

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230927002

基于协同流壁面射流模拟带倾角下击暴流方法研究*

何伟, 张宇, 刘千权

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650500)

摘要: 考虑下击暴流研究主要基于冲击射流模型, 但对射流倾角的研究有限, 且缩尺比较小不利于下击暴流风场特性研究。为此首先基于计算流体力学研究了带倾角冲击射流的风场特性, 得到了倾角对下击暴流出流段的风速衰减系数表达式, 然后针对壁面射流可得到大尺度下击暴流出流段风场, 但忽略了倾角对风速衰减的影响, 因此引入协同流以减小射流周围黏性阻力, 并采用烟迹风洞试验和计算流体力学方法, 得到了协同流对风速衰减的系数表达式, 最后分析了壁面射流模拟下击暴流倾角致效应的可行性。结果表明: ①带倾角冲击射流风场呈三维非对称特性, 前侧最大水平风速的衰减速率随倾角增大而变缓, 风剖面半高水平风速在倾角为 30° 时增幅达 77.8% ; ②烟迹风洞试验和数值模拟结果表明壁面射流风场与下击暴流前侧出流段相似, 引入协同流能够有效减缓水平风速的衰减速率; ③通过建立协同流致风速衰减系数和倾角致风速衰减系数的对应关系, 可实现采用壁面射流模拟任意倾角下的下击暴流平均风剖面, 为模拟大尺度的带倾角下击暴流提供了新的方式。

关键词: 下击暴流; 冲击射流; 壁面射流; 倾角; 协同流; 大尺度

中图分类号: TU312.1; X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0416-11

Method for Simulating Inclined Downbursts Based on Co-Flow Wall Jets

HE Wei, ZHANG Yu, LIU Qianquan

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Current studies on downbursts mainly employ impinging jet models. However, research on jet inclination angles remains limited, and small scaling ratios hinder investigations of downburst wind field characteristics. To address this, the study first investigated the wind field characteristics of inclined impinging jets using computational fluid dynamics (CFD), deriving an expression for the wind speed attenuation coefficient in the outflow region under different inclination angles. Subsequently, wall jets were used to simulate large-scale outflow wind fields in downbursts, but the effect of inclination angles on speed attenuation was neglected. Therefore, co-flow was introduced to mitigate viscous resistance around the jet. Smoke-wire wind tunnel tests and CFD methods were employed, yielding an expression for the co-flow-induced attenuation coefficient. Finally, the feasibility of simulating inclination-induced effects in downbursts using wall jets was evaluated. The results showed that: (1) the inclined impinging jet exhibited three-dimensional asymmetry. The attenuation rate of the maximum horizontal wind speed on the front side decreased with increasing inclination angle, while the half-height wind speed in the wind profile increased by 77.8% at 30° inclination angle. (2) Smoke-wire

* 收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168020)资助

作者简介: 何伟(1964—), 男, 副教授, 博士。主要从事机械振动与流体动力学研究。E-mail: hw_big@126.com

wind tunnel tests and numerical simulations confirmed that wall jet wind fields resembled the front-side outflow section of downbursts, and the incorporation of co-flow effectively reduced the attenuation rate of horizontal wind speed. (3) By establishing a correlation between co-flow-induced and inclination-induced wind speed attenuation coefficients, it was feasible to simulate average wind profiles of downbursts at any inclination angle using wall jets, providing a novel approach for simulating large-scale downbursts with inclination angles.

Keywords: downburst; impinging jets; wall jets; inclination angle; co-flow; large scale

0 引言

自 T. T. Fujita^[1]最早指出下击暴流为强下沉气流猛冲地面形成的近地面直线型突变大风,最大风速可达 66.7 m/s,扩散半径达 4 km,已造成近地面大量建筑屋盖、输电线路与建筑结构的损毁^[2-5],因此对下击暴流风场特性和其作用下建筑风荷载特性的研究存在必要性。

下击暴流具有随机特征,使得现场实测^[6-7]操作困难,因此目前研究下击暴流主要有理论模型、风洞试验及数值模拟。R. M. Oseguera 等^[8]考虑风场轴对称特性首次提出下击暴流风剖面模型(Oseguera & Bowles 模型,简称 OB 模型);D. D. Vicroy 等^[9]优化 OB 模型的形函数提出了更符合真实的平均风速解析模型(Vicroy 模型,简称 OBV 模型);G. S. Wood 等^[10]依据风洞实测数据提出稳态下击暴流半经验数学模型;这些理论模型为风场特性的研究提供了一定的理论基础,但不能提供如风洞试验和数值模拟结果中的流场信息。目前风洞试验和数值模拟研究主要基于冲击射流模型。分别针对下击暴流射流参数^[11]、地面粗糙度^[12]、移动特征^[13]进行风场特性研究,随后研究了不同结构在下击暴流的载荷特性^[14]。因实际下击暴流大尺度特征,现有研究^[15-17]均采用小几何比例尺(1:1 000~1:2 000)的冲击射流模型,不利于风工程研究,当采用大比例尺时,试验装置制造困难,实验空间大,并且难以模拟较大移动速度的下击暴流。然而根据实测^[7]归纳,下击暴流主要破坏范围为出流段,达下击暴流扩散半径的 90%,并且出流段展现出典型的壁面射流特征。因此,W. E. Lin 等^[18]首先设计了壁面射流装置模拟下击暴流出流段,得到风洞试验几何比例尺(1:100~1:250)下的下击暴流出流段风场特征。辛亚兵等^[19]基于壁面射流装置,模拟得到静止下击暴流风场,钟永力等^[20]通过引入协同流的方式解决了移动特征的出流段风场模拟,为下击暴流风场研究提供了新的方式。

现实生活中下击暴流并不是垂直向下的,而是与地面存在一定倾角。然而上述基于冲击射流和壁面射流模型研究中仅考虑了下击暴流射流参数和移动特征,极少研究射流倾角对下击暴流的风场影响,目前针对下击暴流倾角研究极为有限。早期 M. S. Mason 等^[21]利用风洞试验和数值模拟方法分析了下击暴流射流倾角对下击暴流水平风速的影响,结果表明带倾角的下击暴流对结构可能产生更大载荷;李波等^[22]基于冲击射流物理模型讨论了射流参数对下击暴流水平风速风剖面的影响,结果表明存在射流倾角时会造成风场的明显改变,在竖向会产生更大载荷。

但以上研究均基于冲击射流模型,未解决小缩尺比和风洞造价高昂问题,虽然壁面射流模型可解决缩尺比问题,但对带倾角下击暴流的风场模拟并未有学者研究,未来用于结构载荷研究存在局限性,因此射流倾角对下击暴流风场特性的影响有着进一步研究的必要性。

综上所述,为模拟带倾角下击暴流出流段风场,首先通过现有冲击射流试验验证带倾角的冲击射流数值计算的有效性,进而得到更多倾角与风速衰减速率的关系。随后考虑壁面射流模型可得到大尺度下击暴流风场,同时在壁面射流中引入协同流,采用风洞测速和烟迹试验以及计算流体力学数值模拟方法探究协同流对风速衰减的影响,并建立协同流与射流倾角的关系式。为基于协同流壁面射流模拟较大尺度的带倾角下击暴流和对未来用于结构载荷研究提供新的方式。

1 带倾角下击暴流风场特性

1.1 冲击射流试验工况和数值模型

李波等^[22]基于北京交通大学下击暴流模拟器模拟了下击暴流瞬态风场。图 1 为下击暴流物理试验示意图。

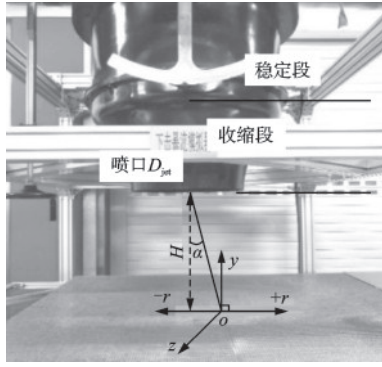


图1 下击暴流物理试验装置
Fig.1 Physical test setup for downburst

该试验通过喷嘴上方风扇段产生气流,途径稳定段和收缩段后由喷嘴射出,在升降平台和喷嘴间形成下击暴流,通过三维脉动风速测试仪测量风场风速。试验研究分析了射流倾角 α 分别为 0° 、 10° 、 20° 的风场特性,采用的几何缩尺为1:1 000,试验喷嘴射流风速为 $V=10$ m/s,射流直径 $D_{jet}=600$ mm,射流高度 $H=1D_{jet}$,风速测量水平区域为左右径向 $r=1\ 300$ mm。由于现有试验数据有限,为了反映更多倾角和大倾角下下击暴流风场特性,基于文献[22]物理试验边界条件,采用相同几何缩尺,通过数值计算方法进一步研究。

冲击射流计算域及边界条件如图2所示,计算域为整个圆柱风场,定义下击暴流射流倾角 α 为射流中心线与地面垂直线的夹角,射流中心线与地面的交点为射流中心 o ,定义径向位置 $+r$ 为风场前侧, $-r$ 为风场背侧。射流直径 $D_{jet}=600$ mm,风场边缘距射流中心 $R=10D_{jet}$,风场高度 $h=4D_{jet}$,根据实测总结下击暴流射流高度 H 与射流直径 D_{jet} 之比在1~2之间,现数值模拟广泛采用射流高度 $H=2D_{jet}$ 。射流管壁为零剪应力滑移壁面,地面为无滑移壁面;风场顶部和边缘为压力出口,回流湍流强度为1%,射流出口为速度出口,射流风速 $V_{jet}=10$ m/s,出流湍流强度为1%,为保证网格一致性,通过定义速度分量控制射流角度。

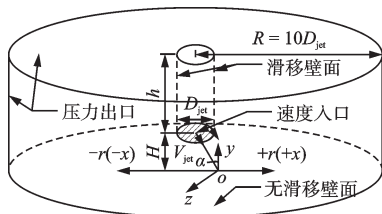


图2 计算域及边界条件示意
Fig.2 Schematic diagram of computational domain and boundary conditions

采用模拟下击暴流适用性较好的各向异性的雷诺应力模型(Reynolds stress equation model, RSM)进行数值模拟。由于RSM模型属于高雷诺数湍流模型,壁面附近由于分子的黏性作用,湍流脉动受到阻尼作用,模型不再适用,因此在近壁面区域采用增强壁面处理修正低雷诺数流动,保证壁面首层网格满足 $y^+ < 1$,其中 y^+ 定义为:

$$y^+ = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (1)$$

式中, Δy 是首层网格至壁面的高度,m; ν 为空气运动黏性系数, m^2/s ; τ 是壁面切应力,Pa; ρ 是空气密度, kg/m^3 。

基于计算流体力学商业软件Fluent 16.0进行非定常计算,计算时间步长为0.000 5 s。选用SIMPLEC算法求解压力速度耦合方程。为保证求解精度,动量、湍动能、湍动能耗散率和雷诺应力离散均采用二阶迎风格式。

1.2 模型验证

图3为网格划分示意图,网格划分采用分块六面体结构化网格,控制各套网格的地面首层网格高度和竖向网格增长率以加密近地面及入口附近网格,采用表1所示3套网格进行网格无关性验证。将全部风速时程数据进行时均化得到图4中倾角分别为 0° 、 10° 、 20° 的冲击射流前侧 $r=1.5D_{jet}$ 处的竖向风剖面($z=0$ m截面处)。由图可以看出三种网格的计算结果差别很小,已满足网格无关性,因此后续计算采用网格数量较少的粗网格参数计算。

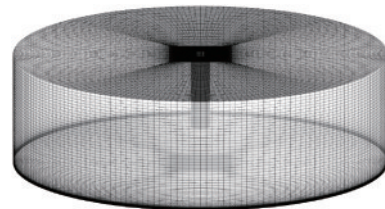


图3 网格划分示意
Fig.3 Schematic diagram of mesh division

表1 冲击射流模型网格参数

Table 1 Mesh parameters for impinging jet model

网格参数	粗网格	中网格	细网格
首层网格高度/m	4e-5	4e-5	2e-5
y^+ 最大值	0.85	0.85	0.42
竖向网格增长率	1.155	1.055	1.055
网格单元数	4 955 200	8 403 550	12 024 000

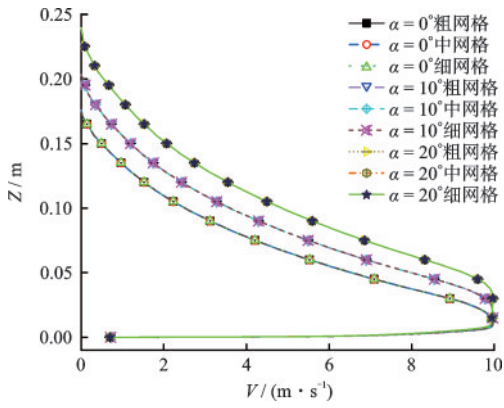


图4 三套网格在 $r=1.5D_{jet}$ 处平均风剖面

Fig.4 Average wind profiles at $r=1.5D_{jet}$ for three types of mesh

为了与风洞试验进行对比,图5给出了倾角分别为 0° 、 10° 、 20° 的下击暴流水平风速竖向风剖面与试验值和理论模型的对比,其中采用最大风速 V_{max} 和最大风速所在高度 Z_{max} 进行无量纲处理,得到自相似风剖面。由图可见,当 $\alpha=0^\circ$ 时,试验^[22]与Wood^[10]模型较为吻合,而数值模拟所得风剖面与

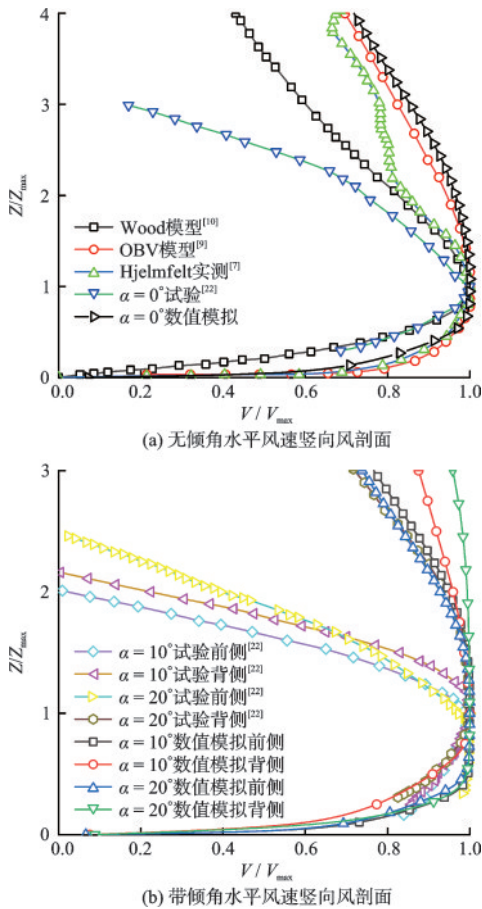


图5 无量纲水平风速竖向风剖面比较

Fig.5 Comparison of vertical profiles of dimensionless horizontal wind speed

OBV^[9]理论模型结果吻合较高,由于OBV模型为Vicroy通过圆柱形风场环形绕流理论建立,是对Wood模型进行形函数修正得到,与本研究风场绕流理论相同,因此数值模拟结果与Vicroy应具有一致性。当存在射流倾角时前侧模拟结果与实测值^[7]吻合较高,但与李波风洞试验值风速衰减趋势不一致,原因是选取径向位置不同导致的。因此实际下击暴流风剖面存在倾角,并且风剖面与径向位置有关。由上述比较分析表明数值模拟结果与实测值及理论模型具有很高的一致性,由于风洞试验缩尺比较小,实际测量高度远高于地面,越靠近地面风速衰减越快,因此数值模拟在进行微观风速研究上具精确性和有效性。

1.3 带倾角下击暴流风场特性

1.3.1 带倾角冲击射流流场特征

采用数值模拟方法详细研究下击暴流更多倾角对出流段风场特性的影响,取射流倾角 α 分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 。

当下击暴流在出流段完全发展时,三维平均风速云图如图6所示。可以看出,当无射流倾角时,风场前侧和背侧的风速云图呈阶梯状对称分布;当存在射流倾角时,随冲击射流倾角的增大,沿高度方向和径向的衰减速率均减小,风场逐渐出现不对称

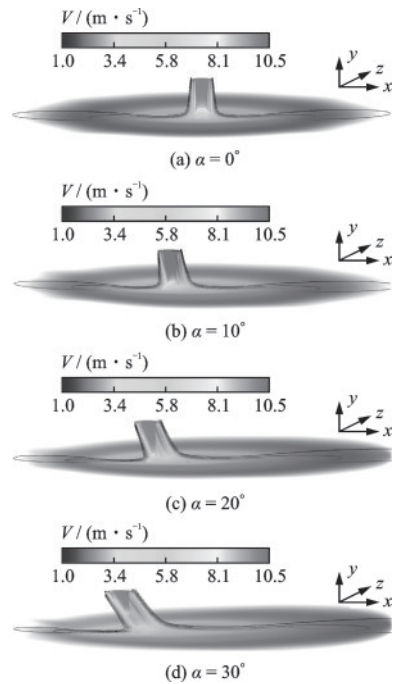


图6 不同倾角下击暴流三维平均风速云图

Fig.6 Three-dimensional contour maps of average wind speed for downbursts at different inclination angles

性,冲击射流整体向前侧倾斜,冲击地面面积随倾角的增大而增大;并且在前侧水平出流段,由于更多气流从前侧流出,近地面气流与周围流体速度差减小,对射流的黏性力阻碍减小,导致前侧强风影响范围随倾角增大而增大,背侧强风影响范围反而缩小。

1.3.2 平均风速

现实下击暴流与地面存在一定倾角,导致风场呈现三维非对称特性,但工程应用中往往关注最大平均风剖面所在位置,经研究^[21]表明最大风剖面所在位置为 $z=0$ m截面处。图7给出了在各倾角下前侧和背侧的最大平均风速所在径向位置的竖向平均风剖面和雷诺切应力剖面对比。

如图7(a)所示,在不同射流倾角下,前侧和背侧水平风速随高度的变化趋势与 0° 倾角相同,均在近地面迅速达到峰值后随高度衰减。在下击暴流前侧,随倾角的增大,水平风速峰值所在径向位置逐渐远离射流中心,高度位置略有升高,到达峰值后随倾角的增加衰减速率变缓。而在下击暴流背侧与前侧规律相反,随倾角的增大,水平风速峰值

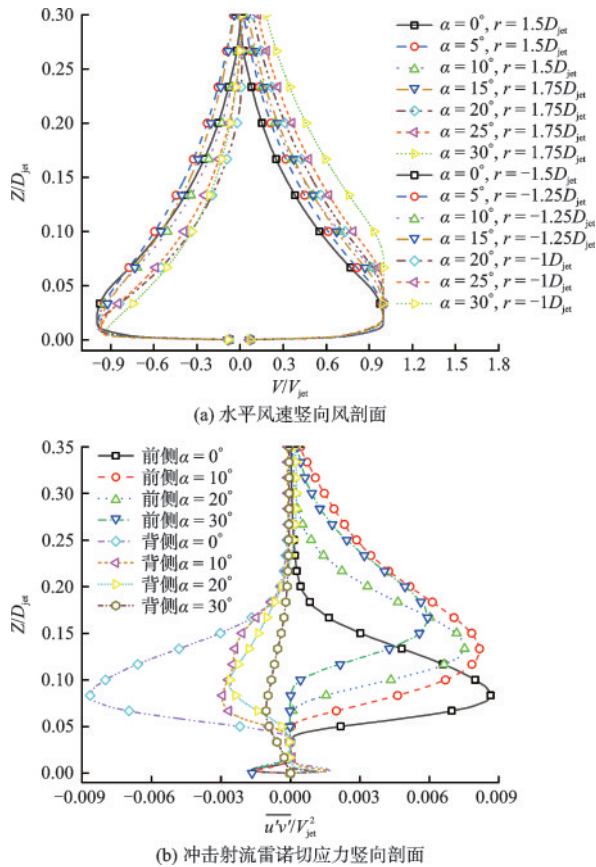


图7 前后侧最大风速位置竖向剖面对比

Fig.7 Comparison of vertical profiles of maximum wind speed positions at front and rear sides

所在径向位置逐渐靠近射流中心,高度位置逐渐降低,风速衰减速率加快。

由图7(b)可以看出,在风速峰值高度($Z \leq 0.05D_{jet}$)以下时,前侧和背侧气流雷诺切应力大小相近,但随高度上升前侧雷诺切应力明显大于背侧,表明前侧近地面气流受周围气流黏性阻力小于背侧,因此前侧和背侧的差异主要是倾角的存在使得前侧冲击地面时的黏性阻力小于背侧,使得前侧风速峰值衰减速率小于背侧,并且随倾角的增大,前侧风速峰值上方的气流黏性阻力逐渐缩小,导致风速衰减速率逐渐变缓。

通常认为下击暴流完整风剖面高度为水平风速从地面迅速增大到峰值后衰减至一半的高度范围^[20],因此选取 0° 倾角时最大风速所在高度 $Z_{max}=0.018D_{jet}$ 和峰值风速 V_{max} 衰减至一半时所在高度 $Z_{1/2}=0.11D_{jet}$,研究射流倾角对完整下击暴流径向剖面的影响。

图8给出了各倾角下下击暴流在 Z_{max} 和 $Z_{1/2}$ 高度处的水平风速径向分布曲线。可以看出下击暴流水平风速径向风剖面呈先线性增大至峰值后随径向距离增大呈非线性衰减的趋势,当径向距离

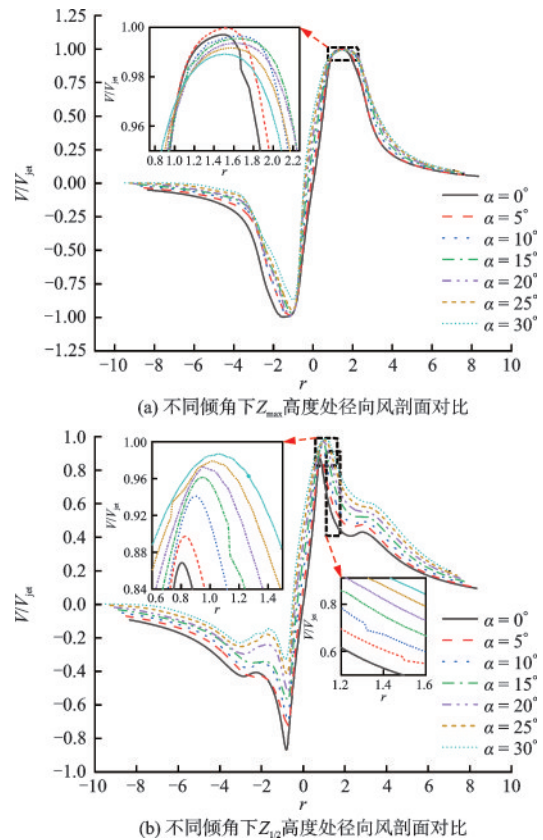


图8 各倾角下径向风剖面对比

Fig.8 Comparison of radial profiles at different inclination angles

$r > 6$ 后,平均风速逐渐趋于0。

在 Z_{\max} 高度处,当出现射流倾角时,前侧最大水平风速随倾角增大反而略微减小,但最大减幅为0.8%,可认为基本不变,但后侧水平风速随倾角增大明显减小,当射流倾角为 30° 时,减幅为24.06%。在 $Z_{1/2}$ 高度处,前侧最大水平风速明显增大,风速峰值在倾角为 30° 时达到最大增幅13.6%,并且随径向发展,在最大风速所在径向位置 $r=1.5D_{\text{jet}}$ 处达到最大增幅77.8%,之后风速增幅效果随径向减弱。因此对于风工程而言,应关注产生最大风速的一侧,研究重点为前侧风剖面,并且以半高风速的增大效应可反映出倾角致风速衰减效应,即半高风速增长率越大表明倾角致风剖面最大风速的衰减速率越慢。

1.3.3 倾角致风速衰减效应

定义无倾角半高风速与各倾角下冲击射流半高风速的比值为倾角致风速衰减系数 C_α 。见表2。表中可以看出随射流倾角 α 的增大,最大风速径向位置风剖面的半高风速 $V_{1/2}$ 逐渐增大,表明最大风速的衰减速率逐渐变缓,当射流倾角达 30° 时,最大风速径向位置的半高风速增大了77.8%,此时衰减系数 C_α 最小,表明风速衰减最为缓慢。通过非线性拟合,不同倾角时,倾角致风速衰减系数 C_α 满足(2)式,拟合曲线如图9所示。

$$C_\alpha = 1.38\alpha^{-0.2559} \quad (2)$$

表2 下击暴流倾角致风速衰减系数

Table 2 Wind speed attenuation coefficients induced by downburst inclination angles

$\alpha/(\circ)$	0	5	10	15	20	25	30
$V_{1/2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	4.96	5.52	6.31	7.04	7.72	8.31	8.82
C_α	1.000	0.899	0.786	0.708	0.642	0.597	0.562

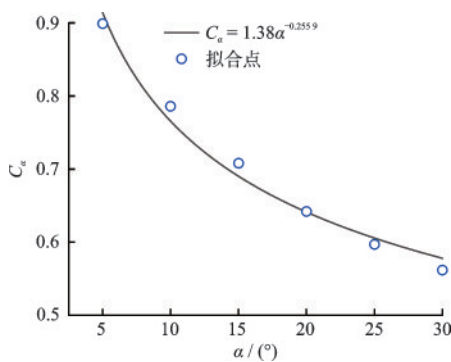


图9 倾角致风速衰减系数拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of wind speed attenuation coefficient induced by inclination angles

2 基于协同流壁面射流模拟下击暴流

壁面射流可模拟无倾角时下击暴流出流段风场,同时可解决冲击射流试验小缩尺比的问题^[20],但常规壁面射流试验未考虑下击暴流倾角对风速衰减变缓效应。考虑射流倾角存在时,近地面气流与周围流体速度差减小,对射流的黏性力阻碍减小,因此在壁面射流喷口上方引入协同流,减小喷口射流与周围气流的黏性阻力,从而实现壁面射流对下击暴流倾角致效应的模拟。

2.1 试验概况

试验主要研究带协同流壁面射流风场特性和流场可视化方法。壁面射流试验结构如图10所示。

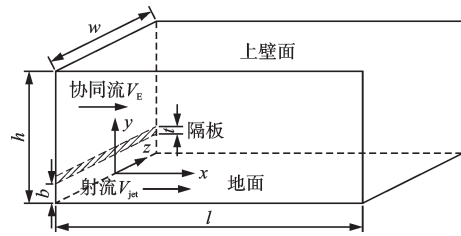


图10 McIntyre 试验结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of McIntyre's test setup

注: b 为射流喷口高度, h 为风洞高度, w 为横风向宽度, l 为顺流向长度, V_{jet} 为射流, V_E 为协同流

R. P. McIntyre^[23]基于风洞试验和钟永力等^[20]基于数值模拟对受限壁面射流几何参数分析表明风洞的高度和宽度对壁面射流发展有着较大影响。典型壁面射流应具有良好的二维性,风洞宽度设置为 $30b$ 可保证壁面射流的二维性;当风洞高度为 $20b$ 时,壁面射流顺流向发展在 $x/b=80$ 以前基本不受上壁面影响;McIntyre 试验中隔板厚度 $t=0.125b$ 时对风速半高值没有明显影响。因此设计受限壁面射流装置几何尺寸 $b=0.1\text{m}$, $h=20b$, $t=0.125b$, $l=80b$, $V_{\text{jet}}=10\text{ m/s}$ 。根据冲击射流风速矢量分量初步确定协同流大小为 $V_{\text{jet}}\cdot\tan\alpha$,即协同流比 $\beta=V_E/V_{\text{jet}}$ 分别为0.0875、0.176、0.268、0.364、0.466,大协同流比 β 取为0.5、0.6、0.7、0.8。

如图11所示,搭建带协同流的壁面射流试验装置,该壁面射流模拟器试验段由射流喷口、协同流喷口以及受限壁面组成,射流喷口布置有蜂窝阻尼网,分割大尺度入口涡流,降低气流湍流度,测量设备包括可竖向移动测量的脉动热线风速仪、烟雾发生器以及工业相机。试验在黑暗条件进行,定义 x 轴原点为喷口位置,顺流向数据采集位置分别为

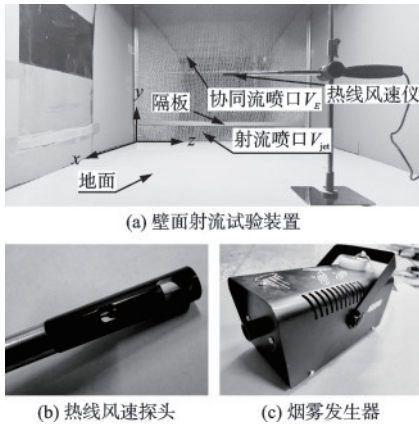


图 11 试验现场

Fig.11 Photos of field test

5b、10b、15b、20b、25b、30b、35b、40b、45b、50b、55b、60b。对每个位置进行三次数据采集,采样频率 256 Hz,将数据时均化后得到不同顺流向位置处水平风速竖向分布剖面。待风场稳定后,进行烟迹流场可视化试验,在射流喷口处注入烟雾,通过工业相机记录烟雾到达相同径向位置时的烟迹情况。在 Matlab 中对烟迹图片进行图像增强处理,直接灰

度变换,通过锐化处理突出烟迹边缘轮廓线,得到壁面射流流场烟迹图像。

2.2 壁面射流试验验证与结果分析

为了验证基于协同流壁面射流模拟下击暴流风场的有效性,通过对试验现场进行全尺寸数值模拟,并以已有下击暴流风场实测数据、理论模型以及带倾角下击暴流数据进行对比分析。

考虑壁面射流具有良好的二维性,参考图 10 中 McIntyre 试验的边界条件,定义平面数值计算域边界条件:地面和隔板设置为无滑移壁面;射流入口和协同流入口设置为速度入口,采用较小湍流强度,设置为 1%;侧面和上壁面为对称壁面,顺流出口为压力出口。采用四边形网格划分结构化网格,地面采用增强壁面处理,首层网格高度满足 $y^+ < 1$ 。地面附近和射流入口均匀加密处理。网格无关性检验后确定地面首层网格厚度为 $5e-5$ m,增长率为 1.2,网格单元数为 17 万。

流场稳定时,烟迹与流场迹线和流线重合,此时烟雾轨迹为气流速度矢量方向。图 12(a~i)为冲

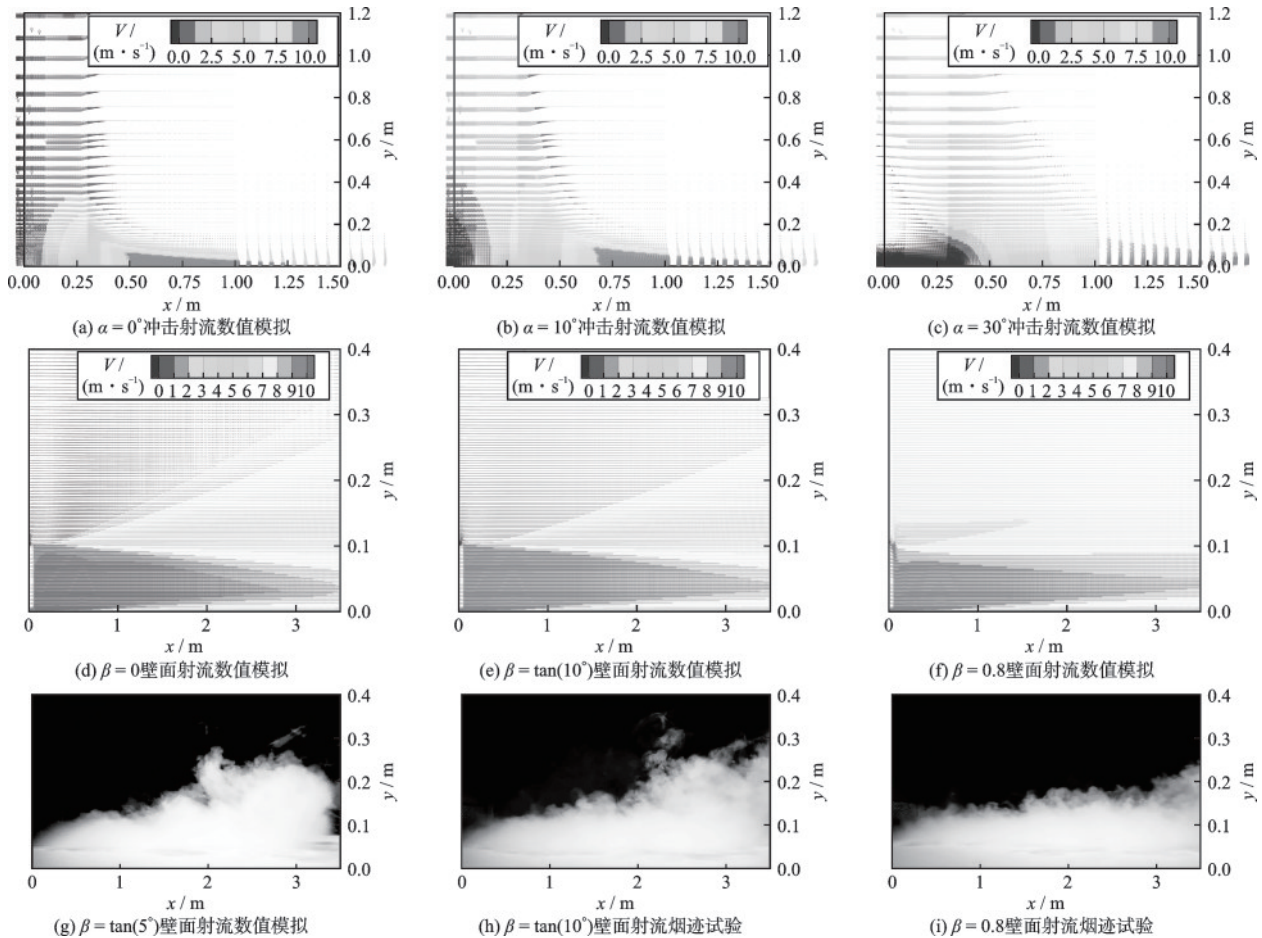


图 12 风速矢量对比

Fig.12 Comparison of wind speed vectors

击射流、壁面射流数值模拟稳定流场风速矢量图和壁面射流烟迹流场试验图片。可以看出冲击射流冲击地面后沿径向扩展区域($x \geq 1D_{jet}$)与壁面射流充分发展区域($x \geq 10b$)的近地面风速矢量图十分相似,在近地面湍流充分发展段风速沿高度先增大至峰值后逐渐衰减。

由图 12(d~e)可以看出,壁面射流由壁面边界层和外部剪切流组成,由于初始射流与周围流体存在速度差,对射流有着黏性力阻碍,同时受壁面的剪切约束,使壁面边界层与剪切流之间存在一个速度峰值,随着顺流距离的增大,射流前端能量由于黏性作用不断耗散,速度峰值逐渐减小;加入协同流的壁面射流中,由于射流与周围流体速度差减小,使得射流粘性耗散降低,气流扩散更贴近地面,且风速沿高度衰减速率和沿径向衰减速率均减小。

由图 12(g~i)烟迹试验可以看出,当采用弱协同流时,由射流喷口射出的气流沿高度扩散范围略微减小,当加入较大协同流时,气流在高度方向扩散范围明显降低,烟迹试验与仿真矢量云图一致。因此采用壁面射流可有效模拟下击暴流出流段风场,当加入协同流时,可反映出带倾角下击暴流出流段沿高度方向风速衰减速率减小效应。

图 13 给出了无倾角冲击射流试验、数值模拟在出流段径向位置 $1.5D_{jet}$ 处和无协同流壁面射流试验、数值模拟在顺流向 $x=50b$ 处的水平速度竖向剖面。风速所在高度 Z 选择 $Z/Z_{1/2}$ 进行无量纲,得到自相似剖面。可以看出,无协同流壁面射流试验和数值模拟的风剖面与冲击射流结果相对一致,同时壁面射流试验与 McIntyre 壁面射流试验值在近地面非常吻合。但在近壁面的试验值大于理论值和数值模拟值,而数值模拟值与理论值吻合程度较高,这是由于试验传感器存在尺寸受限,实际地面

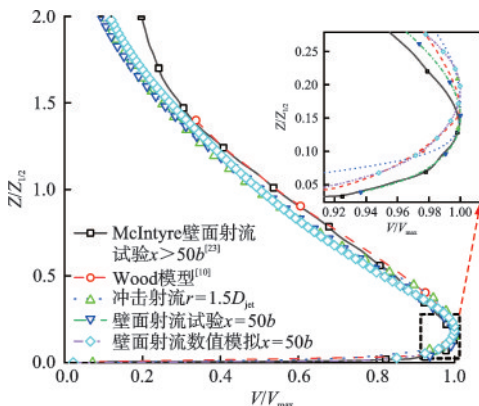
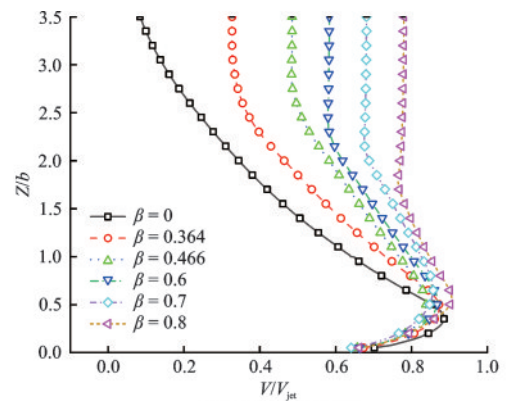


图 13 无倾角效应下的平均风剖面对比

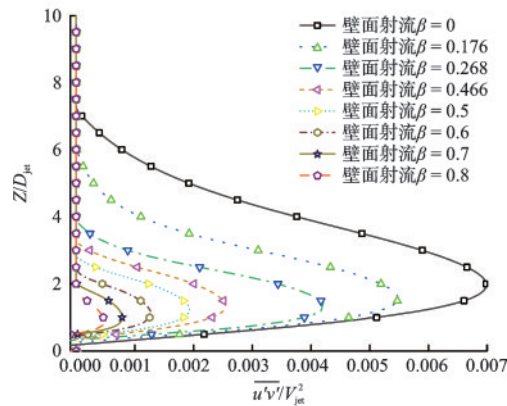
Fig.13 Comparison of average wind profiles without inclination angle effect

存在较厚边界层,测得高度高于理论模型,而越靠近地面风速衰减越快,使得试验结果无量纲时横轴增大。综上分析,壁面射流模型可实现对冲击射流模型出流段风剖面的模拟。

图 14 给出了在各协同流比下壁面射流的竖向平均风剖面 and 雷诺切应力剖面对比。图 14(a)为壁面射流顺流向距离 $x=50b$ 处不同协同流下平均水平风速竖向剖面,可以看出在壁面射流中引入协同流时,协同流越大,抑制风速衰减作用越明显,可反映出冲击射流中倾角致风速衰减效应。图 14(b)为壁面射流顺流向距离 $x=50b$ 处不同协同流下雷诺切应力竖向剖面,可以看出,引入协同流时,雷诺切应力随协同流的增大而减小,对射流喷口上方的黏性阻力逐渐减小。因此采用带协同流的壁面射流模型能够模拟下击暴流风速衰减速率变缓作用。



(a) 平均竖向风剖面



(b) 壁面射流雷诺切应力竖向剖面

图 14 倾角效应下平均竖向剖面对比

Fig.14 Comparison of average vertical profiles under inclination angle effect

2.3 协同流致效应

与冲击射流倾角致风速衰减效应对应,定义相同顺流距离下,无协同流壁面射流半高风速与各协同流比 β 下壁面射流相同高度处风速的比值为协同流致风速衰减系数 C_β , C_β 越大风速衰减越快,反之

C_β 越小衰减越慢,不同协同流比下协同流致风速衰减系数 C_β 见表3。

由表3可以看出,壁面射流风速衰减系数 C_β 与协同流比 β 和径向位置 x 有关。当协同流比 $\beta \leq 0.268$ 时,各径向位置风速衰减并不明显,当 $\beta \geq$

0.364时,风速衰减系数开始减小,在 $x=20b$ 时可基本满足冲击射流小倾角($\alpha=5^\circ$)的风速衰减系数0.899。当 $\beta=0.7$ 时,在 $40b < x < 45b$ 时壁面射流可满足下击暴流大倾角($\alpha=30^\circ$)所致的风速衰减系数0.562。

表3 壁面射流协同流致风速衰减系数 C_β
Table 3 Wind speed attenuation coefficients C_β induced by co-flow of wall jets

x/b	C_β									
	β									
	0	0.087	0.176	0.268	0.364	0.466	0.5	0.6	0.7	0.8
5	1	0.974	0.954	0.934	0.852	0.781	0.759	0.716	0.681	0.649
10	1	0.988	0.964	0.965	0.870	0.785	0.761	0.705	0.662	0.626
15	1	0.986	0.971	0.954	0.887	0.793	0.768	0.707	0.659	0.621
20	1	0.985	0.971	0.957	0.896	0.8	0.774	0.711	0.662	0.623
25	1	0.988	0.968	0.956	0.903	0.805	0.800	0.717	0.667	0.627
30	1	0.985	0.968	0.951	0.902	0.8	0.773	0.708	0.657	0.615
35	1	0.990	0.976	0.961	0.913	0.789	0.757	0.680	0.620	0.573
40	1	1.003	0.991	0.982	0.941	0.781	0.741	0.646	0.576	0.521
45	1	1.025	1.01	1.008	0.961	0.77	0.723	0.614	0.535	0.475
50	1	1.024	1.037	1.031	0.958	0.749	0.708	0.581	0.498	0.436

对协同流比 $\beta \geq 0.364$ 的风速衰减系数 C_β 进行拟合发现 C_β 与 β 满足与冲击射流倾角致效应相同的幂函数规律,如图15所示。

因此 C_β 改写为:

$$C_\beta = A \cdot \beta^B \quad (5)$$

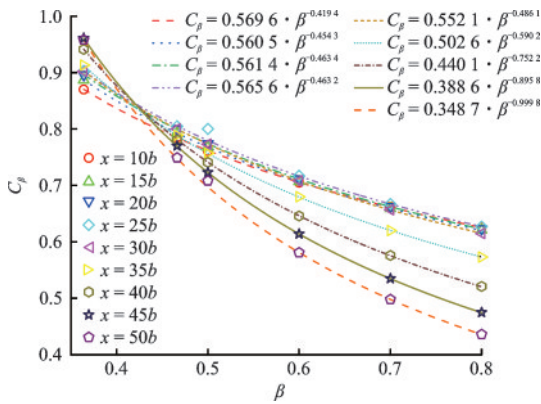


图15 协同流致风速衰减系数拟合曲线

Fig.15 Fitting curves of wind speed attenuation coefficients induced by co-flow

并将参数 A 和 B 对壁面射流顺流向位置 x 进行二次多项式拟合,得到拟合公式为:

$$A = 0.693 \left(\frac{x}{100b} \right) - 2.1019 \left(\frac{x}{100b} \right)^2 + 0.51514 \quad (3)$$

$$B = 1.623 \left(\frac{x}{100b} \right) - 5.1229 \left(\frac{x}{100b} \right)^2 - 0.55441 \quad (4)$$

3 带协同壁面射流模拟带倾角下击暴流方法

采用带协同流壁面射流模拟任意倾角下击暴流最大风速所在位置的平均风剖面,通过冲击射流倾角致风速衰减系数 C_α 与协同流致风速衰减系数 C_β 相对应,可以确定壁面射流顺流向距离和协同流风速。例如,采用协同流壁面射流模拟倾角 $\alpha=20^\circ$ 时下击暴流最大风速所在位置的平均风剖面,该倾角致风速衰减系数 $C_\alpha=0.642$,对应协同流致风速衰减系数 $C_\beta=0.642$ 。若选定协同流比 β 来确定顺流向距离 x ,取 $\beta=0.6$,根据式(5)可以计算顺流向距离 $x=42b$;若选定顺流向距离为 $x=35b$ 时,可以确定协同流比 $\beta=0.661$ 。

由图8可知倾角为 20° 时下击暴流最大风速出现在前侧 $r=1.75D_{jet}$ 处,因此图16对比了冲击射流最大风速剖面 and 壁面射流 $\beta=0.6, x=42b$ 时以及 $\beta=0.661, x=35b$ 时的平均风剖面。并与下击暴流实测数据对比可以看出,带倾角冲击射流与实测数据吻合良好,表明现实生活中下击暴流并不是保持无倾角冲击地面,两带协同流壁面射流的风剖面与

带倾角冲击射流风剖面吻合度很高,并且最大风速风速衰减速率几乎一致。因此采用带协同流壁面射流模型模拟任意倾角下的下击暴流是可行的,由于壁面射流可获得较大缩尺比下击暴流风场,并且常用风洞实验室为直流式风洞,而协同流风速不受实验条件限制,因此可改进直流式风洞,通过加入协同流,经济快捷的模拟较大倾角的下击暴流风场,此模拟方法具有广泛的适用性。

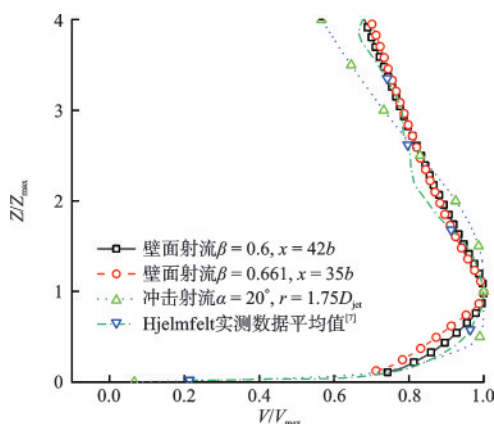


图 16 平均风剖面对比

Fig.16 Comparison of average wind profiles

4 结 论

基于冲击射流和带协同流壁面射流,采用风洞试验和计算流体力学的方法分别讨论了射流倾角对下击暴流出流段水平风速风剖面的影响和协同流对壁面射流水平风速风剖面的影响。主要结论如下:

(1)冲击射流数值模型模拟得到的下击暴流风剖面与风洞试验、理论模型、实测数据结果一致,验证了数值计算的有效性,可通过数值计算得到更多倾角对风剖面的影响。

(2)冲击射流存在倾角时,下击暴流风场呈现三维非对称特性,前侧水平风速峰值大于背侧,前侧相较无倾角时强风影响范围增大,最大水平风速随倾角增大反而略微减小,但最大减幅为0.8%,可认为基本不变,但在半高风速高度处,前侧水平风速峰值明显增大,在倾角为30°时达到最大增幅13.6%,并且随径向发展,水平风速达到最大增幅达77.8%。背侧风速变化规律则相反,水平风速随倾角增大明显减小,影响范围也缩小。

(3)射流倾角的存在使前侧风速峰值上方黏性阻力减小,减缓前侧风速衰减速率,以半高风速的

增大效应可反映出倾角致风速衰减效应,即半高风速增长率越大表明倾角致风速衰减速率越慢。因此提出了倾角致风速衰减系数 C_a 的表达式,其满足幂函数规律,随倾角的增大,衰减速率越小。

(4)风洞烟迹试验和数值模拟结果表明壁面射流可得到下击暴流出流段流场。当在壁面射流喷口上方引入不同协同流比的协同流时,能较好的模拟带倾角下击暴流前侧的风速衰减效应,当协同流比 $\beta \leq 0.268$ 时,风速衰减抑制效果不明显,当协同流比 $\beta > 0.364$ 时,壁面射流风速衰减系数 C_β 与协同流比 β 满足幂函数规律,与倾角致风速衰减系数 C_a 规律相同。

(5)通过建立倾角致风速衰减系数 C_a 和协同流致风速衰减系数 C_β 的对应关系,可实现采用壁面射流对任意倾角下下击暴流风剖面的模拟,为模拟较大缩尺比的带倾角下击暴流和用于结构载荷研究提供新的方式。

参考文献:

- [1] Fujita T T. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990,36(1):75-86.
- [2] Mengistu M T, Orlando A, Repetto M P. Wind and structural response monitoring of a lighting pole for the study of downburst effects on structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 240(1):105447.
- [3] 吉柏锋,邱鹏辉,柳广义,等.下击暴流作用下低矮双坡建筑表面风压特性研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(4):865-875.
Ji B F, Qiu P H, Liu G Y, et al. Characteristics of wind pressure on the surface of low-slope double-slope buildings under the action of downdraft storm[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2023, 31(4):865-875. (in Chinese)
- [4] 陈麒麟,汪大海,向越,等.输电线路下击暴流强风荷载最不利工况研究[J].防灾减灾工程学报,2024,44(1):90-98.
Chen Q L, Wang D H, Xiang Y, et al. Study on the most unfavourable working condition of transmission line under storm strong wind loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1):90-98. (in Chinese)
- [5] 霍林生,赵伟,陈超豪.下击暴流作用下单层球面网壳倒塌破坏研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):354-361.

- Huo L S, Zhao W, Chen C H. Study on the collapse damage of single-layer spherical mesh shell under downburst storm[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(2):354-361. (in Chinese)
- [6] 刘慕广, 胡家锴, 潘元鹏, 等. 基于现场实测的下击暴流风场特性研究[J/OL]. *工程力学*:1-8[2025-03-29].
Liu M G, Hu J K, Pan Y P, et al. Characterisation of downburst storm wind field based on field measurements [J/OL]. *Engineering Mechanics*: 1-8 [2025-03-29]. (in Chinese)
- [7] Hjelmfelt M R. Structure and lifecycle of microburst outflows observed in Colorado [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(8):900-927.
- [8] Oseguera R M, Bowles R L. A simple analytic 3-Dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow[R]. Washington: NASA, 1988.
- [9] Vicroy D D. A simple analytical asymmetric microburst model for downdraft estimation [R]. Washington: NASA, 1991.
- [10] Wood G S, Kwok K C S, Motteram N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89(6):535-552.
- [11] 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 and Industrial Aerodynamics: The Journal of the International Association for Wind Engineering*, 2008, 96(3):345-365.
- [12] 吉柏锋, 柳广义, 尹旭, 等. 地面粗糙度对下击暴流风剖面特征影响[J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(3):393-399.
Ji B F, Liu G Y, Yin X, et al. Influence of ground roughness on the profile characteristics of downdraft storm winds [J]. *Journal of Aerodynamics*, 2019, 37(3):393-399. (in Chinese)
- [13] Hao J, Wu T. Downburst-induced transient response of a long-span bridge: a CFD-CSD-based hybrid approach [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 179(1):273-286.
- [14] Asano K, Iida Y, Uematsu Y. Laboratory study of wind loads on a low-rise building in a downburst using a moving pulsed jet simulator and their comparison with other types of simulators[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 184(1):313-320.
- [15] Wu Z, Iida Y, Uematsu Y. The flow fields generated by stationary and travelling downbursts and resultant wind load effects on transmission line structural system [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 210(1):104521.
- [16] Abd-Elal E S, Mills J E, Ma X. Numerical simulation of downburst wind flow over real topography[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 172(1):85-95.
- [17] 涂佳黄, 吕海宇, 唐彪, 等. 下击暴流下单立柱三面式广告牌风压特性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(2):320-329.
Tu J H, Lyu H Y, Tang B, et al. Wind pressure characteristics of single-column three-sided billboards under downburst storm [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(2):320-329. (in Chinese)
- [18] Lin W E, Orf L G, Savory E, et al. Proposed large-scale modelling of the transient features of a downburst outflow [J]. *Wind and Structures*, 2007, 10(4):315-346.
- [19] 辛亚兵, 刘志文, 陈浩. CAARC 高层建筑标准模型下击暴流风洞试验[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(7):151-159.
Xin Y B, Liu Z W, Chen H. CAARC standard model of high-rise building under the impact storm flow wind tunnel test [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2023, 50(7):151-159. (in Chinese)
- [20] 钟永力, 晏致涛, 汪之松, 等. 下击暴流移动增大效应及带协同流壁面射流模拟方法[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(4):15-24.
Zhong Y L, Yan Z T, Wang Z S, et al. Moving enlargement effect of downdraft storm and simulation method of wall jet with synergistic flow [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(4):15-24. (in Chinese)
- [21] Mason M S, Wood G S, Fletcher D F. Influence of tilt and surface roughness on the outflow wind field of an impinging jet [J]. *Wind & Structures*, 2009, 12(3):179-204.
- [22] 李波, 李若琦, 田玉基, 等. 基于物理模拟的不同射流倾角下击暴流风场特征[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(11):215-222.
Li B, Li R Q, Tian Y J, et al. Physical simulation based wind field characteristics of strike-storm flow at different jet inclinations [J]. *Vibration and Shock*, 2023, 42(11):215-222. (in Chinese)
- [23] McIntyre R P. The effect of inlet geometry on the development of a plane wall jet [D]. Canada: University of Western Ontario, 2011.

(本文编辑:周小潭)