

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240206003

基于气动荷载准则的大型冷却塔六塔风致干扰效应研究*

陶冶¹, 陈旭¹, 吴云¹, 赵林²

(1. 上海师范大学建筑工程学院, 上海 201418; 2. 同济大学防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为研究大型冷却塔典型六塔布置下的群塔干扰效应, 开展了矩形布置和菱形布置两种群塔组合、三种塔间距下的刚体模型测压风洞试验, 探讨了基于气动荷载的干扰因子随群塔布置形式、塔间距和风向角的变化规律, 分析了最不利工况下的塔筒表面平均风压和脉动风压分布特征。结果表明: 六塔组合下的菱形布置形式相比矩形布置的群塔干扰效应更大, 受干扰效应影响最大的冷却塔位于来流下风向; 两种布置形式下干扰因子对风向角的敏感性要大于塔间距; 受扰塔的表面平均风压和脉动风压呈非对称分布, 干扰效应增大了平均风压在侧风区和背风区的吸力以及脉动风压的数值大小。

关键词: 大型冷却塔; 群塔干扰; 气动荷载; 风洞试验

中图分类号: TU33⁺² **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0849-10

Study on Wind-induced Interference Effects among Six Large Cooling Towers Based on Aerodynamic Loading Criteria

TAO Ye¹, CHEN Xu¹, WU Yun¹, ZHAO Lin²

(1. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the wind-induced interference effects in a typical six-tower arrangement of large cooling towers, wind tunnel pressure measurements on rigid models were conducted for two tower layouts—rectangular and rhombic—with three different tower spacings. The variation patterns of interference factors based on aerodynamic loading with respect to tower group layout, tower spacing, and wind direction angle were investigated. The distribution characteristics of average and fluctuating wind pressures on the tower surface under the most unfavorable conditions were analyzed. The results showed that the rhombic layout exhibited stronger tower group interference effects compared to the rectangular layout, with the most significantly disturbed cooling tower located in the leeward direction of the incoming wind. Moreover, the sensitivity of the interference factors to wind direction angle was greater than that to tower spacing for both tower layouts. The distribution of average and fluctuating wind pressures on the surfaces of disturbed towers was asymmetric. The interference effects increased

* 收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-04-22

基金项目: 桥梁结构抗风技术交通行业重点实验室开发课题基金(KLWRTBMC22-02)资助

作者简介: 陶冶(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事结构抗风研究。E-mail: 458094857@qq.com

通信作者: 陈旭(1988—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事结构风工程研究。E-mail: chenxu@shnu.edu.cn

the suction of average wind pressures in the side and leeward wind regions, as well as the magnitude of fluctuating wind pressures.

Keywords: large cooling tower; tower group interference; aerodynamic loading; wind tunnel test

0 引言

大型冷却塔作为典型的高耸薄壁壳体结构,具有质量轻、柔度大、阻尼小、自振频率低等特点,属于典型的风敏感结构。随着电力行业日益增长的需求,国内规划建设了一批高度超出规范限值且塔群布置复杂的大型冷却塔,群塔组合形式从双塔、四塔向六塔、八塔逐渐发展^[1-5]。各塔之间的气动干扰使得群塔与单塔的气动荷载差异显著,复杂群塔布置也加剧了大型冷却塔对风荷载的敏感性,导致结构安全隐患进一步增加。尤其在特异强风作用下,大型冷却塔群将面临更加严峻的抗风安全问题^[6-7]。

大型冷却塔风致干扰效应研究始于1964年英国渡桥电厂冷却塔群的风毁事故^[8],至今仍是热门的研究课题。周良茂等^[9]对北京石景山电厂两座120 m高的冷却塔开展了风压现场实测,得到了受扰冷却塔表面平均风压体型系数分布以及脉动风压剧烈变化的特征。沈国辉等^[10]通过对比单塔与双塔喉部高度处风压系数和截面阻力系数研究了群塔干扰效应大小,发现双塔平行排列下因塔间夹缝效应导致干扰效应显著。张军锋等^[11]基于整体阻力系数的干扰因子研究了双塔干扰效应,结果表明群塔干扰效应与塔间距以及来流风向关系密切。L. Zhao等^[12]以“稳定系数”和“总造价”作为指标提出了六塔干扰下最不利风荷载分布模式。S. T. Ke等^[13]和H. Wang等^[14]针对工程中典型的串列、矩形、菱形、L形和斜L形四种塔布置方案,分析了不同群塔组合形式对风压非高斯特性和峰值因子取值的影响,提出了极值风荷载的分布特征。实际工程中为了量化群塔干扰效应,各国冷却塔设计规范采用干扰因子来考虑复杂群塔干扰效应^[15-17],通过整体放大单塔表面风荷载进行工程结构内力计算和配筋设计。然而,干扰因子不同的评价方法和相应的评价指标存在较大离散性和取值不统一的问题^[18-20],出现了依赖于不同评价指标体系的多种等效风荷载分布模式,给设计工作带来了困扰。

基于气动风荷载层面的干扰效应评价指标如整体阻力系数、整体升力系数、风压系数等能直接从风洞试验现象出发,工程应用简便直接。鉴于此,本文将从气动荷载层面开展冷却塔风致干扰效应研究。通过典型六塔布置下的群塔干扰风洞试验,研究大型冷却塔群塔气动荷载干扰效应随塔间距和风向角的变化关系,量化不同间距下的气动荷载干扰因子,并对最不利工况下的表面风压分布进行分析探讨,以此为大型冷却塔群塔组合布置方案提供科学依据。

1 试验概况

1.1 工程背景与试验模型

本文研究的大型双曲线型自然通风冷却塔原型结构总高度为215 m,塔筒喉部标高160.610 m,塔筒下环梁标高19.594 m,塔顶中面半径51.622 m,喉部中面半径49.684 m,柱底(±0.000 m)中心半径84.634 m,塔筒底部壳体最大壁厚1.800 m,喉部附近最小壁厚0.270 m,整个塔筒由46根矩形截面一字柱支撑,原型结构尺寸如图1所示。

综合考虑结构尺寸、风洞试验段大小和阻塞率的因素,冷却塔刚性测压模型几何缩尺比设为

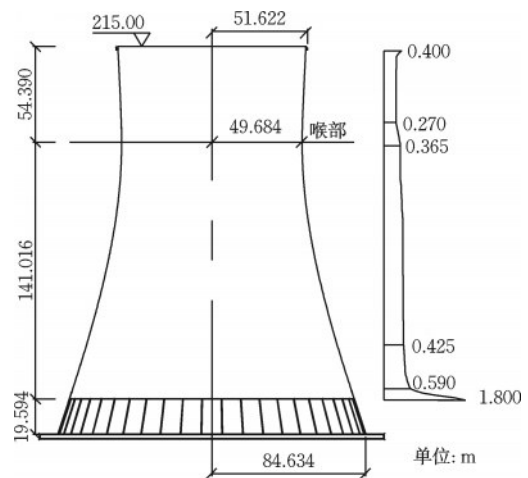


图1 冷却塔原型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cooling tower prototype structure

1:200,对应的风洞阻塞率为 $2.78\% < 5\%$ 。模型外表面沿高度方向布置12层测压点,每层沿环向每隔 10° 均匀布置36个测压点,整个塔筒外表面共计布置 $12 \times 36 = 432$ 个外压测点(图2)。测压设备为PSI公司DTI Initium电子式动态压力扫描阀,采样频率为300 Hz。风洞试验中的群塔组合形式包括六塔矩形布置(Rec)及六塔菱形布置(Rho)两种,相邻塔距 L 为3种,分别为1.5倍、1.75倍、2.0倍塔筒底部直径,试验进行 $0 \sim 360^\circ$ 增量为 22.5° 共计16个风向角下的刚体模型测压试验(图3)。

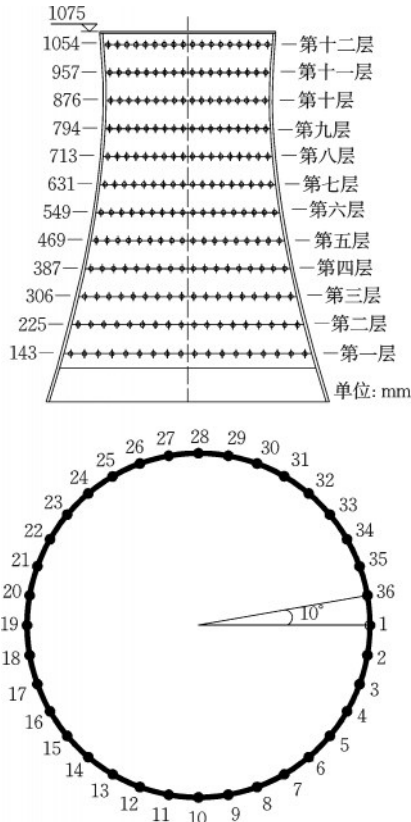
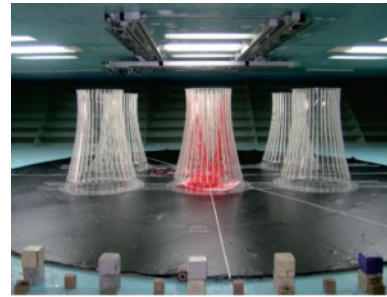
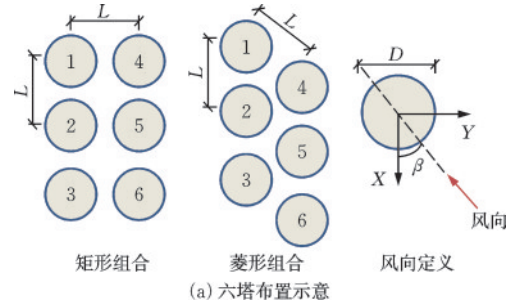


图2 冷却塔模型表面测压点布置

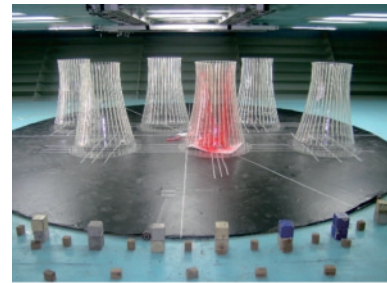
Fig.2 Layout of pressure taps on cooling tower model surface

1.2 风场模拟

六塔干扰刚体模型测压风洞试验在同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室TJ-3风洞中完成,该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,试验段宽15 m、高2 m、长14 m,风速调节范围为 $0 \sim 17.6$ m/s。试验中利用尖劈和粗糙元模拟荷载规范的B类地貌风场^[21],图4给出了风洞中平均风速剖面、紊流度剖面和脉动风速谱的实测值,可见模拟风场的平均风剖



(b) 六塔矩形布置



(c) 六塔菱形布置

图3 风洞试验中群塔布置形式

Fig.3 Tower group layouts in wind tunnel tests

注: L 为相邻两塔中心距; D 为塔底部直径; β 为风向角

面与规范风剖面吻合较好,近地面紊流度为 16% ,脉动风速谱与Karman谱比较接近,该风场满足风洞试验要求。

1.3 雷诺数效应模拟

大型冷却塔原型结构在设计风速下的雷诺数可达 10^8 量级,而风洞试验中由于采用模型缩尺和风速缩尺导致试验雷诺数比实际情况小 $2 \sim 3$ 个量级。为了再现原型结构超高雷诺数条件下的表面绕流特性,C. Farell等^[22]和A. Kareem等^[23]研究表明,增大模型表面粗糙度可实现对风洞试验雷诺数效应的补偿,从而在亚临界雷诺数下实现跨临界钝体绕流特征的模拟。常用改变模型表面粗糙度的方法有表面打磨或刻线、粘贴丝线或粗糙纸带,其中表面粘贴粗糙纸带法由于制作方便、更改厚度容易而广泛使用。本试验在冷却塔外表面相邻测压点间粘贴通长的粗糙纸带来实现表面粗糙度的模

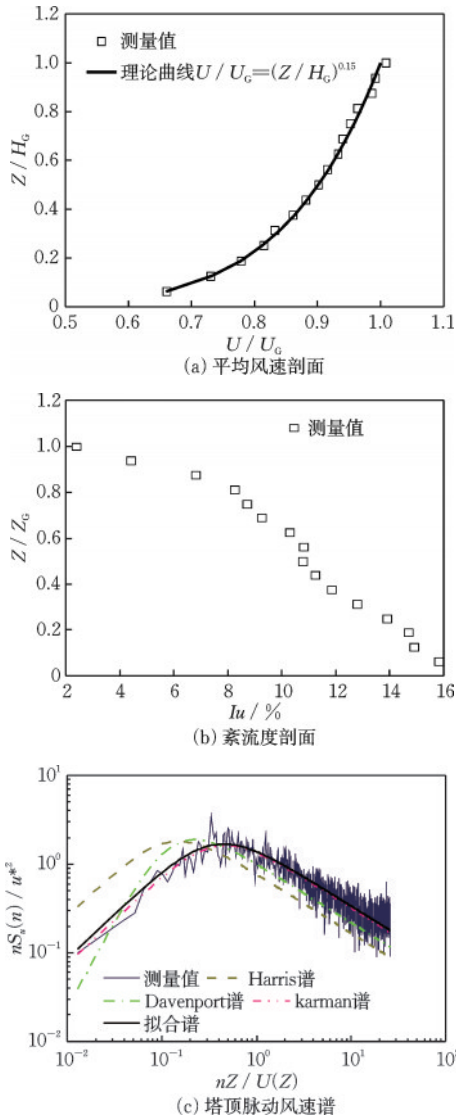


图4 风场参数

Fig.4 Wind field parameters

注: Z 为高度; H_c 为冷却塔总高度; U 为来流风速; U_c 为塔顶风速; I_u 为紊流度; n 为频率; S_n 为脉动风功率谱; u^* 为摩擦速度

拟(图5(a)),每层纸带宽 $b=10\text{ mm}$,每层纸带厚 $k=0.1\text{ mm}$,对应粗糙元的宽度为 b ,粗糙元的厚度为 e ,相邻粗糙元的间距为 a (图5(b))。选用水工规范^[15]中的冷却塔外表面平均风压八项式曲线作为标准,模拟过程着重于最大压力系数 $C_{p_{max}}$ 、最小压力系数 $C_{p_{min}}$ 、尾流压力系数 C_{p_b} 、零压力系数角度 θ_0 、最小压力系数角度 θ_{min} 和分离角度 θ_{p_b} 等参量。图6给出了规范B类地貌风场下的冷却塔外表面八层测点平均风压体型系数在不同粗糙度下的分布,可以看出:冷却塔外表面粘贴三层粗糙纸带时雷诺数模拟效果最好,对应第8层测点的平均相对粗糙度 $e/a=0.02$ 。

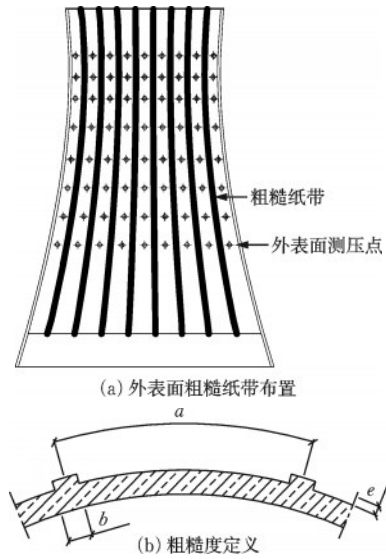


图5 冷却塔雷诺数效应模拟方法

Fig.5 Methods for simulating Reynolds number effects on cooling towers

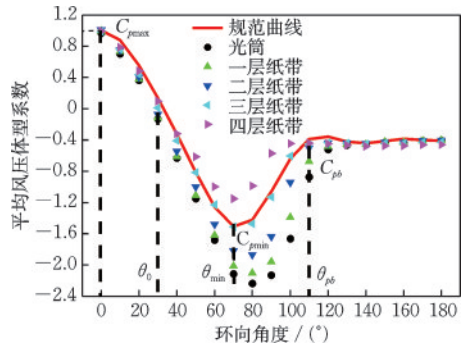


图6 冷却塔雷诺数效应模拟结果

Fig.6 Results of simulations on Reynolds number effects for cooling towers

2 群塔干扰试验结果与讨论

2.1 参数定义

为了便于群塔表面风荷载对比,对作用在塔筒表面的风荷载进行无量纲化处理,其风压体型系数定义如下:

$$C_p(\theta, z) = \frac{P(\theta, z) - P_\infty(z)}{0.5 \times \rho_{air} \times U(z)} \quad (1)$$

式中, $C_p(\theta, z)$ 是 z 高度处环向角度 θ 下的无量纲风压体型系数时程; $P(\theta, z)$ 是 z 高度处环向角度 θ 下的风压时程; $P_\infty(z)$ 是 z 高度处的静压; ρ_{air} 是空气密度; $U(z)$ 是 z 高度处的平均风速。

风荷载干扰效应指标除了有包含局部风荷载的风压系数,还包括表示冷却塔整体风荷载的阻力

系数、升力系数和合力系数,其定义如下:

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^n C_{P_i} A_i \cos \theta_i}{A_T} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{\sum_{i=1}^n C_{P_i} A_i \sin \theta_i}{A_T} \quad (3)$$

$$C_T = \sqrt{C_D^2 + C_L^2} \quad (4)$$

式中, C_D 、 C_L 和 C_T 分别是阻力系数、升力系数和合力系数; n 是冷却塔模型表面测压点总数; C_{P_i} 是测压点 i 的风压系数; A_i 是测压点 i 所对应的附属面积; θ_i 是测压点 i 与风轴的夹角; A_T 是冷却塔塔筒沿风轴方向的投影面积。

为了量化气动干扰效应,定义干扰因子 IF 作为风荷载干扰效应的量化指标,其定义如下^[13]:

$$IF = \frac{P_g}{P_s} \quad (5)$$

式中, IF 是荷载干扰因子; P_g 是群塔干扰下的风荷载指标参数; P_s 是单塔风荷载指标参数。

为反映六塔组合对冷却塔表面风荷载的干扰效应,文中群塔干扰效应的风荷载指标参数包含描述整体风荷载的阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和合力系数 C_T ,也包含描述局部风压特征的最大正压体型系数 $C_{P_{p,max}}$ 、最大负压体型系数 $C_{P_{n,max}}$ 和最大脉动风压系数 $C_{P_{rms,max}}$ 。

2.2 局部风压干扰效应

图7以矩形布置(Rec)下的1号冷却塔(T1)为例,分别给出了1.5倍、1.75倍和2.0倍三种塔间距下按最大正压体型系数 $C_{P_{p,max}}$ 作为干扰指标计算的风荷载干扰因子,可以看出:基于最大正压体型系数的干扰因子数值在0.78~1.29波动,最大正压基本位于受扰冷却塔的迎风滞点,其波动性主要是来

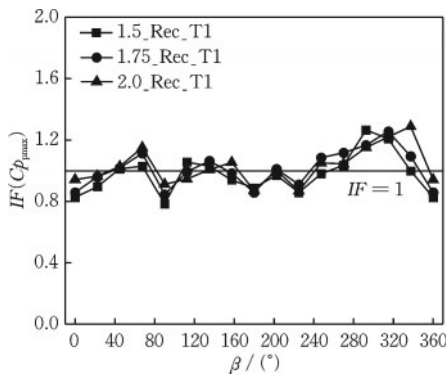


图7 基于最大正压体型系数的干扰因子

Fig.7 Interference factors based on maximum positive pressure shape coefficients

流动压受气动干扰效应的影响。

表1给出了六塔矩形组合(Rec)和六塔菱形组合(Rho)两种群塔布置,1.5倍、1.75倍和2.0倍塔筒底部直径三种塔间距下,按最大负压体型系数 $C_{P_{n,max}}$ 和最大脉动风压系数 $C_{P_{rms,max}}$ 作为干扰指标计算的风荷载干扰因子 $IF(C_{P_{n,max}})$ 和 $IF(C_{P_{rms,max}})$,可以看出:无论是基于最大负压体型系数的荷载干扰因子还是基于最大脉动风压系数的荷载干扰因子,受干扰影响最大的均为1号冷却塔;其中,按最大负压体型系数和最大脉动风压系数作为干扰效应评价指标的最不利工况分别为1.5倍塔间距下六塔菱形布置和1.5倍塔间距下六塔菱形布置;因此,六塔菱形布置比六塔矩形布置更为不利,而渡桥电厂的风毁事故中的八塔组合也为菱形布置形式^[24];而最不利的风向角为337.5°,此时的1号冷却塔位于下风向而非迎风向,这也与渡桥电厂风毁的塔群所处风向角相吻合。

表1 基于最大负压体型系数和最大脉动风压系的最不利工况干扰因子

Table 1 Interference factors under the most unfavorable conditions based on maximum negative pressure shape coefficients and maximum fluctuating wind pressure coefficients

布置方案	$IF(C_{P_{n,max}})$			$IF(C_{P_{rms,max}})$		
	数值	冷却塔编号	风向角/(°)	数值	冷却塔编号	风向角/(°)
1.5_Rec	1.391	T1	315	1.507	T1	292.5
1.75_Rec	1.550	T1	315	1.506	T1	315
2.0_Rec	1.473	T1	337.5	1.546	T1	337.5
1.5_Rho	1.746	T1	270	1.653	T1	90
1.75_Rho	1.560	T1	337.5	1.63	T1	315
2.0_Rho	1.519	T1	337.5	1.562	T1	315

图8给出了1号冷却塔在六塔矩形组合和六塔菱形组合两种布置形式,1.5倍、1.75倍和2.0倍塔筒底部直径三种塔间距下,分别基于最大负压体型系数和基于最大脉动风压系数的干扰因子沿风向角的分布,可以看出:矩形布置和菱形布置下基于最大负压体系系数的干扰因子和基于最大脉动风压系数的干扰因子的分布形式较为吻合,两类干扰因子最大值出现的位置也较为接近;在180°~225°风向角下干扰影响微弱,在270°~360°风向角下干扰影响较大;并且随着塔间距的增大,基于最大脉动风压系数的干扰因子更为显著;同时,两种六塔布置下,菱形布置下的群塔干扰因子更为不利,意味着菱形布置的群塔干扰效应更为显著。

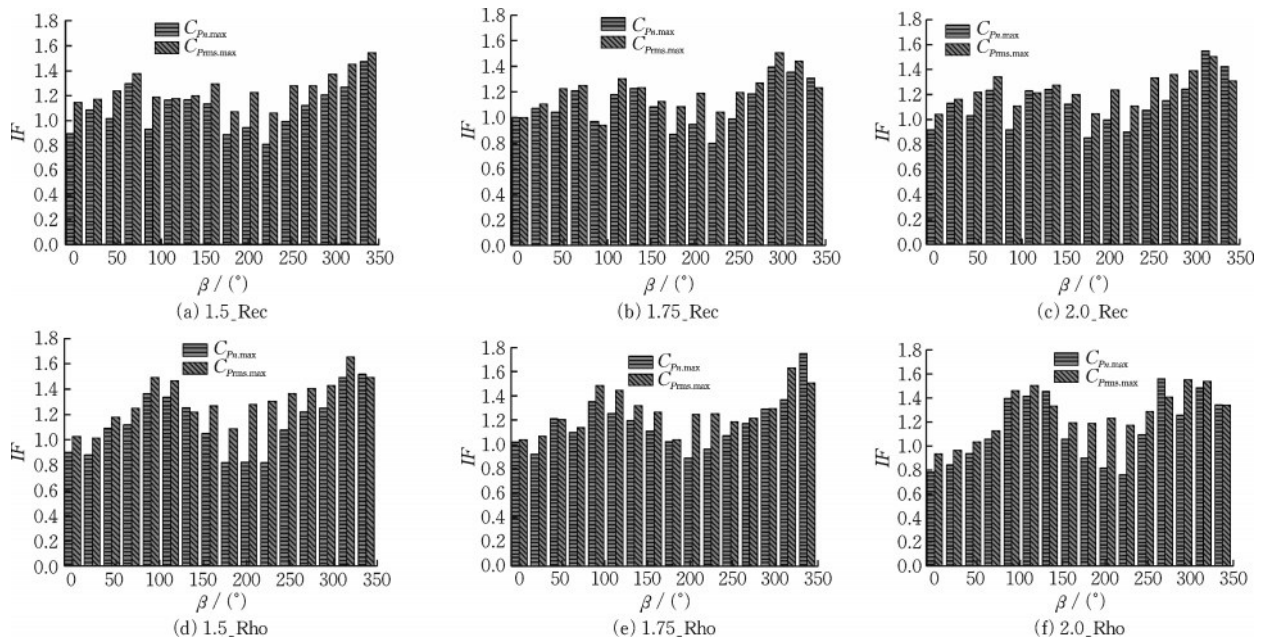


图8 干扰因子随风向角的分布

Fig.8 Distribution of interference factors with wind direction angle

群塔布置下冷却塔表面风压分布与单塔条件下有明显差异,图9给出了单塔下的塔筒表面平均风压系数分布,可以看出:单塔条件下,塔筒表面风压呈现对称的“W”型分布,其中迎风区为正压,侧风区和背风区为负压,最大正压出现在迎风滞点,最大负压出现在侧风区的70°和290°附近,背风区的负压在-0.5左右。图10给出了六塔矩形(Rec)和六塔菱形(Rho)两类布置,1.5倍、1.75倍和2.0倍塔筒底部直径三种塔间距下的1号冷却塔在基于最大负压体型系数干扰因子获得的最不利风向角下的平均风压系数分布,可以看出:六塔布置下,平均风

压呈现出了非对称分布,群塔干扰对迎风区最大正压的影响较小,在迎风滞点的最大正压仍在1.0左右;群塔干扰主要影响侧风区和背风区的最大负压,侧风区最大负压的绝对值相比单塔有所增大,即群塔干扰增大了侧风区的最大风吸力作用;并且六塔菱形布置下的最大吸力作用要大于六塔矩形布置,说明六塔菱形布置下的平均风压分布相比六塔矩形布置更为不利。

图11~图12分别给出了单塔和六塔两种布置、三种塔间距下,基于最大脉动风压系数干扰因子获得的最不利风向角下的脉动风压系数分布,可以看出:单塔条件下,脉动风压呈对称分布模式,受塔筒底部来流紊流和塔筒端部效应双重影响,最大脉动风压出现在塔筒下部沿环向90°和270°附近;六塔干扰下,最大脉动风压仍出现在塔筒下部,但呈现明显的非对称分布,最大脉动风压相比单塔条件数值增大,同时六塔菱形布置下的脉动风压相比六塔矩形布置数值要大,说明群塔干扰增大了冷却塔塔筒表面的脉动风压,并且菱形布置下的群塔干扰效应也大于矩形布置。

2.3 整体风荷载干扰效应

阻力系数 C_d 反映了冷却塔塔筒在风荷载作用下沿风轴方向所承受的顺风向整体风荷载大小,其干扰因子与六塔布置形式、风向角和塔间距三个参数有关。图13给出了六塔矩形(Rec)和菱形(Rho)

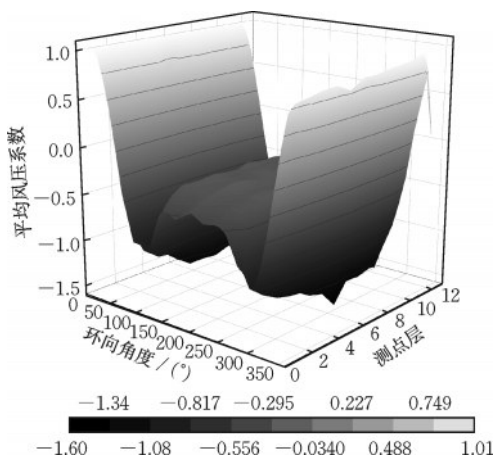


图9 单塔塔筒表面平均风压分布

Fig.9 Distribution of average wind pressure on surface of a single cooling tower

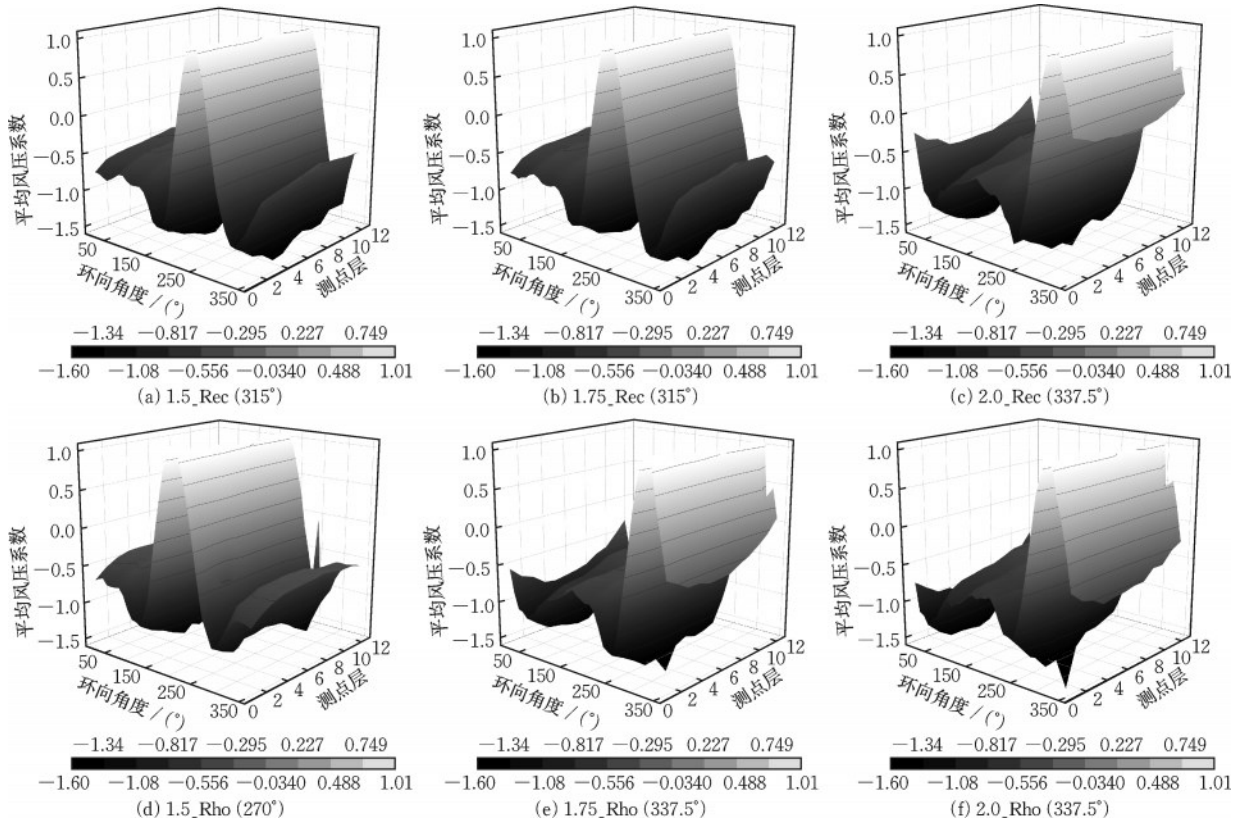


图 10 六塔布置最不利风向下的塔筒表面平均风压分布

Fig.10 Distribution of average wind pressure on tower surface under the most unfavorable wind direction in six-tower layout

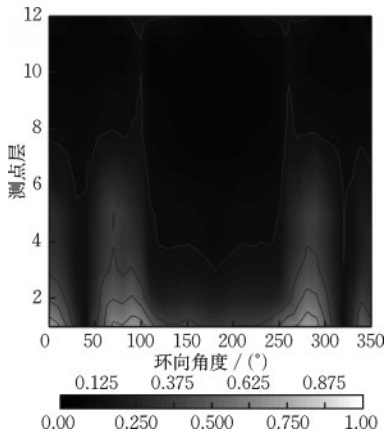


图 11 单塔塔筒表面脉动风压分布

Fig.11 Distribution of fluctuating wind pressure on surface of a single cooling tower

两种布置形式下,1号冷却塔(T1)、2号冷却塔(T2)和3号冷却塔(T3),采用基于整体阻力系数均值计算出的干扰因子 $IF(C_{D,mean})$ 随风向角 β 和塔间距 L/D 的分布,可以看出:两种六塔布置下,基于整体阻力系数均值的干扰因子对风向角的敏感性高于塔间距,即 $IF(C_{D,mean})$ 随 β 的变化程度要大于随 L/D 的变化;两种六塔布置下,T1、T2和T3的最不利风向角分别为 315° 、 292.5° 和 45° ;T1随 L/D 的增大, IF

($C_{D,mean}$)先增加再减小,这是由于塔间距较小时,周边冷却塔对T1形成阻挡效应,随着塔间距的增大,夹缝效应逐渐明显,T2和T3则随 L/D 的增大, $IF(C_{D,mean})$ 逐渐减小;并且,菱形布置下的干扰效应要大于矩形布置,这种干扰效应在 $L/D = 1.5$ 时尤为明显。

表2给出了六塔矩形组合(Rec)和六塔菱形组合(Rho)两种布置,1.5倍、1.75倍和2.0倍塔筒底部直径三种塔间距下,分别按阻力系数均值 $C_{D,mean}$ 、脉动值 $C_{D,rms}$ 和极值 $C_{D,extreme}$ 计算出的干扰因子所对应的最不利工况,可以看出:基于 $IF(C_{D,mean})$ 和 $IF(C_{D,rms})$ 的最不利群塔组合均为六塔菱形布置且在1.5倍塔筒底部直径的塔间距下,基于 $IF(C_{D,extreme})$ 的最不利群塔组合均为六塔菱形布置且在1.75倍塔筒底部直径的塔间距下,可以看出菱形布置下的干扰效应要大于矩形布置;同时,三类干扰因子最大的冷却塔均位于背风区,这与渡桥电厂风毁事故结论相一致。

升力系数 C_L 反映了冷却塔塔筒在风荷载作用下沿垂直风轴方向所承受的横风向整体风荷载大小,由于单塔的升力系数几乎等于0,因此,基于此

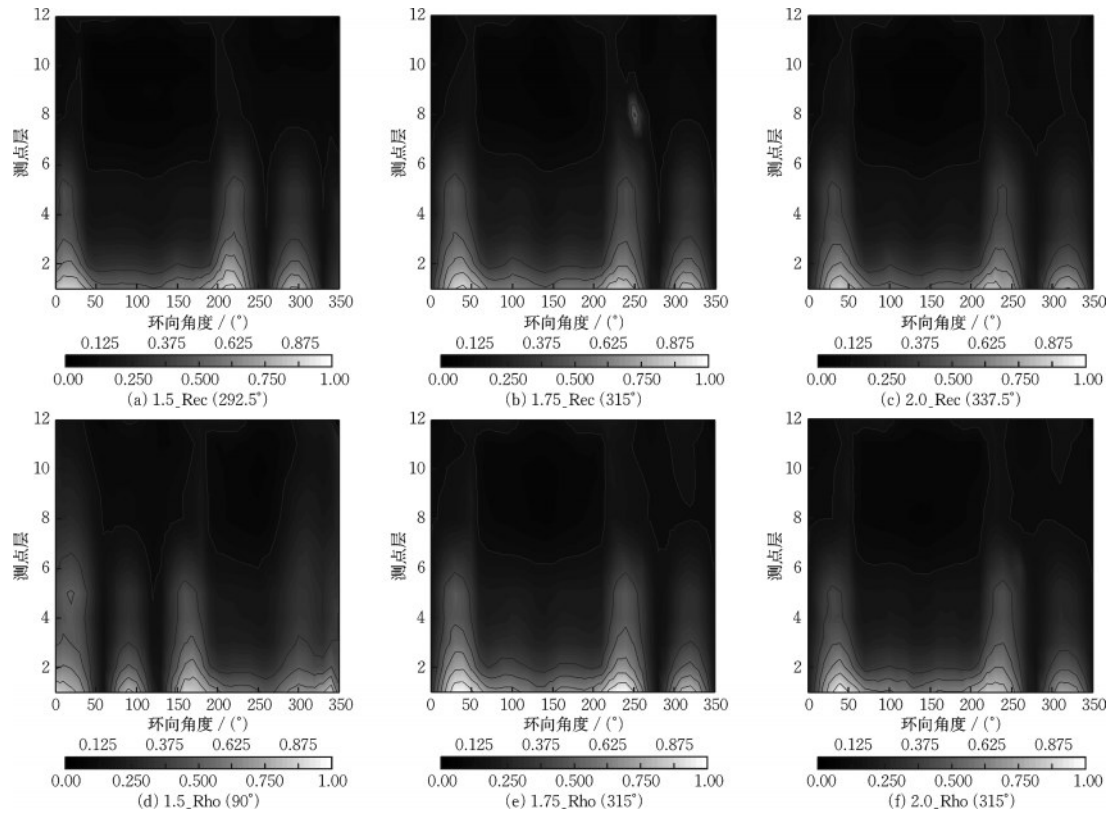


图 12 六塔布置最不利风向下的塔筒表面脉动风压分布

Fig.12 Distribution of fluctuating wind pressure on tower surface under the most unfavorable wind direction in six-tower layout

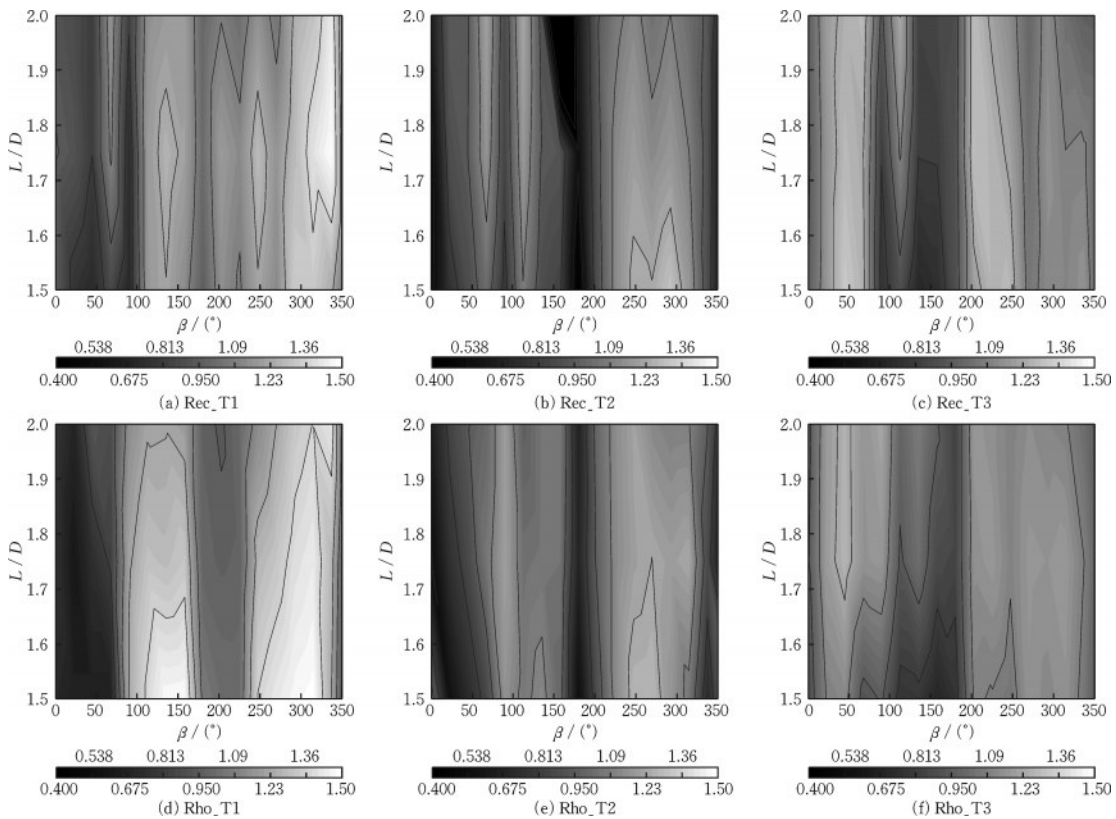


图 13 基于整体阻力系数均值的干扰因子随风向角和塔间距的变化关系

Fig.13 Variation of interference factors based on average values of drag coefficients with wind direction angles and tower spacings

表 2 基于阻力系数特征值的最不利工况干扰因子

Table 2 Interference factors under the most unfavorable conditions based on characteristic values of drag coefficients

布置方案	$IF(C_{D,mean})$			$IF(C_{D,rms})$			$IF(C_{D,extreme})$		
	数值	塔号	风向角/(°)	数值	塔号	风向角/(°)	数值	塔号	风向角/(°)
1.5_Rec	1.339	T1	292.5	1.682	T1	270	1.181	T2	270
1.75_Rec	1.486	T1	337.5	1.814	T2	180	1.129	T2	270
2.0_Rec	1.309	T1	292.5	1.878	T1	90	1.194	T1	270
1.5_Rho	1.490	T1	315	2.093	T2	180	1.305	T1	270
1.75_Rho	1.429	T1	315	2.007	T2	180	1.368	T3	45
2.0_Rho	1.416	T1	337.5	1.987	T2	180	1.282	T3	45

指标计算的干扰因子 $IF(C_L)$ 波动剧烈,不宜作为干扰效应的衡量指标。

合力系数 C_T 反映了冷却塔塔筒在风荷载作用下承受的整体风荷载大小,表 3 给出了六塔矩形和菱形组合两种布置、三种塔间距下分别按合力系数特征值计算出的干扰因子所对应的最不利工况,结

论与基于阻力系数特征值的干扰因子类似,最不利群塔组合为 1.5 倍塔筒底部直径的塔间距下的菱形布置,且此时受干扰最大的冷却塔位于下风向,此时冷却塔不仅受遮挡效应,群塔夹缝效应更加明显。

表 3 基于合力系数特征值的最不利工况干扰因子

Table 3 Interference factors under the most unfavorable conditions based on characteristic values of resultant coefficients

布置方案	$IF(C_{T,mean})$			$IF(C_{T,rms})$			$IF(C_{T,extreme})$		
	数值	塔号	风向角/(°)	数值	塔号	风向角/(°)	数值	塔号	风向角/(°)
1.5_Rec	1.490	T1	315	2.144	T1	45	1.573	T1	337.5
1.75_Rec	1.480	T1	337.5	2.008	T1	90	1.492	T1	337.5
2.0_Rec	1.430	T1	315	1.772	T1	90	1.407	T1	337.5
1.5_Rho	1.621	T1	337.5	2.214	T2	202.5	1.582	T3	45
1.75_Rho	1.501	T1	315	2.093	T3	45	1.460	T3	45
2.0_Rho	1.430	T1	315	1.772	T1	45	1.492	T1	337.5

图 14 给出了基于合力系数特征值的最不利工况下的塔筒喉部位置的平均风压和脉动风压分布曲线,可以看出:受扰下的平均风压呈现非对称分布,侧风区和背风区的负压吸力相比单塔增大;受扰下的脉动风压也呈非对称分布,迎风区、侧风区和背风区的脉动风压的数值相比单塔均明显增大。

3 结 论

根据工程中常见的矩形布置和菱形布置,结合刚体测压风洞试验,系统研究了六塔组合、三种塔间距下的群塔气动干扰效应,主要结论如下:

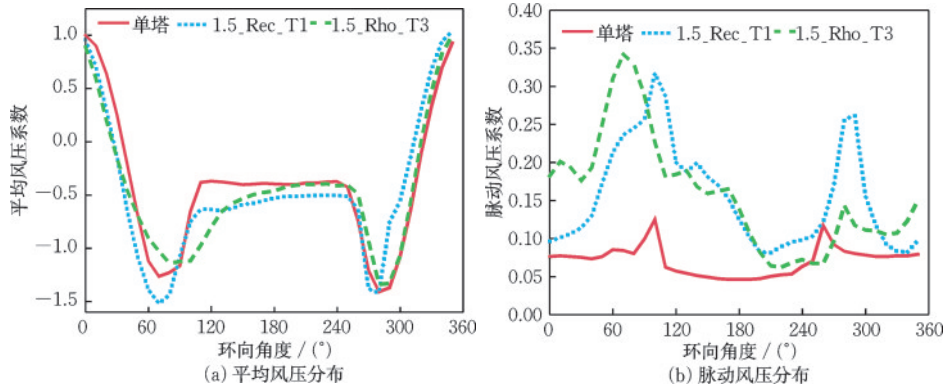


图 14 基于合力系数的最不利工况下塔筒喉部的平均风压和脉动风压分布

Fig.14 Distribution of average and fluctuating wind pressures at tower throat under the most unfavorable conditions based on resultant coefficients

(1) 群塔干扰下,基于气动风荷载层面的干扰因子与群塔布置形式、塔间距和风向角有关,干扰因子对风向角的敏感性要大于塔间距。

(2) 六塔菱形组合下的干扰效应大于矩形组合,群塔布置下最不利工况为冷却塔位于六菱形组合的下风向,这与渡桥电厂风毁的塔群所处的位置和风向角相吻合。

(3) 群塔干扰下,塔筒外表面的平均风压和脉动风压相比单塔呈现明显的非对称性;受扰下的平均风压在迎风区的变化较小,在侧风区和背风区的吸力明显增大,而受扰下的脉动风压沿塔筒表面相比单塔均显著增大。

参考文献:

- [1] 赵林,葛耀君,许林汕,等.超大型冷却塔风致干扰效应试验研究[J].工程力学,2009,26(1):149-155.
Zhao L, Ge Y J, Xu L S, et al. Wind tunnel investigation on wind-induced interference effects for super large cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 149-155. (in Chinese)
- [2] 程霄翔,赵林,葛耀君.典型矩形八塔超大型冷却塔群塔风致干扰效应研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):372-380.
Cheng X X, Zhao L, Ge Y J. 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): 372-380. (in Chinese)
- [3] 沈国辉,张坚,刘显群,等.工程常见塔间距下大型冷却塔的双塔干扰效应[J].空气动力学学报,2015,33(3):433-439.
Shen G H, Zhang J, Liu X Q, et al. Interference effects on two adjacent large cooling towers with commonly used tower distances[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2015, 33(3): 433-439. (in Chinese)
- [4] 柯世堂,王浩.考虑不同四塔形式特大型冷却塔群风荷载极值分布特征与取值探讨[J].空气动力学学报,2020,38(1):48-57.
Ke S T, Wang H. Distribution characteristics and value of extreme wind loads of four super-large cooling towers considering different layouts[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2020, 38(1): 48-57. (in Chinese)
- [5] 陈翰林,赵林,张栋,等.冷却塔群塔风致干扰脉动风压频谱特性与相关性[J].工程力学,2021,38(10):

44-53.

Chen H L, Zhao L, Zhang D, et al. Time-frequency characteristics and relevance of fluctuating wind pressure of grouped cooling towers[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(10): 44-53. (in Chinese)

- [6] Fang G S, Zhao L, Chen X, et al. Normal and typhoon wind loadings on a large cooling tower: A comparative study[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 95: 102938.
- [7] Chen X, Zhao L, Zhao S Y, et al. Tornado-induced collapse analysis of a super-large reinforced concrete cooling tower[J]. Engineering Structures, 2022, 269: 114834.
- [8] Bamu P C, Zingoni A. Damage, deterioration and the long-term structural performance of cooling-tower shells: A survey of developments over the past 50 years[J]. Engineering structures, 2005, 27(12): 1794-1800.
- [9] 周良茂,李培华.两个临近全尺寸双曲型冷却塔风压分布的测量[J].气动实验与测量控制,1992,6(3):37-44.
Zhou L M, Li P H. A measurement of the wind pressure distribution on two neighboring full-scale hyperbolic cooling towers[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1992, 6(3): 37-44. (in Chinese)
- [10] 沈国辉,刘若斐,孙炳楠.双塔情况下冷却塔风荷载的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2007,41(6):1017-1022.
Shen G H, Liu R F, Sun B N. Numerical simulation of wind load on cooling towers under double tower condition[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(6): 1017-1022. (in Chinese)
- [11] 张军锋,赵林,柯世堂,等.大型冷却塔双塔组合表面风压干扰效应试验[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):81-87.
Zhang J F, Zhao L, Ke S T, et al. Wind tunnel investigation on wind-pressure interference effects for two large hyperboloidal cooling towers[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 81-87. (in Chinese)
- [12] Zhao L, Chen X, Ge Y J. Investigations of adverse wind loads on a large cooling towers for the six-tower combinations[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 988-999.

(本文编辑:张艺)

(下转第905页)