

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201902072

千米高度偏转风场风洞模拟技术研究

郑朝荣^{1,2}, 张侃^{1,3}, 刘昭^{1,2}, 武岳^{1,2}, 陈文礼^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 为研究超高层建筑的偏转风效应, 以风场实测所得的指数律平均风速剖面和 Ekman 螺旋型平均风向剖面以及《建筑结构荷载规范》中的湍流度剖面作为目标风场特性, 采用自主设计的导流板系统并结合传统被动模拟装置成功模拟了缩尺比为 1:1 000 的千米高度偏转风场, 分析了不同装置的调节规律. 结果表明: 模拟所得的平均风速剖面符合指数律, 风速剖面指数约为 0.09; 平均风向剖面与 Ekman 螺旋吻合很好, 最大误差不超过 1.5°; 湍流度剖面基本处于“荷载规范”C 类与 D 类地貌的湍流度剖面之间. 以圆盘中心为基准点, 偏转风场在顺流向 -0.5 ~ 2 m、横流向 -0.75 ~ 0.75 m 范围内均匀性良好. 模拟所得的千米高度偏转风场可为后续研究偏转风作用下千米级超高层建筑的风荷载和风致响应特性、评估偏转风效应奠定基础.

关键词: 千米高度偏转风场; 风洞试验; 导流板系统; Ekman 螺旋; 风向偏转角

中图分类号: TU973.213

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0071-08

Wind tunnel simulation of a thousand-meter high twisted wind flow

ZHENG Chaorong^{1,2}, ZHANG Kan^{1,3}, LIU Zhao^{1,2}, WU Yue^{1,2}, CHEN Wenli^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: To investigate the effect of the twisted wind flow on the wind effects of megatall buildings, a modified passive simulation technology, i. e., a combination of a self-developed vane system and the traditional passive simulation devices, is developed to simulate the twisted wind flow with a length scale of 1:1 000. The mean wind speed and wind direction profiles determine by the field measurement, and the turbulence intensity profiles stipulated in the Chinese Load Code are determined to be the target wind characteristics for the thousand-meter high twisted wind flow. Then the effects of different devices on the twisted wind flow characteristics are analyzed in detail. Results show that the mean wind speed profile for the simulated twisted wind flow followed the power law with an exponent of 0.09, and the mean wind direction profile agrees well with the Ekman spiral with a maximum error of 1.5°. The simulated turbulence intensity profile fluctuate within those of the exposure categories C and D in Chinese Load Code, indicating the reasonability of the results. A good consistent wind property is obtained in an area of 2.5 × 1.5 m² around the center of the turntable with a range of -0.5 - 2 m in the streamwise direction and -0.75 - 0.75 m in the span wise direction. Thus, the simulated twisted wind flow can provide a solid basis for the further study of the characteristics of wind loads and wind-induced responses for thousand-meter high mega tall buildings, as well as systematic evaluation of the effects of twisted wind flow.

Keywords: thousand-meter high twisted wind flow; wind tunnel test; vane system; Ekman spiral; wind twist angle

由于全球化和城市集约化的不断发展, 城市中的超高层建筑不断涌现, 建筑的数量和高度也在不断刷新记录. 据世界高层建筑与都市人居学会 (council on tall buildings and urban habitat, 简称 CTBUH) 统计, 2014—2018 年以来, 共有 68 栋高度超过 300 m 的超高层建筑建成, 其中高度超过 500 m

的超高层建筑共有 6 栋^[1]. 随着经济和科技的不断发展, 建筑物高度还会不断增加, 沙特阿拉伯在建的吉达国王塔结构高度将达 1 008 m, 而前不久迪拜云溪塔的建筑高度又被提升到 1 300 m.

当建筑物高度达到千米量级时, 结构将对风荷载更加敏感, 结构抗风设计起控制作用. 然而, GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[2] (简称“荷载规范”) 虽然给出了四类地貌下的平均风速剖面表达式, 但未对梯度风高度 (300 ~ 550 m) 以上进行规定, 因而无法满足千米级超高层建筑的抗风设计要求. Franklin 等^[3]、Powell 等^[4] 对热带气旋气候下千

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51578186); 中国建筑股份有限公司科研基金 (CSCEC-2015-Z-39)

作者简介: 郑朝荣 (1981—), 男, 副教授, 硕士生导师;

武岳 (1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 武岳, wuyue_2000@163.com

米高度范围内的平均风速剖面进行了研究,结果表明,平均风速剖面在 500 m 高度附近存在拐点,且拐点以上风速逐渐减小. Liu 等^[5]对良态风气候下的千米高度风场进行了实测研究,并采用聚类分析方法将平均风速剖面分为 I 类和 R 类, I 类的平均风速随高度增加而增大, R 类的平均风速随高度增加先增大后减小,最大值出现在 500 ~ 600 m;还分别采用对数律、指数律和 D-H 模型对 I 类剖面进行拟合,发现指数律更准确.

此外,“荷载规范”认为建筑高度范围内风向角不变.然而,随着理论研究和实测的不断深入,学者们发现水平风向是随高度变化的,有时还很显著. Ekman^[6]于 1905 年提出了三力平衡理论(即 Ekman 边界层理论),该理论指出:由于受地球自转偏向力(或科里奥利力)的影响,风矢量随高度的变化呈螺旋线状,且地面风与地转风的最大风向偏转角为 45°. Tamura 等^[7-8]对良态风实测发现,420 m 高度处的最大风向偏转角约为 20°. He 等^[9]则发现 1 000 m 高度处的最大风向偏转角可达 60°,并采用对数律拟合了平均风向剖面.张艳辉^[10]对强台风黑格比过程中的风场进行了观测,结果表明:从 50 m 到 1 050 m 高度范围内台风中心经过前、经过时和经过后风向偏转角分别为 47.38°、43.68°和 26.78°. Liu 等^[5]发现大连地区良态风下 1 000 m 高度处的最大风向偏转角可达 40°,并采用 Ekman 螺旋线拟合了平均风向剖面.对于传统的数百米级超高层建筑而言,风向随高度的变化对其风效应影响较小,基本可忽略;而对于千米级超高层建筑来说,较大的风向偏转角可能会使其结构产生较大的不对称荷载,并导致脉动风荷载的空间相关性发生变化,从而影响其风效应的准确评估.

针对偏转风场的风洞试验和 CFD 数值模拟研究,Flay^[11]于 1996 年模拟了用于帆船风帆研究的偏转风场;Tse 等^[12]和 Weerasuriya 等^[13]在风洞中生成了偏转风场,并对高层建筑(群)周围的行人高度风环境进行了研究;冯成栋等^[14]从 $k-\epsilon$ 基本方程出发,对偏转风场的自保持方法进行了研究.然而,目前对偏转风作用下超高层建筑的风荷载和风致响应特性的研究还较少.

为研究偏转风作用下千米级超高层建筑的风效应,本文在边界层风洞中模拟千米高度偏转风场,详细介绍偏转风场特性的模拟过程和调节规律,分析改进的被动模拟装置对偏转风场特性的影响.

1 试验目标及试验方法

Liu 等^[5]采用边界层风廓线仪(BLP)对大连地

区良态风的千米高度风场进行了实测研究,发现平均风速剖面可分为 I 类和 R 类,其中前者的平均风速剖面可包络住后者,因此是结构抗风设计的最不利来流.作者分别采用指数律、对数律和 D-H 模型^[15]对 I 类平均风速剖面进行拟合,图 1 给出了拟合残差的箱型图.由图可知,指数律的拟合残差最小.图 2 给出了指数律对不同参考风速平均风速剖面的拟合结果,可以看出,拟合曲线均在 95% 置信区间内,与实测风速剖面吻合很好.拟合所得的地面粗糙度指数 α 随参考风速的增加而减小,逐渐趋近于 0.1.考虑到千米级超高层建筑的设计风速通常较大,因此在偏转风场风洞模拟时选用 α 约为 0.1 的指数律作为目标平均风速剖面.

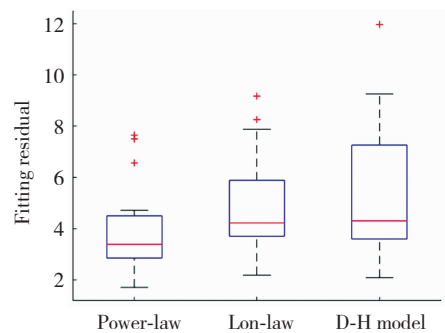


图 1 三种模型对平均风速剖面的拟合残差比较

Fig. 1 Comparison of fitting residual of the mean wind speed profiles by three models

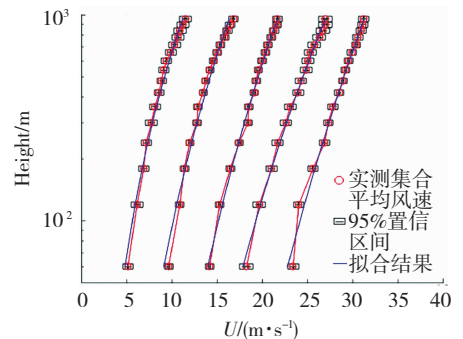


图 2 指数律对平均风速剖面的拟合

Fig. 2 Fitting of mean wind speed profiles by the power law

图 3 给出了不同参考风向和参考风速区间内的平均风向剖面及其与 Ekman 螺旋线(图中虚线)的比较.由图可知,1 000 m 高度处的最大风向偏转角范围为 5° ~ 40°;参考风速或总偏转角越大,Ekman 螺旋线的拟合精度越高,较好地反映了平均风向沿高度的变化趋势.因此,在后续的偏转风场风洞模拟时,将以 1 000 m 高度处总偏转角为 25° 的 Ekman 螺旋线为目标平均风向剖面.

根据 Ekman^[6]的描述,大气边界层中的水平风速分量 u 和 v 可表示为:

$$u = u_g \left[1 - e^{-z/h_E} \cos\left(\frac{z}{h_E}\right) \right] - v_g e^{-z/h_E} \sin\left(\frac{z}{h_E}\right), \quad (1)$$

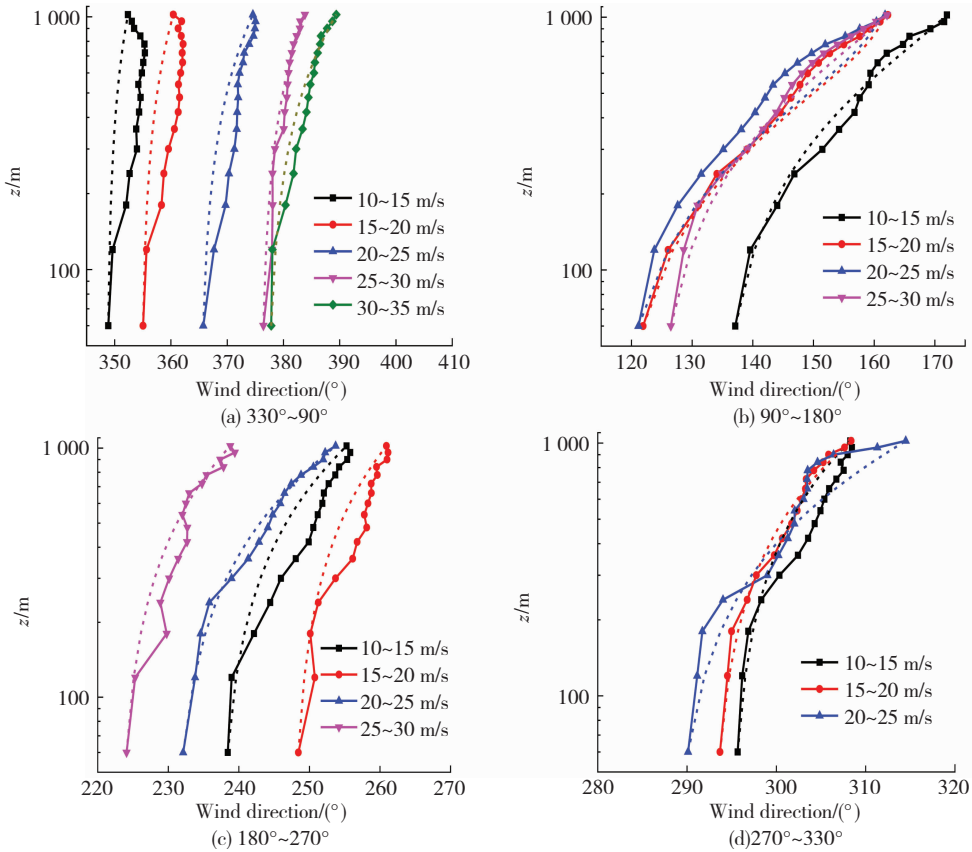


图 3 不同参考风向区间内的平均风向剖面及其 Ekman 螺旋线拟合

Fig. 3 Mean wind direction profiles in different groups of reference directions and their fitting curves by the Ekman spiral

$$v = v_g \left[1 - e^{-z/h_E} \cos\left(\frac{z}{h_E}\right) \right] + u_g e^{-z/h_E} \sin\left(\frac{z}{h_E}\right). \quad (2)$$

式中: u_g 和 v_g 为地转风速的水平分量; h_E 为 Ekman 高度, $h_E = \sqrt{2K/f}$; f 为科里奥利系数; K 为湍动黏性系数.

Ekman 螺旋线(图 4)可表示为

$$\gamma(z) = \arctan(v/u). \quad (3)$$

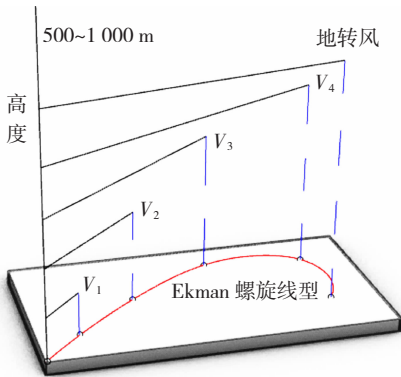


图 4 北半球上水平风向随高度向右偏转所形成的 Ekman 螺旋线

Fig. 4 Ekman spiral generated by the wind direction changes along the height in the northern hemisphere

由式(3)可知,地转风的平均风向为 0° ,地面与地转的风速矢量间的夹角为 45° .由于本文风洞试验主要关注风场自下而上平均风向角沿高度的变化,因此,为方便比较,在试验时将风洞中 1 000 mm

高度处的平均风向作为 0° ,而后文中的平均风向剖面均是以该点为基准而确定的风向偏转角.

由于 BLP 的采样频率较低,无法获得风速的脉动信号,因此在后续的偏转风场风洞模拟时,采用“荷载规范”中 A~D 四类地貌的湍流强度剖面作为目标湍流强度剖面,确保其模拟的合理性.

风洞试验是在哈尔滨工业大学风洞与浪槽联合实验室的小试验段中进行的,其尺寸为宽 \times 高 \times 长 = 4.0 m \times 3.0 m \times 25 m.采用眼镜蛇探头(TFI 系列 100)测量风场中不同空间点的三维风速时程,分析得到平均风速、风向剖面和湍流度剖面等结果.眼镜蛇探头是一种多孔压力探头,其风速量程范围为 2~100 m/s,风向测量角范围为 $\pm 45^\circ$.使用三维移测架系统固定眼镜蛇探头,将采样点定位在圆盘中心,在 10~1 550 mm 高度内共进行 20 次采样.采样频率设为 625 Hz,采样时长为 60 s.

传统的被动模拟装置(如尖劈、粗糙元、挡板和格栅等)不能使风向发生偏转,因此设计了一组导流板,见图 5.每个导流板总高 1.7 m,包括旋转区 1.25 m 和非旋转区 0.45 m.旋转区的偏转角变化遵循 Ekman 螺旋线,最大偏转角为 35° .该值大于后续风场模拟的偏转角 25° ,主要是考虑到偏转角沿下游发生衰减.根据动力气象学,北半球上的气流将发生顺时针偏转,而南半球上的气流则发生逆时针偏转.

根据本文导流板的设计和布置,模拟所得的风场从地面风到地转风将发生逆时针偏转.由于本文生成偏转风场的目的是为了后续研究有/无风向偏转对千米级超高层建筑的风效应特性的影响,考虑到建筑模型的对称性以及风洞试验中风向角的变化规律,处于北半球上顺时针偏转风场下的建筑模型的风效应实际上亦可由本文逆时针偏转风场下的风效应对称得到.因此,偏转风场的风向变化并不会影响后续研究的结论.

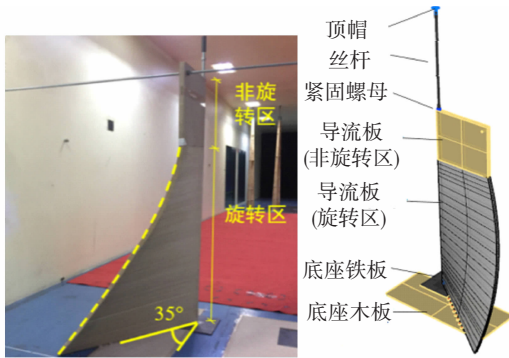


图 5 单个导流板构造及导流板系统在风洞中安装

Fig. 5 Construction of a single vane and the vane system connected by screw rods in the wind tunnel

2 千米高度偏转风场调节规律分析

文献[16]已对试验结果进行了分析,本文以生成偏转角为 25°的千米高度偏转风场为例,分析不同被动模拟装置对偏转风场的调节规律.

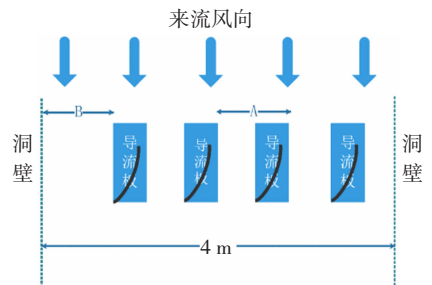
2.1 导流板的影响

为研究不同导流板摆放方案对偏转风场的影响,对图 6 中的 4 种工况进行风场测量,测点为风洞圆盘中心,距离导流板后缘 5 m.

图 7 给出了 4 种工况下的平均风速、风向剖面及湍流度剖面与目标曲线的比较.由图 7 可知,只布置导流板时,平均风速剖面不满足指数律分布,且拟合所得的地面粗糙度指数 α 小于 0.1;平均风向分布基本接近 Ekman 螺线,且 1 000 mm 高度处的最大偏转角约为 25.2°,与目标值吻合较好;湍流度剖面均与四类地貌的湍流度剖面^[2]相差较大.因此仅

为保证导流板的稳定性和风洞试验的安全性,设计了一套框架系统,见图 5.每一个导流板自上而下由一根丝杆贯穿,为了能够在顶部与洞壁稳固接触,安装了顶帽,并在顶帽和洞壁间加入橡胶;在导流板底部设计了底座木板,用于试验时的定位安装,并且在导流板和木板间预留了螺丝孔位,用于导流板和木板的稳定连接;在每一个导流板间,用丝杆穿过导流板非旋转区的预留孔位,并将左右两端顶在风洞洞壁上,使各个导流板相互连接并固定.

采用导流板无法模拟目标风场,该结论与 Tse 等^[12]的研究结论存在一定差别,其原因可能是不同风洞的截面尺寸和流场品质不同引起的.因此,还需借助其他被动模拟装置进行调节.



工况 1#: 3 个导流板, $A=1.0$ m, $B=1.2$ m
 工况 2#: 4 个导流板, $A=0.7$ m, $B=1.2$ m
 工况 3#: 4 个导流板, $A=0.7$ m, $B=1.0$ m
 工况 4#: 4 个导流板, $A=0.75$ m, $B=1.0$ m

图 6 导流板平面布置图及试验工况设置

Fig. 6 Arrangement of the vane system and test cases

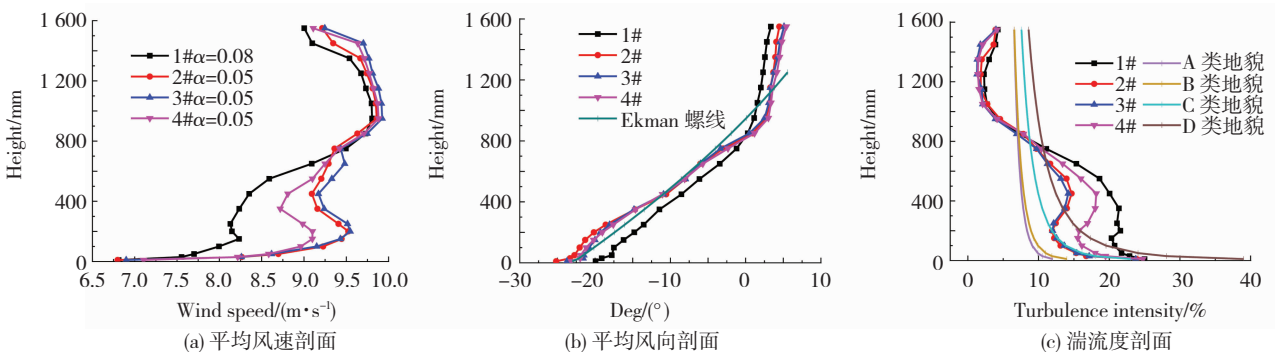


图 7 不同导流板工况的风场特性对比

Fig. 7 Comparison of the wind field characteristics under different arrangements of the vane system

通过比较 4 种工况可知,减少导流板个数(由工况 2#变为 1#)能够增大 α ,但会减小风向偏转角以及增加底部湍流度,均与目标值相背离;调整导流板与左侧洞壁间距(由工况 2#变为 3#)不能有效改变风场特性;增大导流板间距(由工况 3#变为 4#)能够在 150 ~ 750 mm 高度范围内减小风速但会增加湍流度. 相比来说,工况 3#的风场特性与目标风场特性

更为接近,且导流板距离风洞右侧适中,更具可操作性,因此后面的风场调节将以工况 3#为基础进行.

2.2 尖劈的影响

利用尖劈能有效调节平均风速剖面和湍流度剖面^[17-18]. 因此,在工况 3#的基础上,分别加入 5 个、6 个和 7 个尖劈(工况 5# ~ 7#)对风场进行调节. 尖劈位于圆盘中心上游 14.6 m 处,结果见图 8.

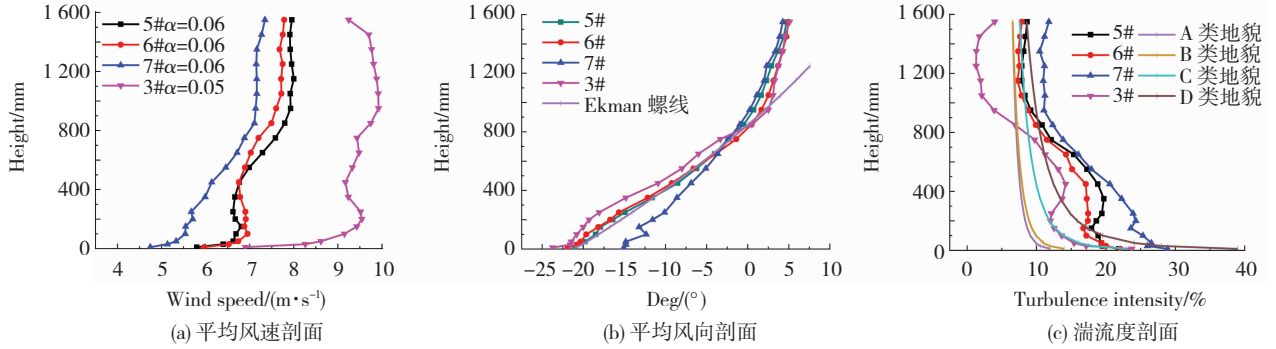


图 8 不同尖劈工况的风场特性对比

Fig. 8 Comparison of the wind field characteristics under different arrangements of the spires

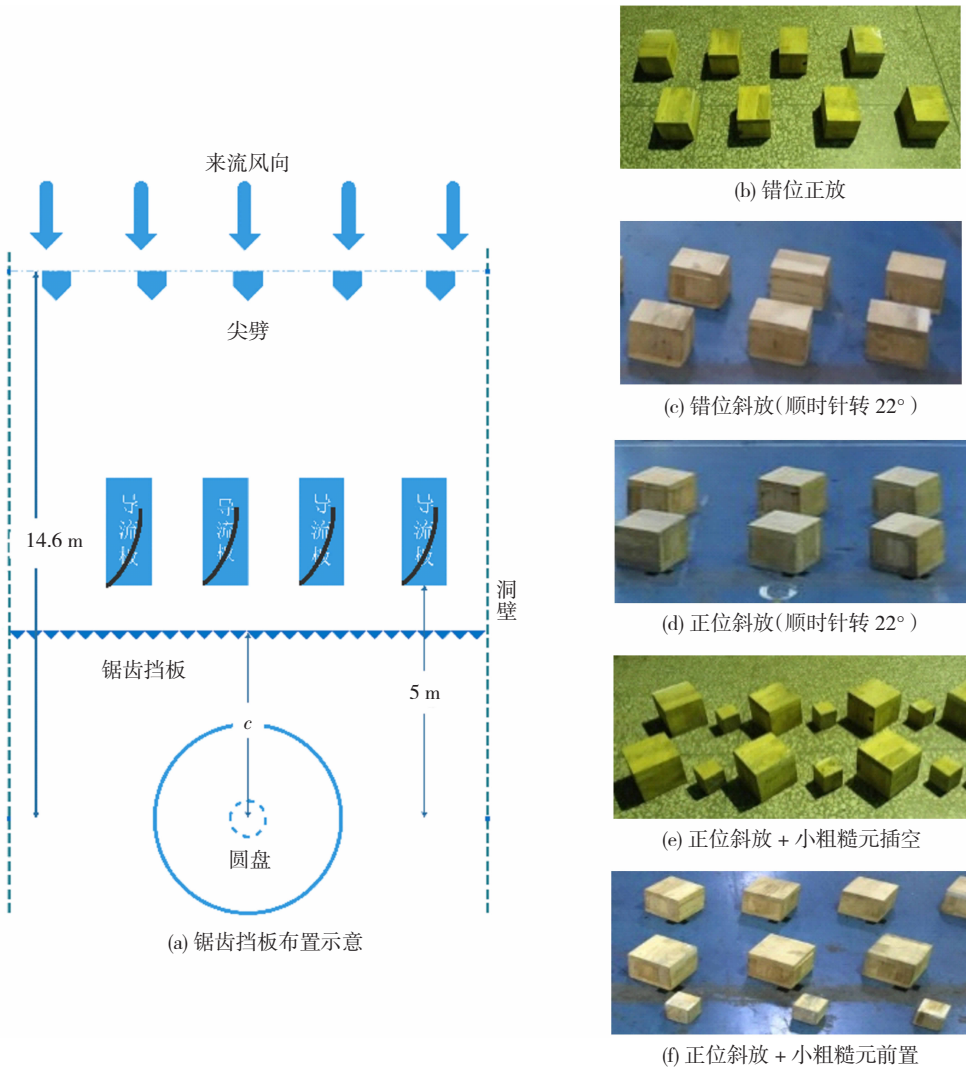


图 9 被动模拟装置摆放示意

Fig. 9 Schematic diagram of different arrangements of the passive simulator

由图 8(a)可知,加入尖劈后,整个高度范围内的平均风速显著减小,逐渐具有指数律的形式.由图 8(b)可知,当尖劈数量较少时(工况 5#和 6#),平均风向剖面具有较好的 Ekman 螺线趋势,且总风向偏转角无明显变化.由图 8(c)可知,加入尖劈后,湍流度整体增大,且工况 5#和 6#的湍流度剖面大多在目标范围之内,而工况 7#的数值偏大.由上述分析可知,加入尖劈后,风场特性有所改善,但与目标值还存在一定差别,因此还得基于工况 5#作进一步调节.

2.3 锯齿挡板、粗糙元和地毯的影响

分别在导流板和圆盘中心间、导流板和尖劈间和尖劈上游等处布置锯齿挡板,见图 9(a).结果表明:当锯齿挡板布置在距圆盘中心 14.1 m(工况 8#)时,模拟所得的风剖面较为理想,与目标风场特性较接近.因此,以工况 8#为基础,在导流板和尖劈间铺上 8 m 长地毯,在距离圆盘中心 2 m 处布置粗糙元,进一步研究粗糙元和地毯对风场的调节作用.粗糙元和地毯的摆放方式分别见图 9(b)~(f)和表 1,编号分别为 9#~13#.

表 1 粗糙元和地毯布置方案

编号	工况
9#	8 m 地毯 + 2 排 13 个粗糙元错位正放
10#	8 m 地毯 + 2 排 13 个粗糙元错位斜放
11#	8 m 地毯 + 2 排 13 个粗糙元正位斜放
12#	8 m 地毯 + 2 排 13 个粗糙元正位斜放 + 小粗糙元插空
13#	8 m 地毯 + 2 排 13 个粗糙元正位斜放 + 1 排小粗糙元前置

图 10 给出了不同粗糙元布置方案所得的平均风速、风向剖面和湍流度剖面.由图 10 可知,粗糙元和地毯的加入降低了底部风速,增大了 α 值;不同粗糙元摆放方式均一定程度增大了底部风向偏转角(从 21° 增加到约 24.2°).将粗糙元旋转一定角度(正位斜放),迎合了底部的风向偏转,对风场调节起到了意想不到的效果,100~850 mm 高度的湍流度明显降低,使湍流度剖面接近目标湍流度剖面.因此,最终采用工况 11#成功地生成了最大风向偏转角为 25° 的千米高度偏转风场,为后续研究偏转风下千米级超高层建筑的风荷载和风致响应特性、评估其偏转风效应奠定基础.

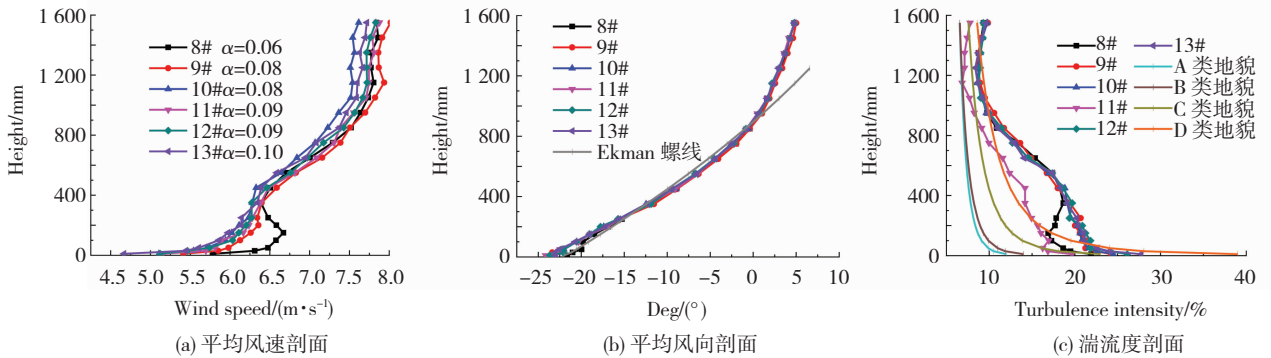


图 10 不同粗糙元工况的风场特性对比

Fig. 10 Comparison of the wind field characteristics under different arrangements of the roughness elements

3 千米高度偏转风场特性分析

前文通过被动模拟装置的逐次调节方法成功地生成了偏转角为 25° 的千米高度偏转风场,图 11 给出了模拟装置的平面布置图.图 12 给出了模拟所得的平均风速、风向剖面和湍流度剖面.由图 12 可知,指数律风速剖面在 $\pm 5\%$ 误差范围内很好地拟合了平均风速剖面, α 约为 0.09;平均风向剖面的最大风向偏转角为 24.2° ,与目标值 25° 非常接近,且在 $0 \sim 1050$ mm 范围内与 Ekman 螺线吻合很好,最大误差不超过 1.5° ;湍流度剖面基本处于“荷载规范”中 C 类和 D 类地貌的湍流度剖面之间,在一定程度上验

证了其合理性.

在获得圆盘中心的偏转风场特性后,以该中心为基准点,分别对顺流向测点($-1 \text{ m} \leq y \leq 3 \text{ m}$)与横流向测点($-1 \text{ m} \leq x \leq 1 \text{ m}$)的风速风向进行测量,研究风场的均匀性.图 13 分别给出了一些测点的平均风速、平均风向角、湍流度与基准点的偏差.由图可知,各测点的平均风速偏差大部分在 $\pm 15\%$ 范围内,且自下而上不断减小;平均风向偏差均在 $\pm 5^\circ$ 范围内;除底部少数测点外,湍流度偏差均在 $\pm 5\%$ 范围内.因此,圆盘中心的均匀区可确定为顺流向 2.5 m ($-0.5 \sim 2 \text{ m}$)、横流向 1.5 m ($-0.75 \sim 0.75 \text{ m}$),可见顺流向的均匀性优于横流向.

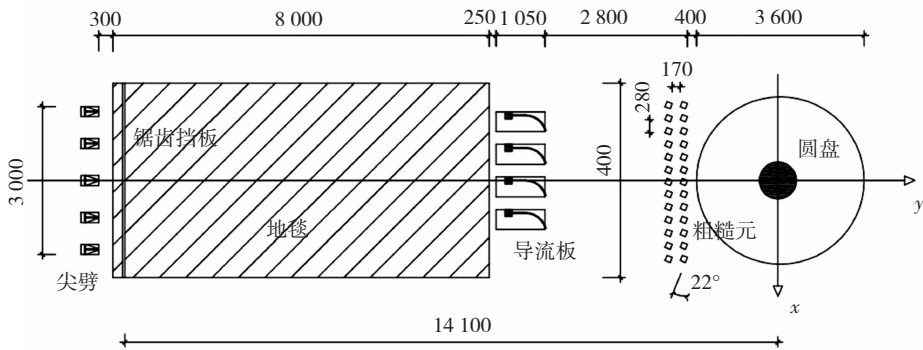


图 11 千米高度偏转风场的风洞模拟布置 (mm)

Fig. 11 Setup of the passive devices to simulate the thousand-meter twisted wind flow in wind tunnel (mm)

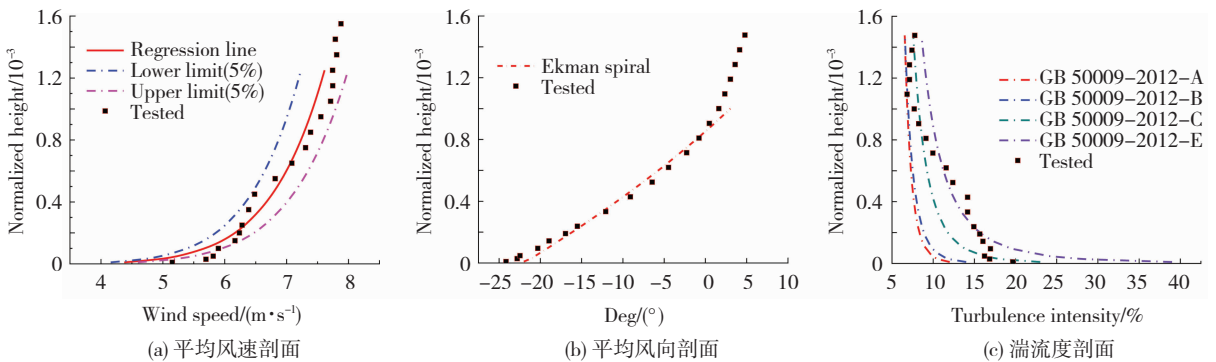


图 12 千米高度偏转风场特性

Fig. 12 Wind field characteristics for the thousand-meter twisted wind flow

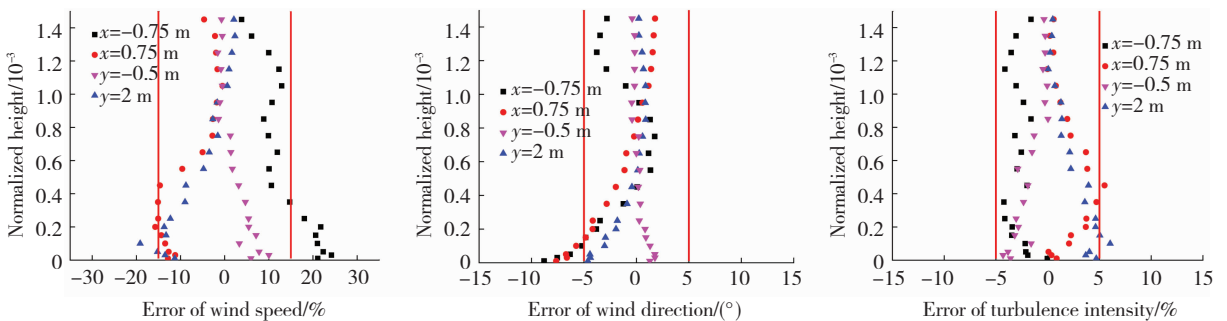


图 13 顺流向和横流向测点的平均风速、平均风向偏差、湍流强度偏差

Fig. 13 Deviation of the mean wind speeds and mean wind directions in longitudinal and lateral directions

4 结 论

采用改进的被动模拟装置对大气边界层中的千米高度偏转风场进行风洞模拟研究,提出了目标风场特性的风洞模拟方法,为后续研究千米级超高层

建筑的风效应特性奠定基础.

1) 基于作者针对大连地区实测所得的千米高度平均风速、风向剖面,将 α 约为0.1的平均风速剖面、最大风向偏转角约为 25° 的Ekman螺旋型平均风向剖面以及“荷载规范”中的湍流度剖面确定为

目标风场特性,为后续的千米高度偏转风场风洞模拟提供依据.

2)自主设计了一套能够模拟风向偏转的导流板系统,并结合传统的被动模拟装置对偏转风场进行了调节,分析了不同装置的影响.

3)模拟所得的平均风速剖面符合指数律, α 约为 0.09.平均风向剖面与 Ekman 螺线吻合很好,最大误差不超过 1.5° ;最大风向偏转角为 24.2° .湍流度剖面基本处于 C 类和 D 类地貌的湍流度剖面之间.以圆盘中心为基准点,偏转风场在顺流向 $-0.5 \sim 2$ m、横流向 $-0.75 \sim 0.75$ m 范围内具有较好的均匀性.

参考文献

- [1] Council on tall buildings and urban habitat[EB/OL]. [2019-01-01]. <http://www.skyscrapercenter.com/>
- [2] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012
Load code for the design of building structures:GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [3] FRANKLIN J L, BLACK M L, VALDE K. Eyewall wind profiles in hurricanes determined by GPS dropwindsondes [C]// Proceedings of 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Fort Lauderdale, USA: American Meteorological Society, 2000: 446
- [4] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. Nature, 2003, 422(6929): 280. DOI: 10.1038/nature01481
- [5] LIU Z, ZHENG C R, WU Y, et al. Investigation on characteristics of thousand-meter height wind profiles at non-tropical cyclone prone areas based on field measurement[J]. Building and Environment, 2018, 130: 62. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.001
- [6] EKMAN V W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents[J]. Arkiv for Matematik Astronomi Och Fysik, 1905, 2(11): 11
- [7] TAMURA Y, SUDA K, SASAKI A, et al. Simultaneous measurements of wind speed profiles at two sites using Doppler sodars [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14/15): 1647. DOI: 10.1016/S0167-6105(00)00085-4
- [8] TAMURA Y, IWATANI Y, HIBI K, et al. Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(6): 415. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.08.005
- [9] HE Y C, CHAN P W, LI Q S. Wind profiles of tropical cyclones as observed by Doppler wind profiler and anemometer[J]. Wind & Structures, 2013, 17(4): 419. DOI: 10.12989/was.2013.17.4.419
- [10] 张艳辉.超高层建筑结构旋转风荷载效应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013
ZHANG Yanhui. Study on wind veering effects on super-tall buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [11] FLAY R G J. A twisted flow wind tunnel for testing yacht sails[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 63(1/2/3): 171. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00080-3
- [12] TSE K T, WEERASURIYA A U, KWOK K C S. Simulation of twisted wind flows in a boundary layer wind tunnel for pedestrian-level wind tunnel tests [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 159(12): 99. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.10.010
- [13] WEERASURIYA A U, TSE K T, ZHANG Xuelin, et al. Equivalent wind incidence angle method: A new technique to integrate the effects of twisted wind flows to AVA[J]. Building and Environment, 2018, 139: 46. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.017
- [14] 冯成栋, 顾明. 基于 RANS 对考虑风向随高度偏转的大气边界层自保持研究[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 28
FENG Chengdong, GU Ming. Study on self-sustained atmospheric boundary layer considering wind veering with height based on RANS [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 28. DOI: CNKI: SUN:GCLX.0.2019-02-003
- [15] DEAVES D M, HARRIS R I. A mathematical model of the structure of strong winds [R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1978
- [16] LIU Z, ZHENG C R, WU Y, et al. Wind tunnel simulation of wind flows with the characteristics of thousand-meter high ABL[J]. Building and Environment, 2019, 152: 80. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.012
- [17] 黄鹏, 全涌, 顾明. TL-2 风洞大气边界层被动模拟方法的研究 [J]. 同济大学学报, 1999, 27(2): 136
HUANG Peng, QUAN Yong, GU Ming. Research of passive simulation method of atmospheric boundary layer in TJ-2 wind tunnel[J]. Journal of Tongji University, 1999, 27(2): 136. DOI: 10.1088/0256-307X/16/12/013
- [18] 丁思华.近地湍流被动模拟实验技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013
DING Sihua. Experimental study on the passive simulation of turbulence in the boundary layer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013

(编辑 赵丽莹)