

随机风场空间相干性研究

阎 启¹, 李 杰^{1,2}

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 提出了一种描述随机风场空间相干特性的相位差谱模型, 可用于大范围随机风场模拟. 经典理论中一般采用相干函数来描述空间风场相干特性. 研究发现, 相干函数只是二阶数值特征, 远不能描述两点脉动风速相干特性的丰富概率信息. 研究表明, Fourier 相位差谱可以对脉动风速时程的相干特性进行全面的描述. 基于对影响相位差主要因素的分析, 提出了相位差谱的基本模型. 通过与实测相位差谱的比较, 验证了所提模型的合理性与适用性. 应用该模型进行了风场模拟, 效果良好.

关键词: 随机风场; 空间相干性; 相位差谱; 相干函数; 风场模拟

中图分类号: TU 973.213

文献标识码: A

Research on Spatial Coherence of Stochastic Wind Field

YAN Qi¹, LI Jie^{1,2}

(1. Department of Building Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents a phase-delay spectrum model to describe the spatial coherence of stochastic wind field which can be used in large-scale stochastic wind field simulation. Coherence function is usually adopted to describe the spatial coherence in classic theory. It is found that coherence function is only second-order numerical characteristics and is far from describing the abundant probabilistic information of coherence of fluctuating wind speed. This study shows that Fourier phase-delay spectrum can give a comprehensive description of the coherence of fluctuating wind speed. Based on the analysis of primary factors affecting phase-delay, a basic model of phase-delay spectrum is presented. By a comparison with the measured phase-delay spectrum, the rationality and applicability of the

model are verified. Finally, wind field simulation with this model obtains a good effect.

Key words: stochastic wind field; spatial coherence; phase-delay spectrum; coherence function; wind field simulation

风场相干性指两点风速时程在频域上的统计相关性, 通常用量纲为一的相干函数描述. Davenport 于 1961 年提出了著名的相干函数指数衰减模型^[1], 这一模型被沿用至今并被广泛采用^[2]. 指数衰减模型使用方便, 但存在固有的问题, 即: 在零频率时取值始终为 1, 当所考虑两点距离较远时这与实测值不符^[2]. Harris 根据 von Karman 的理论推导了各向同性湍流当中两点脉动时程的相干函数^[3]. Maeda 等认为 Harris 模型可以很好地描述实测脉动风速的相干函数, 但由于其中需要用到第二类 Bessel 函数等, 对于工程师来说使用不方便, 因此基于 Harris 模型提出了简化公式^[4]. Krenk 提出了改进的指数衰减函数^[5], 具有使用方便、在整个频率范围都可以对实测数据进行较好拟合的特点.

相干函数是空间风场结构的重要表述方式, 在风场模拟当中, 无论是谱表现方法还是线性滤波方法都需要用到相干函数^[6]. 但是, 由于相干函数是两点风速互谱密度幅值与自谱密度幅值的比值^[7], 因此它在本质上属于二阶矩统计特征, 无法体现两点风速时程在频域内更加本质的概率联系.

本文研究发现: Fourier 相位谱的异同是造成两点脉动风速时程相似而又不同的根本原因, 也是决定两点脉动风速时程相干性的决定性因素. 由此, 引入了 Fourier 相位差谱的概念. 通过推导, 得到了相位差谱与相干函数之间的联系, 初步建立了相位差谱的经验模型. 通过与实测数据的对比, 验证了该模

收稿日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(50621062); 国家自然科学基金项目(50508026, 50778135)

第一作者: 阎 启(1982—), 男, 博士, 主要研究方向为结构风荷载. E-mail: sevenyan_tj@126.com

通讯作者: 李 杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构可靠度以及生命线工程等. E-mail: lijie@tongji.edu.cn

型的合理性和适用性.最后,应用该模型进行了风场模拟.

1 相位差谱与相干函数的关系

1.1 相干函数的定义

两段主风向脉动风速时程 u_x 和 u_y 的相干函数 γ_u 定义为

$$\gamma_u(n) = \frac{|S_{xy}(n)|}{\sqrt{S_{xx}(n)} \sqrt{S_{yy}(n)}} \quad (1)$$

式中: S_{xy} 为 u_x 和 u_y 的互功率谱密度; S_{xx} 和 S_{yy} 分别为 u_x 和 u_y 的自功率谱密度; n 为自然频率.

Davenport 提出了相干函数的指数模型^[1]

$$\gamma_u(r_h, r_v, n) = \exp\left[-\frac{n}{U} \sqrt{(C_h r_h)^2 + (C_v r_v)^2}\right] \quad (2)$$

其中: C_h 和 C_v 分别为水平方向和竖直方向量纲为一的衰减系数; r_h 和 r_v 为两点间的水平风向距离和竖直距离.当频率为零时,该模型的值总是 1.事实上,当 r_h 和 r_v 较大时,这一结论与实测相干函数有较大差别.虽然 Harris, Maeda 和 Krenk 等学者提出了更为合理的相干函数模型^[3-5],但 Davenport 的指数衰减模型以其简单的形式得到了更多的应用.

1.2 相干函数的数值计算方法

由周期图法计算脉动风速谱密度的方法如下^[7]:将脉动风速时程 $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 分为 N 段: $u_{x1}(t), \dots, u_{xN}(t)$ 和 $u_{y1}(t), \dots, u_{yN}(t)$, 每段 D 个点;采样频率为 F_s , 则采样间隔 $\Delta t = 1/F_s$, 每段持时 $T = D/F_s$; 计算每段脉动风速时程的离散 Fourier 变换 $F_{x1}(n), \dots, F_{xN}(n)$ 和 $F_{y1}(n), \dots, F_{yN}(n)$, 即

$$\begin{aligned} F_{xj}(n) &= \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=1}^D u_{xj}(k/F_s) e^{-i2\pi(k-1)(nT-1)\Delta t} \Delta t \\ j &= 1, 2, \dots, N \\ F_{yj}(n) &= \frac{1}{\sqrt{T}} \sum_{k=1}^D u_{yj}(k/F_s) e^{-i2\pi(k-1)(nT-1)\Delta t} \Delta t \\ j &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

如果取单边谱,需要再乘以 $\sqrt{2}$.

自谱的计算公式为

$$\begin{aligned} S_{xx}(n) &= \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} F_{xj}(n) F_{xj}^*(n) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} |F_{xj}(n)|^2 \\ &= E[|F_{xj}(n)|^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{yy}(n) &= \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} F_{yj}(n) F_{yj}^*(n) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} |F_{yj}(n)|^2 \\ &= E[|F_{yj}(n)|^2] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $E[\]$ 表示求期望.

互谱的计算公式为

$$\begin{aligned} S_{xy}(n) &= \sum_{j=1}^N \frac{1}{N} F_{xj}(n) F_{yj}^*(n) = \\ &= E[F_{xj}(n) F_{yj}^*(n)] \end{aligned} \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(1),即得到相干函数的数值计算公式

$$\gamma_u(n) = \frac{|E[F_{xj}(n) F_{yj}^*(n)]|}{\sqrt{E[|F_{xj}(n)|^2]} \sqrt{E[|F_{yj}(n)|^2]}} \quad (6)$$

1.3 相干函数和 Fourier 谱的关系

式(3)所示的离散 Fourier 变换得到的一组复数谱可以表示为幅值和相位的形式

$$\begin{aligned} F_{xj}(n) &= |F_{xj}(n)| e^{i\phi_{xj}(n)} \\ F_{yj}(n) &= |F_{yj}(n)| e^{i\phi_{yj}(n)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $|F_{xj}(n)|$ 和 $|F_{yj}(n)|$ 为 Fourier 幅值谱; $\phi_{xj}(n)$ 和 $\phi_{yj}(n)$ 为 Fourier 相位谱. Fourier 谱的共轭谱可表示为

$$F_{yj}^*(n) = |F_{yj}(n)| e^{-i\phi_{yj}(n)} \quad (8)$$

结合式(7)和式(8),式(5)中互谱的计算转换为

$$\begin{aligned} S_{xy}(n) &= E[F_{xj}(n) F_{yj}^*(n)] = E[|F_{xj}(n)| \cdot \\ &\cdot |F_{yj}(n)| e^{i[\phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n)]}] \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6),得到

$$\gamma_u(n) = \frac{|E[|F_{xj}(n)| |F_{yj}(n)| e^{i[\phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n)]}]|}{\sqrt{E[|F_{xj}(n)|^2]} \sqrt{E[|F_{yj}(n)|^2]}} \quad (10)$$

定义

$$\Delta\phi_j(n) = \phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n) \quad (11)$$

为两点的相位差谱.

假设 $|F_{xj}(n)|$ 和 $|F_{yj}(n)|$ 与 $\Delta\phi_j(n)$ 在各频率点处为相互独立的随机变量,则式(10)可简化为

$$\begin{aligned} \gamma_u(n) &= \frac{|E[e^{i\Delta\phi_j(n)}]|}{\sqrt{1 + \frac{D^2[|F_{xj}(n)|]}{E^2[|F_{xj}(n)|]}}} \sqrt{1 + \frac{D^2[|F_{yj}(n)|]}{E^2[|F_{yj}(n)|]}} \\ &= |E[\cos(\Delta\phi_j(n))]| \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $D[\]$ 表示求标准差. 实测 Fourier 谱显示,标准差谱大小约为均值谱的 10%~30%,因此,式(12)的分母约为 1.01~1.09. 因此,可将式(12)简化为

$$\gamma_u(n) = |E[e^{i\Delta\phi_j(n)}]| = |E[\cos(\Delta\phi_j(n))]|$$

$$i \sin(\Delta \phi_j(n)) \Big| \tag{13}$$

该简化引入的误差在 10% 以内。
式(13)表明, 相干函数上是由相位差谱所决定的。本质上, 两点脉动风速时程之间差别与联系的决定性因素是其相位差谱。

若定义记录脉动风速时程 u_y 的点为基准位置, 则可称 $\phi_{yy}(n)$ 为基准相位谱。此时若知道 x 点关于 y 点的相位差谱 $\Delta \phi_j(n)$, 便可由式(11)得到空间任意 x 点的脉动风速时程相位谱。结合脉动风速 Fourier 幅值谱^[8], 代入式(7), 进行逆 Fourier 变换, 就可以得到重建的脉动风速时程。由之, 可以构造空间风场。

定义相位差谱 $\Delta \phi(n)$ 的取值范围为 $[0, \infty]$, 同时规定相位差谱主值 $\Delta \phi_m(n)$ 定义在区间 $[0, 2\pi]$ 内且始终为正, 如图 1 所示。任意相位差谱可以通过对 2π 求余而转化到主值区间中。

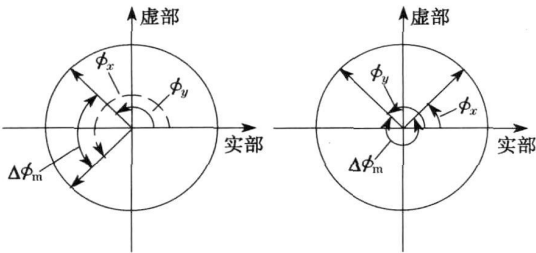


图 1 相位差主值的定义
Fig. 1 Definition of main value of phase delay

2 相位差谱模型

2.1 影响相位差谱的主要因素

既有的研究表明, 影响一段风速时程波形的主要因素为其 Fourier 相位谱^[9], 而 Fourier 幅值谱虽然影响能量分布, 但对波形不起主导控制作用。对于同时采集的风速时程, 距离越近的两点, 其波形的相似程度越高, 反之亦然。由此可以判断, 距离较近两点风速时程的 Fourier 相位谱的相近程度要比较远两点 Fourier 相位谱的相近程度高。换句话说, 对于如式(11)所定义的相位差谱, 距离较近两点风速的相位差应较小。
事实上, 详细分析可知, 影响相位差谱的主要因素如下: ①自然频率 n , 随 n 增大相位差增大; ②两点距离 r_h 和 r_v , 随距离增大相位差增大; ③平均风速 \bar{U} , 随风速增大相位差减小; ④剪切率 $d\bar{U}/dz$, 随剪切率增大相位差增大。其中, 前 3 个因素在相干函数指

数衰减模型中也有所考虑, 而本文则进一步考虑了剪切率的影响。事实上, 高空中的气流受到地面剪切的影响较小, 更为接近各向同性湍流; 越接近地面, 气流受到地面的剪切作用越强, 受到的“干扰”越大。 r_h 或 r_v 相同的空间两点, 距离地面较近时风速的波形会比处于高空时差别更大。因此, 将主流的剪切率作为相位差谱的影响因素考虑进来是合理的。

2.2 相位差谱模型

4 种影响相位差的因素都应该体现在相位差谱的模型当中。相位差本身量纲为一, 可通过对上述影响因素进行量纲组合来表示相位差谱。考虑相位差随 4 个参数的变化规律, 平均风速应放在分母的位置, 其余 3 个参数应放在分子位置。频率的量纲 $[T^{-1}]$ 与距离的量纲 $[L]$ 组合后, 等于速度的量纲 $[LT^{-1}]$ 。由于自然频率 n 和剪切率 $d\bar{U}/dz$ 都具有频率的量纲并都在组合模型中分子的位置, 因此其乘积需要再开方。根据这样的分析, 推荐采用式(14)和式(15)表示相位差谱, 即

$$\Delta \phi_h(n) = \beta_h r_h \left[n \frac{d\bar{U}}{dz} \right]^{0.5} / \bar{U} \tag{14}$$

$$\Delta \phi_v(n) = \beta_v r_v \left[n \frac{d\bar{U}}{dz} \right]^{0.5} / \bar{U} \tag{15}$$

其中: β_h 和 β_v 分别为水平和竖直相位差放大系数。通过调整 β_h 和 β_v , 可以得到不同大小的相位差谱。

式(14)和式(15)各代表一簇相位差谱, 基本变量为平均风速 \bar{U} 和地面粗糙度 z_0 。众所周知, 风剖面反对数律公式为

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \tag{16}$$

将式(16)对高度 z 求导便可得到时距内的主流剪切率

$$\frac{d\bar{U}(z)}{dz} = \frac{u_*}{\kappa z} \tag{17}$$

在应用式(14)和式(15)时, \bar{U} 和 $d\bar{U}(z)/dz$ 可取所研究两点风速及剪切率的平均值。

2.3 模型的验证

2.3.1 基本随机变量的概率分布

基本随机变量的概率分布需要由实测来统计。2006 年, 在华东某地建立了国内第一个强风观测台阵。台阵由 240 m 范围内 P_1 至 P_4 四基观测塔组成, P_1 位于一基输电塔上, 在其竖向可以不间断的同时采集 10, 20, 28 以及 43 m 高度处的风速记录; P_2 , P_3 和 P_4 为三基自立式测风塔, 在其 10 m 和 20 m 高度

处各安装一台三维超声风速仪^[10-11]. 采样频率均为 10 Hz. 风速仪的具体位置见图 2.

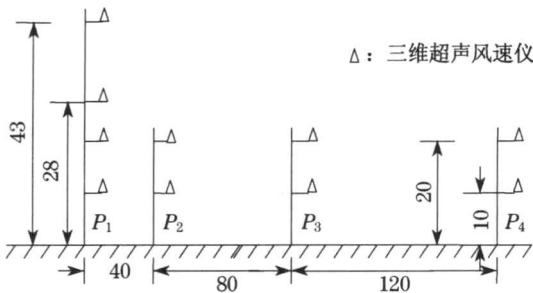


图 2 风速仪安装位置示意图(单位: m)

Fig. 2 Layout of anemometers' position (unit: m)

应用 200 组同时采集于 P_1 点 4 个高度处的 10 min 风速时程, 可以识别地面粗糙度 z_0 , 统计 10 m 高度处平均风速 $\bar{U}(10)$ 的概率分布. 通过拟合, 发现地面粗糙度 z_0 取为对数正态分布, 10 min 平均风速 $\bar{U}(10)$ 取为极值 I 型分布时, 与统计结果符合最好^[8]. 统计得到的参数如表 1 所示.

表 1 基本随机变量概率分布参数

Tab. 1 Parameters of the probability distribution of the basic random variables

变量	z_0		$\bar{U}(10)$	
	μ	σ	α	β
取值	-1.215 5	1.005 2	5.174 6	0.747 5

地面粗糙度 z_0 的对数正态分布概率密度函数为

$$p_{z_0}(x) = \frac{1}{x \sigma_{z_0} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_{z_0})^2}{2\sigma_{z_0}^2}\right)$$

(18)

式中, 参数 μ_{z_0} 和 σ_{z_0} 分别为实测地面粗糙度的对数均值和对数标准差.

10 m 高度处 10 min 平均风速的极值 I 型分布

概率密度函数为

$$p_{\bar{U}}(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{(x - \alpha)}{\beta}\right) \times \exp\left(-\exp\left(-\frac{(x - \alpha)}{\beta}\right)\right)$$

(19)

式中: α 为位置参数; β 为尺度参数. α 和 β 与实测风速数据的均值 $\mu_{\bar{U}}$ 和标准差 $\sigma_{\bar{U}}$ 之间存在关系

$$\beta = \sigma_{\bar{U}} \sqrt{6/\pi}$$

(20)

$$\alpha = \mu_{\bar{U}} - \gamma\beta$$

(21)

式中, γ 为常数, 约为 0.577 2.

2.3.2 竖向模型的验证

根据表 1 的参数, 等概率的选取 z_0 和 $\bar{U}(10)$ 各 20 个样本值. 等概率选取是指将概率分布函数[0, 1] 范围均匀划分为 20 个区间, 取各个区间中点对应的样本值. 为能够与实测数据进行对比, 以 10 m 高度处为基准点, 考虑高度 20, 28 和 43 m, 代入式(15)共可得 3 簇模型相位差谱, 每簇 400 条. 调整相位差放大系数 β 后, 典型的相位差谱及主值如图 3 所示.

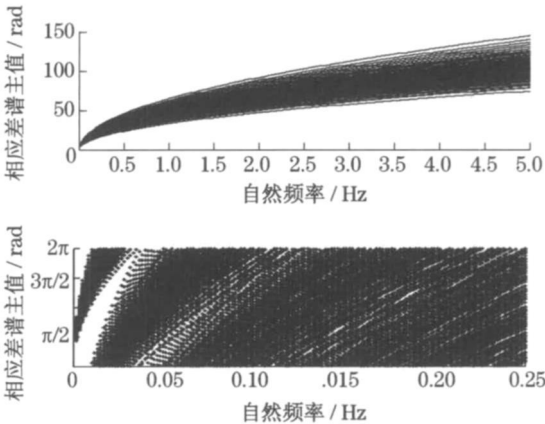


图 3 10 m 与 20 m 高度模型相位差谱及主值

Fig. 3 Phase delay spectrum model and its main value on position of 10 m and 20 m

应用所得相位差谱, 可由式(13)计算出相干函数, 与实测相干函数的比较如图 4 所示.

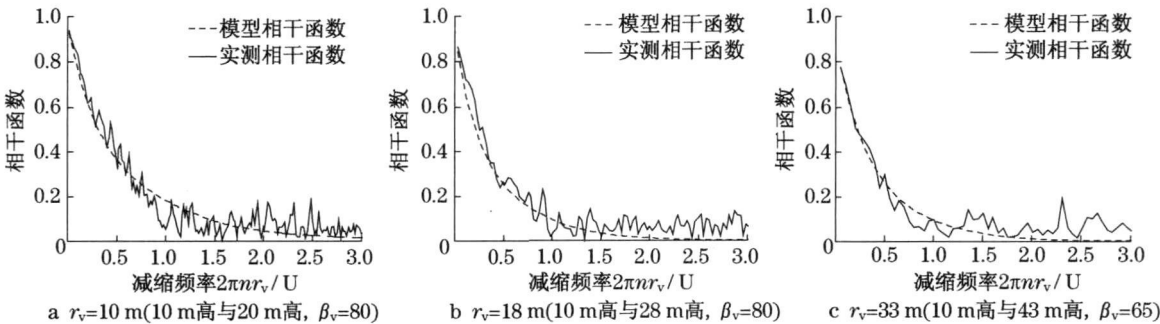


图 4 竖向实测相干函数与模型相干函数的对比

Fig. 4 Comparison of the vertical coherence function between model and measurements

可以看到, 通过调整相位差放大系数 β , 由式 (13) 得到的模型相干函数与实测相干函数符合良好.

分析可知, 式 (13) 仅表示了相位差谱复指数值在复平面内均值意义上的统计特征. 可用式 (22) 进一步定义相位差谱复指数值的标准差谱

$$\hat{\sigma}_a(n) = |D[e^{i(\phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n))}]| = |D[\cos(\phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n)) + i \sin(\phi_{xj}(n) - \phi_{yj}(n))]| \quad (22)$$

其中, $D[\]$ 表示求标准差. 图 5 对比了理论模型与实测数据的标准差谱.

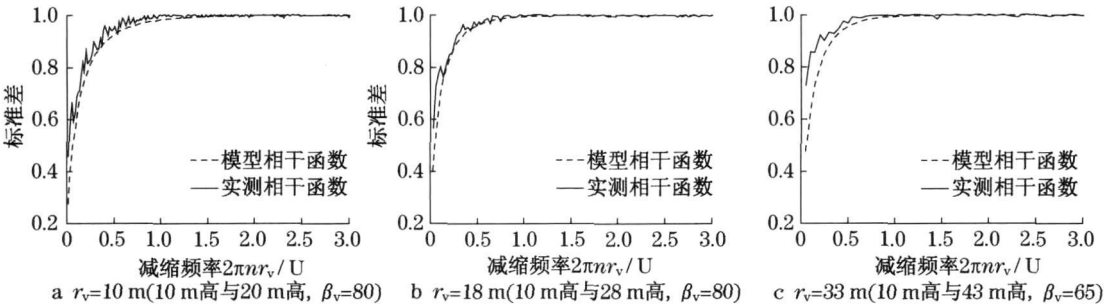


图 5 竖向实测标准差谱与模型标准差谱的对比

Fig. 5 Comparison of the vertical standard-deviation spectrum between model and the measured

可以看到, 实测相位差复指数值的标准差谱比模型标准差谱在低频范围略大, 说明实测的相位差在复平面内的分布范围稍大一些; 当频率增大时, 无论是实测谱还是模型谱都趋近于 1.

2.3.3 水平模型的验证

当风向不垂直于线路时, 各点之间的水平距离并不等于横风向距离, 具体如图 6 所示, 横风向距离 r_v 等于水平距离与夹角正弦的乘积.

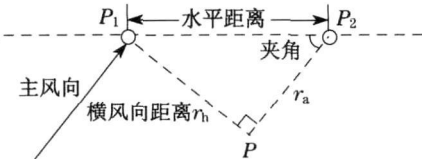


图 6 水平距离和横风向距离的关系示意图

Fig. 6 Illustration of the relationship between horizontal distance and lateral separation

需要注意, 此时式 (14) 描述的是垂足 P 点相对 P_1 点的相位差. 要表示 P_2 点相对 P_1 点的相位差, 还需要叠加 P_2 点相对于 P 点的顺风向相位差. 顺风向距离为 r_a , 顺风向相位差 $\Delta\phi_a$ 可表示为

$$\Delta\phi_a(n) = 2\pi \frac{r_a}{U} n \quad (23)$$

式 (23) 的含义为, r_a 与波长之比乘以 2π 即为顺风向两点相位差.

选择了 66 组风向与线路夹角约为 $30^\circ (\pm 5^\circ)$ 的风速时程, 计算了实测的相干函数和标准差谱. 应用同上节相同的参数, 调整水平相位差放大系数 β_h 并

考虑式 (23) 后, 得到了 20 m 高度处水平各点的相位差谱, 计算了模型相干函数和标准差谱. 与实测值的比较如图 7 和图 8 所示. 由于风向与线路夹角约为 30° , 因此横风向距离恰好等于水平距离的一半. 以 P_1 为基准点, 可以得到横风向距离分别为 20, 60 和 120 m 的相位差谱; 以 P_2 为基准点, 考虑 P_3 的数据, 还可以得到横风向距离为 40 m 的相位差谱.

可以看到, 应用模型相位差谱得到的相干函数可以较好地描述实测水平相干函数, 并且与实测相位差谱的标准差曲线也吻合较好. 通过比较, 可以认为式 (14) 和式 (15) 所提出的相位差谱模型合理.

3 脉动风速模拟

相位差谱模型非常适合进行大范围风场模拟. 首先, 生成一基准点脉动风速时程; 选择合适的相位差放大系数 β_h 和 β , 应用式 (14) 和式 (15) 以及式 (23) 生成空间各点相对基准点的相位差谱; 通过与基准点脉动风速相位谱的叠加, 可得到各目标点的相位谱; 结合各点的 Fourier 幅值谱, 进行逆 Fourier 变换, 取实部后便得到各点的脉动风速时程. 应用上述思路, 以 P_1 点 10 m 高度处为基准位置, 对 P_1 点 20, 28 和 43 m 位置以及 P_2 , P_3 和 P_4 的 20 m 位置的脉动风速进行了模拟, 并与实测数据进行了比较.

在生成相位谱时, 在竖向, 以 P_1 的 10 m 高度处为基准点, 取其实测脉动风速时程的相位谱为竖向

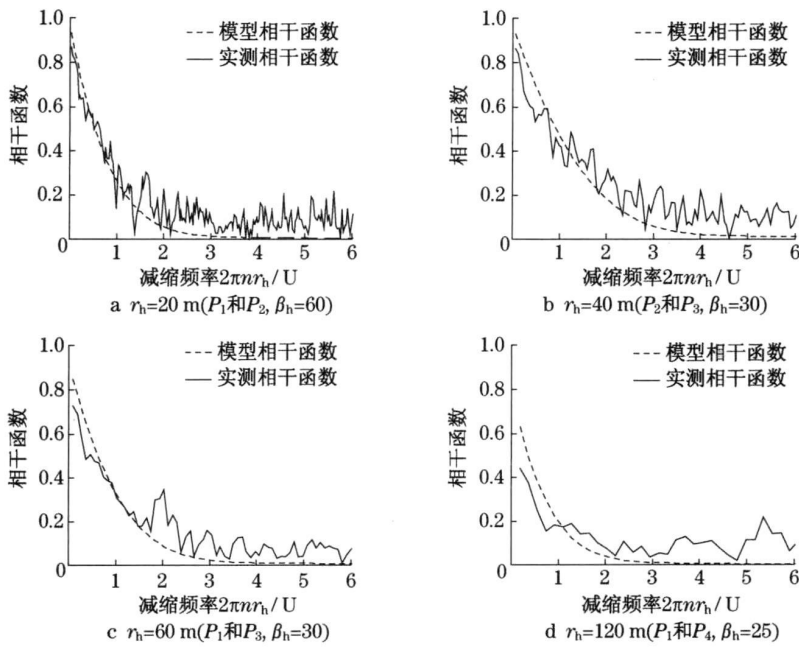


图 7 水平实测相干函数与模型相干函数的对比

Fig. 7 Comparison of the horizontal coherence function between model and the measured

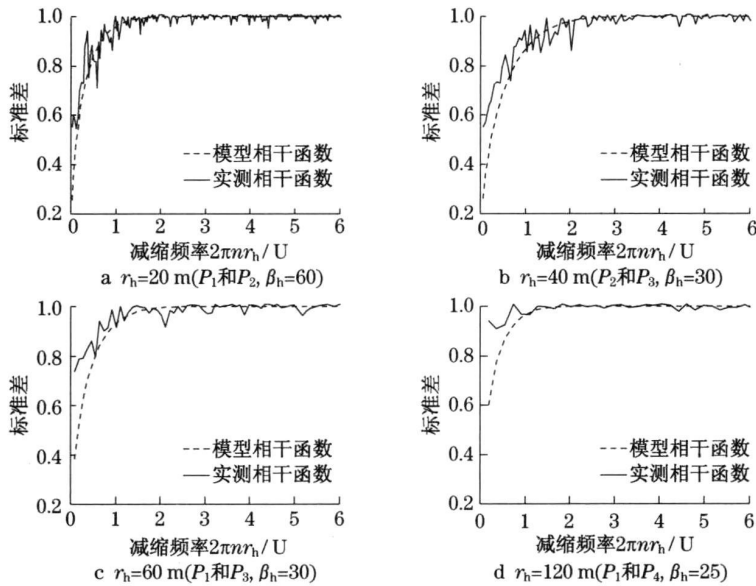


图 8 水平实测相位差谱标准差曲线与模型相位差谱标准差曲线的对比

Fig. 8 Comparison of the horizontal standard deviation spectrum between model and the measured

基准相位谱; 在水平向, 以 P_1 的 20 m 位置为基准点, 取该位置相对竖向基准点叠加相位差谱后得到的相位谱为基准. 相位差放大系数, β_h 取 35, β_v 取 80. 假设风向与线路夹角为 30° , 因此计算水平相位差谱时横风向距离取两点水平距离的一半. 各点的 Fourier 幅值谱取实测谱, 地面粗糙度 z_0 和 10 m 高度处 10 min 平均风速均取实测值. 与实测脉动风速

的比较如图 9 所示. 可以看到, 模拟生成的脉动风速时程大部分与原时程非常接近. P_1 点 28 m 处与 P_4 点 20 m 处模拟脉动风速时程与原时程略有出入, 这可能是因为在模拟时采用了相同的相位差放大系数. 如果对每个点分别取值, 可能得到与原时程更为接近的结果.

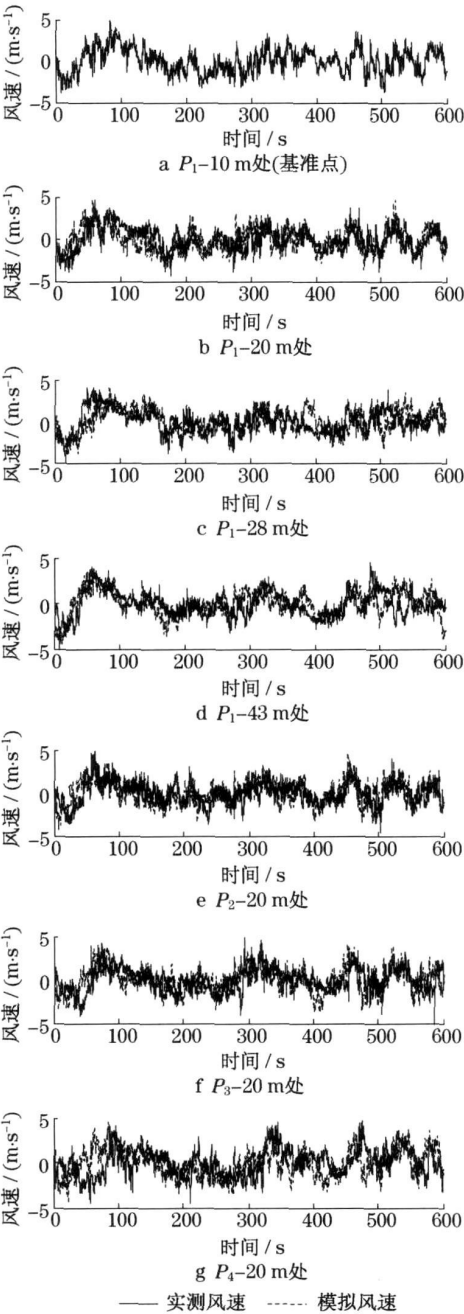


图 9 模拟脉动风速与实测脉动风速的比较

Fig. 9 Comparison between the simulated and the measured fluctuating wind speeds

4 结语

提出了脉动风速相位差谱模型的基本公式, 利用实测风场观测记录, 证实了该模型的合理性和适用性. 相位差谱是用来描述空间两点脉动风速时程之间的“相似”和“差异”的本质因素. 通过对相位差谱求期望, 可以得到近似相干函数. 在进行空间风场

模拟时, 设定一点具有为基准相位谱, 空间各点脉动风速的相位谱都可以通过叠加相位差谱而得到. 结合脉动风速的随机 Fourier 幅值谱, 便可生成脉动风速时程. 本文所提出的模型可应用于高层、大跨结构风振分析的风场模拟当中.

参考文献:

[1] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87: 194.

[2] Dyrbye C, Hansen S O. Wind loads on structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.

[3] Harris R L. The nature of wind[C]// The Modern Design of Wind-Sensitive Structures. London: Construction Industry Research and Information Association, 1971: 30—55.

[4] Maeda J, Makino M. Classification of customary proposed equations related to the component of the mean wind direction in the structure of atmospheric turbulence and these fundamental properties [J]. Transactions of Architecture Institute, 1980 287: 77.

[5] Krenk S. Wind field coherence and dynamic wind forces[C]// IUTAM Symposium on the Advances in Nonlinear Stochastic Mechanics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 180—186.

[6] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25: 111.

[7] Welch P D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms[J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1967, AU-15: 17.

[8] 李杰, 阎启. 结构随机动力激励的物理模型: 以脉动风速为例 [J]. 工程力学, 2009, 26 (S II): 175.

LI Jie, YAN Qi. Physical models for the stochastic dynamic excitations of structures; in the case of fluctuating wind speed [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (S II): 175.

[9] Seong S H, Peterka J A. Experiments on Fourier phases for synthesis of non-Gaussian spikes in turbulence time series[J]. Journal of Wing Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 421.

[10] 阎启, 谢强, 李杰. 风场长期观测与数据分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(1): 37.

YAN Qi, XIE Qiang, LI Jie. Long-term observation and data Analysis of wind field[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(1): 37.

[11] 李杰, 阎启, 谢强, 等. 台风“韦帕”风场实测及风致输电塔振动响应[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 1.

LI Jie, YAN Qi, XIE Qiang, et al. Wind field measurements and wind-induced vibration responses of transmission tower during Typhoon Wipha[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 1.