

袁养金,戴益民,许灵波,等. 直流风洞中大比例风场模拟试验 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):50-57. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.008

YUAN Y J, DAI Y M, XU L B, et al. Large Proportion Wind Field Simulation Study in Straight Through Wind Tunnel [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):50-57. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.008

# 直流风洞中大比例风场模拟试验

袁养金<sup>1,2</sup>,戴益民<sup>1,2\*</sup>,许灵波<sup>3</sup>,蒋姝<sup>1,2</sup>

(1.结构抗风与振动控制湖南省重点实验室,湖南湘潭411201;2.湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭411201;  
3.湖南省建筑科学研究院,湖南长沙410000)

**摘要:**利用尖劈、粗糙元、挡板等被动装置,在湖南科技大学直流风洞中调试不同地貌条件下1:20大缩尺比风场,研究适合低矮建筑缩尺比模型的风洞试验风场,分析尖劈、粗糙元、挡板等被动装置对大气边界层风场的影响.试验结果表明:尖劈迎风面尺寸对平均风速剖面及湍流度剖面影响明显,粗糙元布局对湍流度剖面下部区域影响显著,而挡板的形状及位置对平均风速剖面及湍流度剖面均影响较大.D类地貌大湍流、大缩尺比风场的近地湍流度剖面与规范标准剖面差异明显,值得进一步深入研究.

**关键词:**风洞试验;风场;尖劈;粗糙元;挡板

中图分类号:V211 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)03-0050-08

## Large Proportion Wind Field Simulation Study in Straight Through Wind Tunnel

YUAN Yangjin<sup>1,2</sup>, DAI Yimin<sup>1,2</sup>, XU Lingbo<sup>3</sup>, JIANG Shu<sup>1,2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Wind-resistance and Vibration Control, Xiangtan 411201, China;  
2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
3. Scientific institute of Building in Hunan, Changsha 410000, China)

**Abstract:** Adapting the passive devices of spires, roughness elements, and baffles, the large scale ratio of 1:20 wind field under different landform conditions was simulated in the Hunan University of Science and Technology straight through wind tunnel. Wind tunnel test models suitable for the scale ratio of low rise buildings were researched. The effects of the passive devices to the atmospheric boundary layer wind tunnel was analyzed. The experimental results show that: the windward side size of the spire obviously impact on the mean wind velocity profile and the turbulence intensity profile, the layout of roughness elements have effect on the lower part of the turbulence intensity profile, and the shape and position of baffle have great influence on the wind velocity profile and the turbulence intensity profile. In the type D landform of large turbulence and large scale ratio, the turbulence profile close to the ground have significantly different than the standard profile, which worth further study.

**Keywords:** wind tunnel test; wind field; spire; roughness elements; baffle

收稿日期:2019-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578237)

\*通信作者,E-mail:617275190@qq.com

风洞试验主要针对结构(建筑、桥梁等)采用几何相似原则缩尺建造模型,基于日本与中国标准规范的平均风速剖面与湍流度剖面,在风洞中调试出满足各类研究所需风场模型,扩充湖南科技大学风洞实验室数据库以便开展相关风压测试、风力测试和风振响应测试等研究。

由于风洞试验段的截面与长度的不同,使得各风洞大气边界层模拟被动装置差异较大<sup>[1-3]</sup>。Sill<sup>[4-5]</sup>等通过改变粗糙元的几何尺寸及摆放方式从而研究其与粗糙长度、位移高度等的关联规律,并通过大量的实验数据拟合了经验公式。H. J. Ham<sup>[6]</sup>利用下部宽为125 mm的小尖劈并配合使用高度很大的梯形挡板,较为精确地模拟出满足低矮建筑风荷载特性研究精度的风洞试验风场。Shuyang Cao<sup>[7]</sup>利用多风机驱动的风洞实验室并配合被动模拟装置模拟了符合实际的大比例风场。石碧青<sup>[8]</sup>等采用新型的曲边梯形尖塔进行风场模拟,结果发现曲边梯形尖塔对提高气流边界层中上部湍流的效果显著,而对于气流边界层下部的湍流度提高则主要依赖于粗糙元。陈超,李秋胜等<sup>[9]</sup>在湖南大学风洞实验室利用尖劈和挡板模拟了满足低矮房屋1:10缩尺模型要求的A类风场并与海边现场实测房数据进行对比,利用实测数据佐证了此风场模拟方式的可行性。丁思华,孙瑛等<sup>[10]</sup>在来流进风口处利用尖劈、格栅和锯齿挡板等形成满足要求的风场剖面,同时配套使用粗糙元和地毯有效模拟了1:50~1:300多种缩尺比风场。徐洪涛,廖海黎等<sup>[11]</sup>利用尖劈、粗糙元、格栅和挡板等被动装置的优化组合使用建立大气边界层风场的模拟方式,并分别研究了此类被动模拟装置对风场调试的作用。翟欣欣<sup>[12]</sup>设计了不同尺寸的尖劈和挡板模拟了符合我国荷载规范要求的A、B、C、D这4类地形条件下的风场,采用的是较小的缩尺比1:200,并将不同风场类型中所得到的试验数据与理论值进行比较并分析产生的误差。冀哲<sup>[13]</sup>采用对比研究的方式分别分析了尖劈迎风面积、粗糙元尺寸、挡板尺寸和布置方式对风场模拟的影响机理,并考虑了衰减现象、温度和采样频率等其他因素的影响。

目前,国内大部分研究和项目主要是在回流式风洞中进行小缩尺比的风场模拟,国内外关于此类的风场调试已经有了较为成熟的基础,但对直流式风洞中的大缩尺比、高湍流风场调试的研究相对较少,并且对粗糙元加密方式和增设挡板等布置方式对平均风速剖面和湍流度剖面的影响机理和现象研究有待进一步加强认识。本文利用湖南科技大学直流风洞采用常规尖劈、粗糙元、挡板等被动装置,针对1:20大缩尺比低矮房屋的风场模型模拟进行试验研究,并且通过采用不同工况的风场类别进行定量对比分析,研究粗糙元加密和增设挡板等布置方式对平均风速剖面和湍流度剖面的影响特点。

## 1 大气边界层风特性

### 1) 平均风速剖面

我国《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)<sup>[14]</sup>(下称《规范》)定义风速剖面基本符合指数率模型。

平均风速剖面表达式:

$$V_z = V_{10} \left( \frac{Z}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为粗糙度指数,按《规范》对A、B、C、D这4类地形条件的划分,分别取为0.12,0.15,0.22,0.30; $V_{10}$ 为参考高度10 m处的平均风速; $V_z$ 为大气边界层中任意高度 $Z$ 处的平均风速。

### 2) 湍流度剖面

湍流<sup>[15]</sup>是由于剪切流中的扰动逐渐增长而产生的,湍流度可以用于反映气流的紊乱程度和脉动特性,湍流度剖面沿高度基本服从负指数率模型。

湍流度剖面表达式:

$$I_z(Z) = I_{10} \left( \frac{Z}{10} \right)^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $I_{10}$ 为参考高度10 m处湍流度,按A、B、C、D这4类分别取值0.12,0.14,0.23,0.39。

### 3) 脉动风速谱

脉动风速谱表示的是在频域中的脉动风波动随频率变化的能量分布,通常用Karman谱。

Karman谱的表达式:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4x}{(1 + 70.8x)^{\frac{5}{6}}} \tag{3}$$

式中:  $x = \frac{nL_u(z)}{U(z)}$  (其中,  $n$  为频率,  $U(z)$  为参考高度处的平均风速);  $L_u(z) = 100\left(\frac{z}{30}\right)^{0.5}$  (其中,  $L_u(z)$  为湍流积分尺度,  $z$  为高度).

## 2 风洞试验介绍

### 2.1 风洞介绍

湖南科技大学边界层风洞洞体为全钢结构直流吸入式风洞,其试验段尺寸为  $4.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 21.0\text{ m}$  (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),为减小试验段内的轴向静压梯度,试验段两侧壁设置了  $0.25^\circ$  的当量扩散角,试验段设计空风洞最大风速为  $30\text{ m/s}$ ,在距试验段进口  $16.5\text{ m}$  处设置一台直径为  $3\text{ m}$  的伺服系统控制的  $360^\circ$  旋转的圆形转盘,用于改变待测模型的受风风向.风洞由一台功率  $315\text{ kW}$ 、额定转速  $500\text{ r/min}$  的直流电动机驱动,风扇由  $8$  片叶片组成,风洞风速的调节由以德国西门子公司  $6RA70$  系列调速器为核心的直流调速装置控制,湖南科技大学吸入直流式风洞如图 1 所示.

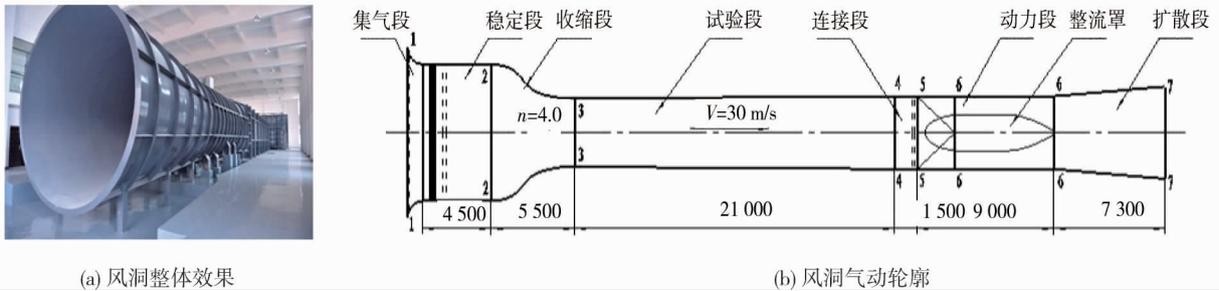


图 1 湖南科技大学直流式风洞

### 2.2 仪器与装置

风场调试所用到的设备和仪器:电机驱动升降装置、三维脉动风速仪(眼镜蛇).眼镜蛇固定在升降装置上,其在风洞地面上的投影在转盘中心范围内,眼镜蛇离地初始距离为  $10\text{ cm}$ ,通过控制升降装置每移动  $10\text{ cm}$  (风洞高度)测量一次,共测量  $10$  次,调试高度范围为  $0.1\sim 1.0\text{ m}$ ,眼镜蛇采样频率为  $500\text{ Hz}$ ,风场调试现场照片如图 2.本次风场调试采用传统的被动模拟装置进行,包括三角形尖劈、粗糙元、各类尺寸挡板.尖劈高度均设计为  $3\text{ m}$ ,底宽有  $22.5, 27.0, 35.0, 40.0\text{ cm}$  等  $4$  种尺寸,可用于模拟各种缩尺比风场,如图 3a 给出了其三维外观.粗糙元为立方体方块,边长分别为  $6, 10, 13\text{ cm}$ ,如图 3b 所示.挡板制作了  $2$  种类型,分别为矩形挡板和锯齿挡板,矩形挡板的长度为  $295\text{ cm}$ ,宽度有  $7.7, 10, 20\text{ cm}$  等  $3$  种尺寸,如图 3c 所示;锯齿挡板参考李永乐<sup>[16]</sup>所采用的尺寸和形式,如图 3d 所示.



图 2 风场模拟照片

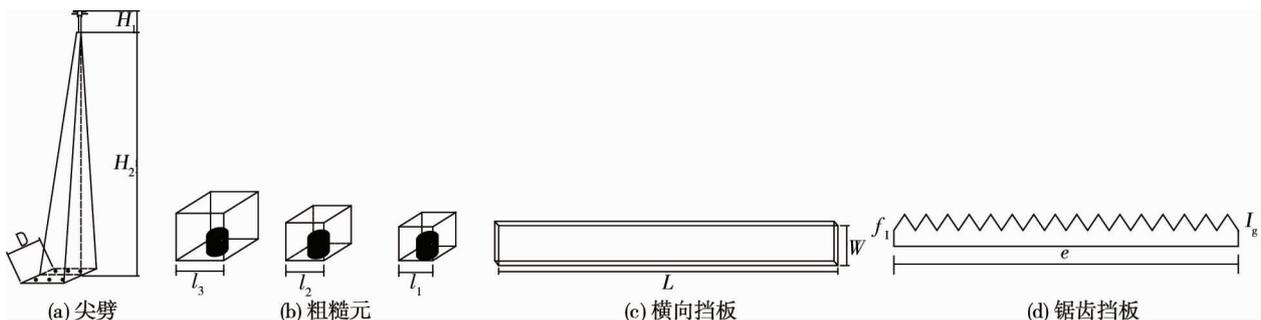


图 3 风场的被动模拟装置

### 3 风场模拟

本实验所模拟的风场比例为 1 : 20 ,参考高度为 10 m,对应风速为 12 m/s.为了更好模拟 A,B,C,D 这 4 类风场,进行了大量的重复性试验,最终采用最优的布置方式调试的风场进行研究,所需被动装置的数量与尺寸如表 1 所示.

表 1 A,B,C,D 这 4 类风场的布置方式

地貌类别	粗糙度指数	粗糙长度	尖劈数 $N/cm$	粗糙元排数及尺寸	矩形横向挡板尺寸
	$\alpha$	$Z_G/m$	底宽 $D/cm$	$l=b=h/cm$	$L \times W/cm$
A	0.12	300	$N=5, D=22.5$	布置 8 排, $l_1=6, l_2=10$	$L_1 \times W_1=295 \times 10$ $L_2 \times W_2=295 \times 20$
B	0.15	350	$N=4, D=27$	布置 18 排 $l_1=6, l_2=10$	$L_1 \times W_1=295 \times 20$
C	0.22	450	$N=5, D=35$	布置 17 排 $l_1=6, l_2=10, l_3=13$	$L_1 \times W_1=295 \times 7.7$ $L_2 \times W_2=295 \times 20$
D	0.30	550	$N=5, D=40$	布置 23 排 $l_1=6, l_2=10, l_3=13$	$L_1 \times W_1=295 \times 10$ $L_2 \times W_2=295 \times 20$ 底部加锯齿挡板

具体布置方式:

1) A 类风场:距试验段 4.5 m 处均匀布置尖劈;在尖劈后 5.4 m 处交错布置 8 排粗糙元,横向间距为 65 cm,纵向间距为 60 cm;在尖劈高度分别为 40,80 cm 处布置横向挡板.

2) B 类风场:在尖劈后 1.8 m 处交错布置 18 排粗糙元,最后一排的横向间距为 32.5 cm,在尖劈高度 80 cm 处布置挡板.

3) C 类风场:在尖劈后 2.4 m 处交错布置 17 排粗糙元,最后一排并排 2 个边长 10 cm 的粗糙元,间隔布置边长为 6 cm 的粗糙元,横向间距 32.5 cm;在尖劈高度 60.0,93.7 cm 处布置挡板.

4) D 类风场:在尖劈后 0.6 m 处交错布置 23 排粗糙元,对接近转盘处的粗糙元加密,横向间距为 32.5 cm,纵向间距为 30 cm,最后两排的横向间距为 16.25 cm,纵向间距为 20 cm;在尖劈高度 60,90 cm 处布置挡板,在尖劈底部位置布置锯齿挡板.

### 4 风场模拟结果分析

由图 4 可知,4 类地形风场的平均风速剖面与湍流度剖面(除 D 类风场)均与中国标准规范吻合较好.其中风速剖面的吻合度明显高于湍流度剖面,尤其在 A,B 两类地貌下,最大偏差分别为 4.9%和 3.0%;C,D 两类地貌中主要在剖面上部区域偏大,偏差分别达到了 7.1%和 9.2%.同时发现对高湍流剖面的调试难度更大,主要是近地面的湍流度达不到理论规范要求,而对 A,B 两类地貌湍流剖面的吻合符合规范要求,最大偏差分别为 7.2%和 5.0%但平均偏差在 5%以内.针对上述情况,风工程界目前的主要措施是铺设粗糙地毯和加密粗糙元,但是可能会导致近地面的风速剖面误差偏大,因此需要综合考虑两者误差,找到两者误差均较小的情况.

在 A,B,C,D 这 4 类风场的调试过程中,发现尖劈的迎风面尺寸对风速剖面的影响大,挡板对其上下范围内的湍流度的影响显著;但当挡板宽度过宽时,会使湍流度剖面在横向挡板影响范围内出现突变导致难以形成指数剖面;对接近转盘处的粗糙元加密,可使近地面的湍流度的实验值高达 31.4%;由于大缩尺比风场调试,D 类地貌风场的近地面的湍流度高达 63.20%(中国标准规范),在尖劈底部增设锯齿挡板使近地面湍流度最高达到 40.9%,但会导致在 10~40 cm 范围内,湍流度剖面与中国规范标准值差异大,因此需要在靠近尖劈处增设粗糙元以改善湍流度与规范值吻合度.

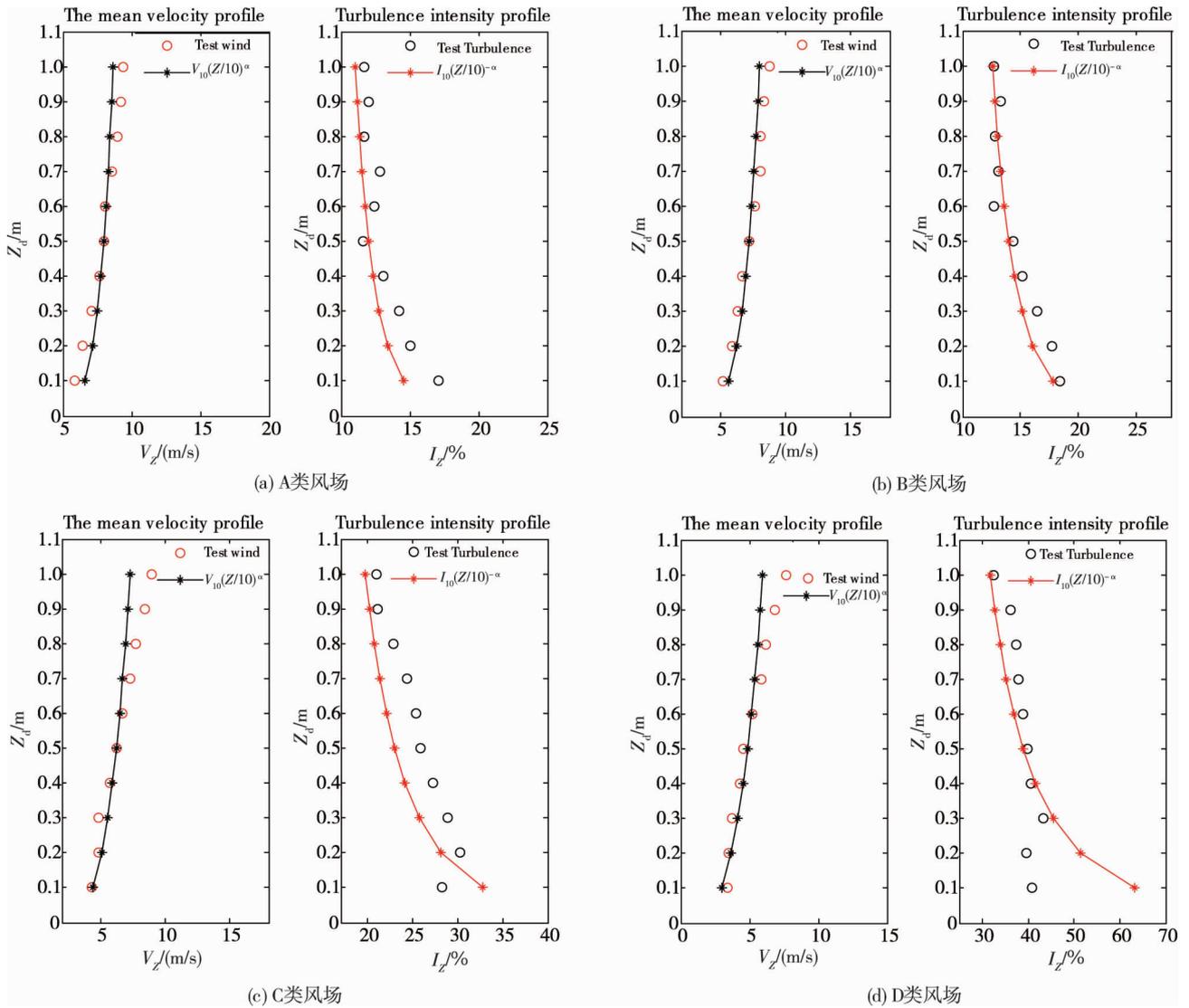


图4 不同风场下的平均风速剖面 and 湍流度剖面

4类风场下50 cm高度(相当于房屋原型10 m处)处的脉动风速谱如图5所示,并将试验结果与Karman谱进行对比,原因是我国东南沿海地区大量的低矮民居都是由于季节性台风过境而遭到破坏,而大量的台风实测发现其脉动风速谱更加接近Karman谱<sup>[17]</sup>.图5中 $f$ 表示脉动风速的频率, $S(f)$ 表示脉动风速功率谱, $\text{var}(u)$ 表示脉动风速时程方差, $z$ 表示特征尺寸,这里取50 cm, $U$ 表示参考高度处风速.从图5可知,试验调试的4类风场的脉动风速谱与Karman谱均比较接近.从图5c和图5d可以看出,高频段会出现能量突增的毛刺,这可能是由于风机噪声,电流不稳定等外部不可控环境造成的,但是总的来说,风洞调试得到的脉动风速谱可以较好反映我国东南沿海地区近地面边界层风场的特性,采用此类风场对低矮建筑表面风荷载进行研究符合对自然条件下风场模拟的实际情况.

### 5 被动装置对风场的影响

风场调试过程中,为验证粗糙元、挡板等被动装置对风场的影响,设计多种试验工况,在每种工况下,对被动装置进行定量变化,每种工况都经过多次调试,找出与理论值吻合最好的布置方式.其中,试验风速为12 m/s,缩尺比为1:20,选择C类调试风场进行分析.下面布置了3种工况.

工况一:沿垂直于气流的方向布置17排粗糙元,纵向间距为60 cm,横向间距为65 cm,接近转盘处粗糙元横向间距为32.5 cm,在尖劈底部离地60 cm处设置挡板,其风场布置如图6a所示.

工况二:沿垂直于气流的方向布置17排粗糙元,纵向间距为60 cm,横向间距为65 cm,接近转盘处粗

糙元加密,在尖劈底部离地 60 cm 处设置挡板,其风场布置如图 6b 所示.

工况三:沿垂直于气流的方向布置 17 排粗糙元,纵向间距为 60 cm,横向间距为 65 cm,接近转盘处粗糙元加密,在尖劈底部离地 60 cm 和 92.3 cm 处分别设置挡板,其风场布置如图 6c 所示.

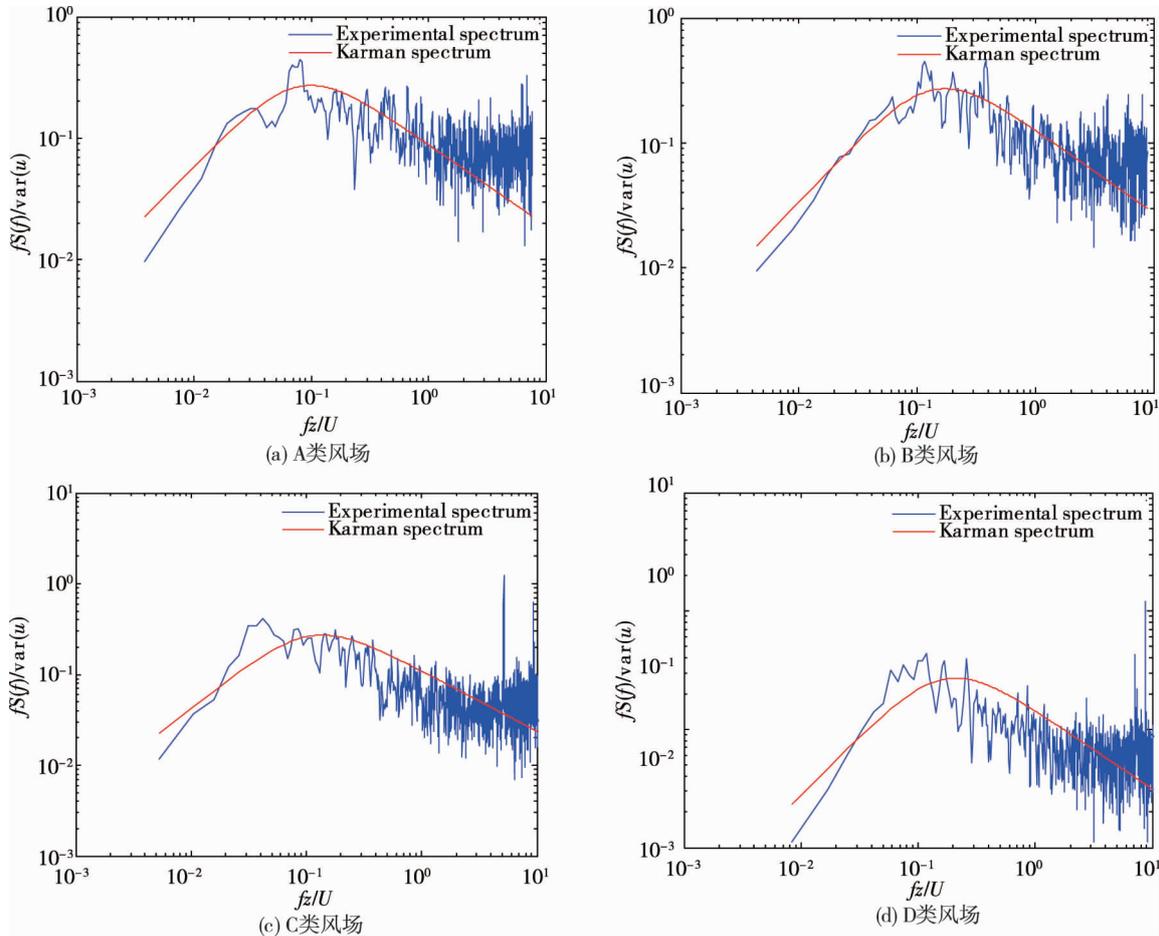


图 5 不同风场下的脉动风速谱

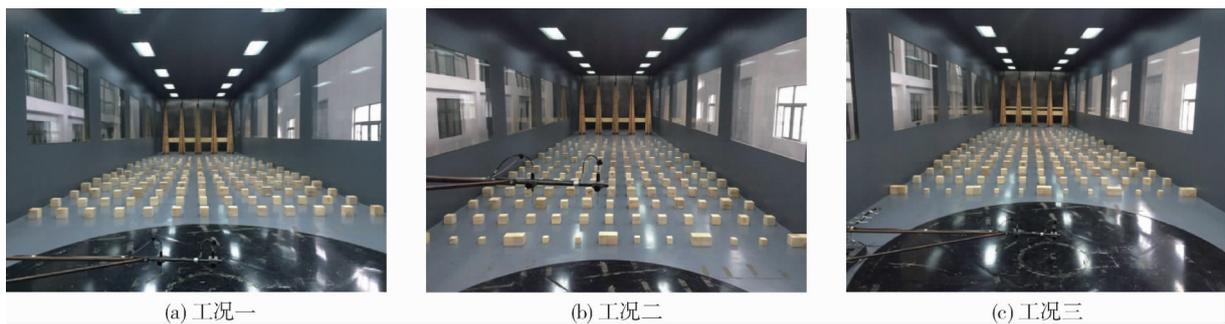


图 6 3 种不同工况风场布置(C 类地貌)

根据设计的 3 种工况,模拟缩尺比为 1 : 20 的 C 类风场在每种工况下的平均风速剖面 and 湍流度剖面,其试验数据如表 2 所示, $Z_d$  表示低矮房屋在风洞中对应的缩尺高度, $V_z$  表示  $Z$  高度处的平均风速, $I_z$  表示  $Z$  高度处的湍流度.

工况一与工况二在其他条件均相同的情况下,工况二在最后一排对粗糙元进行加密,对比 2 种工况的结果发现,加密靠近转盘处粗糙元对风剖面的影响较小而对下层区域的湍流度有一定程度的增加.工况二与工况三在其他条件均相同的情况下,工况三在尖劈底部离地 92.3 cm 处设置挡板,结果发现增设挡板降低了整个调试高度范围内的平均风速,同时湍流度大幅增加.

对被动装置改动时,会明显影响风场剖面,因此,分析其改动时对风场变化的影响规律可以为后续的研究提供经验性的参考建议.由图7可知,工况一与工况二的平均风速剖面的变化规律基本一致,可见对接近转盘处的粗糙元进行加密的布置方式对平均风速影响不大.当 $Z_d < 0.4$ 时,工况二的湍流度实验值大于工况一的实验值,在0.3 m处增大了1.5%,在接近转盘处对粗糙元进行加密的方式使湍流度在 $Z_d$ 的一定范围内增大.由图8可知,工况三的平均风速实验值大于工况二的实验值,差值范围在0.4~0.8,说明适当增设挡板对平均风速剖面影响较小;工况三的湍流度实验值大于工况二的湍流实验值,差值范围在1.8~5.5之间,挡板对湍流度影响明显,特别是对挡板所处位置的上下范围高度处的湍流度影响更为显著.

表2 3种工况下的平均风速剖面 and 湍流度剖面的实验数据

实际高度 $Z/m$	风洞高度 $Z_d/m$	风速 $V_z/(m/s)$			湍流度 $I_z/\%$		
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
2	0.1	4.07	4.37	3.79	26.4	26.2	29.6
4	0.2	4.73	4.94	4.21	26.7	27.3	29.1
6	0.3	5.43	5.43	4.67	24.1	25.6	29.8
8	0.4	5.88	6.00	5.23	23.8	23.9	27.2
10	0.5	6.39	6.36	5.84	22.7	22.7	28.2
12	0.6	6.77	6.91	6.31	21.8	22.2	24.1
14	0.7	7.53	7.36	6.78	20.6	19.9	23.3
16	0.8	8.09	8.02	7.37	18.9	19.8	23.8
18	0.9	8.50	8.20	7.74	18.1	18.6	22.2
20	1.0	8.90	8.76	8.33	18.4	18.9	21.1

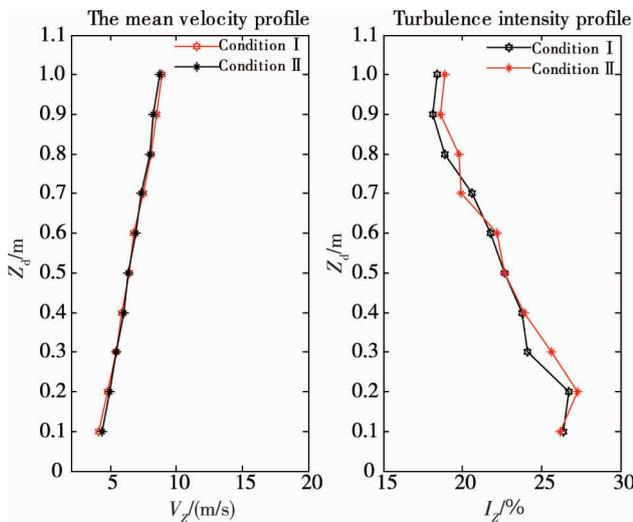


图7 粗糙元加密的影响

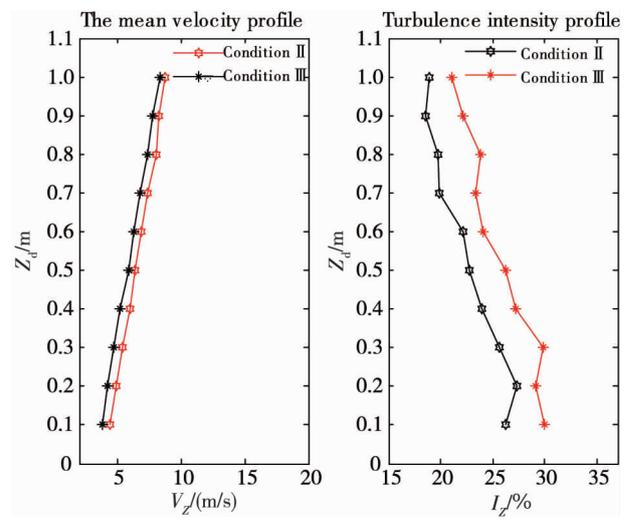


图8 挡板的影响

## 6 结论

1) 采用尖劈加粗糙元的组合装置调试出符合中国标准规范的 A, B, C, D 这 4 类地貌的风场, D 类地貌的风场还需进一步加铺粗糙地毯才能达到近地面风场剖面的要求.

2) 尖劈的迎风面尺寸对平均风速剖面的影响明显,且湍流度随着尖劈底宽的增大而增大.

3) 粗糙元的布局对近地面湍流度剖面影响显著,对接近转盘处的粗糙元进行加密可增大近地面的湍流度,对平均风速基本无影响.

4) 挡板能增大湍流度,特别是挡板所处位置的上下范围高度处的湍流度,但挡板过宽会造成平均风速剖面 and 湍流剖面曲线不符合中国标准规范,需根据实际情况布置合适尺寸的挡板;在尖劈底部布置锯齿挡板,增大湍流度效果显著.

## 参考文献:

- [1] BALENDRA T, SHAH D A, TEY K L, et al. Evaluation of flow characteristics in the NUS-HDB wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(6): 675-688.
- [2] Farell C, Iyengar A K S. Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1999, 79(1/2): 11-35.
- [3] Bortoli M E D, Natalini B, Paluch M J, et al. Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2002, 90(4): 281-291.
- [4] Fang C, Sill B L. Aerodynamic roughness length: Correlation with roughness elements[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1/3): 449-460.
- [5] Jia Y, Sill B L, Reinhold T A. Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters [J]. 1998, 73(3): 215-230.
- [6] Bienkiewicz H B. Wind tunnel simulation of TTU flow and building roof pressure[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(77/78): 119-133.
- [7] Cao S, Nishi A, Kikugawa H, et al. Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12/15): 1719-1729.
- [8] 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].空气动力学报,2007(3):376-380.
- [9] 陈超.低矮房屋风荷载实测与风洞试验[D].长沙:湖南大学,2012.
- [10] 丁思华.近地湍流被动模拟试验技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [11] 徐洪涛,廖海黎,李明水,等.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):76-79.
- [12] 翟欣欣.大气边界层风场的风洞试验模拟[D].北京:北京交通大学,2011.
- [13] 翼哲.大气边界层风场的风洞模拟[D].北京:北京交通大学,2013.
- [14] 中华人民共和国国家标准.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].中国建筑工业出版社,2012.
- [15] 辛金超.大气边界层的风洞被动模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [16] 李永乐,卢伟,李明水,等.风洞短试验段中基于被动技术的大气边界层模拟[J].实验流体力学,2007,21(3):82-85.
- [17] 戴益民,李秋胜,李正农.低矮房屋屋面风压特性的实测研究[J].土木工程学报,2008,41(6):9-13.