关性表达式, 模拟了沿海地区强台风风场模型, 给出了不同高度处的台风脉动风速时程曲线, 并通过功率谱密度函数验证了模拟风谱的准确性。

本文工作为进一步研究各类结构, 尤其是输电塔、风力发电结构等高耸构筑物在强台风作用下的动力响应以及风致破坏奠定了重要基础。

需要指出的是, 由于各地地貌差异, 台风风谱模型存在一定的地区性, 亟需在获得实测台风资料的基础上, 拟合适本地区的台风风谱模型用于结构风工程研究。

参考文献:

- [1] 王景全, 陈政清. 试析海上风机在强台风下叶片受损风险与对策——考察红海湾风电场的启示[J]. 中国工

程科学, 2010, 11:32-34.

- [2] 龚坚刚. “云娜”台风对浙江输电线路的危害分析与对策[J]. 浙江电力, 2005(3):17-19.
- [3] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探[J]. 风能, 2012(5):74-79.
- [4] 徐旭, 刘玉. 基于台风风谱的电视塔风场数值模拟[J]. 特种结构, 2008, 25(2):39-43.
- [5] 胡雪莲, 李正良, 晏致涛. 大跨度桥梁结构风荷载模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005(3):63-67.
- [6] Feng M Q, Zhang Ruichong. Wind-induced vibration characteristics of Nanjing TV tower[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 1997, 32(4):693-706.
- [7] 田浦. 台风风谱的研究[C]. 第三届全国结构风效应学术会议论文集, 1988.
- [8] 石沅, 陆威, 钟严. 上海地区台风结构特征研究[C]. 第二届全国结构风效应学术会议论文集, 1988.
- [9] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random process and its application[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25(1):111-128.
- [10] Yang W W, Chang T Y P, Chang C C. An efficient wind field simulation technique for bridge[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 697-708.
- [11] 沈国辉, 黄俏俏, 郭勇等. 脉动风场的模拟方法及其在输电线路风振计算中的应用[J]. 空气动力学报, 2012, 31(1):69-74.
- [12] Shiotani M, Iwatani Y. Correlations of wind velocities in relation to the gusting loadings[C]. Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971:57-67.

Simulation: Coastal Strong Typhoon Wind Field Based on AR Method

ZHANG Zi-hua, ZHOU Yi, ZHUGE Ping

(Faculty of Architecture, Civil Engineering and Environmental, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Simulation of typhoon is an important pre-step for the wind-induced failure analysis for a variety of large-size constructions such as tall buildings, large-span bridges, and large-space structures. A power spectrum density (PSD) model of typhoon with constant altitude, the auto-regressive method and a simplified expression of vertical correlation are concurrently simulated and employed to model the strong typhoon wind field in coastal area. Giving an average wind speed, the fluctuating wind speed at different heights is simulated. Results show that the PSD of the simulated spectrum is well in agreement with that of the target spectrum. The proposed simulated wind speed is expected to use for predicting the structural wind-induced responses.

Key words: strong typhoon; high-rise structure; fluctuating wind; wind field simulation; auto-regressive method

(责任编辑 章践立)