

尖劈对大气边界层试验风场的影响*

李波^{1,2}, 李晨¹, 郭焕良¹, 吴迪¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京, 100044)

(2. 北京交通大学结构风工程与城市风环境北京市重点实验室 北京, 100044)

摘要 尖劈是风洞生成边界层风场的主要装置,对下游风场的剖面特征有明显的控制作用,但由于作用机制不明确,在风场调试中大多是依据经验布置尖劈,调试效率低。笔者通过风洞试验,得到了3种常用形状(梯形、三角形及曲边三角形)尖劈下游的风速剖面和湍流度剖面特征,并测试了尖劈数量、高度的影响。结果表明:尖劈形状与生成边界层风场的范围高度、指数率直接相关,尖劈的平均宽度越宽,影响高度越高,指数率越大;增加尖劈数量可提高下游风场的指数率,但对风场范围影响很小;抬高尖劈的高度可增加下游边界层风场的高度,配合使用挡板及粗糙元,可以快速调试出目标风剖面。

关键词 尖劈;边界层风场;风洞试验;平均风速剖面;湍流度剖面

中图分类号 TH113; TU312.1

引言

风灾是破坏最为严重的自然灾害,每年都会导致大量财产损失和人员伤亡^[1]。另一方面,随着材料和建造技术的不断改进,工程结构日趋多样化、大型化、复杂化,对风的敏感程度越来越强烈,风荷载已经成为超高层建筑,高耸结构,大跨度屋盖结构的主要控制性荷载^[2]。风洞试验是确定风敏感结构风荷载及其风致效应的最主要手段,被广泛应用于科学研究和工程实践^[3],而在风洞中准确模拟大气边界层风场特征是该类试验最重要的要求之一^[4]。

大气边界层是大尺度漩涡和地面摩擦共同作用的结果^[5],其中,大尺度漩涡是形成平均风速、湍流剖面的主要因素,地面摩擦则主要影响近地面湍流。按此机理,需要在风洞来流入口处设置尖劈(也称尖塔)作为漩涡发生器,在尖劈下游设置一定数量粗糙元模拟地面摩擦作用,用以模拟大气边界层风场^[6]。在实际风场调试中也是先调整尖劈,在洞体中上部形成满足《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)规定的指数率风剖面,再通过挡板及粗糙元调节洞体下部风场^[7]。Counihan^[8-10]利用下宽上窄的尖劈和六面体粗糙元在风洞中成功模拟大气边界层风场。王兆印^[11]仅利用粗糙元在风洞中自然形成大气边界层流场,但由于粗糙元高度较小,其影响范围局限在一定高度

内,在调试高度较高或者较大缩尺比风场时难以满足要求,需要借助对风剖面影响更大的尖劈^[12]。庞加斌等^[13]采用非三角形尖劈模拟大缩尺比下的流场特性,并用于工程结构抗风试验。石碧青等^[14]研究发现,采用曲边梯形尖塔在一定范围内能够保持较大湍流度。可以看出,尖劈是影响下游风剖面的主要因素,但目前风场调试还是依靠经验,调试效率低。笔者通过试验研究了尖劈形状、数量及高度对下游风场的影响规律,为提高风场调试效率提供参考。

1 试验概况

本次试验在北京交通大学风洞实验室 BJ-1 风洞高速试验段完成。如图 1 所示,该风洞为双试验段回流式闭口风洞,风洞洞体平面大小为 41.0 m × 18.8 m,其中,高速试验段尺寸为 3.0 m × 2.0 m × 15.0 m,低速试验段尺寸为 5.2 m × 2.5 m × 14.0 m。经第三方校核,风洞风场品质优秀。

测试时尖劈放置在高速试验段入口处,通过专用支架固定。采用 CobraProbe 风速探头采集高速试验段转盘中心处风速,采样频率为 1.5 kHz,尖劈处与风速探头处距离为 9.65 m。风速探头安装在专用移测架上,自动采集不同高度处风速,移测架定位精度为 0.1 mm。

如图 2 所示,测试选取目前边界层风场调试中

* 国家自然科学基金资助项目(51878041);高等学校学科创新引智计划资助项目(B13002)

收稿日期:2020-02-04;修回日期:2020-06-04

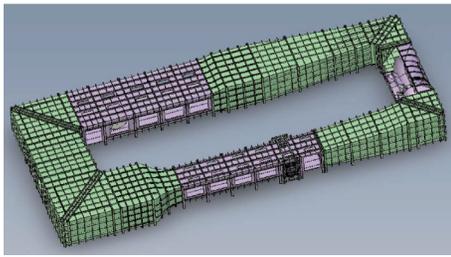


图 1 北京交通大学风洞实验室

Fig.1 Wind tunnel laboratory in Beijing Jiaotong university

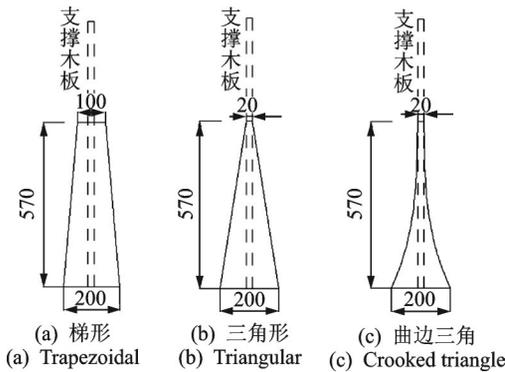


图 2 尖劈形状(单位:mm)

Fig.2 Shape of spiers (unit: mm)

常采用的梯形、三角形和曲边三角形共 3 种形状的尖劈, 3 种尖劈的高度和底部宽度相同, 分别为 570 mm 和 200 mm。梯形尖劈顶部宽度为 100 mm, 三角形和曲边三角形的顶部宽度为 20 mm, 与支架支撑板厚度相同。利用螺栓, 将尖劈底板与风洞地面预留钢带连接固定。

采用相对于参考点的无量纲高度系数 C_H 和无量纲风速系数 C_V 来表示风场剖面, 定义为

$$C_H = H/H_r \quad (1)$$

$$C_V = V/V_r \quad (2)$$

其中: H, V 为任一位置的高度和风速; H_r 为参考高度; V_r 为参考高度处风速, 根据测试结果, 本次试验中参考高度为 33 cm。

2 尖劈形状的影响

将每种尖劈选取 4 个, 等间距布置在风洞来流入口处, 即两侧靠风洞壁的尖劈距离风洞壁 375 mm, 尖劈之间的距离为 750 mm。绝对风速剖面、相对风速剖面和湍流度剖面如图 3~5 所示。由图 3 和图 5 可知, 达到一定高度后, 风速和湍流度随着高度的变化明显减小, 笔者将湍流度剖面不再变化的高度称为调试风场的有效高度。利用梯形、三角形、曲边三角形尖劈得到的调试风场有效高度分别为 80, 75 和 70 cm, 将该有效高度与尖劈

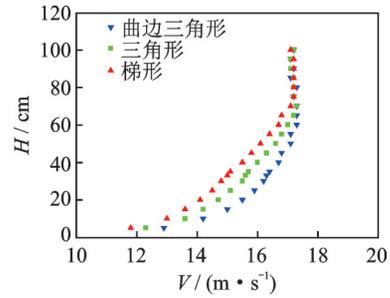


图 3 绝对风速剖面

Fig.3 Absolute wind speed profile

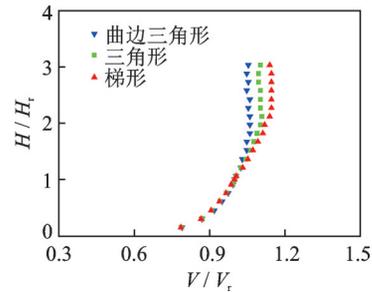


图 4 相对风速剖面

Fig.4 Relative wind speed profile

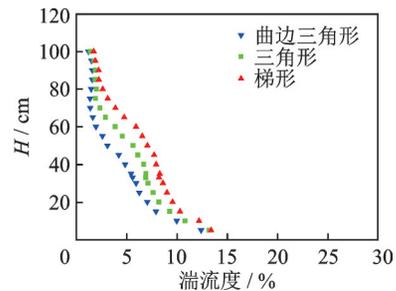


图 5 湍流度剖面

Fig.5 Turbulence intensity profile

自身高度的比值定义为尖劈的影响高度系数, 即

$$C_{inf} = H_{inf}/H \quad (3)$$

其中: C_{inf} 为尖劈的影响高度系数; H_{inf} 为调试风场的有效高度; H 为尖劈高度。

表 1 为不同形状尖劈的影响高度系数。由图 4 可知, 在尖劈的影响高度范围内风速剖面是曲线形变化, 在高于尖劈的影响高度范围之上风速恒定。为了与《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 中规定的指数率风场相对应, 对 3 种形状尖劈的风速

表 1 不同形状尖劈的影响高度系数

Tab.1 Influence height coefficient of spiers with different shapes

参数	梯形	三角形	曲边三角形
H_{inf}/cm	80	75	70
C_{inf}	1.40	1.32	1.23

剖面进行指数函数拟合。考虑到靠近风洞底部风速受风洞地面的影响和尖劈的影响高度之上风速恒定这 2 个因素,拟合时舍去了距离风洞地面 10 cm 及以下和尖劈影响高度之上的数据。表 2 为不同形状尖劈拟合的风剖面指数率。不同形状尖劈的风剖面如图 6~8 所示。由图可知,在尖劈的影响高度范围内,梯形尖劈测试得到的湍流度最大,曲边三角形测试得到的湍流度最小,三角形的居中。在尖劈的自身高度范围内,梯形尖劈相对于三角形和曲边三角形尖劈具有更大的阻挡宽度,对来流具有更大的阻

挡作用,测得的湍流度更大。可见,尖劈形状与生成边界层风场的范围高度、指数率直接相关,尖劈的平均宽度越宽,影响高度越高,指数率越大。

3 尖劈数量的影响

笔者以三角形尖劈为例,测试了当尖劈个数分别为 4,5,6 时下游风场剖面。测试中,尖劈均在风洞中等间距布置。4 个尖劈在风洞中的布置位置为:两侧靠风洞壁的尖劈距离洞壁 375 mm,尖劈之间的距离为 750 mm。5 个尖劈在风洞中的布置位置为:两侧靠风洞壁的尖劈距离洞壁 300 mm,尖劈之间的距离为 600 mm。6 个尖劈在风洞中的布置位置为:两侧靠风洞壁的尖劈距离风洞壁 250 mm,尖劈之间的距离为 500 mm。

测试得到绝对风速剖面、相对风速剖面和湍流度剖面如图 9~11 所示。由图可知,增加尖劈的数量对

表 2 不同形状尖劈拟合的风剖面指数率

Tab.2 The power index of wind profile with different shapes

参数	梯形	三角形	曲边三角形
风剖面指数率	0.153	0.132	0.101

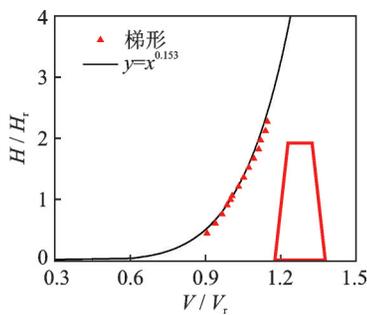


图 6 梯形尖劈的风剖面

Fig.6 Wind speed profile of trapezoidal spiers

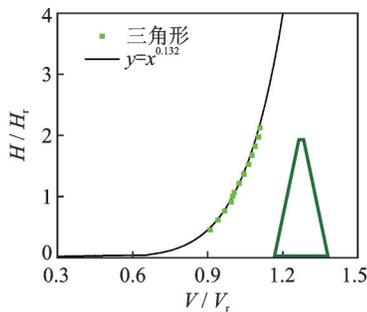


图 7 三角形尖劈的风剖面

Fig.7 Wind speed profile of triangular spiers

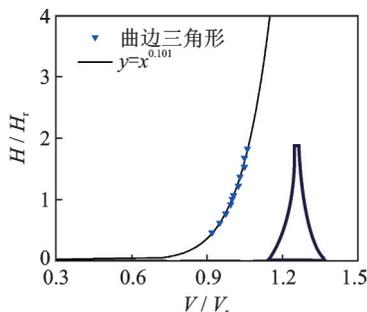


图 8 曲边三角形尖劈的风剖面

Fig.8 Wind speed profile of crooked triangle spiers

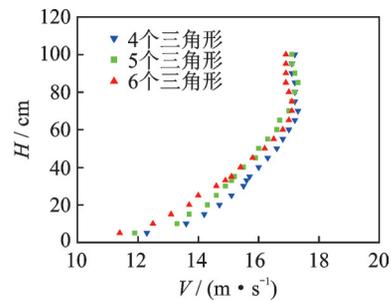


图 9 绝对风速剖面

Fig.9 Absolute wind speed profile

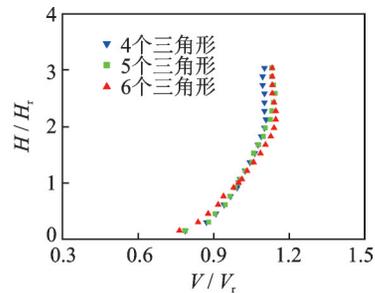


图 10 相对风速剖面

Fig.10 Relative wind speed profile

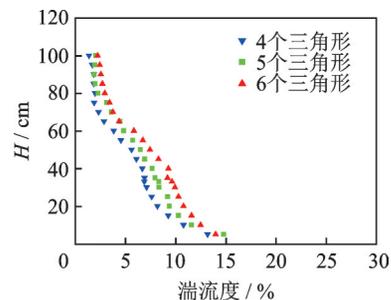


图 11 湍流度剖面

Fig.11 Turbulence intensity profile

下游生成边界层风场的范围影响很小,但增加尖劈个数使在尖劈影响高度范围内的湍流度更大。由风速剖面可知,增加尖劈的个数使风剖面指数更大。不同个数三角形尖劈模拟风场参数如表 3 所示。

表 3 不同个数三角形尖劈模拟风场参数

Tab.3 The parameters of wind field by using different numbers of triangular spiers

参数	4	5	6
C_{mf}	1.32	1.49	1.58
风剖面指数率	0.128	0.130	0.174

4 尖劈高度的影响

笔者以三角形尖劈为例,通过抬高尖劈距离风洞地面的距离来改变尖劈的高度,分别抬高 10 cm 和 20 cm,测试数量分别为 5,6 的三角形尖劈。三角形尖劈抬高 20 cm 的位置如图 12 所示。测试得到的风剖面如图 13 所示。可以看出,抬高尖劈离风洞地面的距离后,增加了尖劈对风速和湍流度的影响高度。由于尖劈抬高,在尖劈的影响高度范围内,使得较高位置的绝对风速减小,湍流度增大。从拟合得到的风速剖面来看,尖劈抬高使风剖面指数更大。5 个三角形和 6 个三角形尖劈的影响高度系数和风剖面指数率如表 4,5 所示。

可见,在风场调试中,在底部一定高度范围内,可以通过挡板、粗糙元来增加湍流度,通过抬高尖劈可快速调试得到目标风场。

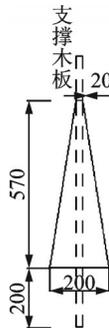
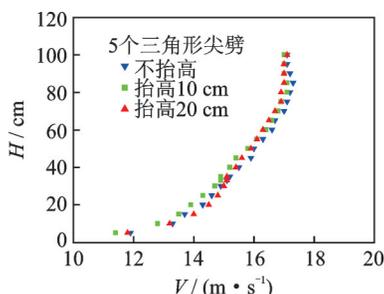
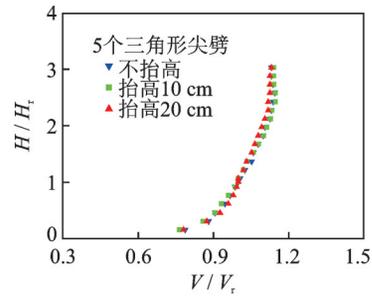


图 12 三角形尖劈抬高 20 cm (单位:mm)

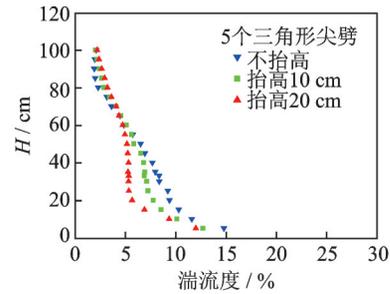
Fig.12 Triangular spiers raising 20 cm (unit:mm)



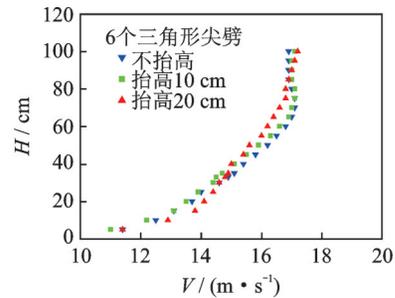
(a) 绝对风速剖面(5个三角形尖劈)
(a) Absolute wind speed profile (five triangular spiers)



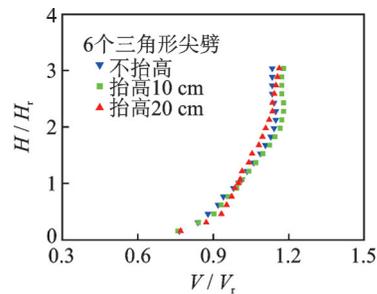
(b) 相对风速剖面(5个三角形尖劈)
(b) Relative wind speed profile (five triangular spiers)



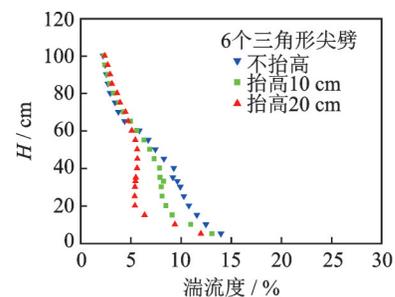
(c) 湍流度剖面(5个三角形尖劈)
(c) Turbulence intensity profile (five triangular spiers)



(d) 绝对风速剖面(6个三角形尖劈)
(d) Absolute wind speed profile (six triangular spiers)



(e) 相对风速剖面(6个三角形尖劈)
(e) Relative wind speed profile (six triangular spiers)



(f) 湍流度剖面(6个三角形尖劈)
(f) Turbulence intensity profile (six triangular spiers)

图 13 风剖面

Fig.13 Wind profile

表4 5个三角形尖劈的影响高度系数和风剖面指数率

Tab.4 Influence height coefficient and power index of five triangular spiers

参数	不抬高	抬高10 cm	抬高20 cm
C_{inf}	1.49	1.58	1.75
风剖面指数率	0.130	0.144	0.116

表5 6个三角形尖劈的影响高度系数和风剖面指数率

Tab.5 Influence height coefficient and power index of six triangular spiers

参数	不抬高	抬高10 cm	抬高20 cm
C_{inf}	1.58	1.67	1.75
风剖面指数率	0.174	0.177	0.128

5 结束语

尖劈形状与生成边界层风场的范围高度、指数率直接相关,尖劈的平均宽度越宽,影响高度越高,指数率越大。增加尖劈数量可提高下游风场的指数率,但对风场范围影响很小。抬高尖劈的高度可增加下游边界层风场的高度,配合使用挡板和粗糙元可以快速调试出目标风剖面。

参 考 文 献

- [1] HOLMES J D. Wind loading of structures [M]. New York: Spon Press, 2001: 16-18.
- [2] 贾彬,王汝恒. 风洞实验在我国建筑工程中的应用简介[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(3): 39-41.
JIA Bin, WANG Ruheng. Brief introduction of wind tunnel experiment in China's construction engineering [J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(3): 39-41. (in Chinese)
- [3] SIMU E, SCANLAN R. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering [M]. New York: Wiley-Interscience, 1978: 318-324.
- [4] NICHOLAS I. Wind tunnel studies of buildings and structures [M]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1996: 67-70.
- [5] SHOJAEE S M N, UZOL O, KURO O. Atmospheric boundary layer simulation in a short wind tunnel [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(1): 59-68.
- [6] 贺林,王军. 大气边界层湍流特性的风洞模拟实验研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(6): 911-916.
HE Lin, WANG Jun. Wind tunnel experimental simulation of turbulent characteristics of atmospheric boundary layer [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(6):

911-916. (in Chinese)

- [7] 周兴,李建兰. 3.5 m×2.5 m风洞大气边界层被动模拟实验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 342-349.
ZHOU Xing, LI Jianlan. Passive simulation experiment of atmospheric boundary layer in 3.5m×2.5m wind tunnel [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(2): 342-349. (in Chinese)
- [8] COUNIHAN J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel [J]. Atmospheric Environment, 1969(3): 197-214.
- [9] COUNIHAN J. The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers [D]. [S. l.]: University of Bristol, 1972.
- [10] COUNIHAN J. Adiabatic atmospheric boundary layer: a review and analysis of data from the period 1880-1972 [J]. Atmospheric Environment, 1975(9): 871-905.
- [11] 王兆印. 大气边界层的风洞模拟[J]. 实验力学, 1998, 13(3): 283-293.
WANG Zhaoyin. Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(3): 283-293. (in Chinese)
- [12] 徐洪涛,廖海黎,李明水. 利用尖劈和粗糙元技术模拟大气边界层的研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 76-80.
XU Hongtao, LIAO Haili, LI Mingshui. Simulation of atmosphere boundary layer by using wedge and roughness element technique [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(9): 76-80. (in Chinese)
- [13] 庞加斌,林志兴. 边界层风洞主动模拟装置的研制及实验研究[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 80-85.
PANG Jiabin, LIN Zhixing. Development and experimental study on the active simulation device in boundary layer wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(3): 80-85. (in Chinese)
- [14] 石碧青,洪海波,谢壮宁,等. 大气边界层风洞流场特性的模拟[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(3): 376-380.
SHI Biqing, HONG Haibo, XIE Zhuangning, et al. Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(3): 376-380. (in Chinese)



第一作者简介:李波,男,1978年8月生,博士、教授。主要研究方向为结构风工程。曾发表《Full-scale wind speed spectra of 5 year time series in urban boundary layer observed on a 325 m meteorological tower》(《Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics》2021, No.218)等论文。
E-mail: libo_77@163.com