

利用静态小波变换的非定常阵风分析与模拟

刘江, 王元

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在塔克拉玛干沙漠风沙环境中进行野外风场定位观测,得到了具有典型非定常特征的输沙阵风. 引入静态小波变换分析了阵风小波系数的非高斯分布特征和时间演化规律,针对其时频特征,推导出各尺度小波系数与目标风速谱的能量关系,采用反映湍流间歇性的 Log-Poisson 级串模型辅助生成小波系数,建立了基于静态小波逆变换的非定常阵风人工生成方法,并可通过调节低频段系数生成任意非定常波动规律. 结果表明:自然阵风与 Karman 风速谱吻合良好,在惯性子区符合湍流 $-5/3$ 定律,且具有明显的间歇性和局部自相似性;基于静态小波逆变换法实例模拟人工风速序列,具有与自然阵风类似的湍流统计特征,证实了该方法的有效性.

关键词: 输沙阵风; 静态小波变换; 非定常; 湍流

中图分类号: O357.5;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0074-05

Stationary Wavelet Transform Based Analysis and Simulation of Unsteady Gust

LIU Jiang, WANG Yuan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The field measurements were conducted to obtain the unsteady gust with blowing sand in the Taklimakan desert. The stationary wavelet transform is applied to investigate the non-Gaussian distribution characteristics and the temporal evolution of the gust wavelet coefficients. According to the time-frequency characteristics of the signal, the relationship between the wavelet at each scale and the target power spectrum is derived and the Log-Poisson law describing the intermittency of turbulence is employed to yield the wavelet coefficients. A method using the inverse stationary wavelet transform is proposed to generate artificial unsteady gust. Moreover, it is considered that the unsteady fluctuation depends on the wavelet coefficient at the lower frequency section. The results show that the power spectrum of the field gust is in good agreement with the Karman power spectrum and the inertial subrange of $-5/3$ power law is observed. The gust in the near-surface layer exhibits clearly the intermittency and local self-similarity of turbulence. In addition, the statistic analysis of a simulated example using the inverse stationary wavelet transform and its comparison with natural gust show the validity of the present method.

Keywords: gust with blowing sand; stationary wavelet transform; unsteady; turbulence

风是造成沙粒运动的根本动力因素. 早期在考虑风沙输移与输沙风的关系时,通常假设风速定常且湍流各向同性,同时跃移达到准平衡状态. 然而,这样的假设在真实条件中几乎不存在,引起风沙运

动的近地层空气流动具有明显的湍流非定常特征^[1]. 与雷诺应力相比,风速的水平脉动对沙粒跃移的影响更为重要^[2]. Neuman 等人^[3]和 Davidson-Arnott 等人^[4]的野外实测均证实,输沙率能够跟随

湍流发生每秒到几分钟的脉动. 当时均风速相同时, 自然风会比定常风导致更低的沙粒起动风速和更高的输沙率^[5]. 与此同时, 作为实验室模拟的重要前提, 非定常风场的风洞复现目前仍不完善. Butterfield^[5]和 Spies 等人^[6]考虑了最简化的非定常风况, 即风速增大、方波型和正弦型阵风, 但实际风况要复杂得多. 更重要的是, 由于风洞空间有限, 气流和下垫面性质相对简单, 风洞自然形成边界层流场的湍流特性和流动结构与野外条件存在差异^[7], 使得实验结果与野外实际之间尚有较大距离. 因此, 对野外真实非定常风场的解读和人工复现是当前风沙动力学一项亟待解决的任务. 小波变换是一种处理非平稳信号的时频域分析技术, 本文使用静态小波变换将不同尺度、强度的涡形成的湍流脉动表示为相应尺度的小波, 由此完成对自然阵风的分析和模拟.

1 静态小波变换

传统傅里叶变换基于平稳随机过程假设, 忽略了数据局域特征, 因此在非平稳信号时变特征分析时受到限制. 小波变换可同时提供信号在频率域和时间域上良好的局部信息, 尤其适合处理非平稳信号. 离散小波变换是一类常见的小波分析方法, 通过小波滤波器和二进抽取算法(降采样), 从原始信号或上级近似成分中分解高频分量(信号细节部分)和对应的低频分量(信号近似部分), 形成小波分解. 本文引入离散小波变换的一种特殊扩展, 称为静态小波变换(SWT)^[8].

设正交小波变换滤波器 H 、 G 的系数分别为 h_i 和 g_i , 并设 Z 为插值补 0 算子, 那么对于所有的整数 i , 有

$$(Zx)_{2i} = x_i; \quad (Zx)_{2i+1} = 0$$

定义滤波器 $H^{[r]}$ 和 $G^{[r]}$ 分别为 $Z^r h$ 和 $Z^r g$. 由此可得 $H^{[r]}$

$h_{2^r i}^{[r]} = h_i$, $h_m^{[r]} = 0$ (m 不等于 2^r 的整数倍). 通过对 $H^{[r]}$ 的每 2 个相邻系数之间插值补 0 (上采样), 可以获得 $H^{[r+1]}$, 同理可得 $G^{[r]}$. 设 f_k 为原始离散信号序列, 定义 $a_0 = f_k$, $H^{[0]} = H$, $G^{[0]} = G$, 则静态小波变换为

$$a_{j+1} = H^{[j]} a_j; \quad d_{j+1} = G^{[j]} a_j \quad (1)$$

式中: a_{j+1} 是 SWT 第 $j+1$ 层近似系数; d_{j+1} 为相应细节系数. 令 $a_j(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j)$ 和 $d_j(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j)$ 为对第 j 层系数 a_j 和 d_j 进行 $\epsilon = [\epsilon_1, \dots, \epsilon_j]$ 的 j 次下采样抽取后的系数. 当 $\epsilon_{j+1} = 0$ 时

$$R_0^{[j]}(a_{j+1}, d_{j+1}) = H^* a_{j+1}(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j, \epsilon_{j+1}) +$$

$$G^* d_{j+1}(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j, \epsilon_{j+1}) \quad (2)$$

当 $\epsilon_{j+1} = 1$ 时

$$R_1^{[j]}(a_{j+1}, d_{j+1}) = H^* a_{j+1}(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j, \epsilon_{j+1}) + G^* d_{j+1}(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j, \epsilon_{j+1}) \quad (3)$$

由此, 静态小波逆变换(ISWT)为

$$a_j(\epsilon_1, \dots, \epsilon_j) = 0.5 [R_0^{[j]}(a_{j+1}, d_{j+1}) + R_1^{[j]}(a_{j+1}, d_{j+1})] \quad (4)$$

式中: H^* 和 G^* 为 H 和 G 的共轭; R 表示重构算子. 由重构公式(4)可知, 由于 SWT 在分解时并无下采样, 故近似系数和细节系数分别作用重建低通和高通滤波器后, 直接相加即可重建信号.

标准离散小波变换使用二进抽取算法对信号进行下采样, 每层分解后小波系数减少一半. 因此, 当原始信号需要多层分解时, 多次下采样后所得小波系数由于数据量过少而无法完备表达信号特征, 且不利于进行统计分析. 通过对滤波器进行上采样, 静态小波变换避免了数据的下采样. 每次分解后细节系数和近似系数与原始信号长度相同, 使得原始信号特征最大限度得以保留, 并且由于不减少数据量, 非常利于统计分析. 文献[8]对 2 例瞬态时变信号进行 2 种小波变换对比分析, 发现 SWT 更适合非平稳信号的局部谱估计.

2 野外观测与阵风特性分析

2.1 实测方法与结果

2004 年~2006 年连续 3 年在塔克拉玛干沙漠不同地点进行野外观测, 选用采集频率为 1 Hz 的转杯风速计, 安装在距沙面 2 m 高处. 实测选在春季强风沙尘环境进行. 图 1 为典型风沙环境风速序列, 总时间 $T=1\,024$ s, 总采样点数 $n=1\,024$, 时均风速 $U_m=4.88$ m/s, 湍流强度 $I_u=0.196$, 湍流积分尺度 $L_u=138$ m. 图 2 给出该阵风功率谱和拟合的 Karman 谱线^[9]. 对 3 次观测所得大量数据分析均发现: 实测风功率谱与 Karman 谱吻合较好, 且符合惯性子区—5/3 定律. Karman 谱表达式为

$$S_K = 4I_u^2 L_u U_m [1 + 70.78(fL_u/U_m)^2]^{-5/6} \quad (5)$$

式中: I_u 为湍流强度; L_u 为湍流积分尺度; U_m 为平均风速; f 为风速信号频率.

风沙输移是以秒为时间尺度的动力过程^[2]. 图 1 所示每秒记录阵风, 60 s 时均风速不断波动, 且平均时段内瞬时风速变化剧烈, 无法用时均风速准确表达风场瞬态特征. 因此, 跃移通量会在不同时刻具有不同强度, 甚至由于某些时段低于起沙风速(例如 260~360 s 时, 平均风速为 3.65 m/s), 导致间歇性

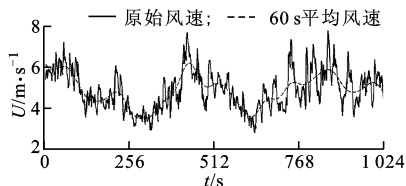


图1 典型风沙环境风速序列

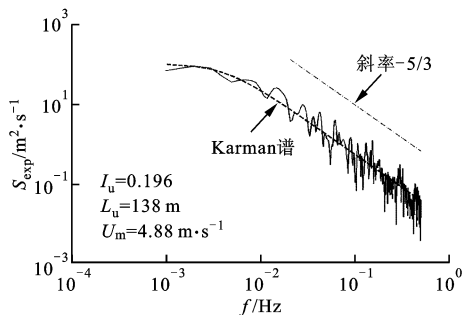


图2 实测野外阵风功率谱

跃移现象. 对大量实测数据统计表明, 自然湍流阵风具有强烈的脉动特征. 因此, 为了真实准确描述输沙过程, 详尽理解流动的非定常性至关重要.

2.2 野外阵风的小波分析

本文采用 Meyer 小波对图 1 阵风进行静态小波变换, 由于数据总数为 2^{10} , 所以最大分解尺度为 10 层. 图 3 给出分解后部分高频尺度小波系数 (细节系数), 随尺度由 5 到 1, 信号成分逐渐向高频发展, 自然阵风的峰值波动逐渐显著, 而且当某一尺度上出现明显波动时, 其他尺度上相同时段也会表现出大的系数波动. 实测阵风的小波系数在不同尺度间具有非常明显的局部自相似性, 在越高频的信号成分上, 小波系数表现出越明显的间歇性, 这与余振苏的层次结构模型^[10]相吻合. 分别对不同尺度的小波系数求其峰度和偏度值的结果见表 1. 对于自然阵风, 尽管偏度均在 0 左右波动, 但随着频率增加,

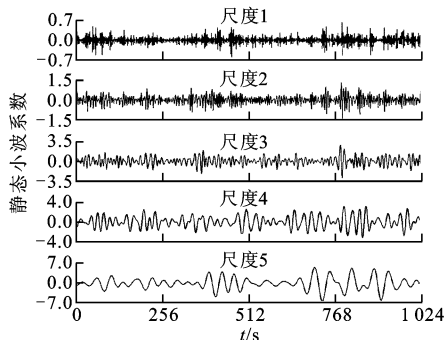


图3 自然阵风的 SWT 系数

峰度逐渐变大, 愈加偏离高斯分布, 与 Yamada 和

Ohkitani^[11]的结论一致. 尽管自然阵风的功率谱在惯性子区符合湍流—5/3 定律, 但小尺度高频脉动成分表现出逐渐强烈的非高斯分布特征, 反映了湍流级串的间歇性, 证明了小尺度涡是间歇产生的.

表1 不同尺度小波系数的峰度和偏度值

尺度	峰度		偏度	
	自然风	小波风	自然风	小波风
1	5.56	7.83	0.09	0.12
2	4.57	6.46	-0.03	-0.02
3	4.46	3.98	-0.01	0.01
4	3.36	3.39	0.03	0.01
5	3.17	3.21	-0.02	0.02

注: 标准高斯分布的峰度为 3, 偏度为 0.

3 基于 ISWT 的脉动风速模拟

为了真实表达湍流阵风的时频特征, 以 Karman 谱作为目标谱 $S(f)$, 采用 ISWT 方法生成湍流阵风.

3.1 小波能量与给定风速谱

根据小波分析定义, ISWT 也可表示为

$$y(t) = \sum_j \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (6)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi\left(\frac{t-k}{2^j}\right)$$

$$j, k \in \mathbf{Z}$$

式中: $y(t)$ 为风速时间序列; $\psi(t)$ 是小波函数, 本文采用 Meyer 小波; $d_{j,k}$ 是静态小波系数 (即细节系数); j 为尺度因子; k 为平移因子; $\mathbf{Z}$ 代表整数集. 根据 Parseval 定理, 每一分解层次上的小波系数 $d_{j,k}$ 与傅里叶幅值有如下关系

$$2^{-j} \Delta t \sum_k d_{j,k}^2 = 2 \int_{f_{1j}}^{f_{2j}} |F(f)|^2 df \quad (7)$$

$$f_{1j} = 2^{-j-1} / \Delta t; f_{2j} = 2^{-j} / \Delta t \quad (8)$$

式中: $|F(f)|$ 是 $y(t)$ 的傅里叶幅值; Δt 是离散序列的时间步长. 由功率谱定义可知

$$S(f) = 2 \Delta t / n |F(f)|^2 \quad (9)$$

式中: n 是参与傅里叶变换的数据总数. 由式 (7) 和 (9) 可知, $d_{j,k}$ 的标准偏差

$$\sigma_j = \left(\frac{1}{n} \sum_k d_{j,k}^2 \right)^{1/2} = \left[\frac{2j}{\Delta t^2} \int_{f_{1j}}^{f_{2j}} S(f) df \right]^{1/2} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 各分解尺度的小波系数标准偏差可由给定功率谱获得. 假定各尺度标准小波系数 $\delta_{j,k}$

(均值为0,标准偏差为1)已知,即可求得小波系数

$$d_{j,k} = \sigma_j \delta_{j,k} \quad (11)$$

求得各层小波系数后,通过公式(4)进行小波重构,即可生成符合给定功率谱的风速序列。

3.2 标准化小波系数

根据湍流尺度理论,在含能区内假设湍流级串不存在,而在惯性子区内,湍流能量按照大尺度涡向小尺度涡以纯能量级串方式传递。定义 f_p 和 j_p 分别为惯性子区的最低频率和初始尺度。由式(5)计算可得

$$f_p = 0.15U_m/L_u \quad (12)$$

根据式(12)和式(8),计算相应的 j_p 。

Kolmogorov 于 1941 年解释了惯性子区的湍流级串,指出湍流能量恒定地从大尺度涡向小尺度涡逐级传递。然而,实验证实惯性子区的能量传递并不总是恒定不变的,存在很强的间歇性。针对间歇性现象,本文采用 Log-Poisson 统计模型^[10]。由此,标准化小波系数的级串模型表示为

$$\delta_{j,k} = s(2/3)^{m/3} 2^{-1/9} \delta_{j+1,k} \quad (13)$$

式中: m 为服从均值为 $2\lg 2$ 的泊松分布随机整数; s 为取+1或-1的随机数。

因此,标准化小波系数的生成分为两步:在含能区($j > j_p$),标准化小波系数服从标准正态分布;在惯性子区($j \leq j_p$),根据式(13),由下层标准小波系数逐级生成上层标准小波系数。

4 小波模拟风速序列分析

根据图1所示的自然阵风特性($I_u=0.196$, $L_u=138$ m, $U_m=4.88$ m/s),采用 Karman 谱为目标谱,利用 ISWT 法生成小波模拟风速序列(见图4)。该序列的平均风速和湍流度分别为 4.88 m/s 和 0.194,与设定值吻合良好。图5为人工风速序列的功率谱图,满足目标 Karman 谱,与自然风谱相似。

图6显示了人工风速序列的静态小波变换,频率越高,小波系数的峰值波动也越显著。在不同尺度小波系数之间比较,相同时段的系数波动较为一致,

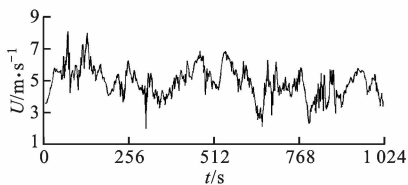


图4 基于 ISWT 法生成的小波模拟风速序列

说明 ISWT 法可模拟湍流的局部自相似性。小波系数的峰度和偏度值见表1,随着频率增高,非高斯性

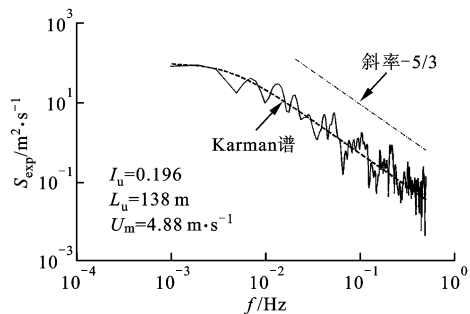


图5 小波模拟风的功率谱

逐渐显著。由表1的数据比较可知:ISWT 法生成的小波风具有与自然阵风较为一致的间歇特性。更重要的是,该方法不仅能够模拟间歇性和局部自相似性,而且还能根据要求构造风速序列非平稳波动特征。图4所示风速序列的初始段表示了非定常风场的加速过程,适用于研究沙粒起动现象。在更极端的情况下,使用与图4相同的统计特征量(I_u 、 L_u 和 U_m),该方法可生成图7所示具有更强烈非定常特征的风速序列。ISWT 方法中,高频段小波系数通过湍流模型构造间歇性和局部自相似性,低频段小波系数主要用来构造非定常特性。通过改变低频段小波系数序列的形状和能量时间分布特征,可构造任意规律的非定常风速序列。

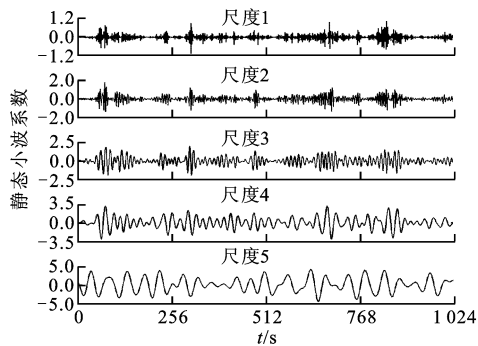


图6 小波模拟风的部分 SWT 系数

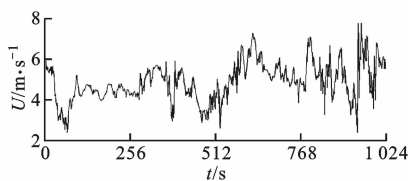


图7 具有强烈非定常特征的人工风速序列

5 结论

在塔克拉玛干沙漠风沙条件下进行定位观测,

证实野外非定常阵风符合 Karman 风速谱,且满足惯性子区 $-5/3$ 定律.引入静态小波变换分析表明,自然阵风具有明显的湍流间歇性和局部自相似性.为了有效模拟自然阵风特性,推导了静态小波系数与目标风速谱的能量关系,借助 Log-Poisson 湍流级串模型生成标准静态小波系数,进而利用静态小波逆变换法生成随机人工风速序列.模拟实例的统计特征符合目标值,具有与自然风相似的间歇性和局部自相似性,通过控制低频段小波系数,可满足不同设定条件的非定常风速特征.模拟结果证实了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] SCHONFELDT H J, VON LOWIS S. Turbulence-driven saltation in the atmospheric surface layer [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2003, 12(5): 257-268.
- [2] LEENDERS J K, VAN BOXEL J H, STERK G. Wind forces and related saltation transport [J]. *Geomorphology*, 2005, 71(3/4): 357-372.
- [3] NEUMAN C M, LANCASTER N, NICKLING W G. The effect of unsteady winds on sediment transport on the stoss slope of a transverse dune, Silver Peak, NV, USA [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(1): 211-226.
- [4] DAVIDSON-ARNOTT R G D, MACQUARRIE K, AAGAARD T. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach [J]. *Geomorphology*, 2005, 68(1/2): 115-129.
- [5] BUTTERFIELD G R. Transitional behaviour of saltation: wind tunnel observations of unsteady winds [J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39(3): 377-394.
- [6] SPIES P J, MCEWAN I K, BUTTERFIELD G R. One-dimensional transitional behaviour in saltation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(5): 505-518.
- [7] RASMUSSEN K R, SØRENSEN M. Aeolian mass transport near the saltation threshold [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 413-422.
- [8] NASON G P, SILVERMAN B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications [M]//*Lecture Notes in Statistics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1995: 281-299.
- [9] MORFIADAKIS E E, GLINOI G L, KOULOUVARIS M J. The suitability of the von Karman spectrum for the structure of turbulence in a complex terrain wind farm [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 62(2): 237-257.
- [10] SHE Zhensu, WAYMIRE E C. Quantized energy cascade and log-Poisson statistics in fully developed turbulence [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(2): 262-265.
- [11] YAMADA M, OHKITANI K. Orthonormal wavelet analysis of turbulence [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1991, 8(1/4): 101-115.

(编辑 王焕雪)

[本刊相关文献链接]

平板微通道壁面粗糙度对流场影响的摄动分析. 西安交通大学学报, 2005, 39(5): 540-543.
基于小波变换的扩散滤波模型数值解的收敛性. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 121-124.
微通道内流的微尺度粒子图像测速技术实验研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1355-1359.
风沙流中沙粒相输移的测量. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 846-850.
粗糙元特征对风洞中大气表面层模拟的影响. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 87-91.
微通道中极性流体流动特性的研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 274-278.
双拉格朗日模型模拟气固两相双圆柱绕流. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 77-80.