

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804026

基于风-雨双向耦合的大型冷却塔结构响应

余文林,柯世堂

(南京航空航天大学 土木工程系,南京 210016)

摘要: 暴风雨天气下,降雨会直接改变结构表面气动载荷并进一步影响风的湍流作用,然而现行冷却塔结构抗风设计均忽略了降雨带来的附加效应。为探究风-雨作用对冷却塔结构受力性能的影响,以中国西北地区已建成的210 m世界最高冷却塔为例,基于风-雨双向耦合算法,首先采用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)技术进行3种典型风速下冷却塔结构周边风场模拟,然后添加离散相模型(discrete phase model,DPM)开展9种不同风速-雨强组合的风雨耦合同步迭代计算。在此基础上,对比研究不同风速-雨强组合对塔筒表面雨滴运行轨迹以及雨量的影响规律,然后提出大型冷却塔风雨耦合等效压力系数的拟合公式。最后,结合有限元方法建立不同工况的大型冷却塔等效荷载耦合模型,对比研究不同风速-雨强组合下大型冷却塔塔筒、支柱和环基的结构响应。研究可为此类大型冷却塔在极端气候和复杂工况下的荷载预测提供参考。

关键词: 冷却塔;CFD模拟;双向耦合;有限元分析;结构响应

中图分类号: TU279.7+41

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0114-05

Structural responses of large cooling tower based on bidirectional coupling between wind and rain

YU Wenlin, KE Shitang

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

Abstract: Under the stormy weather, rainfall directly changes the aerodynamic force of the structural surface and further affects the turbulence action of wind, but current wind resistance designs for cooling towers all ignore the additive effects of rainfall. To explore the effects of wind-rain on mechanical properties of cooling tower structures, a domestic large cooling tower which is the world's tallest (210 m) was taken as an example, and based on wind-rain bidirectional coupling algorithm, the flow fields of cooling tower under three typical wind speeds were simulated based on computational fluid dynamics (CFD) technology. The discrete phase model (DPM) were added and the iterative computations of rain-wind coupling of 9 different combinations of wind speed-rain intensity were carried out. On this basis, the influence laws of different combinations of wind speed-rain intensity on rain drops moving trajectory and rainfall on tower drum surface were studied. Then the fitting formulas of equivalent pressure coefficients were proposed. The coupling models of the large cooling tower under different working conditions were established by the finite element method, and the structural responses of tower drum, pillars, and ring foundation under different wind speed-rain intensity combinations were compared. The research provides references for load forecast of such large cooling towers under extreme climates and complex working conditions.

Keywords: cooling tower; CFD simulation; bidirectional coupling; finite element analysis; structural response

大型冷却塔属于典型的风敏感结构^[1-2],风荷载是结构内力设计的控制荷载,现行冷却塔结构设计规范^[3-4]均忽略了降雨对结构带来的冲击效应。实际上,在狂风暴雨气候条件下,雨滴下落过程中与来流风场联合作用,在影响风场小尺度湍流的同时,受重力和水平风力的裹挟以较大速度击打至冷却塔表面,导致结构近壁面气流运动形式紊乱且雨滴轨迹发生偏移,进而使得冷却塔结构受力性能发生改变。鉴于此,研究风-雨极端环境下大型冷却塔结构

响应分布特征具有重要的工程意义。

针对大型冷却塔风荷载研究,现有主要集中在风压随机特性^[5]、极值分布^[6]、风效应^[7]、静力干扰效应^[8]和动力干扰效应^[9]等。中国规范^[3]与德国规范^[4]均给出了双曲线冷却塔外表面压力系数单一曲线和内表面压力系数单一数值,其完全忽略了塔筒表面压力系数沿高度和环向的变化情况;文献[10]采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型和多相流模型,模拟了冷热空气自循环系统及外风场作用下的冷却塔内表面风荷载,结果表明外风场作用下产生的内压随高度和角度变化明显;文献[11]以风洞试验为手段获取了冷却塔表面脉动风压分布,分析了环向断面阻力系数沿塔高的分布规律,并在考虑相关性

收稿日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究项目(51761165022);
国家自然科学基金(U1733129,51878351)

作者简介: 余文林(1992—),男,硕士研究生

通信作者: 柯世堂, keshitang@163.com

的基础上建议了冷却塔环向外表面风压极值分布拟合曲线. 综上所述,已有研究均是针对冷却塔的风荷载与风效应研究,没有考虑风-雨双向耦合作用的极端工况,更缺乏考虑不同风速-雨强组合对冷却塔结构响应的定性及定量影响分析.

此外,已有文献[12-14]关于风驱雨的研究多集中在输电塔、房屋及桥梁拉索等结构,且大多采用单向耦合计算. 而位于气候条件较差的大型冷却塔结构,是否需要考虑风-雨双向耦合作用对其结构响应的影响,国内外鲜有研究.

鉴于此,以国内已建成 210 m 世界最高的大型冷却塔为例,采用风-雨双向耦合算法,分别基于 CFD 模拟和有限元方法展开不同风速-雨强组合对冷却塔结构响应的对比分析.

1 风-雨双向耦合算法

1.1 降雨强度

表 1 给出了降雨强度等级划分,可以看出雨强分类对于降雨的测量结果影响较大,本文采用对结构影响更加极端的小时雨强.

表 1 降雨强度等级划分
Tab. 1 Grades of rainfall intensity

雨强等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨			
					弱	中	强	极值
日雨强/ (mm/24 h)	10	25	50	100			200	
小时雨强/ (mm/h)	2.5	8	16	32	64	100	200	709.2

1.2 雨滴谱

文献[15]发现雨滴谱呈现负指数分布,本文采用最常见的 Marshall-Palmer 谱:

$$n(D_p) = N_0 e^{-\lambda D_p}, \quad (1)$$

式中: D_p 为雨滴直径,mm; $n(D_p)$ 为直径 D_p 的雨滴浓度谱, $N_0 = 8\,000\text{ 个} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$; λ 为尺度参数,见式(2) (R 为雨强,单位 mm/h).

$$\lambda = 4.1 \times R^{-0.21}. \quad (2)$$

1.3 双向耦合算法

在稳定后的风场中添加 DPM 模型展开风-雨双向耦合降雨模拟^[16]. 离散相雨滴在连续相风场中的平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F, \quad (3)$$

式中: u_p 和 u 分别为离散相雨滴和连续相流体的速度, ρ_p 和 ρ 分别为离散相雨滴和连续相流体的密度, F 是附加加速度项, $F_D(u - u_p)$ 为单位雨滴质量的拖曳力. 其中

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (4)$$

式中: μ 为流体黏性系数, D_p 为雨滴颗粒直径, C_D 为雨滴的牵引系数, Re 为相对雷诺数,表示为

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu}, \quad (5)$$

添加离散相后,连续相流体的基本方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = S_m, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = \\ - \nabla p + \nabla \cdot (\tau_s) + \rho g + F_e, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: S_m 是从离散相加到连续相的质量, p 为静压力, ρg 和 F_e 分别为重力和外力, τ_s 为应力张量,可表示为

$$\tau_s = \mu \left[(\nabla u + \nabla u_v) - \frac{2}{3} \nabla \cdot u \mathbf{I} \right], \quad (8)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为单位张量, ∇u_v 为体积膨胀作用.

1.4 雨滴作用方程

雨滴降落过程近似为球体,碰撞时间可认为是雨滴以末速度经过球体半径. 模拟计算时忽略雨滴在碰撞过程中的能量损失,认为雨滴与结构之间服从动量守恒定律,则雨滴对结构的作用力为

$$F(\tau) = \frac{1}{6\tau} \rho_p \pi D_p^3 v_s = \frac{2v_s}{6D_p} \rho_p \pi D_p^3 v_s = \frac{1}{3} \rho_p \pi D_p^2 v_s^2, \quad (9)$$

式中: $F(\tau)$ 为单个雨滴作用力, τ 为碰撞时间, v_s 为雨滴末速度.

2 工程简介与工况设置

冷却塔位于中国西北地区,塔高 210 m,塔筒下部有 52 对 X 型支柱,环基尺寸为宽 12 m × 高 2.5 m. 对比研究不同风速-雨强组合对冷却塔的影响,其中风荷载作用下依次划分工况 A、B 和 C,风-雨荷载共同作用下依次划分工况 1~9,具体见图 1.

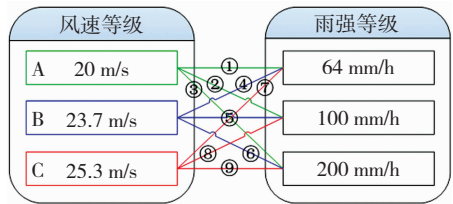


图 1 风雨参数组合计算工况说明

Fig. 1 Working conditions description for wind and rain parameters combinations

3 风-雨双向耦合模拟

3.1 计算域及模型网格划分

本文数值模拟计算域设置为长 3 000 m × 宽 1 500 m × 高 600 m,选取塔底中心为坐标原点. 为了兼顾计算效率和精度,采用局部加密技术划分网格,总网格数量超过 1800 万且网格质量满足模拟要求.

图 2 为计算域网格划分示意图。

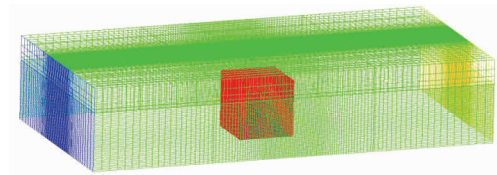


图 2 计算域网格划分

Fig.2 Mesh generation of computational domain

3.2 风-雨场耦合计算方案

本文数值模拟计算采用 FLUENT 软件,计算域分别设置速度入口、压力出口、对称边界和壁面边界条件.该冷却塔处于中国西北地区 B 类地貌,数值湍流模型选用 $k-\omega$ 方程.连续相风场计算收敛后添加离散相模型展开风-雨双向耦合模拟,设置雨滴密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,重力为 9.81 m/s^2 .

3.3 模拟结果展示

图 3 给出了工况 1~9 中冷却塔表面雨滴三维分布.各工况雨滴撞击多集中分布在塔筒外表面迎风区和内表面上部背风区,受气流漩涡驱动作用,外表面背风区和内表面迎风区有少量雨滴附着;塔筒内外表面收集到的雨量均以工况 3 最多,且随风速的增加而减少,随雨强的增大而变多,同时塔筒外表面收集到的雨滴远多于内表面.

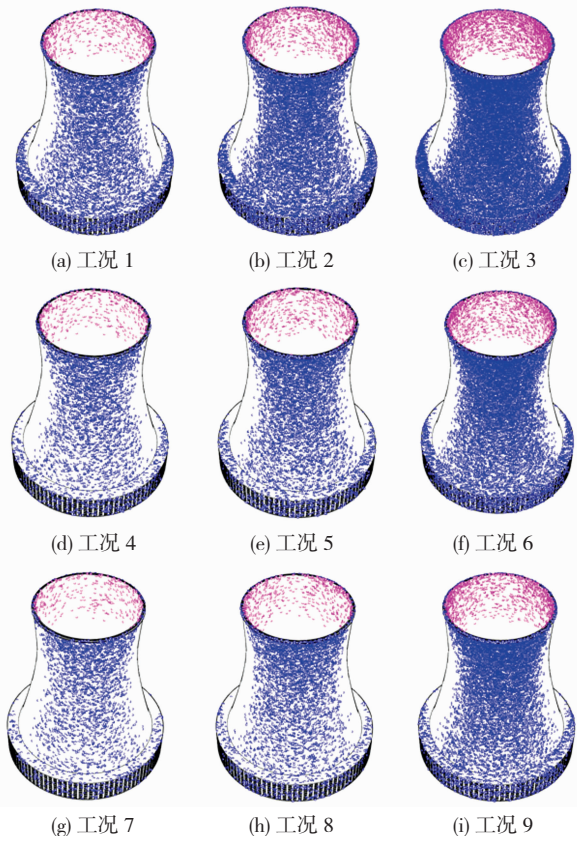


图 3 冷却塔内外表面雨滴三维分布

Fig.3 3D distribution of raindrops on internal and external surfaces of cooling tower

为定量比较不同工况下塔筒表面压力分布,定

义等效压力系数为

$$C_{ei} = C_{wi} + C_{ri}, \tag{10}$$

式中: C_{ei} 为第 i 监控点等效压力系数, C_{wi} 和 C_{ri} 分别为第 i 监控点风压系数和雨压系数,即该位置风压和雨压与参考高度处风压的比值(参考高度取 210 m).

建立并分析不同工况下冷却塔塔筒表面压力系数三维分布模式,并将其作为后续有限元分析的有效输入荷载,然后针对不同风速-雨强组合下大型冷却塔塔筒、支柱和环基的结构响应进行定性以及定量的对比分析.

4 结构响应分析

4.1 塔筒受力分析

图 4 给出了不同工况下冷却塔塔筒典型子午线径向位移对比.分析发现各工况塔筒径向位移分布一致,与工况 A 塔筒径向位移最大正值和负值相比较,工况 3 的增幅最大,分别为 0.81% 和 8.47% ;相比工况 B,工况 6 增幅最大,分别为 0.79% 和 6.40% ;相比工况 C,工况 9 增幅最大,分别为 0.79% 和 5.56% .由此可见,塔筒径向位移同时随着风速和雨强的增大而增大,雨荷载对塔筒迎风面区域径向位移影响显著大于其它区域.

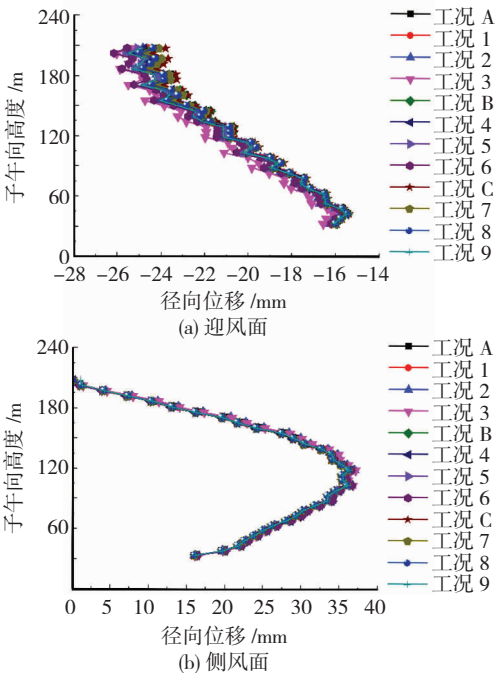


图 4 不同工况下塔筒典型子午线径向位移对比

Fig.4 Comparative curves of radial displacement on typical meridians of tower under different working conditions

图 5 给出了不同工况下冷却塔塔筒典型高度子午向轴力对比.分析可知不同工况塔筒子午向轴力分布一致,随着高度的增大,各工况塔筒子午向轴力随角度的变化幅度显著减小,在塔顶数值基本一致.同时,相比工况 A 的塔筒喉部区域迎风区、侧风区

和背风区子午向轴力,工况 3 增幅最大,分别为 4.21%、0.03% 和 0.05%;相比工况 B,工况 6 增幅最大,分别为 3.01%、0.07% 和 0.01%;相比工况 C,工况 9 增幅最大,分别为 2.44%、0.08% 和 0.13%。

由此可见,塔筒子午向轴力受风速的影响规律不明显,但随着雨强的增大而增大,同时雨荷载对塔筒迎风面子午向轴力影响显著大于其它区域。

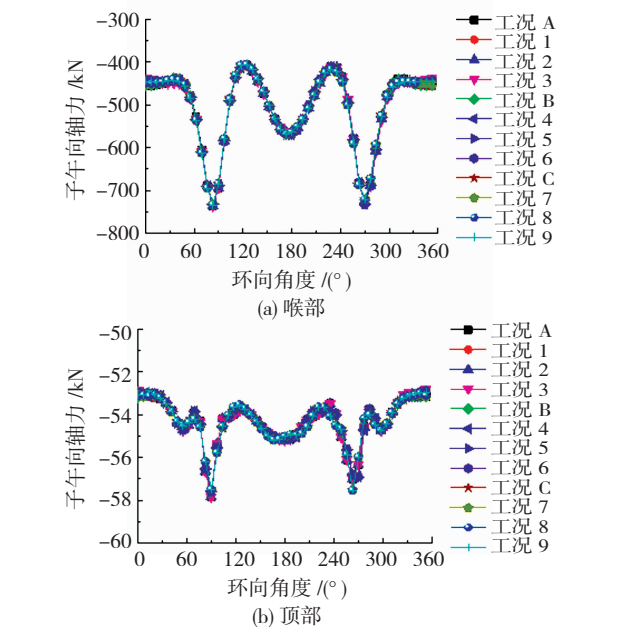


图 5 不同工况下塔筒典型高度子午向轴力对比
Fig. 5 Comparative curves of vertical axis force on typical heights of tower under different working conditions

表 2 给出了不同工况下冷却塔塔筒各内力极值. 对比发现随着风速的增大,塔筒各内力极值均有小幅度的变化,但变化规律不明显. 整体来说,雨荷载对塔筒各内力极值影响较小,其中子午向轴力的增幅最大,达到 0.91%,环向轴力最大增幅为 0.32%,环向弯矩最大增幅为 0.22%,竖向弯矩最大增幅为 0.34%,且各内力最大增幅均出现在工况 3。

表 2 不同工况下冷却塔塔筒各内力极值
Tab. 2 Internal force extrema of cooling tower drum under different working conditions

工况分类	环向轴力/ kN	子午向轴力/ kN	环向弯矩/ (kN·m)	竖向弯矩/ (kN·m)
A	-2 024.3	-2 465.2	415.6	320.7
1	-2 026.0	-2 472.2	415.7	321.0
2	-2 027.0	-2 475.8	416.0	321.2
3	-2 030.7	-2 487.3	416.5	321.8
B	-2 029.7	-2 508.7	419.1	324.9
4	-2 030.1	-2 513.8	419.4	325.1
5	-2 030.7	-2 516.1	419.6	325.2
6	-2 031.1	-2 524.2	420.0	325.6
C	-2 032.6	-2 473.2	385.5	321.9
7	-2 032.7	-2 476.9	385.8	322.0
8	-2 033.0	-2 479.8	386.0	322.2
9	-2 033.1	-2 486.1	386.5	322.4

4.2 支柱受力分析
图 6 给出不同工况下冷却塔支柱右上端的内力对比,表 3 给出不同工况下冷却塔支柱右上端各内力极值. 支柱内力极值主要分布在迎风区和侧风区域. 相比纯风荷载,不同雨强下雨荷载叠加对支柱各内力极值影响微弱,支柱各内力极值的增幅各有不同但均较小,其中扭矩增幅最大为 0.40%,出现在工况 3。

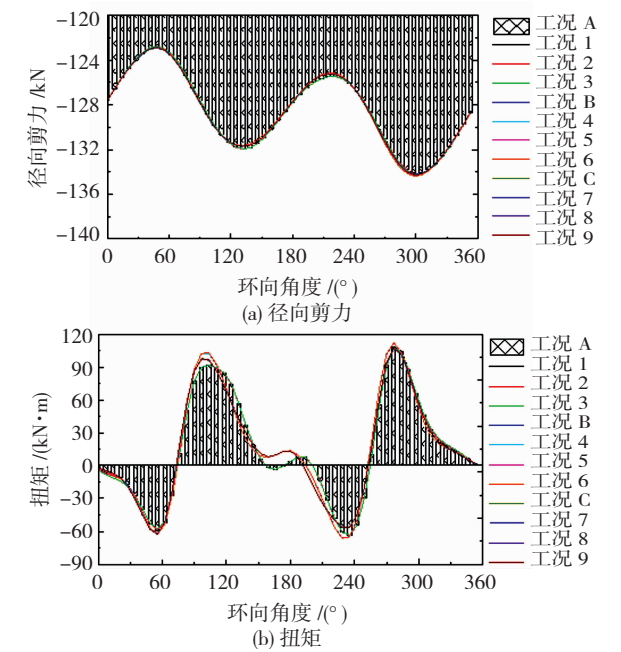


图 6 不同工况下冷却塔支柱右上端各内力分布对比
Fig. 6 Comparative curves of internal forces on the top right of pillars under different working conditions

表 3 不同工况下冷却塔支柱右上端各内力极值
Tab. 3 Internal force extrema on the top right of pillars under different working conditions

工况分类	径向剪力/kN	扭矩/(kN·m)
A	-134.1	107.7
1	-134.2	107.7
2	-134.2	107.9
3	-134.2	108.1
B	-134.3	112.1
4	-134.4	112.1
5	-134.4	112.2
6	-134.4	112.2
C	-134.2	106.7
7	-134.2	106.7
8	-134.3	106.9
9	-134.3	107.1

4.3 环基受力分析
表 4 和图 7 分别给出不同工况下冷却塔环基各位移极值和位移对比. 不同工况环基位移分布基本一致,且随着风速增大,环基各位移极值均呈现先增大后减小的变化规律. 相比纯风荷载,不同雨强下雨荷载的叠加对环基各位移极值均有不同程度的影响,环基各位移极值的增幅各有不同但均较小,其中环向位移增幅最大,最大可达 2.41%,出现在工况 3。

表 4 不同工况下冷却塔环基各位移极值

Tab.4 Displacement extrema of ring foundation under different working conditions

工况分类	径向位移/mm	环向位移/mm	竖向位移/mm
A	3.060	-0.333	-5.160
1	3.060	-0.336	-5.170
2	3.060	-0.337	-5.170
3	3.070	-0.341	-5.180
B	3.080	-0.341	-5.180
4	3.090	-0.342	-5.180
5	3.090	-0.343	-5.180
6	3.090	-0.346	-5.190
C	3.060	-0.336	-5.160
7	3.060	-0.337	-5.160
8	3.060	-0.338	-5.170
9	3.070	-0.340	-5.170

区范围和内表面塔顶高度范围的背风区范围内,且外表面雨滴捕捉数量显著大于内表面。

3) 风速与雨强的增强均会增大塔筒迎风面位移与内力响应,且增幅随着雨强的变大而变大,其中最为显著的是工况 3,相对工况 A 的塔筒迎风面径向位移增大 8.47%,子午向轴力增大 4.21%;降雨对塔筒迎风面区域结构的影响较为显著,但对塔筒其它区域、支柱以及环基的影响微弱。

暴雨环境下此类冷却塔塔筒外表面迎风和内表面塔顶背风区域的降雨影响不能忽略. 同时塔筒迎风区域结构响应计算时建议考虑暴雨荷载的影响,但塔筒其它区域、支柱以及环基可不予考虑。

参考文献

[1] 武际可. 大型冷却塔结构分析的回顾与展望[J]. 力学与实践, 1996, 18(6): 1
WU Jike. Review and prospect of structural analysis of large cooling towers[J]. Mechanics and Practices, 1996, 18(6): 1

[2] 余玮, 柯世堂. 大型冷却塔风致响应极值现场实测和有限元对比[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 23
YU Wei, KE Shitang. Field measurements and finite element comparison of wind-induced extreme response of large cooling towers [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 23

[3] 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

[4] Structural design of cooling tower-technical guideline for the structural design, computation and execution of cooling towers: VGB-R610Ue [S]. Essen: BTR Bautechnik Bei Kühlturmen, 2005

[5] ZHANG Junfeng, GE Yaojun, ZHAO Lin. Influence of latitude wind pressure distribution on the responses of hyperbolic cooling tower shell [J]. Wind & Structures, An International Journal, 2013, 16(6): 579

[6] CHEN Xu, ZHAO Lin, CAO Shuyang, et al. Extreme wind loads on super-large cooling towers [J]. Journal of the International Association for Shell & Spatial Structures, 2016, 57(1): 49

[7] 柯世堂, 余文林. 高度 200m 特大型冷却塔二维风振系数取值方法及分布规律[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 78

[8] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers[J]. Engineering Structures, 1998, 20(10): 874

[9] 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, 32(3): 388

[10] 沈国辉, 余关鹏, 孙炳楠, 等. 考虑内外压共同作用的大型冷却塔风荷载分析[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 439

[11] 李鹏飞, 赵林, 葛耀君, 等. 超大型冷却塔风荷载特性风洞试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 60

[12] 郑永鑫. 低矮建筑风驱雨作用的数值模拟与实测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012

[13] 周超, 芮晓明. 高压输电线风雨激振特性研究及数值分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 173

[14] 王凌云, 徐幼麟. 斜拉桥斜拉索的风雨振动: 参数研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 147

[15] MCFARQUHAR G M, LIST R. The raindrop mean free path and collision rate dependence on rainrate for Three-Peak equilibrium and Marshall-Palmer distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2010, 48(3): 1999

[16] DOUVI E, MARGARIS D. Aerodynamic performance investigation under the influence of heavy rain of a NACA 0012 airfoil for wind turbine applications [J]. International Review of Mechanical Engineering, 2012, 6(6): 25

(编辑 赵丽莹)

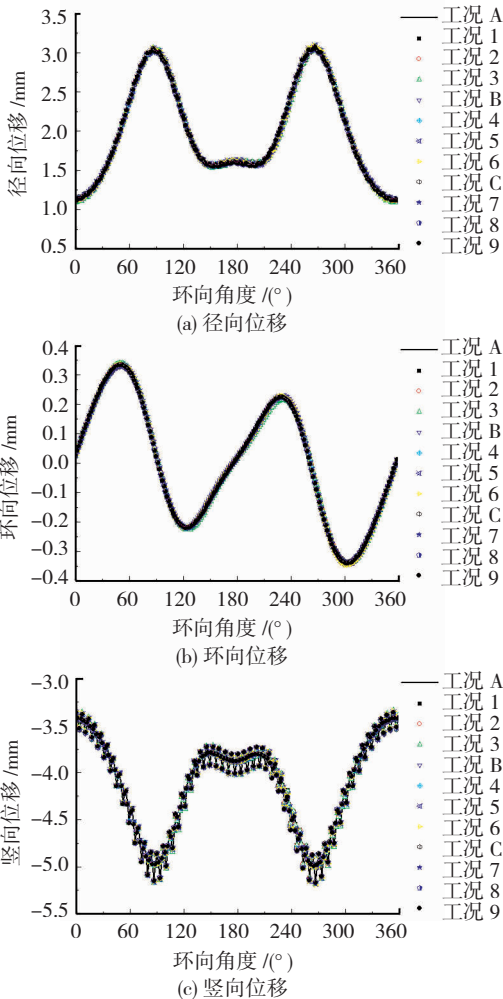


图 7 不同工况下冷却塔环基位移对比

Fig.7 Displacement contrast of ring foundation

5 结 语

1) 冷却塔风雨场呈现明显的三维效应,塔筒内外表面雨滴捕捉数量随风速的增大而减少,随雨强的增大而增加,塔筒内外表面雨滴捕捉数量最多的均为工况 3(风速 20 m/s、雨强 200 mm/h)。

2) 雨滴撞击位置主要集中在塔筒外表面迎风