

风荷载作用下脐带塔结构的动力响应计算

Calculation of Dynamic Response for Umbilical Tower Structure under Wind Load

宋雨青¹, 曾岩¹, 周锦航¹
Song Yuqing¹, Zeng Yan¹, Zhou Jinhang¹

1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁大连, 116024

摘要: 脐带塔是作为典型的细长、高耸结构, 往往对风荷载是极为敏感的, 为了抑制风荷载的危害, 必须在设计时充分考虑脐带塔的风致响应。本文从某实际工程中的脐带塔出发, 建立了结构的精细有限元模型, 分别采用等效静力法和瞬态动力学分析计算了风荷载作用下脐带塔的位置响应, 并将结果进行对比, 研究表明: 等效静力法在计算脐带塔这种高耸结构的风致响应时, 会低估风速脉动导致的动力放大效应, 而瞬态动力学分析得到的风致响应结果更加接近真实情况。

关键词: 脐带塔, 等效静力法, 风荷载模拟, 时程分析

0 引言

脐带塔是航天发射场中重要的地面设备之一, 其结构设计的可靠性直接关系到发射任务的安全性、精准性和成功率。作为典型的细长、高耸结构[1], 脐带塔对风荷载是极为敏感的, 在风荷载作用下, 塔体会产生明显的振动, 引起比较大的结构变形, 这不仅会威胁结构自身安全, 造成安全事故, 还可能会影响到发射平台与火箭之间的精密对接, 导致发射任务失败。为了抑制风荷载的危害, 必须在设计时充分考虑脐带塔的风致响应, 从源头遏制风险, 确保脐带塔具备在复杂风场中顺利执行任务的能力。

自然风通常可以看作平均风和脉动风两部分的组合[2], 由于平均风的变化周期远大于一般结构的自振周期, 所以它对结构的影响可以近似看作静力作用, 而脉动风的变化周期通常和结构的自振周期相近, 因而需要按照动荷载来分析, 脐带塔在风荷载作用下的响应由平均分量引起的静力响应和脉动分量引起的动力响应共同组成[3]。

在传统的工程力学中, 一般会通过放大系数将脉动风压的动力效应转化成一个等效静力荷载, 从而使复杂的动力分析问题简化成易于被接受的静力分析问题[4], 然而风荷载等效静力法在应对大跨、柔性或高耸的复杂结构时, 可能会低估其动力放大效应, 导致响应计算结果与实际情况之间存在较大偏差[5], 因此在针对这些结构的抗风设计中更多采用瞬态动力学分析来计算风致响应。

本文首先介绍了某实际工程中脐带塔的工程概况, 并根据工程概况中的外形设计要求和几何参数信息在 Abaqus 中建立了脐带塔结构的精细有限元模型, 围绕两种主要荷载工况, 分别采用风荷载等效静力法和瞬态动力学分析计算了脐带塔的风致响应, 对比两种方法的计算结果。

1 脐带塔有限元模型建立

1.1 工程概况

与传统脐带塔常采用的开放式桁架结构不同, 新型脐带塔选择了封闭式的箱型结构设计, 截面为矩形, 总高度为 92m, 共 23 层。脐带塔的正面向防风减载装置连接, 左右两侧共安装了 7 个脐带臂, 背面设有用于人员通行和检修的通道门。脐带塔的材料为 Q345 钢(弹性模量 210GPa, 泊松比 0.3, 密度 7850kg/m³), 主要由外板、地板和加强筋组成, 总重

量为 565t。

脐带臂是经典的空间桁架结构，材料同为 Q345 钢，尺寸为 $2\text{m} \times 1.2\text{m} \times 15.3\text{m}$ ，可分解成 10 个周期单元，周期单元如图 1 所示，此外还有一根主轴，用于和脐带塔之间的装配，所有构件均采用空心圆管，为提高脐带臂垂直方向的刚度，在距安装位置 9m 处加设了两条斜拉钢丝绳，拉索和桁架之间的夹角约为 30° 。

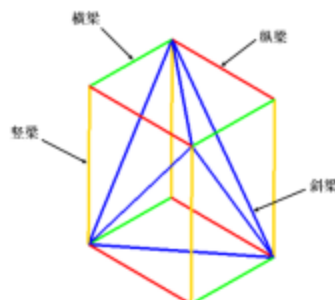


图 1 周期单元示意图

1.2 有限元模型

根据工程概况中的外形设计要求和几何参数信息在 Abaqus 中建立脐带塔的有限元模型，如图 2 所示，脐带塔的外板、地板、加强筋和脐带臂的主轴采用了 S4R 壳单元进行建模，脐带臂的 10 个周期单元采用了 B31 梁单元进行建模，斜拉钢丝绳采用了仅保留轴向自由度的弹簧单元进行模拟。

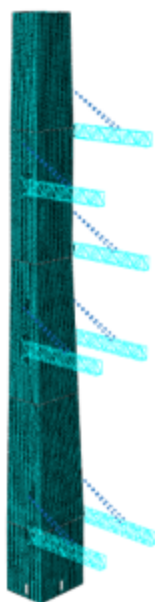


图 2 脐带塔有限元模型

1.3 荷载工况

脐带塔抗风设计的主要荷载工况可根据主风向方位特征决定，本文所选取的主要荷载工况为南向北风工况和东向西风工况，图 3 为两种工况的受风示意图。计算两种工况的风致响应时，除风荷载外还需要考虑结构自重、线缆管道等附加重力以及防风减载装置传递到脐带塔上的荷载。

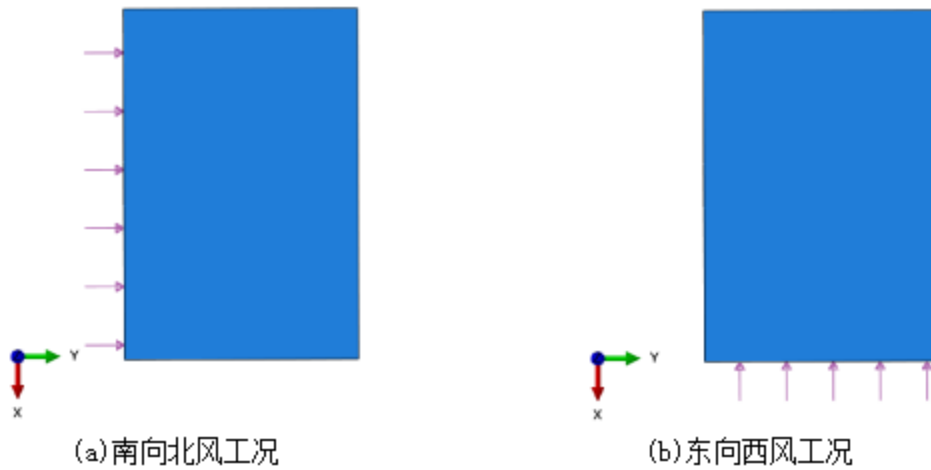


图 3 两种工况的受风示意图

2 等效静力法下的风致响应

2.1 风荷载等效静力法

我国规范 [6] 中规定了应用等效静力法计算风荷载的基本公式，其表达式为：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中， w_k 为单位面积上的等效静力风压； β_z 为 z 高度处的风振系数； μ_s 为风荷载体型系数； μ_z 为风压高度变化系数； w_0 为基本风压，可通过查询规范附录中的全国各城市风压表获得。

风压高度变化系数 μ_z 定义为任意高度的平均风压与基本风压的比值，考虑到脐带塔工作内容的特殊性，其绝大多数时间都存放在技术厂房内，不会长时间暴露在室外，执行任务也不会选在极端天气，所以脐带塔任意高度的平均风压一般可以直接根据平均风速和伯努利公式计算得到：

$$w_a = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (2)$$

式中， ρ 为空气密度，通常取 1.225 kg/m^3 ； \bar{v} 为不同高度下的平均风速，可通过指数律平均风剖面来计算：

$$\frac{\bar{v}(z)}{v_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中， z_r 和 v_r 分别为参考高度和参考高度处的平均风速； z 和 $\bar{v}(z)$ 分别为任一高度和任一高度处的平均风速， α 为地面粗糙度指数。

风荷载体型系数 μ_s 定义为作用在结构上的实际风压与来流风压的比值，其反映了风压在不同结构表面的分布特性。规范中的风荷载体型系数表给出了常见结构风荷载体型系数的计算方法，脐带塔可近似看作超过 45m 的矩形截面高层建筑，其风荷载体型系数如图 4 所示。

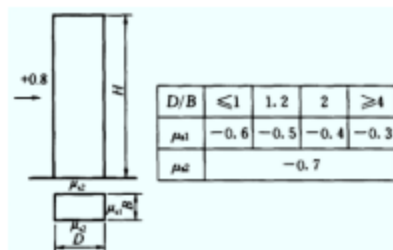


图 4 风荷载体形系数示意图

风振系数 β_z 反映了脉动风压对结构产生的动力放大效应，是风荷载等效静力法中最关键的参数，需结合结构自振特性和阻尼比进行计算。对于一般的竖向悬臂型结构，在计算风振系数时可以仅考虑结构第一阶振型的影响，具体的计算公式为：

$$\beta_z = 1 + 2gI_{10}B_z\sqrt{1 + R^2} \quad (4)$$

式中， β_z 为 z 高度处的风振系数； g 为峰值因子，一般取 2.5； I_{10} 为 10m 高度处的名义湍流强度，A类地貌取 0.12； B_z 为脉动风荷载的共振分量因子； R 为脉动风荷载的背景分量因子。

脉动风荷载的共振分量因子按下列公式计算：

$$R = \sqrt{\frac{\pi x_1^2}{6\xi(1+x_1^2)^{\frac{4}{3}}}} \quad (5)$$

$$x_1 = \frac{30f_1}{\sqrt{k_w w_0}}, x_1 > 5 \quad (6)$$

式中， f_1 为结构的第一阶自振频率； k_w 为地面粗糙度修正系数，A类地貌取 1.28； ξ 为结构阻尼比，对钢结构可取 0.02。

脉动风荷载的背景分量因子按下列公式计算：

$$B_z = kH^\alpha \rho_x \rho_z \frac{\varphi_1(z)}{\mu_z} \quad (7)$$

$$\rho_z = \frac{10 \sqrt{H + 60 \exp\left(-\frac{H}{60}\right)} - 60}{H} \quad (8)$$

$$\rho_x = \frac{10 \sqrt{B + 50 \exp\left(-\frac{B}{50}\right)} - 50}{B} \quad (9)$$

式中， $\varphi_1(z)$ 为结构第一阶振型系数； H 为结构总高度； B 为结构迎风面宽度； ρ_x 和 ρ_z 分别为脉动风荷载水平和竖直方向相关系数； k 和 α 为常数，A类地貌分别取 0.944 和 0.155。

2.2 风致响应静力计算

根据等效静力法分别计算两种工况下不同高度对应的等效静力风压值，具体结果见表 1。

表 1 两种工况下的等效静力风荷载

高度 (m)	平均风速 (m/s)	平均风压 (Pa)	南北向体形系数	南北向风振系数	南北向风压 (Pa)	东西向体形系数	东西向风振系数	东西向风压 (Pa)
10	20	245	1.4	1.015	348	1.3	1.015	323
20	21.73	289	1.4	1.065	431	1.3	1.065	401
30	22.82	319	1.4	1.124	502	1.3	1.125	466
40	23.62	342	1.4	1.195	572	1.3	1.196	531
50	24.26	361	1.4	1.316	664	1.3	1.313	615
60	24.80	377	1.4	1.417	747	1.3	1.403	687
70	25.26	391	1.4	1.555	851	1.3	1.530	778
80	25.67	404	1.4	1.711	966	1.3	1.673	877
90	26.03	415	1.4	1.828	1062	1.3	1.778	960

将表中的等效静力风压结果分段施加到脐带塔的有限元模型上，通过静力计算得到两种设计工况下脐带塔的风致响应，变形云图如图 5 所示。从图中可以看到，两种工况下最

大变形均出现在塔顶,符合悬臂结构的变形特点,南向北风工况的最大变形为 58.82mm,东向西风工况的最大变形为 44.24mm。

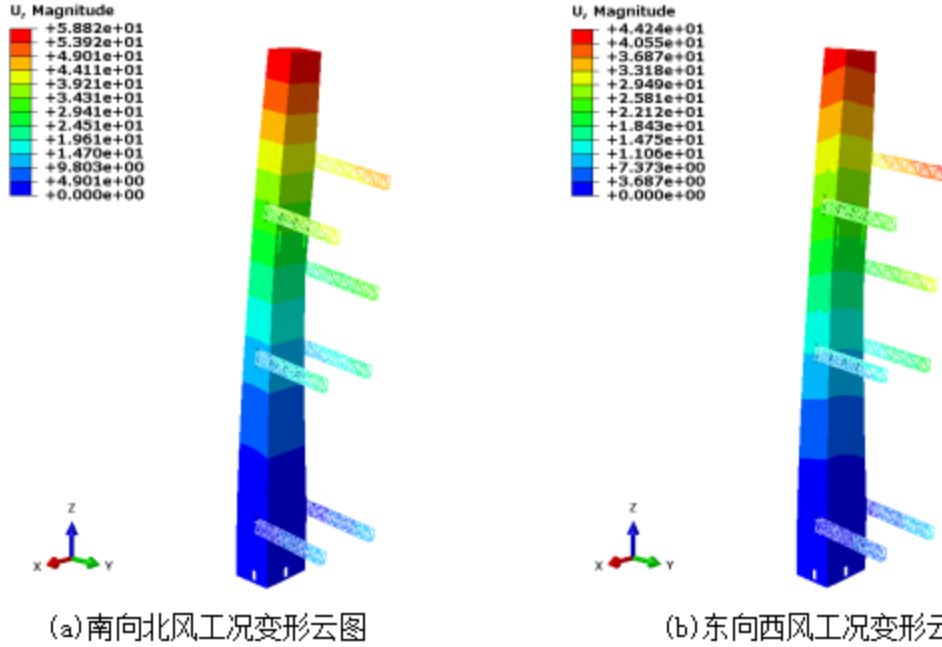


图 5 两种工况下的变形云图

3 风致响应的瞬态动力学分析

3.1 风速时程模拟

若想通过瞬态动力学分析得到结构的风致响应时程,需要先根据给定的风场参数对一段时间内的自然风速进行数值模拟,以计算作用到结构上的风荷载时程。前文提到,自然风速由平均风速和脉动风速两部分组成,而平均风速是一个定常分量,因此风速时程模拟主要针对的是脉动风速。

脉动风作为一个各态历经的零均值平稳正态随机过程,其特征可由功率谱密度函数完全确定[7],目前较为常用的脉动风速时程模拟方法主要包括谐波叠加法和线性滤波法。考虑到计算成本,本文采用了更加高效的线性滤波法来进行脉动风速时程的数值模拟。线性滤波法的基本思想是将随机过程抽象成满足一定条件的白噪声,通过将白噪声输入到一个设计好的滤波器中进行适当变换,调整其频谱特性以匹配目标谱,进而得到该随机过程的时域模型[8]。自回归(Auto-Regressive, AR)模型是线性滤波法中的常用模型,该模型认为时间序列的当前值可以表示为几个过去值的线性组合,再带有一定的随机噪声,对模拟脉动风速而言,可以通过前数个时刻的风速值线性回归产生下一时刻的脉动风速,从而得到整个时间段内的风速时程。

根据 AR 模型,空间中 m 个点的脉动风速时程向量 $V(X, Y, Z, t)$ 如下所示:

$$V(X, Y, Z, t) = \sum_{k=1}^p \psi_k V(X, Y, Z, t - k\Delta t) + N(t) \quad (10)$$

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$, (x_i, y_i, z_i) 是空间中第 i 点的坐标; $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$, 其分量为 m 个空间点的脉动风速; p 为 AR 模型阶数; ψ_k 为 AR 模型回归系数矩阵, 为 $m \times m$ 阶方阵; Δt 为时间步长; $N(t)$ 为 m 维独立随机过程向量, 由下式计算:

$$N(t) = L \cdot n(t) \quad (11)$$

式中, L 为 m 阶下三角矩阵; $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_m(t)]^T$, $n_i(t)$ 为均值为 0, 方差为 1

且彼此相互独立的正态随机过程。

将式(10)两边同时右乘 $V^T(t - h\Delta t)$, $h = 1, 2, \dots, p$, 并取数学期望得

$$E[V(t)V^T(t - h\Delta t)] = \sum_{k=1}^p \psi_k E[V(t - k\Delta t)V^T(t - h\Delta t)] + E[N(t)V^T(t - h\Delta t)] \quad (12)$$

结合相关函数的定义及其偶函数性质, 整理式(12)可得

$$R(h\Delta t) = \sum_{k=1}^p \psi_k R((h - k)\Delta t) \quad (13)$$

式中, $R(h\Delta t)$ 为 $m \times m$ 阶的空间脉动风速相关函数矩阵, 具体如下所示:

$$R(h\Delta t) = \begin{bmatrix} R_{11}(h\Delta t) & R_{11}(h\Delta t) & \cdots & R_{11}(h\Delta t) \\ R_{21}(h\Delta t) & R_{11}(h\Delta t) & \cdots & R_{11}(h\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1}(h\Delta t) & R_{11}(h\Delta t) & \cdots & R_{11}(h\Delta t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

相关函数矩阵中的各元素可通过纳维-辛钦定理依次求出, 其表达式为:

$$R_{ij}(h\Delta t) = \int_0^{\infty} S_{ij}(n) \cos(2\pi n h\Delta t) dn \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

式中, $R_{ij}(h\Delta t)$ 为空间脉动风速 $v_i(t)$ 和 $v_j(t)$ 的相关函数; 当 $i = j$ 时 $S_{ij}(n)$ 为脉动风速的自谱; 当 $i \neq j$ 时 $S_{ij}(n)$ 为脉动风速的互谱, 互谱的表达式为:

$$S_{ij}(n) = Coh_{ij}(r, n) \sqrt{S_{ii}(n)S_{jj}(n)} \quad (16)$$

式中, $Coh_{ij}(r, n)$ 为空间两点之间的相干函数, 可通过下式计算

$$Coh(r, n) = \exp \left[\frac{-2n \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{v(z_i) + v(z_j)} \right] \quad (17)$$

式(13)可进一步整理成如下的矩阵形式:

$$R_{pm \times m} = R_{pm \times pm} \Psi_{pm \times m} \quad (18)$$

式中, $R_{pm \times m} = [R(\Delta t), R(2\Delta t), \dots, R(p\Delta t)]^T$; $\Psi_{pm \times m} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p]^T$; $R_{pm \times pm}$ 写为

$$R_{pm \times pm} = \begin{bmatrix} R(0) & R(\Delta t) & \cdots & R((p-1)\Delta t) \\ R(\Delta t) & R(0) & \cdots & R((p-2)\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R((p-1)\Delta t) & R((p-2)\Delta t) & \cdots & R(0) \end{bmatrix} \quad (19)$$

求解式(18)即可得到 AR 模型的回归系数矩阵 ψ_k , 再将式(10)两边分别同时右乘 $V^T(t)$ 和 $N^T(t)$, 并取数学期望, 整理后可得如下方程组:

$$R(0) = \sum_{k=1}^p \psi_k R(k\Delta t) + R_N \quad (20)$$

$$R_N = L \cdot L^T \quad (21)$$

通过式(20)可解出 R_N , 再对 R_N 进行 Cholesky 分解得到下三角矩阵 L , 利用计算机生成 m 个正态随机序列 $n(t)$, 依据式(11)将两者相乘即可得到独立随机过程 $N(t)$ 。假设初始时

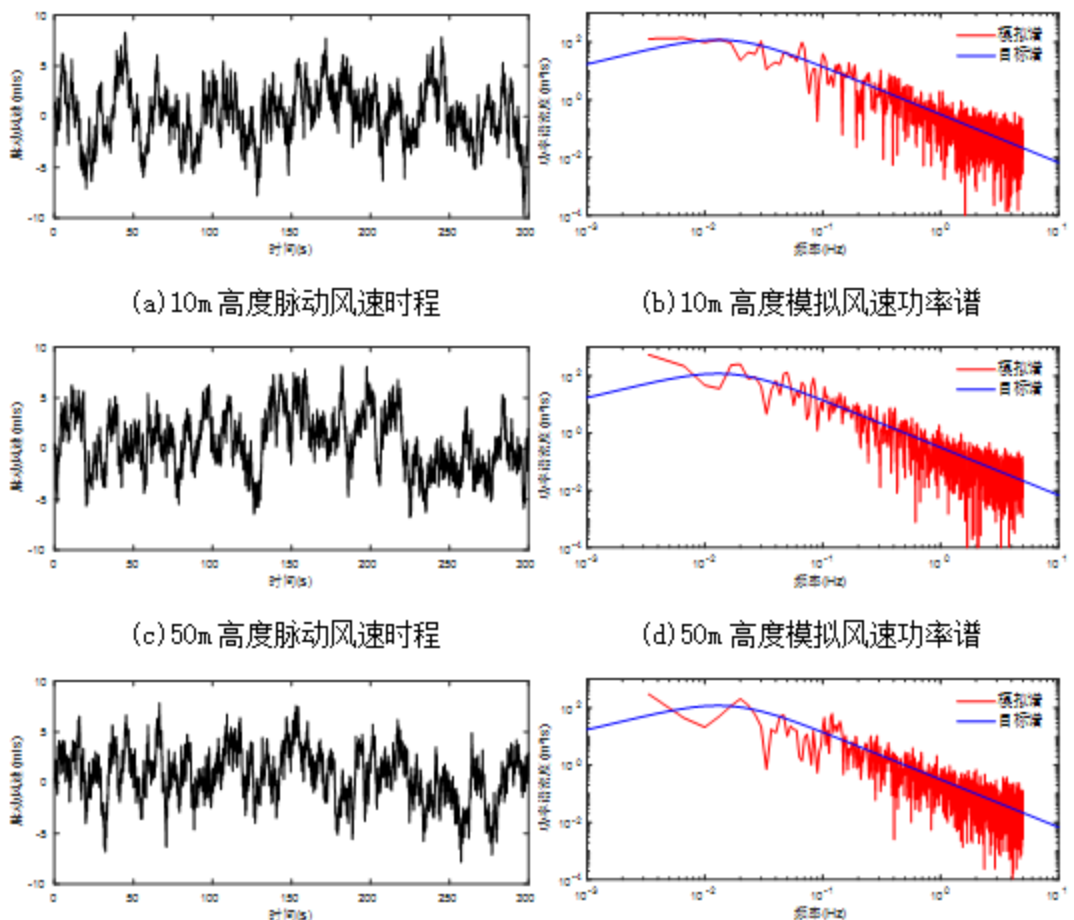
刻的脉动风速为零，将上述求出的回归系数矩阵 ψ_k 和独立随机过程向量 $N(t)$ 代回 AR 模型中，便可根据式 (10) 迭代得到整个时间段内的脉动风速时程。

根据 AR 线性滤波法的基本原理，编写 Matlab 程序来模拟脐带塔的风速时程，将脐带塔按高度每 10m 划分成一个区域，假设同一区域内的风速相同，每个区域就可以简化为一个模拟点，将模拟点取在各区域的最高处，整个结构共取 9 处模拟点，选取 Davenport 谱作为脉动风速目标功率谱，数值模拟过程中所需的主要参数及取值如表 2 所示。

表 2 风速时程模拟的主要相关参数

参数	取值
10m 处标准风速(m/s)	20
地面粗糙度(m)	0.005
AR 模型阶数	4
模拟时长(s)	300
时间间隔(s)	0.1
起始频率(Hz)	0.001
截止频率(Hz)	10
频率间隔(Hz)	0.001

通过 AR 线性滤波法的 Matlab 程序，得到了各模拟点的脉动风速时程。选取模拟点 10m、50m、90m 的脉动风速时程曲线进行展示，分别如图 6(a)、(c)、(e) 所示，从图中可以看到，利用 AR 模型模拟出的各点脉动风速幅值基本都在 $\pm 10\text{m/s}$ 以内来回波动，且不同模拟点处的脉动风速变化规律也不尽相同，表现出了非常明显的随机性。



(e) 90m 高度脉动风速时程

(f) 90m 高度模拟风速功率谱

图 6 脉动风速时程和功率谱密度曲线

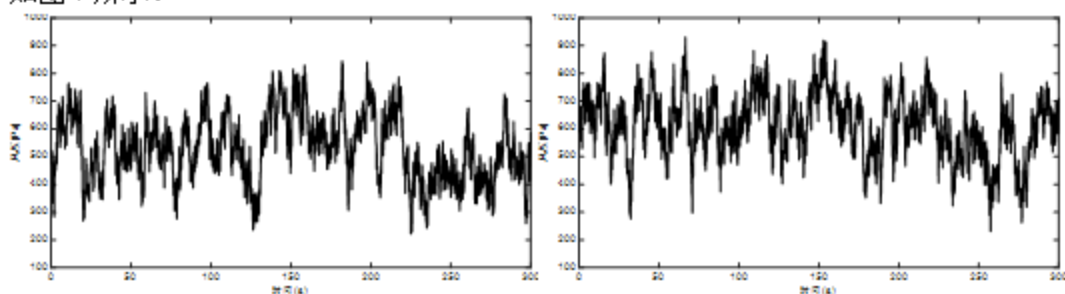
为了验证数值模拟结果的准确性和有效性，需要将模拟得到的脉动风速功率谱和目标风速功率谱(Davenport 谱)进行对比，考察两者之间的吻合程度。功率谱对比图分别如图 6 中 (b)、(d)、(f) 所示，从图中可以看到，模拟风速谱和目标谱的趋势几乎完全一致，表明两者较为吻合，足以证明通过 AR 线性滤波法模拟出的脉动风速时程是真实有效的。

3.2 风致响应动力计算

设自然风的平均风速为 \bar{v} ，脉动风速为 v_f ，则作用在结构上的实际风速为 $(\bar{v} + v_f)$ ，根据准定常假设，结构上任意一点的实际风压可用伯努利公式计算：

$$w = \frac{1}{2} \mu_s \rho (\bar{v} + v_f)^2 = \frac{1}{2} \mu_s \rho (\bar{v}^2 + 2\bar{v} \cdot v_f + v_f^2) \approx \frac{1}{2} \mu_s \rho \bar{v}^2 + \mu_s \rho \bar{v} \cdot v_f \quad (22)$$

利用式 (22) 和前文中得到的平均风速和脉动风速可以计算各时刻的风压，风压时程曲线如图 7 所示。

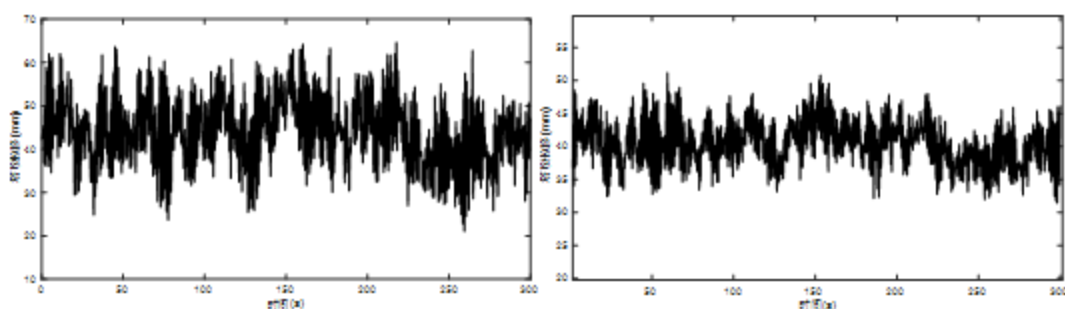


(a) 50m 高度风压时程

(b) 90m 高度风压时程

图 7 风压时程曲线

将模拟出来的风压时程加载到脐带塔的相应区域，利用模态叠加法对脐带塔进行瞬态动力学分析，截断频率取 30Hz，以覆盖风荷载的频率范围，采用 Rayleigh 阻尼，质量阻尼系数 $\alpha = 0.166$ ，刚度阻尼系数 $\beta = 0.0024$ ，分别计算两种工况下的风致响应，求解完毕后，通过后处理模块提取位移响应结果，绘制响应时程曲线，其中塔顶作为最大变形位置，其位移时程曲线如图 8 所示，从图中可以看到，在风荷载作用下，塔体出现了明显的振动，由于脐带塔南北方向的抗弯刚度要小于东西方向的抗弯刚度，因此南向北风工况下的振动要更剧烈一些。



(a) 南向北风工况塔顶位移时程

(b) 东向西风工况塔顶位移时程

图 8 两种工况下塔顶位移时程曲线

4 计算结果对比

将通过等效静力法和瞬态动力学分析得到的风荷载作用下的脐带塔最大位移响应计算结果进行对比，见表 3。

表 3 两种方法的最大位移响应结果对比

工况	等效静力法的最大位移 (mm)	瞬态动力学分析的最大位移 (mm)
----	-----------------	-------------------

南向北风工况	58.82	64.62
东向西风工况	44.24	51.16

从表中可以看到，瞬态动力学分析的最大位移响应计算结果普遍大于等效静力法，这是因为在等效静力法中并没有充分考虑到实际风荷载的随机动力效应，忽略了结构在时域上的振动，从而低估其动力放大效应，而瞬态动力学分析通过直接输入时变的风荷载时程，可以精确计算出结构的动态响应，其适用场景广泛，规避了等效静力法不足的同时为评估结构安全提供了更加精准且全面的依据。

5 结论

以某实际工程中的脐带塔结构为研究对象，分别采用等效静力法和瞬态动力学分析计算脐带塔的风致响应，得到以下结论：

(1)采用AR线性滤波法对不同高度下的脉动风速时程进行数值模拟，将模拟风速功率谱和目标谱进行对比，发现两者曲线趋势几乎完全一致，说明模拟结果真实有效，能够满足脐带塔结构时域风振响应计算需要。

(2)通过将等效静力法和瞬态动力学分析的风致响应计算结果进行对比，发现采用等效静力法得到的最大位移结果并不能较好的反映结构的实际响应情况，因此想要得到风荷载作用下更为准确的响应结果，应对结构采用瞬态动力学分析。

参考文献

- [1] 叶茂伟, 贾立德, 郑永煌等. 风对航天发射塔展开合拢过程的影响分析[J]. 载人航天, 2013, 19(01): 52-57.
- [2] 蒋国庆, 李道奎. 基于 Davenport 风速谱的火箭及其发射平台风致响应分析[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(05): 104-109.
- [3] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990
- [4] Davenport A G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures[J]. Civil Eng Proc. Inst, 1961, 4(19): 449-472.
- [5] 何敏娟, 李旭. 高耸结构基于性能的抗风设计[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 87-94
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009-2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 鲁丽君, 翟伟廉, 李明. 桅杆结构脉动风速模拟与风荷载计算[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(5): 1057-1060
- [8] 程华, 钟华生, 周凌等. 脉动风速时程数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 143-148.

第一作者简介: 宋雨青, 男, 2000年8月生, 黑龙江省伊春市人, 大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系航天工程硕士在读, 本科毕业于大连理工大学船舶与海洋工程专业。通讯方式: 辽宁省大连市大连理工大学工程力学系, 邮箱: 1921494906@qq.com。

宋雨青，男，2000年8月生，黑龙江省伊春市人，大连理工大学力学与航空航天学院工程力学系航天工程硕士在读，本科毕业于大连理工大学船舶与海洋工程专业，在硕士期间参与了多个与结构仿真分析和优化设计密切相关的项目，在结构建模、拓扑优化、参数优化方面有着丰富实践经验。