

现场监测脉动风速的 APES 法幅值谱相位谱估计^{*}

王向杰¹, 淡丹辉¹, 闫兴非², 程 纬¹

(1. 同济大学土木工程学院 上海, 200092;

(2. 上海市建设设计研究总院 上海, 200125)

摘要 对于超高、大跨架构而言, 风致振动是结构安全的重要威胁, 对风荷载的建模分析对结构安全具有重要的意义。针对常用的 Fourier 算法在实测数据谱分析中具有识别精度与频率分辨率不高的缺点, 采用一种非参数高精度的幅值相位估计方法 (amplitude and phase estimation, 简称 APES), 实现某桥现场实测风速数据的脉动风幅值谱和相位谱高精度估计。通过对估计结果进行统计分析, 得到幅值谱与相位谱的概率统计信息并给出在各频率处建议的幅值与相位分布类型, 从而提高本地区风谱模型的建模精度, 这对结构抗风设计和安全评估均具有重要意义。

关键词 脉动风; 幅值谱; 相位谱; 结构抗风

中图分类号 TU317.2; TH824

引 言

对于超高、大跨结构而言, 风荷载引起的结构振动可对结构的安全造成严重威胁, 风荷载成为此类结构的设计控制因素^[1]。对风荷载的监测、分析、建模, 以及对结构风致效应的分析, 不仅成为结构前期规划设计的重点难题之一, 也成为建成结构服役期安全性能评估关心的一项重要内容^[2]。脉动风速谱是描述其能量频域分布特征的一种重要参数。

脉动风速谱包括功率谱和幅值谱两种。已有规范中给出的均为前者, 但只能反应脉动风速幅值的二阶数据特征, 不能表征其他概率特性, 也丢失了包括相位在内的更丰富的信息, 难以完全还原脉动风的随机性原貌^[3]。因此使用已知脉动风功率谱产生模拟风速时程, 常常需要用到谐波合成法^[4-5]或线性回归滤波器法^[6], 这些方法计算量大, 而且质量不佳。采用幅值谱和相位谱的方式来表征脉动风速, 不仅可以保留脉动风速的全面统计特性, 从而得到更加接近真实情况的脉动风速模拟时程, 而且可以大大降低模拟计算的工作量。李杰等^[7]利用实测数据拟合得到了基于 Fourier 变换的随机脉动风幅值谱, 证明了幅值谱在反映脉动风统计特性方面的优

势, 但由于 Fourier 变换的频率分辨率较差, 对幅值和相位的估计精度也较差, 因此得到的幅值谱质量不佳。

近年来, 得益于结构监测技术的发展, 很多工程结构上安装有风速风向监测系统, 笔者采用上海闵浦二桥监测系统的风速监测数据, 利用 APES 方法在频率分辨率和幅值相位估计方面的优势^[8-11], 对其进行风速的幅值和相位谱估计, 并对估计结果进行统计分析。

1 基于 APES 算法的脉动风速特征表示

1.1 脉动风速的信号模型

在平稳风条件下, 可以将实测得到的紊流风速看成平稳的高斯过程, 由多个频率成分的谐振分量与平稳噪声成分叠加而成, 即

$$u(t) = \sum_{r=1}^M U(\omega_r) \sin(\omega_r t + \varphi(\omega_r)) + \omega_{\omega_r}(t) \quad (1)$$

其中: $u(t)$ 为水平方向的脉动风速; ω_r 为第 r 个谐振成分的频率; $U(\omega_r)$ 和 $\varphi(\omega_r)$ 分别为该成分的幅值和相位; ω_{ω_r} 为该频率处的噪声。

^{*} 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2014AA110402); “十二五”国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAJ11B01); 中央高校基本科研业务费专项资金和国家气象局气象行业科研专项经费的联合资助项目(201306102)

收稿日期: 2017-05-28; 修回日期: 2017-08-25

在任意感兴趣的频率 ω 处, 风速可以被写成一个经幅值函数 $a(\omega)$ 调制的正弦项与一个噪声残余项 $w_\omega(t)$ 之和

$$u(t) = U(\omega) \sin(\omega t + \varphi(\omega)) + w_\omega(t) \quad (2)$$

其中: $U(\omega)$, $\varphi(\omega)$ 分别为定义在频率 ω 处的幅值谱函数和相位谱函数; $w_\omega(t)$ 包含了除频率 ω 外所有的其他频率点的衰减正弦项及一个随机噪声成分 $\omega(n)$ 。

1.2 基于 APES 的脉动风幅值谱相位谱估计

APES 法是一种高精度的非参数幅值和相位谱估计方法, 这类非参数谱估计方法起初多用于对复信号、非阻尼信号的处理^[8-9]。Stoica 等^[12] 给出了 APES 和 Capon 方法的实信号实现形式。由于脉动风速信号为实信号, 故笔者采用了后者改进的 APES 谱估计方法来对脉动风速信号进行谱估计, 其过程如下。

将式(2)进一步写为

$$u(t) = U_I(\omega) \cos(\omega t) + U_Q(\omega) \sin(\omega t) + w_\omega(t) \quad (3)$$

其中: $U_I(\omega) = U(\omega) \cos\varphi(\omega)$; $U_Q(\omega) = U(\omega) \sin\varphi(\omega)$ 。

设通过连续的风速监测, 获得脉动风的时间序列 $u(t)$ 的 N 个观测数据 $u(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$ 。则每一个观测数据都可以写成如下形式

$$u(n) = U_I(\omega) \cos(\omega n) + U_Q(\omega) \sin(\omega n) + w_\omega(n) \quad (4)$$

构造观测数据的 $M \times L$ 阶 Hankel 阵

$$Y = [y_l] \quad (5)$$

其中: $y_l = \{u(l), u(l+1), \dots, u(l+M-1)\}^T$; $l=0, 1, \dots, L-1$; M 为用户参数, 也可以成为 FIR 滤波器长度, $M \leq \frac{N}{2}$; $L = N - M + 1$, 表示对时间序列进行快照(snapshot)的总次数。

设

$$\Theta(\omega) = \begin{bmatrix} U_I(\omega) & U_Q(\omega) \\ U_Q(\omega) & -U_I(\omega) \end{bmatrix}$$

$$\theta(\omega) = [U_I(\omega) \quad U_Q(\omega)]^T = \Theta [1 \quad 0]^T$$

$$V_\omega(l) = [\cos\omega l \quad \sin\omega l]$$

$$A_M(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos\omega & \sin\omega \\ \vdots & \vdots \\ \cos\omega(M-2) & \sin\omega(M-2) \\ \cos\omega(M-1) & \sin\omega(M-1) \end{bmatrix}$$

$$B_\omega(l) = \begin{bmatrix} \cos\omega l & \sin\omega l \\ \sin\omega l & \cos\omega l \end{bmatrix}$$

则有如下信号模型

$$y_l = A_M(\omega) B_\omega(l) \theta(\omega) + n_l \quad (6(a))$$

$$y_l = A_M(\omega) \Theta(\omega) V_\omega^T(l) + n_l \quad (6(b))$$

$$Y = A_M(\omega) \Theta(\omega) (A_L(\omega))^T + [n_l] \quad (7)$$

其中: $n_l = \{w_\omega(l), w_\omega(l+1), \dots, w_\omega(l+M-1)\}^T$ 。

通过观测数据 Y 识别制定频率 ω 处幅值问题, 可以转化为最佳滤波器问题: 构造一个可以完全只通过频率 ω 处的成分的正则化 FIR 滤波器 $h(\omega) = \{h_i(\omega)\}^T$, $h_i(\omega)$ 表示滤波器系数。利用该滤波器对观测矩阵进行滤波, 得到 $h^T(\omega)Y$ 。希望的最佳滤波效果是: 残余项 $w_\omega(n)$ 最小, 即噪声消减为零, 只剩下其他点 ω^* 处信号成分在 ω 处的贡献; 同时滤波器对 ω 点处的信号幅值没有任何扭曲。这就要求

$$\min_{U(\omega), h(\omega)} (\text{mean}(h^T(\omega)Y - A_M(\omega)\Theta(\omega)(A_L(\omega))^T))^2 \quad (8(a))$$

约束条件为

$$h^T(\omega)A_M(\omega) = c^T \quad (8(b))$$

其中: $c = [1, 0]^T$ 。

式(8(a))等价于使滤波后的信号的信噪比(SNR)最大化, 即

$$\max_{a(\omega), h(\omega)} \frac{\|h^T(\omega)A_M(\omega)\|}{h^T(\omega)Q(\omega)h(\omega)} \quad (9)$$

其中: 噪声协方差定义为 $Q(\omega) = E(n_l \cdot n_l)$ 。

可以用其估计 $\hat{Q}(\omega)$ 代替, 即

$$\hat{Q}(\omega) = \frac{1}{L} [n_l] [n_l]^T = \hat{R} - \hat{C}(\omega)G^{-1}(\omega)\hat{C}^T(\omega) \quad (10)$$

其中: $G(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} V_\omega^T(l) V_\omega(l)$; $\hat{C}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} y_l V_\omega(l)$; \hat{R} 为信号的协方差 R 的估计, $\hat{R} = E(y_l y_l^T) = \frac{1}{L} Y Y^T$ 。

式(9)的优化问题进一步可转化为

$$\begin{cases} \min_{U(\omega), h(\omega)} h^T(\omega)\hat{Q}(\omega)h(\omega) \\ h^T(\omega)A_M(\omega) = [1, 0]^T \end{cases} \quad (11)$$

Stoica 等^[10] 给出的最优滤波器估计器如下

$$h_{APES}(\omega) = \hat{Q}^{-1}(\omega)A_M(\omega) \cdot (A_M^T(\omega)\hat{Q}^{-1}(\omega)A_M(\omega))^{-1}c \quad (12)$$

由式(8(b)), 有

$$h^T(\omega)A_M(\omega)\hat{\Theta}(\omega) = c^T\hat{\Theta}(\omega)$$

即

$$h^T(\omega)\hat{C}(\omega)G^{-1} = \hat{h}^T(\omega)$$

注意到 \mathbf{G} 的对称性,即

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(\omega) &= \mathbf{G}^{-1}(\omega) \hat{\mathbf{C}}^T(\omega) \mathbf{h}_{\text{APES}}(\omega) = \\ & \mathbf{G}^{-1}(\omega) \hat{\mathbf{C}}^T(\omega) \hat{\mathbf{Q}}^{-1}(\omega) \mathbf{A}_M(\omega) \cdot \\ & (\mathbf{A}_M^T(\omega) \hat{\mathbf{Q}}^{-1}(\omega) \mathbf{A}_M(\omega))^{-1} \mathbf{c} \\ & (i = 1, 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\hat{\boldsymbol{\theta}}^T(\omega)$ 即为估计。

根据式(3),可以给出最终的脉动风速的幅值谱和相位谱估计为

$$\begin{cases} U(\omega) = \sqrt{U_I^2(\omega) + U_Q^2(\omega)} \\ \varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{U_I(\omega)}{U_Q(\omega)}\right) \end{cases} \quad (14)$$

2 APES 算法与 Fourier 变换在信号处理中的比较

已有研究表明,APES 谱估计方法是一种特殊形式的离散 Fourier 变换(discrete fourier transform,简称 DFT),前者对频率和幅值的识别精度要优于后者。为了比较二者在谱识别方面的性能表

现,给定一段测试信号进行谱识别。该信号包 5 个谐波分量,其频率分别为:0.053,0.056,0.077,0.081,0.093 Hz,幅值真实值分别为 12.3,10.0,5.3,10.0,10.0 m。信号长度为 600 s,取样频率为 1 Hz。在信号时程中加入一个均值为 0,标准差为 0.5 的随机噪声。分别用 APES 法和 DFT 进行处理,谱图在图 1 中给出,识别得到的结果见表 1。

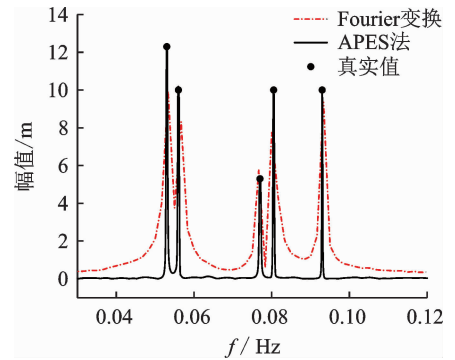


图 1 APES 算法与 DFT 识别结果对比
Fig. 1 Amplitude spectrum identified by APES and DFT

表 1 测试信号的幅值谱识别结果

Tab. 1 Amplitude spectral identified for test signal

采用算法	APES	DFT	APES	DFT	APES	DFT	APES	DFT	APES	DFT
信号成分 (频率/rad)	0.053		0.056		0.077		0.081		0.093	
幅值识别结果 (频率/rad)	0.053 00	0.053 33	0.055 99	0.056 67	0.077 06	0.076 67	0.080 50	0.080 00	0.093 06	0.093 33
误差/%	0	0.6	0	1.2	0	0.4	0	0.6	0	0.4
幅值识别结果 (频率/rad)	12.340	9.985	10.060	8.313	5.353	5.813	10	7.777	10.110	9.512
误差/%	0.3	23.2	0.6	16.9	1.0	9.7	0	22.2	1.1	4.9
周期数	31.8		33.6		46.2		48.3		55.8	

由表 1 和图 1 可见,通过计算结果可知,APES 法以 0 误差的方式识别得到了全部 5 个频率成分,而 DFT 的识别结果相对精度较低,其误差最大可达到 1.2%。对于幅值识别结果,APES 法同样具有明显识别精度优势,其最大相对误差仅为 1.1%,而 DFT 的幅值识别精度很差,且识别结果均小于真实值,其相对误差最大达到 23.2%,最小为 4.9%。从图 1 可见,对于前两个频率成分非常接近的信号,DFT 识别得到的两个峰值在顶端几乎重合,而 APES 法得到的两个峰值在底部仍然能够有较大的距离,这反映了后者比前者具有更好的频率分辨率。

由此可见,采用 APES 方法,不仅可以得到高质量的风谱幅值估计,而且因为更高的频率分辨率,可以得到比 Fourier 法幅值谱更密的频率线,使风谱在

全频率域内的谱线分布更趋合理。另外,由于风谱估计的常用时长为 600 s,其包含各频率信号的完整周期数最小只有 31.8 个周期,在这样的短的时长内,APES 法的幅值识别结果比 Fourier 法更可靠。

3 闵浦二桥风速监测数据处理

上海闵浦二桥是一座轻轨两用一体化双层特大桥,位于上海市黄浦江上游闵行一奉贤段。主桥为独塔双索面双层斜拉桥,主跨为 251.4 m,锚跨为 147 m + 38.25 m。上层为二级公路双向 4 车道,桥面宽度为 18 m;下层为双线轻轨(上海轨道交通 5 号线闵奉段),最小功能宽度为 10 m。闵浦二桥结构健康监测系统监测,综合考虑桥梁结构特点,选择了多种监测目标,共

有测点 172 个,其中风速风向测点有 2 个,分别位于塔顶与主跨跨中。塔顶为 150 m,跨中为 29 m(吴淞零点高程),均小于当地梯度风高度,采样频率为 4 Hz,采用不间断采样方式监测作用在结构上的风速。



图 2 闵浦二桥鸟瞰图

Fig. 2 Aerial view of minpu second bridge

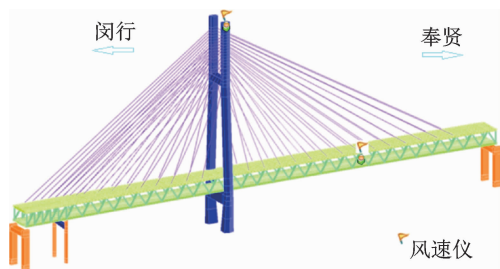


图 3 闵浦二桥风速仪布置图

Fig. 3 The layout of anemometers in Minpu Second Bridge

采用 2016 年 1~3 月之间的 3 个月(2 184 h)的风速监测数据为研究对象,根据中国交通部规范《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004)^[13]规定的 10 min 为平均风时距,将其分解为 13 104 个样本,每个样本包括塔顶与跨中两组数据。

采用矢量分解法^[14-15]得到主风速 \bar{u} 、平面风速 \bar{u}_p 以及水平平均风向角 φ ,具体计算公式为

$$\begin{cases} \bar{u} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \\ \bar{u}_p = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \\ \cos(\varphi) = \frac{\bar{u}_x}{\bar{u}} \\ \sin(\varphi) = \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}} \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z$ 代表顺桥向、横桥向以及竖向的平均风速。

对于采样频率 4 Hz,时距 10 min 的子样本来说,其计算公式为

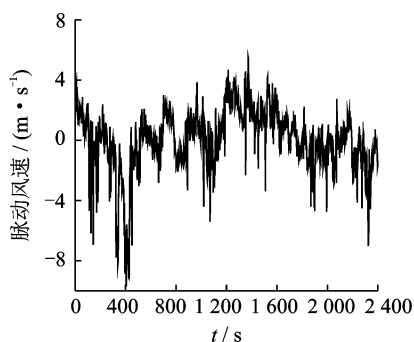
$$\begin{cases} \bar{u}_x = \frac{1}{2400} \sum_{i=1}^{2400} u_x(t_i) \\ \bar{u}_y = \frac{1}{2400} \sum_{i=1}^{2400} u_y(t_i) \\ \bar{u}_z = \frac{1}{2400} \sum_{i=1}^{2400} u_z(t_i) \end{cases} \quad (16)$$

在进行正式风谱估计之前,对得到的监测数据样本进行筛选处理,筛选原则为^[16]: a. 两处风速原始数据中风速超过 64 m/s 的数据点小于 50 个; b. 跨中与塔顶两处的主风速均大于 6 m/s; c. 跨中主风速小于塔顶主风速; d. 跨中平面风速小于塔顶平面风速。

通过以上筛选,共得到 1 014 个符合平稳风要求的子样本。按下式计算各子样本的水平内脉动风速时程^[17]

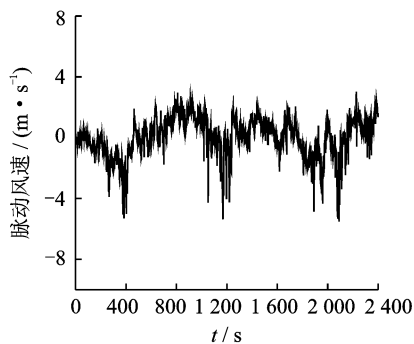
$$u(t) = u_x(t) \cos(\varphi) + u_y(t) \sin(\varphi) - \bar{u}_p \quad (17)$$

图 4(a)和(b)给出由计算得到的其中两个时段内的脉动风风速时程。



(a) 某典型脉动风时程曲线1

(a) A certain typical fluctuating wind velocity time history 1



(b) 某典型脉动风时程曲线2

(b) A certain typical fluctuating wind velocity time history 2

图 4 典型脉动风速时程曲线

Fig. 4 Typical fluctuating wind velocity time history

4 平稳脉动风幅值谱与相位谱估计结果及统计分析

4.1 平稳脉动风幅值谱和相位谱估计

针对得到的 1 041 个平稳风速数据样本,分别用 APES 法与 DFT 估计各个样本的幅值谱和相位谱。图 5 给出其中一个样本的幅值谱和相位谱估计曲线。由图可见,在频率的对数坐标轴上,APES 法的谱曲线比 Fourier 谱更加平滑,在低频段,前者比后者的数据点多;在高频段,后者数据则过于密集,

反而掩盖了总体趋势信息。总体来看, APES 幅值谱曲线在全频段内的质量要好于 Fourier 幅值谱。这主要是因为前者可以实现任意指定频率线上的谱估计, 因此可以在低频区加密频率线, 使频率点在对数轴上合理分布; 而 DFT 则需要将时域信息平均地投射到事先划定好的等间隔频率线上, 其频率点只能是一个等差数列, 低频区缺乏数据, 而在高频区则显得数据过密。

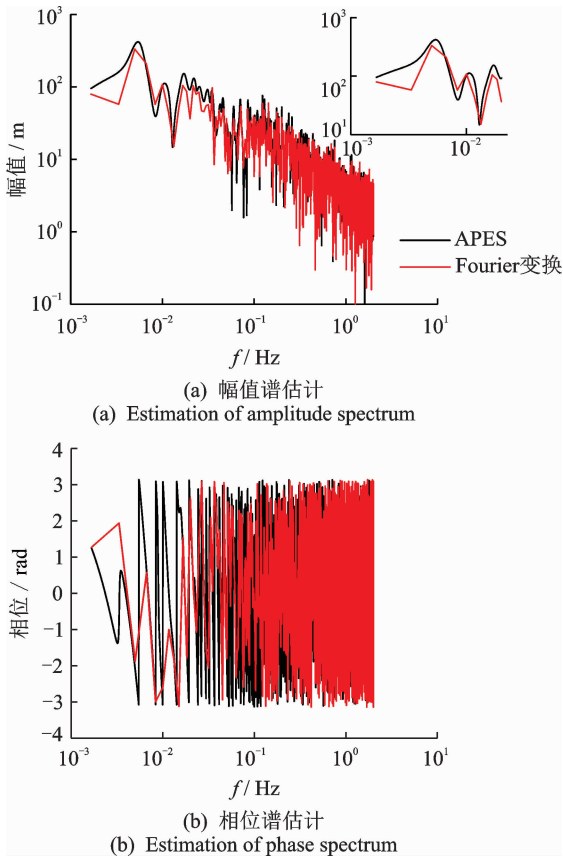


图 5 某一时段脉动风速样本的幅值谱相位谱估计
Fig. 5 Amplitude spectrum and phase spectrum estimation of a certain wind velocity sample

4.2 幅值谱相位谱的估计结果统计

将上述两种方法估计得到的所有样本的幅值、相位谱作进一步统计分析。用上述两种方法估计的塔顶、跨中两处脉动风速的幅值均值谱与标准差谱分别在图 6 和图 7 给出。定义两种方法估计得到的幅值均值谱差异为

$$\Delta = \frac{U_{APES}(\omega) - U_{Fourier}(\omega)}{U_{Fourier}(\omega)} \quad (18)$$

其中: $U_{APES}(\omega)$, $U_{Fourier}(\omega)$ 分别为 APES 法与 Fourier 变换得到的幅值谱。

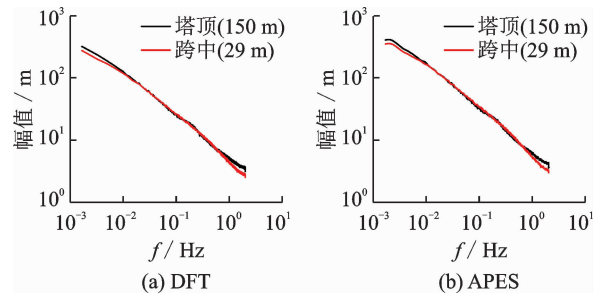


图 6 两种算法得到的脉动风幅值均值谱
Fig. 6 Mean of the measured fluctuating wind amplitude spectrum obtained using the two method

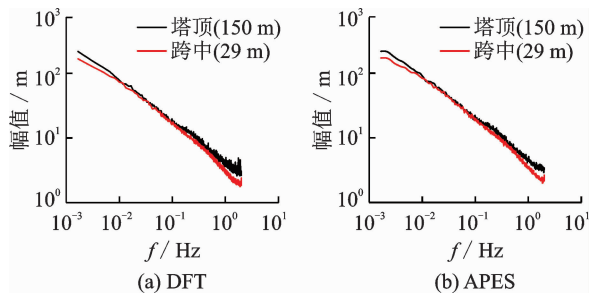


图 7 两种算法得到的脉动风幅值标准差谱
Fig. 7 Standard deviation of measured fluctuating wind amplitude spectrum obtained using the two methods

差异如图 8 所示。相位均值谱在图 9 给出。

通过对图 6~9 的分析可知: 两种方法得到的幅值谱均值规律一致: 低频区域幅值大, 高频区域幅值小, 在双对数坐标系下, 谱线呈近似线性下降趋势, 这与已有文献的结论相同, 即脉动风的能量集中在低频区域; 跨中的幅值谱均值在低频区和高频区均明显小于塔顶的幅值, 而在中间频率区间两者非常靠近; 两种方法得到的风速幅值谱标准差在低频区大, 高频区小, 而且塔顶大于跨中, 这从另一个侧面反映紊流能量集中于低频区。

DFT 得到的幅值谱均值在全频率区段均明显小于 APES 法风幅值谱均值估计结果, 最大差异达到 23.37%, 最小也有 0.63%; 这与前文给出的二种方法性能对比结论一致, 有理由相信, APES 法得到的脉动风幅值均值谱比 Fourier 幅值均值谱更准确。

两种方法估计得到的相位谱塔顶和跨中的均值均于 0。

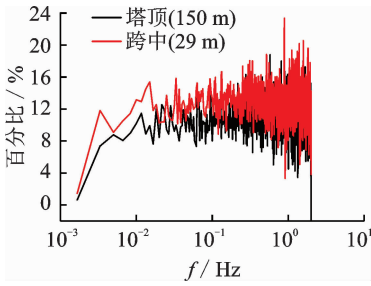


图 8 两种方法得到的脉动风幅值均值谱差异

Fig. 8 Difference between the mean of fluctuating wind amplitude spectrum using the two method

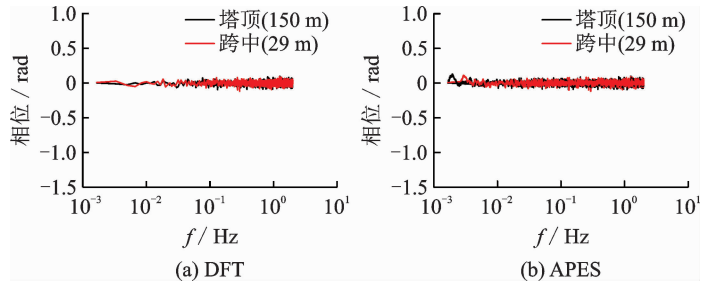


图 9 两种方法得到的脉动风速幅值均值谱

Fig. 9 Mean of fluctuating wind phase spectrum obtained using the two method

4.3 幅值谱相位谱的分布估计

为了进一步了解脉动风幅值谱与相位谱在各频率点处的分布类型,图 10、图 11 分别给出塔顶频率为 0.005, 0.1, 1 Hz 处实测风幅值与相位数据的分布频数图, 3 个频率分别代表低频区、中频区和高频区。由于跨中与塔顶的分布类型相同, APES 算法较 DFT 结果更为准确, 故此处只给出塔顶脉动风谱幅值与相位的 APES 法计算结果。图 10 中横轴为无量纲化的幅值, 定义为各频率处幅值与该频率处

均值的比值。

由图 10 可知, 在各频率处幅值分布近似一致, 均为先急剧上升再急剧下降的趋势, 与对数正态分布较为吻合。

由图 11 可知, 各相位区间的频数大致相等, 表明脉动风速的相位基本符合零均值且均匀分布在 $[-\pi, \pi]$ 区间的规律。

根据图 10, 11 可知, 将塔顶与跨中的脉动风幅值谱均值以及在特定频率点处的幅值分布情况表示在图 12 中。

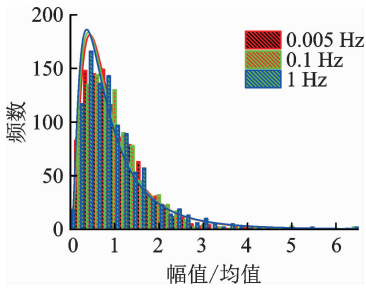


图 10 塔顶处幅值频数分布图

Fig. 10 Histogram of amplitude at the top of the tower using APES algorithm

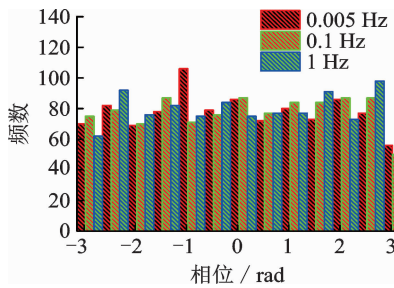


图 11 塔顶处相位频数分布图

Fig. 11 Histogram of phase at the top of the tower using APES algorithm

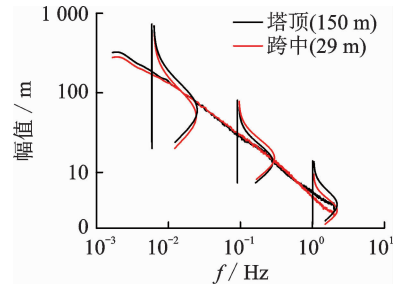


图 12 塔顶与跨中的幅值谱均值与其分布规律

Fig. 12 The mean of fluctuating wind amplitude spectrum and its distribution at the top of the tower and middle of the span

5 结束语

平稳脉动风的幅值谱和相位谱可以很好地描述风场概率特性。为了提高谱估计的质量, 笔者采用 APES 法对闵浦二桥现场实测的风速数据进行了幅值谱与相位谱估计, 并与 DFT 估计结果进行对比。结果表明, APES 具有更高的频率分辨率和幅值识别精度, 是进行现场风谱估计的有效工具。通过对估计得到的幅值谱与相位谱进行统计分析, 发现幅

值谱均值在双对数坐标轴中近似呈线性关系, 各频率处幅值均呈对数正态分布; 相位在 $[-\pi, \pi]$ 上符合均值为 0 的均匀分布, 其规律与已有研究一致。本研究结果可以为桥梁所在地区风荷载估计提供方法参考, 也为此地区的结构抗风设计提供依据。

参 考 文 献

[1] Davenport A G. How can we simplify and generalize wind loads? [J]. Journal of Wind Engineering & In-

- dustrial Aerodynamics, 1995, 54(94): 657-669.
- [2] Campbell S, Kwok K C S, Hitchcock P A, et al. Field measurements of natural periods of vibration and structural damping of wind-excited tall residential buildings[J]. Wind & Structures an International Journal, 2007, 10(5): 401-420.
- [3] 李杰,张琳琳. 脉动风速功率谱与随机 Fourier 幅值谱的关系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 363-369.
Li Jie, Zhang Linlin. A study on the relationship between turbulence power spectrum and stochastic Fourier amplitude spectrum[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 363-369. (in Chinese)
- [4] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its applications[J]. Journal of Sound & Vibration, 1972, 25(1): 111-128.
- [5] Shinozuka M. Simulation of multivariate and multidimensional random processes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(1): 357-368.
- [6] Spanos P D, Mignolet M P. Simulation of homogeneous two-dimensional random fields: part ii--ma and arma models[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(2S): S270-S277.
- [7] 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): 66-72.
Li Jie, Zhang Linlin. Research on the random Fourier spectrum of observational wind[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(1), 66-72. (in Chinese)
- [8] Li J, Stoica P. An adaptive filtering approach to spectral estimation and sar imaging[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(6): 1469-1484.
- [9] Larsson E G, Li J, Stoica P, et al. "High-resolution nonparametric spectral analysis: theory and applications" in high-resolution and robust signal processing [M]. New York: Marcel Dekker, 2003: 153-253.
- [10] Stoica P, Li H, Li J. A new derivation of the apes filter[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(8): 205-206.
- [11] Capon J. Nonlinear methods of spectral analysis topics in applied physics[M]// Maximum-likelihood spectral estimation: Vol. 34. Berlin: Springer, Heidelberg, 1983: 155-179.
- [12] Stoica P, Jakobsson A, Li J. Matched-filter bank interpretation of some spectral estimators[J]. Signal Processing, 1998, 66(1): 45-59.
- [13] JTG/T D60-01-2004. 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:中华人民共和国交通部, 2004.
- [14] 徐安,傅继阳,赵若红,等. 土木工程相关的台风近地风场实测研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1): 23-31.
Xu An, Fu Jiyang, Zhao Ruohong, et al. Field measurements of typhoons according to civil engineering research[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2010, 28(1): 23-31. (in Chinese)
- [15] Fu Jiyang, Li Qiusheng, Wu Jiurang, et al. Field measurement of boundary layer wind characteristics and wind-induced response of super-tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(8-9): 1332-1358.
- [16] 胡晓红,葛耀君,庞加斌. 上海“派比安”台风实测结果的二维脉动风谱拟合[J]. 结构工程师, 2002(2): 41-47.
Hu Xiaohong, Ge Yaojun, Pang Jiabin. The fitting of 2d fluctuating wind spectrum for the actual measurement data of "pba" typhoon in Shanghai[J]. Structural Engineers, 2002(2): 41-47. (in Chinese)
- [17] 申建红,李春祥,李锦花. 基于小波变换和 EMD 提取非平稳风速中的时变均值[J]. 振动与冲击, 2008, 27(12): 126-130.
Shen Jianhong, Li Chunxiang, Li Jinhua. Based on the wavelet transformation and EMD to extract the time-varying mean value of the non-stationary wind speed [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(12): 126-130. (in Chinese)



第一作者简介:王向杰,男,1992年10月生,硕士生。主要研究方向为桥梁结构健康监测与振动控制。曾发表《Numerical investigation and optimal design of fiber bragg grating based wind pressure sensor》《Frontiers of Structural and Civil Engineering》2017, Vol. 11, No. 5)等论文。

E-mail: xwan133@lsu.edu