

风雨共同作用超大型冷却塔气动力和受力性能^{*}

柯世堂， 余文林

(南京航空航天大学土木工程系 南京,210016)

摘要 为定量评价雨荷载对超大型冷却塔气动力和风效应的影响,以国内某在建世界最高的 220 m 超大型双曲线间接空冷塔为例,基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, 简称 CFD)方法对冷却塔周围风场进行数值模拟,验证模拟结果的有效性后添加离散相模型(discrete phase model, 简称 DPM)进行雨强为 50mm/h 的暴雨模拟,系统分析了风雨共同作用下冷却塔表面流体绕流特性、风雨荷载特征值及平均压力系数的变化。在此基础上,采用有限元方法分析了风荷载和风雨荷载共同作用下超大型冷却塔风致稳定性和受力性能。研究表明:冷却塔表面所受总雨荷载占总风荷载的 6.71%,部分区域内雨压系数可达 0.07 以上,与风压系数的比值最高可以达到 26.98%;相比于风荷载,风雨荷载共同作用降低了冷却塔整体屈曲稳定和局部稳定性能,增大了塔筒、支柱和环基结构内力响应,屈曲位移最大增量达 10%,0°子午向轴力最大增量达 17.4%。该结论可为此类大型冷却塔结构抗风/雨荷载设计提供参考依据。

关键词 风雨共同作用; 超大型冷却塔; 计算流体动力学数值模拟; 有限元分析; 气动力; 受力性能

中图分类号 TU279.7⁺41; TU33⁺2

引 言

大型冷却塔是以承受风荷载为主的高耸空间薄壳结构^[1-2],暴风雨天气下,雨滴下落时同时受到重力和水平风力作用,此时雨滴以非常大的速度斜向击打在冷却塔表面,产生了不同方向与大小的雨荷载,风雨荷载共同作用对冷却塔安全及稳定性能产生显著影响^[3]。

对于风雨共同作用的研究,文献[4-5]对雨滴尺寸的分布及建筑物表面风驱雨量和风雨荷载进行了分析,对各种模拟风驱雨方法的优缺点进行了叙述。文献[6-8]基于数值模拟和现场实测的方法,分析了不同风向角、风速和降雨量对于低矮房屋风雨荷载效应的影响,研究表明强降雨在迎风面上产生的附加荷载最大可达风荷载的 25%~30%。文献[9-10]在数值模拟的基础上,采用有限元方法对结构在风雨共同作用下的响应及稳定性展开研究,结果表明强降雨对结构整体受力影响微弱,但对于局部变形及稳定性有一定影响。文献[11-12]基于风洞试验和现场实测的方法进行了斜拉索风雨激振响应特

性及机理分析的研究,得到了拉索的风压系数以及气动力系数,总结出拉索风雨振主要表现为主振模态和多阶模态参与的振动。现有成果给结构抗风雨设计提供了思路和方法,但鲜有涉及风雨共同作用下大型冷却塔结构气动力和受力性能研究。

笔者以西北地区某在建超大型冷却塔(高为 220 m)为工程背景,首先,基于 CFD 方法对冷却塔周围风场进行数值模拟,验证模拟结果的有效性;然后,添加离散相模型进行强降雨的模拟,并分析风雨共同作用下冷却塔表面流体绕流特性、风雨荷载特征值及平均压力系数的变化。在此基础上,采用有限元方法对比分析了风荷载和风雨荷载共同作用下超大型冷却塔风致稳定性及受力性能;最后,总结归纳出雨荷载对冷却塔结构气动力和受力性能的影响规律。

1 工程概况

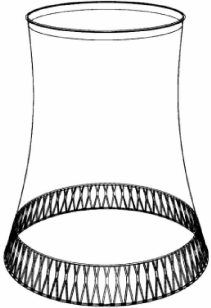
该在建超大型钢筋混凝土双曲线自然通风间接空冷塔,塔高为 220 m,喉部标高为 165 m,进风口标高为 30.5 m,塔顶中面直径为 128.1 m,喉部中面直

^{*} 国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究资助项目(51761165022);国家自然科学基金资助项目(51208254, U1733129);江苏省优秀青年基金资助项目(BK20160083);中国博士后科学基金资助项目(2013M530255,1202006B);江苏省六大人才高峰层次人才计划资助项目(JZ-026);江苏高校青蓝工程资助项目
收稿日期:2017-03-15;修回日期:2017-08-15

径为 123 m,底部直径为 185 m。冷却塔风筒壳体采用指数变厚,最小厚度位于喉部断面,壁厚为0.38 m,最大壁厚在下环梁位置,壁厚为 1.85 m。塔筒由 64 对 X 型支柱支撑且与环板基础连接,X 型柱采用矩形截面,尺寸为 1.7 m×1.0 m。环板基础为现浇钢筋

混凝土结构,宽为 10.5 m,高为 2.2 m。
考虑到冷却塔百叶窗的常规工作状态,按 30% 透风率考虑百叶窗开启效应。不同透风率的百叶窗开启状态对冷却塔周围流场的影响详见文献[13]。表 1 为该工程冷却塔的主要结构尺寸及示意图。

表 1 超大型冷却塔主要结构尺寸及示意图

Tab. 1 Size characteristics of main components and sketch map for super large cooling tower					
结构	标高/m	中面半径/m	塔筒壁厚/m	混凝土等级	示意图
塔筒	30.50	82.77	1.85	C ₄₀	
	77.13	71.43	0.49		
	124.48	63.68	0.42		
	148.40	61.87	0.39		
	165.00	61.50	0.38		
	196.37	62.62	0.39		
	218.83	64.05	0.66		
支柱	64 对矩形截面 1.7 m×1.0 m 的 X 型柱			C ₄₅	
环基	宽为 10.5 m,高为 2.2 m			C ₃₅	

2 数值模拟

2.1 风场模拟

为同时保证冷却塔处于降雨区和尾流充分发展,计算域尺寸设置为顺风向 30*D*×横风向 10*D*×竖向 3*H*,其中:*D* 为冷却塔零米直径;*H* 为塔高,计算模型中心距离计算域入口为 3 500 m,模型最大堵塞度不超过 3%。为了兼顾计算效率和精度,将整个计算域划分为外围区域和局部加密区域。形状规整的外围区域采用高质量的结构化网格进行划分,内含冷却塔模型的局部加密区域采用非结构化网格进行划分。核心区最小网格尺寸为 0.2 m,整体模型总网格数量超过 1 500 万且网格最小正交质量大于 0.40(要求大于 0.1 以上,杜绝出现负体积^[14]),网格数目及质量均满足计算要求。

图 1 为计算域网格划分和边界条件示意图,定义计算域左侧和顶部边界条件为速度入口,右侧为压力出口。如图 2 所示,按照 B 类地貌设置大气边界层指数风剖面 and 湍流度剖面,将模拟的脉动风谱进行拟合,并与 Davenport 谱、Harris 谱及 Karman 谱进行比较,可认为该风场模拟的脉动风谱满足工程要求。其中,地面粗糙度指数为 0.15,50 年重现期 10m 参考高度处的基本风速为 28.3 m/s,并通过用户自定义函数(user defined function,简称 UDF)定义上述脉动风场。侧面采用等效于自由滑移壁面的对称边界条件,地面以及冷却塔表面采用

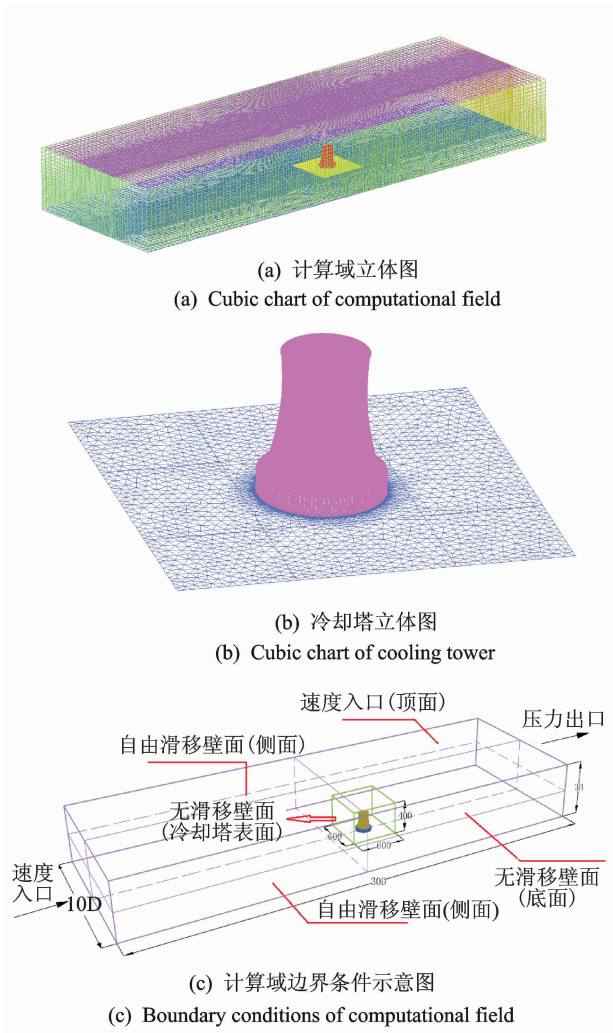


图 1 计算域网格划分及边界条件示意图

Fig. 1 Sketch maps of mesh generation and boundary conditions of computational field

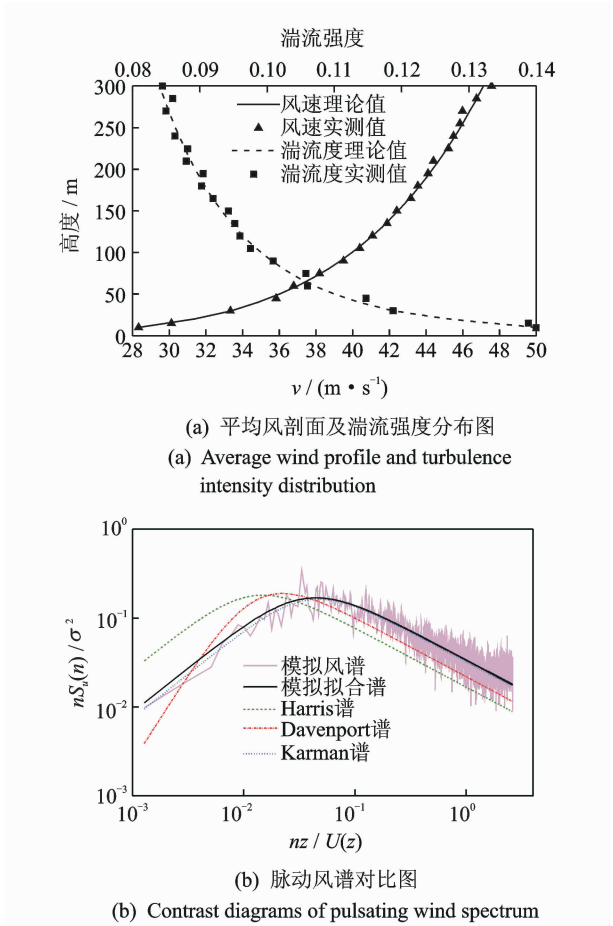


图 2 B 类风场模拟结果示意图

Fig. 2 Result diagrams of wind field simulation for class B

无滑移壁面。选用 $k-\omega$ /SST 湍流模型进行模拟时启用了(增强)壁面函数模型,其中壁面 y^+ 值为 39.6,可保证底层网格对数分布律成立,符合常见计算和工程要求。

数值计算采用 3D 单精度、分离式求解器,空气风场选用不可压缩流场,压力速度耦合方程组求解采用 SIMPLEC 格式,对流项求解格式为二阶,计算过程中设置了网格倾斜校正以提高混合网格计算效果,控制方程的计算残差设置为 1×10^{-6} 。

为了验证风场模拟的有效性,图 3 为冷却塔喉部断面平均风压系数与规范^[15-16]及实测曲线^[17]对比示意图。分析可知,冷却塔喉部断面平均风压分布曲线的负压极值点和分离点对应角度与规范和西热曲线一致,迎风和背风区域风压系数数值吻合较好,侧风区负压略大于规范值,与西热曲线基本吻合。

2.2 风雨场模拟

作为降雨重要特征的降雨强度是指单位时段内

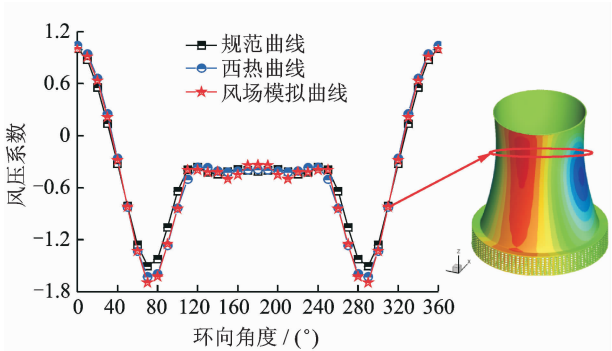


图 3 冷却塔喉部断面风场数值模拟结果与规范及实测曲线对比示意图

Fig. 3 Contrast diagrams among numerical simulation, code and actual measurement result

的降雨量,按每小时降雨量作为降雨等级划分标准,如表 2 所示^[18-19]。考虑内陆地区常见的暴雨情形,取降雨强度为 50 mm/h。

表 2 降雨强度等级划分
Tab. 2 The class of rain intensity

降雨量 等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨			
					弱	中	强	极值
降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	2.5	8	16	32	64	100	200	709.2

直径较小的雨滴可以看作是球体,当雨滴直径大到一定程度时,空气阻力超过了使雨滴保持整体的分子凝聚力,大雨滴便分裂成了小雨滴,因而天然降雨的雨滴直径一般保持在 0.1~6.0 mm 范围内。依据现有观测结果^[19],采用 1.0~6.0 mm 范围内的 10 种直径的雨滴来模拟连续雨滴分布的降雨,且雨滴分布一般服从马歇尔-帕尔默谱分布(Marshall-Palmer,简称 M-P 谱)

$$n(d) = N_0 \exp(-\Delta d) \tag{1}$$

其中: $n(d)$ 是直径为 d 的雨滴数量; $N_0 = 8 \times 10^3 / (\text{m}^3 \cdot \text{mm})$; $\Delta = 4.1 I^{-0.21}$; I 为降雨强度(mm/h)。

雨滴与结构的碰撞是一个动量守恒的过程,其速度在与结构碰撞的极短时间内变为零。笔者主要研究雨滴对冷却塔的水平作用,假定雨滴在碰撞前的水平末速度为 V_x ,质量为 m ,碰撞时间为 $\tau = d / 2V_x$,且碰撞过程中不发生蒸发、飞溅和破裂,根据动量定理可求得雨滴对冷却塔的水平撞击力为

$$F(\tau) = \frac{mV_x}{\tau} = \frac{1}{3} \rho_w \pi d^2 V_x^2 \tag{2}$$

进行风雨场模拟时,首先,计算风场达到收敛并分析得到风压结果;其次,在流场上方喷射雨滴确定风驱雨的运动轨迹,记录撞击冷却塔壁面时的基本

信息;最后,根据式(2)计算雨荷载。基于 50 mm/h 的雨强及相应计算公式确定空气中浮动的雨滴数量、雨层间隔和竖向末速度,最终确定每层雨间隔时间步长^[7]为 0.01 s。

图 4 为风雨共同作用下雨滴的运动轨迹。为清晰反映雨滴的运动轨迹,已对雨滴密集程度进行了稀释化处理,仅展示出实际雨滴数量的 1%。可见,雨滴运动轨迹受风荷载影响显著,均以一定斜向速度击打在冷却塔壁面,冷却塔两侧出现局部速度增益区,且冷却塔近壁面雨滴运动形式复杂,大量雨滴随风向冷却塔两侧分离,而背风区的雨滴因受尾流回旋的影响呈现出不同尺度的回流,同时伴随着少量雨滴击打在冷却塔背风面,此时雨滴速度出现负值,最大可达 20 m/s 左右。

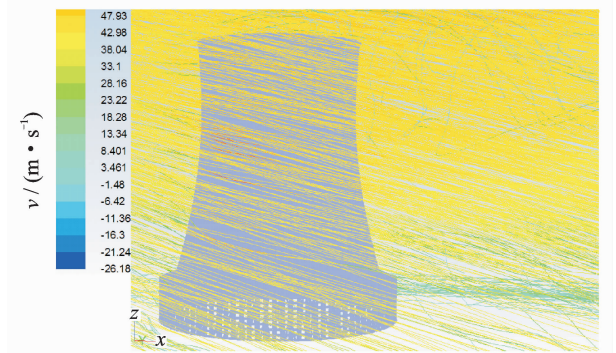


图 4 雨滴运动轨迹及 x 方向速度(单位: m/s)

Fig. 4 Motion track and x -velocity of raindrops (unit: m/s)

图 5 为冷却塔表面雨滴及雨荷载三维分布示意图。分析发现:a. 强降雨天气下雨滴主要分布在冷却塔迎风面附近,在背风面以及侧面数量显著减少;b. 由于展宽平台平行于地面,有大量雨滴击打在迎风向展宽平台表面;c. 迎风面和背风面区域单滴雨荷载较小,侧面单滴雨荷载较大且在塔底附近更为显著,最大可达到 70 N 左右。

根据式(2)计算平均水平雨荷载,并将冷却塔受到的雨荷载和风荷载作为对比,如表 3 所示。可见,冷却塔受顺风向雨荷载为 2 169 kN,逆风向雨荷载为 1.9 kN,约占顺风向雨荷载的 0.1%;冷却塔表面总雨荷载为 2 167 kN,占总风荷载的 6.71%,影响不可小视。

表 3 风雨荷载特征值表				
Tab. 3 Summary table of wind and rain load				kN
荷载类型	雨荷载	雨荷载	总雨荷载	总风荷载
数值	2 169	1.9	2 167	32 310

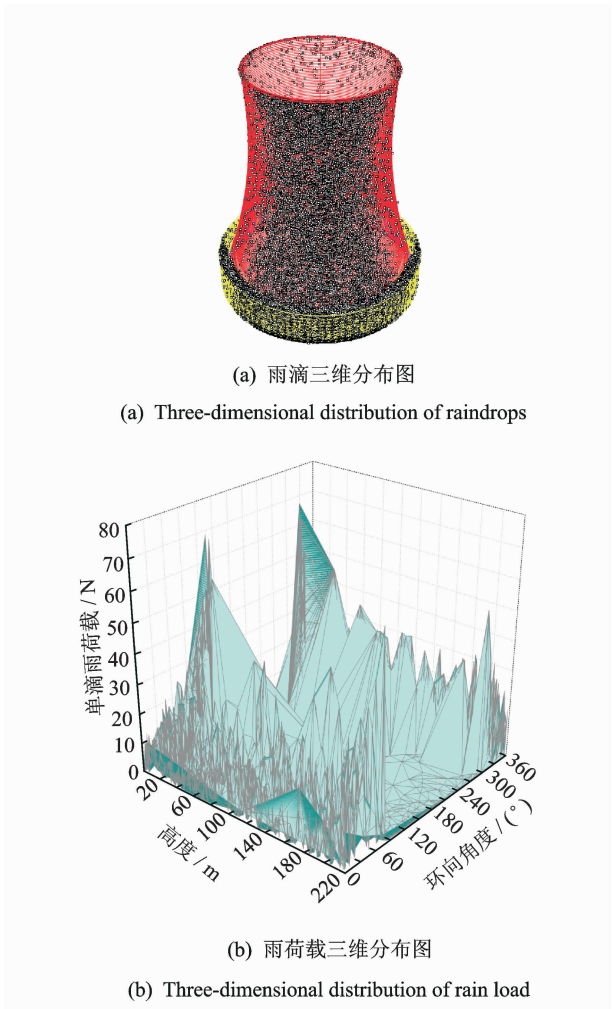


图 5 冷却塔表面雨滴及雨荷载三维分布示意图

Fig. 5 Three-dimensional distribution of raindrop and rain load on the surface of cooling tower

为方便比较风雨荷载的数值特性以及探究雨荷载对冷却塔平均压力系数的影响,给出雨压系数定义,将测点雨荷载转化成雨压,求出测点雨压与参考高度处风压的比值即为雨压系数,为方便计算,参考高度取为塔顶高度。图 6 为冷却塔喉部断面风压系数与雨压系数曲线对比示意图。分析发现:a. 风、雨压系数沿环向基本对称,雨压系数数值较小,均在 0~0.1 范围内;b. 雨压系数主要在迎风面两侧各 40°范围内分布,在其他区域数值几乎为 0,说明强风作用下雨滴击打区主要集中在迎风面附近区域,只有少量雨滴落在背风面区域;c. 将风、雨压力系数进行叠加,得到冷却塔总压力系数,发现总压力系数与风压系数基本吻合,但在部分区域雨压系数可达到 0.07 以上,与风压系数比值最高可达 26.98%,表明强降雨对冷却塔表面压力系数具有一定影响。

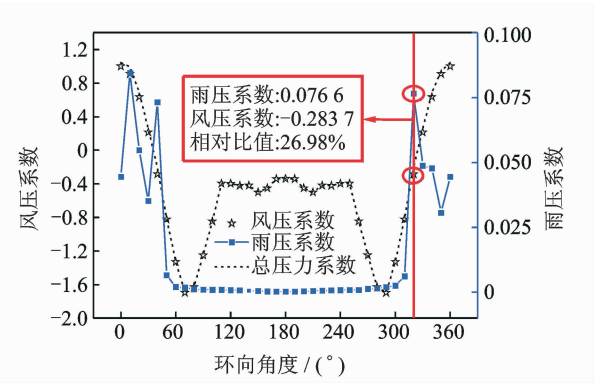


图 6 冷却塔喉部断面风压系数与雨压系数曲线对比示意图

Fig. 6 Contrast diagrams between wind and rain pressure coefficients on throat section of cooling tower

表 4 冷却塔前 10 阶固有频率和振型列表

Tab. 4 First 10 order natural frequency and vibration modes of cooling tower

阶数	1,2	3,4	5,6	7,8	9,10
固有频率/Hz	0.529	0.567	0.585	0.667	0.757
振型					

有明显的三维特征,同时伴随有子午向和环向的振动变形。

3.2 稳定性分析

3.2.1 屈曲稳定性

表 5 为冷却塔在风荷载和风雨荷载共同作用下的屈曲模态及特征值列表。可见:a.两种荷载作用下临界风速均大于设计风速,满足设计要求;b.冷却塔屈曲部位均位于塔筒中下部,且最大位移超过 1 m;c.相比于风荷载,风雨荷载共同作用对冷却塔屈曲稳定性略有不利,屈曲系数和临界风速均有所减低,且最大位移增加 10%左右。

3.2.2 局部稳定性

根据《工业循环水冷却设计规范》^[14],冷却塔的局部稳定性为

$$0.8K_B\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}}+\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}}\right)+0.2K_B^2\left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}}\right)^2\right]=1$$

(3)

3 有限元分析

3.1 有限元建模及动力特性分析

基于大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立冷却塔结构有限元模型,塔筒采用 Shell63 单元,环基及与环基连接的 64 对 X 字型柱均采用 Beam188 单元模拟,采用 Block Lanczos 方法求解冷却塔自振频率和振型^[20-21]。表 4 为冷却塔前 10 阶自振频率分布曲线和振型图。可见,冷却塔具有轴对称性,其奇数阶和偶数阶频率基本一致;冷却塔自振频率小,其基频仅为 0.529 Hz,前 10 阶频率均在 0.8 Hz 以下,结构自振频率低且分布密集;结构振型复杂且具

$$\sigma_{cr1}=\frac{0.985E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}}\left(\frac{h}{r_0}\right)^{4/3}K_1$$

(4)

$$\sigma_{cr2}=\frac{0.612E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}}\left(\frac{h}{r_0}\right)^{4/3}K_2$$

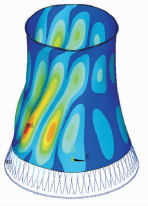
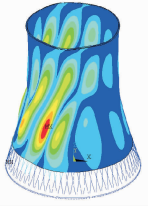
(5)

其中: σ_1 和 σ_2 为不同荷载组合工况下的环向和子午向压应力; σ_{cr1} 为环向临界压力; σ_{cr2} 为子午向临界压力; h 和 r_0 分别为塔筒喉部壁厚与半径; E 和 ν 分别为壳体混凝土的弹性模量和泊松比; K_1,K_2 可以根据塔筒几何参数插值得到,这里冷却塔取 $K_1=0.232\ 3,K_2=1.250\ 6;K_B$ 为局部稳定因子,规范要求需大于 5.0。

为对比冷却塔在风荷载和风雨荷载共同作用下局部稳定性特征,图 7 为两种荷载工况下冷却塔层最小局部稳定因子随高度变化曲线。可见:两种荷载工况下最小局部稳定因子均大于规范规定的最小值 5.0,满足局部稳定安全要求;两种荷载工况下冷却塔层最小局部稳定因子随高度变化规律一致,整体上均随高度的增加先减小后增大,最小值均在塔

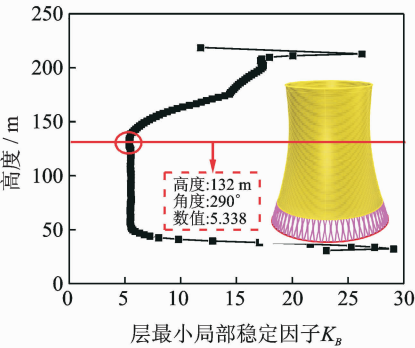
表 5 两种荷载工况下冷却塔屈曲模态及特征值列表

Tab. 5 Modal and buckling eigenvalues of cooling tower under two kinds of loads

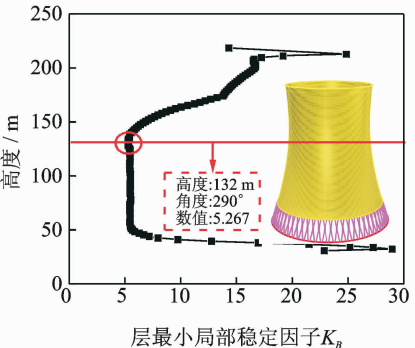
风荷载屈曲特征值		风荷载屈曲模态	风雨荷载屈曲模态	风雨荷载屈曲特征值	
屈曲系数	7.573			屈曲系数	7.473
临界风速/(m·s ⁻¹)	77.879			临界风速/(m·s ⁻¹)	77.363
最大位移/m	1.215			最大位移/m	1.325

筒 132 m 高且环向 290°处;相比于风荷载,风雨荷载共同作用对冷却塔局部稳定性略有不利,最小局部稳定因子为 5.267,降低约 2%。

午线左右,最大负值出现于迎风面 0°子午线上;b. 冷却塔在 0°和 70°子午线上均随着高度的增加先增大后减小,且至喉部达到最大;c. 风荷载作用下,塔筒径向位移最大正值和负值分别为 0.080 m 和 -0.091 m,雨荷载的叠加使其分别增加约 2%和 1.5%。



(a) 风荷载作用
(a) Wind action



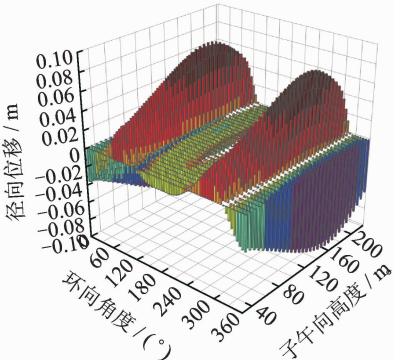
(b) 风雨荷载共同作用
(b) Simultaneous action of wind and rain loads

图 7 两种荷载工况下冷却塔层最小局部稳定因子对比
Fig. 7 Contrast of layer minimum local stability stable factors of cooling tower under two kinds of loads

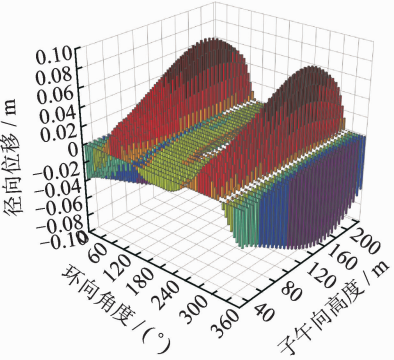
3.3 结构响应分析

3.3.1 塔筒响应

图 8 为冷却塔在风荷载和风雨荷载共同作用下的塔筒径向位移对比示意图。正值表示位移由冷却塔中心轴指向外侧,0°子午线为正迎风方向。可见:a. 两种荷载工况下冷却塔塔筒径向位移分布规律一致,均沿迎风面对称,且最大正值出现在侧风面 70°子



(a) 风荷载作用
(a) Wind action



(b) 风雨荷载共同作用
(b) Simultaneous action of wind and rain loads

图 8 两种荷载工况下冷却塔塔筒径向位移对比
Fig. 8 Contrast of radial displacement of cooling tower drum under two kinds of loads

图 9 为冷却塔在风荷载和风雨荷载共同作用下塔筒子午向轴力对比示意图。由图可知:a. 两种荷载工况下塔筒子午向轴力分布规律基本一致,均沿迎风面对称,且最大正值出现在塔筒迎风面 0°子午

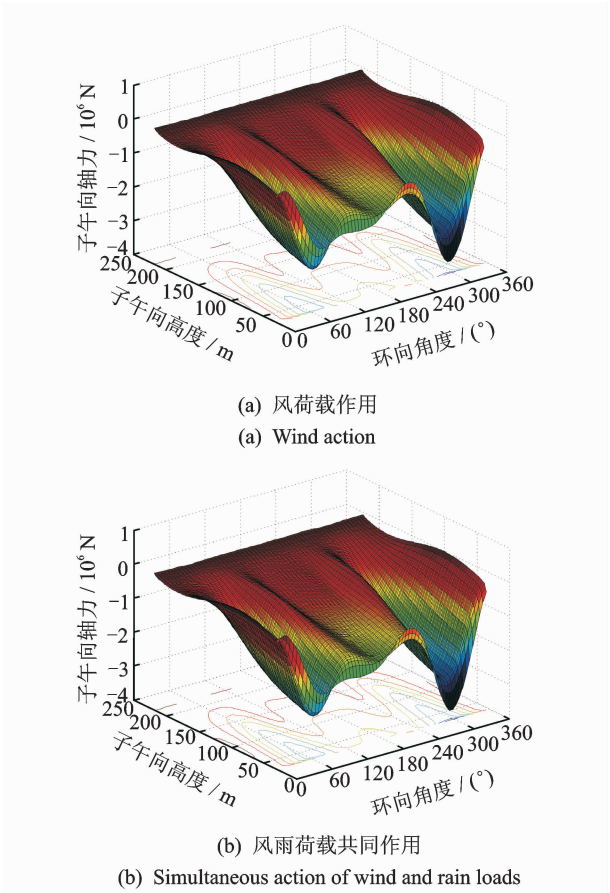


图 9 两种荷载工况下冷却塔塔筒子午向轴力对比
Fig. 9 Contrast of meridian axial force of cooling tower drum under two kinds of loads

表 6 两种荷载工况下冷却塔塔筒各内力极值及其发生角度列表

极值类别	风荷载				风雨荷载共同作用			
	环向轴力/kN	子午向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	子午向弯矩/(kN·m)	环向轴力/kN	子午向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	子午向弯矩/(kN·m)
最大正值	747	80	321	252	761	93	323	255
数值角度/(°)	68	0	73	276	68	0	73	276
最大负值	-2 859	-3 651	-269	-15	-2 867	-3 702	-272	16
数值角度/(°)	107	298	0	259	107	298	0	259

表 7 两种荷载工况下冷却塔支柱各内力极值及其发生角度列表

名称	风荷载				风雨荷载共同作用			
	轴力/kN	径向剪力/kN	径向弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)	轴力/kN	径向剪力/kN	径向弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)
极值	-15 574	-98	958	96	-15 778	-99	971	99
数值角度/(°)	287	309	0	304	287	309	0	304

3.3.3 环基响应

表 8 和图 11 分别为风荷载和风雨荷载共同作用下冷却塔环基最大位移列表和位移对比示意图。分析得到两种荷载工况下冷却塔环基位移分布规律

线上,最大负值出现在侧风面 70°子午线左右;b. 随着高度的增大,两种工况塔筒的子午向轴力随环向角度的变化幅度均显著减小,且在塔顶数值基本一致;c. 风荷载作用下,塔筒子午向轴力最大正值和负值分别为 79.604 kN 和-3650.51 kN,雨荷载的叠加使其分别增加约 17.4%和 1.5%,对应角度为别为 0°和 300°左右,可见雨荷载对迎风区域子午向轴力影响显著。

表 6 为风荷载和风雨荷载共同作用下冷却塔塔筒各内力极值及其发生角度列表。对比发现,相比于风荷载,雨荷载的叠加均增大了塔筒各内力极值,但增幅各有不同,其中,0°子午向轴力增幅显著,最大可达 17.4%,其他内力增幅较小。

3.3.2 支柱响应

表 7 为两种荷载工况下冷却塔支柱各内力极值及其发生角度。图 10 为冷却塔在风荷载和风雨荷载共同作用下支柱右上端的轴力、径向剪力、径向弯矩及扭矩对比示意图。由图表对比可知:a. 两种荷载工况下冷却塔支柱各内力分布规律基本一致,且沿环向均无对称性;b. 4 种内力极值主要分布在迎风面 0°子午线和侧风面 300°子午线左右,其中径向弯矩极值分布在迎风面 0°子午线上,其他 3 种内力极值分布在侧风面 300°子午线左右;c. 相比于风荷载,雨荷载的叠加使支柱各内力均有所增大,增幅分别为轴力1.3%、径向剪力 1%、径向弯矩 1.4%和扭矩 3.1%。

一致,且径向位移和竖向位移沿环向对称,而环向位移沿环向不对称。相比于风荷载,雨荷载的叠加使环基各位移均有所增大,增幅分别为径向位移 2.4%、环向位移 3.2%和竖向位移 1%。

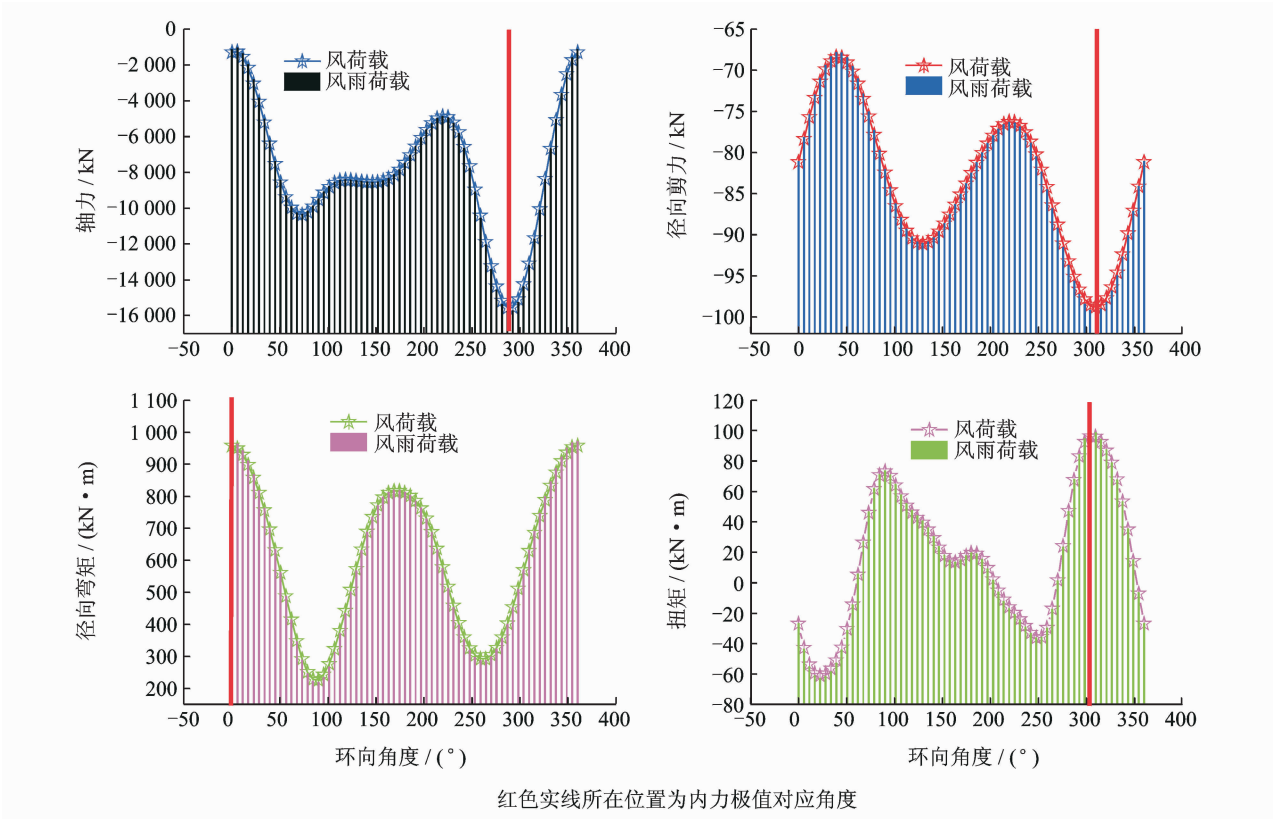


图 10 两种荷载工况下冷却塔支柱各内力对比

Fig. 10 Contrast of internal forces of cooling tower pillars under two kinds of loads

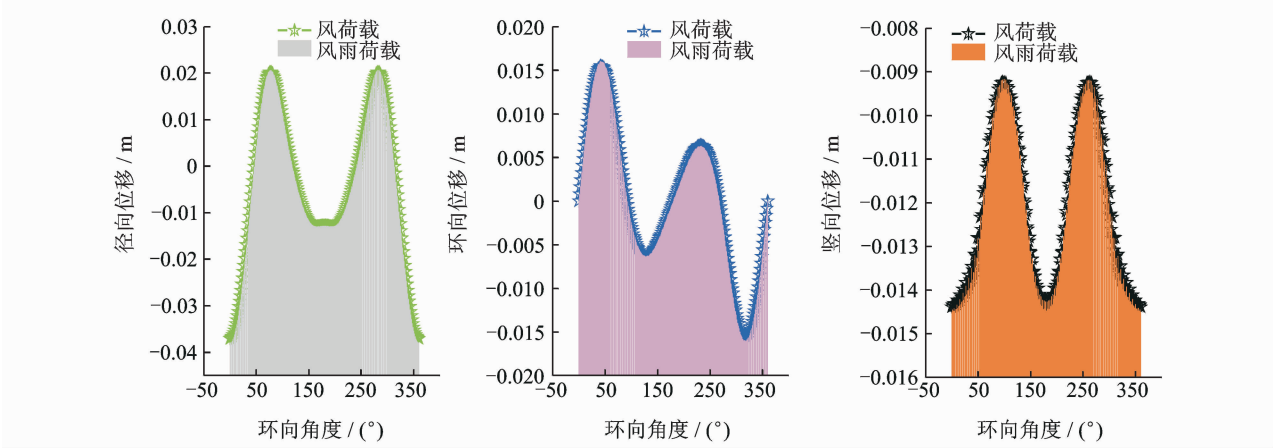


图 11 两种荷载工况下冷却塔环基位移对比

Fig. 11 Contrast of cooling tower base displacement under two kinds of loads

表 8 两种荷载工况下冷却塔环基最大位移列表			
Tab. 8 Maximum displacement of cooling tower base under two kinds of loads			
位移类别	风荷载	风雨荷载	增大幅值/%
径向位移/m	-0.037 0	-0.037 9	2.4
环向位移/m	0.015 5	0.016 0	3.2
竖向位移/m	-0.014 4	-0.014 5	1.0

图 12 为风荷载和风雨荷载共同作用下冷却塔环基轴力和径向弯矩对比曲线。分析发现:a. 两种荷载工况下冷却塔环基轴力和径向弯矩分布规律一致,且轴力和径向弯矩均沿环向角度对称;b. 风荷载作用下冷却塔最大环基轴力和径向弯矩分别为 27 640 kN 和 15 666 kN·m,对应角度均在侧风面 295°子午线左右;c. 相比于风荷载,雨荷载的叠加使环基轴力和径向弯矩均有所增大,增幅分别为轴力 0.5%和径向弯矩 1.5%。

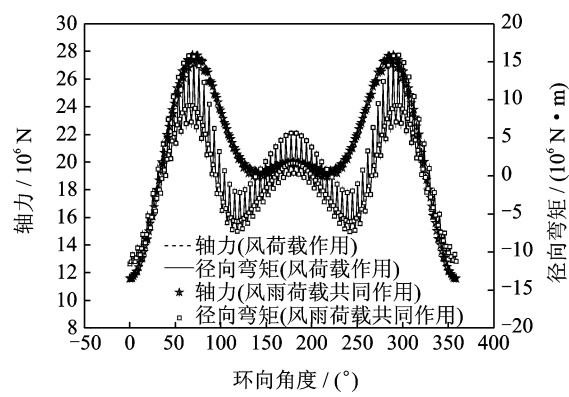


图 12 两种荷载工况下冷却塔环基内力对比
Fig. 12 Contrast of internal force of cooling tower base under two kinds of loads

4 结 论

1) 基于 CFD 方法对超大型冷却塔进行风场和风雨场数值模拟,并将计算结果与规范、国内外现有实测结果以及相关研究成果进行对比,验证了风雨共同作用数值模拟的有效性。

2) 冷却塔背风区雨滴因受尾流回旋的影响呈现出不同尺度的回流以及相应的速度负值,逆风向雨荷载约占顺风向雨荷载的 0.1%,但总雨荷载占总风荷载的 6.71%,同时塔筒部分区域雨压系数达到 0.07 以上,与风压系数比值最高可达 26.98%。

3) 相比于风荷载,风雨荷载共同作用对冷却塔整体屈曲稳定和局部稳定均略有不利,其中,屈曲系数和临界风速均有所减低,且最大屈曲位移增量达 10%左右,最小局部稳定因子降低约 2%。

4) 雨荷载的叠加对冷却塔各部位的影响程度为塔筒>环基>支柱,其中,塔筒 0°子午向轴力最大增量达 17.4%,环基环向位移最大增量为 3.2%,支柱扭矩最大增量为 3.1%。

5) 综上所述,考虑风雨共同作用对于此类大型冷却塔迎风面两侧 40°区域压力系数影响不能忽略;大型冷却塔局部稳定计算中可以不予考虑雨荷载的影响,但整体屈曲稳定计算时不可忽略;雨荷载对冷却塔支柱和环基影响较小,可忽略不计,但塔筒迎风面区域子午向轴力计算时建议考虑雨荷载效应。

6) 本研究仅是针对冷却塔在风驱雨单项作用下的气动和受力性能初探,后续会基于现场实测^[22-23]和风-雨双向耦合^[24]手段,进一步展开风-雨耦合作用下此类大型冷却塔结构气动和流场机理的

精细化研究。

参 考 文 献

[1] Ke Shitang, Ge Yaojun. The influence of self-excited forces on wind loads and wind effects for super-large cooling towers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014,132(5):125-135.

[2] 柯世堂,葛耀君,赵林,等. 大型冷却塔结构的等效静力风荷载[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(8): 1132-1137.

Ke Shitang, Ge Yaojun, Zhao Lin, et al. The equivalent static wind load of large cooling tower structure [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2011, 39(8): 1132-1137. (in Chinese)

[3] Choi E C C. Simulation of wind-driven-rain around a building [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1993, 46(52): 721-729.

[4] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1948, 5(4): 165-166.

[5] Blockena B, Carmeliet J. A review of wind-driven rain research in building science [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1079-1130.

[6] 于森. 低矮建筑风雨作用效应的数值与实测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.

[7] 陈博文. 低矮房屋表面风雨压力 CFD 数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.

[8] 吴小平. 低层房屋风雨作用效应的数值研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.

[9] 李宏男,白海峰. 输电塔线体系的风(雨)致振动响应与稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 31-38.

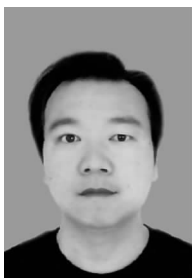
Li Hongnan, Bai Haifeng. Transmission line tower system of wind (rain) vibration response and stability study [J]. Journal of Civil Engineering, 2008, 41 (11): 31-38. (in Chinese)

[10] 高乾丰,董辉,邓宗伟,等. 大型风力机风雨结构三场耦合分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2016, 47(3): 1011-1016.

Gao Qianfeng, Dong Hui, Deng Zongwei, et al. Large wind turbine wind structure in three coupling analysis [J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2016, 47(3): 1011-1016. (in Chinese)

[11] 胡建华,王修勇,陈政清,等. 斜拉索风雨振响应特性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 41-48.

- Hu Jianhua, Wang Xiuyong, Chen Zhengqing, et al. Wind cable vibration response characteristics [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 41-48. (in Chinese)
- [12] 顾明, 李寿英, 杜晓庆. 斜拉桥拉索风雨激振理论模型和机理研究[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(2): 169-174.
- Gu Ming, Li Shouying, Du Xiaoqing. Cable-stayed bridge cable vibration theory model and mechanism study [J]. Journal of Air Dynamics, 2007, 25(2): 169-174. (in Chinese)
- [13] Ke Shitang, Liang Jun, Zhao Lin, et al. Influence of ventilation rate on the aerodynamic interference for two IDCTs by CFD [J]. Wind and Structures, An International Journal, 2015, 20(3): 449-468.
- [14] 江帆. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 80-87.
- [15] DL/T5339-2006 火力发电厂水工设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [16] GB/T50102-2014 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [17] 孙天凤, 周良茂. 无肋双曲线型冷却塔风压分布的全尺寸测量和风洞研究[J]. 空气动力学学报, 1983, 12(4): 12-17.
- Sun Tianfeng, Zhou Liangmao. Without ribs the elliptic wind pressure distribution of the cooling tower full size measurement and wind tunnel study [J]. Journal of Air Dynamics, 1983, 12(4): 12-17. (in Chinese)
- [18] 吕宏兴, 武春龙. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 水土保持学报, 1997, 3(2): 14-21.
- Lü Hongxing, Wu Chunlong. Raindrops falling velocity of numerical simulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 3(2): 14-21. (in Chinese)
- [19] 杨俊涛, 楼文娟. 风驱雨 CFD 模拟及平均雨荷载计算方法研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 600-606.
- Yang Juntao, Lou Wenjuan. The wind drive rain CFD simulation and average rain load calculation method research [J]. Journal of Air Dynamics, 2011, 29(5): 600-606. (in Chinese)
- [20] 柯世堂, 朱鹏. 基于大涡模拟增设气动措施冷却塔风荷载频域特性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2016, 50(11): 2143-2149.
- Ke Shitang, Zhu Peng. Large eddy simulation of additional aerodynamic measures of cooling tower wind load characteristics based on frequency domain [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2016, 50(11): 2143-2149. (in Chinese)
- [21] 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: 自激力效应[J]. 土木工程学报. 2012, 45(12): 45-53.
- Ke Shitang, Hou Xianan, Zhao Lin, et al. Super large cooling tower wind load and wind vibration response parameters analysis: effect of self-excited force [J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 45(12): 45-53. (in Chinese)
- [22] 王浩. 大跨度悬索桥抖振数值模拟与现场实测: 平稳分析[M]. 南京:东南大学出版社, 2015: 74-91.
- [23] 王浩, 李爱群, 谢静, 等. 台风作用下超大跨度斜拉桥抖振响应现场实测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 71-78.
- Wang Hao, Li Aiqun, Xie Jing, et al. Under the action of typhoon of large span cable-stayed bridge buffeting response of in-situ test study [J]. Journal of Civil Engineering, 2010, 43(7): 71-78. (in Chinese)
- [24] 毕继红, 王剑, 邵倩, 等. 风雨激振时水膜形态与拉索振动间的双向耦合[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 54-60.
- Bi Jihong, Wang Jian, Shao Qian, et al. When the wind and rain vibration water film form the two-way coupling between cable vibration [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 54-60. (in Chinese)



第一作者简介:柯世堂,男,1982年11月生,博士、副教授。主要研究方向为结构抗风与抗震。曾发表《Aerodynamic loads and aeroelastic responses of WT tower-blade system in yaw condition》(《Structural Engineering and Mechanics》2015, Vol. 56, No. 6)等论文。
E-mail: keshitang@163.com

