

典型四塔组合特大型冷却塔群风荷载干扰效应

柯世堂^{1,2}, 王 浩^{1,2}, 余 玮¹

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 以在建世界最高冷却塔(220 m)为工程背景, 分别对单体、双塔、串列、矩形、菱形、L 形和斜 L 型四塔组合共 353 个工况进行了刚体测压风洞试验. 系统探讨了 5 种典型四塔组合方案对冷却塔群静力、动力和极值干扰效应的影响规律. 采用数理统计、频谱分析等方法对干扰效应的不同影响因素和作用机理进行研究, 提出了典型四塔组合考虑风向的干扰因子估算公式. 从整体风荷载干扰效应角度综合定性给出四塔组合形式方案选择排序为: 串列>斜 L 形>L 形>菱形>矩形. 回归分析表明, 四塔组合形式的特征角度与最大干扰因子之间存在着良好的线性相关性.

关键词: 典型四塔组合; 特大型冷却塔; 风洞试验; 风荷载; 干扰效应; 作用机理

中图分类号: TU279.7

文献标志码: A

Interference Effect of Wind Loads for Super Large Cooling Tower Under Typical Four Towers Combinations

KE Shitang^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, YU Wei¹

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the world's highest cooling tower (220 m) which is being built as the engineering background, the wind tunnel tests of pressure measurement under single tower condition and six typical group towers combinations were conducted. The influence laws of static, dynamic and extreme interference effects of different typical four towers combinations were discussed. The mathematical statistics method and frequency spectrum method were used for analyzing different influencing factors and mechanisms. Then, the formulas of interference factors for typical four towers combinations considering wind directions were given. Finally, based on comprehensive assessment of the

interference effects of overall wind loads, the best scheme for the arrangement of the four towers in a row was proposed, which followed the arrangements in oblique L-shaped pattern, L-shaped pattern, rhombic pattern, and rectangular pattern successively. A strong linear correlation was found to exist between the characteristic angle α and the maximum F_E of five typical four-tower arrangements.

Key words: typical four towers combination; super-large cooling tower; wind tunnel test; wind load; interference effect; function mechanism

关于 1965 年英国渡桥电厂 3 座冷却塔风毁事故的调查^[1-3], 国内外众多学者一致认为, 塔群干扰效应是引起冷却塔倒塌的重要原因之一. 然而现阶段我国大型冷却塔建设多以超高大和复杂塔群组合为特点, 其中尤以四塔组合形式最为常见^[1]. 国内外现有冷却塔规范^[4-5]均没有明确给出不同群塔组合形式下的干扰因子, 而冷却塔群干扰效应相关研究成果大多基于双塔、三塔组合或某一特定形式的四塔、八塔组合进行^[6-11]. 文献[6]通过一系列测压试验研究了双塔和三塔组合下周边建筑物对冷却塔群造成的干扰效应; 文献[7-9]分别基于测压试验和完全气动弹性测振试验研究了双塔干扰下冷却塔风压干扰因子和整体力系数随风向角变化规律; 文献[10]对某八塔组合冷却塔群进行了模型测压试验, 并基于整体阻力系数给出了最不利风向角和干扰因子取值; 文献[11]对某考虑地形效应的斜 L 型四塔组合进行测压试验, 并基于整体阻力系数探讨了该组合形式下冷却塔的干扰因子和作用机理. 已有研究工程背景与现阶段常见的四塔组合方案存在明显差异, 且不能形成直接指导工程设计的规律性成果, 亟需针对多种常见塔群组合形式系统开展干扰效应和作用机理的定量和定性研究.

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 江苏省优秀青年基金(BK20160083); 国家自然科学基金(51208254); 博士后科学基金(2013M530255, 1202006B); 江苏高校“青蓝工程”项目

第一作者: 柯世堂(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构风工程. E-mail: keshitang@163.com

鉴于此,以在建世界最高特大型冷却塔为工程背景,系统进行了串联、矩形、菱形、L 形和斜 L 型等常见典型四塔组合工况下的刚体测压试验.采用数理统计和频谱分析等方法提炼出不同四塔组合形式对冷却塔群风致静力、动力和极值干扰因子的影响规律,揭示了常见四塔组合形式下冷却塔群的干扰效应和作用机理,最终基于非线性最小二乘法提出了不同四塔组合形式考虑风向的干扰因子简化计算公式.主要结论可为此类特大型冷却塔群四塔组合布置方案提供科学依据.

1 风洞试验简介

1.1 工程背景

该在建冷却塔塔高为 220.00 m,进风口标高为 30.75 m,喉部中面直径为 123.00 m.采用 64 对 X 型支柱支撑并与环板基础连接,X 型柱采用矩形截面.冷却塔喉部以下共设置 3 道水平内环梁,分别位于 72.75、94.80 以及 139.43 m 高度处.冷却塔主要几何尺寸如表 1 所示.

表 1 冷却塔主要几何尺寸

Tab. 1 Size characteristics of main components for super large cooling tower

参数	数值	示意图
总高度/m	220.00	
喉部高度/m	165.00	
进风口高度/m	30.75	
塔顶直径/m	128.00	
塔底直径/m	185.00	
喉部直径/m	123.00	
支柱截面/(m×m)	1.70×1.00	
环基截面/(m×m)	10.50×2.20	

风洞试验模型缩尺比为 1:450,采用亚克力材料制作能够保证模型具有足够的刚度和强度.塔筒沿子午向布置 12 层外压测点,每层沿环向顺时针均匀布置 36 个测点,总 432 个测点.

1.2 风场模拟

试验用风洞是一座闭口回流式矩形截面风洞,主试验段宽 5.0 m、高 4.5 m,风速连续可调,最高稳定风速可达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.试验风场按《建筑结构荷载规范》中的 B 类地貌模拟^[12].风场模拟的主要指标为平均风速剖面、湍流度剖面和顺风向脉动风谱等,三角尖劈和地面粗糙元置于来流前端用以模拟相应的风场,模拟结果见图 1.图 1 显示风场模拟效果较

好,满足试验要求.

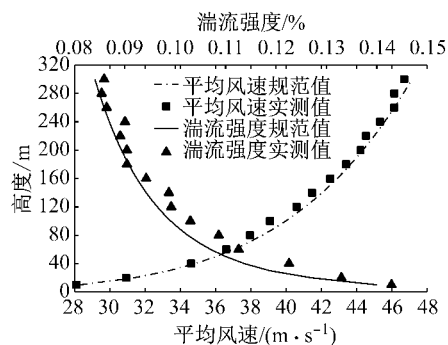


图 1 风场模拟结果

Fig. 1 Simulation of wind characteristics in boundary layer wind tunnel

1.3 雷诺数效应模拟

Farell 和 Sun 等^[13-14]的研究表明,可通过提高表面粗糙度对模型试验的雷诺数效应进行补偿.

共测试了如下 7 种表面粗糙度工况:①表面光滑;②均匀粘贴 1 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带;③均匀粘贴 2 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带;④间隔粘贴 2/3 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带;⑤均匀粘贴 3 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带;⑥间隔粘贴 3/4 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带;⑦均匀粘贴 4 层 5 mm 宽计 36 条粗糙纸带.图 2 给出了不同表面粗糙度下冷却塔体型系数分布曲线,并与规范曲线^[4-5]进行对比.由图 2 可见,均匀粘贴 4 层粗糙纸带可以较好地实现冷却塔雷诺数效应模拟.最终模拟措施如图 3 所示.本文试验均以 30%透风率考虑运行状态下的百叶窗开启效应^[15].

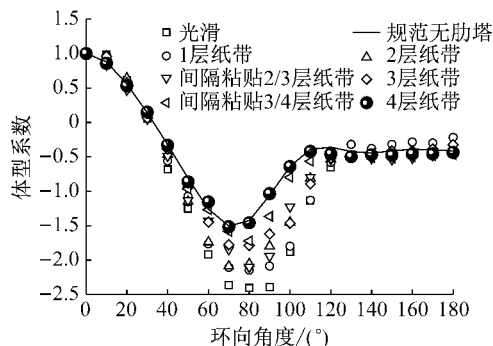


图 2 不同表面粗糙度下冷却塔体型系数分布曲线

Fig. 2 Shape coefficient at different surface roughnesses

1.4 试验工况

群塔试验包括双塔和串联、矩形、菱形、L 形、斜 L 型四塔组合共 6 类工况,每种布置方案各工况风向角间隔 22.5° (逆时针旋转).冷却塔塔间距均为 $2D$, D 为塔底直径.为更准确反映冷却塔在电厂中受到的干扰效应,参考实际工程布置了多个周边干

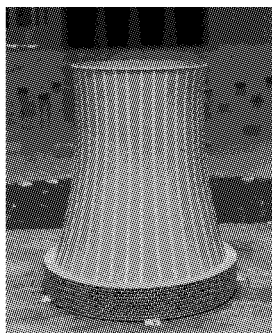


图3 雷诺数效应措施示意图

Fig. 3 Diagram of simulation of Reynolds effect measure

扰建筑,各工况具体平面布置见图4.

1.5 干扰效应的量化方法

干扰效应研究中通常采用干扰因子 F 评估周边构筑物对受扰建筑的干扰效应,计算公式如下:

$$F = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中: P 为有干扰时结构风荷载; P_0 为无干扰时结构风荷载.其中,结构所受的风荷载可分为静力、动力和极值风荷载,同时又存在最大正压干扰因子、最小负压干扰因子、阻力系数干扰因子和升力系数干扰因子等以不同参数为依据的干扰因子.已有研

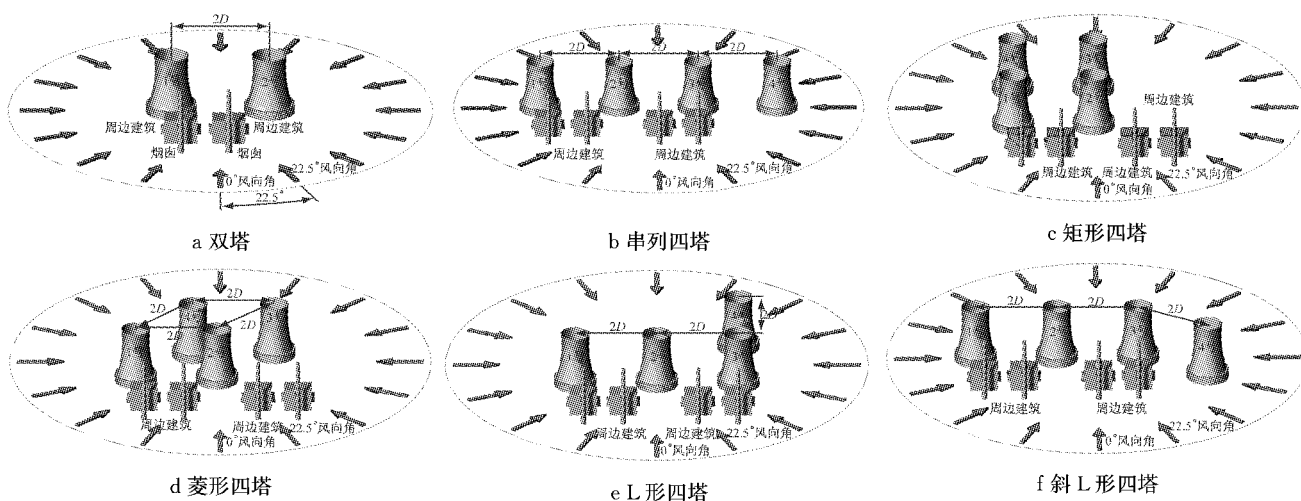


图4 群塔组合工况布置示意图

Fig. 4 Layouts of grouped towers

究表明,此类干扰因子均只能反映干扰效应的一部分特征^[6-11].由于最大正压干扰因子和最小负压干扰因子只考虑了结构表面局部风压分布情况,以其作为结构设计指标对冷却塔这类三维壳体结构并不完全适用.本文采取由整体阻力系数和整体升力系数合成的合力系数作为计算参数(式2),并计算相应的静力、动力和极值干扰因子.

$$C_T = \sqrt{C_D^2 + C_L^2} \quad (2)$$

式中: C_T 、 C_D 和 C_L 分别为受扰冷却塔的整体合力、阻力和升力系数.

2 试验结果分析

2.1 合力系数

已有研究^[16-17]表明,冷却塔局部区域的风压信号呈现出非高斯特性,因此本文开展了相应的风压极值研究.首先对合力系数时程进行概率密度统计,图5和图6分别给出了单塔工况和典型群塔工况(菱形布置247.5°风向角下2号塔)合力系数时程

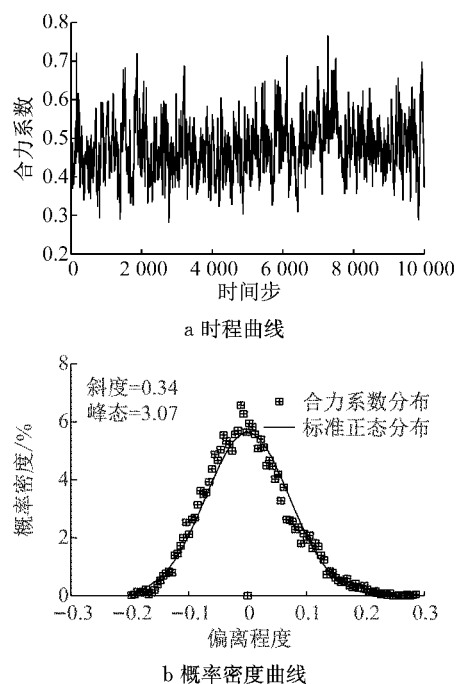


图5 单塔工况合力系数时程曲线及概率密度曲线

Fig. 5 Sample time series and PDFs of resultant force coefficient in single tower

及其概率密度曲线. 由图 5 和图 6 可知, 单塔工况下合力系数的斜度和峰态分别为 0.34 和 3.07, 四塔工况下合力系数的斜度和峰态分别为 0.43 和 3.45, 且单塔和四塔干扰工况合力系数概率分布均与标准正态分布吻合良好, 这也反映了以合力系数作为干扰因子计算指标的合理性. 合力系数极值可由下式计算得到:

$$C_{Tmax} = C_{Tmean} \pm gC_{Tstd} \quad (3)$$

式中: C_{Tmax} 、 C_{Tmean} 和 C_{Tstd} 分别为合力系数的极值、均值和根方差; g 为峰值因子, 本文取 3.5^[18].

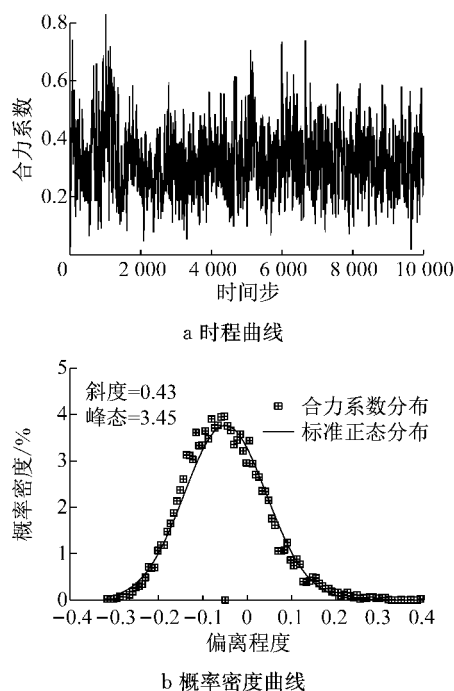


图 6 群塔工况合力系数时程曲线及概率密度曲线

Fig. 6 Sample time series and PDFs of resultant force coefficient in group towers

2.2 典型四塔组合最大干扰因子

基于合力系数时程分别计算了静力、动力和极值干扰因子. 其中, 静力干扰因子 F_M 、动力干扰因子 F_D 和极值干扰因子 F_E 分别定义如下:

$$F_M = \frac{G(C_{Tmean})}{S(C_{Tmean})} \quad (4)$$

表 2 各布置形式下最不利工况干扰因子列表

Tab. 2 Interference factors of the most unfavorable condition at different layouts

布置方案	静力工况			动力工况			极值工况		
	F_M	塔号	风向角/(°)	F_D	塔号	风向角/(°)	F_E	塔号	风向角/(°)
双塔布置	1.16	1	157.0	1.54	2	247.5	1.26	2	247.5
串列四塔	1.31	3	337.5	1.76	2	247.5	1.27	3	0
矩形四塔	1.24	2	315.0	2.03	2	247.5	1.43	2	247.5
菱形四塔	1.16	2	247.5	1.77	2	247.5	1.37	2	247.5
L 形四塔	1.20	2	45.0	2.05	2	112.5	1.33	2	112.5
斜 L 形四塔	1.32	2	315.0	1.86	2	247.5	1.29	2	315.0

$$F_D = \frac{G(C_{Tms})}{S(C_{Tms})} \quad (5)$$

$$F_E = \frac{G(C_{Tmax})}{S(C_{Tmax})} \quad (6)$$

式(4)~(6)中: $G(*)$ 和 $S(*)$ 分别表示群塔和单塔工况合力系数特征值.

表 2 给出了不同方案下塔群最大 F_M 、 F_D 和 F_E . 由表 2 可知: ①双塔最大干扰因子几乎均小于四塔组合工况, 不同方案最大干扰因子多发生于 2 号塔, 说明实际工程中后续冷却塔建设对已建塔的风荷载放大作用不容忽视. ②3 种干扰因子数值与分布规律并不完全一致, F_D 数值偏大, 部分最不利工况 F_D 大于 2.00, 各方案下 F_M 数值均偏小. ③典型四塔组合形式中, 对静力干扰效应影响最大的布置方式是斜 L 形方案, 影响最小的是菱形方案; 动力干扰效应最大的布置形式为 L 形方案, 最小的是串列方案; 极值干扰效应最大的是矩形方案, 最小的是串列方案. 综上所述, 2 号塔的干扰效应最为显著, 后续干扰效应及机理研究均基于 2 号塔进行分析.

2.3 干扰效应分析

图 7 给出了双塔和串列四塔布置下 F_M 、 F_D 和 F_E 沿风向角变化曲线. 与双塔不同的是, 串列四塔布置下干扰因子近似呈轴对称分布, 这是由于增加的两干扰塔使得 2 号塔在 $0^\circ \sim 180.0^\circ$ 风向角内受到明显的干扰效应. 从图 7b 可以看出, 对于受扰塔而言, 上游存在两干扰塔或单塔仅对静力干扰效应影响较明显(90° 与 270° 风向角), 对极值和动力干扰效应影响微弱. 结合表 1 可知单排串列布置时干扰效应的控制工况由中间塔决定, 冷却塔数量的增加对最大 F_E 数值大小的影响较小.

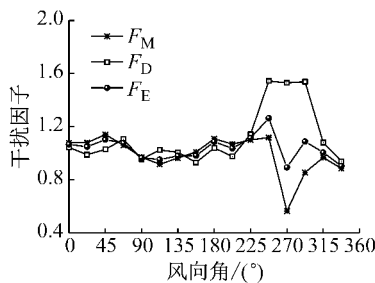
图 8 给出了矩形和菱形四塔布置下 F_M 、 F_D 和 F_E 沿风向角变化曲线. 对比图 8 与图 7a 可知, $0^\circ \sim 67.5^\circ$ 和 $292.5^\circ \sim 360.0^\circ$ 风向角内菱形和矩形布置增加的两干扰塔均对 2 号塔干扰效应无明显影响, $90.0^\circ \sim 270.0^\circ$ 风向角内干扰塔的影响较大, F_D 最大增加了 31.8%. 两种形式最大 F_E 均发生于 247.5°

风向角,由塔群相对位置关系可知,两种工况下2号塔上游均由1号和4号塔形成了明显的“狭缝”,此时 F_D 分别达到了2.03(矩形)和1.77(菱形).对比可知,矩形布置时受扰塔不同风向角下 F_D 和 F_E 普遍较大,且最不利工况干扰因子大于菱形布置.

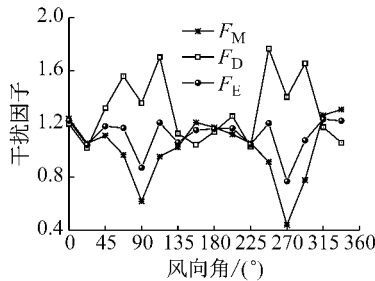
图9给出了L形和斜L形四塔组合 F_M 、 F_D 和 F_E 沿风向角变化曲线.对比可知:① $180.0^\circ \sim 360.0^\circ$ 风向角内,L形四塔与双塔组合干扰因子分布吻合度较高,增加的两塔对受扰塔的干扰作用主要体现在 $22.5^\circ \sim 157.5^\circ$ 风向角内,L形最不利工况即发生在这一范围;②L形布置最大 F_D 和 F_E 均发生于 112.5° 风向角, F_D 达2.05,矩形、菱形和L形布置最不利工况受扰塔均位于两塔狭缝下游,但菱形布置

时来流风经两干扰塔狭缝加速后尾流发展不充分,此时 $F_D(1.77)$ 仍小于其他两种工况(2.03和2.05);③不同风向角下斜L形布置干扰因子数值与分布规律与串列布置十分接近,说明4号塔相对位置的改变对2号塔干扰效应的影响微弱.

综上所述,塔群静力干扰效应通常表现为遮挡效应,即多数风向角下 $F_M \leq 1$;动力干扰效应常表现为狭缝效应,即多数风向角下 $F_D \geq 1$.极值干扰因子既能体现出受扰塔位于干扰塔下游时的遮挡效应,又能反映出受扰塔位于两塔狭缝下游时的风荷载放大效应.因此本文采取 F_E 作为典型四塔组合冷却塔群干扰效应的衡量标准.



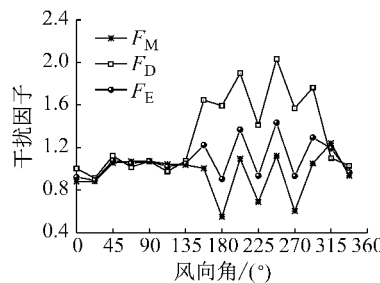
a 双塔布置



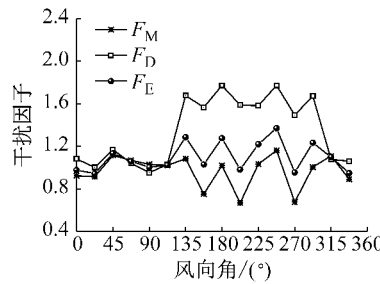
b 串列四塔

图7 双塔和串列四塔布置下干扰因子沿风向角变化曲线

Fig. 7 Influence factors along wind angles in layouts of two towers and four towers in a row



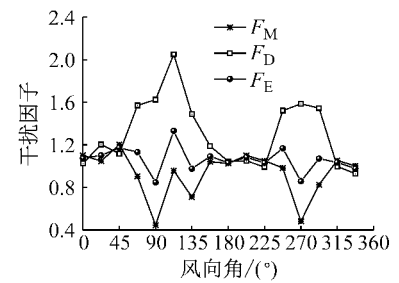
a 矩形四塔



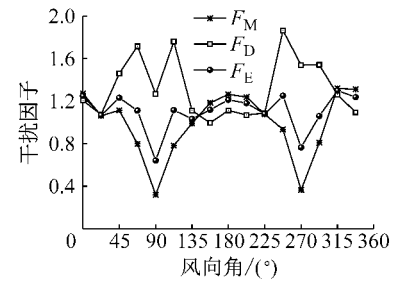
b 菱形四塔

图8 矩形和菱形布置下2号塔干扰因子沿风向角变化曲线

Fig. 8 Influence factors along wind angles for NO. 2 tower in rectangular arrangement and lozenge arrangement



a L形四塔



b 斜L形四塔

图9 L形和斜L形布置下2号塔干扰因子沿风向角变化曲线

Fig. 9 Influence factors along wind angles for NO. 2 tower in L-shaped and oblique L-shaped arrangement

2.4 典型四塔组合干扰因子估算方法

上述研究表明,不同四塔布置下塔群干扰效应有较大差别,因此有必要针对四塔方案给出相应的干扰因子估算方法.5种典型组合形式中,矩形、菱形和L形方案的塔群干扰作用较接近,最大干扰因子分别为1.43、1.37和1.33;串列与斜L形布置塔群干扰效应较接近,最大干扰因子分别为1.27和1.29.因此从塔群干扰效应的角度定性地给出四塔布置方案建议:在不考虑土地使用效率等因素的前

提下应按以下顺序进行方案选择:串列>斜L形>L形>菱形>矩形.

图10中汇总给出了5种典型四塔组合形式布置方案,为便于分析,将1号和2号塔作为已固定位置的冷却塔,并视为一个整体(塔群A),将3号和4号塔视为一个整体(塔群B).5种四塔组合方案的不同之处在于塔群A与塔群B相对位置的改变,定义塔群A中心点与塔群B中心点连线相对X轴的夹角为四塔组合形式的特征角 α (取绝对值),其中L形

表 5 菱形方案干扰因子拟合参数

Tab. 5 Parameters of interference factors in lozenge arrangement

i	1	2	3	4	5	6	7	8
a_i	31.890 0	30.810 0	0.029 1	0.065 7	0.048 9	0.056 6	0.028 2	0.025 3
b_i	0.006 6	0.006 7	0.053 5	0.100 3	0.072 9	0.120 2	0.172 4	0.147 1
c_i	0.926 5	4.062 0	0.347 4	2.416 0	-2.702 0	-2.034 0	2.318 0	0.398 7
拟合优度/%	96.54							

表 6 斜 L 形方案干扰因子拟合参数

Tab. 6 Parameters of interference factors in oblique L-shaped arrangement

i	1	2	3	4	5	6	7	8
a_i	1.325 0	0.318 2	0.146 7	0.091 8	0.069 6	0.076 6	0.044 1	0.033 3
b_i	0.002 5	0.011 5	0.025 3	0.099 3	0.044 5	0.067 2	0.136 5	0.179 9
c_i	1.349 0	3.100 0	3.358 0	2.341 0	5.805 0	-1.397 0	-0.888 9	0.764 0
拟合优度/%	98.79							

表 7 L 形方案干扰因子拟合参数

Tab. 7 Parameters of interference factors in L-shaped arrangement

i	1	2	3	4	5	6	7	8
a_i	0.722 3	0.541 3	0.446 6	0.865 3	1.136 0	0.492 0	0.939 4	1.060 0
b_i	112.600 0	69.290 0	247.800 0	149.700 0	387.800 0	291.100 0	208.200 0	4.693 0
c_i	17.180 0	35.860 0	17.760 0	34.570 0	110.700 0	33.120 0	41.770 0	79.390 0
拟合优度/%	98.15							

图 13 给出了 F_E 最小的串联工况和最大的矩形工况的冷却塔合力系数 C_T 功率谱密度曲线。分析可知,两种工况功率谱密度曲线有相似的变化规律,在感兴趣的频段范围内矩形布置的功率谱密度明显高于串联形式,这将导致前者的干扰效应要高于后者。串联布置下塔群形成的涡旋结构要优于矩形布置,其能量要高于后者。结合已有研究可知,流场中形成漩涡所需要的能量来自流场本身,漩涡的能量越高则消耗流场的能量越高,因此串联布置下塔群干扰效应相对矩形布置较小。

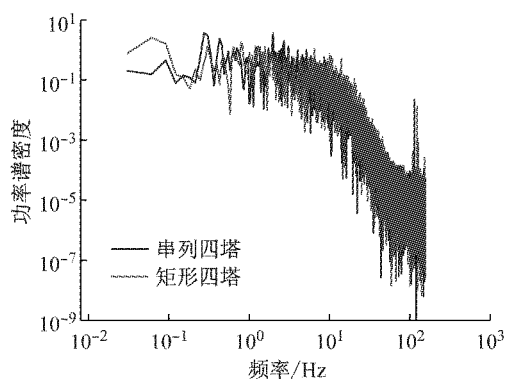


图 13 矩形和串联布置最不利工况合力系数谱对比图

Fig. 13 Comparison of spectral of resultant force coefficients between row arrangement and rectangular arrangement

3 结论

以工程中最常见的串联、矩形、菱形、L 形和斜 L

型 5 种四塔组合方案为例,结合刚体测压风洞试验系统研究了典型四塔组合形式对冷却塔群风荷载静力、动力和极值干扰效应的影响规律和干扰因子的估算方法,并采用数理统计和频谱分析等方法对作用机理进行解释,得到如下主要结论:

(1)单塔和群塔工况合力系数的概率密度分布均呈现出标准的正态分布特征,5 种四塔组合形式下最大干扰因子均大于双塔情况,且控制工况发生于中间塔,说明实际工程中后续冷却塔建设对已建塔的风荷载放大作用不容忽视。

(2)不同四塔组合形式塔群静力干扰效应通常表现为遮挡效应,多数风向角下 $F_M \leq 1$;而动力干扰效应更多地呈现为狭缝效应,多数风向角下 $F_D \geq 1$; F_E 既能体现出干扰塔位于上游时造成的遮挡效应,又能反映出受扰塔位于两塔狭缝下游时的风荷载放大效应,综合考虑采取 F_E 作为塔群干扰效应的衡量标准最为合理。

(3)不同四塔组合布置方案最不利工况的合力系数功率谱均出现较明显的涡脱尖峰,矩形和菱形方案在更多的风向角出现上述现象;对比串联和矩形工况发现,在感兴趣的频段范围内后者功率谱密度明显高于前者,串联布置形成的涡旋结构要优于矩形布置。

综上所述,从塔群干扰效应的角度定性给出了四塔组合布置方案建议,在不考虑土地使用效率等因素的前提下应按以下顺序进行方案选择:串联 > 斜 L 形 > L 形 > 菱形 > 矩形。回归分析表明四塔

组合形式的特征角度与最大干扰因子之间存在良好的线性相关性;在此基础上,提出了适用于 5 种典型四塔组合形式的考虑风向干扰因子估算公式。

参考文献:

- [1] 柯世堂, 侯宪安, 姚友成, 等. 大型冷却塔结构抗风研究综述与展望[J]. 特种结构, 2012, 29(6):5.
KE Shitang, HOU Xian'an, YAO Youcheng, *et al.* Review and prospect of wind resistance researches on large cooling towers [J]. *Special Structures*, 2012, 29(6):5.
- [2] ARMITT J. Wind loading on cooling towers[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(3):623.
- [3] 王浩, 柯世堂. 三种典型子午线型大型冷却塔风致响应分析[J]. 力学与实践, 2015, 37(6):690.
WANG Hao, KE Shitang. Wind-induced response analysis for large cooling tower with three typical meridian curves [J]. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(6):690.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 火力发电厂水工设计规范: DL/T5339—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. The thermal power plant hydraulic design specification: DL/T5339—2006 [S]. Beijing: China Power Press, 2006.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of cooling for industrial recirculating water: GB/T 50102—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [6] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers[J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(10):874.
- [7] ORLANDO M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers[J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(8): 979.
- [8] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 群塔布置对冷却塔整体风荷载和风致响应的不同干扰效应[J]. 工程力学, 2016, 33(8):15.
ZHANG Junfeng, GE Yaojun, ZHAO Lin. Interference effects on global wind loads and wind induced responses for group hyperboloidal cooling towers [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8):15.
- [9] 邹云峰, 牛华伟, 陈政清. 基于完全气动弹性模型的冷却塔干扰效应风洞试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(12):1.
ZOU Yunfeng, NIU Huawei, CHEN Zhengqing. Wind tunnel test on wind-induced interference effect of cooling towers based on full aero-elastic model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(12):1.
- [10] 程霄翔, 赵林, 葛耀君. 典型矩形八塔超大型冷却塔群风致干扰效应试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(1):372.
CHENG Xiaoxiang, ZHAO Lin, GE Yaojun. Wind tunnel investigation on interference effect of eight grouped super large cooling towers with rectangular arrangement [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(1):372.
- [11] KE S T, GE Y J, ZHAO L, *et al.* Stability and reinforcement analysis of super-large exhaust cooling towers based on a wind tunnel test [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2015, 141(12): 04015066.
- [12] 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB50009—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [13] FARELL C, GUVEN O, MAISCH F. Mean wind loading on rough-walled cooling towers[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1976, 102(6):1059.
- [14] SUNA T F, ZHOUB L M. Wind pressure distribution around a ribless hyperbolic cooling tower [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 14 (S1/S2/S3):181.
- [15] KE S T, LIANG J, ZHAO L, *et al.* Influence of ventilation rate on the aerodynamic interference for two IDCTs by CFD [J]. *Wind and Structures*, 2015, 20(3): 449.
- [16] 柯世堂, 侯宪安, 赵林, 等. 超大型冷却塔风荷载和风振响应参数分析: 自激励效应[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12):45.
KE Shitang, HOU Xian'an, ZHAO Lin. Parameter analysis of wind loads and wind induced responses for super-large cooling towers: self-excited force effect [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(12):45.
- [17] 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——风压极值特性探讨[J]. 实验流体力学, 2010, 24(4): 7.
KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin. Research on features of fluctuating wind pressure on large hyperbolic cooling tower—discussions on extreme wind pressure [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(4): 7.
- [18] Ke S T, Ge Y J. Extreme wind pressures and non-Gaussian characteristics for super-large hyperbolic cooling towers considering aero-elastic effect [J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 2015, 141(7): 04015010.