

平面壁面射流风场作用下建筑物表面风压数值模拟

钟永力¹, 晏致涛^{1,2†}, 游溢^{1,3}, 赵爽¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331;
3. 国网新疆电力公司 电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:采用平面壁面射流模拟下击暴流的出流段风场,通过协同流模拟下击暴流水平移动,基于计算流体动力学方法,采用雷诺应力模型(RSM)的 Stress-Omega 模型模拟了稳态下击暴流的平均风剖面,并在风场中建立高层建筑模型,研究下击暴流风场中高层建筑表面风压分布特性.结果表明,采用平面壁面射流模型得到的水平速度竖向风剖面与下击暴流理论风剖面以及试验结果吻合较好,壁面射流模型风场中建筑风压分布特征与冲击射流风洞试验一致;迎风面风压系数随着顺流向距离的增加而不断减小,随着射流入流湍流强度的增大而减小.当下击暴流风剖面半高值大于1.45倍建筑物高度时,壁面射流风场中建筑风压分布与大气边界层风场中类似.协同流对结构中下部风压分布影响较大,而风向角对最大风压的影响不大.

关键词:下击暴流;平面壁面射流;数值模拟;雷诺应力模型;风压系数

中图分类号:TU312.1

文献标志码:A

Numerical Simulation of Mean Wind Pressure Distribution on Building Surface under Plane Wall Jet Wind Field

ZHONG Yongli¹, YAN Zhitao^{1,2†}, YOU Yi^{1,3}, ZHAO Shuang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: The downburst outflow wind field was modeled by plane wall jet, and the co-flow was used to simulate the translation of downburst. Based on the computational fluid dynamics (CFD) method, the velocity profile of steady downburst was simulated with Reynolds stress model (RSM), and then a high-rise building model was put into the wind field to study the surface pressure distribution. The velocity profile from the numerical analysis results matches well with the empirical models as well as the plane and radial wall jet experiments. The pressure distribution characteristics of the building model in plane wall jet flow is in good accordance with the results of the impinging jet experiment. The pressure coefficient decreases when the downstream distance increases. The pressure coefficient decreases with the increase of wall jet inlet turbulence intensity. When the half-width of the downburst velocity profile is higher than 1.45 times height of the building, the pressure distribution in wall jet flow is similar with that in boundary layer. Co-flow mainly has influence on the structure in the lower part. The wind direction of wall jet has little effect on the maximum pressure.

Key words: downburst; plane wall jet; numerical simulation; Reynolds stress model; wind pressure coefficient

* 收稿日期:2018-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478069,51178489), National Natural Science Foundation of China(51478069,51178489);重庆市科委项目(CSTC2017JCYJB0210), Chongqing Science & Technology Commission Program(CSTC2017JCYJB0210);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(106112017CDJXSYY002), Fundamental Research Funds for the Central Universities(106112017CDJXSYY002)

作者简介:钟永力(1989—),男,贵州遵义人,重庆大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: yanzhitao@cqu.edu.cn

下击暴流是一种在雷暴天气中由强下沉气流猛烈冲击地面形成并经由地表传播的近地面短时破坏性强风^[1]。在雷雨天气时,发生微下击暴流的概率可达60%~70%,并且产生的近地面强风最大风速可超过60 m/s,下击暴流在世界范围内造成了大量工程结构物的破坏^[2-4]。而在实际工程中,大多数国家的结构设计规范采用的风荷载都是通过统计方法得到的大气边界层风荷载,对下击暴流等潜在威胁高耸结构安全的强风荷载并未加以考虑。因此,对下击暴流作用下建筑风荷载特性的研究是非常有必要的。

由于下击暴流发生的随机性强,持续时间短,实测研究非常困难,目前研究下击暴流风荷载效应的方法主要为风洞试验以及数值模拟。Letchford等^[5-6]采用冲击射流装置模拟了静止和移动下击暴流的风场特征,并分析了立方体表面的压力分布。Sengupta等^[7]通过风洞试验以及大涡模拟,研究了下击暴流和龙卷风作用下立方体建筑和高层建筑表面的风荷载特性。Mason等^[8]通过脉动的冲击射流装置,研究了立方体模型在下击暴流瞬态峰值荷载作用下的荷载效应。陈勇等^[9]利用射流装置、粗糙元等模拟了下击暴流风场,对球形大跨度屋面的风压分布进行了参数分析。邹鑫等^[10]采用静止型冲击射流装置模拟稳态下击暴流风场,研究了不同径向位置处高层建筑的风荷载特性。汪之松等^[11]通过冲击射流试验以及数值模拟方法,研究了平地与坡地两种地形下高层建筑物的表面风压分布特性。Kim等^[12]通过数值模拟,对比了大气边界层风与下击暴流对建筑物的风荷载效应。李宏海等^[13]基于径向射流模型,研究了二维下击暴流风场中高层建筑物表面风压分布。汤卓等^[14]采用大涡模拟方法研究了下击暴流风场中不同径向位置处方形界面高层建筑物的风荷载特性。吉柏锋等^[15]基于冲击射流模型,研究了CAARC高层建筑物标准模型的表面风压分布,发现下击暴流作用下高层建筑物的表面风压分布与边界层风存在较大差异。

到目前为止,大部分试验研究与数值模拟都采用冲击射流模型,由于实验设备限制,很难实现大缩尺比与移动下击暴流研究。而下击暴流的尾流出口区域的面积较冲击中心大得多,对于结构物而言,其破坏区域大概率位于下击暴流的尾流出口区域。通过平面壁面射流模型来研究下击暴流的流出区域,协同流模拟下击暴流平动,避开常规研究中冲击射流喷嘴尺寸较小并且移动困难的问题,可以

实现与一般传统风洞实验中相同的几何缩尺比(1:100~1:250)^[16]。本文通过对平面壁面射流进行数值模拟,研究平面壁面射流风场中建筑物的风压分布情况,分析下击暴流风场中关键参数与建筑物参数的关系,初步探讨常规风洞中进行下击暴流大尺度风工程研究的可行性。

1 计算模型及方法

通过对JAWS研究计划实测结果的总结,Hjelmfelt^[17]给出了典型下击暴流的风场结构示意图,如图1所示。 V 为下击暴流冲击地面后水平风速, r 为下击暴流的径向距离, Z 为离地高度。

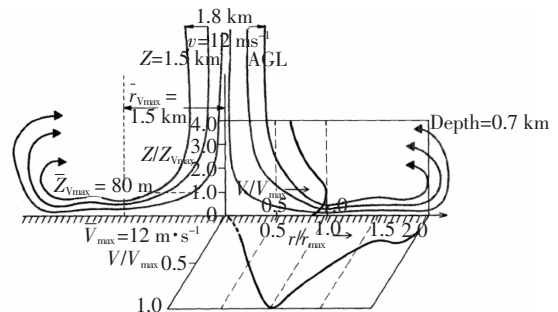


图1 典型下击暴流风剖面示意图

Fig.1 Typical wind velocity profile of downburst

从结构风工程的角度来看,由于下击暴流中心面积较小,其导致结构物破坏的概率也小得多,而下击暴流风场中的水平段具有更大的面积,对结构的危害更大。通过忽略下击暴流中部的冲击区域,仅仅模拟其水平段,考虑其轴向对称特性,可以将下击暴流的模拟简化为一个二维的壁面射流段,即壁面射流模型,如图2所示。 U_E 为协同流速度, U_m 是顺流向任意位置竖直风剖面的最大速度, y_m 和 $y_{1/2}$ 分别是 U_m 和 $1/2(U_m - U_E)$ 对应的竖向位置。

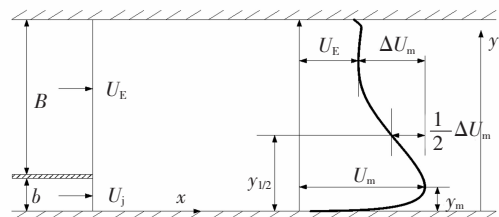


图2 壁面射流模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the wall jet model

壁面射流模型计算域如图3所示,其中射流高度 $b=30$ mm,计算域入口边界为速度入口(velocity-inlet),壁面射流入口采用均匀入流,风速为30 m/s,

定义壁面射流和协同流速度之比 $\beta = U_E / U_j$ 来确定协同流大小.Hjelmfelt^[17]的实测研究表明,约有 50% 的下击暴流伴随云层平动,而平移速度最快能达到 20 m/s^[18].目前的实测数据中,最大下击暴流风速为 Fujita^[19]记录的华盛顿圣安德鲁斯空军基地(Andrews AFB)下击暴流,在离地 4.9 m 高度处的风速超过 67 m/s;而 3 个常用的下击暴流平均风速分布剖面模拟的理论模型^[20-22](Oseguera、Vicroy、Wood)采用的最大风速均为 80 m/s.下击暴流平移与下击暴流最大风速的比值 $\beta = U_E / U_j$ 约为 0.25.因此,为了反映真实下击暴流情况,本文中 β 分别取值为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30.

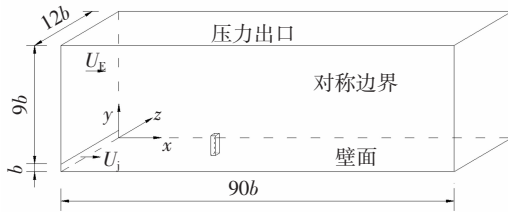


图3 壁面射流计算域及边界条件
Fig.3 Computational domain of wall jet and the boundary conditions

由于下击暴流存在突发性和随机性,较难捕捉到其完整的风速信息,标准地貌风场湍流度的取值尚无定论,大部分冲击射流试验和数值模拟都采用较小的入流湍流强度^[11-12].Chay 等^[23]通过实测数据,确定了高层建筑高度范围内的湍流强度为 5%~10%;Aboshosha 等^[24]采用大涡模拟方法,得到了开放地形下最大风速附近湍流度为 8%~12%.因此,如无特别说明,本文壁面射流湍流强度取 5%.同时,经典壁面射流试验中,壁面射流入流均为弱强度湍流,其湍流强度一般不大于 2%,协同流湍流强度更小.本文通过协同流来模拟下击暴流风场中的云层平动,云层平动对下击暴流风的湍流度影响不大,因此湍流度选取为 0.5%.

计算域底部边界为壁面边界,两侧边界采用对称边界,而计算域顶部和右侧出口采用压力出口边界条件.

整个计算域采用结构化网格,射流入口附近网格和近壁面网格加密,采用增强壁面处理,下壁面

第一层网格高度满足无量纲参数 $y^+ < 1$,风场模拟网格数为 170 万.在进行建筑物风压模拟时,建筑模型位于计算域中心线上,模型尺寸为 10 mm × 10 mm × 60 mm,对建筑物周围的网格划分采用 O 型网格,近壁面网格进行加密,因此,计算网格数量略有增加.采用多区域计算模型,把建筑物与流场分两个区域,总网格数为 310 万,分界面数据传递通过定义 interface 来完成,如图 4 所示.根据不同工况进行网格组装,不用重新划分网格,从而保证网格的一致性,同时能减少计算网格数,提高计算效率.

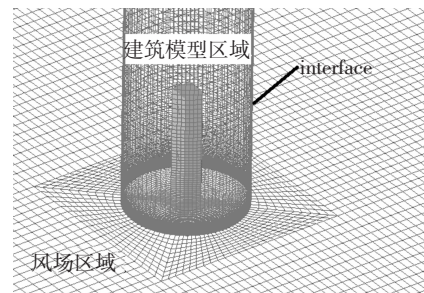


图4 建筑模型网格示意图
Fig.4 The computational mesh for building

采用 Fluent15.0 对壁面射流进行数值模拟,不可压缩流体的质量和动量控制方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \tag{2}$$

式中: u_i 为速度分量; ρ 为流体密度; P 为压力; μ 为流体动力黏度; $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$,是雷诺应力张量.湍流模型采用基于各向异性的雷诺应力模型 (RSM Stress-Omega),通过直接求解雷诺应力的输运方程来得到雷诺应力.Fluent 15.0^[25]中 Stress-Omega RSM(SORSM)模型是基于 Wilcox^[26]在 1998 年提出的 Stress- ω 模型.随后 Wilcox^[27]对该模型参数进行了一定的修正,进一步提高了 SORSM 模型的性能,而 Fluent 软件参数并没有进行修正.为了得到更好的模拟结果,本文采用文献[27]中修正参数进行数值模拟,具体参数如表 1 所示.采用 SIMPLEC 算法求解速度与压力的耦合,动量和压力的离散采用较高精度的二阶迎风格式.

表 1 改进的 SORSM 参数

Tab.1 The modified SORSM parameters

C_1	C_2	Alpha*_inf	Alpha_inf	Beta_i	Beta*_inf	zeta*	Mt0	TKE Prandtl number	SDR Prandtl number
1.8	10/19	1	0.52	0.070 8	0.09	0.5	0.25	5/3	2

2 壁面射流流场验证

现有文献通常是对静止下击暴流进行研究,为了验证壁面射流模型的可靠性,通过计算典型无协同流壁面射流模型对模拟结果进行检验.壁面射流模型通常使用半高 $y_{1/2}$ 和最大风速 U_m 进行无量纲处理,从而得到自相似剖面, U_m 是顺流向任意位置竖直风剖面的最大速度, $y_{1/2}$ 为 $1/2(U_m - U_E)$ 对应的竖向位置.选取顺流向距离为 $10b$ 、 $30b$ 和 $50b$ 处的风剖面,同现有常用的下击暴流经验风剖面模型和物理实验结果进行比较,如图 5 所示.可以看出,数值模拟的壁面射流竖向风剖面具有较强的自相似性,并且与壁面射流试验^[28]、冲击射流试验^[29]以及 Wood 模型吻合非常好,同 Oseguera 模型和 Vicroy 模型相比略有偏差.说明采用 SORSM 模型能够对壁面射流进行准确的模拟.图 6 为 $x = 30b$ 处不同风速比 β 时的平均风剖面.当 $y < y_m$ 时风剖面基本重合,说明在壁面射流内层受协同流的影响不大,随后风剖面开始分离,随着 β 的增大,壁面射流外层风速增大.

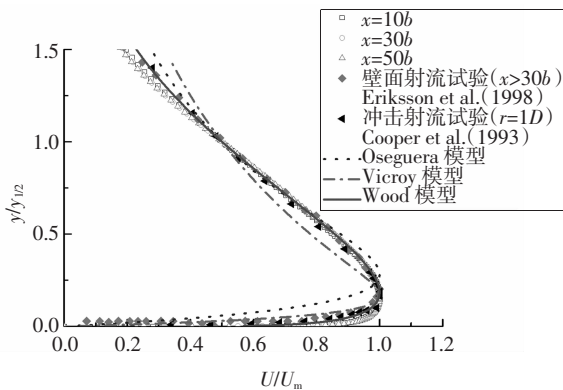


图 5 不同顺流向距离的平均风剖面对比

Fig.5 Mean velocity profiles at various streamwise locations

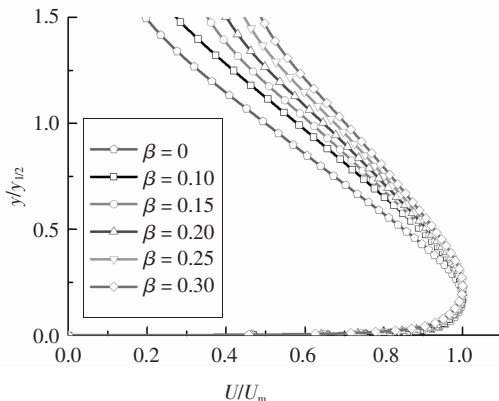


图 6 $x = 30b$ 处不同风速比平均风剖面对比

Fig.6 Mean velocity profiles at $x = 30b$ with different β

3 建筑表面风压研究

3.1 模拟方法验证

目前仅有冲击射流试验模拟静止下击暴流下的建筑风压测试结果^[11].文献[11]初始出流速度为 12 m/s,湍流强度为 1%.图 7 为冲击射流试验 $R = 1.5D$ 与壁面射流 $x = 15b$ 处的平均风剖面,壁面射流模型与冲击射流试验的风剖面非常吻合,仅在较大竖向位置有偏差,这可能是由于试验与数值模拟上部边界条件不同所致.图 8 给出了壁面射流模型数值模拟和冲击射流试验得到的迎风面风压系数分布.由于建筑模型尺寸以及风压系数参考风速的差异,采用无量纲进行对比分析,可以看出,数值模拟迎风面风压系数与试验结果吻合较好,仅在上部风压处略有差异.总体来说,采用壁面射流模型数值模拟方法能够较为准确地模拟下击暴流出流段风场特性,可作为进一步研究下击暴流出流段建筑风压特性的有效方法.

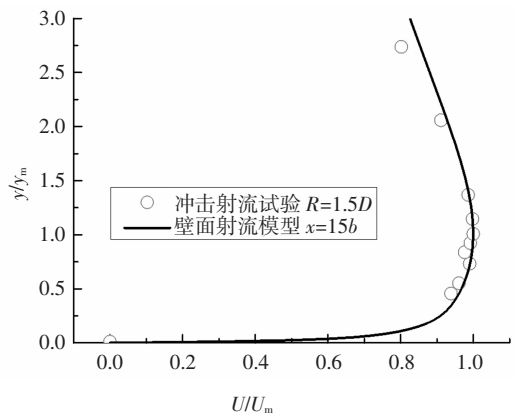


图 7 平均风速剖面对比图

Fig.7 The comparison of mean velocity profiles

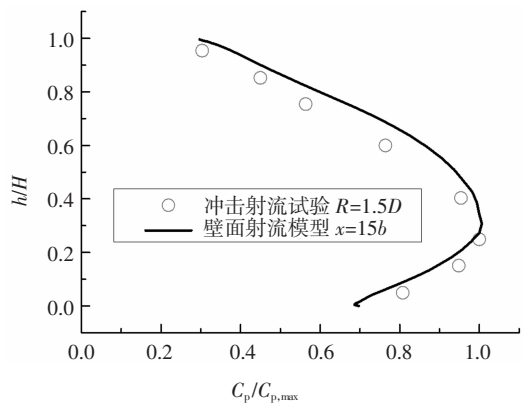


图 8 迎风面风压系数对比图

Fig.8 The comparison of pressure coefficient on the windward side

3.2 不同径向距离的风压分布

协同流与射流风速之比 β 为 0.1 时, 不同顺流方向位置建筑模型迎风面中心线压力系数分布如图 9 所示. 迎风面风压系数随着顺流向距离的增加而不断减小, 并且顺流向距离越大, 减小的速率越慢. 最大风压系数所在高度随顺流向距离的增加而不断增大, 顺流向距离与建筑风压的关系, 可以通过壁面射流风剖面长度尺度 $y_{1/2}$ 与建筑高度 H 之比来反映, 当顺流向距离增大到 $30b$ 后 ($y_{1/2}/H > 1.45$), 壁面射流冲击作用下建筑风压分布逐渐与大气边界层风场作用下类似.

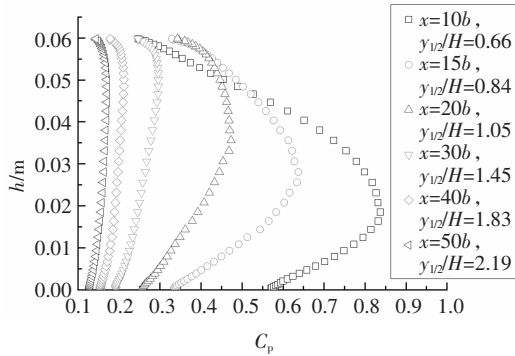


图 9 不同顺流向距离的迎风面风压系数
Fig.9 Pressure coefficient at various streamwise locations on the windward side

不同顺流向位置背风面中心线压力系数如图 10 所示. 当建筑模型位于 $15b$ 之前, 负压力分布表现出中间大, 上下侧小, 在顶部又突然增大的特点; 当模型位于 $20b$ 时, 负压力分布呈现出下小上大的特点, 并且在顶部急剧增大; 当模型位置大于 $30b$ 时压力系数仍然表现出下小上大的特点, 但是在建筑顶部趋于平缓, 逐渐与边界层风作用类似.

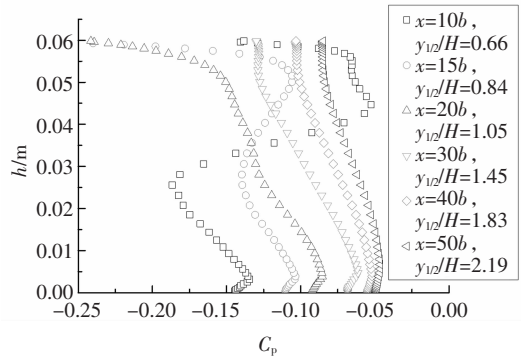


图 10 不同顺流向距离的背风面风压系数
Fig.10 Pressure coefficient at various streamwise locations on the leeward side

根据壁面射流的研究结果, 壁面射流的自保持性能持续到顺流向距离 $200b$ 以上, 同时, 壁面射流半高 $y_{1/2}$ 与顺流向距离满足线性关系^[30]:

$$dy_{1/2}/dx = 0.73 \pm 0.002$$

因此, 在研究下击暴流对建筑物作用荷载时, 除了壁面射流初始发展阶段 ($x > 10b$), 在满足壁面射流不受风洞上边界约束的条件下, 只要确定了 $y_{1/2}/H$, 就可以根据建筑物模型大小以及实际风洞大小选择合理的顺流向距离 x 以及射流入口 b 的高度, 建议取顺流向 $15b < x < 200b$ 区域为研究区域, 同时建筑物高度 H 应该小于 1.45 倍 $y_{1/2}$. 下击暴流最大风速发生位置位于径向 $1D \sim 1.5D$, 竖向 $0.03D \sim 0.05D$ 范围内^[5,14], 根据已有下击暴流统计记录, 下击暴流出流直径平均为 1800 m, 即最大风速高度约为 $54 \sim 90$ m, 据此可通过壁面射流来研究下击暴流风场中的最大风荷载.

当风速比为 0.1 时, 0° 风向角风场作用下, 不同顺流向位置处建筑物模型迎风面、背风面和侧面风压系数云图如图 11 所示. 迎风面风压呈现出两侧小

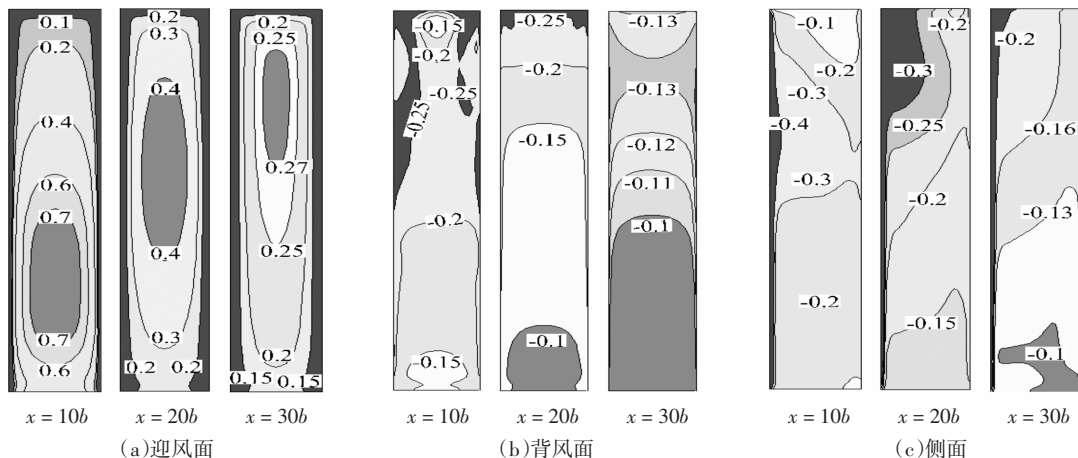


图 11 不同顺流向位置处建筑物风压系数云图
Fig.11 Pressure coefficient contours of building at various streamwise locations

而中间大的特点;背风面却相反,表现出两侧负风压较大,而中间较小.侧面风压为负压,表现为靠近迎风面一侧大,向背风面逐渐减小的特点,并且随着顺流向距离的增加,最大风压高度逐渐上移.

3.3 不同协同流大小的风压分布

图 12 为 $x = 15b$ 处不同协同流时建筑模型迎风面中心线风压系数,可看出,迎风面中下部风压系数随着风速比的增大而增大,但上部风压系数随风速比的增大而减小,其临界点位于 $0.8H$ 左右,与半高位置大致相同.不同风速比时背风面中心线风压系数如图 13 所示,背风面中下部负压随着风速比的增大而增大,上部风压基本不受风速比的影响.总体而言,风速比对结构中下部风压的影响明显大于上部.

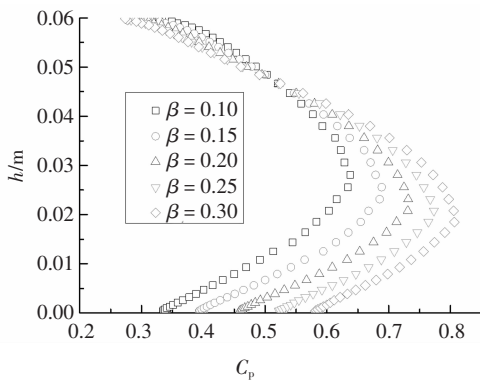


图 12 $x = 15b$ 处不同风速比迎风面风压系数
Fig.12 Pressure coefficient at $x = 15b$ on the windward side with different β

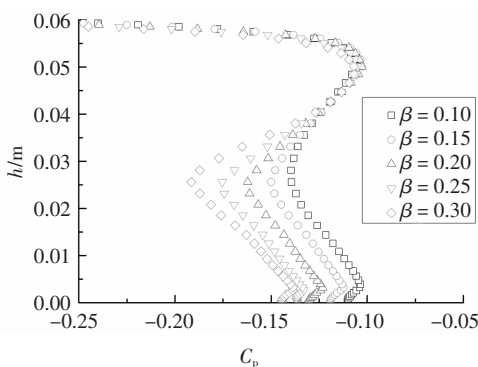


图 13 $x = 15b$ 处不同风速比背风面风压系数
Fig.13 Pressure coefficient at $x = 15b$ on the leeward side with different β

3.4 不同入流湍流强度的风压分布

典型的壁面射流是由壁面边界层的内层和剪切流外层组成,通常其分界点在最大风速处,这种特性是由于射流与周围流体之间存在速度差并且相互作用,同时受到壁面的约束形成的.分界区域刚

好处于下游建筑物高度范围内,并且会产生湍流. $\beta = 0.1$ 时不同顺流向距离的湍流强度如图 14 所示.可以看出,在接近射流入口的地方,湍流强度呈现明显的两峰值特征,内峰值是由于射流受到壁面约束形成的,随着顺流向距离的增加,射流速度逐渐减小,这种约束作用也逐渐减弱,内峰值变得不明显.外峰值位于射流与协同流交界的地方,随着顺流向距离的增加,壁面射流不断发展,外峰值位置也逐渐扩展.这种特征也反映在雷诺切应力上,如图 15 所示.

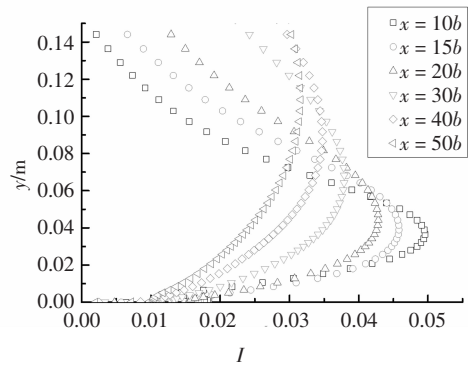


图 14 不同顺流向湍流强度
Fig.14 Turbulence intensity profiles at various streamwise locations

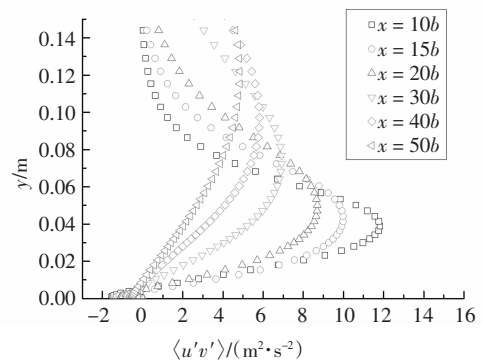


图 15 不同顺流向雷诺切应力
Fig.15 Reynolds shear stress profiles at various streamwise locations

$\beta = 0.1$ 时不同入流湍流强度下 $x = 20b$ 处建筑迎风面风压系数如图 16 所示,可以看出,湍流强度越大,风压系数反而越小.分析建筑物前方风速剖面可以发现,射流入流湍流强度越大,平均风速越小,造成这种结果的原因是由于壁面射流与协同流之间存在动量传递.当湍流强度越大时,这种传递越快,射流速度越小,而协同流速度越大,并且最大风速高度以及半高位置会上移,如图 17 所示.

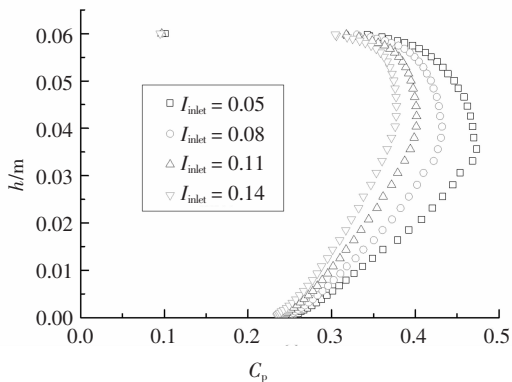


图 16 $x = 20b$ 处不同入流湍流度迎风面风压分布
Fig.16 Pressure coefficient at $x = 20b$ with different inlet turbulence intensity on the windward side

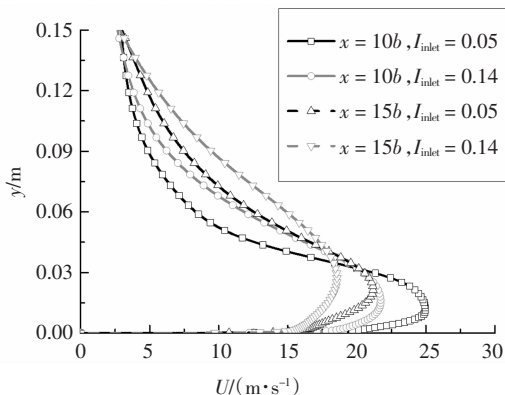
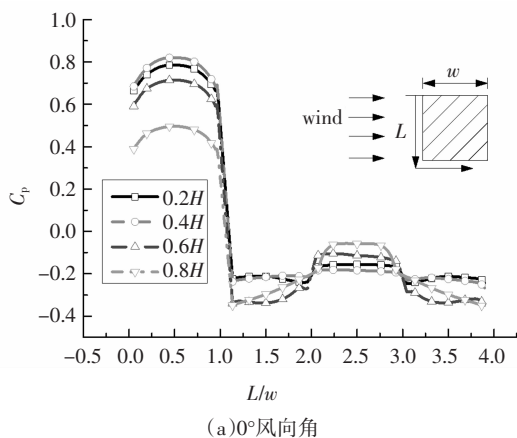


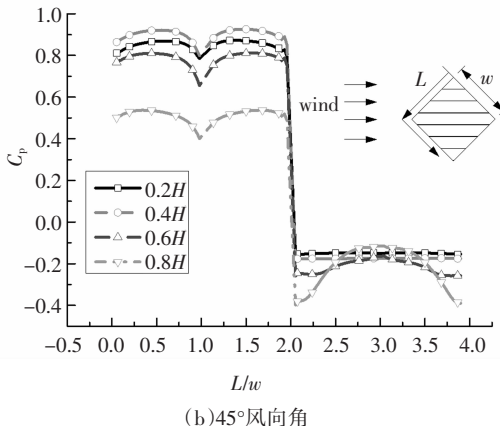
图 17 不同入流湍流度速度剖面
Fig.17 Velocity profiles with different inlet turbulence intensity

3.5 不同攻角风压分布

图 18 为 $x = 20b$ 处不同风向角建筑表面风压系数分布,可以看出,风向为 0° 时,只有迎风面为正压,侧面与背风面都是负压.而风向角为 45° 时,两侧迎风面都为正压,最大正压略大于 0° 迎风角,而两侧背风面为负压,其最大负压出现在建筑顶部棱角处,随后迅速减小.



(a) 0° 风向角



(b) 45° 风向角

图 18 $x = 20b$ 处不同风向角的风压系数分布
Fig.18 Pressure coefficient at $x = 20b$ with different wind direction

4 结论

本文基于平面壁面射流模型模拟下击暴流风场的出流段,采用 CFD 方法对壁面射流风场以及建筑模型表面风压分布进行了研究,得到以下结论:

1) 平面壁面射流模型能够较好地模拟下击暴流出流段的基本风场特性,得到与经验剖面、壁面射流试验和冲击射流试验较为吻合的风速剖面.同时,建筑物在平面壁面射流风场中的风压分布特征与在冲击射流模型中分布基本一致,验证了本文方法的可靠性.

2) 迎风面最大风压系数所在高度随顺流向距离的增加而不断增大,当 $y_{1/2}/H > 1.45$ 时,壁面射流风场作用下建筑风压分布逐渐与大气边界层风场作用下类似.在研究下击暴流对建筑物作用荷载时,建议取顺流向 $15b < x < 200b$ 为研究区域,同时建筑物高度 H 与射流半高 $y_{1/2}$ 之比应该小于 1.45.

3) 迎风面中下部风压系数随风速比的增大而增大,而上部风压系数随风速比的增大而减小,背风面中下部负压随着风速比的增大而增大,协同流对结构物上部风压分布的影响不大.建筑迎风面风压系数随着射流入流湍流强度的增大而减小;建筑在 45° 风向角所受最大正压力略大于 0° 风向角.

参考文献

[1] FUJITA T T. Manual of downburst identification for project NIM-ROD: SMRP research paper 156[R]. Chicago:University of Chicago, 1978:19-31.
[2] DEMPSEY D, WHITE H. Winds wreak havoc on lines [J]. Trans-

- mission and Distribution World, 1996, 48(6):32—37.
- [3] PROCTOR F H. Numerical simulations of an isolated microburst. part I: dynamics and structure [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(21):3137—3160.
- [4] LETCHFORD C W, MANS C, CHAY M T. Thunderstorms—their importance in wind engineering(a case for the next generation wind tunnel)[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12):1415—1433.
- [5] LETCHFORD C W, CHAY M T. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. part A: stationary downburst observations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7):711—732.
- [6] LETCHFORD C W, CHAY M T. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. part B: moving downburst observations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(7):733—753.
- [7] SENGUPTA A, SARKAR P P. Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2008, 96(3):345—365.
- [8] MASON M S, JAMES D L, LETCHFORD C W. Wind pressure measurements on a cube subjected to pulsed impinging jet flow[J]. Wind & Structures an International Journal, 2009, 12(1):77—88.
- [9] 陈勇, 崔碧琪, 余世策, 等. 雷暴冲击风作用下半球型屋面模型风压特性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(8):26—33.
CHEN Y, CUI B Q, YU S C, *et al.* Experimental investigation of spherical roof subjected to thunderstorm downbursts[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8):26—33. (In Chinese)
- [10] 邹鑫, 汪之松, 李正良. 稳态冲击风作用下高层建筑风荷载特性试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1):29—36.
ZOU X, WANG Z S, LI Z L. Experimental study on the wind load characteristics of high-rise building in stationary downbursts[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(1): 29—36. (In Chinese)
- [11] 汪之松, 左其刚, 唐伟峰, 等. 稳态冲击射流作用下平地及坡地高层建筑的风荷载特性[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3):103—110.
WANG Z S, ZUO Q G, TANG W F, *et al.* Wind load characteristics for high-rise building on flat terrain and slope under steady-state impinging jet [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 103—110. (In Chinese)
- [12] KIM J, HANGAN H, HO T C E. Downburst versus boundary layer induced wind loads for tall buildings[J]. Wind & Structures an International Journal, 2007, 10(5):481—494.
- [13] 李宏海, 欧进萍. 下击暴流作用下建筑物表面风压分布模拟[J]. 工程力学, 2011, 28(S2):147—151.
LI H H, OU J P. Numerical simulation of the wind-induced pressure distribution on building surface in downburst[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S2):147—151. (In Chinese)
- [14] 汤卓, 吕令毅. 雷暴冲击风荷载的大涡模拟[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(1):147—151.
TANG Z, LÜ L Y. Large eddy simulation of downburst wind load [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(1):147—151. (In Chinese)
- [15] 吉铂锋, 瞿伟廉. 下击暴流作用下高层建筑表面风压分布特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9):89—94.
JI B F, QU W L. Mean wind pressure distribution characteristics on tall building under downburst [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(9): 89—94. (In Chinese)
- [16] LIN W E, ORF L G, SAVORY E, *et al.* Proposed large-scale modelling of the transient features of a downburst outflow [J]. Wind & Structures an International Journal, 2007, 10(4):315—346.
- [17] HJELMFELT M R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado[J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27(8):900—927.
- [18] HOLMES J D. Modelling of extreme thunderstorm winds for wind loading of structures and risk assessment [C]//Proceeding of the Tenth International Conference on Wind Engineering. Copenhagen, Denmark: Balkema, 1999:1409—1415.
- [19] FUJITA T T. The downburst: microburst and macroburst—report of projects NIMROD and JAWS[R]. Chicago: University of Chicago, 1985:1—122.
- [20] VICROY D D. Assessment of microburst models for downdraft estimation[J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(6):1043—1048.
- [21] WOOD G S, KWOK K C K. Physical and numerical modeling of thunderstorm downbursts[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(6): 535—552.
- [22] OSEGUERA R M, BOWLES R L. A simple analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow: NASA technical memorandum 100632 [R]. Hampton, Virginia: Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration, 1988:1—16.
- [23] CHAY M T, ALBERMANI F G, HAWES H. Wind loads on transmission line structures in simulated downbursts [C]// World Congress on Asset Management. Gold Coast, Australia, 2006:1—13.
- [24] ABOSHOSHA H, BITSUAMLAK G, DAMATTY A E. Turbulence characterization of downbursts using LES[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 136:44—61.
- [25] ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT theory guide (Release 15.0) [M]. Canonsburg: SAS IP, Inc, 2013:41—140.
- [26] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD[M]. 2nd ed. La Canada: DCW Industries, Inc, 1998:273—339.
- [27] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD[M]. 3rd ed. La Canada: DCW Industries, Inc, 2006:303—380.
- [28] ERIKSSON J G, KARLSSON R I, PERSSON J. An experimental study of a two-dimensional plane turbulent wall jet [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(1):50—60.
- [29] COOPER D, JACKSON D C, LAUNDER B E, *et al.* Impinging jet studies for turbulence model assessment—I. Flow-field experiments [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1993, 36(5): 2675—2684.
- [30] LAUNDER B E, RODI W. The turbulent wall jet [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1981, 79(19):81—128.