

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.019

## 不同透风率超大型冷却塔台风致内吸力取值

韩光全<sup>1</sup>, 柯世堂<sup>1</sup>, 杨杰<sup>1</sup>, 朱容宽<sup>1,2</sup>, 王晓海<sup>1,3</sup>

(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 510663; 3. 中国能源建设集团江苏省电力设计研究院有限公司, 南京 211102)

**摘要:** 风荷载是超大型冷却塔设计的控制荷载, 塔筒内部风荷载取值仅考虑了良态风工况。为研究台风作用下超大型冷却塔内吸力分布特性, 采用多重嵌套的中尺度天气研究预报 (Weather research and forecast, WRF) 模式对台风“鲇鱼”进行高时空分辨率模拟, 并借助最小二乘法优化技术拟合得到近地面三维风速剖面。以山西潞安电厂 220 m 世界最高冷却塔为对象, 结合中-小尺度耦合模式嵌套技术对超大型冷却塔进行台风和 A 类地貌下大气边界层良态气候风的近地面三维风场 CFD 模拟。在此基础上, 探讨了塔内绕流特性、能量分布、阻力系数以及风阻的差异和产生原因, 对比分析了冷却塔内表面风压系数三维分布特征, 最后给出台风作用下超大型冷却塔内吸力的取值建议。结果表明, 采用 WRF-CFD 耦合模式可以有效模拟台风下超大型冷却塔近地三维风场, 考虑 0%、15%、30% 及 100% 百叶窗透风率下台风致内吸力系数取值分别为 -0.61、-0.36、-0.34 和 -0.42。

**关键词:** 超大型冷却塔; 台风; WRF-CFD 耦合模式; 内吸力系数; 绕流特性

**中图分类号:** TU279.741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0154-10

## Value of Internal Suction Caused by Typhoon in Super-Large Cooling Tower Considering Ventilation Rates

HAN Guangquan<sup>1</sup>, KE Shitang<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, ZHU Rongkuan<sup>1,2</sup>, WANG Xiaohai<sup>1,3</sup>

(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 510663, China; 3. China Energy Engineering Group Jiangsu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Wind load is the control load for the design of super-large cooling towers. The value of the wind load inside the tower only considers the normal wind conditions. In order to study the suction distribution and flow field mechanism in a super-large cooling tower under a typhoon, a multiple nested mesoscale weather research and forecast (WRF) model is used to simulate the high spatiotemporal resolution of the typhoon “Megi”, and the wind velocity profile of the simulated area is obtained based on the least squares fitting. The 220 meter cooling tower, the highest in the world, at Shanxi Lu’an Power Plant is taken as the research object. Three-dimensional (3D) CFD wind field simulations of this tower under normal wind and typhoon are performed based on the mesoscale microscale nesting technology. Based on this, the differences and causes of flow field characteristics, energy distribution, drag coefficients and wind resistances in towers under normal wind and typhoon are compared. The 3D distribution characteristics of the wind pressure coefficient on the inner surface are compared and analyzed. Finally, suggestions for suction values in large-cooling towers under typhoons are given. The results show that the WRF-CFD coupling mode can effectively simulate the

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51878351, 51761165022, U1733129); 江苏省优秀青年基金 (BK20160083)。

**收稿日期:** 2021-03-23; **修订日期:** 2022-01-03

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

**引用格式:** 韩光全, 柯世堂, 杨杰, 等. 不同透风率超大型冷却塔台风致内吸力取值[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 154-163. HAN Guangquan, KE Shitang, YANG Jie, et al. Value of internal suction caused by typhoon in super-large cooling tower considering ventilation rates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 154-163.

near-ground 3D wind field of super-large cooling towers under typhoons. The recommended values of the overall internal pressure coefficients at 0%, 15%, 30%, and 100% louver air permeability are  $-0.61$ ,  $-0.36$ ,  $-0.34$ , and  $-0.42$ , respectively.

**Key words:** super-large cooling tower; typhoon; WRF-CFD coupling mode; internal pressure coefficient; flow field characteristics

超大型冷却塔为典型高耸旋转薄壳结构,风荷载是其结构设计的控制荷载之一。现有冷却塔风荷载相关研究主要针对大气边界层良态气候风场作用下塔筒外表面风荷载分布<sup>[1-2]</sup>、塔群干扰效应<sup>[3-4]</sup>、等效静力风荷载<sup>[5-6]</sup>等,而对于内吸力系数仅以 $-0.5$ 作为建议取值进行整体设计<sup>[7]</sup>,同时并没有考虑内吸力在强台风场下的三维分布特性和取值。然而,已有研究<sup>[8-9]</sup>及冷却塔风毁事故调查<sup>[10-11]</sup>发现内吸力分布呈现出明显三维非线性特征,对结构抗风稳定性存在显著影响。加之我国海岸线曲折绵长,沿海地区工程结构与各类建(构)筑物遭受台风破坏乃至倒塌的案例屡见不鲜<sup>[12]</sup>。相较于良态风,极高风速、活跃湍流、突增切变的台风将对冷却塔内壁面气动紊乱性产生剧烈作用。因此,系统研究台风作用下超大型冷却塔内吸力取值对结构抗台风设计具有重要的工程意义。

针对冷却塔内表面风荷载,我国规范<sup>[7]</sup>中采用单一统一内吸力系数经验取值,并假定沿子午向及环向为定值。国内外相关研究中,其中文献<sup>[13]</sup>考虑了自然对流引起的浮升力影响,分析了冷却塔内表面风荷载的三维分布特征,结果表明塔筒内部风压系数会因风热耦合作用产生增大效应;文献<sup>[14-15]</sup>基于CFD数值模拟分析了不同侧风和百叶窗透风率下冷却塔内部空气流场及内吸力导致的风振特性;文献<sup>[16]</sup>采用CFD数值模拟分析总结了运行状态下冷却塔内压分布规律。然而已有研究仅关注了良态风作用下冷却塔内表面风压分布特性,台风作用下超大型冷却塔内压研究尚属空白。

鉴于此,基于中尺度数值天气研究预报(Weather research and forecast, WRF)模式进行了台风“鲇鱼”登陆过程模拟,并采用最小二乘法拟合区域平均风速剖面。以山西潞安 220 m 世界最高冷却塔为研究对象,将模拟得到的台风风速剖面与规范<sup>[17]</sup>A 类地貌梯度高度处具有相同风速的风场剖面作为CFD模拟的两种初始风场信息。在此基础上,对比分析不同透风率时良态风和台风作用下塔筒内表面风荷载的三维效应,探讨良态风和台风作用下塔内绕流特性、阻力系数及风阻的差异,以及产生原因。最后归纳总结内压系数沿环向和子午向的分布规律,提炼并给出台风作用下超大型冷

却塔内吸力的推荐取值。

## 1 工程概况

本文采用的超大型冷却塔工程位于中国山西潞安电厂,是目前建成的世界最高自然通风间接空冷塔,塔高 220 m,喉部标高 165 m,塔顶中面直径 128 m,喉部中面直径 123 m。塔筒以指数律变厚,最小厚度位于喉部截面,壁厚为 0.39 m,最大厚度为 1.85 m。塔筒底部由 64 对 X 形柱与环形基础相连。

冷却塔进风口透风率与施工阶段及运行工况相关<sup>[9]</sup>,本文综合考虑分为以下 3 类:第一类为施工期,百叶窗尚未安装,透风率为 100%;第二类为正常运行期,根据生产需要及外部环境,透风率设为 15% 和 30%;第三类为冬季防冻期,此时百叶窗处于完全关闭状态,透风率为 0%(图 1)。

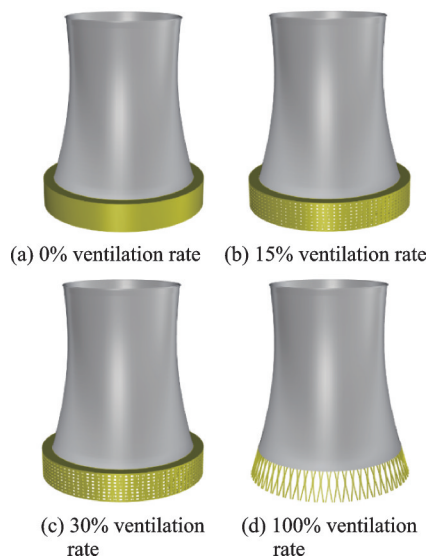


图 1 4 种透风率下冷却塔三维模型示意图

Fig.1 3D model of cooling tower under four kind of ventilation rates

## 2 中-小尺度耦合模式下台风场模拟

### 2.1 物理方案选取及参数设置

中尺度 WRF 模式以流体力学和热力学为理论基础,具有较为完善的物理过程。WRF 模式包含两个动力框架,分别为 WRF-ARW 和 WRF-NNM。本文采用 WRF-ARW 模式,该模式

考虑风速、温湿度、水汽等多物理过程<sup>[18]</sup>,可准确模拟真实大气环境下台风运动路径和较大范围内风压、流场等风场结构特征。

WRF-ARW 模式采用 3 层单向嵌套方案实现台风“鲇鱼”的风场模拟和数值计算,水平分辨率分别设置为 13.5、4.5 和 1.5 km。冷却塔尺寸为百米级别,处在大气边界层的下部区域,结构气动性能受气流密度、湿度、热传递等气象要素影响较为显著,故在模拟时需采用适宜的参数化物理方案以保证足够的精度。经过多次试验并与模拟结果进行对比,选定参数设置如表 1 所示。

表 1 WRF-AKW 模式嵌套网格划分与参数化物理方案  
Table 1 Nested meshing and parametric physical schemes for WRF-AKW model

WRF 参数	主区域 d01	嵌套区域 d02	嵌套区域 d03
嵌套网格数	211	217	241
积分时间步长/s	180	180	180
短波辐射		RRTM 方案	
长波辐射		Dudhai 方案	
陆面过程		Noah 方案	
微物理过程方案		Lin 方案	
边界层方案		MYJ 方案	
模式动力框架		ARW 非静力	

### 2.2 台风场模拟结果

图 2 给出了“鲇鱼”台风登陆过程模拟路径及实测结果对比图,红色线段为 WRF 模拟路径,蓝色线段为气象实测结果。由图可知,WRF 模拟得出的台风路径与真实路径仅在经度方向略有偏差,整体吻合程度较高。

图 3 为台风不同登陆阶段速度流场矢量分布图。由图可知:风速流线在台风眼壁外侧呈现波动特征,风场非对称性较强。台风登陆前其路径稳定

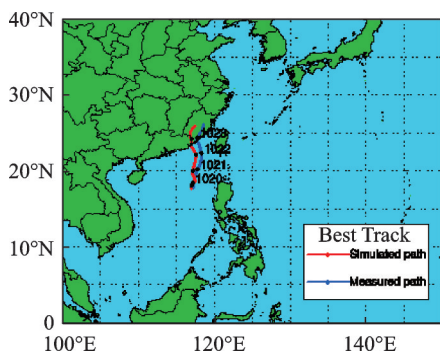
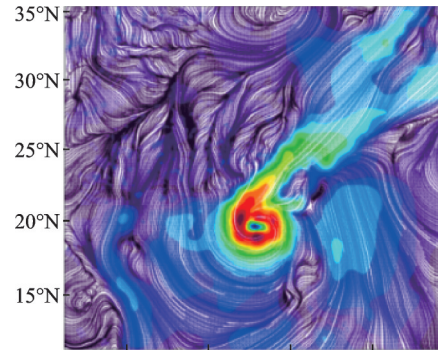


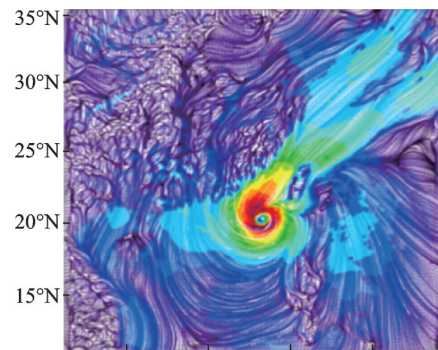
图 2 台风登陆过程模拟路径及实测结果对比图

Fig.2 Comparison of simulated paths and measured results during typhoon landing process

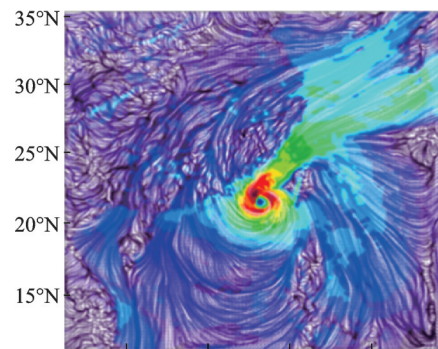
向西北方向移动,各阶段速度流场均存在一条东西方向切变线,且随着台风登陆该切变线向北移动,切变线以北区域因受到复杂地形条件的影响风速流线表现杂乱。从风速场模拟结果可知本文采用的 WRF-ARW 模式可有效模拟台风登陆发展和风场时变过程。



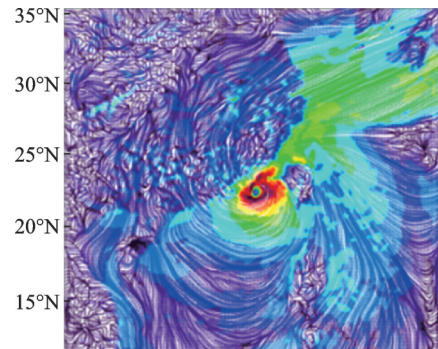
(a) 02:00, October 22nd



(b) 08:00, October 22nd



(c) 20:00, October 22nd



(d) 2:00, October 23nd

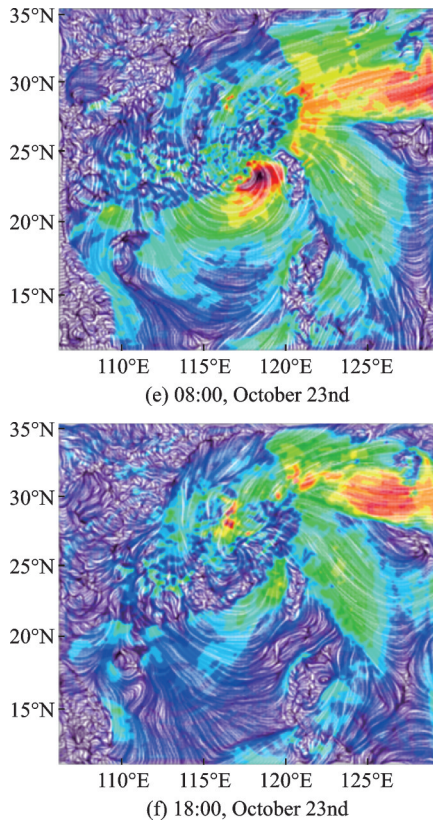


图 3 “鲑鱼”台风不同发展阶段速度流线矢量分布图  
Fig.3 Vector distribution of the velocity streamline of “Meigi” typhoon in different development stages

图 4(a)为台风登陆前后不同时刻中心附近区域风速剖面,由图可知,台风登陆各时刻低海拔风速分布具有明显的规律性,随着海拔逐渐增高,风速分布则愈加紊乱,10月23日2:00台风尚未登陆,之后台风向偏西北方向移动并登陆泉州市、漳州市等地,此过程中台风强度逐渐降低而减弱为热带风暴,继而转为热带低压,故风速在10月23日2:00最大,随时间推移逐渐减小。假定在300 m高度处,台风场与A类地貌<sup>[17]</sup>下大气边界层良态风场风速相等,依此对大气边界层台风平均风剖面进行拟合。由图4(b)可知,模拟结果能较为准确地拟合出近地面台风场,模拟精度可达93.57%;拟合得到的近地面台风场平均风速剖面地面粗糙指数 $\alpha$ 取值为0.091,小于规范<sup>[17]</sup>中A类地貌地面粗糙指数0.12。

2.3 中-小尺度台风场模拟嵌套

采用单向嵌套方案,在边界层范围内对竖向网格进行加密,为小尺度CFD模拟提供精细的中尺度风场信息。WRF模式和CFD模拟之间的嵌套和运算流程见图5。

为保证流动充分发展及雷诺效应的相似性,在CFD中以实际尺寸建立冷却塔模型,计算域设置为顺风向 $X=20D(D=185\text{ m})$ 、横风向 $Y$

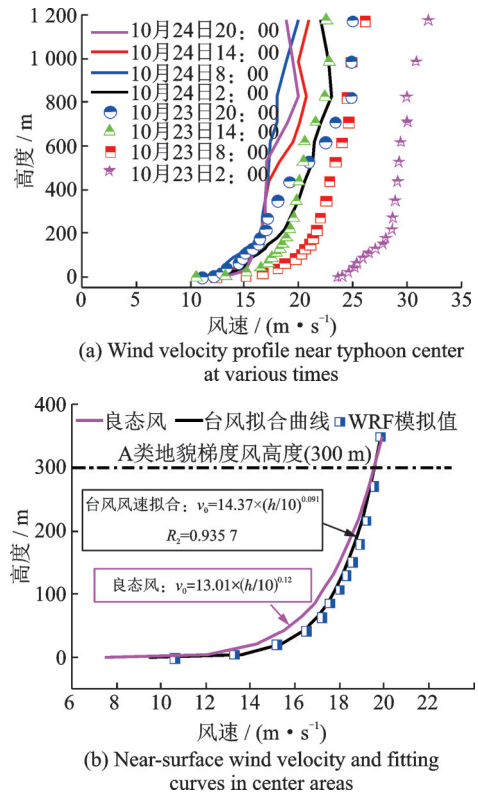


图 4 台风中心附近区域风速剖面 and 两类风场近地面风速及拟合曲线

Fig.4 Wind velocity profile in the area near the typhoon center and near-surface wind velocity and fitting curves of two types of wind fields

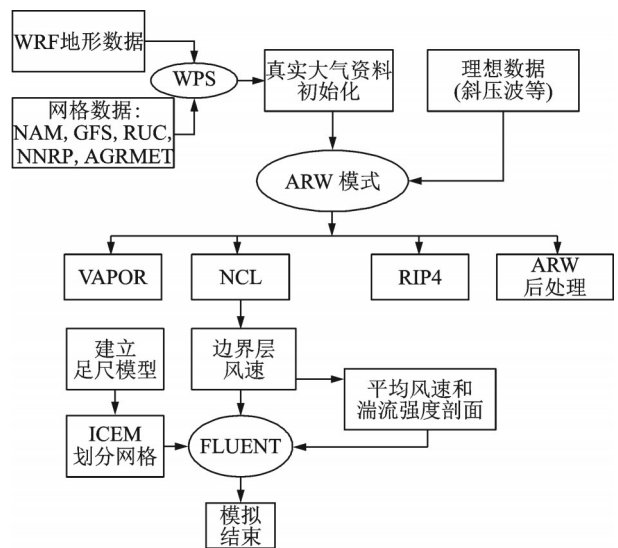


图 5 WRF 与 CFD 的嵌套和运算流程图

Fig.5 Nesting and operation flow of WRF and CFD

$=9D$ 、高度方向 $H=4D$ ,冷却塔底部中心距计算域入口约 $7D$ 。考虑到计算效率和模拟精度的要求,采用混合网格离散形式,核心区域选用四面体非结构网格,在核心区域外围采用具有高质量、快传输、规则拓扑的六面体结构网格进行划分。计算域及具体网格划分如图6所示。

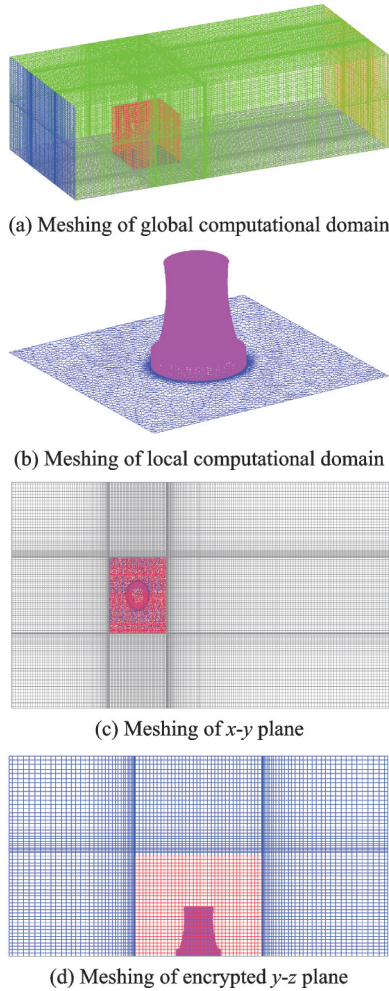


图6 整体计算域及局部网格加密示意图

Fig.6 Schematic diagrams of global computational domain and local grid encryption

### 3 流动机理

#### 3.1 绕流特性

以正常运行期百叶窗透风率30%为例,图7给出了两类风场作用下冷却塔结构内外速度流线图,相比良态风,由于强湍流及高风速的影响,台风作用下来流对冷却塔绕流特性的影响更为显著。主要表现为:气流沿塔筒结构两侧外壁加速效应更加明显;塔筒内部上升气流与塔筒顶部顺风向加速气流相互扰动作用更加剧烈,从而在塔顶背风面形成较大范围的旋涡脱落效应;透过百叶窗撞击塔内背风面的气流运动更加紊乱,致使与近地面复杂的三维绕流运动交互作用,在塔筒百叶窗出风口下流区域形成更大尺度的涡旋。

百叶窗透风率为30%时良态风和台风分别作用下冷却塔喉部截面速度流线如图8所示。对比可知,两类风场作用下冷却塔喉部位置及外风场尾流区均形成涡旋,但台风的高风速、强湍流使得进入塔筒内部的上升气流运动更为剧烈,与塔顶反向回旋气流相互冲击,导致塔内喉部两侧旋涡尺度更

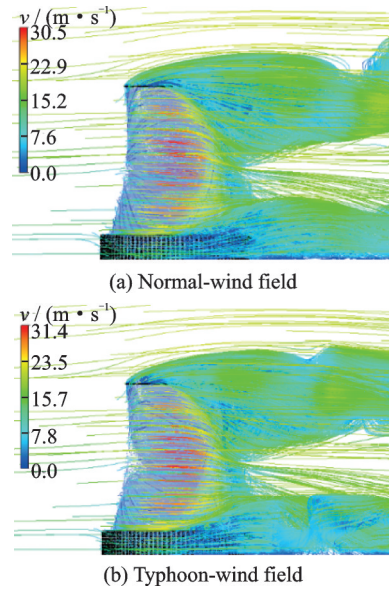


图7 冷却塔结构内外速度流线图

Fig.7 Streamline diagrams of internal and external velocities of cooling tower

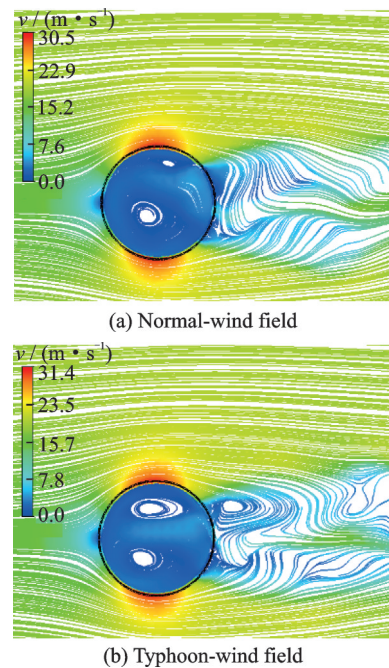


图8 冷却塔喉部截面速度流线图

Fig.8 Velocity streamlines of the throat section of cooling tower

大,尾流更加紊乱且发展区域更长。

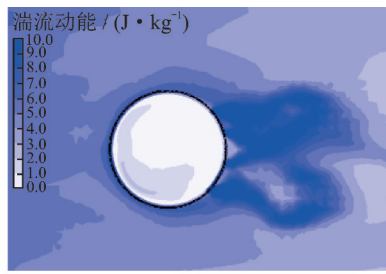
#### 3.2 能量分布

风场能量一般以湍动能考虑,湍动能是湍流强度的度量,能够反映湍流脉动的剧烈程度。计算公式为

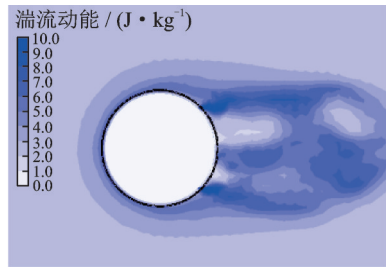
$$k = \frac{3}{2} u(z)^2 I(z)^2 \quad (1)$$

图9给出了两类风场作用下考虑不同透风率冷却塔喉部截面湍动能分布云图,由图可以看出,随着百叶窗透风率由15%增大到100%,冷却塔喉

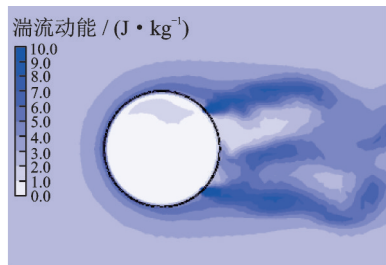
部断面位置湍动能明显增大。百叶窗透风率相同时,两类风场作用下冷却塔喉部截面湍动能分布也存在差异,相比良态风作用下,台风作用下气流运



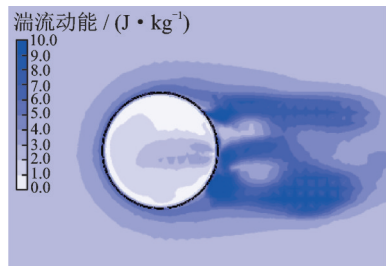
(a) Normal-wind field at a 0% ventilation rate



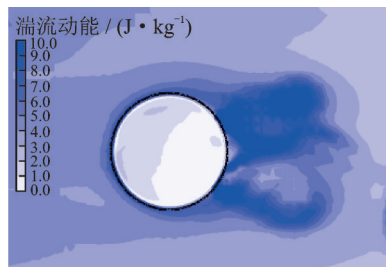
(b) Normal-wind field at a 15% ventilation rate



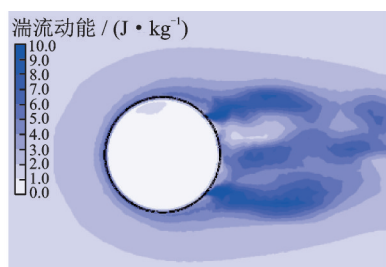
(c) Normal-wind field at a 30% ventilation rate



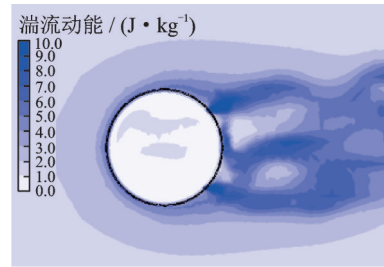
(d) Normal-wind field at a 100% ventilation rate



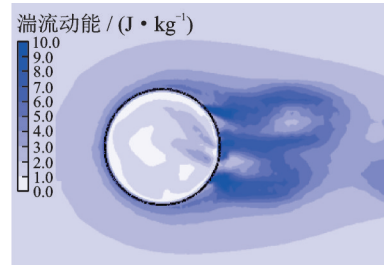
(e) Typhoon-wind field at a 0% ventilation rate



(f) Typhoon-wind field at a 15% ventilation rate



(g) Typhoon-wind field at a 30% ventilation rate



(h) Typhoon-wind field at a 100% ventilation rate

图 9 冷却塔喉部截面湍动能分布云图

Fig.9 Cloud diagrams of turbulent kinetic energy distribution of throat section

动更为复杂,旋涡尺度更大,在冷却塔背风面尾流区域及喉部截面位置处湍动能分布出现更大范围的增量和集中现象。

### 4 内表面风荷载特性

#### 4.1 局部风荷载

图 10 给出了台风作用下考虑不同透风率冷却塔内压系数分布云图,参考高度为 220 m。分析可知,台风作用下塔筒内表面风压系数分布较为紊乱。同时,不同透风率下其影响存在差异,主要表现为:0%透风率下,由于来流仅由塔顶进入冷却塔内部,冷却塔内压系数绝对值明显大于其他透风率工况下的冷却塔;且相对于速度较低的良好风,整体上进入冷却塔内部的台风来流更少,造成台风作用下冷却塔内压系数绝对值小于良好风作用下内压系数绝对值。而 15%、30% 和 100%透风率下,较高速度的台风来流可通过近地面进风口和塔顶出风口进入塔筒内部,造成台风作用下内压系数绝对值大于良好风作用下内压系数绝对值。

图 11 给出了各透风率下冷却塔不同高度横截面



(a) 0% ventilation rate

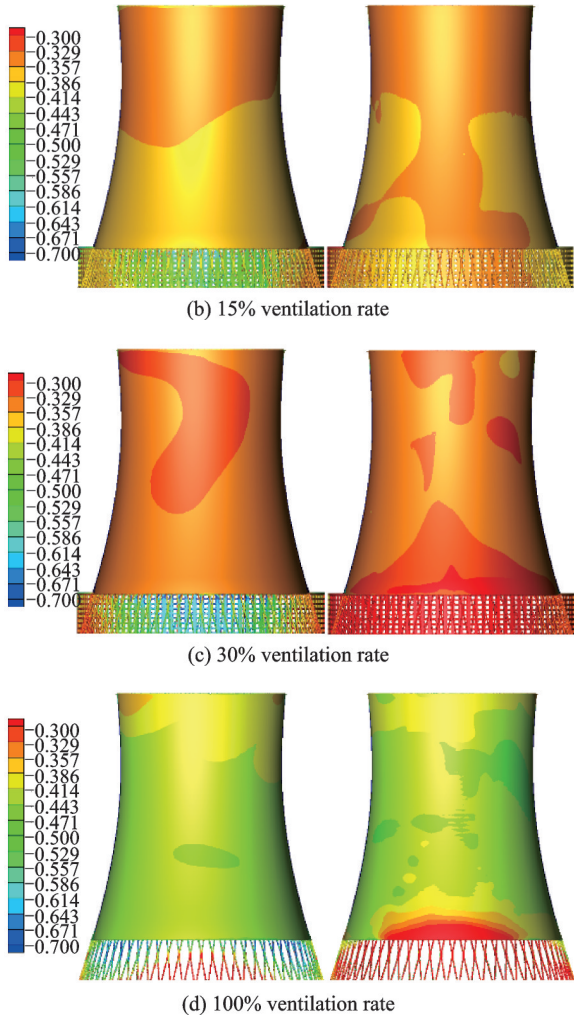


图10 台风作用下冷却塔内压系数云图  
Fig.10 Cloud diagrams of the internal pressure coefficient of cooling tower under the typhoon

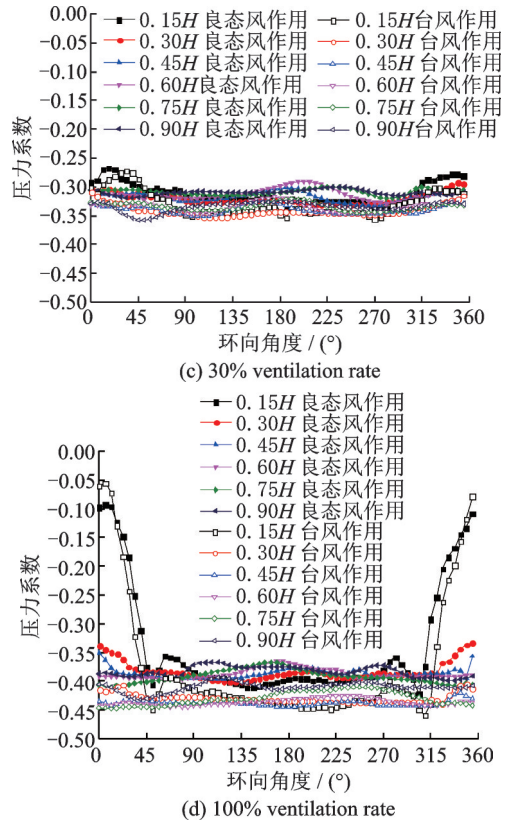
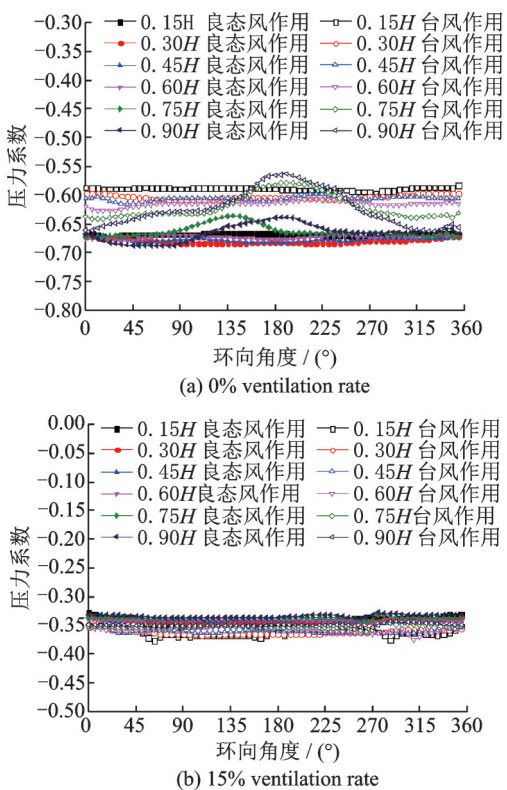


图11 冷却塔内压系数沿环向分布曲线

Fig.11 Toroidal distribution curves of the internal pressure coefficient of cooling tower

处内压系数沿环向分布曲线,由图可知,不同工况下冷却塔内表面风压沿环向分布差异显著。主要表现为:0%透风率时良态风作用与台风作用下内压系数沿环向分布规律基本一致,良态风作用下冷却塔内压系数分布在 $-0.69\sim-0.64$ 之间,台风作用下其值分布在 $-0.66\sim-0.56$ 之间;15%和30%透风率时,良态风和台风作用下冷却塔内表面风压系数沿环向分布较为均匀,由于透风率增大,进入塔筒内部的气流增多,故相较于15%透风率,30%透风率下内压系数沿环向分布波动幅度较大;100%透风率下,由于失去百叶窗遮挡,部分来流直接从冷却塔支柱处进入塔筒内部撞击到背风面,而后回流撞击迎风面塔筒内壁,造成0.15H高度迎风面两侧约 $60^\circ$ 范围内正负压力部分抵消,该范围内压系数绝对值较小,其他高度范围内压系数分布则较为均匀。

不同透风率下冷却塔各横截面内压系数沿子午向分布曲线如图12所示,对比可知,同一透风率时良态风和台风作用下内压系数沿子午向分布规律较为接近,但其数值大小存在明显差异。由塔内各测点层平均风压系数进行平均计算,得到整体内压系数。0%透风率良态风作用下整体内压系数为 $-0.67$ ,台风作用下其取值约为 $-0.61$ ,相对良态风作用下内压系数取值减小了8.96%;15%、30%透风率时,良态风和台风作用下冷却塔层平均内压系数基本不变,计算得到良态风作用下冷却塔整体平



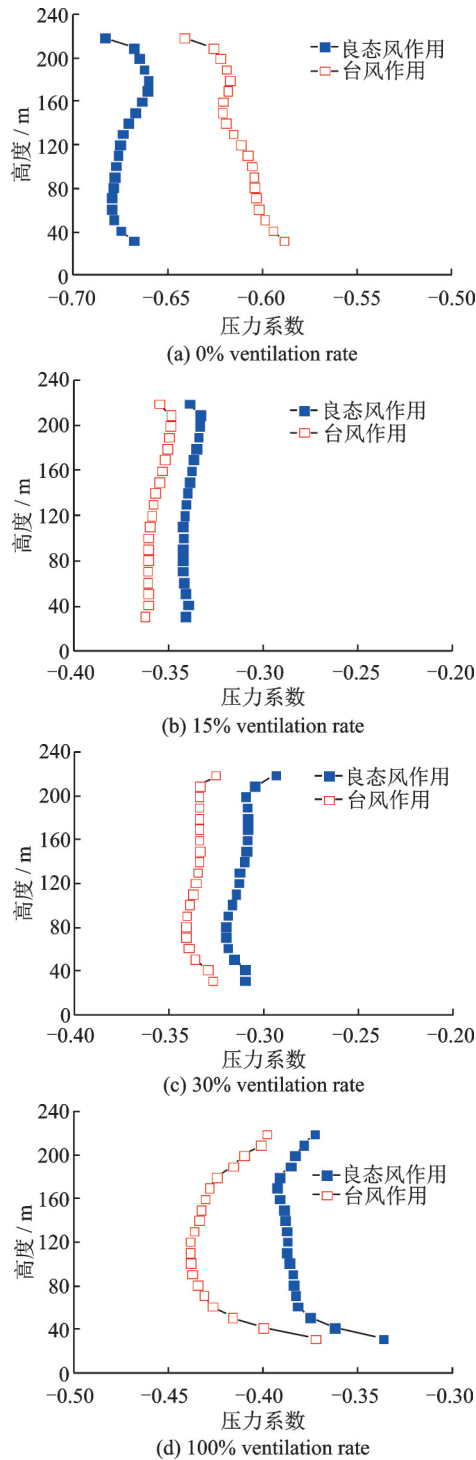


图 12 冷却塔内压系数沿子午向分布曲线

Fig.12 Meridian distribution curves of the internal pressure coefficient of cooling tower

均内压系数取值分别约为-0.34、-0.31,台风作用下其取值分别约为-0.36、-0.34,相对良态风作用下内压系数取值分别增大了5.88%、9.68%;100%透风率时,良态风和台风作用下冷却塔层平均内压系数绝对值均呈现先增大后减小的趋势,计算得到良态风作用下冷却塔整体平均内压系数取值约为-0.38,台风作用下其取值约为-0.42,相对良态风作用其内压系数取值增大了10.53%。

考虑进风口及出风口的压力差,图 13 给出了

台风作用下考虑不同透风率冷却塔进风口及出风口断面压力分布云图(风向由左向右),由图可以看出,百叶窗透风率为0%时,台风作用下进、出风口截面压力绝对值均大于其他工况,且进、出风口截面压力值存在显著差异,其差值为27.6 Pa,而其余透风率下进、出风口压力值较为相近。

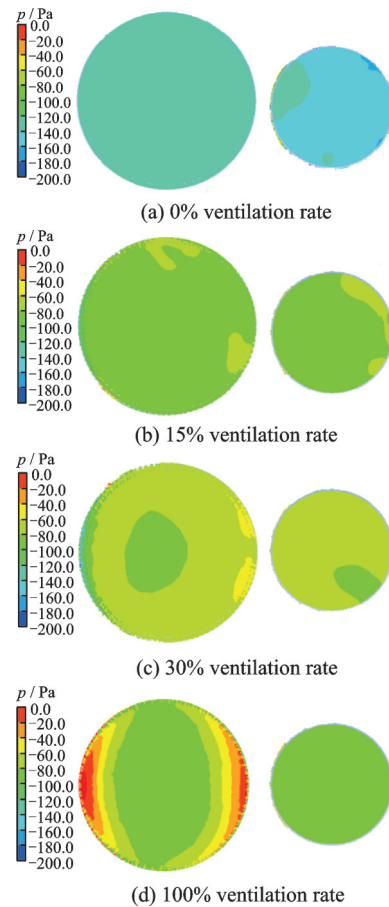


图 13 台风作用下冷却塔进/出风口截面压力云图

Fig.13 Cloud diagrams of pressure distribution of inlet/outlet section of cooling tower under the typhoon

#### 4.2 整体风荷载

本文采取整体阻力系数作为整体风荷载的计算指标,顺风向冷却塔阻力系数可由风压系数积分计算得到<sup>[19]</sup>

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

式中: $A_i$ 为第*i*测点压力覆盖面积, $\theta_i$ 为第*i*测点压力与来流方向夹角, $A$ 为整体结构沿顺风方向投影面积。

图 14 首先给出了不同透风率下冷却塔内表面沿子午向的阻力系数分布,由图可知,相同透风率时,良态风和台风作用下冷却塔内表面阻力系数沿子午向分布规律较为接近,且其数值无明显差异。0%、15%及30%透风率下,内表面阻力系数较小,均分布在-0.04~0.04区间内;100%透风率下,200 m以下各层阻力系数分布在-0.05~0.05范围内,200 m以上两



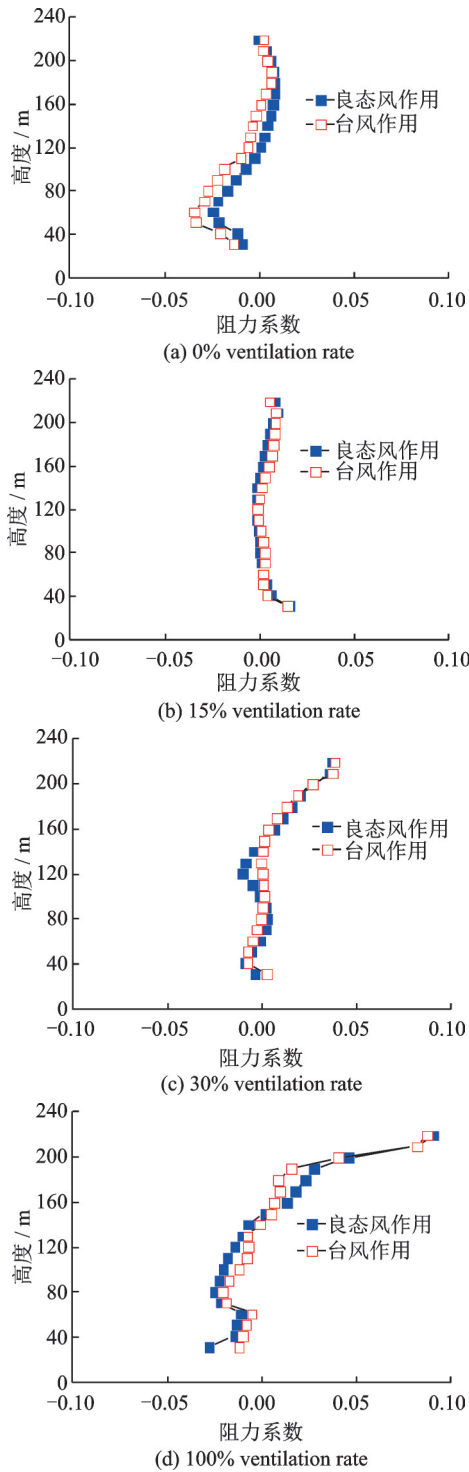


图14 不同透风率下冷却塔内表面阻力系数沿子午向分布曲线

Fig.14 Meridian distribution curves of internal drag coefficient of cooling tower considering different ventilation rates

层的阻力系数较大,其取值接近0.10,表明在此高度范围内冷却塔内压沿环向分布的不均匀性较为显著。

图15给出了两类风场作用下不同透风率时冷却塔内表面的整体阻力系数分布曲线,分析可知,随着透风率的增大,良态风和台风作用下内表面整体阻力系数变化规律相近,均呈现先增大后减小的趋

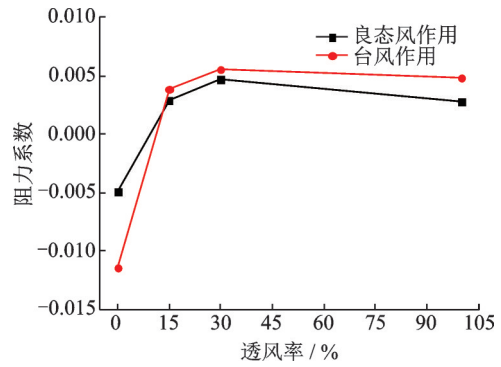


图15 冷却塔内表面整体阻力系数分布曲线

Fig.15 Distribution curves of internal overall drag coefficient distribution of cooling tower

势。良态风作用下,整体阻力系数分布在 $-0.0049 \sim 0.0047$ 之间,台风作用下其值则分布在 $-0.0114 \sim 0.0056$ 之间,对比可知台风作用下随透风率增大冷却塔内表面整体阻力系数变化更加剧烈。

### 5 结 论

以中国山西潞安电厂220 m世界最高间接空冷却塔为研究对象,基于中尺度WRF模式对台风“鲇鱼”进行详细的风场模拟和分析,并结合小尺度CFD嵌套技术对比研究了良态风和台风作用下塔筒内部流场作用机理及内吸力取值的差异性。主要结论如下:

(1)WRF模式中采用多重网格嵌套技术实现了中/小尺度之间准确的风场信息交互传递。该降尺度方法拟合得出的台风“鲇鱼”风速剖面指数为0.091,相较我国规范中规定的A类地貌环境下大气边界层良态风剖面指数减小24.2%。

(2)相同透风率时良态风和台风作用下冷却塔周围及内部流场特性差异显著,台风作用导致塔内上升气流与塔顶加速气流交互作用,使得塔内喉部两侧及尾流区形成大尺度旋涡,同时喉部断面及尾流区出现明显的湍动能增量区域。

(3)相比0%透风率,15%、30%和100%透风率时台风作用下进、出风口截面压力绝对值无显著差异;同一透风率时两类风场作用下冷却塔内表面阻力系数沿子午向分布规律较为接近,在同一高度处阻力系数值相差较小。

(4)台风作用下冷却塔内表面风压系数取值相较良态风浮动明显,表2给出了不同透风率时良态风和台风作用下内压系数建议取值,可为此类超大

表2 良态风和台风作用下内压系数建议取值列表

Table 2 Recommended values of internal pressure coefficients under normal wind and typhoon

透风率风场	0%	15%	30%	100%
规范	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
良态风	-0.67	-0.34	-0.31	-0.38
台风	-0.61	-0.36	-0.34	-0.42

型冷却塔在台风气候下内吸力取值提供依据。

### 参考文献:

- [1] BABU G R, RAJAN S S, HARIKRISHNA P, et al. Experimental determination of wind-induced response on a model of natural draught cooling tower [J]. *Experimental Techniques*, 2013, 37(1): 35-46.
- [2] 赵林, 刘晓鹏, 高玲, 等. 大型冷却塔表面脉动风压原型实测与分布准则[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(1): 1-11. ZHAO Lin, LIU Xiaopeng, GAO Ling, et al. Prototype measurement and distribution criteria of fluctuating wind pressure on the surface of a large cooling tower[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(1): 1-11.
- [3] 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 Shitang, WANG Hao. Considering the wind load extreme value distribution characteristics and value selection of four-tower super large cooling tower groups [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(1): 48-57.
- [4] 赵林, 王志男, 梁誉文, 等. 大型冷却塔考虑多种风荷载分布模式的结构优化选型[J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(3): 493-504. ZHAO Lin, WANG Zhinan, LIANG Yuwen, et al. Structural optimization and selection of large cooling towers considering multiple wind load distribution modes[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(3): 493-504.
- [5] ZHANG J F, GE Y J, ZHAO L, et al. Wind induced dynamic responses on hyperbolic cooling tower shells and the equivalent static wind load[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2017, 169: 282-289.
- [6] LIU Z Q, ZHANG C, ISHIHARA T. Numerical study of the wind loads on a cooling tower by a stationary tornado-like vortex through LES[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2018, 81: 656-672.
- [7] 火力发电厂水工设计规范:DL/T5339—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014. Code for hydraulic design of fossil fired power plant: DL/T5339—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [8] 邹云峰, 何旭辉, 陈政清, 等. 超大型冷却塔内表面风荷载风洞试验与数值模拟研究[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(5): 697-705. ZOU Yunfeng, HE Xuhui, CHEN Zhengqing, et al. Wind tunnel test and numerical simulation study on internal wind loading for super large cooling tower[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(5): 697-705.
- [9] KE S T, LIANG J, ZHAO L, et al. Influence of ventilation rate on the aerodynamic interference between two extra-large indirect dry cooling towers by CFD [J]. *Wind and Structures*, 2015, 20(3): 449-468.
- [10] Report of the COI into collapse of cooling towers at Ferrybridge: Monday 1 November 1965[R]. [S.1.]: Central Electricity Generating Board, 1966.
- [11] POPE R A. Structural deficiencies of natural draught cooling towers at UK power stations. Part 1: Failures at ferrybridge and fiddlers ferry[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1994, 104(1): 1-10.
- [12] 叶继红, 张志强, 王浩, 等. 地震、风、火灾调查与简析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. YE Jihong, ZHANG Zhiqiang, WANG Hao, et al. Investigation and analysis of earthquake, wind and fire disasters[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [13] KE S T, YU W, GE Y J, et al. The influence of internal ring beams on the internal pressure for large cooling towers with wind-thermal coupling effect [J]. *Wind and Structures*, 2019, 28(1): 1-17.
- [14] 董国朝, 张建仁, 蔡春声, 等. 侧风对超大型冷却塔内空气动力场的影响研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(2): 76-83. DONG Guochao, ZHANG Jianren, CAI Chunsheng, et al. Influence of crosswind on aerodynamic field in super large cooling tower [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2): 76-83.
- [15] 柯世堂, 杜凌云, 侯宪安. 考虑百叶窗透风率超大型冷却塔内吸力风振系数研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(8): 36-44. KE Shitang, DU Lingyun, HOU Xian'an. Research on influence of louver ventilation rates on internal wind vibration coefficient for super large cooling towers[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(8): 36-44.
- [16] 董国朝, 张建仁, 蔡春声, 等. 运行状态下超大型冷却塔内表面风荷载的数值模拟研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 17-23. DONG Guochao, ZHANG Jianren, CAI Chunsheng, et al. Numerical simulation of the internal surface wind load of super large cooling tower under operating conditions [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2015, 42(1): 17-23.
- [17] 建筑结构荷载规范: GB50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Load code for the design of building structures: GB50009—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [18] DI Z H, GONG W, GAN Y J, et al. Combinatorial optimization for WRF physical parameterization schemes: A case study of three-day typhoon simulations over the northwest pacific ocean[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(5): 1-23.
- [19] 周旋, 牛华伟, 陈政清, 等. 大型冷却塔风荷载干扰系数的取值方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10): 3637-3644. ZHOU Xuan, NIU Huawei, CHENG Zhengqing, et al. The method of determining the wind load interference coefficient of large cooling tower [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2014, 45(10): 3637-3644.