

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250105002

文章编号:1674-599X(2025)02-0031-13

引用格式:胡朋,龙佳慧,胡广德,等.稳态雷暴冲击风场下矩形梁风荷载特性试验研究[J].交通科学与工程,2025,41(2):31-43.

Citation: HU Peng, LONG Jiahui, HU Guangde, et al. Experimental study on wind load characteristics of rectangular beam under steady thunderstorm downburst wind field[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 31-43.

稳态雷暴冲击风场下矩形梁风荷载特性试验研究

胡朋¹,龙佳慧²,胡广德^{1,3},陈飞¹,陈婉婷^{1,4},韩艳¹

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 国际工学院,湖南 长沙 410114;
3.河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450015;
4.中铁十一局集团第四工程有限公司,湖北 武汉 430061)

摘要:【目的】考察稳态雷暴冲击风场对大跨度桥梁风特性及风荷载的影响。【方法】基于雷暴冲击风试验装置模拟了稳态雷暴冲击风场,以典型矩形梁断面为研究对象,探究了稳态雷暴冲击风场对矩形梁风压系数及风荷载特性的影响规律。【结果】所采用的雷暴冲击风试验装置能够产生精度较高的雷暴冲击风场,具备模拟稳态雷暴冲击风场的条件。在半径 $r=0.6D_{jet} \sim 2.75D_{jet}$ (D_{jet} 为喷嘴直径)范围内,雷暴冲击风水平风速的竖向风剖面整体呈“鼻子”状。不同高度处雷暴冲击风的风攻角大多处于负攻角状态,且在一定高度范围内,雷暴冲击风的风攻角绝对值随着高度的增加而增加。受喷嘴下方高压的影响,当矩形梁位于喷嘴正下方时,矩形梁断面整体表现为正压;随着径向距离的增加,雷暴冲击风风速逐渐由竖向演变为以水平方向为主,矩形梁表面风压逐渐变小。在 $r=0 \sim 2.0D_{jet}$ 范围内,矩形梁升力和阻力的变化最为剧烈,且在该范围内出现最大值;不同离地高度的矩形梁的升力和阻力随径位置的变化趋势基本相同。【结论】研究成果可为雷暴冲击风作用下桥梁等钝体结构的风荷载分布提供参考。

关键词:稳态雷暴冲击风;矩形梁;风场特性;风压系数;气动力

中图分类号:U441^{+.2}

文献标志码:A

Experimental study on wind load characteristics of rectangular beam under steady thunderstorm downburst wind field

HU Peng¹, LONG Jiahui², HU Guangde^{1,3}, CHEN Fei¹, CHEN Wanting^{1,4}, HAN Yan¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. International Institute of Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450015, China; 4. The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Railway 11th Bureau Group Corporation Limited, Wuhan 430061, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to investigate the influence of the steady thunderstorm downburst wind field on the wind characteristics and wind loads of long-span bridges. [Methods] The steady thunderstorm downburst wind field was simulated with a thunderstorm downburst wind simulator. Taking a typical rectangular beam section as the research object, the study explored the influence of the steady thunderstorm downburst wind field on the wind pressure coefficient and wind load characteristics of the rectangular beam. [Findings] The thunderstorm downburst wind simulator used in this study can generate thunderstorm downburst wind field with high precision, meeting the

收稿日期:2025-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52178451,52178452);湖南省自然科学基金项目(2024JJ2002,2024JJ3002);国家级大学生创新训练计划项目(S202310536057)

通信作者:胡朋(1985—),男,教授,主要从事工程结构风效应与智能防控方面的研究工作。E-mail: hupeng@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

conditions for simulating the steady thunderstorm downburst wind field. Within the scope of the radius r from $0.6D_{\text{jet}}$ to $2.75D_{\text{jet}}$ (D_{jet} is nozzle diameter), the vertical wind profile of the horizontal wind speed of the thunderstorm downburst wind overall exhibits a shape of nose. The wind attack angles of the thunderstorm downburst wind at different heights are mostly negative, and within a certain height range, the absolute values of the wind attack angles increase with increasing height. Due to the influence of high air pressure below the nozzle, when the rectangular beam is located directly below the nozzle, the entire rectangular beam section exhibits positive pressure. As the radial distance increases, the thunderstorm downburst wind speeds gradually evolve from vertical direction to primarily horizontal direction, and the wind pressures on the surfaces of the rectangular beam gradually decrease. Within the range of r from 0 to $2.0D_{\text{jet}}$, the changes in the lift and drag forces of the rectangular beam are the most drastic, and the maximum values appear within this range. The trends of the lift and drag forces of the rectangular beam at different heights from the ground vary similarly with changes in radial position. [Conclusions] The research findings can provide references for the wind load distributions of bluff body structures such as bridges under the thunderstorm downburst wind.

Key words: steady thunderstorm downburst wind; rectangular beam; wind field characteristic; wind pressure coefficient; aerodynamic force

雷暴冲击风是指在雷暴天气中产生的一股向地面冲击,然后向周围扩散的气流。这种非平稳强风将会在桥梁表面产生复杂的气动荷载,进而产生大幅度振动,从而给大跨度桥梁的抗风设计带来严峻挑战。此外,大跨度桥梁中的许多构件都是矩形断面形式,比如桥梁主梁、桥塔的横梁、桥墩等。因此,研究雷暴冲击风场下矩形梁表面荷载的空间分布特性对大跨度桥梁的抗风设计意义重大。

准确获取雷暴冲击风场特性是分析雷暴冲击风场下矩形梁表面风荷载特性的先决条件。早期相关学者通过现场实测、试验模拟和数值模拟等手段研究雷暴冲击风的风场特性,并取得了许多研究成果。二十世纪八九十年代,通过FUJITA^[1-2]最早在美国华盛顿某空军基地观测的雷暴冲击风的风速时程数据和HJELMFELT^[3]在美国中部科罗拉多州监测的雷暴冲击风数据,工程界开始关注这种非平稳强风并逐渐开展了深入的研究。近几年,LOMBARDO等^[4]对美国某一机场发生的雷暴冲击风进行了实测分析,得到了近地面雷暴冲击风场的特性。HUANG等^[5]采用超声波风速仪对山区地形的雷暴冲击风进行了现场实测,并详细分析了超声波风速仪采集的数据。研究表明,当雷暴冲击风最强烈时,其时变平均风攻角的变化范围为 $-5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。较大的风攻角以及风攻角的非平稳特性是雷暴冲击风区别于台风、龙卷风等非平稳风的显著特征。在物理试验方面,目前的雷暴冲击风模拟

装置包括冲击射流装置、多风扇主动控制风洞^[6-7]以及安装在大气边界层风洞中可控制的水平开合板^[8-9]。冲击射流装置可模拟雷暴冲击风发生的整个过程,且可考虑雷暴冲击风的空间变化。多风扇主动控制风洞和在大气边界层风洞中安装水平开合板的方法,能通过不断调试使模拟风剖面满足雷暴冲击风的经验风剖面。然而,这两种方法虽然能够部分再现雷暴冲击风场,但是没有考虑雷暴冲击风的空间变化。此外,前文已述,雷暴冲击风存在较大的风攻角,而这两种方法难以再现实际雷暴冲击风的风攻角。因此,一些研究者采用冲击射流装置进行试验研究。在冲击射流试验研究方面,MCCONVILLE等^[10]采用大比例雷暴冲击风试验装置模拟了不同几何缩尺比的移动型雷暴冲击风场。ROMANIC等^[11]通过雷暴冲击风试验装置研究了近地面大气边界层风和雷暴冲击风之间的相互作用。徐挺等^[12]、CHEN等^[13]研发了雷暴冲击风试验装置,并基于该装置研究了不同类型山丘对雷暴冲击风剖面及加速区的影响。在数值模拟方面,CHAY等^[14]采用 $k-\varepsilon$ 重整化群模型,对雷暴冲击风进行了数值模拟,研究了雷暴冲击风场的特性,并得到了不同径向位置的雷暴冲击风水平风速竖向风剖面曲线。ABOSHOSHA等^[15]采用大涡模拟(LES)方法模拟了4种不同粗糙度的雷暴冲击风场,研究了粗糙度对雷暴冲击风场的影响。试验结果表明,随着地面粗糙度的逐渐增大,雷暴冲击风最大水平风速

逐渐减小,最大水平风速出现的高度逐渐增加。ABD-ELAAL等^[16]对真实复杂地形中的雷暴冲击风场进行了数值模拟,研究了复杂地形下雷暴冲击风水平和竖向风速的变化规律。

针对雷暴冲击风对工程结构的影响,ELAWADY等^[17]在加拿大西安大略大学建造了大比例尺雷暴冲击风模拟装置,利用该装置开展了雷暴冲击风场下输电塔及多跨输电线气弹模型风洞试验,详细研究了不同雷暴冲击风场下输电塔及输电线的动力响应特性。ZHENG等^[18]采用经验模型模拟雷暴冲击风场,研究雷暴冲击风路径对输电塔体系的影响,研究结果表明,塔线系统的倒塌受雷暴冲击风中心运动路径的影响很大,强度相同但路径不同的雷暴冲击风可能导致系统中1~3座输电塔倒塌。ABOSHOSHA等^[19]提出了一种雷暴冲击风场下输电线风致响应的计算方法,该方法简单、精确,可为雷暴冲击风场下输电线体系的抗风设计提供参考。CAO等^[20]采用经验函数生成了雷暴冲击风的平均风速,采用大气边界层风谱生成了雷暴冲击风的脉动风速。在此基础上,合成了射流直径分别为600、1 200、1 800 m的雷暴冲击风场,研究了上述雷暴冲击风场对大跨度悬索桥抖振响应的影响。结果表明,尺寸越大的雷暴冲击风场对大跨度桥梁主梁峰值响应的影响越大,并指出在桥梁抗风设计中需要考虑雷暴冲击风的影响。HAO等^[21]采用冲击射流装置模拟了雷暴冲击风的风速时程,利用已有的现场测量数据,验证了模拟得到的雷暴冲击风时变平均风速的准确性,基于Hibert变换模拟了雷暴冲击风的非平稳脉动风场。在此基础上,对雷暴冲击风场下大跨度桥梁的抖振响应进行了时域分析。研究结果表明,桥梁结构在雷暴冲击风时变平均风速作用下的响应占据结构响应的主要部分,雷暴冲击风脉动风场对桥梁响应的影响相对较小。

综上所述,现有研究大多针对输电塔及高层建筑结构,针对雷暴冲击风场下桥梁结构风荷载特性及响应的研究较少。桥梁作为线状结构,对雷暴冲击风的空间变化比较敏感。为此,本文采用长沙理工大学雷暴冲击风试验装置,模拟静止型稳态雷暴冲击风场,采用眼镜蛇三维脉动风速仪对测点进行数据采集,研究稳态雷暴冲击风场的特性。并以长宽比2:1的矩形梁为研究对象,采用刚性模型测压试验测量矩形梁表面的风压,对比分析当矩形梁位于不同径向位置以及不同离地高度时,矩形梁表面

的平均风压系数、脉动风压系数以及气动力。

1 试验概况

1.1 雷暴冲击风试验装置

本文试验是在长沙理工大学雷暴冲击风试验装置上进行的,射流(或喷嘴)直径分别为400、600、800 mm,其中800 mm规格的喷嘴能产生15 m/s的最大射流速度,其他规格喷嘴产生的最大射流速度会更大。雷暴冲击风试验装置如图1所示。本文试验选用的喷嘴直径 $D_{jet}=600$ mm,射流高度 $H_{jet}=2D_{jet}$,射流速度 $v_{jet}=10$ m/s。

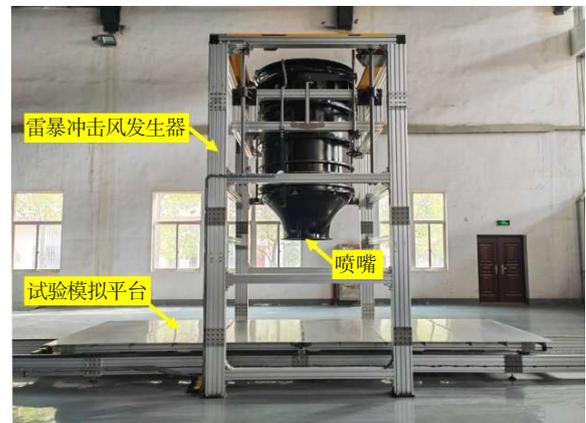


图1 雷暴冲击风试验装置

Fig. 1 Thunderstorm downburst wind simulator

1.2 风场试验工况

采用眼镜蛇三维脉动风速仪采集雷暴冲击风的风速时程、湍流强度、风攻角等数据,眼镜蛇三维脉动风速仪的采样频率为1 250 Hz,采样时间为60 s。本文测量高度从下到上依次为5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、60、70、80、90、100、110、120、130、140、150、160、170、180 mm,测点距射流中心的径向距离 r 从内到外依次为 0 、 $0.1D_{jet}$ 、 $0.2D_{jet}$ 、 $0.3D_{jet}$ 、 $0.4D_{jet}$ 、 $0.5D_{jet}$ 、 $0.6D_{jet}$ 、 $0.7D_{jet}$ 、 $0.8D_{jet}$ 、 $0.9D_{jet}$ 、 $1.0D_{jet}$ 、 $1.2D_{jet}$ 、 $1.4D_{jet}$ 、 $1.6D_{jet}$ 、 $1.8D_{jet}$ 、 $2.0D_{jet}$ 、 $2.25D_{jet}$ 、 $2.5D_{jet}$ 、 $2.75D_{jet}$ 、 $3.0D_{jet}$ 、 $3.5D_{jet}$ 、 $4.0D_{jet}$ 。测试内容为水平风速、湍流强度以及风攻角。

1.3 测压模型及试验工况

为方便揭示雷暴冲击风场下的气动力机理,研究对象选取长宽比为2:1的矩形梁,模型长 $L=1 000$ mm,宽 $B=100$ mm,高 $D=50$ mm。模型由3 mm厚的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)塑料板制成。在模型展向布

置了9排测压孔,分别位于A-A断面、B-B断面、C-C断面、D-D断面、E-E断面、F-F断面、G-G断面、H-H断面、I-I断面这9个断面上,如图2所示。每个断面上的测压孔总数为40个,测压孔的布置如图3所示,图中Y表示迎风面测点到下表面的距离,X表示下表面测点到下表面中心的距离。由于风一般会在矩形断面边角处分离得较为剧烈,因此在模型的4个角点适当加密测压孔。采用电子压力扫描阀测量矩形梁表面的风压(采样频率为330 Hz,采样时间为120 s),分别测试离地高度 $H=60、80、100$ mm,矩形梁距射流中心径向距离 $0 \sim 4.0D_{jet}$ 范围内的风压。矩形梁测压试验结果如图4所示。

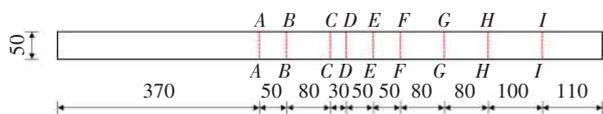


图2 展向测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of spanwise measurement points (unit: mm)

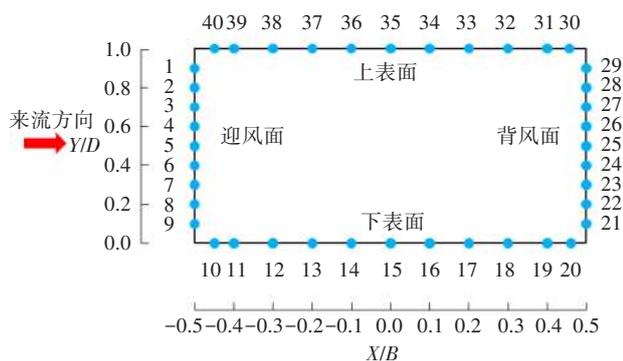


图3 断面测压点编号

Fig. 3 Numbers of pressure measurement points at section



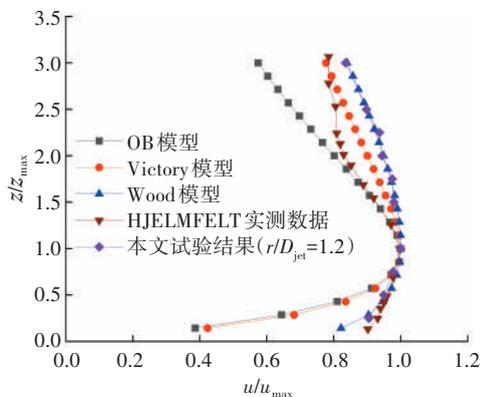
图4 矩形梁测压示意图

Fig. 4 Pressure measurement diagram of rectangular beam

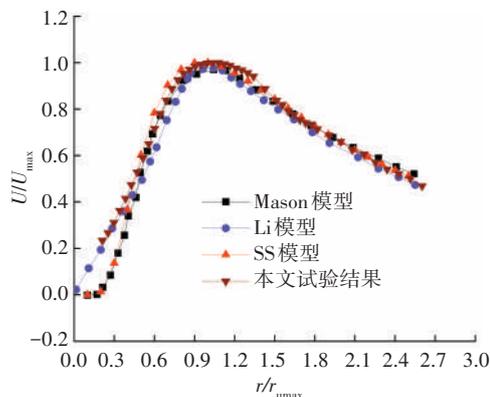
2 风场试验结果及分析

2.1 稳态雷暴冲击风场验证

图5(a)给出了距射流中心 $1.2D_{jet}$ 位置的稳态雷暴冲击风水平风速竖向风剖面与OB模型^[22]、Victory模型^[23]以及Wood模型^[24]经验风剖面的对比,还给出了HJELMFELT^[3]的实测风剖面。在图5(a)中, u 表示平均水平风速, u_{max} 表示最大水平风速, z 表示竖向高度, z_{max} 表示最大水平风速所对应的竖向高度。图5(b)给出了试验测得的离地高度 $z=20$ mm($0.033D_{jet}$)位置雷暴冲击风水平风速径向风剖面与Mason模型^[25]、Li模型^[26]以及SS模型^[27]的对比。在图5(b)中, r_{umax} 代表最大水平风速对应的径向距离, U 代表平均径向风速, U_{max} 代表最大径向风速。从图5可以看到,无论是雷暴冲击风水平风速竖向风剖面还是雷暴冲击风水平风速径向风剖面,均与实测数据和经验模型结果吻合较好。因此,本研究所采用的雷暴冲击风试验装置可以产生与实际雷暴冲击风相吻合的、精度较高的风场,可用于后续雷暴冲击风场特性的研究。



(a) 水平风速竖向风剖面



(b) 水平风速径向风剖面

图5 归一化后的水平风速风剖面

Fig. 5 Normalized horizontal wind speed profiles

2.2 不同径向位置雷暴冲击风水平风速竖向风剖面特性

图 6 给出了本试验测得的不同径向位置雷暴冲击风水平风速竖向风剖面的对比。从图 6 可以看出:

1) 在 $r=0.1D_{jet} \sim 0.5D_{jet}$ 范围内, 即当测点位于喷嘴正下方时, 雷暴冲击风向下冲击地面且尚未扩散, 水平风速在竖向高度范围内变化不大。

2) 在 $r=0.6D_{jet} \sim 2.75D_{jet}$ 范围内, 雷暴冲击风冲击地面后向四周扩散, 在 $r=0.6D_{jet}$ 的位置, 风剖面开始向稳定的雷暴冲击风水平风速竖向风剖面发展,

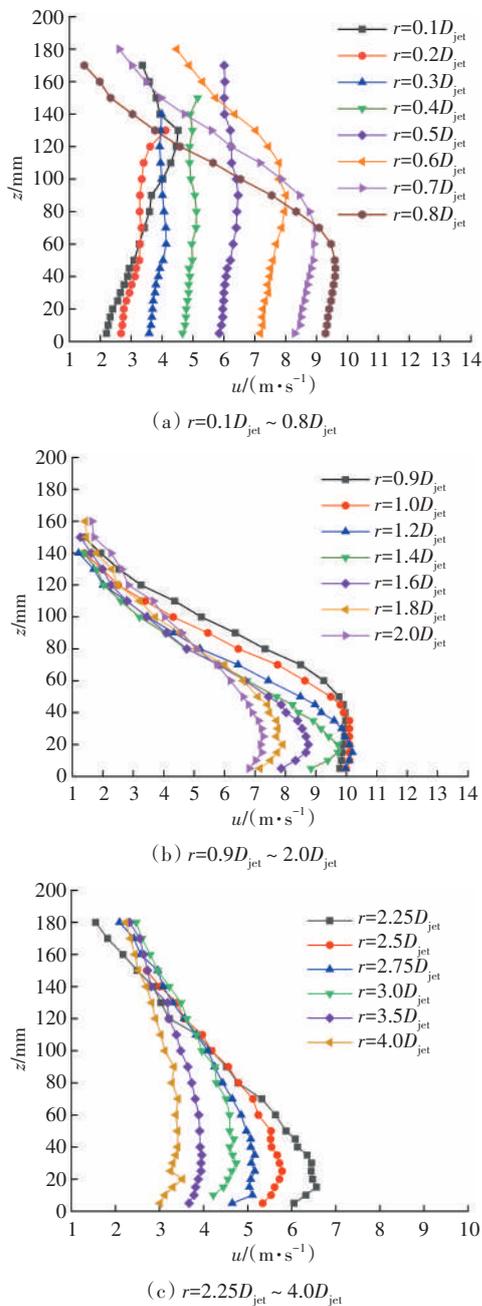


图 6 不同径向位置水平风速竖向风剖面

Fig. 6 Vertical wind profiles of the horizontal wind speed at different radial positions

“鼻子”状雷暴冲击风水平风速竖向风剖面开始形成。此外, 在这一径向范围内, 竖向风剖面在离地 $20 \sim 90 \text{ mm} (z/D_{jet}=0.033 \sim 0.150)$ 范围内出现峰值, 并且峰值的高度整体上随径向距离的增大而降低。

3) 在 $r=3.0D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内, 近地面雷暴冲击风的水平风速逐渐减小, 同一径向位置的雷暴冲击风水平风速的变化范围不大, 整体风剖面近似均匀。

2.3 不同高度处雷暴冲击风水平风速径向风剖面特性

图 7 给出了试验测得的不同高度处雷暴冲击风水平风速径向风剖面的对比。从图 7 可以看出:

1) 在 $z=10 \sim 35 \text{ mm}$ 高度范围内, 雷暴冲击风水平风速的径向风剖面基本重合, 水平风速随着径向距离的增加先增加后减小, 在 $r=1.0D_{jet}$ 左右的位置水平风速达到最大值, 然后逐渐减小。

2) 在 $z=40 \sim 50 \text{ mm}$ 高度范围内, 随着测点距射流中心距离的增大, 水平风速先增大后减小, 在 $r=0.9D_{jet}$ 左右的位置水平风速达到最大值。

3) 在 $z=60 \sim 140 \text{ mm}$ 高度范围内, 雷暴冲击风水平风速径向风剖面形状发生了明显变化。随着测点距射流中心距离的增大, 水平风速先迅速增大到极大值, 然后迅速减小, 出现波谷, 之后缓慢增大出现第二个峰值, 最后缓慢减小。此外, 在 $z=60 \sim 140 \text{ mm}$ 高度范围内, 随着测点离地高度的增加, 最大水平风速出现的位置距射流中心的距离逐渐减小, 波谷出现的位置距射流中心的距离也逐渐减小, 而第二个峰值出现的位置距射流中心的距离逐渐增大。在每一高度处, 随着测点距射流中心距离的增大, 在 $r=3.0D_{jet}$ 以后, 水平风速不断减小, 在达到某一位置后水平风速的变化较为缓慢, 这说明雷暴冲击风水平风速的影响范围有限, 超过这一范围后雷暴冲击风水平风速的变化不明显。

2.4 不同径向位置雷暴冲击风湍流强度剖面

图 8 给出了试验测得的不同径向位置雷暴冲击风湍流强度剖面的对比。由图 8 可知, 湍流强度在雷暴冲击风喷嘴附近表现为低脉动, 而在远离雷暴冲击风喷嘴的区域表现为高脉动。具体表现为:

1) 在 $0.3D_{jet} \leq r \leq 0.5D_{jet}$ 范围内, 即在喷嘴正下方的区域, 由于下沉气流在冲击试验模拟平台后还未开始扩散, 所以沿高度方向的湍流强度整体上变化不明显, 表现为低脉动。

2) 在 $0.6D_{jet} \leq r \leq 1.0D_{jet}$ 范围内, 即在喷嘴边缘区

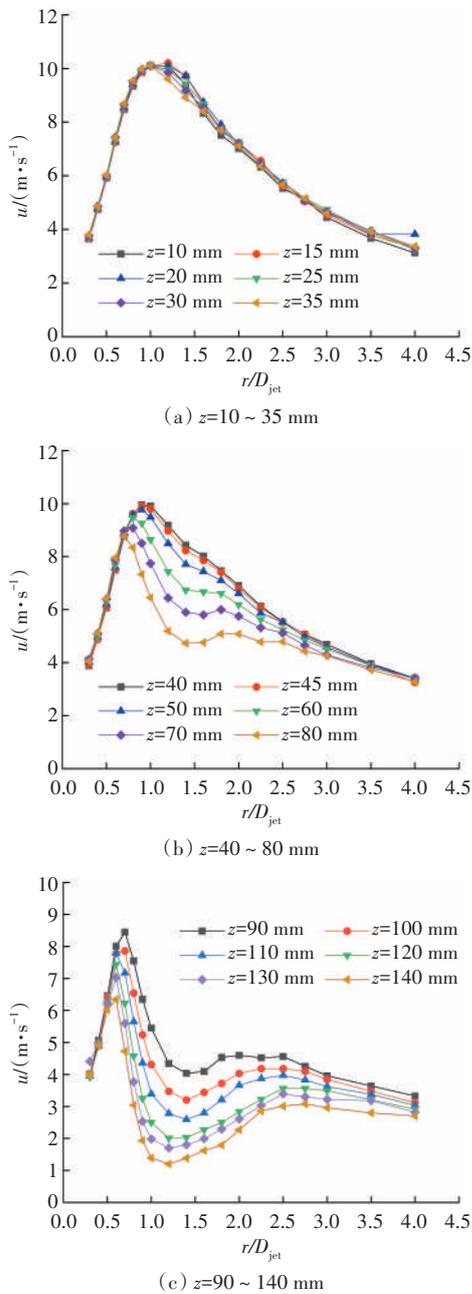


图7 不同高度处水平风速的径向风剖面

Fig. 7 Radial wind profiles of the horizontal wind speed at different heights

域,由于下沉气流冲击地面后沿径向向四周扩散,故近地面区域的湍流强度变化不明显。随着测点离地高度的不断增加,雷暴冲击风湍流强度也在不断增加。

3) 在 $1.2D_{jet} \leq r \leq 2.0D_{jet}$ 范围内,湍流强度在近地面表现为高脉动,随着离地高度的增加,雷暴冲击风湍流强度先减小后增大,湍流强度剖面形状呈“鼻子”状,最大湍流强度出现的高度整体上随着径向距离的增加逐渐降低。

4) 在 $2.25D_{jet} \leq r \leq 4.0D_{jet}$ 范围内,近地面湍流强度

明显增大,整体上表现为高脉动,湍流强度为0.3~0.4。此外,在这一径向范围内,湍流强度沿高度方向的变化规律不明显。

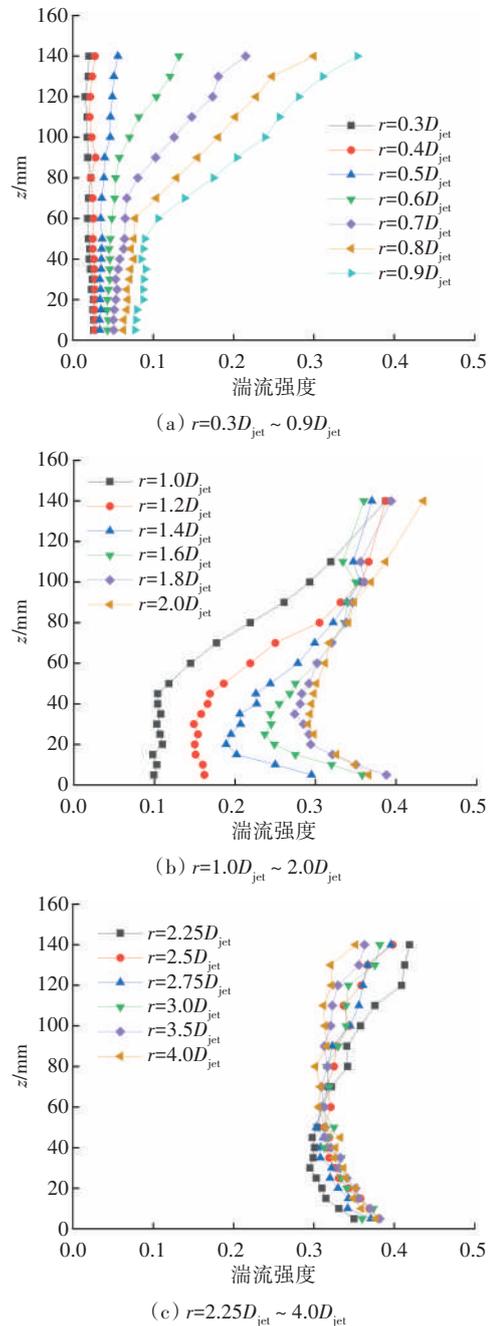


图8 不同径向位置雷暴冲击风湍流强度剖面

Fig. 8 Turbulent intensity profiles of thunderstorm downburst wind at different radial positions

2.5 不同径向位置风攻角沿高度方向的变化

图9给出了本试验测得的不同径向位置雷暴冲击风平均风攻角随高度的变化情况。从图9可以看出:

1) 在 $r=0.3D_{jet} \sim 0.7D_{jet}$ 范围内,雷暴冲击风风攻角的绝对值随高度的增加而增加,风攻角的变化范

围为 $-47.8^{\circ} \sim 2.6^{\circ}$ 。

2) 在 $r=0.8D_{jet} \sim 2.25D_{jet}$ 范围内,雷暴冲击风风攻角的绝对值随高度的增加先逐渐增大,然后减小,在离地高度 $z=130\text{ mm}$ 左右出现拐点,风攻角的变化范围为 $-29.4^{\circ} \sim 2.9^{\circ}$ 。出现拐点的原因可能是雷暴冲击风冲击地面后,下方气流的挤压作用以及下沉气流的回弹作用使得风攻角的绝对值在一定的离地高度后不再增加。

3) 在 $r=2.5D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内且离地高度 $z \leq 120\text{ mm}$ 的情况下,雷暴冲击风风攻角的绝对值基本上随着离地高度的增加逐渐增大。

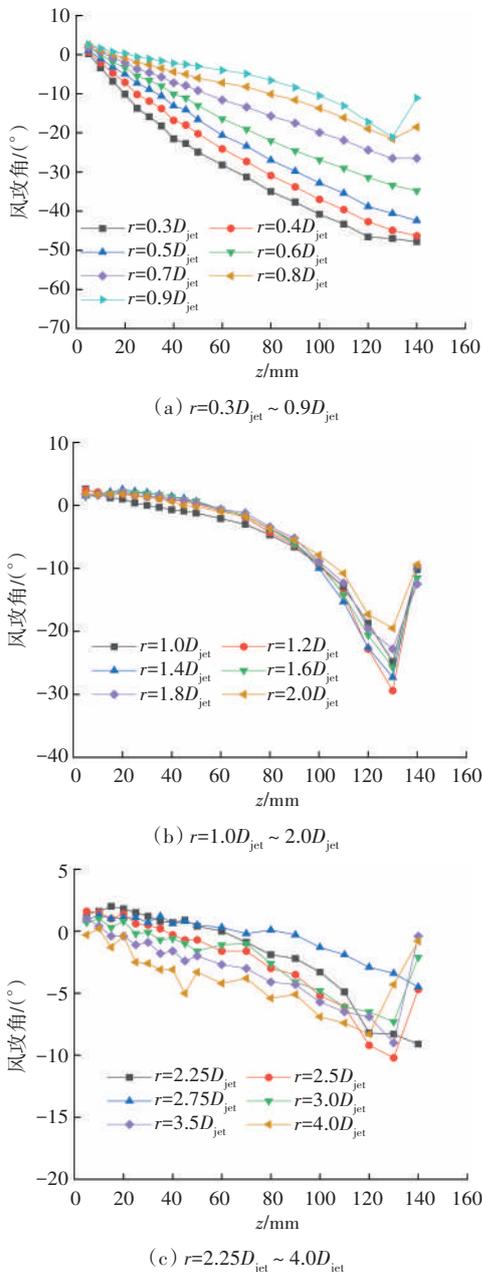


图9 雷暴冲击风平均风攻角随高度的变化
Fig. 9 Variation of average wind attack angle of thunderstorm downburst wind with height

4) 在 $r=0.3D_{jet} \sim 2.0D_{jet}$ 范围内且离地高度($z \leq 130\text{ mm}$)相同的情况下,随着测点距射流中心距离的增加,雷暴冲击风风攻角的绝对值逐渐减小。另外,在 $r=0.3D_{jet} \sim 2.0D_{jet}$ 范围内,受雷暴冲击风下沉气流的抬升作用,近地面雷暴冲击风的风攻角大多处于正攻角状态。总体上,雷暴冲击风作用下风攻角较大,远超常规平坦均匀场地上良态风的风攻角范围。

3 矩形梁测压试验结果及分析

3.1 风压系数计算

1) 平均风压系数。

$$C_{pa,i}(t) = \frac{P_{a,i}(t)}{\frac{1}{2} \rho V_{jet}^2} \quad (1)$$

式中: $C_{pa,i}(t)$ 为刚性模型表面 i 点的平均风压系数; $P_{a,i}(t)$ 为刚性模型表面 i 点的平均压力值; V_{jet} 为射流速度; ρ 为空气密度,本文取 1.225 kg/m^3 。

2) 脉动风压均方根系数。

$$C_{pr,i}(t) = \frac{P_{r,i}(t)}{\frac{1}{2} \rho V_{jet}^2} \quad (2)$$

式中: $C_{pr,i}(t)$ 为刚性模型表面 i 点的脉动风压均方根系数; $P_{r,i}(t)$ 为刚性模型表面 i 点的脉动风压均方根值。

3.2 矩形梁气动力计算

为了研究雷暴冲击风场下不同径向位置矩形断面的风荷载特性,本文通过对每个截面测点的风压结果进行积分来获得断面的受压时程,进而得到每个截面的阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 以及扭矩系数 C_M 的均值和均方根值。矩形断面所受到的三个方向的气动力的表达式为:

$$L_V = \sum_{i=1}^N P_i(t) S_i \cos \beta_i \quad (3)$$

$$D_H = \sum_{i=1}^N P_i(t) S_i \sin \beta_i \quad (4)$$

$$M = \sum_{i=1}^N P_i(t) S_i \cos \beta_i \cdot Y_i + \sum_{i=1}^N P_i(t) S_i \sin \beta_i \cdot X_i \quad (5)$$

式(3)~(5)中: L_V 、 D_H 、 M 分别为体轴坐标系中某断面相对于气动中心的升力、阻力和力矩; S_i 为 i 点的积分长度; β_i 为 i 点的法线与水平面的夹角; X_i 、 Y_i 分别为 i 点到轴心的横向和垂直距离; N 为测点个数; $P_i(t)$ 为刚性模型表面 i 点在 t 时刻的压力。矩形梁气动力示意图见图10。

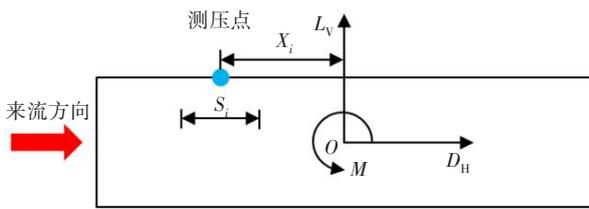


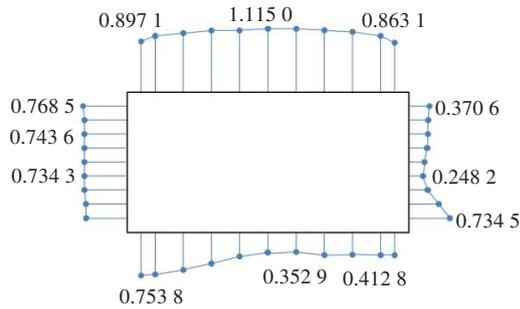
图10 矩形梁气动力示意图

Fig. 10 Aerodynamic force diagram of rectangular beam

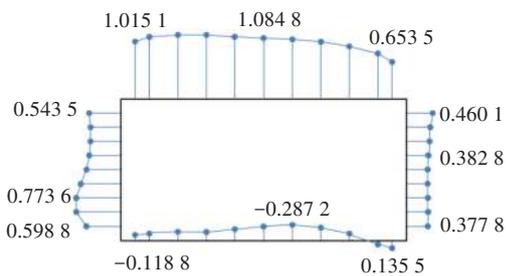
3.3 典型测点风压系数的变化规律

当雷暴冲击风发生时,相对于射流中心不同径向位置的矩形梁表面风压的分布特性具有明显差异。图11~12给出了 $r=0, 0.4D_{jet}, 0.8D_{jet}, 1.0D_{jet}, 1.2D_{jet}, 2.0D_{jet}, 3.0D_{jet}, 4.0D_{jet}$ 处跨中 $C-C$ 断面矩形梁表面风压系数的分布情况。从图11~12可以看出:

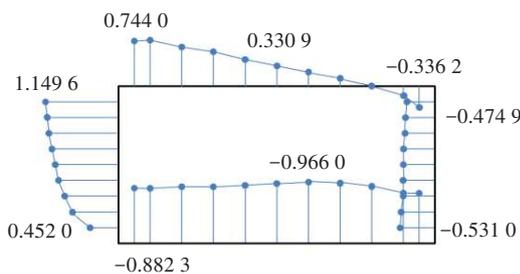
1) 当矩形梁左侧边缘位于喷嘴正下方时($r=0$),下沉气流冲击矩形梁表面,受喷嘴下方高压的影响,矩形梁表面的风压整体上为正压。表面风压系数表现为:平均风压系数在迎风面、下表面、背风面及上表面均为正值,其中迎风面的风压系数基



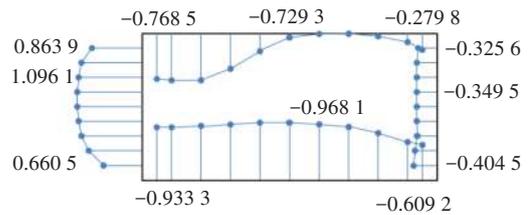
(a) $r=0$



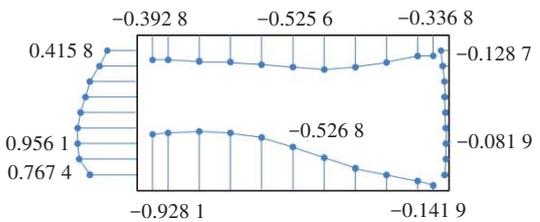
(b) $r=0.4D_{jet}$



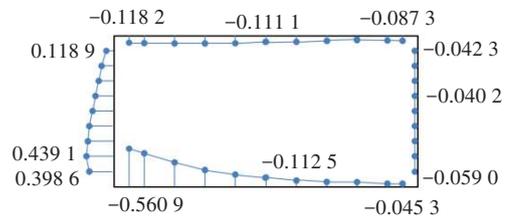
(c) $r=0.8D_{jet}$



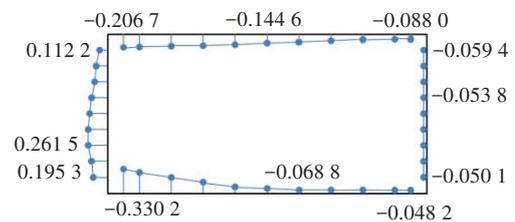
(d) $r=1.0D_{jet}$



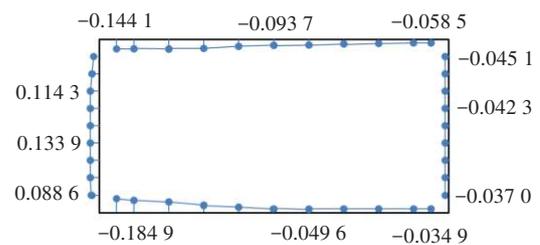
(e) $r=1.2D_{jet}$



(f) $r=2.0D_{jet}$



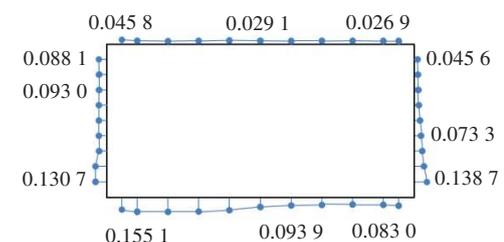
(g) $r=3.0D_{jet}$



(h) $r=4.0D_{jet}$

图11 不同径向位置矩形梁风压系数均值

Fig. 11 Average wind pressure coefficients of rectangular beam at different radial positions



(a) $r=0$

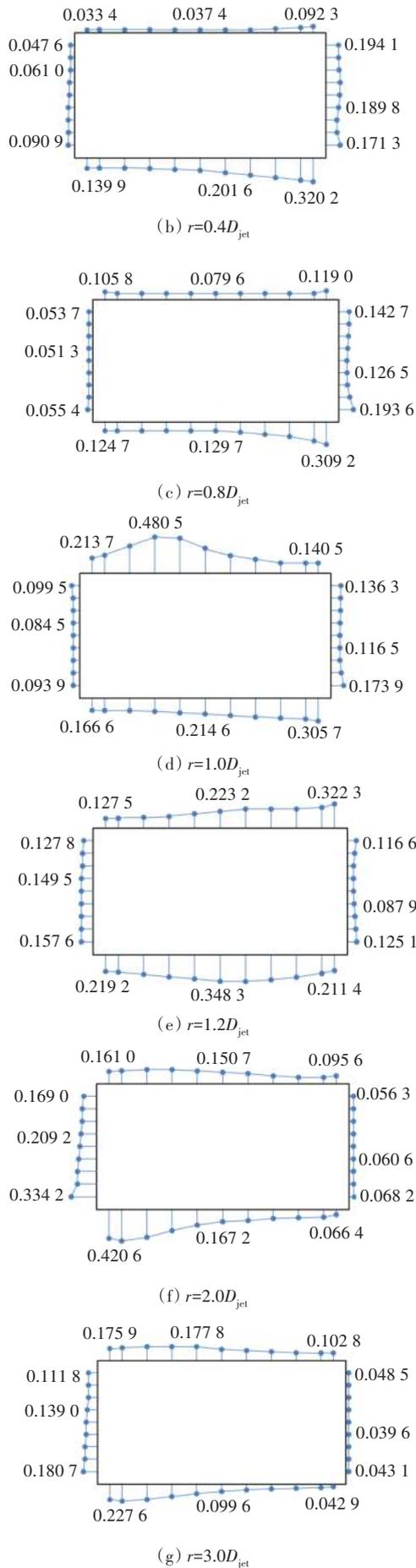


图 12 不同径向位置矩形梁脉动风压均方根系数

Fig. 12 Root mean square coefficients of fluctuating wind pressure of rectangular beam at different radial positions

基本上不随离地高度发生变化;在下表面,其上游表面的风压系数均值大于其下游表面的风压系数均值;背风面的风压系数沿高度方向先减小后增大;上表面的风压系数均值从上游到下游先增大后减小。表面脉动风压均方根系数表现为:迎风面的沿高度方向逐渐减小;下表面的从上游到下游先增大后减小;背风面的沿高度方向逐渐减小;上表面的整体上变化不大。

2) 在 $r=0.4D_{jet} \sim 1.0D_{jet}$ 范围内,矩形梁表面的风压也由最开始的正压逐渐向负压演变(正压逐渐减小为负压),下表面最开始出现负压,其次是背风面,最后是上表面。

3) 随着测点逐渐远离射流中心 ($r=1.2D_{jet} \sim 2.0D_{jet}$),雷暴冲击风风速由竖向逐渐演变为以水平方向为主,迎风面平均风压系数曲线沿高度方向逐渐向“鼻子”状雷暴冲击风剖面演变。表面风压系数均值表现为:迎风面风压系数均值始终为正值,且风压系数均值沿高度方向先增大后减小,这与雷暴冲击风水平风速竖向风剖面的分布规律一致;下表面风压系数均值整体上为负值,风压系数均值的绝对值从上游到下游整体上逐渐减小;背风面风压系数均值整体上为负值,且风压系数均值基本上不随离地高度发生变化;上表面风压系数均值整体上为负值。表面脉动风压均方根系数表现为:迎风面的随着高度的增加逐渐减小;下表面的从上游到下游先增大后减小;背风面的基本上不随高度发生变化;上表面的变化趋势与下表面的基本一致。

4) 在 $r=3.0D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内,雷暴冲击风水平风速竖向风剖面近似均匀,矩形梁表面风压系数均值整体上较小。表面风压系数均值表现为:迎风面平均风压系数均值为正值,沿高度方向变化不大;下表面风压系数均值为负值,其绝对值从上游到下

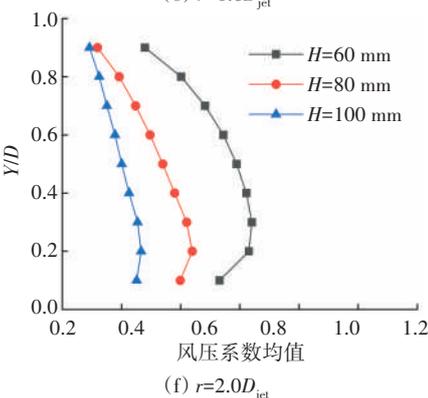
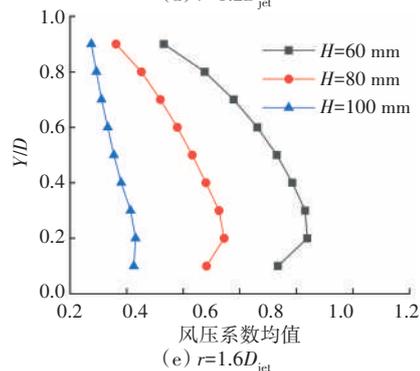
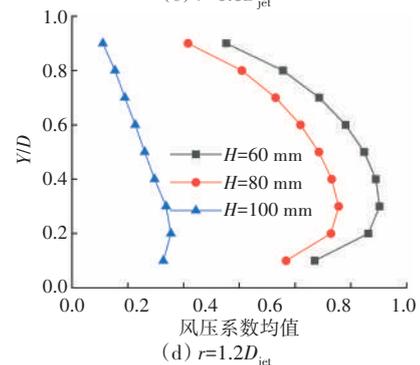
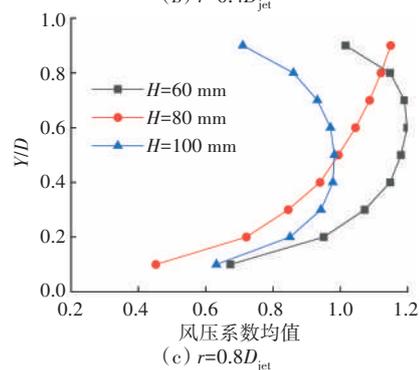
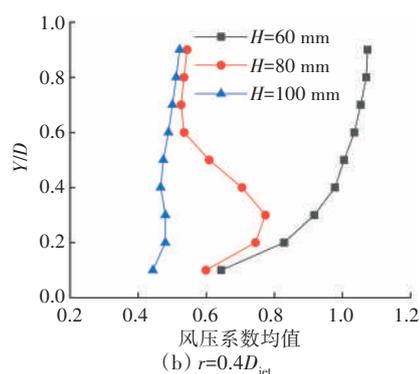
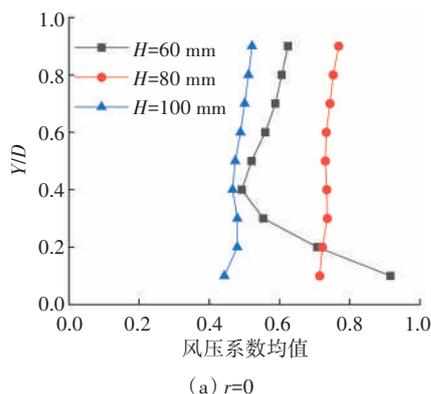
游逐渐减小;背风面风压系数为负值,沿高度方向基本上没有发生变化;上表面风压系数的变化趋势与下表面的一致。脉动风压均方根系数的总体表现为:上下表面越靠近迎风面的位置,其值越大,而背风面的脉动风压均方根系数最小。

5) 对比 C-C 截面不同径向位置的风压系数可知:迎风面平均风压系数在 $r=0.8D_{jet}$ 处出现极值,下表面平均风压系数在 $r=1.0D_{jet}$ 处出现极值,背风面和上表面受下沉气流的影响,在 $r=0$ 处出现极值。此外,通过试验发现,当测点的径向距离相同时,越远离跨中截面,其风压系数均值越小。

3.4 离地高度对矩形梁风压系数的影响

本节仅选取 C-C 截面(跨中截面)进行分析。图 13 给出了三种离地高度的矩形梁 C-C 断面平均风压系数沿径向的变化。限于篇幅,仅给出迎风面的情况。从图 13 可以看到,在 $r=0 \sim 0.8D_{jet}$ 范围内,三种离地高度的矩形断面迎风面测点的平均风压系数变化较为剧烈:当矩形断面位于雷暴冲击风正下方时($r=0$),由于受雷暴冲击风冲击地面后反弹的影响,离地高度较低($H=60\text{ mm}$)的矩形断面迎风面测点的平均风压系数在高度方向上并不相等,而是随着离地高度的增加,先减小后增加;随着径向距离的增加($r=0.4D_{jet} \sim 0.8D_{jet}$),离地高度 $H=80、100\text{ mm}$ 的矩形断面迎风面平均风压系数沿高度方向基本上先增大后减小。

随着径向距离的进一步增加($r=1.2D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$),三种离地高度的迎风面测点平均风压系数曲线逐渐与“鼻子”状雷暴冲击风水平风速竖向风剖面类似,即随着高度的增加迎风面测点的平均风压系数沿高度方向先增加后减小。此外,在 $r=1.2D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内,在径向位置和竖向高度相同的情况下,离地高度越低测点的平均风压系数均值越大。



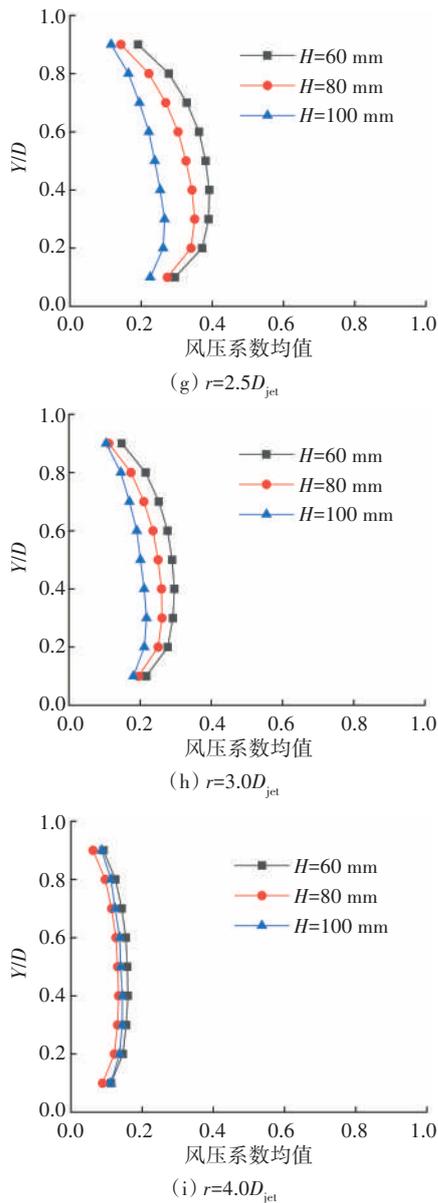


图13 不同离地高度矩形梁平均风压系数

Fig. 13 Average wind pressure coefficients of rectangular beam with different heights from the ground

3.5 矩形梁表面气动力特性

图14给出了雷暴冲击风场下离地高度80 mm处矩形断面跨中C-C断面的气动力随径向位置的变化情况。由图14可知,矩形断面的升力总体上为负值,随着径向距离的增加,从 $r=0.3D_{jet}$ 开始,矩形断面升力的绝对值逐渐增大,在 $r=0.7D_{jet}$ 位置其绝对值达到最大,之后逐渐减小,升力逐渐由负值变为正值,在 $r=1.2D_{jet}$ 位置达到正向最大值。在 $r=1.4D_{jet}$ 以后,矩形断面升力绝对值略有减小,但整体上变化不大。对于矩形断面的阻力,随着径向距离的增加,从 $r=0$ 开始,矩形断面阻力由负值逐渐变化为正值,在 $r=0.9D_{jet}$ 位置达到最大值,之后逐渐减小。对

比矩形断面升力和阻力的变化趋势可以发现,在雷暴冲击风场下在 $r=0 \sim 2.0D_{jet}$ 范围内,矩形断面升力和阻力的变化最为剧烈,升力和阻力的最大值也出现在这一范围内。在 $r=2.0D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内,雷暴冲击风风速以水平方向为主,但水平风速较小,矩形断面的升力和阻力整体上变化不大。

图15给出了雷暴冲击风场下不同离地高度的矩形梁C-C断面升力和阻力随径向距离的变化趋势。由图15可看出,在不同离地高度下矩形断面的升力和阻力随径向位置的变化趋势基本相同,但离地高度越低矩形断面升力绝对值的最大值越大,而不同离地高度下矩形断面阻力的最大值相差不大。

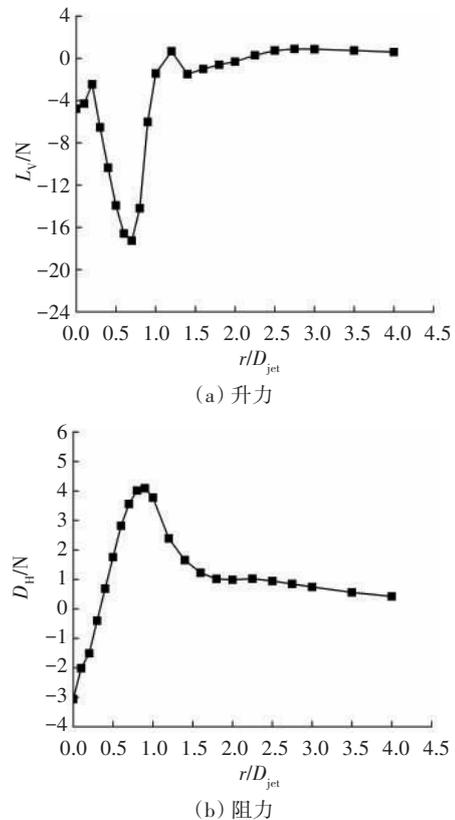
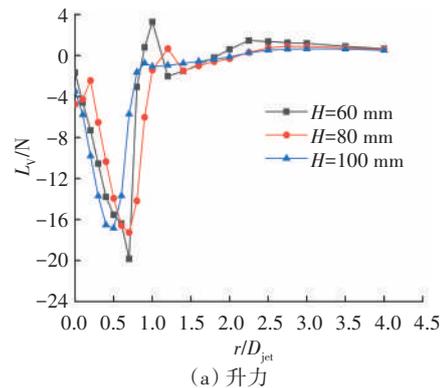


图14 不同径向位置矩形梁气动力变化

Fig. 14 Variation of aerodynamic force of rectangular beam at different radial positions



(a) 升力

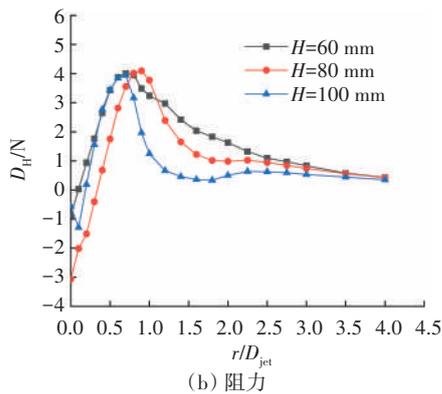


图15 不同离地高度矩形梁气动力随径向位置的变化

Fig. 15 Variation of aerodynamic forces of rectangular beam at different heights from the ground with radial position

4 结论

本文基于雷暴冲击风试验装置,模拟了静止型稳态雷暴冲击风场,研究了稳态雷暴冲击风场下矩形梁的风荷载特性,得到的主要结论如下:

1) 本试验所采用的雷暴冲击风试验装置能够产生较为优良的、精度较高的稳态雷暴冲击风场,可用于雷暴冲击风场特性的研究。

2) 对于稳态雷暴冲击风场,在径向距离 $r=0.6D_{jet} \sim 2.75D_{jet}$ (D_{jet} 为喷嘴直径) 范围内,雷暴冲击水平风速竖向风剖面呈“鼻子”状,并且最大峰值出现的高度随着径向距离的增大而降低。在 $z=60 \sim 140$ mm 高度范围内,雷暴冲击风水平风速径向风剖面形状发生了明显的变化。随着测点距射流中心距离的增大,水平风速先迅速增大到极大值,然后迅速减小,之后缓慢增大出现第二个峰值,最后又缓慢减小。

3) 不同高度的雷暴冲击风的风攻角大多数处于负攻角状态,且在一定高度范围内,雷暴冲击风风攻角的绝对值随着离地高度的增加而增加。此外,在雷暴冲击风冲击地面后,受下方气流的挤压作用以及下沉气流的回弹作用,部分区域的风攻角在高度方向上出现拐点。总体而言,雷暴冲击风作用下的风攻角较大,远超常规平坦均匀场地上良态风的风攻角范围。

4) 当矩形梁位于喷嘴正下方时($r=0$),下沉气流冲击矩形梁表面,受喷嘴下方高压的影响,矩形梁表面的风压整体为正压。随着测点逐渐远离射流中心($r=1.2D_{jet} \sim 2.5D_{jet}$),雷暴冲击风风速由竖向逐渐演变为以水平方向为主,由于气流的分流,矩形梁表面的风压也由最开始的正压逐渐向负

压演变,迎风面的平均风压系数曲线逐渐向“鼻子”状演变。当 $r=3.0D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 时,雷暴冲击风水平风速竖向风剖面近似均匀,矩形梁表面风压系数均值整体上较小。此外,在同一径向位置,越远离跨中截面矩形梁表面的风压系数均值越小。

5) 在 $r=0 \sim 2.0D_{jet}$ 范围内,矩形梁升力和阻力的变化最为剧烈,且在该范围内出现最大值。在 $r=2.0D_{jet} \sim 4.0D_{jet}$ 范围内,雷暴冲击风风速以水平方向为主,但水平风速较小,矩形断面升力和阻力整体上变化不大。不同离地高度的矩形梁的升力和阻力随径向距离的变化趋势基本相同。

本文目前主要聚焦稳态雷暴冲击风对典型结构的影响,后续将围绕非稳态雷暴冲击风对桥梁结构的影响进行深入研究。

参考文献(References):

- [1] FUJITA T T. Manual of downburst identification for project NIMROD [J]. SMRP Research Paper, 1978, 156: 104.
- [2] FUJITA T T. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36(1): 75-86. DOI: 10.1016/0167-6105(90)90294-M.
- [3] HJELMFELT M R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27(8): 900-927. DOI: 10.1175/1520-0450(1988)027<0900:SALCOM>2.0.CO;2.
- [4] LOMBARDO F T, ZICKAR A S. Characteristics of measured extreme thunderstorm near-surface wind gusts in the United States [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 193: 103961. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.103961.
- [5] HUANG G Q, JIANG Y, PENG L L, et al. Characteristics of intense winds in mountain area based on field measurement: focusing on thunderstorm winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 166-182. DOI: 10.1016/j.jweia.2019.04.020.
- [6] CAO S Y, NISHI A, KIKUGAWA H, et al. Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12-15): 1719-1729. DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00282-9.
- [7] WU B, LI S P, ZHANG L L, et al. Experimental determination of the two-dimensional aerodynamic admittances of a 5:1 rectangular cylinder in streamwise sinusoidal flows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 210: 104525. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104525.
- [8] 刘慕广, 黄琳玲, 邹云峰. 雷暴冲击风下输电塔风振特

- 性试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(6): 869-876. DOI: 10.7520/1001-4888-18-096.
- LIU Muguang, HUANG Linling, ZOU Yunfeng. Experimental investigation on dynamic response of transmission tower under downburst winds[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(6): 869-876. DOI: 10.7520/1001-4888-18-096.
- [9] 辛亚兵, 刘志文, 邵旭东, 等. 大跨连续刚构桥下击暴流作用效应试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 279-290. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.027.
- XIN Yabing, LIU Zhiwen, SHAO Xudong, et al. Effects of downburst on long-span continuous rigid frame bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 279-290. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.027.
- [10] MCCONVILLE A C, STERLING M, BAKER C J. The physical simulation of thunderstorm downbursts using an impinging jet [J]. Wind and Structures, 2009, 12(2): 133-149. DOI: 10.12989/was.2009.12.2.133.
- [11] ROMANIC D, HANGAN H. Experimental investigation of the interaction between near-surface atmospheric boundary layer winds and downburst outflows [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104323. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104323.
- [12] 徐挺, 陈勇, 彭志伟, 等. 雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J]. 实验力学, 2009, 24(6): 505-512.
- XU Ting, CHEN Yong, PENG Zhiwei, et al. Wind tunnel design and steady flow field measurement for thunderstorm downburst experiment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6): 505-512.
- [13] CHEN Y, LI Y H, YAO J F, et al. Experimental study of downburst wind flow over a typical three-dimensional hill [J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 3101. DOI: 10.3390/app12063101.
- [14] CHAY M T, ALBERMANI F, WILSON R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 240-254. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.07.007.
- [15] ABOSHOSHA H, BITSUAMLAK G, EL-DAMATTY A. Turbulence characterization of downbursts using LES [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136: 44-61. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.10.020.
- [16] ABD-ELAAL 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: 85-95. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.10.026.
- [17] ELAWADY A, ABOSHOSHA H, EL-DAMATTY A, et al. Aero-elastic testing of multi-spanned transmission line subjected to downbursts [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 169: 194-216. DOI: 10.1016/j.jweia.2017.07.010.
- [18] ZHENG H D, FAN J. Progressive collapse analysis of a truss transmission tower-line system subjected to downburst loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 188: 107044. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107044.
- [19] ABOSHOSHA H, EL-DAMATTY A. Engineering method for estimating the reactions of transmission line conductors under downburst winds [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 272-284. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.010.
- [20] CAO B C, SARKAR P P. Numerical simulation of dynamic response of a long-span bridge to assess its vulnerability to non-synoptic wind [J]. Engineering Structures, 2015, 84: 67-75. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.009.
- [21] HAO J M, WU T. Downburst-induced transient response of a long-span bridge: a CFD-CSD-based hybrid approach [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 273-286. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.06.006.
- [22] OSEGUERA R M, BOWLES R L. A simple, analytical 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow [J]. Nasa Technical Memorandum, 1988(1): 1-16.
- [23] VICROY D D. Assessment of microburst models for downdraft estimation [J]. Journal of Aircraft, 1992, 29(6): 1043-1048. DOI: 10.2514/3.46282.
- [24] 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. DOI: 10.1016/S0167-6105(00)00090-8.
- [25] 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 and Structures, 2009, 12(3): 179-204. DOI: 10.12989/was.2009.12.3.179.
- [26] LI C, LI Q S, XIAO Y Q, et al. A revised empirical model and CFD simulations for 3D axisymmetric steady-state flows of downbursts and impinging jets [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 102: 48-60. DOI: 10.1016/j.jweia.2011.12.004.
- [27] 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, 2008, 96(3): 345-365. DOI: 10.1016/j.jweia.2007.09.001.

(责任编辑:石月珍)