

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201707139

基于响应目标的特大型冷却塔优选组合方案

孙捷, 王浩, 柯世堂

(南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016)

摘要: 现有冷却塔群组合形式选型主要基于荷载干扰因子来考虑, 这一做法难以真实反映冷却塔群结构的受力特征. 为研究基于静风响应目标的四塔组合优选方案及特大型冷却塔在不同四塔组合下的综合受力性能, 本文以在建世界最高冷却塔(220 m)为工程背景, 分别对串列、矩形、菱形、L形和斜L型5种典型四塔组合冷却塔群共320个工况进行了同步刚体测压风洞试验. 获取了5种四塔组合形式下各工况冷却塔表面风压分布模式, 并基于有限元方法建立了“塔筒-支柱-环基”一体化仿真计算模型, 分别对不同组合形式、来流风向角和塔群相对位置工况进行了三维非对称风荷载作用下的特大型冷却塔静风响应分析, 探讨了7种典型响应目标下四塔干扰作用对特大型冷却塔风致位移响应及内力响应影响规律. 在此基础上, 综合对比研究了不同静风响应指标的影响程度与分布规律. 最终, 基于静风响应目标综合定性给出了四塔组合形式的优选方案, 其中的串列组合布置方案抗风性能最优, 菱形、斜L形、矩形和L形组合抗风性能依次递减.

关键词: 特大型冷却塔; 典型四塔组合; 风洞试验; 风致响应; 优选方案

中图分类号: TU279.7+41

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)06-0040-07

Optimal combination scheme for super-large cooling towers based on response targets

SUN Jie, WANG Hao, KE Shitang

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The selection of current cooling tower group is mainly based on load interference factor, which it is difficult to truly reflect the force characteristics of the cooling towers group. To study the four-tower combination optimization scheme based on the static wind response target and combined stress performance of super-large cooling tower in different four towers combinations, with the under-construction of the world's highest cooling tower (220 m) as the engineering background, the synchronous rigid body pressure measurement by wind tunnel tests were respectively carried out for five typical four towers combined cooling tower groups, including tandem, rectangular, rhombus, L-shaped and oblique L-shaped, totally having 320 working conditions. The surface wind pressure distribution pattern of cooling towers under different four tower combinations was obtained, and an integrated simulation model of “tower barrel-stanchion-ring foundation” was established based on the finite element method. The static wind responses of super-large cooling towers under three dimensional asymmetrical wind loads were analyzed respectively for different combinations, currents, wind directions and relative positions of towers, in which the influence law of four tower interference on the force and displacement response of the cooling tower under seven typical response targets was discussed. The influence degree and distribution law of different static response indexes were studied. Based on the static wind response target, the optimal scheme of the combination of four towers was given qualitatively. The results show that wind-resistant performance of the tandem layout is optimal, and the wind-resistant performance of the rhombic, oblique L-shaped, rectangular and L-shaped layouts are gradually reduced.

Keywords: super-large cooling tower; typical four-tower combination; wind tunnel test; wind induced response; optimization scheme

冷却塔群风致干扰效应^[1]是风工程领域的重要研究方向之一, 现有规范和文献^[2-4]大多以整体或局部风荷载为目标来进行塔群布置优化, 这一做法不能反映冷却塔群结构的真实受力情况. 实际上,

冷却塔群的破坏形式大多表现为塔筒子午向受拉破坏和环向受弯破坏. 考虑到四塔组合形式是冷却塔群最常见的布置方案之一, 故系统研究不同典型四塔组合形式下冷却塔群真实受力性能, 并基于静风响应目标探讨四塔组合形式的优选方案具有重要工程指导意义.

文献[5-7]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阻力系数随风向角变化规律; 文献[8-9]针对

收稿日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(U1733129);

江苏省优秀青年基金(BK20160083);

国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究项目(51761165022)

作者简介: 孙捷(1993—), 男, 硕士研究生

通信作者: 柯世堂, keshitang@163.com

特定布置形式的三塔组合进行了测压风洞试验研究,基于试验结果分析了不同布置形式下冷却塔整体阻力系数的变化规律,以及塔群组合形式下冷却塔风致响应特性;文献[10]对某考虑地形效应的斜 L 型四塔组合进行测压风洞试验,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;文献[11]对某电厂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.尽管冷却塔群的干扰效应已得到较为系统的研究,但鲜有涉及典型四塔组合冷却塔群的风致响应及其作用机理,故亟需针对常见典型的四塔布置方案展开综合受力性能及方案优化设计的定性研究.

鉴于此,以在建世界最高冷却塔为工程背景,分别对串列、矩形、菱形、L 形和斜 L 型五种典型四塔组合冷却塔群共 320 个工况进行了同步刚体测压风洞试验.采用有限元计算和数理统计的方法分别对不同组合形式、来流风向角和塔群相对位置工况进行了三维非对称风荷载作用下的冷却塔静风响应分析,并着重探讨了 7 种控制响应指标下四塔干扰对冷却塔受力性能及位移响应的影响.最终,综合考虑各静风响应控制指标的规律,归纳给出四塔组合形式的优选方案.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 风洞试验及数据处理

1.1 工程背景

该在建冷却塔高度为 220 m,建成后为世界最高冷却塔,喉部高度 165 m,进风口高度 31 m,塔顶中面直径 128 m,喉部中面直径 123 m,冷却塔底部直径为 185 m.塔筒混凝土等级为 C40,支柱为 C45,环基为 C35;筒壁厚度呈指数率变化,其中最小壁厚为 0.39 m,最大壁厚为 1.85 m.塔筒采用 64 对 X 型支柱支承,支柱采用矩形截面,截面尺寸为 1.7 m × 1.0 m.该拟建冷却塔位于 B 类地貌,基本风压为 0.5 kPa.

风洞试验模型缩尺比为 1 : 450,采用亚克力材料制作以保证足够的刚度和强度.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,总计 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 m、高 4.5 m,风速连续可调,最高稳定风速可达 30 m/s.试验风场按《建筑结构荷载规范》^[12]中的 B 类地貌模拟,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,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,模拟效果见图 1.可见风场模拟良好,满足试验要求.

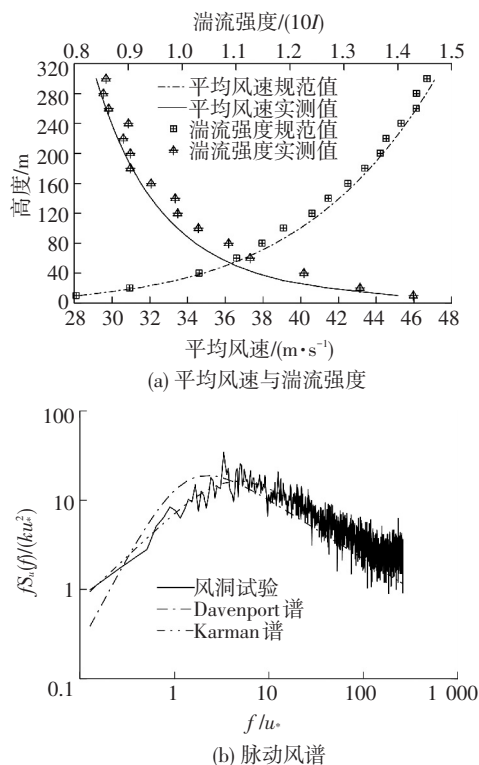


图 1 风洞试验风场模拟结果示意

Fig.1 Simulation of wind characteristics in BLWT

1.3 雷诺数效应模拟

风洞试验中共测试了如下 7 种粗糙度工况以进行雷诺数效应修正:①表面光滑、②均匀粘贴 1 层、③均匀粘贴 2 层、④间隔粘贴 2/3 层、⑤均匀粘贴 3 层、⑥间隔粘贴 3/4 层、⑦均匀粘贴 4 层 5 mm 宽粗糙纸带.图 2 给出了经归一化处理后的冷却塔喉部高度体型系数分布曲线,并与规范曲线^[13]进行对比.由图 2 可见,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.

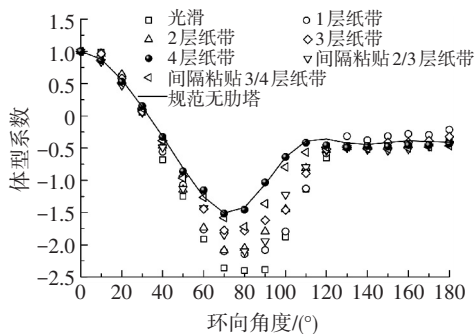


图 2 风洞试验体型系数与目标曲线对比

Fig.2 Comparison of μ_s between wind tunnel tests and target curve

1.4 5 种典型四塔组合形式

群塔风洞试验包括串列、矩形、菱形、L 形和斜 L 形四塔组合共 5 类方案,每种布置形式在 360°风向角范围内以 22.5°增量逐一测量,共 320 个试验工

况.冷却塔塔间距均为 $2D$, 其中 D 为塔底直径.为更真实反映冷却塔在电厂中受到的干扰效应, 试验时考虑了冷却塔周边高度大于 30 m 构筑物的干扰, 主要干扰构筑物的高度见表 1, 各工况具体平面布置及冷却塔位置信息见图 3. 群塔工况中最大阻塞率为 3.22% , 满足现行风洞试验标准^[14] 中的要求.

表 1 风洞试验考虑的主要干扰模型尺寸

Tab. 1 List of primary interference model sizes considered in wind tunnel test

构筑物名称	构筑物长度	构筑物宽度	构筑物高度
汽机房及加热器室	151.5	30	29~34.4
煤仓间	85.3	23	47~49.3
锅炉房	85.3	51	91.5
烟囱	底部直径 12.75, 顶部直径 7.3		240

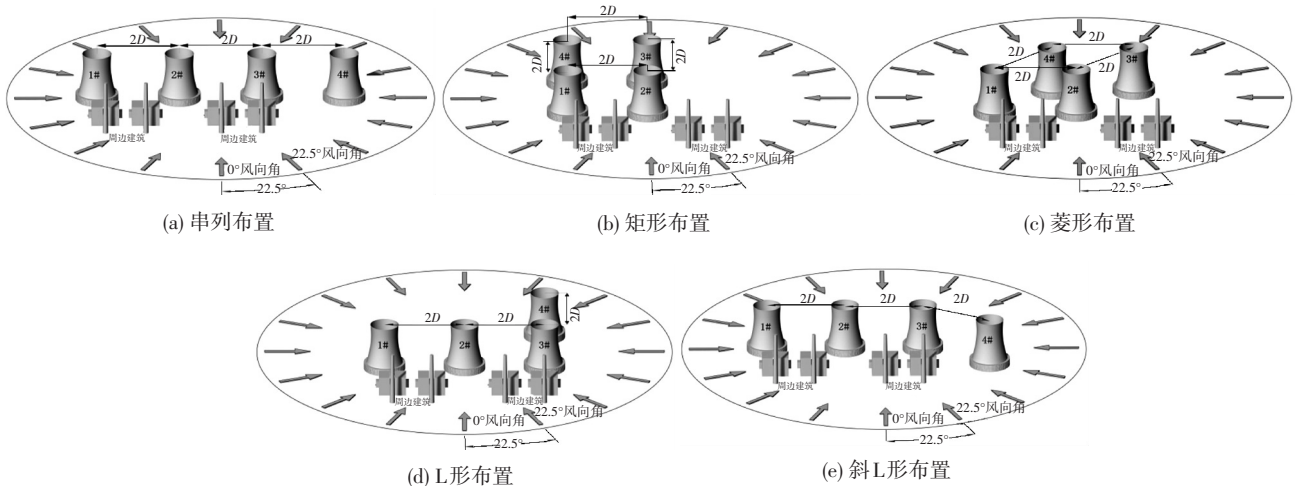


图 3 群塔工况布置示意

Fig. 3 Diagram of layouts of grouped towers

1.5 风洞试验结果

图 4 中列举给出了 4#塔在不同布置形式下冷却塔喉部高度表面风压系数分布示意图. 由图可知: 1) 四塔组合形式对冷却塔平均风压有明显的放大作用, 其中串联与斜 L 形四塔组合形式的放大作用较为明显, 主要影响区域为侧风区和背风区; 2) 矩形布置下

冷却塔平均风压系数沿环向分布趋势与菱形布置十分接近, 但矩形布置在迎风区与背风区的数值均偏大; 3) L 形布置方案对冷却塔平均风压分布的影响介于上述 4 种方案之间, 主要影响区域位于负压极值区; 4) 群塔布置下负压区平均风压相对单塔均有不同程度的增大, 斜 L 形布置的放大效果最为显著.

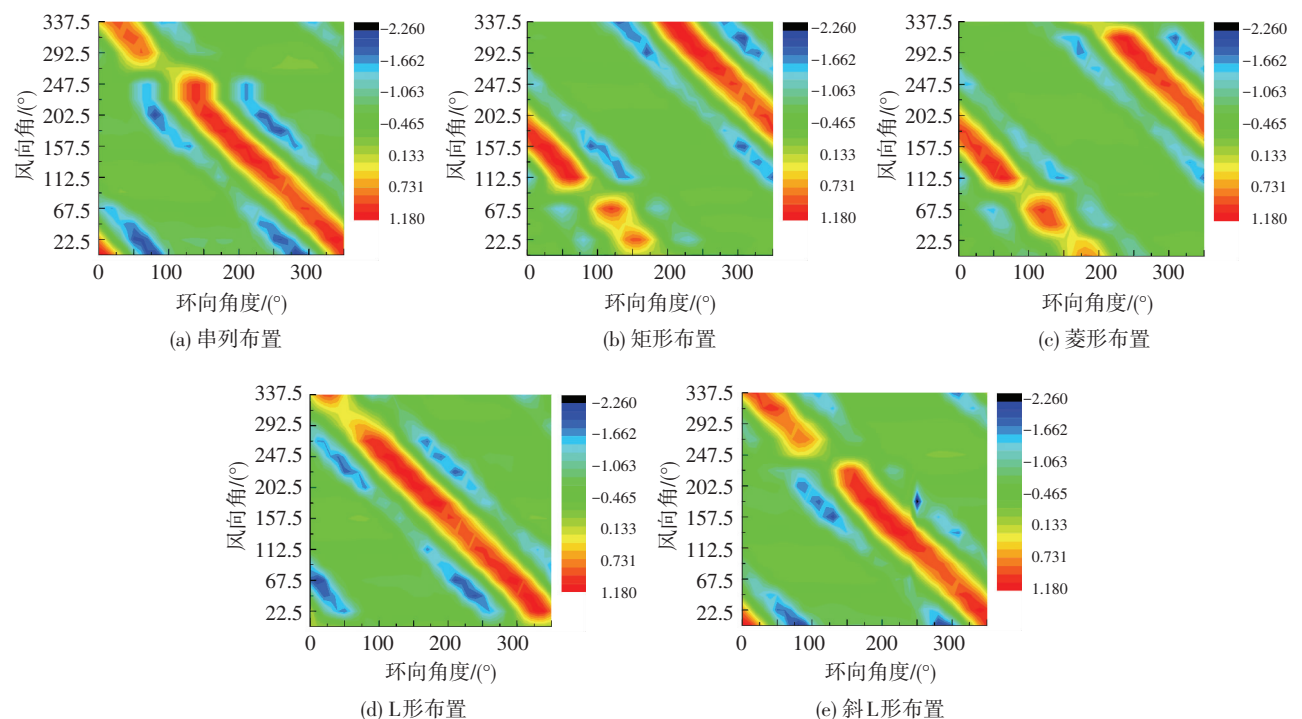


图 4 4#塔各风向角工况风压系数分布曲线示意

Fig. 4 Wind pressure coefficients under different wind directions of 4# tower

2 风致响应

2.1 有限元建模

采用有限元计算方法,建立“塔筒-支柱-环基”一体化仿真计算模型.塔筒采用 Shell63 单元,其中环向 256 个单元,子午向 128 个单元;环基及与环基连接的 64 对 X 型柱均采用 Beam188 单元模拟,环基划分为 256 个单元,X 型柱和环基处采用刚性域连接,刚性桩复合地基视为弹性地基,每个环基下部采用 Combin14 单元模拟弹性地基,采用 3 个力弹簧单元和 3 个力矩弹簧单元分别模拟桩沿竖向、环向、径向、绕竖向、绕环向和绕径向的作用,弹簧单元一端与环基刚性连接,另一端固结约束.有限元模型见图 5.

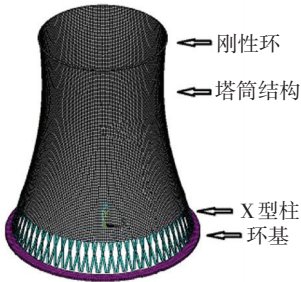


图 5 冷却塔有限元模型示意

Fig.5 Finite element modeling of cooling tower

2.2 位移响应

5 种典型四塔组合形式冷却塔群风致响应分析

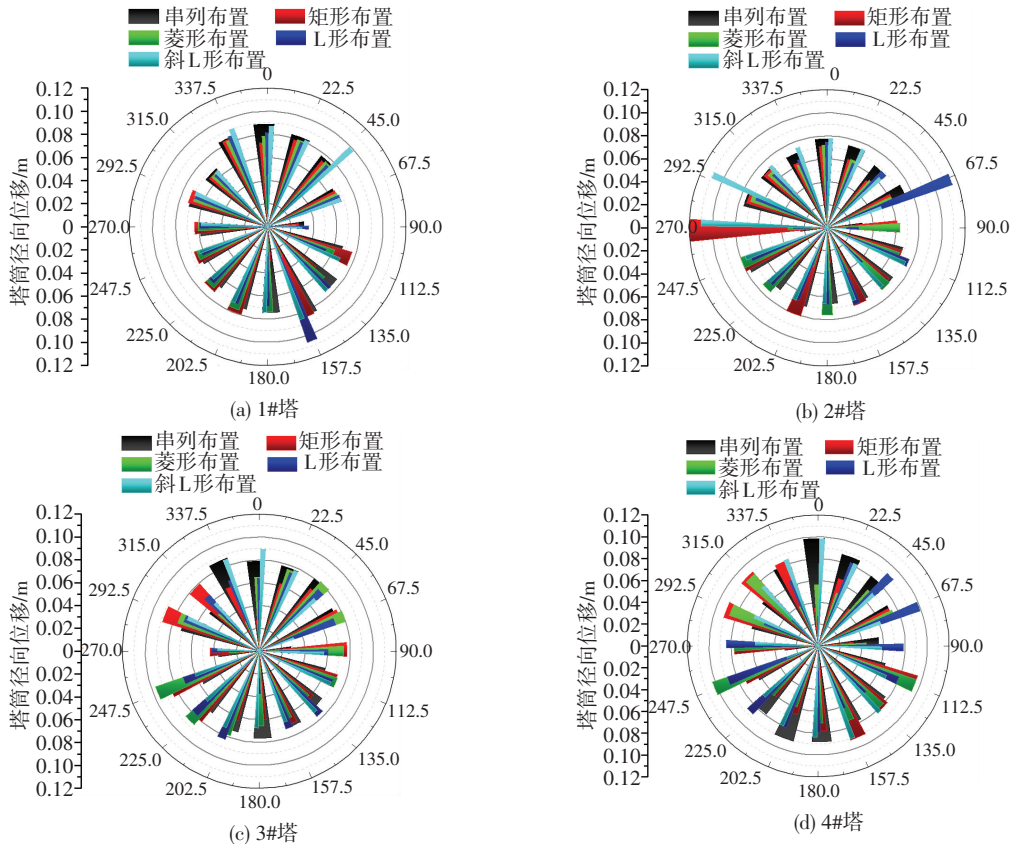


图 6 5 种四塔组合形式冷却塔筒最大径向位移示意

Fig.6 Maximum radial displacement of cooling tower under different wind direction in five four-tower arrangements

过程中,风振系数选取为 $1.9^{[13,15-16]}$.图 6 给出了 5 种典型四塔组合形式冷却塔群在不同风向角下塔筒最大径向位移变化示意图.由图可知:1) 1#塔最大径向位移受四塔组合形式影响较小,最大位移 0.11 m 发生于 L 形方案;2) 2#塔最大径向位移随风向角波动较大,在矩形和 L 形方案中最大径向位移达到 0.12 m 左右;3) 3#和 4#塔受四塔组合形式影响明显,但 3#和 4#塔塔筒径向位移最不利值仍比 2#塔小 20% 左右;4) 以塔筒径向位移为目标,4 座冷却塔位移优劣次序为:1#塔>3#塔>4#塔>2#塔.

2.3 内力响应

图 7 给出了 5 种四塔组合形式冷却塔群在不同风向角工况下的塔筒子午向轴力最大值分布示意图.其中,串联布置下塔筒子午向轴力以折线图形式表现,其他 4 种四塔组合形式均以该工况相对串联布置对应风向角工况的增/减量表示.由图 7 分析可得:1) 1#塔塔筒子午向轴力受四塔组合形式影响最小,其最不利工况发生于 L 形方案;2) 2#塔和 3#塔的塔筒子午向轴力受四塔组合形式影响较为显著,2#塔最大值出现在串联布置中,3#塔最大值出现在菱形布置形式;3) 不同四塔组合均在 4#塔达到最不利值,2#塔均较为有利;4) 以塔筒子午向轴力为评价指标时,菱形布置为最优布置方案,串联布置则相对最为不利.

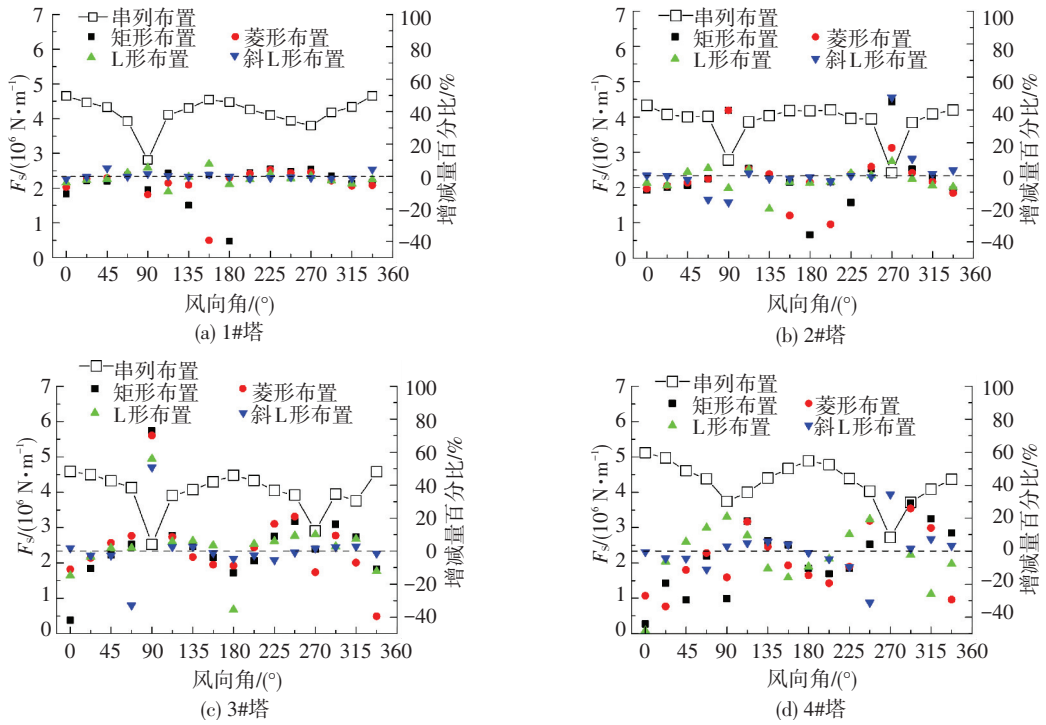


图 7 5 种四塔组合形式塔筒子午向应力最大值分布

Fig.7 Diagram of maximum meridional stress distribution of five kinds of five four-tower combinations

图 8 给出了 5 种四塔组合形式冷却塔群在不同风向角工况下的塔筒环向弯矩最大值分布示意图,分析可得:1)以环向弯矩为控制指标时,矩形、L 形和斜 L 形组

合均在 2#塔达到最不利工况,而串列和菱形方案于 4#塔工况达到响应最大值;2)以塔筒环向弯矩为指标时,最优布置方案为串列布置,矩形布置则相对最为不利.

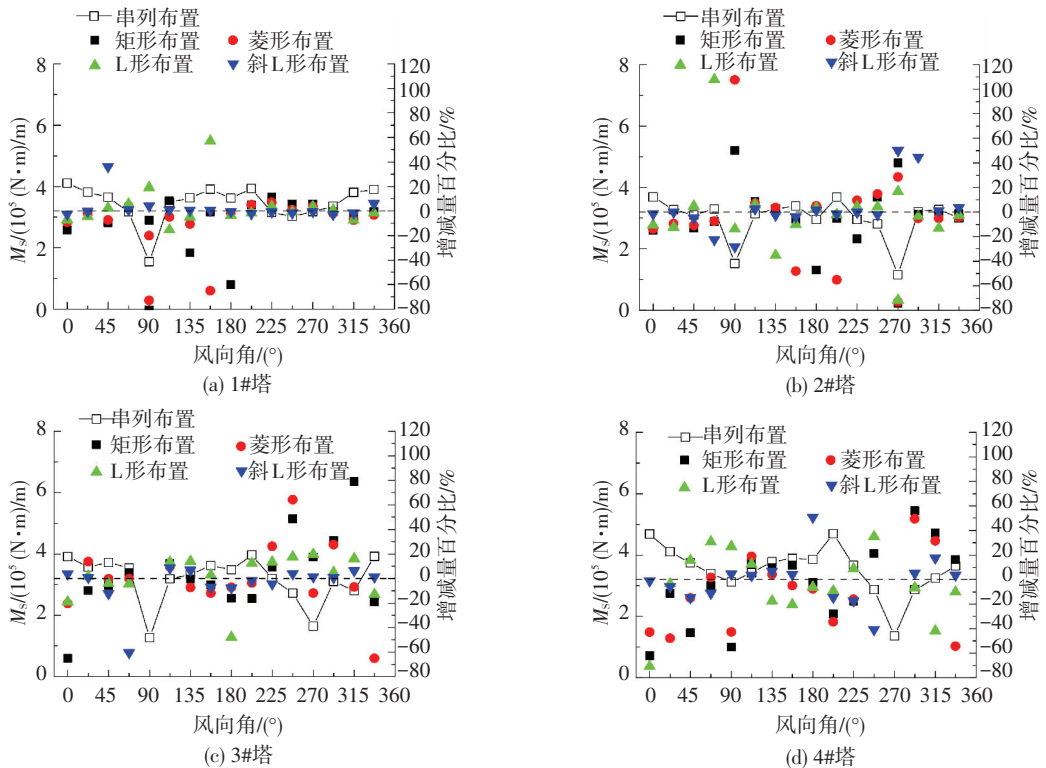


图 8 5 种四塔组合形式冷却塔群塔筒环向弯矩最大值分布

Fig.8 Maximum distribution of annular moment of cooling tower under different wind direction in five four-towers

图 9、10 给出了 5 种四塔组合形式冷却塔群支柱轴力 F_c 和支柱弯矩的 M_c 箱式图.其中,上下两点为同一四塔组合形式 16 个风向角工况的响应最值,

中间矩形上边缘横线表示所有响应数值的上四分位数,下边缘表示下四分位数,圆圈表示响应数值的平均数.分析可得:1)四座冷却塔的支柱轴力和弯矩受

四塔组合形式影响的程度呈递增趋势,1#塔变化幅度最小,2#和3#塔较为明显,4#塔最为显著;2)5种四塔组合形式的支柱轴力和弯矩最大值均出现于斜L形布置方案;3)以支柱轴力为评价指标时应按以下优先顺序选择四塔布置方案:菱形>矩形>L形>斜L形>串列;而以支柱弯矩为评价指标时,最优布置方案为矩形布置,斜L形则相对最为不利。

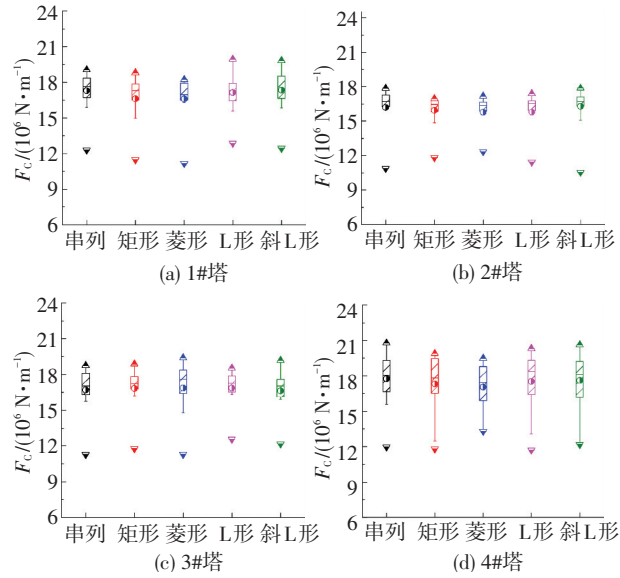


图 9 5 种四塔组合形式冷却塔支柱轴力最大值分布

Fig.9 Distribution of maximum value of strut axial force with five four-towers under different wind direction

表 2 列举给出了不同四塔组合形式下 2#塔在各风向角下支柱扭矩和环基弯矩特征值列表,其中平均值、最值均为 16 个风向角工况的响应最大值的统计值.结合前文数据分析得:1)四座冷却塔支柱扭矩

表 2 不同四塔组合形式冷却塔支柱扭矩和环基弯矩特征值

Tab.2 Distribution of maximum moment of strut torque and ring foundation moment under different four-tower combination

塔号	组合形式	支柱扭矩/(10 ⁴ (N·m)/m)			环基弯矩/(10 ⁷ (N·m)/m)		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
2#	串列组合	8.94	3.14	7.50	1.91	1.37	1.77
	矩形组合	10.20	3.87	7.56	1.84	1.44	1.75
	菱形组合	8.73	4.19	7.18	1.84	1.49	1.74
	L形组合	10.30	3.34	7.25	1.83	1.42	1.74
	斜L形组合	10.40	2.91	7.90	1.92	1.34	1.76

3 结 语

以国内在建世界最高 220 m 特大型冷却塔为对象,基于风洞试验、有限元分析和数理统计方法对典型四塔组合冷却塔群综合受力性能进行对比研究,归纳给出了典型四塔组合形式的优选方案。

研究表明,四塔组合形式对塔筒径向位移、环向弯矩和支柱扭矩影响较大,且 5 种典型四塔组合方

案中的最优形式均为串列布置,其风致响应相对其余 4 种布置方案均减小 5% 以上,最大可达 64.87%;塔筒子午向轴力、支柱轴力、支柱弯矩和环基弯矩等典型响应指标受四塔组合形式影响较小,且矩形和菱形布置对减小这 4 种内力存在较有利效果.最终,基于 7 种静风响应目标综合定性给出了四塔组合优选方案,其中串列组合布置方案的抗风性能最优,菱形、斜 L 形、矩形和 L 形组合依次递减。

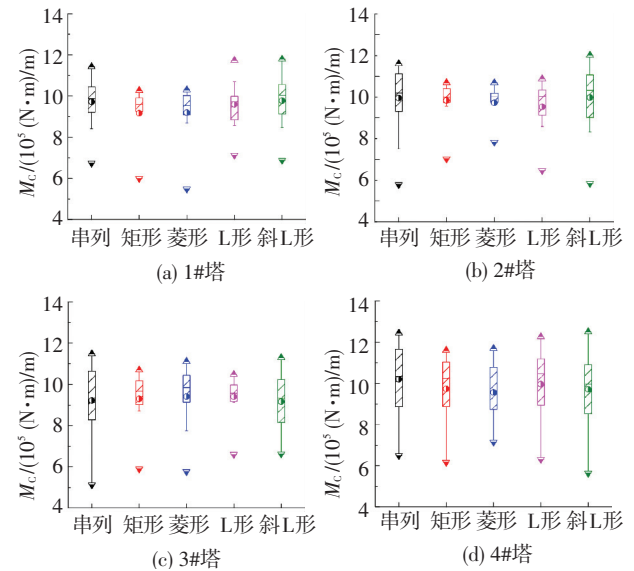


图 10 5 种四塔组合形式冷却塔支柱弯矩最大值分布

Fig.10 Distribution of maximum moment of cooling moment offive four-towers under different wind direction

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): 5-10.
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): 5-10.
- [2] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers [J]. Engineering Structures, 1998, 20(10): 874-880.
- [3] 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 Guohui, LIU Ruofei, SUN Bingnan. Numerical simulation of wind load on cooling towers under double tower condition [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(6): 1017-1022.
- [4] 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 Guohui, ZHANG Jian, LIU Xianqun, et al. Interference effects two adjacent large cooling towers with commonly used tower distances [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(3): 433-439.
- [5] ORLANDO M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers [J]. Engineering Structures, 2001, 23(8): 979-992.
- [6] 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): 15-23.
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): 15-23.
- [7] 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): 1-7.
ZOU Yunfeng, NIU Huawei, CHEN Zhengqing. Wind tunnel test on wind-induced interference effect of cooling towers based on full aeroelastic model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(12): 1-7.
- [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): 15-23.
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): 15-23.
- [9] 沈国辉, 余关鹏, 孙炳楠, 等. 倒品字形分布三个冷却塔的风致干扰效应研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(1): 107-113.
SHEN Guohui, YU Guanpeng, SUN Bingnan, et al. Study of wind-induced interference effects on three adjacent cooling towers under upside-down triangular distribution [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(1): 107-113.
- [10] KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin, 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.
- [11] 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): 372-380.
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): 372-380.
- [12] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Loading code for design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [13] 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.
Code for design of cooling for industrial recirculating water: GB/T 50102—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [14] 建筑工程风洞试验方法标准: JSJ/T 338—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Standard for wind tunnel test of buildings and structures: JSJ/T 338—2014 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.
- [15] 柯世堂, 赵林, 葛耀君. 超大型冷却塔结构风振与地震作用影响比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1635-1641.
KE Shitang, ZHAO Lin, GE Yaojun. Comparison of super-large cooling towers under earthquake excitation and wind load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(10): 1635-1641.
- [16] 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): 690-697.
WANG Hao, KE Shitang. Wind-induced response analysis for large cooling tower with three typical meridian curves [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(6): 690-697.

(编辑 赵丽莹)