

# 脉动风速随机 Fourier 波数谱研究

李杰<sup>1,2</sup>, 阎启<sup>1</sup>

(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:** 从物理机制出发, 建立了具有扎实物理基础的脉动风速随机 Fourier 谱模型. 首先, 基于大气湍流物理图景, 阐述了湍流中的涡旋尺度和风速能谱不同子区的对应关系. 以脉动风速在剪切含能子区和惯性子区所符合的不同幂次规律为基础, 建立了随机 Fourier 谱模型, 指出上述两个子区分界波长  $l_c$  对应实际物理过程中含能大涡尺度和平衡范围涡旋尺度的分界值. 本质上,  $l_c$  是一个随机变量, 影响  $l_c$  的主要因素是湍流流量和剪切率的比值. 利用实测数据, 建立了  $l_c$  和剪切率以及 Fourier 谱模型中各参数的关系. 最后, 以地面粗糙度和 10 min 平均风速为基本随机变量, 湍流强度为牵连随机变量, 得到了分界波长的分布以及以双线性函数为特征的随机 Fourier 波数谱. 理论预测结果和实际观测结果符合良好.

**关键词:** 随机 Fourier 谱; 脉动风速; 概率密度演化方法; 含能子区; 物理建模

**中图分类号:** TU 973.213

**文献标识码:** A

## Research on Stochastic Fourier Wave-number Spectrum of Fluctuating Wind Speed

LI Jie<sup>1,2</sup>, YAN Qi<sup>1</sup>

(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:** Based on physical mechanism, a stochastic Fourier spectrum model of fluctuating wind speed with solid physical basis is proposed. In view of physical scene of atmospheric turbulence, relationship between the scales of vortex in turbulence and the sub-ranges in energy spectrum is revealed. According to the exponential laws of Fourier spectrum in different energy ranges, a stochastic Fourier spectrum model is established. In actual physical process, the boundary wavelength  $l_c$  of the two sub-ranges corresponds to the boundary value of the scales of vortexes in energy-content range and in

equilibrium range. Essentially,  $l_c$  is a variable and the main physical factor which affects its value is the ratio between shear-ratio of the main-flow and vorticity of turbulence. It is found that the ratio is proportional to shear-ratio. Along with numerical calculation, the formula to calculate  $l_c$  and the other parameters in Fourier spectrum model is founded. Finally, taking ground roughness length and 10 min mean wind speed as two basic variables and turbulence intensity as related variable, the distribution of  $l_c$  and the normalized stochastic Fourier wave-number spectrum with the bilinear characteristic can be obtained. The theoretical results accord with the measured results well.

**Key words:** stochastic Fourier spectrum; fluctuating wind speed; probability density evolution method; energy-content sub-range; physical modeling

脉动风速模型是进行结构抗风计算的基础. 实质上, 脉动风是大气湍流的脉动部分<sup>[1]</sup>. 在风工程中, 通常用功率谱密度函数描述脉动风速的能量分布, 多年来, 研究者已提出诸多模型<sup>[2-5]</sup>. 然而, 由于湍流问题的复杂性, 仅仅依靠功率谱密度, 远不能刻画大气中脉动风速复杂的概率信息. 并且, 在结构抗风分析中应用功率谱密度函数, 也只能得到响应量的二阶数值特征, 无法进行更为深入的结构可靠度分析<sup>[6-7]</sup>.

研究表明, 在动力激励的建模方面, 应用基于物理背景的随机 Fourier 函数模型, 可以得到具有明确物理意义且蕴含丰富概率信息的动力作用模型<sup>[7]</sup>. 结合近年发展起来的概率密度演化理论<sup>[8-9]</sup>, 可以用来精确计算一般非线性多自由度体系在动力作用下的结构可靠度. 已有的研究成果表明, 这是一个行之有效的方法<sup>[10-11]</sup>.

收稿日期: 2010-10-11

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

第一作者: 李杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构工程及生命线工程. E-mail: lijie@tongji.edu.cn

通讯作者: 阎启(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构风工程. E-mail: sevenyan\_tj@126.com

文献[6]初步探索了脉动风速的随机建模;文献[12]初步建立了脉动风速的随机 Fourier 幅值谱模型.在此基础上,本文试图从大气湍流的物理图景出发,结合具体物理参数的建模,建立具有扎实物理基础的脉动风速随机 Fourier 幅值谱模型,以求对脉动风速频域能量分布的概率特征做出更为合理、全面的刻画.与文献[12]相比,本文修正了双线性模型的定义,给出了模型谱和实测谱标准差的比较,并对模型的适用性进行了验证.

## 1 随机 Fourier 函数

### 1.1 随机 Fourier 幅值谱

空间中某点处的脉动风速是一类典型的随机过程,其随机样本是一系列的时程  $u(\eta, t)$ ,其中  $\eta$  为影响脉动风速随机过程的物理随机变量.对随机样本  $u(\eta, t)$  进行 Fourier 变换,可以得到样本 Fourier 谱  $F(\eta, n)$ ,包括幅值部分和相位部分,其中  $n$  为自然频率;反过来,对  $F(\eta, n)$  的一组样本也可以通过逆 Fourier 变换得到相应的时程随机样本.两类描述方法具有等价性.当基本物理变量  $\eta$  为随机向量时,  $F(\eta, n)$  为一类随机函数.显然,随机 Fourier 谱包括随机 Fourier 幅值谱和随机 Fourier 相位谱,对随机过程的频谱进行了全面描述.本文研究 Fourier 幅值谱,它实质上表示随机过程的能量在频域内的分布.下文中的“Fourier 谱”均指 Fourier 幅值谱.

文献[6]定义了脉动风速的随机 Fourier 频率谱

$$|F(\eta, n)| = \frac{1}{\sqrt{T}} \left| \int_0^T u(\eta, t) e^{-2\pi i n t} dt \right| \quad (1)$$

式中:  $T$  为样本持时.当  $\eta$  为确定性变量时,随机 Fourier 谱退化为样本 Fourier 谱;当  $\eta$  为随机变量时,随机 Fourier 谱对应于给定的样本 Fourier 谱集合.对于一个物理过程来说,  $\eta$  是可测的变量,可以通过观测得到其概率分布.

### 1.2 随机 Fourier 波数谱

波数所对应的波长可以直观地给出湍流漩涡的尺度大小,因此,在湍流理论中多用波数谱而非频率谱.波长与波数互为倒数.本文首先基于随机 Fourier 频率谱定义随机 Fourier 波数谱.

由 Taylor 冻结假定<sup>[13]</sup>,可以得到波数  $k$  与频率  $n$  之间的关系为

$$k = \frac{2\pi}{\bar{U}} n \quad (2)$$

式中:  $\bar{U}$  为平均风速.

显然,存在关系  $dk = \frac{2\pi}{\bar{U}} dn$ .由

$$\int_0^\infty |F(\eta, n)|^2 dn = \int_0^\infty |F(\eta, k)|^2 dk \quad (3)$$

可以得到 Fourier 波数谱  $|F(\eta, k)|$  与频率谱  $|F(\eta, n)|$  的转换关系为

$$\begin{aligned} |F(\eta, k)| &= \sqrt{\frac{\bar{U}}{2\pi}} |F(\eta, n)| \\ |F(\eta, n)| &= \sqrt{\frac{2\pi}{\bar{U}}} |F(\eta, k)| \end{aligned} \quad (4)$$

数值计算中,只需要将一点的脉动风速时程做离散 Fourier 变换,取其幅值然后乘以系数  $\sqrt{\bar{U}/2\pi T}$  便可以得到该段脉动风速时程的随机 Fourier 波数谱,对应的波数由公式(2)计算.本文中的建模,即对脉动风速随机 Fourier 波数谱进行.

## 2 随机 Fourier 波数谱建模

### 2.1 剪切含能区和惯性子区的能谱

涡旋是湍流的主要特征之一.在大气湍流中,充斥着各种尺度的涡旋.由于非线性相互作用,湍流中存在尺度之间的逐级能量传递,一般是大尺度涡旋向小尺度涡旋输送能量.科学家们的研究描绘出这样一幅湍流的物理图景:含能尺度附近的大涡在与主流的相互作用之中获得动能,它们包含了湍流大部分的能量;大涡破碎失稳,生成尺度逐级减小的涡旋并逐级传递能量;在某一个尺度范围,涡旋接受到大涡传递的能量和传递给小涡的能量相等,这便是“平衡范围”;动能传递至耗散尺度的涡旋,最终由于流体的粘性耗散作用转化为内能<sup>[14]</sup>.

根据在能量传递中的不同级别,大气涡旋可以分为 3 种尺度:含能尺度  $l_e$ 、平衡尺度  $l_i$  和耗散尺度  $l_d$ <sup>[13]</sup>.在能谱中,分别对应着含能子区、惯性子区和耗散子区.在土木工程中,主要关心前两个子区的能量分布.

理论研究和实验数据都表明,惯性子区的能谱符合“-5/3”幂次规律,并且很多各向异性湍流在惯性子区范围也是局部各向同性的<sup>[13]</sup>.虽然湍流“间歇性”的提出对“-5/3”律做出了一定的修正<sup>[14]</sup>,但是在风工程应用当中,“-5/3”的幂次规律已经足够,各经典风谱函数在频率较高时也都符合“-5/3”律.

湍流能谱中的含能子区受到地形和各向异性的影响,远较惯性子区复杂.但是很多风洞试验和大气

边界层的实测数据都发现:边界层湍流能谱含能区符合“-1”幂次规律<sup>[15]</sup>. Tchen<sup>[16]</sup>和 Panchev<sup>[17]</sup>利用 Heisenberg 的涡粘性理论进行分析,指出是主流的剪切和湍流自身涡旋的强烈相互作用导致了含能子区的“-1”幂次规律,因此,含能子区也称为“剪切含能子区”. Kader 和 Yaglom 利用量纲分析也得到了相同的结论<sup>[18]</sup>. 本文利用实测风速资料,同样发现无论是实测风速的三维谱还是主风方向的一维谱,在剪切含能子区都符合“-1”幂次规律.

## 2.2 脉动风速的随机 Fourier 波数谱

对应一段风速时程,在某个具体的大气湍流物理过程当中,各种尺度的涡旋混杂在一起.对风速时程做 Fourier 变换,可以还原不同尺度,亦即不同频率的涡旋的能量分布.由上节的描述可知,含能尺度对应的含能子区符合“-1”幂次规律,平衡尺度对应的惯性子区符合“-5/3”幂次规律.由此,在能谱中,含能子区和惯性子区会表现出一个界限位置,不妨称为分界波数  $k_c$ ,  $k_c$  的倒数为分界波长  $l_c$ . 在真实的物理过程中,  $l_c$  对应含能范围涡旋和平衡范围涡旋所对应尺度的界限值,如图 1 所示.可以认为,尺度大于  $l_c$  的涡旋属于含能范围的大尺度涡旋,从主流中获取能量;尺度小于  $l_c$  的涡旋(但大于耗散尺度)属于平衡范围,它们从较大涡获取的能量和向较小涡传递的能量相等.由于湍流过程的复杂性,  $l_c$  必定是一个随机变量,不同的湍流过程会对应不同的  $l_c$  值.

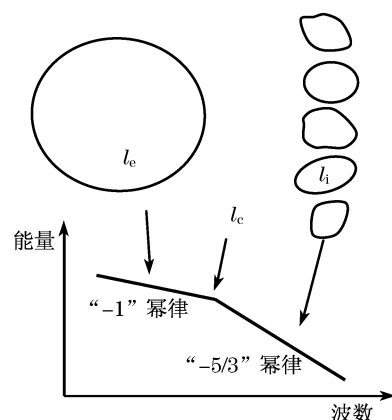


图1 大气湍流不同尺度涡旋和能谱的对应关系(对数坐标)

Fig.1 Relationship between eddy scales and spectral sub-ranges in atmosphere turbulence (logarithmic coordinate)

在含能子区和惯性子区分别用两段指数模型描述脉动风速能量谱,不但可以反映不同子区的能量分布,还可以明确表示出分界波数  $k_c$  的位置.由于在双对数坐标下指数函数表现为一直线,因此两段

指数模型转化为双对数坐标系中的双线性模型.

考虑到如式(1)所定义的 Fourier 幅值谱和脉动风速功率谱  $S(n)$  的如下关系<sup>[19]</sup>:

$$S(n) = E[|F(\eta, n)|^2] \quad (5)$$

可以用下式所示的双线性模型给出随机 Fourier 波数谱:

$$|F(\eta, k)| = \begin{cases} Au_* k^{-1/2} & k < k_c \\ Bk^{-5/6} & k > k_c \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $A, B$  为和幅值有关的参数;  $u_*$  为剪切波速.由于连续性的要求:  $Au_* k_c^{-1/2} = Bk_c^{-5/6}$ , 故存在关系式

$$B = Au_* k_c^{1/3} \quad (7)$$

即  $B$  并非独立的参数.式(6)中剪切含能子区和惯性子区的近似分界位置  $k_c$  以及剪切含能区的能量参数  $A$ , 可以通过实测 Fourier 样本谱进行识别.

本研究小组于 2006 年 9 月在华东某地建立了国内第一个强风观测台阵<sup>[20]</sup>, 其中沿同一垂直剖面安装的超声风速仪可以得到 10, 20, 28, 43 m 高处的高精度三维风速记录, 采样频率为 10 Hz. 观测位置位于大片田野中. 应用这 4 个高度同时采集的风速数据, 取时距为 10 min, 可以得到平均风的风剖面. 图 2 给出了某 10 min 平均风速的风剖面. 风剖面对数律为<sup>[5]</sup>

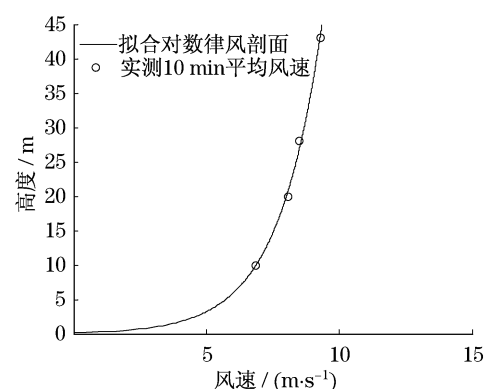


图2 某 10 min 平均风速风剖面及对数律拟合  
Fig.2 The measured 10 min mean wind speed at four heights and log-law fitting

$$\bar{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (8)$$

式中:  $\kappa$  为 von Karman 常数, 一般取 0.4;  $z$  为距地面高度;  $z_0$  为地面粗糙度. 从图 2 中可以看到, 4 个点的平均风速与对数律拟合效果良好. 拟合得到地面粗糙度  $z_0 = 0.16$  m, 剪切波速  $u_* = 0.66$  m · s<sup>-1</sup>.

与上述平均风速对应的风速时程以及标准化 Fourier 波数谱的双线性拟合如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 采用双线性模型对 Fourier 波数谱进行建

模是合理的. 建模过程采用最小二乘逼近准则. 图 3 右边各图中圆圈为分界位置的标识.

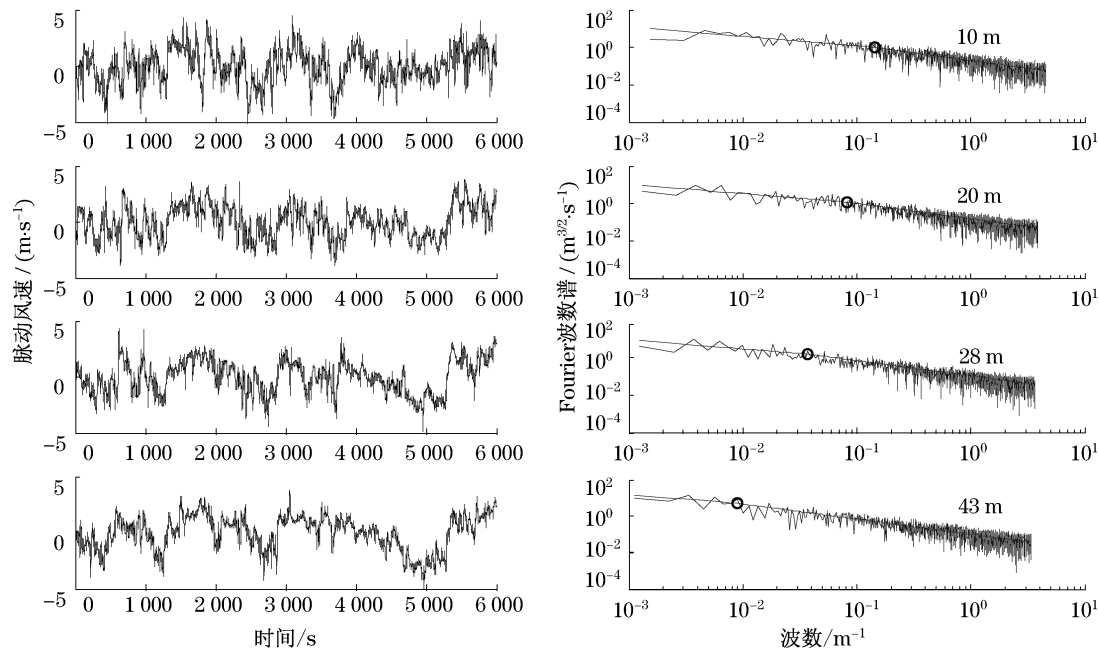


图 3 同时采集的不同高度 10 min 脉动风速时程、标准化 Fourier 幅值谱及双线性拟合

Fig.3 Simultaneous 10 min fluctuating wind speed and normalized Fourier spectrum with bilinear fitting

将风剖面对数律公式(8)对高度  $z$  求导便可得到时距内的主流剪切率为

$$d\bar{U}(z)/dz = u_* / \kappa z \quad (9)$$

根据不同高度的风速时程, 识别参数如表 1 所示.

表 1 样本 Fourier 谱识别参数

Tab.1 Parameters identified from the Fourier spectrum samples

高度/m	剪切率/s <sup>-1</sup>	$k_c/m^{-1}$	$l_c/m$	$A$
10	0.165	0.145	6.9	0.60
20	0.083	0.082	12.2	0.61
28	0.059	0.037	27.0	0.65
43	0.038	0.009	111.0	0.75

### 2.3 湍流涡量与主流涡量的比值 $\gamma$

根据 Tchen 的推导<sup>[16]</sup>, 影响分界波数  $k_c$  的主要因素为湍流涡量  $V_t$  和主流涡量  $V_m$  (即剪切率  $d\bar{U}(z)/dz$ ) 的相对比值  $\gamma$ .

$$\gamma = V_t / V_m \quad (10)$$

当  $\gamma$  为 1 的数量级时, 才可以保证湍流和主流发生强烈相互作用<sup>[15]</sup>.

在所考虑的剪切含能区的波数范围内, 湍流涡量  $V_t$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$V_t = \left[ 2 \int_0^{k_c} k^2 S(k) dk \right]^{1/2} =$$

$$\left[ 2 \int_0^{k_c} k^2 |F(\eta, k)|^2 dk \right]^{1/2} \quad (11)$$

则

$$\gamma = \frac{\left[ 2 \int_0^{k_c} k^2 |F(\eta, k)|^2 dk \right]^{1/2}}{d\bar{U}/dz} \quad (12)$$

$\gamma$  值可以利用实测数据计算得到. 应用 500 组、每组 4 段的 10 min 脉动风速计算得到了 2 000 个  $\gamma$  值, 它与剪切率的关系如图 4 所示.

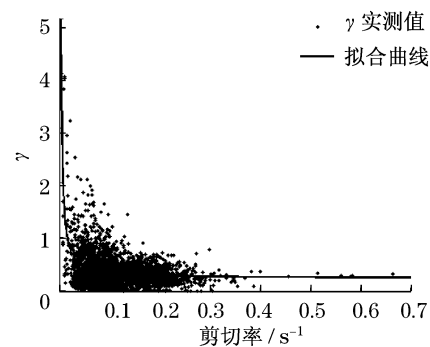


图 4 湍流涡量和主流涡量的比值  $\gamma$  与剪切率  $d\bar{U}/dz$  的关系

Fig.4 Relationship between  $\gamma$  (ratio of turbulence vorticity and main-flow vorticity) and shear-ratio  $d\bar{U}/dz$

可以看到,  $\gamma$  与剪切率的关系呈现出一定的离散性, 但又有规律可循: 即在小剪切率时离散性较

大,随剪切率增大,离散性减小.为简化起见,由统计回归得到  $\gamma$  与剪切率的均值关系式为

$$\gamma = 0.00740 \left( \frac{d\bar{U}(z)}{dz} \right)^{-1.11} + 0.246 \quad (13)$$

#### 2.4 $\gamma$ 与分界波数 $k_c$ 的关系

在本质上,分界波长  $l_c$  是一个随机变量.考虑公式(6)所示的 Fourier 幅值谱的双线性函数,设在实际计算时其下限波数为  $k_{low}$ .实测采用持时为  $T$  的风速数据,有

$$k_{low} = \frac{2\pi}{U} \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{UT} \quad (14)$$

此时式(6)可写为

$$|F(\eta, k)| = \begin{cases} Au_* k^{-1/2} & k_{low} < k \leq k_c \\ Bk^{-5/6} & k > k_c \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)剪切含能区部分带入湍流涡量的表达式(11),得到

$$V_t = Au_* (k_c^2 - k_{low}^2)^{1/2} \quad (16)$$

如果取时距为 10 min,则  $T = 600$  s,因此  $k_{low}^2$  为一小值,将其舍去.此时湍流涡量  $V_t$  可表示为

$$V_t = Au_* k_c \quad (17)$$

考虑式(9)和式(10),可以得到  $k_c$  的显式表达为

$$k_c = \frac{\gamma}{\kappa Az} \quad (18)$$

其中  $\gamma$  可由剪切率经式(13)确定,而剪切率同时受到高度、平均风速和地面粗糙度的影响,因此  $k_c$  仍为一变量.

式(18)中仍有系数  $A$  的值需要确定.已有研究认为,  $A$  的值约在 0.9~1.1 之间<sup>[18]</sup>.通过实测 Fourier 谱识别的结果,  $A$  集中在 0.4~2.0 的范围内,呈现一定的离散性,均值约为 0.9.本文取  $A = 0.9$ .该取值的合理与否需要通过模型谱与实测谱的对比来验证.

### 3 模型验证

#### 3.1 基本随机变量的统计

模型(6)的基本随机变量为地面粗糙度  $z_0$  和高度  $z$  处的 10 min 平均风速  $\bar{U}(z)$ .利用概率密度演化方法可以根据实测数据计算出变量的实测概率密度<sup>[21]</sup>.相比较直方图的统计方法,此方法具有不受直方图区间划分影响的优点.

应用本文实际观测的风速记录,对  $z_0$  和  $\bar{U}(z)$

应用概率密度演化方法计算其分布的概率密度,然后以此分布曲线为参照,用假设概率分布函数进行数值拟合.通过对 500 组数据的拟合,发现地面粗糙度  $z_0$  取为对数正态分布,10 min 平均风速  $\bar{U}(z)$  取为极值 I 型分布时,与实测概率分布密度曲线符合最好.

图 5 为应用上述观测台阵所记录的 500 组 10 min 平均风速计算所得的  $z_0$  和不同高度风速的实测概率密度和建议概率密度的比较(为图形清晰起见,此处省略 20 m 的情况,实际上符合情况同样良好),分布参数列于表 2.

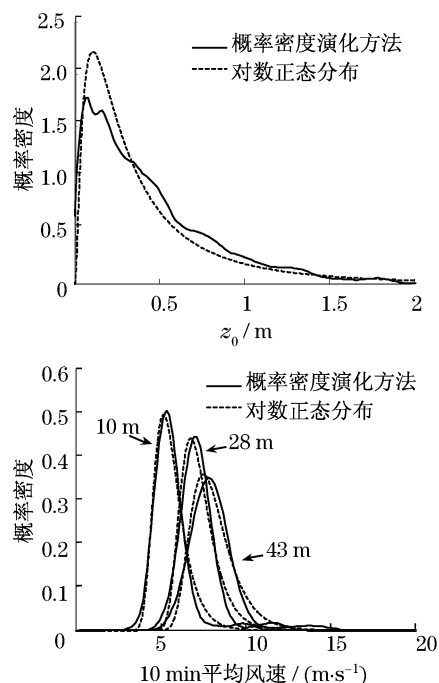


图 5 基本随机变量建议概率分布和实测概率分布的对比  
Fig.5 Comparison between the proposed and the measured probability distribution of the basic random variables

表 2 基本随机变量概率分布参数

Tab.2 Parameters of the probability distribution of the basic random variables

高度/m	$\mu_{z_0}$	$\sigma_{z_0}$	$\alpha$	$\beta$
10			5.174 6	0.747 5
20	-1.215 5	1.005 2	6.334 9	0.828 6
28			6.771 2	0.840 2
43			7.515 1	1.033 7

注: $\mu_{z_0}, \sigma_{z_0}$ 分别为实测地面粗糙度的对数均值和对数标准差; $\alpha$ 为位置参数; $\beta$ 为尺度参数.

#### 3.2 与实测谱对比

计算模型 Fourier 幅值谱时,首先确定平均风速和

地面粗糙度,由式(8)和式(9)计算剪切波速  $u_*$  和剪切率,应用式(13)可以得到  $\gamma$ ,带入式(18)即可得到  $k_c$ ,  $A$  如前所述取 0.9,应用式(7)可以得到参数  $B$  的值,代入公式(6)便得到了模型 Fourier 波数谱. Fourier 波数谱可以通过公式(4)方便地转换为频率谱.

对应表 2 中基本随机变量的概率分布密度,对地面粗糙度  $z_0$  等概率取 40 个样本值,4 个高度 10 min 平均风速各等概率取 40 个样本值.应用前述流程,参考高度取 10 m,可以计算得到各个高度的  $k_c$  值.代入公式(6),可以得到不同高度的随机 Fourier 模型谱集合,进而可计算得到模型谱的均值谱和标准差谱.本研究小组强风观测台阵在 4 个高度的实测谱和本文模型谱的比较,如图 6 所示.可以看到,在各个高度处,均值谱的实测与预测结果符合情况非常好;实测标准差谱比模型标准差谱略大,但效果仍属良好.为画图清楚起见,20,28 和 43 m 的曲线分别向上移动了 10 倍,100 倍,1 000 倍.

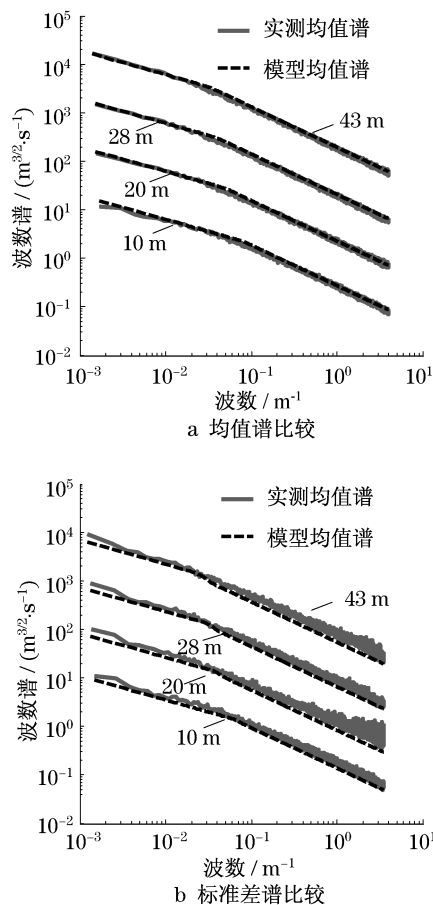


图 6 模型均值谱、标准差谱与实测谱的对比  
Fig.6 Comparison of mean spectrum and standard-deviation spectrum between model and measurements

### 3.3 适用性验证

应用在香港某大桥采集的风速数据来验证脉动

风速随机 Fourier 波数谱的适用性.风速采集于距水面 30 m 和 50 m 高处,4 Hz 采样.同样认为地面粗糙度符合对数正态分布,平均风速符合极值 I 型分布.经过识别,地面粗糙度的对数均值为 -1.579 5,对数标准差为 1.409 0.换算到 10 m 高度处的 10 min 平均风速均值为  $5.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,标准差为  $1.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,极值 I 型分布的参数  $\alpha = 5.065$ ,  $\beta = 0.953$ .计算中,系数  $A$  仍取为 0.9.实测均值谱和标准差谱的对比如图 7 所示.

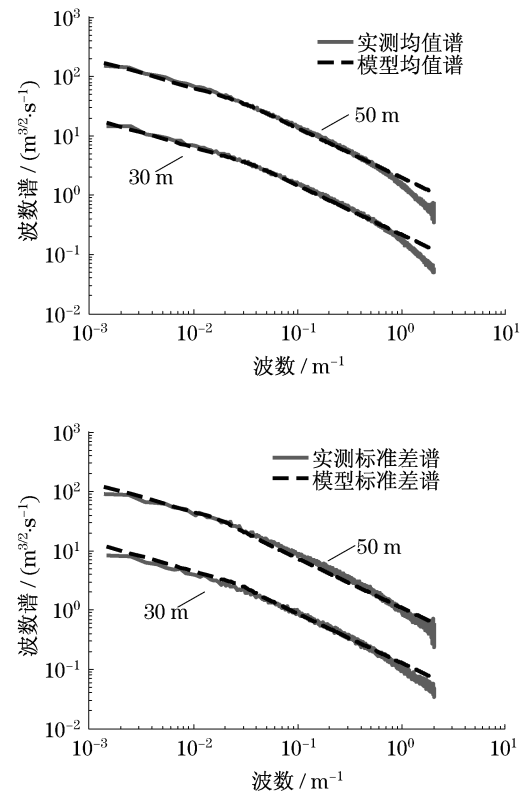


图 7 模型均值谱、标准差谱与实测谱的对比  
(适用性验证)

Fig.7 Comparison of mean spectrum and standard-deviation spectrum between model and measurements for suitability verification

可以看到,无论是均值谱还是标准差谱,都符合得非常好.可以认为,该模型具有一定的适用性,可以应用在不同地区的风场环境中.

## 4 结论

结构抗风分析与可靠度计算首先要求有合理的脉动风速模型.基于这样的目标,本文首先定义了脉动风速的随机 Fourier 波数谱.根据大气边界层湍流理论,阐述了剪切含能子区和惯性子区所服从的幂

次规律,建议在双对数坐标系内采用双线性模型反映实测 Fourier 谱.研究表明,影响子区分界位置  $l_c$  的主要因素是湍流涡量和主流的剪切率  $d\bar{U}(z)/dz$  的比值  $\gamma$ . 本文建立了  $\gamma$  随剪切率变化的线性关系式,并应用数值计算方法得到了根据剪切率来计算  $l_c$  以及双线性模型中其他参数的公式.与此同时,统计给出了基本随机变量地面粗糙度  $z_0$  和高度  $z$  处 10 min 平均风速  $\bar{U}(z)$  的概率分布,建立了湍流强度和平均风速的转化关系,得到了 Fourier 波数谱模型,理论预测结果与实测 Fourier 波数谱符合良好.

本文所建立的脉动风速标准化随机 Fourier 波数谱模型具有简单的形式和扎实的物理背景,为结构抗风设计与可靠度计算提供了较为合理的随机动力输入模型.

#### 参考文献:

- [1] Monin A S, Yaglom A M. Statistical fluid mechanics; mechanics of turbulence[M]. Cambridge: The MIT Press, 1971.
- [2] Von Karman T. Progress in the statistical theory of turbulence [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1948, 34(11): 530.
- [3] 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.
- [4] Harris R I. The nature of wind [C] // The Modern Design of Wind-Sensitive Structures. London: Construction Industry Research and Information Association, U. K., 1971: 19 - 33.
- [5] Dyrbye C, Hansen S O. Wind loads on structures [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [6] 李杰, 张琳琳. 实测风场的随机 Fourier 谱研究 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 66.  
LI Jie, ZHANG Linlin. Random Fourier spectrum of the measured wind field [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(1): 66.
- [7] 李杰. 随机动力系统的物理逼近 [J]. 中国科技论文在线, 2006, 1(2): 95  
LI Jie. A physical approach to stochastic dynamical systems [J]. Science Paper Online, 2006, 1(2): 95.
- [8] 李杰, 陈建兵. 随机结构非线性动力响应的概率密度演化方法 [J]. 力学学报, 2003, 35(6): 716.  
LI Jie, CHEN Jianbing. The probability density evolution method for analysis of dynamic nonlinear response of stochastic structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(6): 716.
- [9] 李杰, 陈建兵. 随机动力系统中的广义密度演化方程 [J]. 自然科学进展, 2006, 16(6): 712.  
LI Jie, CHEN Jianbing. Generalized density evolution function in stochastic dynamic system [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(6): 712.
- [10] Chen J B, Liu W Q, Peng Y B, et al. Stochastic seismic response and reliability analysis of base-isolated structures [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(6): 903.
- [11] Zhang L L, Li J, Peng Y B. Dynamic response and reliability analysis of tall buildings subject to wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 25.
- [12] 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(Sup. II): 175.  
LI Jie, YAN Qi. Physical models for stochastic dynamic excitations of structures; in the case of fluctuating wind speed [J]. Engineering Mechanism, 2009, 26(Sup. II): 175.
- [13] Hinze J Q. Turbulence [M]. New York: McGraw - Hill, 1975.
- [14] 胡非. 湍流、间歇性与大气边界层 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
HU Fei. Turbulence, intermittency and atmospheric boundary layer [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [15] Drobinski P. Numerical and experimental investigation of the neutral atmospheric surface layer [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2007, 64: 137.
- [16] Tchen C M. On the spectrum of energy in turbulent shear flow [J]. Journal of research of the national bureau of standards, 1953, 50: 51.
- [17] Panchev S. Exact elementary solutions of the spectral equation of nonstratified turbulent shear flow [J]. Physics of Fluids, 1969, 12: 722.
- [18] Katul G, Chu C R. A theoretical and experimental investigation of energy-content scales in the dynamic sublayer of boundary-layer flows [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 86: 279.
- [19] Li J, Chen J B. Stochastic dynamics of structures [M]. Singapore: John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd, 2009.
- [20] 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.
- [21] 陈建兵, 李杰. 密度演化方法在概率分布估计中的应用研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 433.  
CHEN Jianbing, LI Jie. Probability density evolution method for probability density function estimation of random variables [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 433.