

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.05.020

风-雨耦合环境超高层三塔连体建筑雨压分布研究

王晓海, 柯世堂, 赵永发, 员亦雯, 刘田田

(南京航空航天大学民航学院/飞行学院, 南京, 211106)

摘要:以中国东南沿海某超高层三塔连体建筑为研究对象,以风-雨双向耦合算法为核心,基于计算流体力学技术采用连续相和离散相模型进行风场和雨场的迭代模拟。首先基于9种风雨组合工况进行三塔连体建筑非定常脉动风场模拟,探讨超高层三塔连体建筑平均风压分布、表面速度流线和流场干扰机理。然后对比研究不同风雨组合工况下主塔表面雨滴附着数量、雨滴冲击力和雨压系数的分布规律,揭示风-雨耦合场中结构表面速度流线、雨滴运行轨迹和最终速度的作用机理。最后提炼出超高层三塔连体建筑最不利风-雨组合工况,并给出对应的雨压系数取值建议。研究表明:风-雨耦合环境下超高层连体建筑迎风面雨荷载作用最为显著,此时雨荷载与风荷载最大比值可达23.81%,局部测点最大雨压系数达到0.301,100 a重现期风速和强大暴雨组合为风-雨耦合作用的最不利组合工况。

关键词:超高层三塔连体建筑;风-雨耦合作用;CFD数值模拟;气动力分布;雨压分布

中图分类号:TU279.741 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2020)05-0825-10

Rain Pressure Distribution of Three-Tower Connected Tall Buildings with Wind-Rain Coupled Environment

WANG Xiaohai, KE Shitang, ZHAO Yongfa, YUN Yiwen, LIU Tiantian

(College of Civil Aviation/College of Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: An iterative simulation on wind field and rain field in one three-tower connected tall buildings in southeast coastal region in China was carried out based on the computational fluid dynamic technology. In the iterative simulation, the wind-rain two-way coupled algorithm was viewed as the core and the continuous phase model and discrete phase model were used. Firstly, the nonsteady fluctuating wind fields in connected buildings were simulated under 9 wind-rain working conditions. The average wind pressure distribution, the surface velocity streamline, and the flow field disturbance mechanism of the three-tower connected tall buildings were discussed. Secondly, the number of raindrops on the principal tower surface, impact force of raindrops, and distribution law of rain pressure coefficient at different wind-rain working conditions were compared. The structural surface velocity streamline, raindrop travelling path and action mechanism of the final velocity in the wind-rain coupled field were disclosed. Finally, the most unfavorable wind-rain working condition for the three-tower connected tall buildings was recognized. The recommended values of the rain pressure coefficient were given. The results demonstrated that the rain load on the windward surface of the

基金项目:国家自然科学基金(51761165022,U1733129)资助项目;江苏省六大人才高峰高层次计划(JZ-026)资助项目;江苏高校“青蓝工程”资助项目。

收稿日期:2019-02-22;**修订日期:**2020-04-30

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:王晓海,柯世堂,赵永发,等.风-雨耦合环境超高层三塔连体建筑雨压分布研究[J].南京航空航天大学学报,2020,52(5):825-834. WANG Xiaohai, KE Shitang, ZHAO Yongfa, et al. Rain pressure distribution of three-tower connected tall buildings with wind-rain coupled environment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(5):825-834.

three-tower connected tall buildings in the wind-rain coupled environment was the most significant. The maximum rain-to-wind load ratio reached 23.81% and the maximum rain pressure coefficient at local measuring points reached 0.301. The wind velocity and strong rainstorm combination was the most unfavorable wind-rain working condition in the 100-year recurrence interval.

Key words: three-tower connected tall buildings; wind-rain coupled effect; CFD numerical simulation; aerodynamic distribution; rain pressure distribution

相较于单体超高层建筑,超高层多塔连体建筑的相互干扰效应导致其表面风荷载分布及流场作用机理更加复杂^[1-2]。尤其在极端天气条件下,超高层建筑外表面遭受强风和暴雨的共同作用,此时雨滴在重力及风力的驱动下以较大的斜向速度撞击到建筑物表面,使结构表面气动力分布发生明显变化,对超高层建筑幕墙等覆面结构及整体设计产生不利影响^[3]。同时,雨滴在风场中的无规则运动会显著影响脉动风的湍流效应,使得超高多塔连体建筑周围的脉动风场更加复杂,进而影响雨滴的运动轨迹、附加作用力及结构表面风荷载分布。因此,研究风-雨耦合环境下超高层多塔连体建筑气动力分布及干扰效应具有重要的理论意义和工程价值。

超高层建筑风致干扰效应属于结构风工程的传统研究方向,已有研究主要集中在多个单体建筑之间的静力风荷载干扰^[4-5]、动力风荷载干扰^[6]、干扰因子的选取标准^[7]、风致效应干扰^[8-9]等。此外,针对多塔连体建筑,文献[10-12]对超高层两塔连体建筑的风荷载、干扰因子和风致响应进行了系统探讨,结果认为双塔结构干扰效应主要表现为遮挡效应和狭管效应,干扰效应使得主塔结构的整体体型系数明显小于单个建筑,并获得用于指导一般性对称双塔结构设计整体体型系数和极值风压,已有研究成果为超高层双塔建筑的抗风设计提供了相应的科学依据。然而,随着国内外超高层多塔连体建筑的逐渐兴建,相对两塔连体建筑其主塔周围流场变化更为复杂,即便是对称的截面形状也可能会出现不对称的风压分布,特别是周边群塔和干扰建筑对主塔结构的干扰造成风荷载特性与单个高层建筑有很大差别,现有的抗风研究成果已不能满足此类多塔建筑抗风设计的要求。

关于风-雨共同作用的研究主要集中于风单向驱动雨产生的效应,文献[13-14]首次提出基于三维稳态风场下的雨滴轨迹数值计算方法,并得到了三维风场中建筑物迎风面风驱雨的分布情况;文献[15-16]对斜拉桥拉索风雨激振机理及相关参数影

响进行了系统研究;文献[17-18]采用CFD数值模拟的手段研究了风驱雨作用下低矮房屋及特定群体建筑的迎风面雨压分布特性,相关研究表明降雨产生的雨压荷载在极端条件下可达到纯风压的30%以上,设计工程结构尤其是覆面结构时,应考虑极端气候下雨压所引起的荷载作用。已有研究主要集中于风驱雨作用下斜拉桥拉索、低矮建筑和输电塔等结构,对于日益兴建的超高层结构尤其是超高层多塔连体建筑,鲜有系统讨论风-雨共同作用下主塔表面雨荷载分布规律及其与子塔之间的干扰效应。

鉴于此,基于风-雨双向耦合算法并采用连续相和离散相模型进行风场和雨场的迭代模拟,以中国东南沿海地区某超高层三塔连体建筑为例,系统探讨不同风-雨组合工况下主塔表面雨滴附着数量、雨滴冲击力和雨压系数的分布规律,揭示风-雨耦合场中结构表面速度流线、雨滴运行轨迹和最终速度的作用机理。在此基础上,提炼出超高层三塔连体建筑最不利风-雨组合工况,并给出对应的雨压系数取值建议。研究结论可为极端环境下超高层三塔连体建筑雨荷载和抗风设计提供科学依据。

1 风-雨双向耦合算法

1.1 降雨强度

降雨强度是指单位时间内的降雨量,与24 h平均降雨量相比,小时降雨量更能直观反映出极端天气条件下瞬时雨强对建筑结构安全性能的影响,表1给出了降雨强度分类^[19]。

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

雨强等级	小 中 大 暴				大暴雨			
	雨	雨	雨	雨	弱	中	强	极值
日雨强/(mm·(24·h) ⁻¹)	10	25	50	100	200			
小时雨强/(mm·h ⁻¹)	2.5	8	16	32	64	100	200	709.2

1.2 雨滴谱分布

雨滴谱近似服从负指数分布,常用 Marshall-Palmer谱^[20]来计算

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

式中: D_p 为雨滴直径; $n(D_p)$ 为不同直径雨滴个数浓度谱; N_0 为浓度,取常数值8 000; λ 为尺度参数,其表达式为

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

式中 R 为降雨强度。

1.3 雨滴末速度

降落高度大于20 m时几乎所有粒径雨滴都能达到最终末速度^[21]。直径小于2 mm的雨滴在降落过程中近似为球体下落,而直径超过2 mm时,空气阻力将导致雨滴出现较大变形,采用如下公式计算雨滴下落垂直末速度^[22]。

$$v(D) = 9.1549 \left(\frac{D}{2}\right)^{0.5} - 2.6549 + 2.5342 e^{-3.727\left(\frac{D}{2}\right)^{0.5}} - 0.389 \left(\frac{D}{2}\right)^{2.18} \quad (3)$$

式中: $v(D)$ 表示直径为 D 的雨滴垂直降落末速度。

1.4 风-雨双向耦合算法

在大暴雨时,雨滴占空气体积分数远小于10%,故可采用DPM(Discrete phase model)模型进行雨滴模拟,并在风场计算稳定后作为第二相插入连续相中进行风-雨双向耦合^[23-24]计算。雨滴在风场中运动平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (4)$$

式中: u_p 为离散相颗粒速度; u 为连续相流体速度; $F_D(u - u_p)$ 为单元颗粒质量的拖曳力; ρ_p 和 ρ 分别为颗粒和流体密度; F 为由离散相和连续相间的相互作用力。其中

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (5)$$

式中: μ 为流体黏性系数; D_p 为颗粒直径; Re 为相对雷诺数,可表示为

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (6)$$

考虑雨滴离散相影响后,风连续相基本控制方程可表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = S_m \quad (7)$$

$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F$ (8)
式中: S_m 为加入连续相的第二离散相质量, p 为压力, τ 为应力张量, ρg 为重力。其中应力张量可表示为

$$\tau = \mu \left[(\nabla u + \nabla u^T) - \frac{2}{3} \nabla u I \right] \quad (9)$$

式中: I 为单位张量,等式右边第二项为体积膨胀作用。

1.5 壁面碰撞方程

雨滴冲击到塔筒壁面过程服从动量守恒定律,求解冲击力的关键在于碰撞时间。计算中忽略雨滴在冲击过程中可能发生的蒸发、飞溅、破裂等现象,认为雨滴与结构间相互作用遵循牛顿第二定律。由动量定理

$$\int_0^\tau f(t) dt + \int_{v_s}^0 m dv = 0 \quad (10)$$

式中: $f(t)$ 为单个雨滴冲击力; v 为雨滴速度。

雨滴在单位时间内对结构的冲击力 $F(\tau)$ 为

$$F(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t) dt = \frac{mv_s}{\tau} \quad (11)$$

将下落时雨滴近似看作球体,则

$$F(\tau) = \frac{mv_s}{\tau} = \frac{1}{6\tau} \rho \pi D_p^3 v_s \quad (12)$$

由于雨滴直径一般在6 mm以下,且撞击前水平末速度相对较大,故为简化计算,将碰撞时间 τ 取为

$$\tau = \frac{D_p}{2v_s} \quad (13)$$

则雨滴对结构的冲击力可简化为

$$F(\tau) = \frac{1}{6\tau} \rho \pi D_p^3 v_s = \frac{2v_s}{6D_p} \rho \pi D_p^3 v_s = \frac{1}{3} \rho \pi D_p^2 v_s^2 \quad (14)$$

1.6 等效压力系数

为定量比较不同工况组合下的建筑外表面压力分布,定义雨压系数为

$$p_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_i} \quad (15)$$

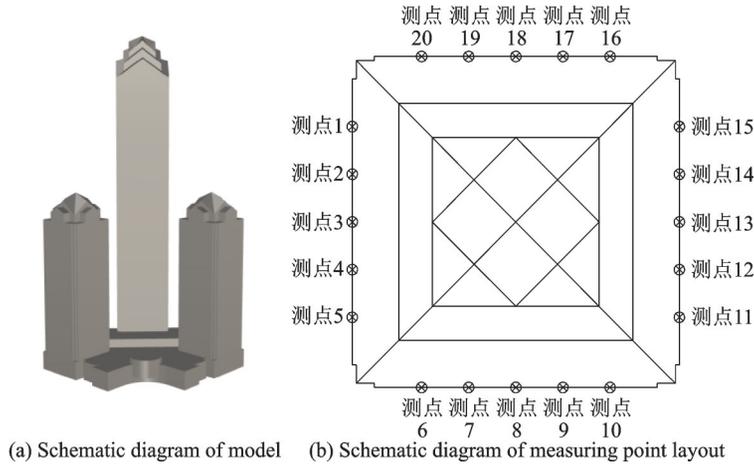
$$C_{p_{ri}} = \frac{p_{ri}}{p_{wz_0}} \quad (16)$$

式中: $C_{p_{ri}}$ 为雨压系数; p_{ri} 为雨压; p_{wz_0} 为参考高度处风压(本文参考高度取建筑物总高300 m); F_{ri} 为雨荷载; S_i 为计算面积。

2 工程概况与工况设置

2.1 工程概况

超高层三塔连体建筑位于东南沿海地带,主体工程有3栋连体建筑,其中主塔为65层塔楼外加塔冠,总高度300 m,子塔B、C塔楼总高度158.7 m,底部为5层裙房,总高23.6 m,如图1所示。



(a) Schematic diagram of model (b) Schematic diagram of measuring point layout

图1 超高层三塔连体建筑及测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of model and measuring point layout of the three-tower connected tall buildings

2.2 工况设置

该超高层三塔连体建筑位于B类地貌,重现期10、50和100 a对应的最大风速分别为28.28、33.47和35.77 m/s,大暴雨气候条件下3种雨强分别为:弱大暴雨(64 mm/h)、中大暴雨(100 mm/h)和强大暴雨(200 mm/h)。图2给出了9种典型风速和雨强的组合工况说明。

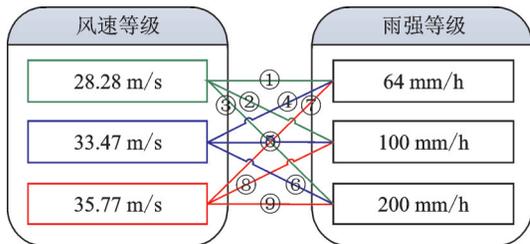


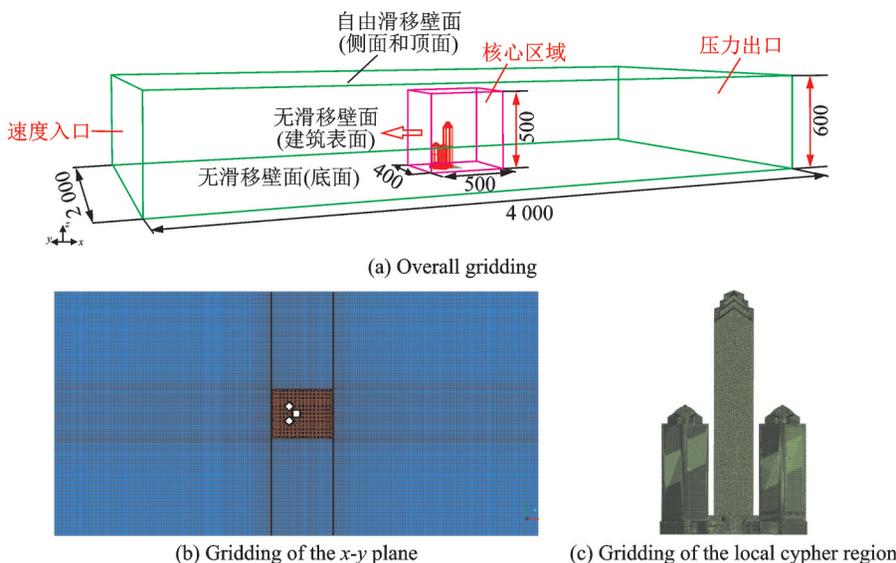
图2 对比工况组合示意图

Fig.2 Sketch map of contrast working conditions

3 风-雨双向耦合数值模拟

3.1 计算域及网格划分

三塔连体结构主体建筑外轮廓约为140 m×180 m×300 m(长×宽×高),为同时保证超高层建筑处于降雨区域和尾流充分发展,计算域尺寸取顺风向X=4 000 m,横风向Y=2 000 m,高度方向Z=600 m。为了兼顾计算效率与精度,同时考虑到建筑物外形复杂,网格划分采用混合网格离散形式^[25],将计算域划分为局部加密区域和外围区域。局部加密区域内含超高层建筑三维模型,采用非结构化网格进行划分,外围区域形状规整,采用高质量的结构化网格进行划分。核心区最小网格尺寸为0.3 m,总网格数量约1 400万个,计算域及具体的网格划分如图3所示。



(b) Gridding of the x-y plane

(c) Gridding of the local cypher region

图3 计算域及加密网格划分示意图

Fig.3 Computational domain and cipher gridding

3.2 边界条件与参数设置

数值模拟采用3D单精度分离式求解器,计

算参数及边界条件设定如表2所示。流体流速为绝对速度,空气模型等效为理想不可压缩流

体,湍流模型选取 $k-\epsilon$ 剪切应力(SST)控制方程,速度入口按 B 类地貌设置大气边界层指数风剖面,湍流度剖面,10 m 参考高度处的基本风速分别为 2.2 节中的 3 种不同重现期风速,地面粗糙度指数为 0.15。基于用户自定义函数定义上述脉动风场的平均风剖面、湍流度、湍动能、湍流积分尺度和比耗散率等流体参数,在入口处生成纵向分布的脉动风场。图 4 给出了模拟脉动风场的平均风速和湍流度与理论值对比示意图,由图 4 可以看出,模拟的脉动风场各参数与理论

值的分布规律基本一致,脉动风场质量符合要求。

表 2 计算参数及边界条件设定

Table 2 Calculation of parameters and boundary conditions

计算参数	参数设定	计算参数	参数设定
入口边界条件	速度出口	流场求解方法	SIMPLEC
出口边界条件	压力出口	压力项离散	Standard 格式
壁面边界条件	无滑移壁面	瞬态方程	二阶隐式
其他边界条件	对称边界条件	收敛容差	10^{-6}

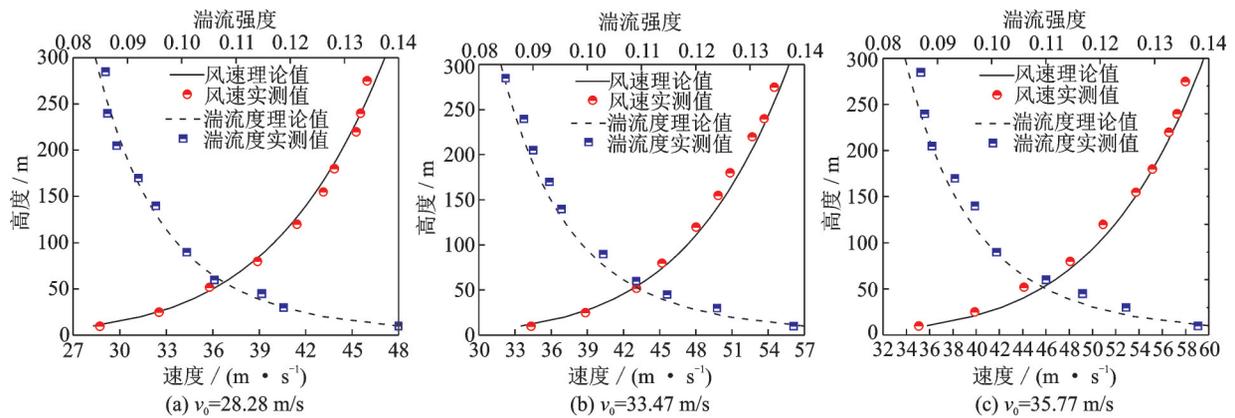


图 4 速度及湍流度剖面示意图

Fig.4 Velocity and turbulence profile

脉动风场求解稳定后加入离散相进行风雨场耦合迭代运算。采用直径为 1.0~6.0 mm 的雨滴来模拟连续直径分布的降雨(见表 3),每种直径雨滴数量和体积占有率采用 Marshall-Palmer 谱确

定。对雨滴进行“面”释放,水平初始释放速度为 0 m/s,竖向初始释放速度为 -5 m/s,重力和阻力的共同作用及足够大的高度范围使得所有雨滴均可达到极限速度。

表 3 雨滴直径分组

Table 3 Diameters of raindrops

雨滴直径	1	2	3	4	5	6
控制范围	0~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5.5	5.5~6

风雨耦合迭代完成后,可输出建筑物表面捕捉到的雨滴信息,据此计算雨滴对建筑结构的冲击作用力,计算雨滴冲击荷载时,假定 0.01 s 时距^[26]内所有收集到的雨滴同时作用在建筑外表面。

3.3 有效性验证

对该超高层连体建筑进行测压风洞试验,试验详细介绍见文献[27]。模型缩尺比为 1:300,在主塔表面沿高度布置 13 层,每个面 85 个测点,共 340 个同步测点。试验中模拟风向角间隔为 15°。将数值模拟计算结果与风洞试验结果进行比较,图 5 给出了 0°风向角 93.6 和 213.6 m 截面测点数据对比。可以发现,数值模拟的结果与风洞试验的数据较接近且总体趋势十分吻合。模拟结果在建筑物的背面、侧面以及棱角处吻合较好,故认为本文数值模

拟结果具有较高的有效性。

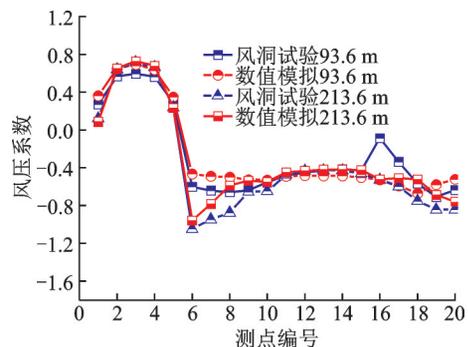


图 5 超高层典型截面风场数值模拟结果与风洞试验曲线对比示意图

Fig.5 Comparison between numerical simulation results and wind tunnel test at typical interfaces of the three-tower connected tall buildings

4 气动性能分析

4.1 风场分析

图6给出了超高层多塔连体建筑80和250 m高度处速度流线图。由图可以发现:

(1)两个子塔对主塔的流程分布形成了显著的干扰效应。由于子塔的存在,主塔与子塔的“峡谷效应”使得三塔之间的流体出现明显的加速现象,

同时子塔的干扰效应也改变了矩形流场的对称分布。

(2)在250 m高度截面处,结构的尾流漩涡区域出现明显的减少现象,但建筑矩形断面的流场仍未出现对称分布,说明子塔对主塔的干扰作用在子塔高度以上($Z \geq 157.8$ m)仍然存在,超高层三塔连体建筑在静力干扰方面呈现明显的三维效应。

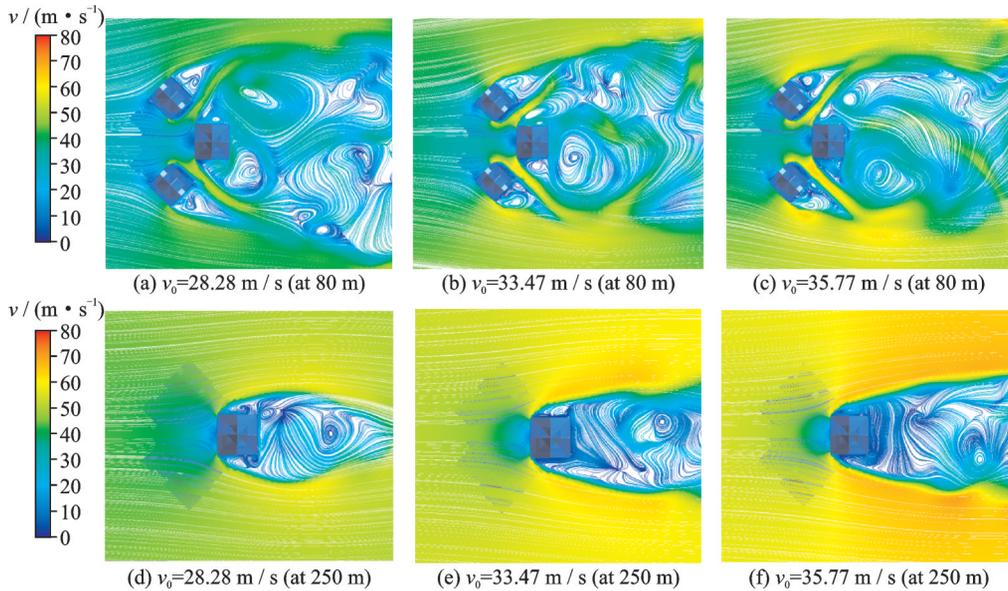


图6 超高层建筑80 m和250 m截面处速度流线图

Fig.6 Speed streamline at 80 m and 250 m sections of the three-tower connected tall buildings

4.2 雨场分析

图7给出了9种组合工况建筑物表面各直径雨滴数量、撞击速度及速度占有率对比曲线。由图对比可知:(1)各工况下雨滴直径主要分布在3~6 mm之间,以直径5 mm雨滴百分比最大;(2)各工况结构表面雨滴水平末速度占有率分布规律基

本一致,工况1、2、3基本风速较小,其水平末速度峰值出现在15~20 m/s,其余工况出现在20~25 m/s;(3)各工况建筑外表面雨滴平均水平末速度小于基准风速,数值主要分布在10~25 m/s范围内,撞击水平末速度随着雨滴直径的增加而增大。

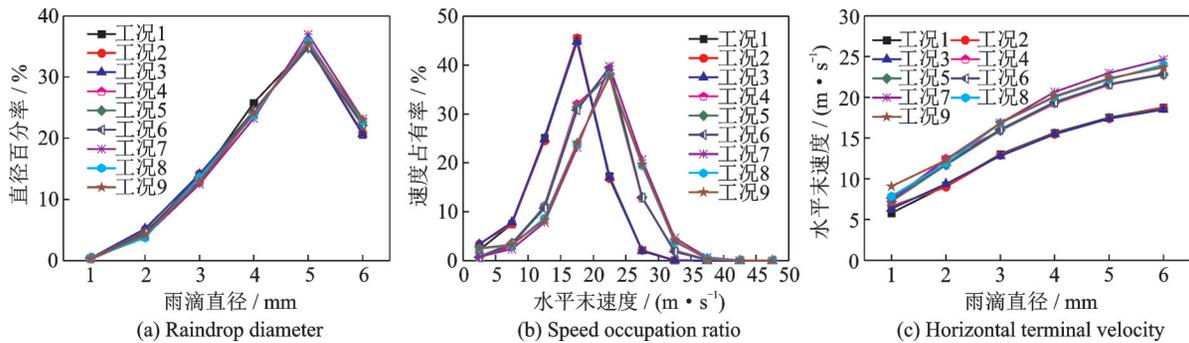


图7 雨滴数量与水平末速度分布曲线

Fig.7 Distribution curves of raindrop number and horizontal velocity

表4—6对比给出不同组合工况下建筑物迎风面不同高度范围雨荷载、风荷载及二者比值。由表4—6可知:

(1)迎风面各高度范围内均有雨滴附着,不同组合工况下建筑外表面雨荷载随着高度的增加而

增大;不同高度范围雨荷载与风荷载的比值大多分布在3%~15%范围,但在工况3的223.6~261.3 m高度范围,雨荷载达到风荷载的23.81%。

(2)在同一重现期风速下,雨荷载随着雨强的增大而增大,固定雨强下风速的提高将导致建筑物

迎风面的雨荷载增大,但雨荷载与风荷载的比值减小。

表 4 工况 1~3 建筑物迎风面不同高度范围风雨荷载特征值列表

Table 4 List of characteristic values of wind and rain loads on the windward side of working conditions 1—3

高度/m	工况 1			工况 2			工况 3		
	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %
23.6~63.6	39.5	929.9	4.24	51.5	929.9	5.54	110.0	929.9	11.83
63.6~103.6	40.7	1 270.5	3.20	70.9	1 270.5	5.58	138.3	1 270.5	10.88
103.6~143.6	58.7	1 417.9	4.14	85.9	1 417.9	6.06	175.5	1 417.9	12.38
143.6~183.6	72.5	1 562.6	4.64	110.5	1 562.6	7.07	214.8	1 562.6	13.74
183.6~223.6	87.1	1 705.0	5.11	124.2	1 705.0	7.28	266.3	1 705.0	15.62
223.6~261.3	128.9	1 610.4	8.00	204.4	1 610.4	12.69	383.4	1 610.4	23.81

表 5 工况 4~6 建筑物迎风面不同高度范围风雨荷载特征值列表

Table 5 List of characteristic values of wind and rain loads on the windward side of working conditions 4—6

高度/m	工况 4			工况 5			工况 6		
	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %
23.6~63.6	24.4	1 369.9	1.78	42.8	1 369.9	3.13	79.8	1 369.9	5.83
63.6~103.6	38.2	1 758.6	2.17	58.3	1 758.6	3.32	114.3	1 758.6	6.50
103.6~143.6	52.8	1 945.6	2.71	81.0	1 945.6	4.17	168.5	1 945.6	8.66
143.6~183.6	73.5	2 164.5	3.39	113.3	2 164.5	5.23	235.4	2 164.5	10.88
183.6~223.6	100.5	2 351.3	4.27	159.3	2 351.3	6.77	327.4	2 351.3	13.92
223.6~261.3	151.3	2 213.1	6.84	252.1	2 213.1	11.39	478.7	2 213.1	21.63

表 6 工况 7~9 建筑物迎风面不同高度范围风雨荷载特征值列表

Table 6 List of characteristic values of wind and rain loads on the windward side of working conditions 7—9

高度/m	工况 7			工况 8			工况 9		
	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %	雨荷载/ kN	风荷载/ kN	比值/ %
23.6~63.6	24.5	1 545.2	1.58	32.7	1 545.2	2.12	66.3	1 545.2	4.29
63.6~103.6	33.8	2 032.0	1.66	58.5	2 032.0	2.88	121.4	2 032.0	5.98
103.6~143.6	56.4	2 274.5	2.48	88.9	2 274.5	3.91	167.1	2 274.5	7.35
143.6~183.6	76.2	2 538.1	3.00	116.3	2 538.1	4.58	237.3	2 538.1	9.35
183.6~223.6	112.9	2 752.3	4.10	157.1	2 752.3	5.71	314.7	2 752.3	11.44
223.6~261.3	165.7	2 584.0	6.41	254.0	2 584.0	9.83	501.3	2 584.0	19.40

图 8 给出了不同组合工况下结构迎风面典型测点雨压系数沿高度分布曲线图。对比发现,不同组合工况下各测点雨压系数随着高度增加基本呈现增大的趋势,各测点雨压系数最大值均出现在工况 3 下 253.3 m 高度处,最大值为测点 1 的 0.301。

4.3 整体雨压系数分析

为更清晰展示建筑物各侧面和高度雨滴位置、数量和对应的压力系数,图 9 给出了各工况超高层三塔连体建筑各表面雨滴位置和雨压系数三维分布示意图,为清晰显示雨滴撞击位置,对雨滴进行粗化处理。由图 9 可知:

(1)各组合工况下雨滴撞击位置主要集中在建

筑物迎风面区域,来流在迎风面的分流和绕流携带部分雨滴远离迎风面中心点。因此,迎风面两侧区域雨压系数较大,中间区域雨压系数较小,受尾流区域漩涡的驱动作用,背风面区域有少量雨滴附着。

(2)各工况下建筑外表面收集到的雨滴总数随着雨强的增大逐渐变多,而随风速的增加迅速减少,其中工况 3 下雨滴数量最多。

(3)各工况下雨压系数主要集中于迎风面,其余范围数值基本为 0,雨压系数最大值为 0.243,发生在工况 3 的 0.73H~0.86H 高度范围内。

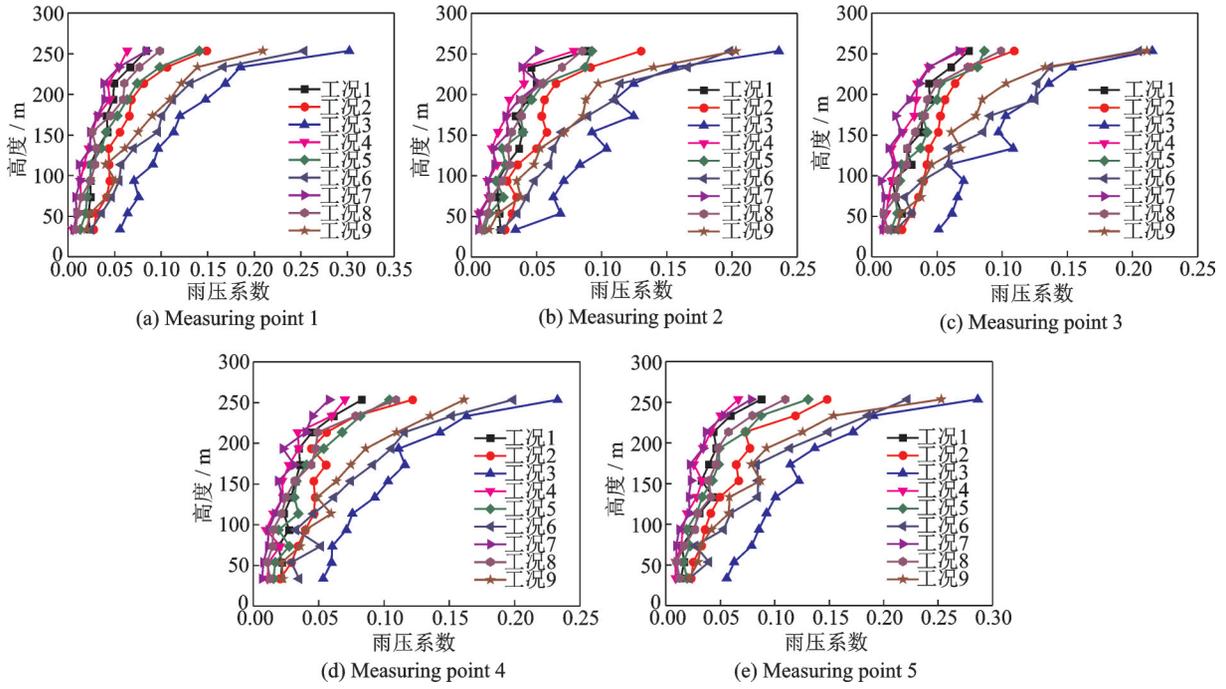
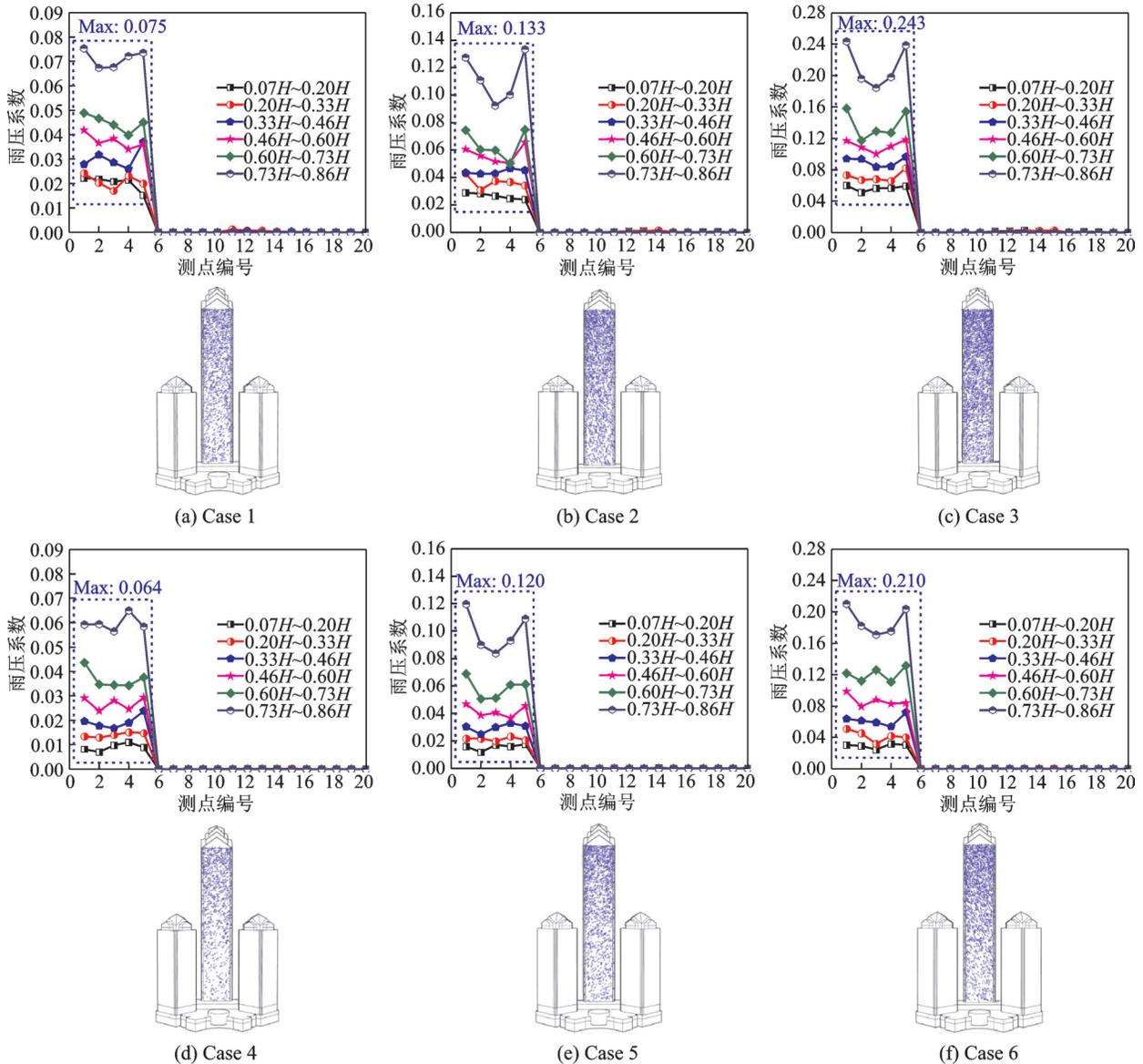


图8 迎风面典型测点雨压系数分布曲线

Fig.8 Distribution curves of typical rain pressure coefficients at the windward surface



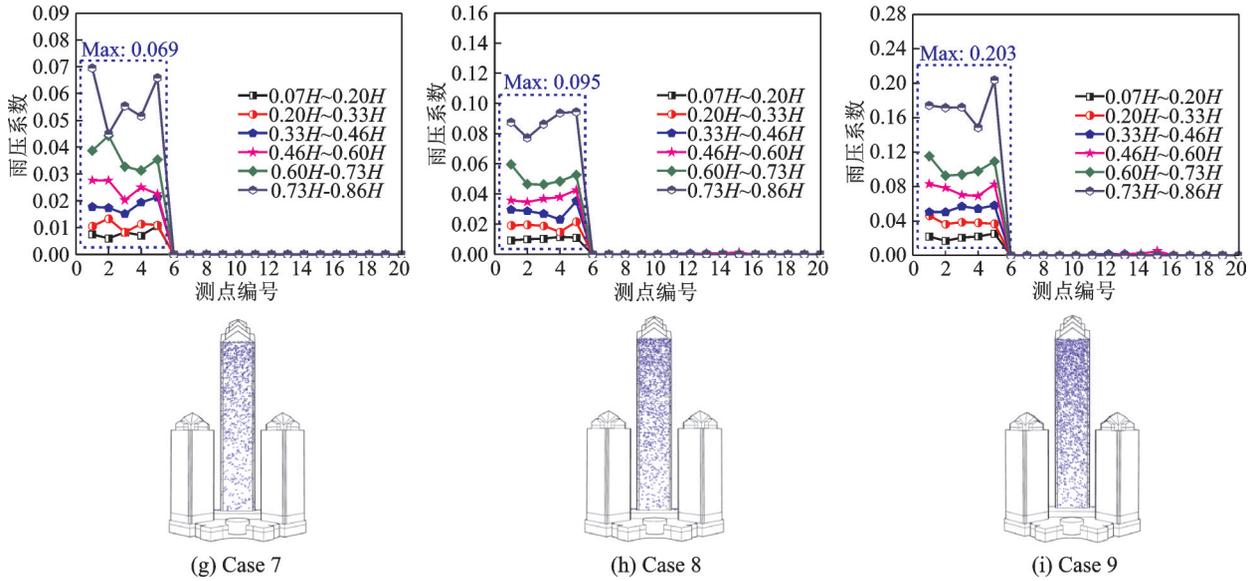


图 9 各工况下超高层建筑外表面雨滴和雨压系数三维分布示意图

Fig.9 Three-dimensional distribution of raindrop and rain pressure coefficient of three-tower connected tall buildings

基于最不利组合工况 3 和超高层建筑各表面雨滴分布特性,表 7 给出了超高层建筑外表面雨压系数建议取值,其中建筑迎风面整体建议取值为 0.12,侧风区及背风面几乎没有受到雨滴的撞击作用,其雨压系数数量级在 10^{-4} 左右,可以忽略不计。

表 7 超高层建筑外表面雨压系数建议取值

Table 7 Recommended values of rain pressure coefficient

迎风面		侧风区及背风面	
局部	整体	局部	整体
0.0H~0.2H	0.06	0.0H~0.2H	5.91×10^{-4}
0.2H~0.4H	0.08	0.2H~0.4H	1.67×10^{-4}
0.4H~0.6H	0.10	0.4H~0.6H	3.56×10^{-6}
0.6H~0.8H	0.16	0.6H~0.8H	6.27×10^{-6}
0.8H~1.0H	0.21	0.8H~1.0H	2.91×10^{-6}

5 结 论

本文系统探讨了风-雨耦合环境下超高层三塔连体建筑气动力与雨压分布特性,主要涉及风-雨双向耦合数值模拟、风荷载分布、干扰效应、流场作用机理、雨荷载分布、风-雨等效压力系数等。得到如下主要结论:

(1)超高层三塔连体建筑的静力干扰呈现明显的三维效应,子塔的干扰效应减小了主塔迎风面和侧风面的风荷载。

(2)主塔表面雨滴捕捉数量随风速增大而减少,随雨强增大而增加,工况 3 下雨滴捕捉数量最多,并以 5 mm 直径雨滴占比最大,雨滴水平速度主要分布在 10~30 m/s 范围内。

(3)不同工况下雨滴撞击位置主要集中在迎风

区域,且迎风面雨荷载随着高度的增加逐渐增大,迎风面雨荷载与风荷载最大比值为 23.81%,局部测点最大雨压系数达到 0.301,发生在工况 3 的塔顶范围内。

(4)风雨耦合的最不利组合工况为 100 a 重现期风速 (35.77 m/s) 和强大暴雨组合 (200 mm/h),主塔迎风面雨压系数整体取值建议为 0.12,侧风区和背风区整体雨压系数数量级在 10^{-4} 左右,可以忽略不计。

参考文献:

- [1] 余先锋,谢壮宁,顾明.群体高层建筑风致干扰效应研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(3):1-11.
YU Xianfeng, XIE Zhuangning, GU Ming. Research progress of wind-induced interference effects on tall buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (3): 1-11.
- [2] HUANG M F, CHAN C M, LOU W J. Optimal performance-based design of wind sensitive tall buildings considering uncertainties[J]. Computers & Structures, 2012, 98: 7-16.
- [3] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1079-1130.
- [4] KASPERSKI M. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design[J]. Engineering Structures, 1992, 14(1): 27-34.
- [5] KHANDURI A C, STATHOPOULOS T, BÉDARD C. Wind-induced interference effects on buildings—A review of the state-of-the-art[J]. Engineering Structures, 1998, 20(7): 617-630.
- [6] LAM K M, LEUNG M Y H, ZHAO J G. Interfer-

- ence effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5): 562-583.
- [7] YU X F, XIE Z N, WANG X, et al. Interference effects between two high-rise buildings on wind-induced torsion[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2016, 159: 123-133.
- [8] HUANG D, ZHU X, HE S, et al. Characteristics of the aerodynamic interference between two high-rise buildings of different height and identical square cross-section[J]. *Wind & Structures An International Journal*, 2017, 24(5): 501-528.
- [9] ZHANG J W, LI Q S. Field measurements of wind pressures on a 600 m high skyscraper during a landfall typhoon and comparison with wind tunnel test[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 391-407.
- [10] XIE J, IRWIN P A. Wind-induced response of a twin-tower structure[J]. *Wind & Structures An International Journal*, 2001, 4(6): 495-504.
- [11] SHEN G, SUN B, LOU W, et al. Distribution of wind load on symmetrical double tower tall building [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(1): 64-66.
- [12] SONG J, TSE K T. Dynamic characteristics of wind-excited linked twin buildings based on a 3-dimensional analytical model[J]. *Engineering Structures*, 2014, 79(79): 169-181.
- [13] CHOI E C C. Parameters affecting the intensity of wind-driven rain on the front face of a building[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1994, 53(1/2): 1-17.
- [14] CHOI E C C. Numerical modelling of gust effect on wind-driven rain[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1997, 72(1): 107-116.
- [15] COSENTINO N, FLAMAND O, CECCOLI C. Rain-wind induced vibration of inclined stay cables—Part I: Experimental investigation and physical explanation[J]. *Wind & Structures An International Journal*, 2003, 6(6): 471-484.
- [16] JING H, HE X, LI H. Initial condition and damping effects on rain-wind induced cable vibration[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 376-383.
- [17] 王辉, 李新俊, 潘竹. 建筑(群)立面风驱雨压荷载的数值模拟研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(9): 94-100.
- WANG Hui, LI Xinjun, PAN Zhu. Numerical simulation study of WDR pressure load on facades of buildings[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(9): 94-100.
- [18] ARCH G, HAJRA B, MORAVEJ M, et al. An experimental study to assess the effect of soffit louvered vents on wind loads and wind driven rain intrusion on low rise buildings[J]. *Sustainable Cities & Society*, 2017, 34: 43-55.
- [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. Research on wind-driven rain CFD simulation and method calculating mean rain load [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(5): 600-606.
- [20] 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(48): 1999-2004.
- [21] GUNN R, KINZER G D. The terminal fall velocity for water droplets in stagnant air[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1949, 6(4): 243-248.
- [22] RIGBY E C, MARSHALL J S, HITSCHFELD W. The development of the size distribution of raindrops during their fall[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, 11(5): 362-372.
- [23] 刘顺, 黄生洪, 李秋胜, 等. 基于欧拉多相流模型的桥梁主梁三维风驱雨数值研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(4): 63-71.
- LIU Shun, HUANG Shenghong, LI Qiusheng, et al. 3D numerical simulation of wind-driven rain on bridge deck sections based on Eulerian multiphase model[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(4): 63-71.
- [24] 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): 1-8.
- [25] ELSHAER A, BITSUAMLAK G, DAMATTY A E. Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization[J]. *Engineering Structures*, 2017, 136: 133-148.
- [26] 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.
- CHEN Bowen. Low building surface wind pressure CFD numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2009.
- [27] KE S, WANG H, GE Y. Wind load effects and equivalent static wind loads of three-tower connected tall buildings based on wind tunnel tests[J]. *Structural Engineering & Mechanics*, 2016, 58(6): 967-988.