中国科学: 技术科学 2010 年 第 40 卷 第 12 期: 1409 ~ 1419
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

澳门友谊大桥“鹦鹉”台风的湍流特性实测和分析

宋丽莉[①*], 庞加斌[②], 蒋承霖[③], 黄浩辉[③], 秦鹏[③]

① 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;
② 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804;
③ 广东省气候中心, 广州 510080
* E-mail: llsong@grmc.gov.cn

收稿日期: 2010-04-01; 接受日期: 2010-07-15
国家自然科学基金(批准号: 90715031, 40775071)资助项目

摘要 为了探索、了解登陆台风强风过程的湍流特性和空间相关特性, 利用设置在澳门友谊大桥主跨桥中相距 30 m 的两台三维超声测风仪实测的“鹦鹉”台风过程数据, 在数据可靠性、代表性判别基础上, 采用谱分析、数值模拟和统计等方法, 重点分析了“鹦鹉”台风过程的强风时段的平均风速和风向特征、湍流强度、湍流积分尺度、湍流功率能谱、空间相关系数和相干函数等. 实测数据分析发现: (1) 同步观测的两台测风仪获取的台风过程平均和湍流风特性变化均具有很好的一致性, 台风的过程风速呈“M”型双峰分布, 大于 8 级强风的风向转换了 122°方位角; (2) 台风眼壁强风区纵、横和垂直向湍流强度之比为 1∶0.96∶0.36, 与规范推荐的 1∶0.88∶0.5 相比, 横向湍强更大, 垂直向湍强较小; (3) 台风眼壁强风区积分尺度增大, “鹦鹉”表现在其中心经过前的强风区湍流积分尺度是非台风风况的 2 倍左右; (4) 脉动风空间相关性、相干函数曲线和衰减系数在台风过程的不同时刻存在显著差异, 台风眼壁强风区水平向脉动风的空间相关性较强, 水平空间相关谱随频率的衰减速度较慢, 相干函数的衰减拟合系数 C 值最小为4.67, 小于规范下限值; 台风中心经过时刻衰减系数最大为 27.75, 也较规范给出的上限值大. 上述“鹦鹉”的强风特征参数, 部分地表征了台风强风的湍流和空间相关特性.

关键词
台风
实测分析
湍流特性
湍流空间相关

1 引言

台风是强度较强的热带气旋, 是影响我国近海和沿海地区建筑结构最主要的致灾天气现象, 在亚洲地区尤其是印度、中国和孟加拉国受灾最多[1], 随着经济的高速发展, 沿海地区不断兴建各种大型复杂的建筑结构, 如大型场馆、高耸楼宇和超大跨度桥梁等, 对风环境和风的作用更为敏感, 风因子甚至成为各种复杂工程结构的关键控制性因素. 因此, 摸清台风在近地边界层的湍流特性对复杂结构的设计至关重要, 也是评估结构抗风的安全性和计算风荷载, 准确模拟包括台风在内的自然风特性是结构抗风设计的基本课题[2].

自然风总是呈现出剧烈的随机脉动, 这种随机性表现为在一定时间尺度内复杂的湍流脉动, 以及相应的风特性参数随机变化[3]. 为了准确地模拟这样复杂的随机特性, 世界上许多国家和地区根据当地气候特征、地形条件等因素, 通过大量的实测研究建立风特性的模型, 制定相应的规范, 例如美国 ASCE、加拿大 NBCC、英国 BSI、澳洲 SAA、欧洲

引用格式: Song L L, Pang J B, Jiang C L, et al. Field measurement and analysis of turbulence coherence for Typhoon Nuri at Macao Friendship Bridge. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 2647–2657, doi: 10.1007/s11431-010-4084-3

EuroCode 和 ESDU、日本 JS 等[4]; 而且在特大跨度桥梁工程中, 工程师们专门安装风观测系统, 有针对性地对当地的湍流特性, 尤其是风谱和湍流空间相关特性进行深入研究, 例如丹麦大海带跨海大桥工程的湍流实测和空间相关性研究[5], 日本跨海大桥上的风的相关性实测研究[6], 香港青马大桥上的湍流实时监测系统及相关研究工作等[7]. 所有这些研究都希望能够采集到具有代表性的台风样本, 然而, 由于台风登陆点和路径具有很强的随机性, 要获取其中心附近的强风数据并不容易, 当缺乏足够的实测数据支撑时, 工程计算只能倾向于采用简便的风特性规范推荐的方法和参数[8], 或者借助数值模拟手段去模拟目标风谱特征[9,10]. 国内的结构工程师和气象学研究者在近些年来逐步开展类似的观测工作, 并积累了一定的台风数据和研究成果[11], 但是类似于欧洲、日本和香港等学者[4~7]曾经开展的多点同步观测的相关性研究工作仍然比较少.

本文利用设置在澳门友谊大桥上的台风风场空间相关观测系统成功采集到的 2008 年登陆该地区的“鹦鹉”台风过程的脉动风数据, 分析了该台风过程的平均风况和湍流风特征, 特别对沿桥轴线方向设置的相距 30 m 的 2 个测站的脉动风速进行了相关性分析, 以期为风工程规范研究和工程结构设计应用提供参考.

2 实测方案和台风过程

2.1 观测位置和仪器

台风风场空间相关观测系统设置在澳门友谊大桥主桥跨中, 友谊大桥是连接澳门半岛和氹仔岛的跨海大桥, 全长 4700 m, 桥面高度 35 m, 桥宽 18 m. 利用桥上面向外海的水平间距 30 m 的 2 个相邻灯柱, 设置 2 台超声风速仪, 三维超声风速仪器型号为 Gill-WindMaster Pro, 风速仪离桥面高度 8 m, 分别以 A, B 表示 2 个测站. 桥轴线方向南北走向, A 站位于南侧, B 站位于北侧, A 站比 B 站更靠近桥塔, 如图 1 所示.

WindMaster Pro 超声风速仪最大采样频率 32 Hz (实测取 10 Hz), 最大测量风速 65 m/s, 测量精度 0.1%. 工作温度范围–40~70℃, 相对湿度范围 5%~100%. 风速仪安装朝向正北, 即北风对应零度风向角, 风向角顺时针增大.

2.2 台风过程实测概况

0812 号台风“鹦鹉”(英文名 NURI)于 2008 年 8 月 18 日上午 8 时生成于菲律宾东部洋面, 22 日下午 4 时 55 分在香港西贡沿海地区登陆, 登陆时中心气压 975 hPa, 22 日 19 时减弱为强热带风暴, 并于 22 日 22 时 10 分在中山南蓢镇再次登陆, 登陆时气压 985 hPa. “鹦鹉”台风的“眼区”直径达 100 km, 眼区内部风力小[12], 外围风力大, 形成空心台风结构. 在离台风中心 28 km 的深圳南澳自动气象站录得最大阵风 42 m/s (相当于 14 级), 在离台风中心 25 km 的珠海桂山岛自动气象站录得最大阵风 41.4 m/s. 设置在澳门友谊大桥的台风风场空间相关观测系统距离台风中心的最近距离约 35 km, 实测到的最大 10 min 平均风速为 19.5 m/s, (0.1 s 时距)最大阵风 41.0 m/s.

台风“鹦鹉”从澳门友谊大桥东侧经过, 如图 2 所示, 台风中心最接近大桥所在地的时间大约在 22 日 10 时, 观测位置距离台风中心的最短距离约 35 km. 分析数据选择了 22 日 6 时 00 分至 23 日 10 时 50 分约 29 h 的台风过程数据, 按照 10 min 划分样本, 有效样本数共 173 个, 样本按照时间顺序编号, 每增加一个编号表示距离起始时间间隔增大 10 min.

3 数据处理和分析方法

3.1 无效数据和野点数据处理

由于台风过程常伴有强降水, 降水对超声波类观测仪的数据可靠性可能造成影响. 本文采用的超声风速仪能够自动判别由于降水影响而产生的无效数据, 在选取计算样本时, 首先根据超声风速仪的数据判别码, 剔除无效数据, 然后采用文献[13,14]的方法剔除数据样本中的其他野点(因电源不稳定和其他不明原因造成的可疑数据), 然后用线性插值法进行插补[13,14].

对“鹦鹉”台风过程数据, 取多个样本进行分析, 根据风工程分析要求, 样本长度取为 10 min, 每个样本包含 6000 组数据, 本文进行湍流功率谱分析时选定样本的无效数据小于 10 s, 即有效数据大于 98%, 其他脉动参数计算选取的样本有效数据大于 90%.

3.2 平均风速和脉动风速样本数据

如果实测三维风速 $u_x(t)$, $u_y(t)$和 $u_z(t)$是定义在超声风速仪坐标下的 3 个实数序列, 以 10 min 为基本时距分析, 则水平平均风速 U 和风向角 Φ 分别为[15,16]

$$U=\sqrt{\overline{u_x(t)}^2+\overline{u_y(t)}^2}, \tag{1a}$$

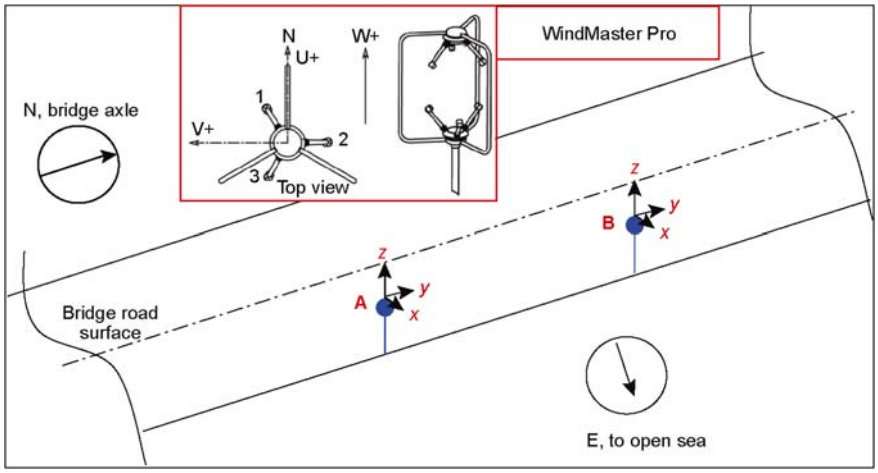

图 1　澳门友谊大桥风观测方案示意图

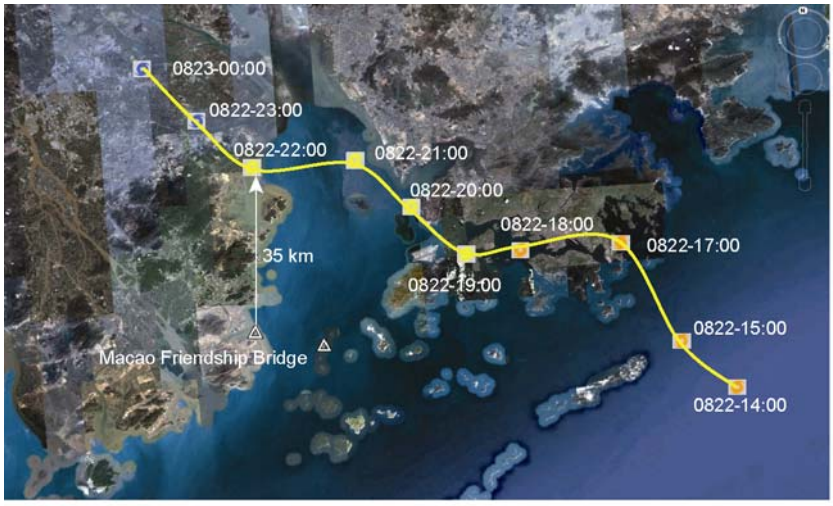

图 2　台风“鹦鹉”路径图

$$\cos\Phi = \frac{\overline{u_x(t)}}{U}. \tag{1b}$$

垂直风速方向与风速仪坐标 z 轴相同, 因此垂直平均风速 W 为

$$W = \overline{u_z(t)}, \tag{1c}$$

其中, $\overline{u_x(t)}$, $\overline{u_y(t)}$ 和 $\overline{u_z(t)}$ 分别表示 10 min 时距样本的三维风速平均值.

在 10 min 时距内, 纵向脉动风速分量 $u(t)$, 横向脉动风速分量 $v(t)$和垂直脉动风速 $w(t)$可根据以下公式计算, 结果作为脉动风速统计分析的数据基础.

$$u(t) = u_x(t)\cos\Phi + u_y(t)\sin\Phi - U, \tag{2a}$$

$$v(t) = -u_x(t)\sin\Phi + u_y(t)\cos\Phi, \tag{2b}$$

$$w(t) = u_z(t) - W. \tag{2c}$$

3.3　湍流度

湍流度反映了风的脉动强度, 是确定结构脉动风荷载的关键参数, 定义湍流度为 10 min 时距的脉动风速均方根与水平平均风速的比值

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U}, \quad (i=u,v,w), \tag{3}$$

其中, σ_i分别表示对应于脉动风速 $u(t)$, $v(t)$和 $w(t)$的均方根, σ_i^2 相当于湍流脉动风速在 i 方向上的动能.

3.4 湍流度积分尺度

湍流积分尺度的定义和计算根据Taylor冷冻假设[15,16]

$$L_i = U\int_0^{\tau_{0.05}} r_i(\tau)\mathrm{d}\tau,\ \ (i=u,v,w), \tag{4}$$

其中, L_i, r_i 分别表示 u, v 和 w 分量的积分长度和自相关系数, $\tau_{0.05}$ 表示自相关系数从 1 单调减小至 0.05 时对应的延迟时间.

3.5 湍流功率谱密度

湍流功率谱密度函数的工程模型有很多表达形式, 我国桥梁抗风设计规范采用了用摩阻速度归一化的 Simiu 谱和 Panofsky 谱, 根据 Simiu 谱和能量归一化原理, 应当存在 $\sigma_u^2 = 6u_*^2$ [8]. 从大气边界层理论分析, 摩阻速度只有在接近地面有限高度(约 30 m)内基本为常数, 而且前提条件是“纯机械湍流”, 即浮力的作用可以忽略[3]. 桥梁结构高度一般超过 30 m, 因此不宜用摩阻速度无量纲化湍流功率谱密度函数模型. 从表达“脉动能量”的角度出发, 功率谱密度函数在全频段的积分等于脉动风速能量的总合, 用脉动风速的方差对湍流功率谱密度归一化更合适, Simiu 谱和 Panofsky 谱的脉动速度方差无量纲化形式[2],

Simiu 谱: $$\frac{nS_{u,v}(f)}{\sigma_{u,v}^2} = \frac{200f}{6(1+50f)^{5/3}}, \tag{5a}$$

Panofsky 谱: $$\frac{nS_w(f)}{\sigma_w^2} = \frac{4f}{(1+4f)^2}, \tag{5b}$$

其中, $S_{u,v,w}$ 分别为 3 个脉动分量的功率谱密度函数, f 为莫宁坐标, 定义为 $f=nZ/U$, σ_u 和 σ_w 分别表示脉动风速 $u(t)$ 和 $w(t)$ 对应于 U 的均方根, n 为频率, Z 为高度.

3.6 相关系数

在空间两点存在一定的相关性, 空间相关性有 2 种数学描述方法: 相关系数和相干函数. 前者从统计平均的角度评估湍流参数在空间上的关联程度, 后者以频域分析的方式描述湍流过程在不同尺度上的相关性. 设两测站的坐标 $\boldsymbol{r}_A=(x_A, y_A, z_A)$ 和 $\boldsymbol{r}_B=(x_B, y_B, z_B)$, 对应速度测量信号 $\boldsymbol{u}_A=[u_A(x_A, y_A, z_A, t), v_A(x_A, y_A, z_A, t), w_A(x_A, y_A, z_A, t)]$ 和 $\boldsymbol{u}_B=[u_B(x_B, y_B, z_B, t), v_B(x_B, y_B, z_B, t), w_B(x_B, y_B, z_B, t)]$, 相关系数的定义如下

$$\rho_{x_A x_B} = \frac{E[x_A x_B]}{\{E[x_A x_A]E[x_B x_B]\}^{1/2}}, \tag{6}$$

其中, x 用 u, v, w 替代分别对应 3 个方向的脉动速度分量, $E[\cdot]$ 为系综平均运算符[17].

3.7 相干函数

空间相干函数的定义为

$$\mathrm{Coh}_{x_A x_B}(n) = \frac{\hat{S}_{x_A x_B}(n)\cdot \hat{S}^*_{x_A x_B}(n)}{S_{x_A}(n)\cdot S_{x_B}(n)}. \tag{7a}$$

同(6)式一样, 其中 x 用 u, v, w 替代分别对应 3 个方向的脉动速度分量, $\hat{S}_{u_1u_2}(n)$ 表示 $u_A(x_A, y_A, z_A, t)$ 和 $u_B(x_B, y_B, z_B, t)$ 的互谱, $S_{u_1}(n)$ 和 $S_{u_2}(n)$ 分别表示 $u_A(x_A, y_A, z_A, t)$ 和 $u_B(x_B, y_B, z_B, t)$ 的自功率谱函数, 以此类推.

相关函数随着频率增大而衰减, 通常用指数衰减函数表示

$$\mathrm{Coh}_{x_A x_B}(n, D) = \exp\left[-\frac{C_x nD}{\pi U}\right], \tag{7b}$$

这里 D 表示空间两测点之间的距离, C_x 为衰减系数, $x=u, v, w$. 对于结构抗风计算而言, 关键要求给出公式(7b)的衰减系数, 我国《桥梁抗风设计指南》中参考国外强台风湍流相关性研究的结果, 建议 C = 7~21[8].

4 台风的湍流特性实测分析

4.1 台风测风数据的代表性判别

台风属于中尺度大气涡旋系统, 由其核心、眼壁强风区直至外围环流的剖面上, 风场的三维结构和风的湍流特性显著不同, 这些不同反映在平均风速和风向的变化上以及在较小时间和空间尺度上的湍流特性参数变化, 如湍流度、积分尺度和功率谱特性等在台风中心区(或称眼区)、眼壁强风区和外围环流区的变化特征差异显著[11]. 由于结构工程抗风主要关注台风眼壁强风区的风特性, 因此需要对获取的观测数据是否能够代表台风眼壁强风特征进行判别.

根据台风特有的涡旋结构特点, 判断台风核心强风区域是否经过观测点的条件为同时满足以下两点: 一是观测点获取的台风强风风向角应出现大幅度的转换; 二是台风过程的风速时程曲线呈“M”型变化, 即强风出现双峰型分布, 双峰之间的底部(为台风眼区)出现小于 11 m/s(5 级)的风速, 即可以判断为台风眼区[12]. 依据上述判别条件, 对本次“鹦鹉”台风的观测数据进行代表性判别.

图 3 给出了澳门友谊大桥观测系统 A, B 两测站

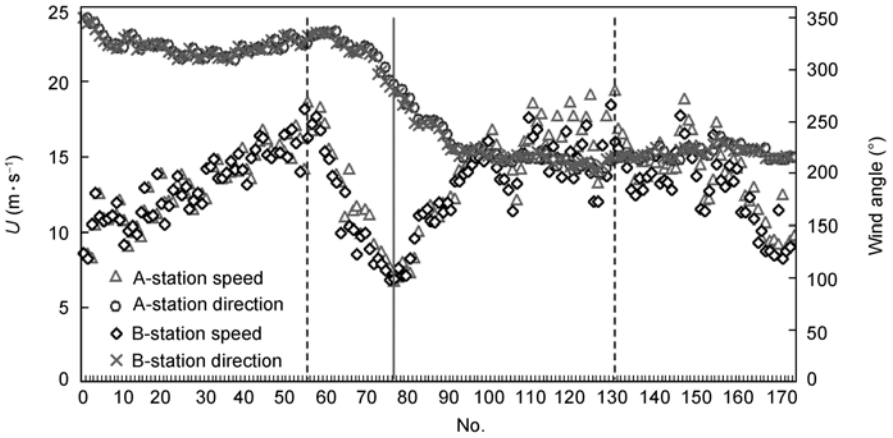

图 3　A, B 两站获取的“鹦鹉”台风过程的平均风速和风向

获取的“鹦鹉”台风 10 min 平均风速和风向的时程变化过程, 图 3 中的两条点划竖线表示台风中心经过测站之前和之后最大风速出现的时间, 实竖线为台风中心风速最小的时间, 也是台风中心经过的时刻.

图 3 显示, A, B 两站测量的“鹦鹉”台风过程 10 min 平均风速大于 8 级(17.2 m/s)强风的风向转换了 122°方位角; 过程风速时程曲线呈“M”型双峰分布, 在双峰之间的底部(眼区)风速小于 7 m/s, 因此, 可以认为, 澳门友谊大桥观测系统获取的“鹦鹉”台风数据包含了台风中心和台风眼壁强风区风数据, 能够代表台风特有的强风特性.

4.2　平均风速和风向

从图 3 可以看出, A, B 两站测量的风速、风向一致性很强, 台风登陆前和登陆后最大风速以及台风中心最小风速在 2 个测站均出现在同一时刻.

在台风过程风速时程变化的双峰型分布中, 前一个风速峰值出现在台风中心经过观测点之前, 风向为西北向, 10 min 平均风速最大值为 18.7 m/s, 0.1 s 极大风速为 35.2 m/s; 后一个风速峰值出现在台风中心经过观测点之后, 风向转为西南向, 风速最大值为 19.4 m/s, 0.1 s 极大风速为 41.0 m/s. 整个台风过程的最大风速和极大风速均出现在台风中心经过之后的西南风向中.

台风中心小风期(风速小于 11 m/s)持续时间长达 120 min, 属眼区较大的台风个例, 观测点获取的台风中心区最小风速 6.7 m/s.

台风过程的大风(10 min 平均风速大于 17.2 m/s)风向由登陆前的 337°, 沿逆时针方向转为登陆后的 215°, 风向转换幅度达 122°.

4.3　湍流度

图 4 给出“鹦鹉”台风经过 A, B 测站在纵向、横向和垂直向三维方向的湍流强度变化过程. 可以看出, 纵、横和垂直向湍强的过程变化一致性很好, 最大值均出现在台风中心(点划竖线)附近, 但由于中心区风速小, 因此一般不会给结构造成损坏; 工程关注的眼壁强风区(实竖线附近)湍强: 纵向为 0.18、横向为 0.16、垂直向为 0.06.

图 4 显示, A, B 两站在纵、横和垂直向的湍流变化趋势基本一致, B 站在台风中心经过之后的湍强值比 A 站略大, 这种差异可能来自仪器所在位置附近的桥体结构影响.

三维方向的湍流强度之间存在较好的相关性, 图 5 为两测站大风时段(10 min 平均风速大于 17.2 m/s)的横向和垂直方向湍流强度相对纵向湍流强度的相关图, 其中, 横向湍流强度与纵向的比值为 0.93, 垂直向湍流强度与纵向的比值为 0.36, 三维方向在大风时段的湍流强度之比为 I_u:I_v:I_w = 1:0.96:0.36, 与规范给出的 1:0.88:0.5 相比, 横向湍强更大, 垂直向湍强较小.

4.4　湍流积分尺度

图 6 是“鹦鹉”台风 A, B 测站纵、横、垂直向湍流积分尺度变化过程. 可以看出, 2 个测站的积分尺度变化趋势基本一致, A 站值略大于 B 站值.

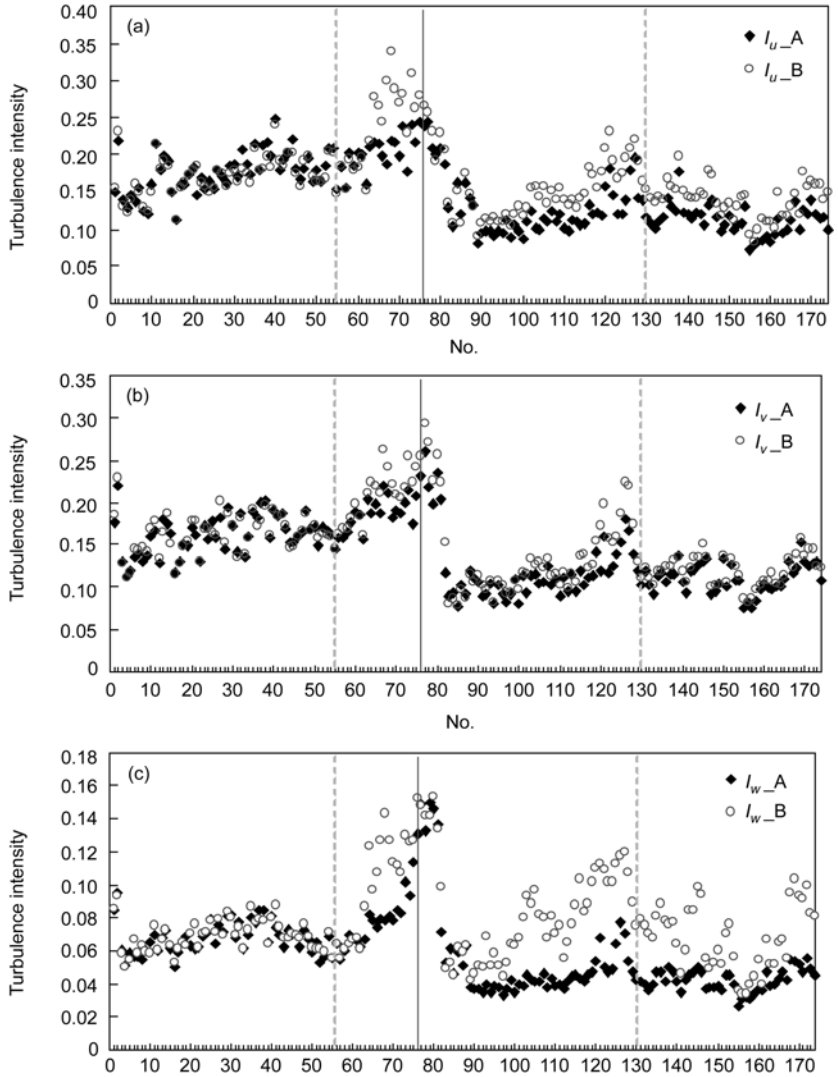

图 4 “鹦鹉”台风过程在 A, B 测站三维方向的湍流强度变化

(a) “鹦鹉”台风过程在 A, B 测站纵向湍流强度变化; (b) “鹦鹉”台风过程在 A, B 测站横向湍流强度变化; (c) “鹦鹉”台风过程在 A, B 测站垂直向湍流强度变化

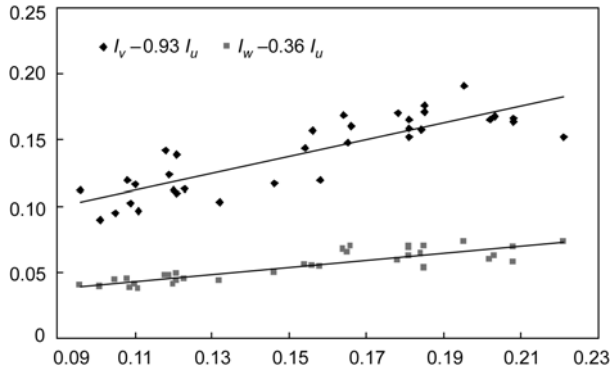

图 5 A, B 站“鹦鹉”强风时段横向和垂直向湍流强度相对纵向值的线性相关图

图 6(c)显示垂直向尺度在 15 m 左右小幅变动, 而图 6(a)和(b)给出的纵、横向湍流积分尺度变化过程均显示出在台风眼壁强风区(10 min 平均风速大于 17.2 m/s)积分尺度明显增大, 尤其在台风中心经过前的强风区增大更为明显, 其中 A 站纵、横向平均尺度分别为 162 和 152 m, B 站纵、横向平均尺度分别为 139 和 74 m, 是非台风风况积分尺度的 2 倍左右; 在台风中心经过后的强风区, A 站纵、横向平均尺度仍较大分别为 161 和 133 m, B 站明显减小, 分别为 76 和 36 m, 基本恢复到非台风风况的尺度.

湍流积分尺度数值很不稳定, 这主要因为公式(4)

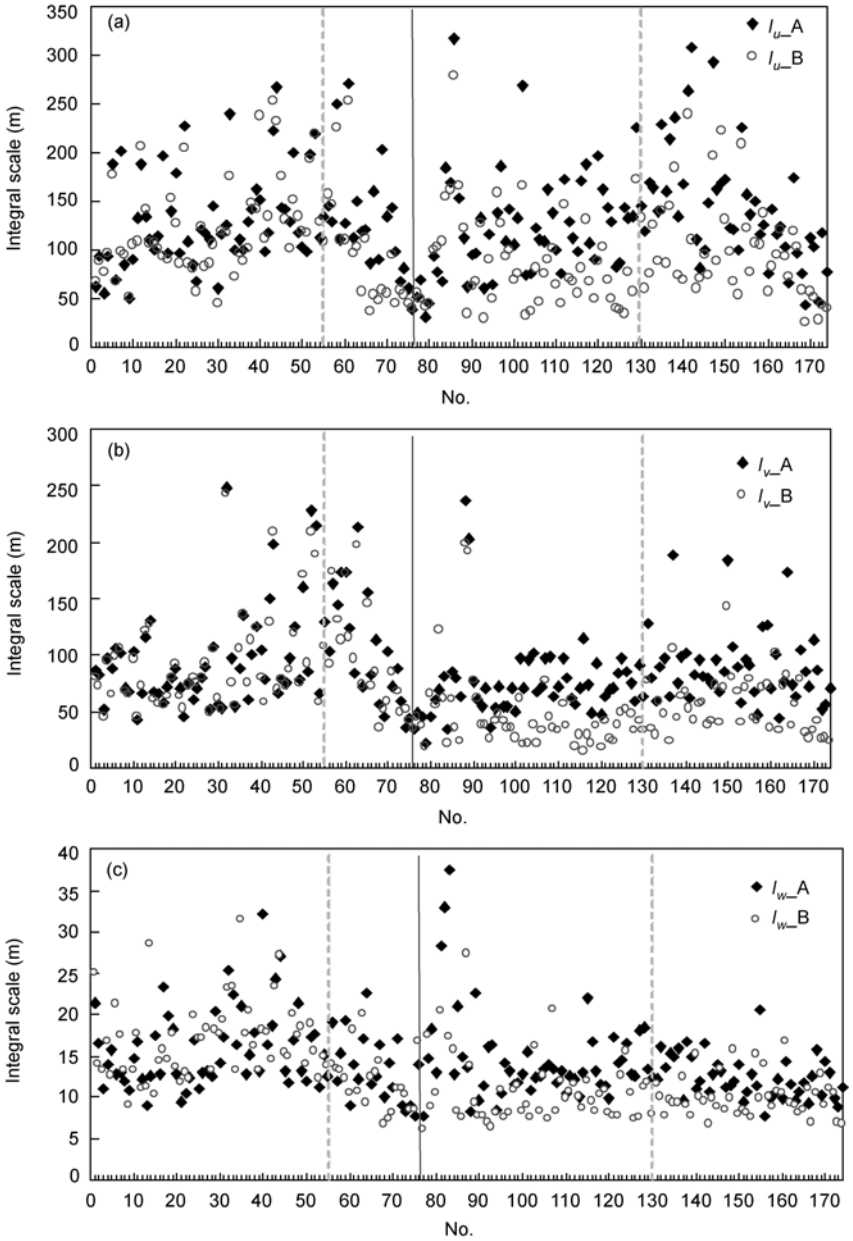

图 6　"鹦鹉"台风过程在 A, B 测站三维方向的湍流积分尺度变化

(a) A, B 测站纵向湍流积分尺度变化; (b) A, B 测站横向湍流积分尺度变化; (c) A, B 测站垂直向湍流积分尺度变化

包含"Taylor 假设"适用于均匀平稳的纯机械湍流, 而台风眼壁区湍流呈不均匀和非平稳特性[11], 因而计算得出的积分尺度参数在此只能定性地参考.

4.5　空间相关系数

图 7 显示 A, B 测点之间的脉动风速相关系数随台风过程的演变. 可以看出, 垂直向相关系数远小于纵、横向; 在台风中心经过前的风速相关性大于台风中心经过之后, 台风中心的风速空间相关性明显减弱.

在中心经过之前的台风眼壁强风(10 min 平均风速大于 17.2 m/s)时段, 纵、横和垂直向相关系数达到最大, 分别为 0.77, 0.7, 0.09; 在中心经过之后的强风时段相关系数明显小于前者, 分别为 0.53, 0.45, 0.03.

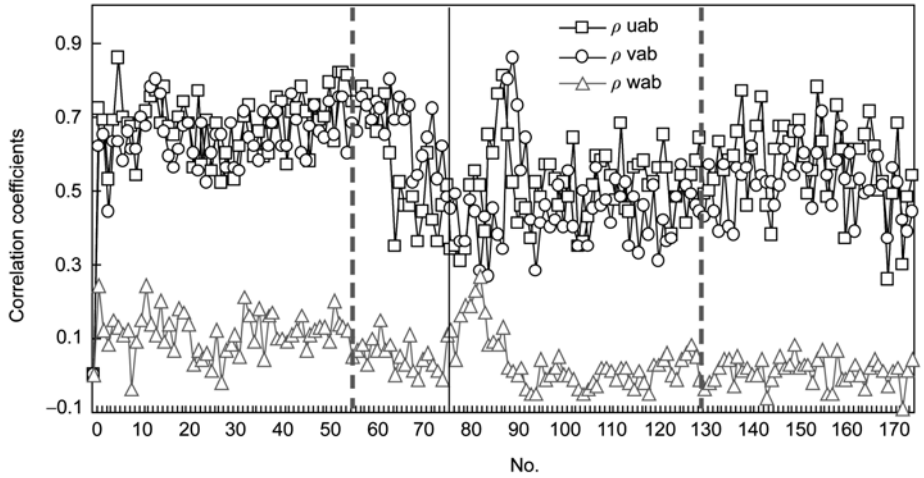

图 7　台风过程的脉动风速 A, B 站之间的相关系数

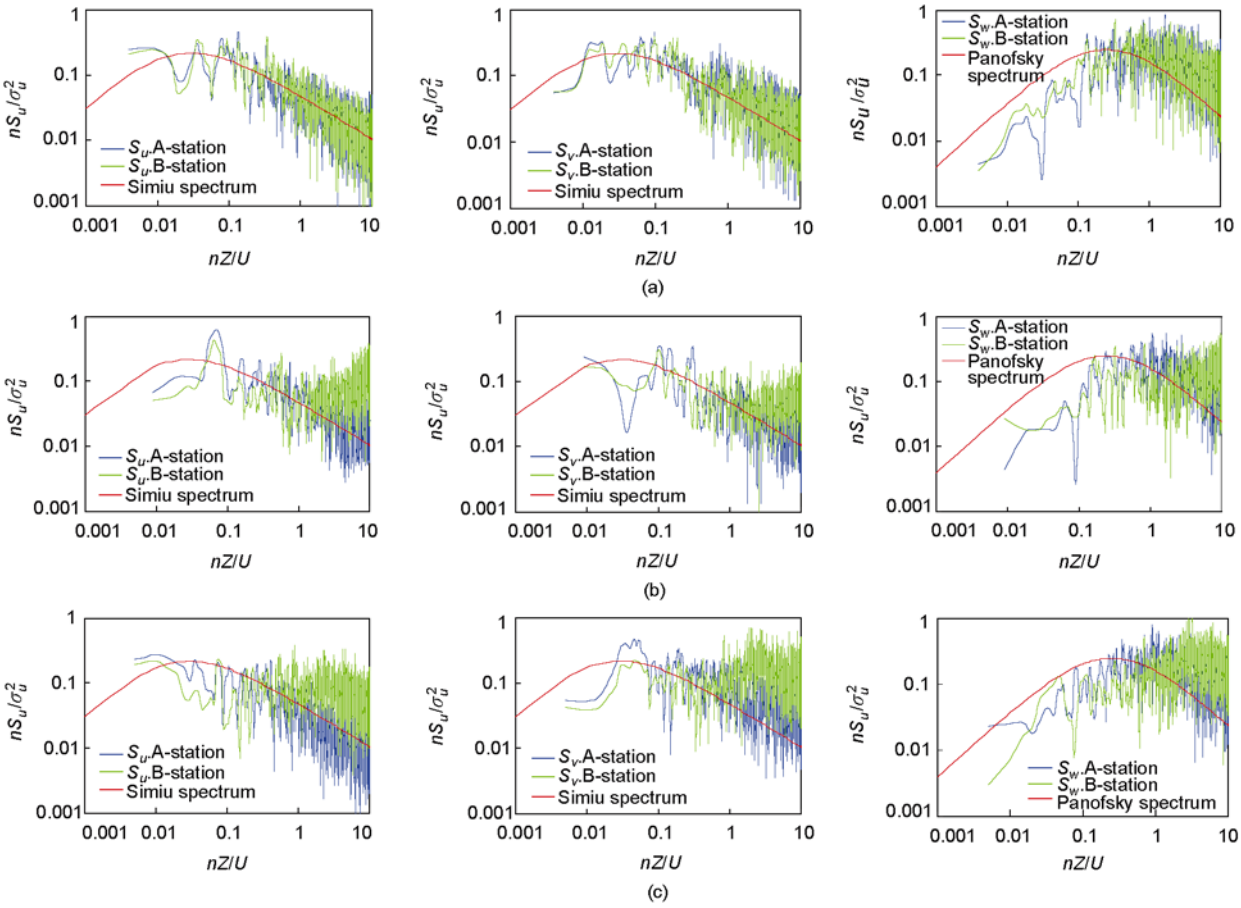

图 8　台风过程 3 个关键时刻的湍流功率谱密度函数曲线

(a) “鹦鹉”台风中心经过之前的强风时段(22 日 15:00)三维方向的湍流风谱; (b) “鹦鹉”台风中心经过时刻(22 日 18:30)三维方向的湍流风谱; (c) “鹦鹉”台风中心经过之后的强风时段(23 日 03:30) 三维方向的湍流谱

初步分析认为, 风来向的下垫面粗糙度影响应是产生上述差异的主要因素之一, 从图 2 可以看出, 台风中心经过之前的强风来自偏北方向的海面, 粗糙度较小, 中心经过之后的强风来自西南方向的海岛陆地, 粗糙度较大, 粗糙的下垫面对气流有较强的动力强迫作用, 可以使原本较“有组织”的气流发生强烈扰动或紊乱, 从而破坏了气流的“有组织”特性.

4.6　功率谱密度和相干函数

在结构抗风分析中, 直接应用于荷载分析计算的湍流模型需要脉动风速的功率谱函数, 既有单个位置的脉动风速自谱, 即功率谱密度函数[公式(5a), (5b)], 也有空间两点上脉动风速的互相关谱, 常称之为相干函数[公式(7a), (7b)].

图 8 为台风中心经过前、后的强风时段和台风中心经过等 3 个关键时刻的湍流功率谱密度函数实测曲线. 可以看出, A, B 站在台风中心经过之前的强风时段, 湍流谱具有很强的一致性, 在台风中心和中心经过之后的强风时段, 两站在中、低频的湍流谱较一致, 高频段出现差异, 这一特征与其空间相关性特征相似. 台风“鹦鹉”的 3 个关键时刻在观测点产生的湍流谱分布型态与规范推荐的 Simiu 谱(水平向)和 Panofsky(垂直向)还是比较接近的, 但是台风过程不同时刻的低频段能量分布有较明显的区别, 台风中心经过时刻与强风时段相比, 低频的湍流能量显著减小. 这与台风特有的涡旋结构风场特征是一致的.

相干函数曲线在台风过程的不同时段同样存在差异, 如图 9 所示, 台风中心经过前的强风时段, 湍流的空间相关性随频率的衰减速度明显慢于其他时刻, 而台风中心经过时, 空间相关性最弱, 此时湍流的空间相关性随频率的衰减速度最快.

图 10 显示了“鹦鹉”台风过程的相干衰减系数演变过程, 实测拟合的衰减系数 C_{uv} 从台风外围环流影响时即开始减小, 至台风中心经过前的强风时段达到最小值 4.67, 比规范值的下限 7 小 2.33, 衰减系数 C_{uv} 值在台风中心经过时段达到最大值 27.75, 较规范值的上限 21 大 6.75; 台风中心经过后的强风时段的

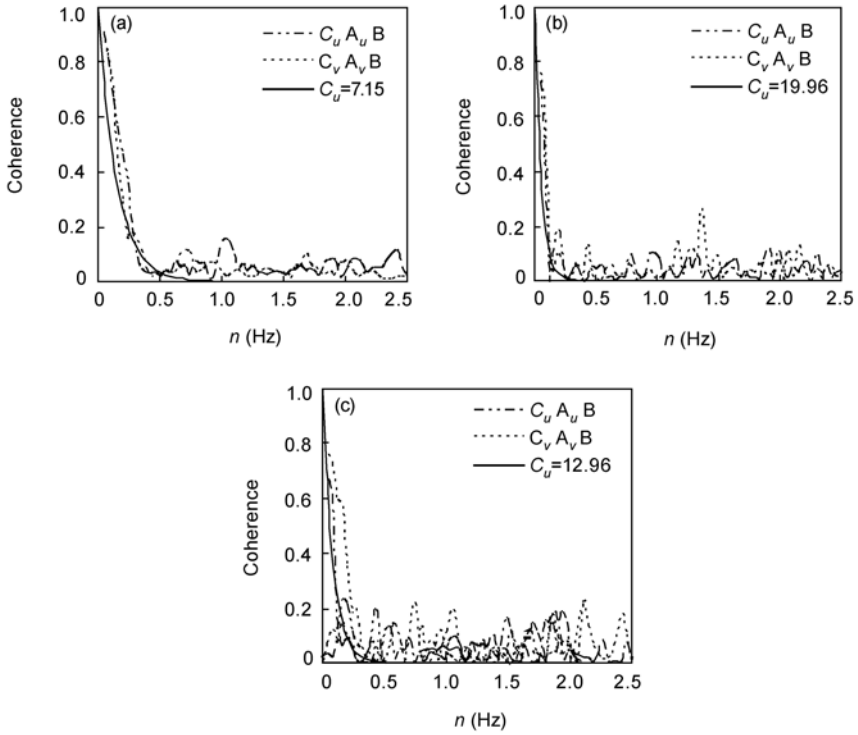

图 9　台风过程 3 个关键时刻的湍流相干函数曲线

(a) 22 日 15:00(中心经过前的强风); (b) 22 日 18:30 (台风中心弱风); (c) 23 日 03:30(中心经过后的强风)

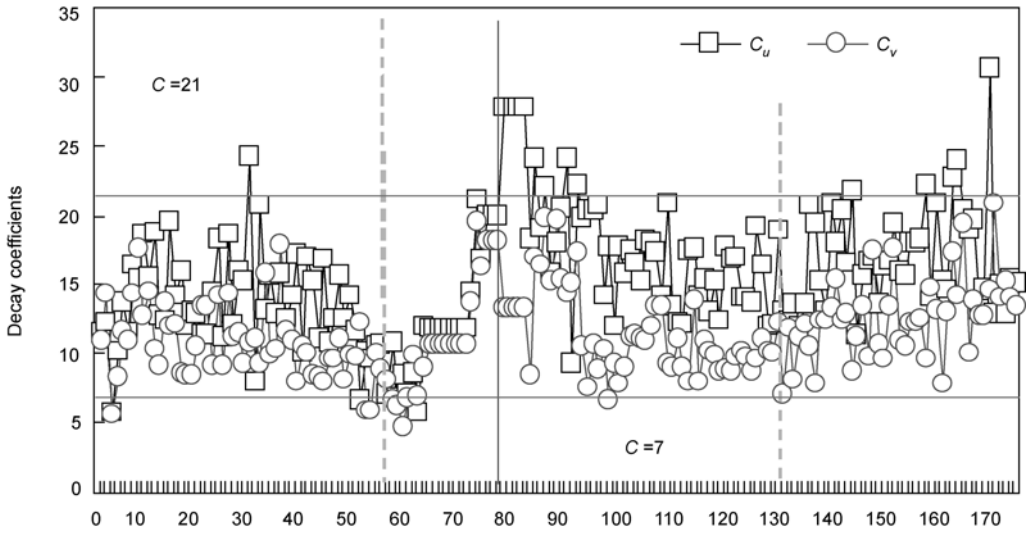

图 10　水平相干函数的衰减系数实测拟合值

衰减系数 C_{uv} 也呈减小特征, 但减小的幅度要小得多, 其最低值仍在规范限定的数值范围内.

5　小结和讨论

利用设置在澳门友谊大桥主桥跨中相距 30 m 的两台三维超声测风仪实测的“鹦鹉”台风过程, 根据台风涡旋环流特点和风速、风向过程变化特征, 判断所获取的数据可以代表该台风包括眼壁强风、中心以及外围风况的全过程. 分析“鹦鹉”台风过程的湍流特性和空间相关特性, 小结如下.

1) 从本观测系统获取的“鹦鹉”台风的平均风速、风向以及湍流强度、积分尺度等湍流风参数均具有很好的一致性这一观测事实可以说明, 即使在台风这样的剧烈天气系统中, 至少在 30 m 水平尺度内, 风的脉动场仍具有较强的组织性.

2) 在该场地观测的“鹦鹉”台风其三维方向湍流强度之比 I_u:I_v:I_w=1:0.96:0.36, 比规范给出的 1:0.88:0.5 的横向湍强更大, 垂直向湍强较小. 因此, 工程抗风要重视台风眼壁强风区出现的横向湍强较大的现象, 这与台风的涡旋环流特征是一致的.

3) 虽然台风湍流各向异性的特征使的基于 Taylor 冻结假设前提下的湍流积分尺度计算结果很不稳定, 但是仍可以看出台风的不同位置积分尺度的显著变化, 台风眼壁强风区积分尺度显著增大, “鹦鹉”在该观测点表现出其中心经过前的强风区湍流积分尺度是非台风风况的 2 倍左右.

4) 水平向脉动风的空间相关性、相干函数曲线和衰减系数在台风过程的不同时刻存在显著差异. 在台风眼壁强风时段, 水平向的脉动风具有较强的空间相关性、水平空间相关谱随频率的衰减速度也最慢, 而在台风中心出现与之相反的特点; “鹦鹉”台风实测值拟合的衰减系数在台风中心经过前的强风时段达到最小值 4.67, 超越了规范下限值; 台风中心经过时刻衰减系数达到最大为 27.75, 也较规范给出的上限值大. 因此, 尤其对于大跨和超长的柔性结构应特别关注台风强风作用下的脉动风特有的空间相关特性.

综上分析, 工程抗风设计应当关注工程所在区域特有的下垫面条件下, 台风过程不同时刻的风特性变化, 其中台风中心附近的眼壁强风区的特征参数最为关键, 因为伴随强风影响的平均或湍流特征参数对结构的风荷载响应也可能较高; 本文分析的“鹦鹉”台风个例是在澳门友谊大桥这种特定下垫面条件下观测的一个台风个例, 并且该台风尚不是影响该地区最强的个例, 因此上述计算分析给出的风特征参数只能说明此次台风影响产生的某些重要的或与常态风不同的特征, 其数值大小、变幅和分布的普遍特性等还需获取更多、更具有强台风特点的个例去进一步验证.

参考文献

1 Scheuren J M, Le Polain de Waroux O, Below R, et al. The Numbers and Trends, Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Annual Disaster Statistical Review, 2008

2 Simiu E, Scanlan R H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996

3 Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric Turbulence—Models and Methods for Engineering Applications. New York: John Wiley & Sons, 1984

4 Liu H. Wind Engineering: A Handbook for Structural Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991

5 Mann J, Kristensen L, Courtney M S. The Great Belt Coherence Experiment—A Study of Atmospheric Turbulence over Water. Roskilde: Riso National Laboratory, 1991

6 Toriumi R, Katsuchi H, Furuya N. A study on spatial correlation of natural wind. J Wind Eng Indus Aerodyn, 2000, 87: 203—216

7 Zhu L D. Buffeting Response of Long-span Cable-supported Bridges under Skew Winds: Field Measurement and Analysis. Dissertation of Doctral Degree. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2002. 571

8 项海帆, 林志兴, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁抗风设计指南. 北京: 人民交通出版社, 1996

9 周志勇, 项海帆, 陈艾荣. 变量 ARMA 模型与大跨结构随机风场的数值仿真. 自然科学进展, 2001,11: 631—634

10 张斌, 金东范, 卢天健. 非均质材料凝固过程分析——理论和实验. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 206—213

11 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等. 登陆台风近地层湍流特性观测研究. 气象学报, 2005, 63, 6: 915—921

12 陈瑞闪. 台风. 福建: 福建科学技术出版社, 2002. 12

13 陈红岩, 胡非, 曾庆存. 理时间序列提高计算湍流通量的精度. 气候与环境研究, 2000, 5: 304—311

14 卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 青藏高原南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究. 应用气象学报, 2001, 12: 1—13

15 Xu Y L, Zhan S. Field measurements of Diwang Tower during typhoon York. J Wind Eng Ind Aerodyn, 2001, 89: 73—93

16 Kaimal J C, Finigan J J. Atmospheric Boundary Layer Flows. Oxford: Oxford University Press, 1994

17 Pang J B, Ge Y J, Lu Y. Analysis methods for integral length of turbulence. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Advances in Wind and Structures. Korea: Techno-Press, 2002, 8: 185—192