

# 自适应时频插值非平稳实测风速模拟\*

李春祥, 罗镛兴, 韩 慧, 曹黎媛

(上海大学力学与工程科学学院 上海, 200444)

**摘要** 经典的基于理论规范谱的谱表示法(spectral representation method, 简称 SRM)可有效模拟自然界大部分风速,但在应用于极端恶劣的实测风速模拟时存在较大偏差,且模拟效率低下。针对这一问题,分别以台风“杜鹃”(弱非平稳)和实测下击暴流风速(强非平稳)为研究背景,首先,以实测风速谱为目标,对理论规范谱进行修正,建立基于修正谱的模拟方案,使得模拟风速更加贴近真实的实测风速;其次,在基于修正谱的风速模拟平台中,引入时频插值技术,并以“平均分辨率”为量化指标,设计一种自适应插值增强方案,从二维角度,实现时频域插值点非均匀分布的自动化确定,避免时域、频域上的局部精度损失和人工测试插值参数的麻烦。数值表明:基于上述方案的模拟结果较好地保留了非平稳实测风速的时域特性和功率谱特性;自适应时频插值方案的引入,在误差损失减小 78% 左右的情况下,模拟效率提高了 76% 左右。

**关键词** 实测下击暴流;谱表示法;目标谱修正;时-频插值;自适应方案;非均匀分布

**中图分类号** O324;TU311.4

## 引 言

谐波合成法又称谱表示法<sup>[1]</sup>,SRM 是常用的一种数值模拟方法,能够生成具有指定目标特征的随机过程。该方法物理意义明确、数学表达简洁且模拟结果准确,但计算量大、速度较慢。经典 SRM 的模拟过程如下:首先,确定模拟点处的目标功率谱,常选取经典的功率谱模型作为目标谱(经验得到的规范谱<sup>[2]</sup>);其次,根据目标谱计算多点风速向量的功率谱密度矩阵;然后,对该矩阵进行 Cholesky 分解,该项需要大量的分解次数,是模拟耗时的主要因素;最后,将分解结果及其他参数代入谐波叠加公式,即可得到模拟点处的风速序列。

基于 SRM 的风速模拟研究大多针对非平稳风,因为非平稳风的进化功率谱密度(evolutionary power spectral density, 简称 EPSD)矩阵具有时间依赖性<sup>[3]</sup>,会导致 Cholesky 分解的次数急剧增加,模拟效率低下。为提高模拟效率,Ding 等<sup>[4]</sup>在 Cholesky 分解结果的频域方向引入了插值技术。Tao 等<sup>[5]</sup>研究了不同插值函数、插值点间隔和插值点的分布方式等对插值效果的影响。Bao 等<sup>[6]</sup>提出了时-频插值的想法,对 EPSD 的 Cholesky 分解结果在时间和频率两个维度上同时进行插值。这些基于插值技术的改

进研究极大地提高了非平稳风的模拟效率,但都是针对理论规范谱的模拟方法。规范谱是根据大量实测风速数据统计分析得到的经验公式,一定程度上可以表征大部分风速的功率谱特性。实际自然界中的风速是千变万化的,尤其是对于一些极端恶劣的雷暴风而言,规范谱和实测风速谱之间存在较大偏差。对于极端实测风速的模拟研究,不能仅依托于理论规范谱,需做针对性的改进。

通过对非平稳实测极端风的特性研究发现,其 EPSD 在时域及频域上的变化都很强烈,若直接采用实测风速谱为目标谱,可有效模拟实测风速,但难以引入插值技术。文献[7-8]根据现场实测风速的功率谱特性,对理论规范谱进行了频域修正,但未考虑其时域分布情况。以往基于规范谱的模拟研究,在进行插值时通常只考虑了频域方向插值点的分布合理性,而忽略了时域方向,如文献[5,9]都是针对频域方向的插值点分布优化。

因此,笔者以台风“杜鹃”<sup>[10]</sup>和美国 Reese 技术中心的实测下击暴流<sup>[11]</sup>风速数据为研究背景,建立了基于自适应时频插值技术的非平稳实测风速模拟方案。在基于修正谱模拟的时域、频域方向引入插值技术,并以“平均分辨率”<sup>[12]</sup>为量化指标,设计了一种自适应方案,以实现非平稳实测风速的高精度快速模拟。

## 1 理论基础

改进的实测风速模拟方案的主要思路是:采用从非平稳实测风速中提取的时变平均风速和修正谱,替换经典SRM中的自定义时变平均风速和规范谱。

### 1.1 改进的谱表示法

设  $V(t) = \{V_1(t), V_2(t), \dots, V_N(t)\}^T$  为  $N$  条非平稳实测风速数据,采用基于实测谱的SRM来模拟该非平稳随机过程,主要步骤如下。

1) 提取实测风速功率谱和时变平均风速。采用滑动平均法<sup>[13]</sup>提取  $N$  条非平稳实测风速的时变平均风速,记为  $\bar{V}_j(t), j = 1, 2, \dots, N$ 。提取趋势项后,可得到实测风速的脉动部分。采用 Priestley<sup>[14]</sup>提出的基于演化理论的频谱估计方法,分别计算  $N$  条实测脉动风速数据的功率谱,记为  $S_j(\omega, t)$ ,将  $S_j(\omega, t)$  作为模拟的目标谱。

2) 计算多点风速功率谱密度矩阵。多点非平

$$\gamma_{jk}(\omega, t) = \exp\left(\frac{-\omega \sqrt{C_x^2(x_j - x_k)^2 + C_y^2(x_j - x_k)^2 + C_z^2(x_j - x_k)^2}}{\pi [\bar{V}_j(t) + \bar{V}_k(t)]}\right) \quad (4)$$

$$\phi_{jk}(\omega, t) = \frac{\omega}{\pi} \frac{C_\phi \Delta z}{\bar{V}_j(t) + \bar{V}_k(t)} \quad (5)$$

其中:  $C_x, C_y, C_z$  分别为空间任意两点左右、上下、前后的衰减系数,通常取  $C_x = 16, C_y = 8, C_z = 10$ ;  $C_\phi$  为相位角的衰减系数,通常取 5.5。

3) Cholesky 分解。由于时变功率谱  $G(\omega, t)$  在任意时刻  $t$  都是 Hermitian 非负矩阵,因此可以对其进行 Cholesky 分解

$$G(\omega, t) = H(\omega, t) H^{T*}(\omega, t) \quad (6)$$

非对角元素可以表示为极坐标的形式

$$H_{jk}(\omega, t) = |H_{jk}(\omega, t)| e^{i\theta_{jk}(\omega)} \quad (7)$$

$$\theta_{jk}(\omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im} [H_{jk}(\omega, t)]}{\text{Re} [H_{jk}(\omega, t)]} \right\} \quad (8)$$

其中:  $\text{Im}$  和  $\text{Re}$  分别表示复数的虚部和实部。

4) 谐波叠加。多点非平稳随机过程中的第  $j$  点处的脉动风速可采用式(9)进行模拟

$$V_{mj}(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^{N_k} |H_{jk}(\omega_l, t)| \cos[\omega_l t - \theta_{jk}(\omega_l) + \Phi_{kl}] \quad (9)$$

其中:  $N_k$  为频域离散个数;  $\Delta\omega = \omega_u/N_k$  为频率增量,  $\omega_u$  为上限截止频率,即当  $\omega > \omega_u$  时,  $S(\omega) = 0$ ,  $\omega_u$  通常取  $4\pi$ ;  $\omega_l = l\Delta\omega$  为索引频率;  $\Phi_{kl}$  为均匀分布于  $[0, 2\pi]$  上的随机相位角。

稳随机过程的时变功率谱密度矩阵可表示为

$$G(\omega, t) = \begin{bmatrix} G_{11}(\omega, t) & G_{12}(\omega, t) & \cdots & G_{1N}(\omega, t) \\ G_{21}(\omega, t) & G_{22}(\omega, t) & \cdots & G_{2N}(\omega, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1}(\omega, t) & G_{N2}(\omega, t) & \cdots & G_{NN}(\omega, t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中矩阵各元素可表示为

$$G_{jj}(\omega, t) = S_j(\omega, t) \quad (2)$$

$$G_{jk}(\omega, t) = \gamma_{jk}(\omega, t) \sqrt{S_j(\omega, t) S_k(\omega, t)} e^{-i\phi_{jk}(\omega, t)} \quad (3)$$

其中:  $S_j(\omega, t)$  和  $S_k(\omega, t)$  分别为  $V_j(t)$  和  $V_k(t)$  的自功率谱函数;  $\gamma_{jk}(\omega, t)$  为  $V_j(t)$  和  $V_k(t)$  之间的复数相干函数;  $\phi_{jk}(\omega, t)$  为  $V_j(t)$  和  $V_k(t)$  之间的相位角。

相比于时不变相干函数,时变相干函数对于结构的动力响应更强,更符合实际情况<sup>[15]</sup>。因此,笔者采用时变相干函数进行模拟。考虑行波效应所引起的相位差,即不同的空间位置处的波,由于波的传播存在延迟现象,相干函数和相位角函数可表示为

第  $j$  点处的非平稳模拟风速为

$$V_j(t) = \bar{V}_j(t) + V_{mj}(t) \quad (10)$$

### 1.2 目标谱修正

笔者以实测风谱为目标,采用最小二乘拟合法,对理论规范谱模型进行修正,从而使得基于修正谱的SRM既比较贴近真实的实测数据,又可以引入插值技术以提高模拟效率。选用 Kaimal 谱<sup>[16]</sup>的风谱形式,经时域扩展获取非平稳风速的时变功率谱,即

$$S(\omega, t) = \frac{a}{4\pi} u_*^2 \frac{z}{U_z(t)} \frac{1}{\left[1 + b \frac{\omega z}{2\pi U_z(t)}\right]^{5c/3}} \quad (11)$$

$$u_* = kU_z(t) / \ln(z/z_0) \quad (12)$$

其中:  $u_*$  为剪切速度;  $U_z(t)$  为自定义时变平均风速。

在规范谱中,基本参数  $a, b, c$  的取值分别为 200, 50 和 1, 时变平均风速常使用正弦函数形式。现需要对目标谱进行修正,使得风谱模型更加贴近实测风速谱。首先,采用从实测风速中提取的时变平均风速替代公式中的平均风速;其次,将公式中的参数  $a, b, c$  作为待定系数,采用最小二乘拟合法以实测风速谱为目标值,对公式中的待定系数进行拟合求解;最后,得到待定系数的最小二乘解为  $a = 243.75, b = 47.62, c = 1.24$ 。因此,基于实测风速得到的修正谱可表示为

$$S(\omega, t) =$$

$$\frac{243.75}{4\pi} u_*^2 \frac{z}{\bar{V}_z(t)} \frac{1}{\left[1 + 47.62 \frac{\omega z}{2\pi \bar{V}_z(t)}\right]^{6.2/3}} \quad (13)$$

其中:  $\bar{V}_z(t)$  为从实测风速中提取的时变平均风速。  
分别以台风“杜鹃”和美国下击暴流作为常见风

和极端风的代表。图1所示为常见风和极端风修正前后的非平稳风速目标谱。分别在EPSD的时域及频域方向取切片,以  $f=0.202$  Hz 频率位置和  $t=703.13$  s 时刻位置的切片结果为例,风速谱在时、频域上的对比如图2所示。

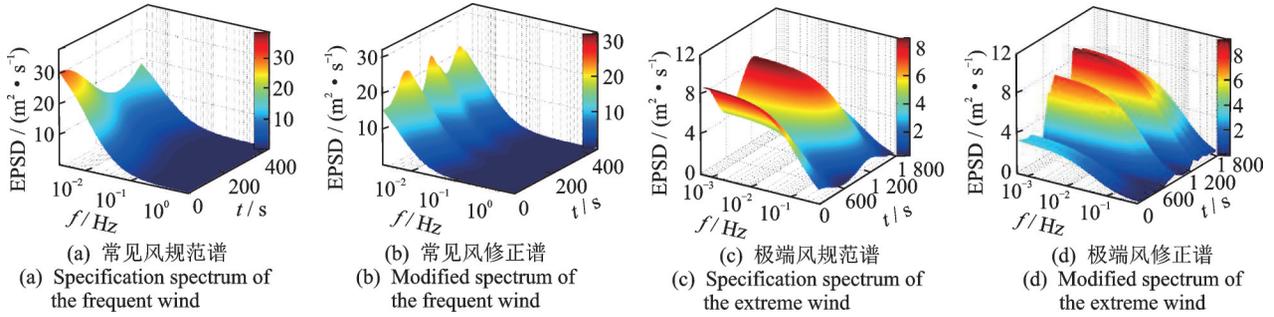


图1 修正前后的目标谱

Fig.1 Target spectrum before and after correction

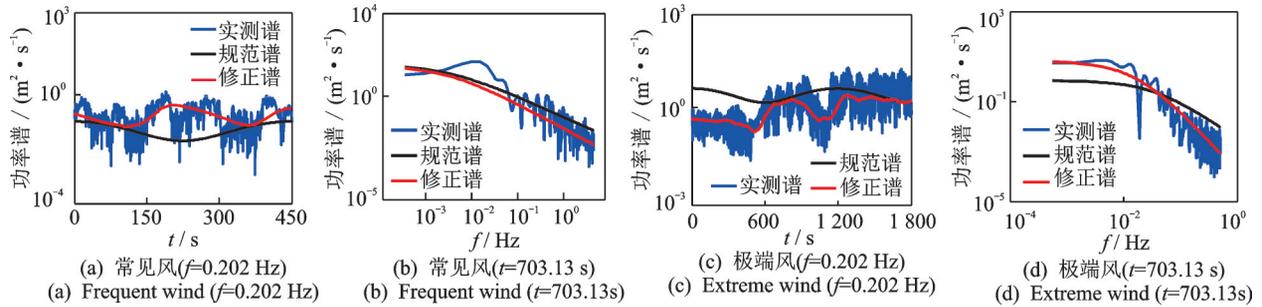


图2 风速谱在时、频域上的对比图

Fig.2 Comparison of the wind velocity spectrum in the time and frequency domain

由图可知:经验得到的理论规范谱和弱非平稳的常见风速谱较为吻合,可较好地实现实测风速模拟,经修正后吻合程度更高;规范谱和极端风速谱之间则存在较大差距,仅依托于规范谱进行模拟会产生较大误差,经修正后的风速谱与实测风速谱的变化趋势更加吻合。这说明该修正方法在非平稳特征比较剧烈的极端风速场中具有更明显的改善效果,因此更加适用于极端风速情况。

## 2 自适应时频插值方案

### 2.1 自适应算法

在基于修正谱的SRM中引入插值技术,插值应用在功率谱矩阵分解后的H矩阵元素上,可以大幅减少Cholesky分解的次数,从而提高实测风速的模拟效率。自适应时频插值的具体步骤如下:

- 1) 采用自适应方案确定时域、频域插值点的分布位置;
- 2) 计算插值点处的功率谱矩阵,然后对其进行Cholesky分解;

3) 采用三次样条插值重构分解结果;

4) 将重构后的功率谱矩阵分解结果代入谐波叠加公式,得到模拟风速序列。

自适应插值增强方案流程如图3所示,以“平均分辨率”<sup>[12]</sup>为量化指标,设计了一种全新的自适应插值增强方案,能够自动确定插值点的非均匀分布位置。该方案简单、方便、有效,并可以同时应用于时频域两个方向,避免人工调试插值参数的麻烦。“平均分辨率”即插值曲面上任意位置处的分辨率和信息量是平均化的,点与点之间的距离近似相等。其核心思想是保证时频域插值曲面上的插值点分布均衡。图中的轨迹长度函数和平均间隔可表示为

$$L(t(m)) = L(t(m-1)) + \sqrt{\Delta t^2 + [H(t(m)) - H(t(m-1))]^2} \quad (14)$$

$$L(\omega(n)) = L(\omega(n-1)) + \sqrt{\Delta \omega^2 + [H(\omega(n)) - H(\omega(n-1))]^2} \quad (15)$$

$$\begin{cases} dl_t = L(t(N_t))/n_t \\ dl_\omega = L(\omega(N_\omega))/n_\omega \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $m = 2, 3, \dots, N_t$ ;  $n = 2, 3, \dots, N_\omega$ ;  $N_t, N_\omega$  分别

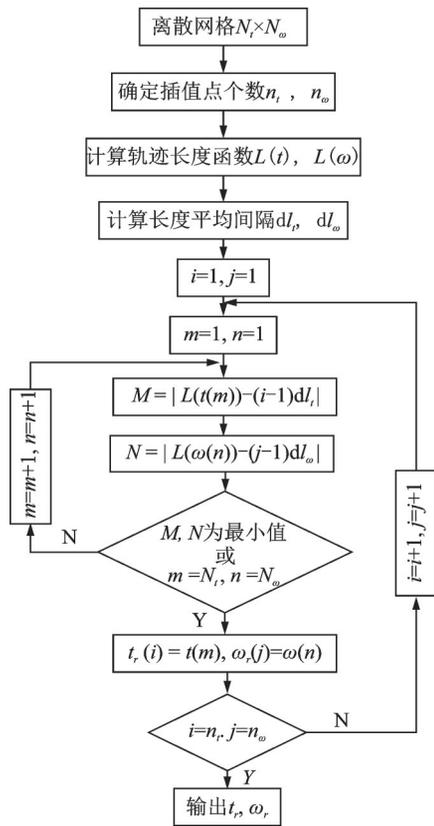


图3 自适应插值增强方案流程图

Fig.3 Flowchart of adaptive interpolation enhanced scheme

为时域、频域离散个数;  $n_t, n_\omega$  分别为时域、频域插值点个数;  $L(t(1))=L(\omega(1))=0$ ;  $\omega, t$  分别为均匀分

布的频率及时间序列;  $\omega_r, t_r$  分别为经自适应方案优化后的非均匀分布的频率及时间序列。

### 2.2 插值点分布位置

图4所示为传统均匀插值分布方案和自适应时频插值方案的插值点分布位置。对于均匀插值分布方案,插值网格点存在着局部稀疏和局部紧密的特征。局部稀疏导致插值分辨率较低,插值精度下降;局部紧密保证了插值精度,但计算量较大,效率降低。对于自适应方案,插值点在插值曲面上的分布变得更加均衡。图4(d)中将局部图形放大后,曲线上的插值点分别为  $a, b, c, d, e$  和  $f$ , 其中  $ab \cong bc \cong ad \cong de \cong df$ 。网格边长近似相等,保证了插补曲面上各插值点在时频域内的分辨率相等,可以有效提高H矩阵数据重构的有效性和准确性。

为更清晰地了解插值点在时、频域上的分布情况,分别在  $f=0.202$  Hz 和  $t=703.13$  s 时的位置取切片。图5为插值点在时域和频域方向上的分布位置,由图可知:基于自适应方案得到的插值点,无论是在时域还是频域上都比均匀分布方案分布的更加合理。基于实测风速修正谱的分解结果在时域方向的变化曲线存在着很多急剧增加和急剧减小的部位,笔者所提出的自适应时频插值方案,从二维角度出发,兼顾时域方向,进一步优化了插值点分布位置。

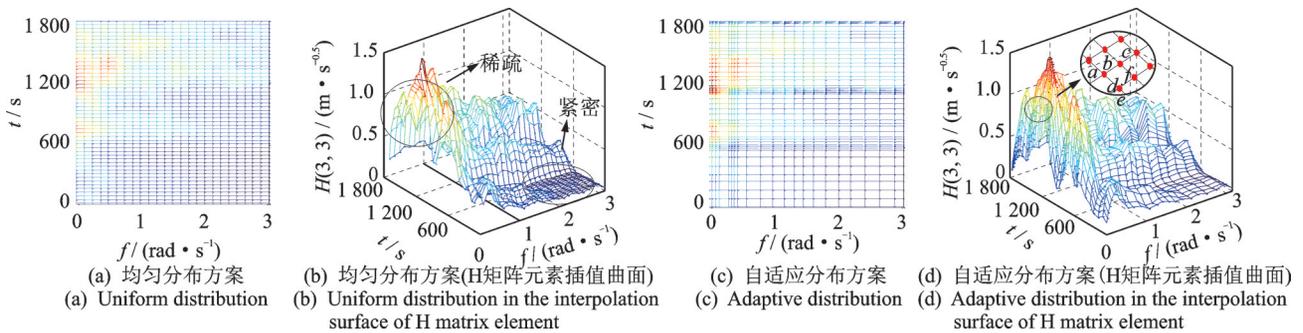


图4 插值点的分布位置

Fig.4 The distribution position of the interpolation points

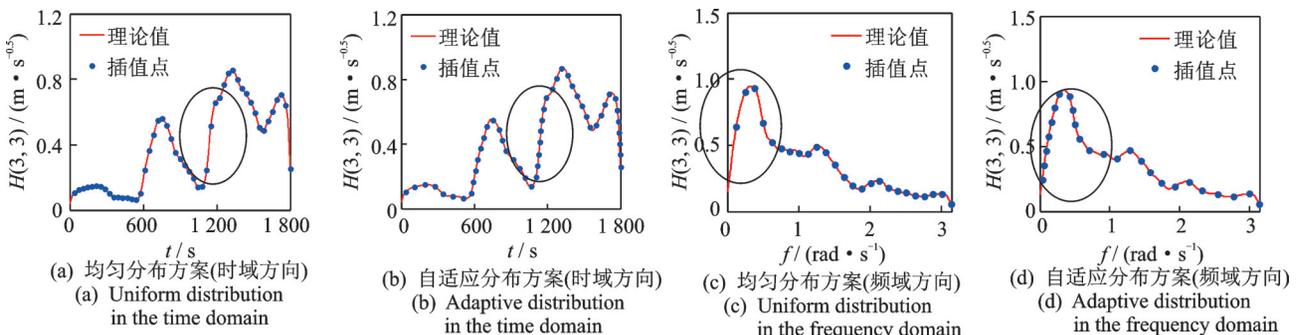


图5 插值点在时域和频域方向的分布位置

Fig.5 The distribution position of the interpolation points in the time and frequency domain

### 3 模拟案例

笔者选用香港昂船洲大桥的实测台风“杜鹃”<sup>[10]</sup>的数据,作为具有弱非平稳特征的常见风代表;选用美国德克萨斯州卢伯克市 Reese 技术中心的实测下击暴流<sup>[11]</sup>数据,作为具有强非平稳特征的极端风代表。两组结果印证了本研究的修正方案在极端风上更有现实意义(图 1 和 2)。以下击暴流风速为重点,对模拟结果进行分析。

该下击暴流的实测概况如下:采用 7 个便携式发射塔和风向标风速计于 2002 年 6 月 5 日记录了一段下击暴流风速事件,相当于 50 年重现期的雷暴风速。发射塔由北向南阵列布置,2 座塔楼相距 263 m,跨度为 1 578 m,4 号塔高为 15 m。现场试验在 4 号塔 1~5 点处所观测到的下击暴流风速呈现出强烈的非平稳特征,选取该 5 点处的顺风向风速作为研究数据,采测点的位置高度分别为 2,4,6,10 和 15 m。

模拟的其他参数条件取值为:地面粗糙度指数  $z_0=0.02$  m,采样频率  $f=1$  Hz;时域离散个数  $N_t=1800$ ;频域离散个数  $N_\omega=900$ ;插值间隔  $IN=36$ ;时域插值点个数  $n_t=N_t/IN=50$ ;频域插值点个数  $n_\omega=N_\omega/IN=25$ 。

图 6 为该实测下击暴流风速测点布置及数据预处理操作<sup>[17]</sup>。采用滑动平均法<sup>[13]</sup>提取 5 点实测风速数据的趋势项,将非平稳风速分为时变平均部分和脉动部分,再采用 Priestley<sup>[14]</sup>提出的基于演化理论的频谱估计方法,分别计算 5 条实测脉动风速数据的 EPSD,并以此作为上述模拟方案的修正目标。为方便绘图,图中展示的是 5 点实测风速

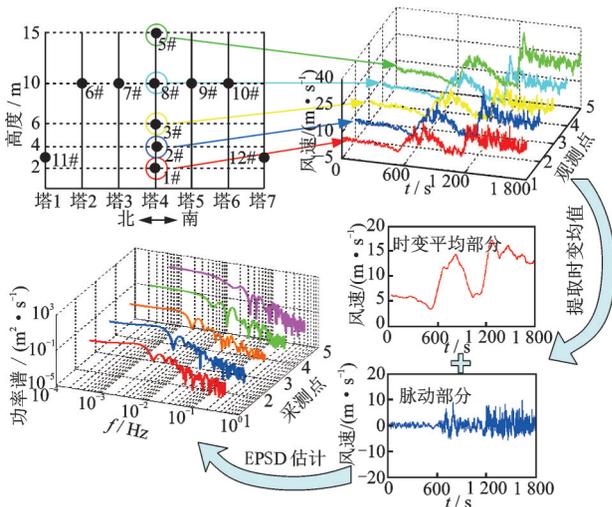


图 6 实测下击暴流风速测点布置及数据预处理

Fig.6 Layout and data preprocessing of measured downburst wind velocities

EPSD 的频域切片结果,切片位置为  $t=703.13$  s。

#### 3.1 模拟结果

基于上述实测背景和模拟方案,对非平稳实测下击暴流风速数据进行模拟验证。以 4 号塔测点 3 处风速结果为例,图 7 为该点脉动风速模拟结果比较,图 8 为非平稳风速模拟结果比较。由图可知:基于修正谱和自适应时频插值的模拟风速与实测风速的趋势和幅度都比较吻合,较好地保留了实测风速的非平稳时域特性。

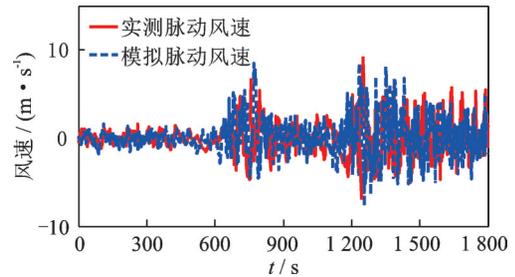


图 7 脉动风速模拟结果比较

Fig.7 Comparison of fluctuating wind velocity

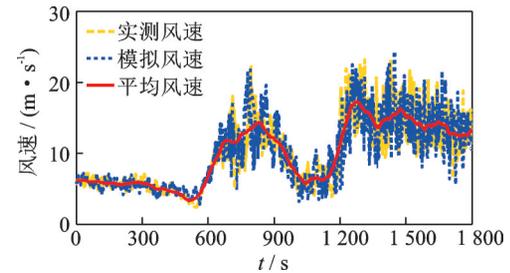


图 8 非平稳风速模拟结果比较

Fig.8 Comparison of non-stationary wind velocity

图 9 为测点 3 处实测风速和模拟风速 EPSD 的三维视图。图 10 为实测与模拟 EPSD 的切片图,切片位置为  $f=0.202$  Hz 和  $t=703.13$ 。由图可知:实测风速和模拟风速的 EPSD 在时频域上的分布非常相似,无明显差别;时频域方向上的变化趋势也吻合良好,基于修正谱和自适应时频插值的模拟风速较好

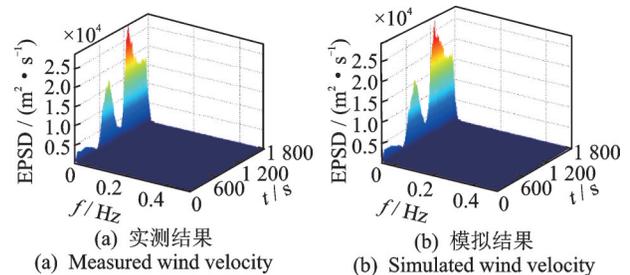


图 9 实测风速与模拟风速的 EPSD

Fig.9 The EPSD of the measured wind velocity and the simulated wind velocity

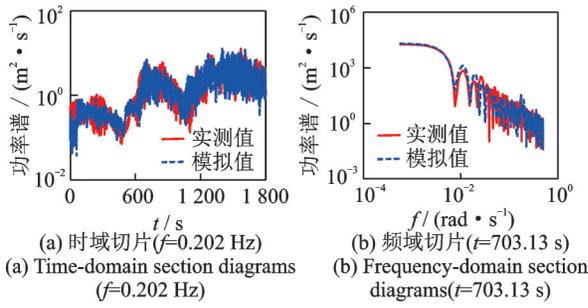


图10 实测与模拟EPSD的切片图

Fig.10 The section diagrams of measured and simulated EPSD

地保留了实测风速的功率谱特性。

### 3.2 修正结果

多点功率谱密度矩阵的Cholesky分解结果是一个下三角矩阵, H矩阵。在该矩阵元素的不同位置处取切片, 绘制出其在时域和频域上的变化结果。图11, 12分别为基于实测谱的Cholesky分解结果和基于修正谱的Cholesky分解结果在时域和频域上的切片图。

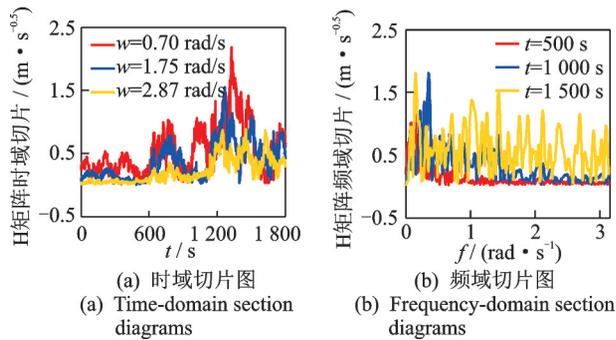


图11 基于实测谱的Cholesky分解结果

Fig.11 The result of Cholesky decomposition based on the measured spectrum

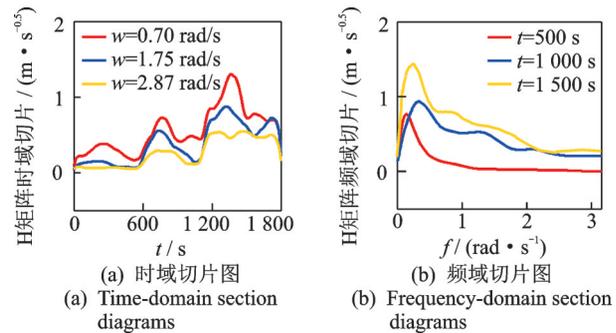


图12 基于修正谱的Cholesky分解结果

Fig.12 The result of Cholesky decomposition based on the modified spectrum

由图可知: 基于修正谱的分解结果在时频域上的变化曲线与实测结果非常相似, 但平滑了很多。由于极端风的时变平均风速变化幅度比较强, 其变

化曲线依然存在多处骤升和骤降的情况, 这在插值时很容易产生局部精度损失。风速能量的分布在频域方向会随着频率的增大而衰减, 主要集中在低频区域; 而在时域方向无固定的分布特征, 具有不确定性。因此, 研究时域和频域上插值点的非均匀分布和根据风场环境的自适应调整非常重要。

### 3.3 插值结果

采用三次样条插值函数, 插值间隔设置为  $36\Delta\omega$ , 时域和频域方向的插值点个数分别为50和25。以Cholesky分解结果的矩阵元素  $H(3,3)$  为例, 分别在矩阵元素  $t=703.13$  s 时刻位置和  $f=0.634$  rad/s 频率位置处取切片。图13, 14分别为基于不同方案的时域和频域插值结果。由图可知, 与均匀分布方案相比, 自适应插值增强方案的结果更接近无插值方案。基于实测极端风速修正谱的Cholesky分解结果在时域方向的变化也较为剧烈, 自适应方案在时域方向有明显改善效果。

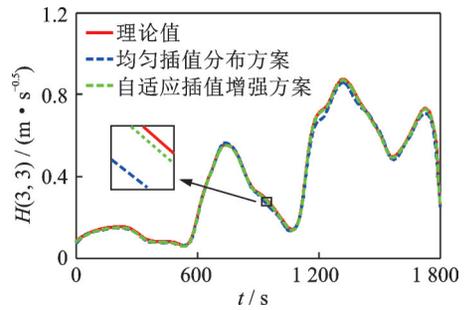


图13 基于不同方案的时域插值结果

Fig.13 Interpolation results based on different schemes in time domain

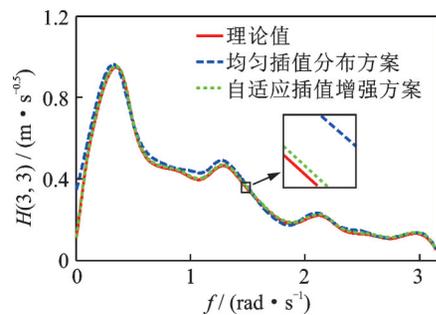


图14 基于不同方案的频域插值结果

Fig.14 Interpolation results based on different schemes in frequency domain

### 3.4 精度和效率

计算平台包括: 处理器 Inter(R) Core(TM) i7-6600U CPU@ 2.60 GHz; 内存 16 GB, 不曾采用并行计算。基于本研究实测下击暴流案例背景, 在插

值间隔为  $36\Delta\omega$ 、模拟点为 5 的情况下,表 1 统计了采用不同插值方案的插值误差和模拟耗时。插值方案包含无插值、Ding 等<sup>[4]</sup>提出的频域插值以及 Bao 等<sup>[6]</sup>提出的时频插值;插值点分布方案包含均匀分布、Tao 等<sup>[5]</sup>提出的四次多项式分布和指数分布以及笔者提出的自适应方案。采用平均相对误差(mean relative error, 简称 MRE)和均方根误差(root-mean-square error, 简称 RMSE)分别计算了时域和频域上的插值误差,将时域和频域方向的平均相对误差的平均值作为插值方案的综合误差。

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_n - \hat{H}_n|}{\hat{H}_n} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_n - \hat{H}_n)^2} \quad (18)$$

数据显示:笔者提出的自适应时频插值技术,在误差损失减少 78% 左右的情况下,节省了约 76% 的计算时间;时频插值相较于频域插值,也节省了约 35% 的计算时间;自适应方案相较于四次多项式分布和指数分布,误差损失最小,精度最高,并且可同时适用于时域、频域方向,而四次多项式分布和指数

分布仅适用于频域方向。

图 15 为基于不同插值分布方案的误差统计。由图可知:随着插值间隔的增大(插值点减少),插值误差随之增大。同表 1 结果对应,非均匀插值分布方案与经典的均匀插值分布结果相比,插值误差大大减少。笔者所提出的自适应插值增强方案,兼顾时频域精度,相比其他非均匀分布方案也有所提高。将 5% 作为误差上限,在误差上限内,可以选用更大的插值间隔(更少的插值点),从而进一步提高模拟效率。

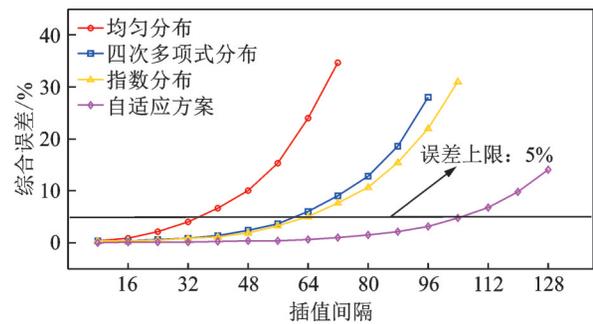


图 15 不同插值分布方案的误差统计

Fig.15 Error statistics of different interpolation distribution schemes

表 1 不同插值方案的插值误差和模拟耗时

Tab.1 Interpolation error and simulation time of different interpolation schemes

方案	MRE/%	RMSE	综合误差/%	计算时间/s	$\frac{t_i}{t_0}/\%$
无插值	0	0	0	$t_0=655.2$	—
频域插值+均匀分布	3.73	0.018 3	3.73	$t_1=237.6$	36.26
频域插值+四次多项式分布	1.02	0.005 0	1.02	$t_2=238.8$	36.45
频域插值+指数分布	0.96	0.004 7	0.96	$t_3=238.3$	36.37
时频插值+均匀分布(时域)	2.42	0.011 1	3.08	$t_4=154.3$	23.55
时频插值+均匀分布(频域)	3.73	0.018 3			
时频插值+四次多项式分布(时域)	2.42	0.011 1	1.72	$t_5=156.4$	23.87
时频插值+四次多项式分布(频域)	1.02	0.005 0			
时频插值+指数分布(时域)	2.42	0.011 1	1.69	$t_6=156.8$	23.93
时频插值+指数分布(频域)	0.96	0.004 7			
时频插值+自适应方案(时域)	0.58	0.003 4	0.67	$t_7=158.7$	24.22
时频插值+自适应方案(频域)	0.76	0.004 2			

## 4 结 论

1) 在时频域上对经验时变风谱模型进行修正,建立了基于修正谱的 SRM,修正后的风谱模型更符合实测风速谱的分布情况,模拟结果也更贴近实测风速。

2) 对于非平稳实测风速,传统插值不仅会在频域上产生局部精度损失,在时域上也存在较为严重

的局部精度损失。

3) 自适应方案的引入,优化了插值点的分布位置,避免了时频域上的局部精度损失和人工调试插值参数的麻烦。

4) 基于自适应时频插值技术的模拟方案,在减少 78% 左右误差损失的情况下,节省了约 76% 的计算时间。

5) 笔者提出的模拟方案较好地保留了非平稳

实测风速的时域特性及功率谱特性,并有效实现了非平稳实测风速的快速模拟。自适应方案的思路比较简单,在时-频插值上引入该方案仅增加了很小的模拟耗时,其对于模拟效率的影响会随着模拟点个数的增加而减弱,在大尺度的非平稳实测风速模拟上具有更好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] RICE S O. Mathematical analysis of random noise [J]. Bell System Technical Journal, 1944, 23(3): 282-332.
- [2] 王浩,陶天友,郭彤,等. 基于实测与规范风谱的三塔悬索桥抖振性能对比[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5):986-992.  
WANG Hao, TAO Tianyou, GUO Tong, et al. Comparable study on buffeting performance of triple-tower suspension bridge based on measured wind spectrum and specification wind spectrum[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5):986-992.(in Chinese)
- [3] HUIY, LI B, HIROMASA K, et al. Non-stationary and non-Gaussian characteristics of wind speeds[J]. Wind and Structures, 2017, 24(1):59-78.
- [4] DING Q S, ZHU L D, XIANG H F. Simulation of stationary Gaussian stochastic wind velocity field[J]. Wind and Structures, 2006, 9(3):231-243.
- [5] TAO T Y, WANG H, YAO C Y, et al. Efficacy of interpolation-enhanced schemes in random wind field simulation over long-span bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(3):04017147.
- [6] BAO X M, LI C Y. Fast simulation of non-stationary wind velocity based on time-frequency interpolation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 193:103982.
- [7] 刘颖莲,郁永静,丁平. 基于高海拔实测风速的脉动风速功率谱研究[J]. 水力发电, 2019, 45(10): 102-105, 110.  
LIU Yinglian, YU Yongjing, DING Ping. Research on wind speed spectrum based on field measurement at high altitude[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 45(10):102-105, 110. (in Chinese)
- [8] 杨素珍. 基于实测风特性的台风模拟研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(5): 89-94.  
YANG Suzhen. Typhoon simulation study based on measured wind characteristics[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2019, 38(5):89-94. (in Chinese)
- [9] JIANG Y, ZHAO N, PENG L L, et al. Simulation of stationary wind field based on adaptive interpolation-enhanced scheme[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 195:104001.
- [10] CHEN J, MICHAEL C H, XU Y L. A comparative study of stationary and non-stationary wind models using field measurements[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 122(1):105-121.
- [11] ORWIG K D, SCHROEDER J L. Near-surface wind characteristics of extreme thunderstorm outflows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(7): 565-584.
- [12] 李振海,汪海洪. 重力数据网格化方法比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1): 140-144.  
LI Zhenhai, WANG Haihong. Comparison among methods for gravity data gridding[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(1):140-144. (in Chinese)
- [13] 裴益轩,郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001, 1(7):21-23.  
PEI Yixuan, GUO Min. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Gun Launch and Control Journal, 2001, 1(7):21-23. (in Chinese)
- [14] PRIESTLEY M B. Power spectral analysis of non-stationary random processes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 6(1):86-97.
- [15] PENG L L, HUANG G Q, CHEN X Z, et al. Evolutionary spectra-based time-varying coherence function and application in structural response analysis to downburst winds[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(7):04018078.
- [16] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence[J]. Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417):563-589.
- [17] 李春祥,李洲. 基于EVSEWT的下击暴流时变平均风提取[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 450-457.  
LI Chunxiang, LI Zhou. Time-varying mean wind extraction of downburst based on energy valley searching empirical wavelet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3):450-457. (in Chinese)



**第一作者简介:**李春祥,男,1964年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制、结构风工程及结构健康监测。曾发表《Tuned tandem mass dampers-inerters with broadband high effectiveness for structures under white noise base excitations》(《Structural Control and Health Monitoring》2019, Vol.26, No.4)等论文。  
E-mail: li-chunxiang@vip.sina.com