

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.019

超大型冷却塔施工全过程风荷载频域特性分析

徐璐^{1,2}, 柯世堂¹

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 211106;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州, 510700)

摘要: 以国内在建世界最高 220 m 超大型冷却塔为对象, 基于大涡模拟 (Large eddy simulation, LES) 方法获得施工全过程冷却塔周围流场和风荷载时程, 并将成塔风压分布结果与规范及实测曲线进行对比验证了数值模拟的有效性。在此基础上, 对比分析了施工全过程塔筒平均与脉动风压根方差分布特性, 系统对比研究了施工全过程风荷载频域特性, 主要包括: 典型测点风压功率谱特性、升/阻力系数功率谱、典型测点间环向相干性和升/阻力系数竖向相干性, 并基于最小二乘法拟合给出随高度变化的典型测点功率谱计算公式。研究表明, 施工期与成塔的脉动风荷载能量均集中在低频区, 其中塔筒中部脉动风荷载在低频区能量较其他位置弱, 随着施工高度的增加, 脉动风荷载和层阻力系数功率谱密度函数均呈先减小后增大的趋势, 升力系数功率谱在塔筒中下部谱值较大而上部较小, 测点脉动风荷载环向相干性以及升/阻力系数竖向相干性均逐渐减弱。主要结论可供此类大型冷却塔施工期设计风荷载取值参考。

关键词: 超大型冷却塔; 施工全过程; 频域特性; 功率谱; 相干性

中图分类号: TU279.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)01-0150-11

Frequency Domain Characteristics Analysis for Wind Loads During Construction of Super Large Cooling Tower

XU Lu^{1,2}, KE Shitang¹

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., LTD., Guangzhou, 510700, China)

Abstract: Taking the world's highest 220 m domestic super large cooling tower under construction as the example, the flow field information and the three-dimensional aerodynamic forces during construction period are obtained based on large eddy simulation (LES). The average wind pressure distribution of the entire tower results are compared with the standard and the measured curves to verify the validity of the numerical simulation. On this basis, the average wind pressure and pulsating wind load variance distribution characteristics of the whole construction process of tower drum are contrasted and analyzed. Then the ritual law carrier frequency domain features of the whole construction process are systematically contrasted and studied, which include wind pressure power spectrum features of typical measurement points, the power spectrum of lift and resistance coefficient, ring to the coherence of typical measurement points, and the vertical coherence of lift and resistance coefficient. Finally, the calculation formula of the power spectrum with height for typical measurement points is fitted based on least square method. Studies show that the

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究 (5171101042) 资助项目; 国家自然科学基金面上 (51878351) 资助项目; 国家“九七三”计划 (2014CB046200) 资助项目; 江苏省优秀青年基金 (BK20160083) 资助项目; 江苏省“六大人才”高峰高层次人才计划 (JZ-026) 资助项目。

收稿日期: 2018-01-18; **修订日期:** 2018-09-27

通信作者: 柯世堂, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: keshitang@163.com。

引用格式: 徐璐, 柯世堂. 超大型冷却塔施工全过程风荷载频域特性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 150-160. XU Lu, KE Shitang. Frequency domain characteristics analysis for wind loads during construction of super large cooling tower[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 150-160.

pulsating wind load energy of the tower under construction and the whole tower are both concentrated in the low frequency area, and the pulsating wind load at the central tower drum is weaker than that in other positions. With the increase of construction height, the power spectrum density function of pulsating wind load and layer resistance shows a trend of decreasing first and then increasing, the power spectrum value of lift coefficient is bigger in the lower part of tower and smaller in the upper part, and the ring to the coherence of typical measurement points and the vertical coherence of lift and resistance coefficient are gradually weakening. Main conclusions can provide a reference for the value designing of the wind load for this kind of large cooling tower during construction.

Key words: super large cooling tower; the whole construction process; frequency domain characteristics; power spectrum; coherence

大型冷却塔是以承受风荷载为主的高耸空间薄壳结构,其抗风性能研究一直是风工程领域关注的重点和热点。现阶段冷却塔大型化的发展趋势导致结构表面三维动态风荷载效应更加显著、主体结构施工周期更长且难度更大,尤其对于在塔筒全部浇筑完成之前的整个施工过程,其整体结构刚度和受力性能随混凝土强度和弹性模量的增长实时演化,相应的结构形态和力学性能的变化会直接改变表面动态分压分布。由于施工期各种因素的不确定性和复杂性,国内外鲜有学者对超大型冷却塔施工全过程的风荷载特性进行深入研究,导致设计人员不能充分预估结构在施工期所能承受的极限荷载^[1-3]。

针对大型冷却塔的风荷载特性,现有研究主要集中在成塔状态下的平均风压分布特征、脉动风压非高斯、极值和相关性,以及多塔组合下风荷载干扰效应和风致响应特性^[3-6]。其中文献[4]对脉动风压的非高斯特性进行了系统研究,探讨了强/弱相关区域脉动风压形成机理;文献[5]通过刚体模型测压试验对塔筒表面平均和脉动风压分布,以及环向和子午向相关性进行系统分析,并根据相关性强弱进行区域划分;文献[6]基于气弹模型试验研究了表面粗糙度对冷却塔风致响应及干扰机理,探究了不同粗糙度下位移响应自功率谱密度曲线的幅值分布。考虑到施工过程中风荷载分布明显异于成塔状态,探究施工全过程冷却塔风荷载特性是目前此类超大型冷却塔抗风研究的关键。

鉴于此,以西北地区某在建220 m高超大型冷却塔为研究对象,建立高精度不同施工高度冷却塔三维实体模型,基于大涡模拟方法获得了塔筒外表面风荷载时程和流场信息。在此基础上,对冷却塔典型测点脉动风压的功率谱特性以及相干性进行了系统研究,最终提炼出典型测点脉动风荷载随施工高度变化的影响规律,并给出了典型测点功率谱沿高度变化的拟合曲线,主要结论可为此类超大型冷却塔施工全过程风荷载特性研究提供科学的研

究依据。

1 工程概况

该在建超大型冷却塔位于西北地区,属于B类地貌,50年一遇基本风压为 0.35 kN/m^2 ,相应风速为 23.7 m/s 。冷却塔塔高220 m,喉部高度165 m,进风口高度30.75 m,塔顶中面直径128.10 m,喉部中面直径123 m,底部直径185 m,塔筒壁厚沿高度呈指数变厚,最小壁厚为0.38 m,最大壁厚为1.85 m。

为系统分析施工全过程超大型冷却塔风荷载特性,基于工程实际与分析精度按照塔筒施工模板层选择6个典型施工高度,为精细化研究端部流场分布,将工况1设置在15层模板高度处;工况2~5每隔20层模板进行设置,工况5中95层模板处恰为喉部附近,可对塔筒整体最薄弱部位进行研究;工况6即为成塔结构高度。依次为:施工工况1(15层模板)、施工工况2(35层模板)、施工工况3(55层模板)、施工工况4(75层模板)、施工工况5(95层模板)和施工工况6(128层模板),各典型工况相关参数如表1所示。此外,本文主要针对理想状态下冷却塔施工全过程的风荷载特性进行研究,将忽略脚手架对结构气动性能的影响。

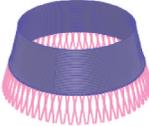
2 CFD数值模拟与风压特性分析

2.1 计算域与网格划分

为保证冷却塔尾流充分发展,计算域设置为顺风向($32D$) \times 横风向($21D$) \times 竖向($4H$),其中 D 为底部零米直径, H 为塔高,计算模型中心距离计算域入口为1800 m,模型最大阻塞率1.5%;为兼顾计算效率和精度,在靠近建筑物表面的局部加密区采用非结构化网格进行划分,而形状规整的外围区域采用高质量的结构化网格进行划分,网格尺寸由内往外逐渐增大。整塔总网格数量约1852万个,网格数目均满足计算要求。计算域及模型网格划分如图1所示。

表1 不同施工工况计算参数

Table 1 Calculating parameters under different construction states

工况	1	2	3	4	5	6
三维实体模型						
模板编号	15	35	55	75	95	128
高度/m	50.90	80.07	109.60	139.43	169.41	218.84
最小半径/m	78.00	71.00	65.73	62.54	61.67	61.67
最小壁厚/m	0.51	0.49	0.45	0.38	0.38	0.38

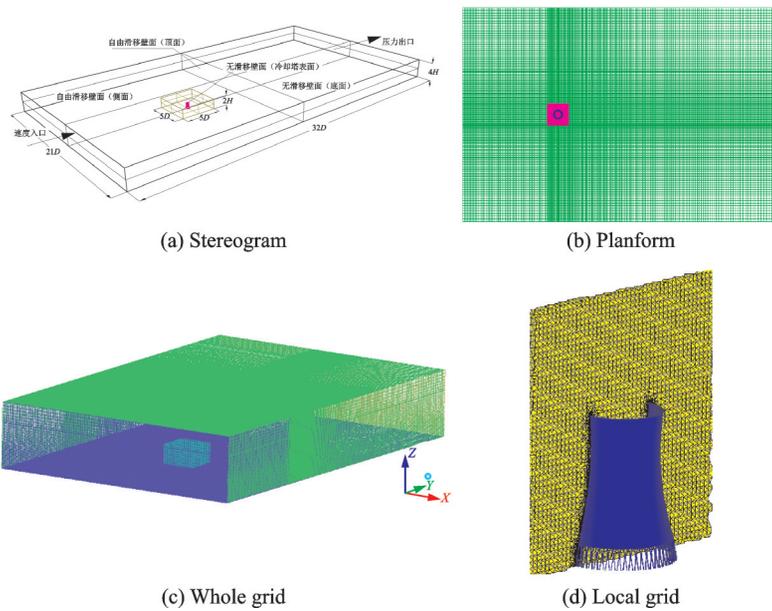


图1 计算域及模型网格划分示意图

Fig.1 Sketch maps of computational field and model mesh

2.2 流体控制方程

结构抗风研究中流体视为黏性不可压缩,对瞬态的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程进行空间平均,可得大涡模拟方法^[7]的控制方程为

$$\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\mu}_i \bar{\mu}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{\mu}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; t 为时间; ν 为空气运动黏性系数; $\bar{\mu}_i, \bar{\mu}_j$ 表示滤波后3个方向的速度, $i=1,2,3, j=1,2,3; x_i, x_j$ 为空间3个方向坐标分量; \bar{p} 为滤波后的压力; τ_{ij} 为空间平均后N-S方程出现的不封闭项,即亚格子应力(Subgrid-Scale Stress)

$$\tau_{ij} = \overline{\mu_i \mu_j} - \bar{\mu}_i \bar{\mu}_j \quad (3)$$

根据Smagorinsky提出的基于涡旋黏度假设的亚格子模型,引入Boussinesq假设,亚格子应力

可表达为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{ij} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\mu}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中: \bar{S}_{ij} 为可解尺度应变率张量; τ_{tk} 为亚格子应力的各向同性部分,包含在滤波后的压力项中; δ_{ij} 为Kronecker delta函数; μ_t 为亚格子湍流黏系数,一般采用Smagorinsky假设

$$\mu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

式中: C_s 为Smagorinsky常数,常见取值范围为0.1~0.23,文中取0.1;应变率张量 $|\bar{S}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; Δ 为空间网格尺度, $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$, Δ_x, Δ_y 和 Δ_z 分别为 x, y 和 z 方向的网格尺寸。此即标准Smagorinsky亚格子模型。

针对本文研究的高雷诺数冷却塔结构,对大涡模拟的精度要求较高,采用Smagorinsky亚格子模

型进行超高精度的数值模拟^[7]可以达到较好的模拟效果。

2.3 边界条件及参数设置

计算域采用速度入口 (Velocity inlet) 和压力边界出口 (Pressure-outlet), 顶部和侧面采用自由滑移壁面的对称边界 (Symmetry), 地面及建筑物表面采用无滑移壁面边界 (Wall), 通过用户自定义文件 (User defined file, UDF) 定义脉动风场, 并设置 B 类地貌大气边界层指数风剖面 and 湍流度剖面, 风剖面中地面粗糙度指数为 0.15。基于 Fluent 计算的脉动风荷载生成理论公式^[8]为

$$E(k) = \sum_{m=k_0}^{k_{\max}} E_m(k) = \sum_{m=1}^{k_{\max}} E_m(k) \delta(k - k_m) = \sum_{m=1}^{k_{\max}} \left(\frac{3}{2} v_m^2 \right) \delta(k - k_m) \quad (6)$$

$$u_{m,i} = \sum_{n=1}^N [p_1^{m,n} \cos(k_j^{m,n} x_j + \omega_{m,n} t) + q_1^{m,n} \sin(k_j^{m,n} x_j + \omega_{m,n} t)] \quad (7)$$

$$u(x, t) = \sum_{m=k_0}^{k_{\max}} \sum_{n=1}^N [p^{m,n} \cos(\tilde{k}^{m,n} \tilde{x} + \omega_{m,n} t) + q^{m,n} \sin(\tilde{k}^{m,n} \tilde{x} + \omega_{m,n} t)] \quad (8)$$

式中

$$p^{m,n} = \frac{\xi \times k^{m,n}}{|\xi \times k^{m,n}|} \sqrt{a \frac{4E(k_m)}{N}}; \quad q^{m,n} = \frac{\xi \times k^{m,n}}{|\xi \times k^{m,n}|} \sqrt{(1-a) \frac{4E(k_m)}{N}}; \quad \tilde{x} = \frac{x}{L_s}; \quad \tilde{k}^{m,n} = \frac{k^{m,n}}{k_0};$$

$|k^{m,n}| = k_m; \omega_{m,n} \in N(0, 2\pi f_m); f_m = k_m U_{\text{avg}}$ 。其中, x 为坐标向量, t 为时间; k_m 为波数; $\xi \in N(0, 1)$; a 满足 $0 \sim 1$ 之间均匀分布。本文计算中 $k_{\max} = 500, N = 100$ 。

基于上述边界条件设置形成的脉动风荷载进行了精度校核, 图 2 详细给出了数值风洞中 B 类流场实测平均风剖面、湍流强度和脉动风谱, 可见风场模拟的平均风剖面与规范比较吻合。同时将实测脉动风谱进行拟合, 并和 Davenport 谱、Harris 谱及 Karman 谱进行对比, 结果表明该风场模拟的脉动风谱满足要求。

数值计算采用 3D 单精度、分离式求解器, 空气风场选用不可压缩流场, 基于大涡模拟的 SIM- PLEC 算法进行压力速度耦合, 该方法收敛性好且适合时间步长较小的大涡模拟计算, 计算过程设置了网格倾斜校正以提高混合网格计算效果, 控制方程的计算残差设置为 1×10^{-6} , 时间步长为 0.05 s。

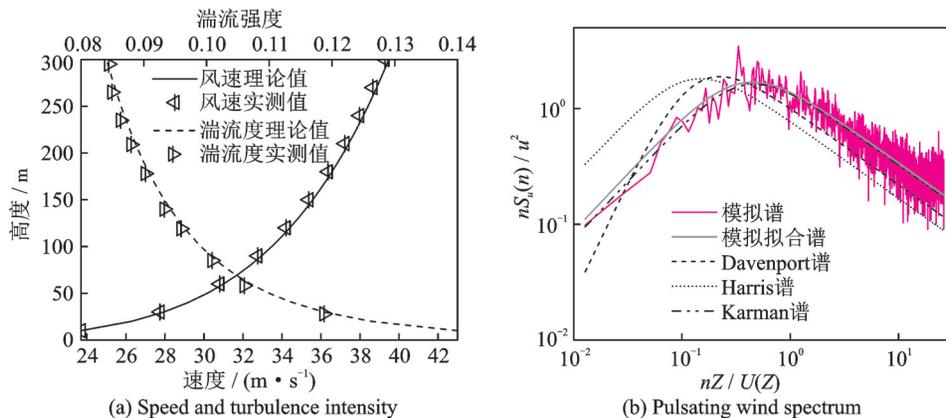


图 2 速度及湍流度剖面示意图

Fig.2 Velocity and turbulence profile sketch

2.4 单塔数值模拟与有效性验证

对于非稳态数值模拟, 需要确定所用网格的数量、时间步长与计算结果之间的无关联性, 即要对网格进行无关联性验证和时间独立性验证。本文主要探讨模拟计算结果中压力系数的无关联性检验。

表 2 给出了不同最小网格尺寸下网格总数和最大歪斜度, 对比可知: 随网格数量精度的增加, 最大歪斜度逐渐减小。图 3 给出了不同网格精度下典型节点的风压系数, 可以看出, 当精度较小时风压系数是不断变化的, 随着精度的增加风压系数逐渐趋于平稳, 在最小网格尺寸为 0.2 时为风压系数

的临界点。综合考虑网格质量参数, 选取 0.2 作为核心区的最小网格尺寸。

以最小网格尺寸 0.2 为网格模型, 按时间步长 0.001, 0.005, 0.010 和 0.015 s 对所选网格数量进行时间独立性检验, 在模拟进行到稳态后, 得出的计算结果如图 4 所示。在满足库朗数的前提下, 可以看出, 时间步长对压力分布的计算结果具有一定影响, 在半自由涡区域时间步长对计算结果的影响不大, 但在强制涡区域, 时间步长对压力分布的计算结果差异均较大, 相比之下选取更小的时间步长更为适宜, 即 0.001 s。

表2 不同网格尺寸下的网格质量参数

Table 2 Parameters of the mesh quality under different grid sizes

方案	最小网格尺寸	网格数量(内)/个	网格数量(外)/个	最大歪斜度
1	0.40	1 783	1 800	0.78
2	0.30	1 833	1 852	0.78
3	0.20	1 975	1 996	0.74
4	0.10	2 200	2 176	0.73

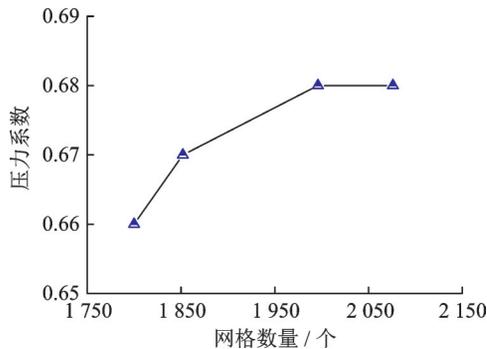


图3 不同网格数量下典型节点的风压系数

Fig.3 Wind pressure coefficients of typical nodes under different mesh numbers

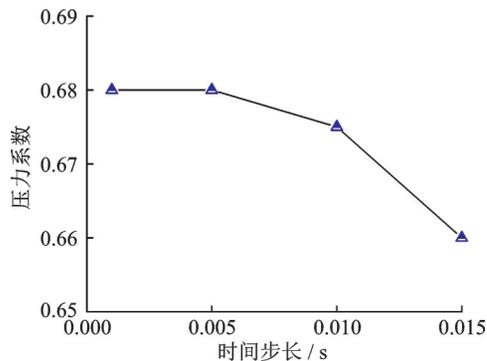
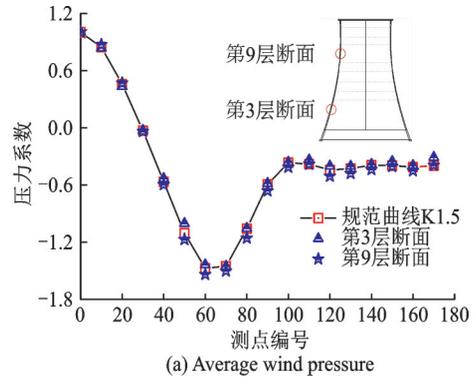


图4 不同时间步长下典型节点的风压系数

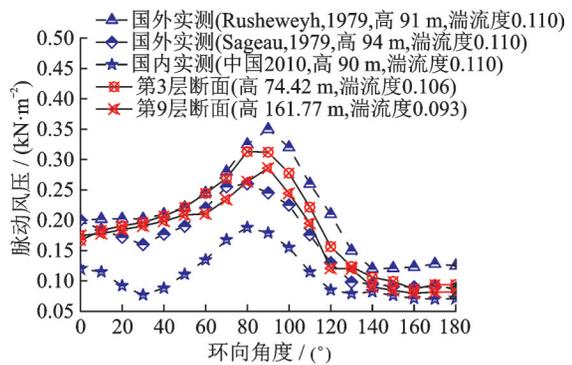
Fig.4 Wind pressure coefficients of typical nodes under different time steps

考虑到规范^[9-12]仅给出了成塔结构表面风压的分布规律,图5给出了成塔工况下典型断面风压平均和脉动分布曲线示意图。对比可知:(1)第3层断面平均风压分布结果与规范曲线分布规律一致,迎风区和背风区域风压系数数值吻合性较好,侧风区负压略小于规范曲线;喉部附近负压极值和分离点对应角度与规范曲线一致,迎风区风压系数数值吻合性较好,侧风区和背风区较规范值略大,最大不超过5%,总体验证了大涡模拟获得平均风压的有效性;(2)图5(b)给出了国内外风压实测结果,分析发现在90 m高度附近湍流强度接近0.110,但脉动风压数值试验稍有不同,这是由于冷却塔结构的特征尺寸和地形、周围干扰等引起的,本文大涡模拟获得的脉动风压分布与国内外实测曲线较为

接近,数值上要小于国外实测结果。本文获得的脉动风压分布趋势和数值均在已有实测和试验结果包围中,因此认为本文基于大涡模拟获得的脉动风压具有一定的有效性,可用于后续的风荷载时域特性分析。



(a) Average wind pressure



(b) Fluctuating wind pressure

图5 数值模拟与实测及风洞试验结果对比示意图

Fig.5 Mean wind pressure and wind pressure correlation of wind tunnel test and numerical simulation

2.5 平均风压分布特性

图6给出了各工况下塔筒表面压力系数分布云图,分析可知:(1)各工况下塔筒迎风面均为正压,侧风面与背风面为负压,与沿环向的规范平均风压分布曲线规律一致,尤以工况6最为接近;(2)随施工高度增加,迎风面正压中心区形状逐渐由“矮胖型”过渡到“高瘦型”,同时侧风面负压极值呈现不断发展趋势;(3)随施工高度的增加,塔筒表面平均压力系数变化显著,迎风面正压最大值由0.5增长至0.6,负压极值由-0.3降至-1.4。

2.6 脉动风根方差分布特性

通过对脉动风荷载根方差环向分布进行分析,由图7可以得出各工况下塔筒表面风荷载根方差分布满足一定的对称性,不同施工高度下气流的绕流特性将发生显著变化,使得来流在塔筒表面产生明显的分离、再附,来流迎风向塔筒前缘脉动风荷载根方差较大,受特征湍流的影响,负压极值区风荷载根方差急剧增加,并且变化梯度较大;受端部效应的影响导致塔筒底部和顶部根方差较大,根方

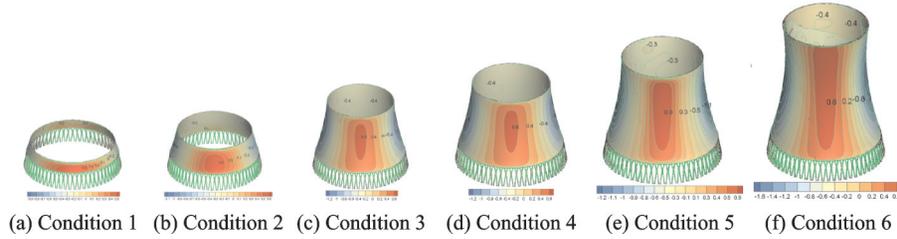


图 6 各工况下塔筒表面压力系数分布云图

Fig.6 Pressure coefficient distribution nephogram on the tower drum surface under different conditions

差变化梯度较剧烈,随施工高度增加根方差呈先减小后增大的趋势;各工况下相同测点脉动风荷载的

根方差差异显著,工况 4 迎风面根方差较大,工况 6 负压极值区和分离区根方差较大。

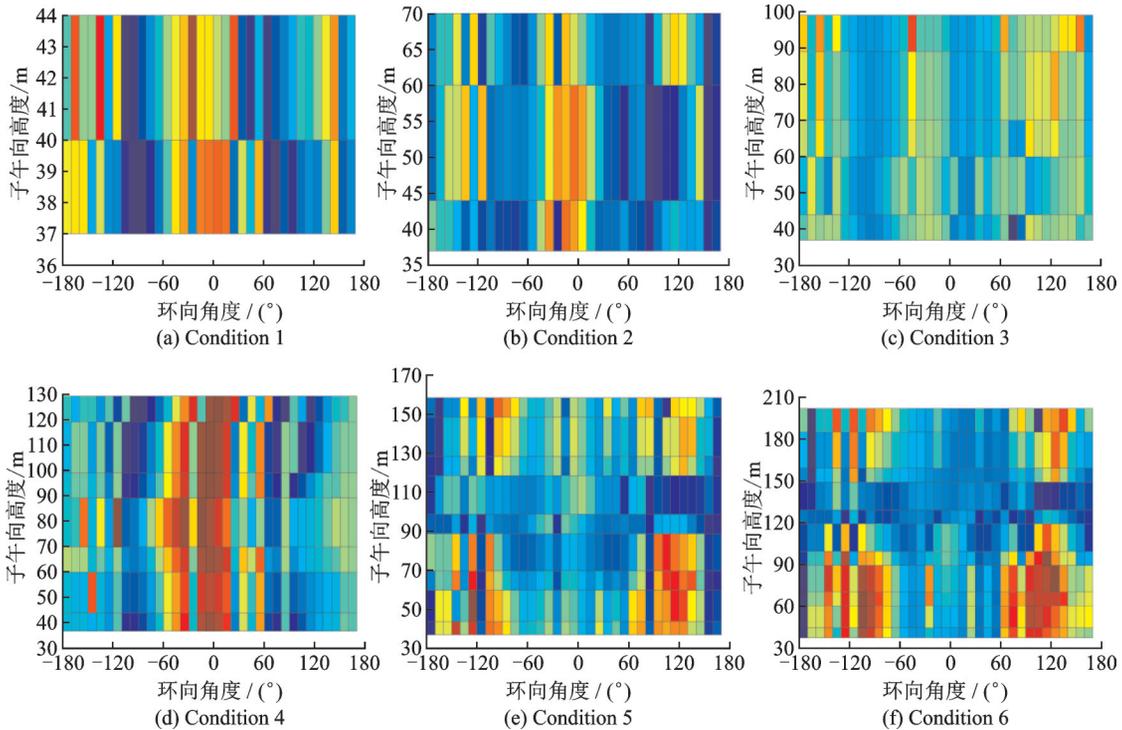


图 7 各工况下塔筒表面风荷载根方差环向分布图

Fig.7 Distribution of root variance of the wind load on the surface of the tower under different conditions

3 风荷载频域特性分析

脉动风的阵风脉动可近似作为各态历经的平稳随机过程。由随机过程理论,在 l 点和 p 点测得的随机过程 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,也即 l 和 p 点两个脉动风速分量连续记录的数学期望为时域内的互相关函数,用 $R_{u_1u_2}(\tau)$ 表示,该互相关函数由维纳-辛钦关系可得频域内的互谱密度函数 $S_{u_1u_2}(r,n)$,再由相干函数的定义对相干函数的平方根取值

$$Coh(r,h) = \frac{S_{u_1u_2}(r,n)}{\sqrt{S_{u_1}(l,n)S_{u_2}(p,n)}} \quad (9)$$

由于互谱密度函数 $S_{u_1u_2}(r,n)$ 是复数,若其实部用 $S_{u_1u_2}^R(r,n)$ 表示,虚部用 $S_{u_1u_2}^I(r,n)$ 表示,则式(9)也写作

$$Coh(r,h) = \left\{ \frac{[S_{u_1u_2}^R(r,n)]^2 + [S_{u_1u_2}^I(r,n)]^2}{S_{u_1}(l,n)S_{u_2}(p,n)} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

一般地,互谱密度函数 $S_{u_1u_2}(r,n)$ 的虚部与实部相比影响小,故式(10)还可写作

$$Coh(r,h) \approx \frac{S_{u_1u_2}^R(r,n)}{\sqrt{S_{u_1}(l,n)S_{u_2}(p,n)}} \quad (11)$$

3.1 典型测点功率谱特性

分析脉动信号的频谱特性可以比较直观体现脉动风压的一些基本特性,对不同施工阶段冷却塔典型测点脉动风荷载功率谱^[13-15]进行分析,图 8 给出了偶数测点层迎风面在不同工况下量纲为一的功率谱散点分布图,并拟合给出了功率谱密度曲线计算公式。公式具体定义为

$$f(x) = b_1x^9 + b_2x^8 + b_3x^7 + b_4x^6 +$$

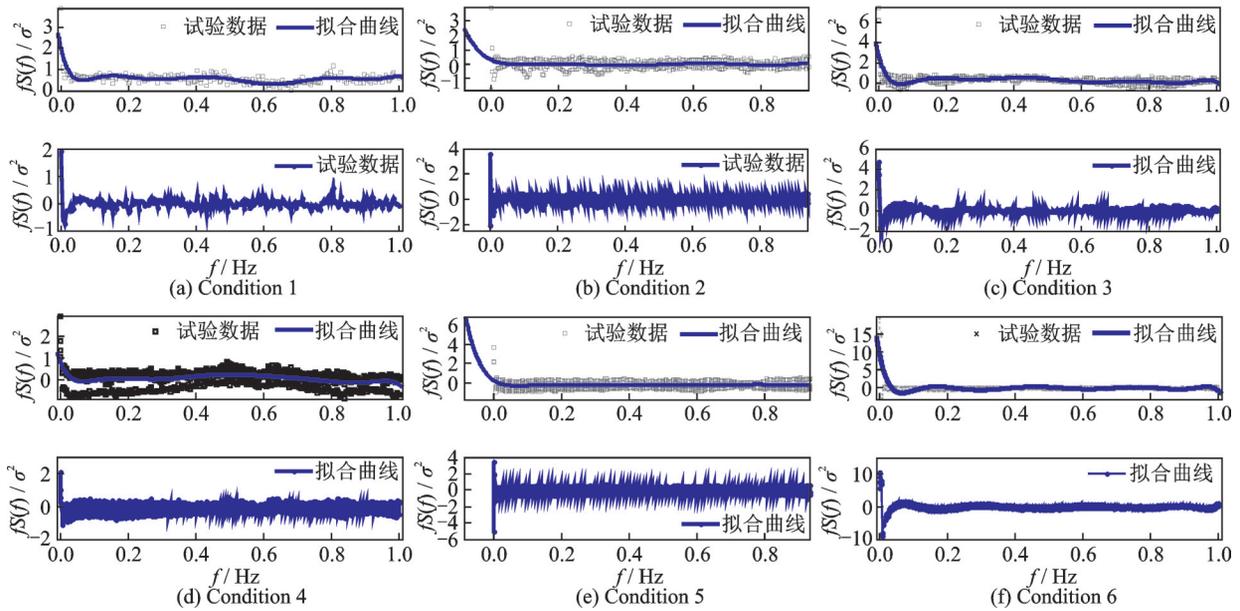


图8 各工况下典型测点功率谱分布曲线

Fig.8 Typical station power spectrum distribution curve under different conditions

$$b_5 x^5 + b_6 x^4 + b_7 x^3 + b_8 x^2 + b_9 x + b_{10} \quad (12)$$

式中: x 表示随频率变化的功率谱密度函数, $b_i(i=1,2,\dots,10)$ 为拟合系数,具体见表3。

表3 目标拟合公式系数列表

Table 3 Coefficients table of target fitting formula

拟合系数	数值	拟合系数	数值	拟合系数	数值
b_1	-936.60	b_5	-8 602.00	b_9	-9.22
b_2	4 744.00	b_6	3 743.00	b_{10}	0.27
b_3	10 190.00	b_7	-968.80		
b_4	12 080.00	b_8	137.70		

对比分析得出:拟合曲线与模拟结果分布规律一致,吻合度良好且均在模拟结果包络中,能较好地反映典型测点的功率谱特性;各测点层脉动风荷载能量主要集中在低频区,受三维端部效应影响塔筒底部和顶部散点分布较中部密集,即低频区能量随施工高度增加呈先减小后增大的趋势;不同工况下功率谱拟合曲线差别较大,工况4~6低频区均出现谱峰,随频率增加伴有多个小谱峰,且工况5峰值最大、小谱峰数量最多,说明该处除了具有较高的低频能量外,气流撞击形成的分离泡和大尺度、间歇性旋涡脱落使得功率谱在相应的主导频率处能量增加越多,进而出现了多个峰值。

3.2 升、阻力功率谱特性

为更好地研究升、阻力系数沿高度变化规律,根据数值模拟结果分别选取偶数测点层对脉动风升、阻力系数谱特性^[16]进行了研究,图9和10中纵坐标为归一化风压功率谱密度,横坐标为频率 f ,并将所有横、纵坐标取对数以达到更直观、清晰表达

脉动风压特性的目的。

由归一化的升、阻力系数功率谱曲线图可知:本文模拟结果与已有文献中的数据变化规律^[17-18]一致,风荷载功率谱低频段出现峰值,频率接近1 Hz时功率谱呈下降趋势,高频区域功率谱衰减较快;层阻力系数功率谱随高度增加呈先减小后增大的趋势,此现象在工况4和6最为显著;层升力系数功率谱则随施工高度增加逐渐减小并出现显著性分离;层阻力系数功率谱低频段带宽随施工高度增加逐渐减小,谱峰由一个增至两个或多个,高频区域塔筒中部功率谱衰减最快,说明此处受到的脉动风荷载较其他部位较弱;塔筒中下部层升力系数功率谱谱值较大而上部较小,在高频区衰减速率也随施工高度增加而逐渐增大。

3.3 典型测点间相干特性

脉动风荷载相关性通常采用相干函数(又称频率相关系数)来描述,是在频域内对结构进行风振响应计算的重要参数^[13,19]。本文选取同步采样的迎风点和背风点,分析其测点间脉动风压的相干特性。图11给出了塔筒表面偶数测点层测点间脉动风压的相干性函数分布曲线,对比发现:各工况下典型测点间相干函数曲线形状基本一致,变化规律相同,不同测点间脉动风荷载相干性均表现出随频率增大呈先减小后增大的趋势,并且在高频段测点间相干函数已接近于1;迎风点与背风点相干性变化显著,随施工高度增加逐渐减弱;各工况下相同测点层相干性差异显著,工况5时各测点层迎风点与背风点相干性最弱,工况6次之,工况2时相干性最强。

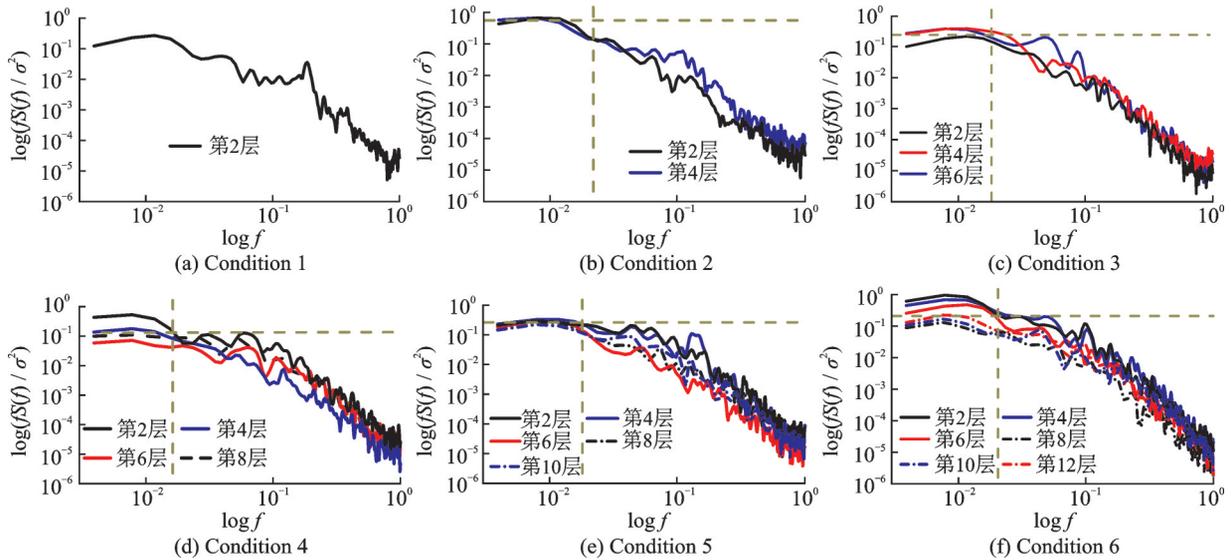


图 9 各工况下阻力系数功率谱分布曲线

Fig.9 Drag coefficient of power spectrum distribution curve under different conditions

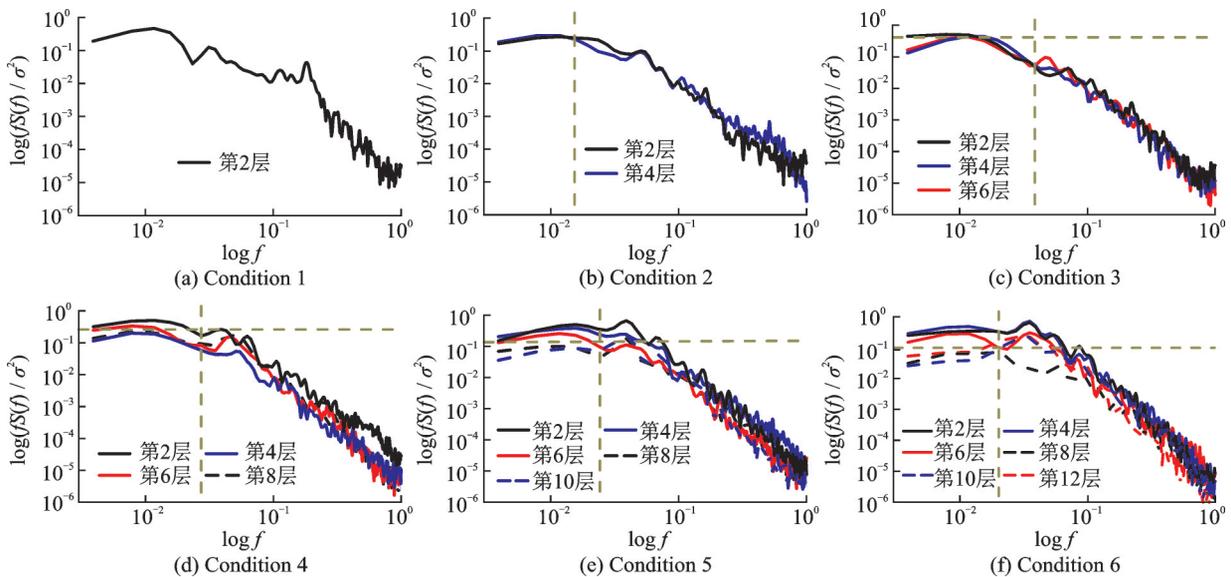


图 10 各工况下升力系数功率谱分布曲线

Fig.10 Lift coefficient of power spectrum distribution curve under different conditions

3.4 升、阻力系数间的竖向相干特性

升、阻力系数的功率谱主要反映横风向和顺风向脉动风中各种频率成分对应的能量分布情况,现针对脉动风在空间的竖向相关性进行分析,由图 12 和 13 可知:各工况下升/阻力系数的竖向相干性随施工高度增加逐渐减小,低频段衰减速率逐渐增大,工况 6 中斜率由 -0.30 降至 -0.92 ,高频段增加速率逐渐减小;工况 4~6 衰减速率较工况 1~3 大,但其增长速率也大于工况 1~3,说明脉动风荷载的能量主要集中在低频段,施工高度较低时受脉动风荷载影响较大;各工况下升力系数相干性低频段衰减速率明显大于阻力系数,这与升、阻力影响因素不同有关。

4 结 论

基于 CFD 方法获得了施工全过程冷却塔周围流场和风荷载时程,系统对比探讨了施工全过程脉动风荷载的频谱特性,主要内容涉及大涡模拟、风压分布、典型测点功率谱、升/阻力系数功率谱、最小二乘法、相关性分析等。

研究表明,考虑施工全过程能更真实反映此类超大型冷却塔脉动风荷载分布特性,施工期与成塔的脉动风荷载能量均集中在低频区,其中塔筒中部脉动风荷载在低频区能量较其地位置弱,随着施工高度的增加:脉动风荷载和层阻力系数功率谱密度函数均呈先减小后增大的趋势,升力系数功率谱在塔筒中下部谱值较大而上部较小;测点脉动风荷载

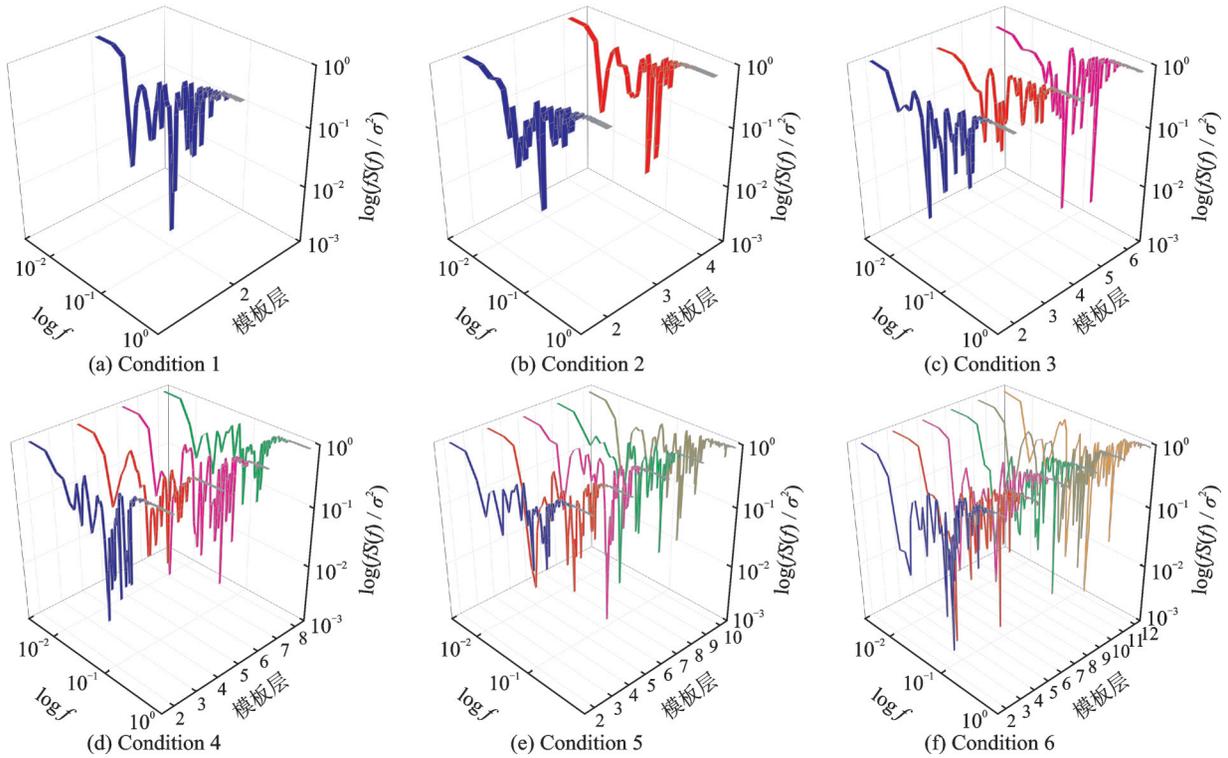


图 11 各工况下不同高度处典型测点间相干性分布曲线

Fig.11 Coherence between different heights in typical measuring point distribution curve under different conditions

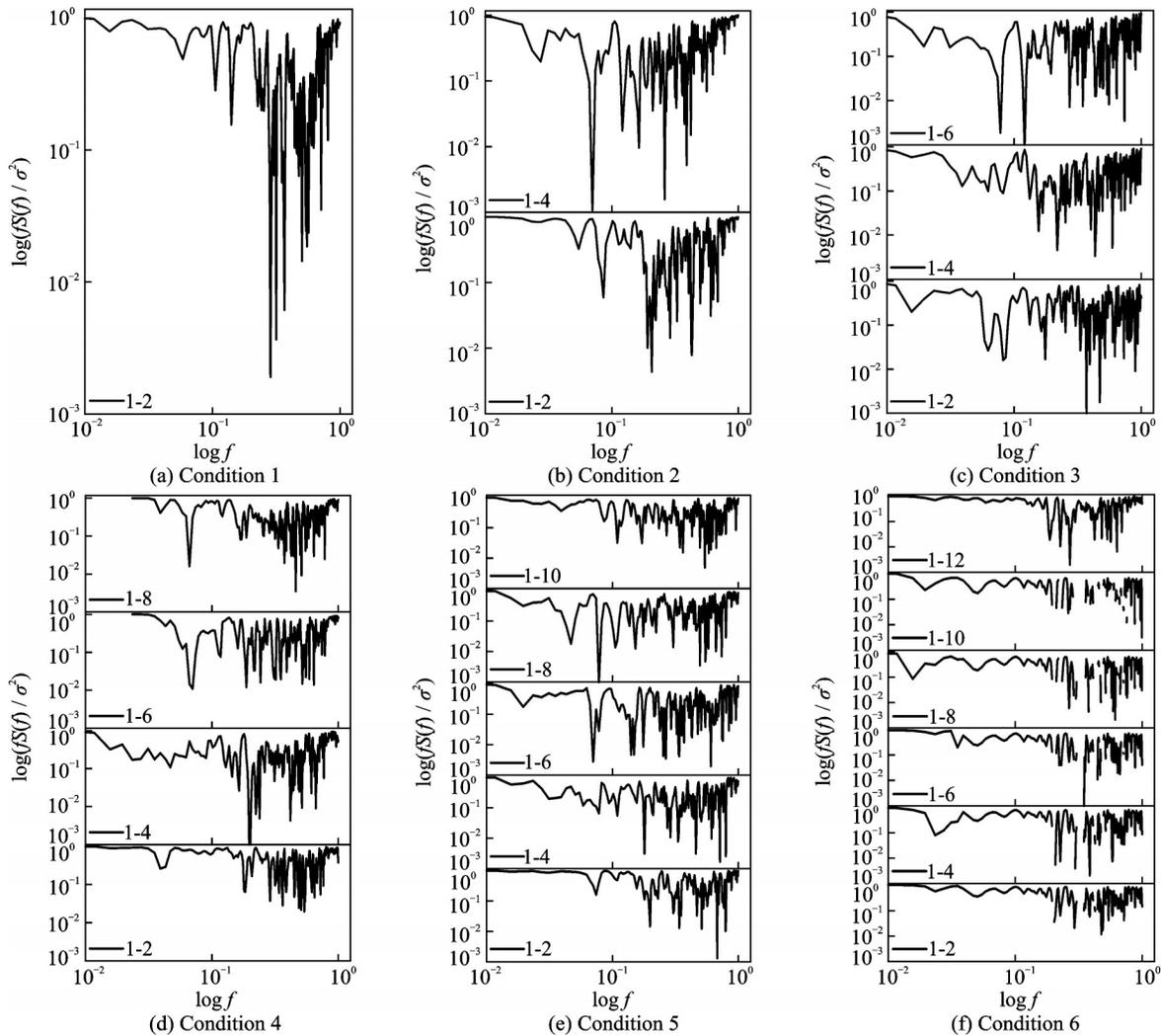


图 12 各工况下阻力系数竖向相干性分布曲线

Fig.12 Drag coefficient of vertical coherence distribution curve under different conditions

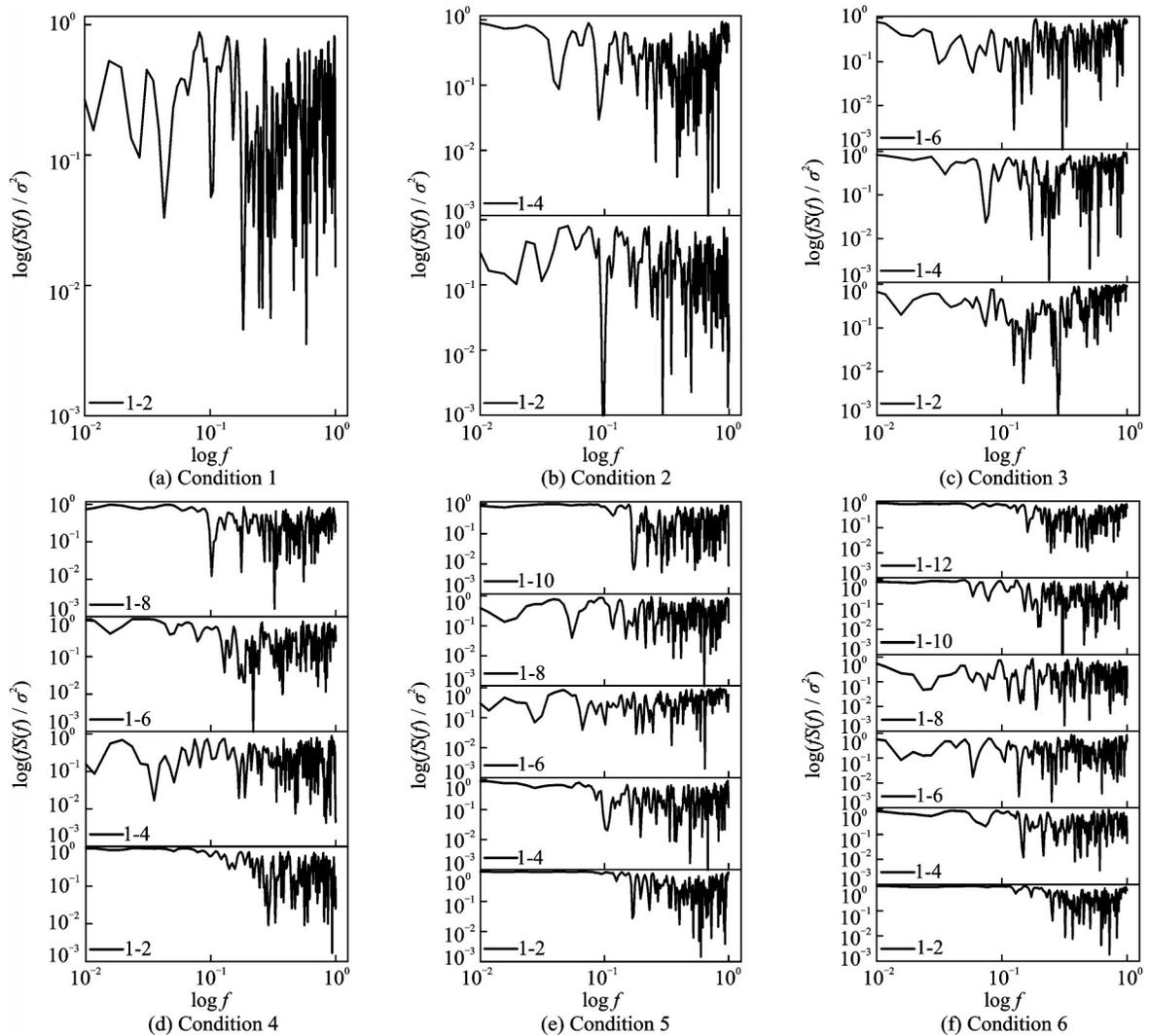


图 13 各工况下升力系数竖向相干性分布曲线

Fig.13 Lift coefficient of vertical coherence distribution curve under different conditions

环向相干性以及升、阻力系数竖向相干性均逐渐减弱,其中阻力系数相干性变化较大,低频段斜率由-0.30降至-0.92。在此基础上给出的随高度变化迎风面典型风压功率谱拟合公式可供此类大型冷却塔施工期设计风荷载取值参考。

参考文献:

[1] PRABHAKAR N. Hyperbolic cooling towers [J]. Structural Engineering International, 1991, 1(3):22.
 [2] BASU P K, GOULD P L. Cooling towers using measured wind data[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 29(56): 2139-2140.
 [3] NIEMANN H J, ZERNA W. Impact of research on development of large cooling towers[J]. Engineering Structures, 1986, 8(2): 74-86.
 [4] 柯世堂, 葛耀君, 赵林. 大型双曲冷却塔表面脉动风压随机特性——非高斯特性研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(3): 12-18.
 KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin. Large hyperbolic cooling tower pulsating wind pressure on the surface

of random—non-Gaussian characteristics research [J]. Journal of Experimental Fluid Mechanics, 2010, 24 (3): 12-18.

[5] 张军锋, 葛耀君, 赵林, 等. 双曲冷却塔表面三维绕流特性及风压相关性研究[J]. 工程力学, 2013(9): 234-242.
 ZHANG Junfeng, GE Yaojun, ZHAO Lin, et al. The surface of the hyperbolic cooling tower three-dimensional flow characteristics and wind pressure correlation studies [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013(9): 234-242.
 [6] 邹云峰, 陈政清, 牛华伟. 模型表面粗糙度对冷却塔风致响应及干扰的影响[J]. 空气动力学学报, 2014 (3): 388-394.
 ZOU Yunfeng, CHEN Zhengqing, NIU Huawei. Influence of model surface roughness on wind-induced response and interference of cooling tower [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014(3): 388-394.
 [7] 郑德乾, 郑启明, 顾明. 平滑流场内半球大跨屋盖非定常绕流大涡模拟[J]. 建筑结构学报, 2016, 37:

- 19-24.
ZHENG Deqian, ZHENG Qiming, GU Ming. Large eddy simulation of flow around a hemispherical dome in smooth flow [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37: 19-24.
- [8] 卢春玲, 李秋胜, 黄生洪, 等. 大跨度复杂屋盖结构风荷载的大涡模拟[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 1-9.
LU Chunling, LI Qiusheng, HUANG Shenghong, et al. Simulation of large eddy of wind load on a long-span complex roof structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 1-9.
- [9] VGB-Guideline. Structural design of cooling tower-technical guideline for the structural design, computation and execution of cooling tower (VGB-R610Ue) [S]. Essen: BTR Bautechnik Bei Kühltürmen, 2005.
- [10] BLANCHETTE J, NELSON T F, XUAN Z, et al. The british standards institution [C]//Proceedings of Apha Meeting and Exposition. [S.l]: [s.n.], 2013: 633-634.
- [11] 中华人民共和国建设部. 火力发电厂水工设计规范: DL/T 5339—2006 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国建设部. 工业循环水冷却设计规范: GB/T 50102—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [13] 李秋胜, 李慧真, 李毅. 椭圆形高耸结构风荷载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 1-8.
LI Qiusheng, LI Huizhen, LI Yi. The oval tower structure wind load characteristic test study [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2015, 42(1): 1-8.
- [14] 李波, 杨庆山, 田玉基, 等. 锥形超高层建筑脉动风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 8-16.
LI Bo, YANG Qingshan, TIAN Yuji, et al. Tapered super-tall building features a fluctuating wind load [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 8-16.
- [15] 顾明, 叶丰. 典型超高层建筑风荷载频域特性研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 30-36.
GU Ming, YE Feng. Typical super-tall building prescribed by ritual law carrier frequency domain features study [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 30-36.
- [16] 陈伏彬, 李秋胜, 傅继阳, 等. 大跨屋盖风荷载的频域特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 111-117.
CHEN Fubin, LI Qiusheng, FU Jiyang, et al. The wind load of large-span frequency characteristic test study [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 111-117.
- [17] 柯世堂, 朱鹏. 基于大涡模拟增设气动措施冷却塔风荷载频域特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(11): 2143-2149.
KE Shitang, ZHU Peng. Wind loads frequency domain characteristics for large cooling towers with aerodynamic measures based on large eddy simulation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(11): 2143-2149.
- [18] 傅继阳, 谢壮宁, 倪振华. 大跨悬挑平屋盖结构风荷载特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 7-14.
FU Jiyang, XIE Zhuangning, NI Zhenhua. Experimental investigation on wind load characteristics of large span cantilevered flat roof structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 7-14.
- [19] 柯世堂, 杜凌云. 不同气动措施对特大型冷却塔风致响应及稳定性能影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 79-89.
KE Shitang, DU Lingyun. Different aerodynamic measures of super large cooling tower wind-induced response and stable performance impact analysis [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2016, 43(5): 79-89.

(编辑:夏道家)