

文章编号: 1672-3031(2021)03-0329-06

## 环境风作用下边界层内速度分布风洞试验研究

王树鑫<sup>1,2</sup>, 李陆军<sup>2</sup>, 赵顺安<sup>2</sup>, 黄春花<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045; 2. 中国水利水电科学研究院 水力学研究所, 北京 100038)

**摘要:** 尖劈和粗糙元广泛地应用于风洞试验中的大气边界层模拟, 虽可模拟不同地貌的平均剖面流速, 但存在试验准备周期长、具体操作复杂等问题。为快速准确开展大气边界层平均剖面流速试验, 本文在风洞底部铺设了粗糙度约为 50  $\mu\text{m}$  木板用以模拟环境地面, 采用皮托管测量空气全压和静压的方法, 获得了空气流速在木板上方的分布, 给出了木板上方边界层的轮廓线与风剖面指数。研究表明: 风速在风洞测试段木地板上方边界层的分布呈幂函数分布, 风剖面指数约为 0.172 ~ 0.195, 这与田野、乡村、丛林、平坦开阔地及低层建筑物稀少地区和树木及低层建筑物密集地区、中高层建筑物稀少地区、平缓的丘陵地的地貌指数接近, 且当边界层顶部风速大于 9.77 m/s 时, 指数有随风速的增大而减小的特点。

**关键词:** 大气边界层; 环境风洞; 风速剖面; 速度分布; 木地板

**中图分类号:** TU 991.42

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200022

### 1 研究背景

近地面的流场与我们的生活息息相关, 如工农业生产、城市群形成的局部大气辐射、环境保护等。当大气流过近地面的田野、乡村、丛林、山川和城镇时, 地面摩擦使风运动产生阻力, 气流以梯度风速流动, 当超过一定高度时, 地面摩擦对风速的影响可以忽略, 此时对应的高度为大气边界层高度。目前人们居住及使用的大部分建筑物都处于大气边界层内, 大气边界层的特性主要包括四个方面: 平均剖面流速、湍流度、脉动风速功率谱和湍流积分尺度。而其他风特性参数, 例如阵风因子、Reynolds 应力和空间的相关函数等可作为关键特性的补充<sup>[1]</sup>。风洞试验必须按照建筑物所处环境模拟风速梯度随高度的变化规律。为全面研究各类地形地貌风速梯度随高度的变化规律, 国内外学者对其展开了大量研究, 其中较为典型的有 Counlihan 等<sup>[2-3]</sup>初步提出了模拟城市与乡村地貌的方法; 白景峰<sup>[4]</sup>利用尖劈和粗糙元对靠近海洋的港口和附近建筑物较为稀疏的地貌成功进行了模拟; 施宗城<sup>[5]</sup>给出了风洞试验中模拟大气边界层流场的实践经验; Sill<sup>[6-8]</sup>等集中分析了立方体粗糙元的尺寸、排列方式和粗糙度的关系; Asanuma<sup>[9]</sup>等利用无线探测仪得到缓缓起伏地域上方的风速剖面 and 湿度剖面; 陈波<sup>[10]</sup>通过风洞试验研究了地貌类型和建筑物平面长宽比对平屋面建筑平均风压系数、均方根风压系数、极值风压系数、屋面平均升力系数的影响规律; 庞加斌<sup>[11]</sup>针对我国沿海和山区强风, 通过风观测及风洞模拟研究分析平均和脉动风速的统计特性。

风洞是进行空气动力学试验的基本设备<sup>[12]</sup>。风洞试验是解决城市大气中的污染扩散、环境风影响等问题的重要研究手段。在风洞中正确模拟大气边界层的流动特性和地形条件, 关键是要在风洞测试段地面上方产生类似环境风剖面指数分布的边界层, 因此在开展风洞环境风的影响试验前, 须依据试验对象所处环境, 通过试验措施产生一个风速沿高度变化的边界层, 以模拟真实风速随高度的变化规律<sup>[13-14]</sup>。目前常用的方法包括尖劈和粗糙元等方法, 但存在试验准备周期长、具体操作复杂

收稿日期: 2020-03-04; 网络首发时间: 2021-04-20

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210419.1408.002.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院青年专项(HY0145B352017)

作者简介: 王树鑫(1994-), 硕士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 617982961@qq.com

通讯作者: 李陆军(1981-), 博士, 正高级工程师, 主要从事流体力学研究。E-mail: lilujun2008@126.com

等问题。

针对上述问题,为能够快速准确地开展大气边界层平均剖面流速风洞试验<sup>[14]</sup>,本文在风洞试验段底部铺设了粗糙度约为 $50\ \mu\text{m}$ 木板,以模拟环境地面,并采用皮托管测量空气全压和静压的方法,获得了空气流速在木板上方的分布,给出了木板上方边界层的轮廓线与风剖面指数。

## 2 试验条件

**2.1 试验测量仪器** 试验所用风速测试仪器:智能压力风速测量系统、PSI9000压力数据采集系统、阿斯曼干湿球表、大气压表、L型皮托管、测压软管、粗糙度约 $50\ \mu\text{m}$ 木板和皮托管固定架。风速测试系统的测量范围 $0\sim 40\ \text{m/s}$ ,其仪器精度 $0.01\ \text{m/s}$ ;压力测试系统的精度为 $\pm 1\ \text{Pa}$ ;皮托管为德国德图testo不锈钢L型皮托管,量程 $0\sim 1\ \text{kPa}$ ,精度 $0.1\%$ 。

**2.2 风洞结构** 本次试验在中国水利水电科学研究院环境风洞中进行,风洞为直流式低速闭口风洞,试验段剖面为方形(4个角为光滑过渡),宽 $2000\ \text{mm}$ 、高 $2000\ \text{mm}$ 、长度 $11\ 000\ \text{mm}$ ,收缩比6,速度范围 $0.5\sim 40\ \text{m/s}$ 。风洞配置有操作台,内含配电系统,控制系统,显示系统以及相应的软件所集成的中央计算机操控平台。风洞结构如图1所示,木板铺设示意图如图2中绿色部分所示。

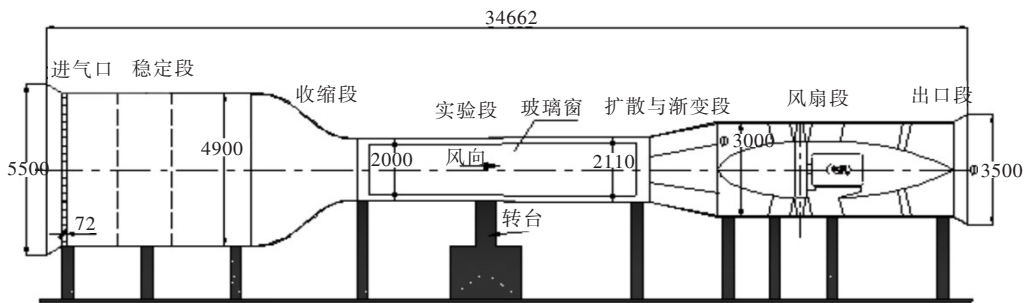


图1 风洞结构(单位: mm)



图2 风洞木板铺设示意图

## 3 试验方法

**3.1 试验测量** 在距风洞测试段进口 $2.5\ \text{m}$ 处固定支架,垂直测点间距为 $5\ \text{cm}$ ,最低测点距离木板为 $3\ \text{cm}$ 。利用软管将L型皮托管与压力采集设备(PSI)相连,得到皮托管内的总压力值与静压力值,并根据测量阿斯曼干湿球表与大气压表数值计算出实验室的密度。利用伯努利方程得出的风压关系式得出风速<sup>[15]</sup>,并根据风速剖面试验数据进行参数拟合得到风剖面指数值。

**3.2 风速计算** 风速测量方法根据伯努利方程得出的风压关系,通过测量皮托管总压与静压计算出动压,测量空气的干、湿球温度和大气压,并根据式(1)一式(5)计算出实验室的空气密度<sup>[16]</sup>,从而

得出风速。

$$\phi = \frac{P''_{\tau} - 0.000662P_a(\theta - \tau)}{P''_{\theta}} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\rho_v}{\rho''_v} = \frac{P_v}{P''_T} \quad (2)$$

$$\rho_d = \frac{P_d}{TR_d} \quad (3)$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{TR_v} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{P_0}{T_0 \cdot R_a} \quad (5)$$

式中： $\phi$  为空气的相对湿度； $P''_{\tau}$  为湿球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $P''_{\theta}$  为干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $P_a$  为大气压， $\text{Pa}$ ； $P''_T$  为湿球温度对应的饱和水蒸气压力； $\rho_d$  为干空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $\rho_v$  为水蒸气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $P_d$  为干空气分压力， $\text{Pa}$ ； $P_v$  为水蒸气分压力， $\text{Pa}$ ； $T$  为热力学温度值， $^{\circ}\text{C}$ ； $R_d$  为干空气气体常数， $287.14 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $R_v$  为水蒸气气体常数， $461.53 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $\rho$  为环境空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $P_0$  为大气压， $\text{Pa}$ ； $R_a$  为湿空气气体常数， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $T_0$  为环境空气干球温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

依据伯努利方程可得风压关系：

$$U = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho}} \quad (6)$$

式中： $P_0$  为总压， $\text{Pa}$ ； $P_1$  为静压， $\text{Pa}$ ； $\rho$  为空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $U$  为风速， $\text{m}/\text{s}$ 。

根据实测断面平均风速可以计算出相应雷诺数：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (7)$$

式中： $v$  为测量断面平均风速， $\text{m}/\text{s}$ ； $d$  为实测特征高度，取  $1.86 \text{ m}$ ； $\mu$  为空气动力黏性系数，取  $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

## 4 试验结果与分析

**4.1 试验结果** 试验对同一块木板在不同风速下的风洞边界层情况进行研究，经式(1)一式(5)计算实测大气密度为  $1.23 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。工况 1 为风洞中未安装木板前测试风速为  $5 \text{ m}/\text{s}$ ，安装木板后经测量最高位置处风速为  $4.86 \text{ m}/\text{s}$ ；工况 2 为风洞中未安装木板前测试风速为  $10 \text{ m}/\text{s}$ ，安装木板后经测量最高位

表 1 不同高度的速度分布

(单位： $\text{m}/\text{s}$ )

高度/cm	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
3	3.01	5.87	8.93	12.43
8	3.68	7.04	10.61	14.37
13	4.07	7.62	11.27	15.52
18	4.44	8.34	12.06	16.61
23	4.53	8.83	12.87	17.66
28	4.62	9.22	13.45	18.47
33	4.59	9.34	13.66	18.74
38	4.83	9.72	14.48	19.61
43	4.85	9.75	14.49	19.83
48	4.86	9.76	14.49	19.83
53	4.86	9.77	14.5	19.84

置处风速为 9.77 m/s；工况 3 为风洞中未安装木板前测试风速为 15 m/s，安装木板后经测量最高位置处风速为 14.49 m/s；工况 4 为风洞中未安装木板前测试风速为 20 m/s，安装木板后经测量最高位置处风速为 19.83 m/s。根据式(7)可知，雷诺数范围在  $6.14 \times 10^5 \sim 2.51 \times 10^6$ 。试验中测量了风洞边界层内风速，试验结果见表 1，数据处理结果见图 3。

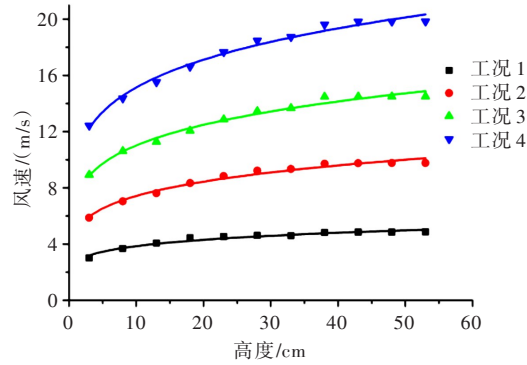


图3 平均流速剖面图

**4.2 试验结果分析** 根据相关资料显示<sup>[17-20]</sup>，研究风速与高度的规律主要有两种模拟方法：指数律和对数律。通过对试验数据拟合发现符合指数律，采用指数律对数据进行分析，其表达式如下：

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^n \quad (8)$$

式中： $Z$ 表示高度，m； $U$ 表示风速，m/s；下标 1 和 2 表示两个不同的高度； $n$ 表示风剖面指数。

对式(3)两边取对数，可得：

$$\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = n \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \quad (9)$$

令：

$$y = \ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right), \quad x = \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \quad (10)$$

则得：

$$y = nx \quad (11)$$

即  $y$  与  $x$  成正比例， $n$  为风剖面指数。

下标 1 取 3 cm 高度处，下标 2 为其他高度，对表 1 中的试验数据按照式(10)整理，可得表 2。根据表 2 可知，当  $x < 2.66$  时， $x$  与  $y$  呈正比例关系，即边界层厚度为 43.0 cm。

表2 不同高度上  $x$  与  $y$  的对应关系

高度/cm	$x$	$y$			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
8.0	0.98	0.20	0.18	0.17	0.15
13.0	1.47	0.30	0.26	0.23	0.22
18.0	1.79	0.39	0.35	0.30	0.29
23.0	2.04	0.41	0.41	0.37	0.35
28.0	2.23	0.43	0.45	0.41	0.40
33.0	2.40	0.42	0.46	0.43	0.41
38.0	2.54	0.47	0.50	0.48	0.46
43.0	2.66	0.48	0.51	0.48	0.47
48.0	2.77	0.48	0.51	0.48	0.47
53.0	2.87	0.48	0.51	0.48	0.47

图4给出了边界层内的 $x$ 与 $y$ 的线性关系图和风剖面指数 $n$ 。根据图4可知,4个工况对应的系数分别为0.190、0.195、0.180、0.172,当风速大于9.77 m/s时,风剖面指数 $n$ 随最高位置处的风速 $U_{\max}$ 增大而减小。

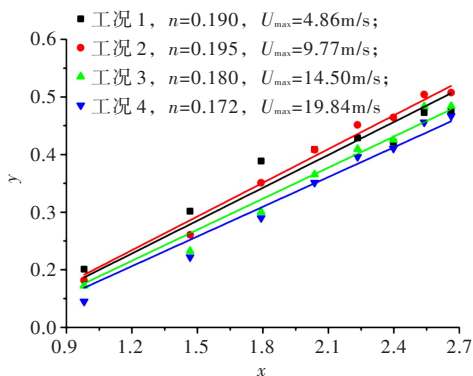


图4 边界层内 $y$ 与 $x$ 的关系及其对应的系数

表3给出的4种地貌的大气边界层的风剖面指数 $n$ <sup>[21-24]</sup>。对照表3可知,试验给出的边界层风剖面指数 $n$ 与地貌2和地貌3接近。因此,通过底部布置粗糙度约为50  $\mu\text{m}$ 木板的方式,可以近似模拟地貌2和地貌3的边界层速度分布。后续将研究不同材料产生边界层内风速分布,为其他地貌模拟提供参考。

表3 不同地表对应的指数 $n$

地貌	地表状况	指数 $n$
1	海面、海岸、开阔水面、沙漠	0.12
2	田野、乡村、丛林、平坦开阔地及低层建筑物稀少地区	0.16
3	树木及低层建筑物密集地区、中高层建筑物稀少地区、平缓的丘陵地	0.22
4	中高层建筑物密集地区、起伏较大的丘陵地	0.30

## 5 结论

本文通过在风洞测试段铺设木地板,测量底部边界层内速度分布,获得了风速分布及其风剖面指数。主要结论如下:

- (1)当采用木板模拟环境地面,边界层内速度分布呈指数形式。
- (2)铺设木板可获得一个43 cm厚边界层,该边界层可供环境风模拟研究使用。
- (3)边界层内的分布指数 $n$ 为0.172~0.195,这与表3中的地貌2(田野、乡村、丛林、平坦开阔地及低层建筑物稀少地区)和地貌3(树木及低层建筑物密集地区、中高层建筑物稀少地区、平缓的丘陵地)数接近。
- (4)边界层顶部最大风速 $U_{\max}$ 高于9.77 m/s时,风剖面指数 $n$ 随最高位置处的风速 $U_{\max}$ 增大而减小。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 王兆印.大气边界层的风洞模拟[J].实验力学,1998(9):283-293.
- [ 2 ] COUNIHAN J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel[J]. Atmospheric Environment, 1969(3): 197-214.
- [ 3 ] COUNIHAN J. Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel[J]. Atmospheric Environment, 1973(7): 673-689.
- [ 4 ] 白景峰,胡传新.港口地貌大气边界层风洞试验模拟[J].水道港口,2015,36(1):75-78.
- [ 5 ] 施宗城.中性大气边界层模拟试验调试方法研究[J].同济大学学报,1994(4):469-474.
- [ 6 ] SILL B L. Turbulent boundary layer profiles over uniform rough surfaces[J]. Journal of Wind Engineering and In-

- dustrial Aerodynamics, 1981(7): 361–366.
- [ 7 ] FANG C, SILL B L. Aerodynamic roughness length: correlation with roughness elements[J]. Journal of Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992(4): 449–460.
- [ 8 ] JAY Y Q, SILL B L, REINHOLD T A. Effects of roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(7): 215–230.
- [ 9 ] ASANUMA J, DIAS N, KUSTAS W P, et al. Observations of neutral profiles of wind speed and specific humidity above a gently rolling landsurface[J]. Meteorological Society of Japan, 2000, 78: 719–730.
- [ 10 ] 陈波, 黄正源, 尹泽鹏, 等. 地貌类型和长宽比对平屋面建筑风荷载的影响分析[J]. 建筑结构学报, 2019(7): 54–61.
- [ 11 ] 庞加斌. 沿海和山区强风特性的观测分析与风洞模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [ 12 ] 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1985.
- [ 13 ] 刘彧, 周琦, 于汪洋. 水工模型试验中测压排测值图像数字处理方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(6): 446–450.
- [ 14 ] 余志林, 李贵雷, 赵顺安. 直接空冷凝汽器V型布置与A型布置防风能力对比研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(2): 143–148.
- [ 15 ] 李会知. 风洞模拟大气边界层的数据处理[J]. 郑州大学学报, 2002, 12(4): 64–67.
- [ 16 ] 赵顺安. 冷却塔工艺原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [ 17 ] LOPES MFP, GLÓRIA GOMES MFERREIRA JG. Simulation of the atmospheric boundary layer for model testing in a short wind tunnel[J]. Experimental Techniques, 2008, 32(4): 36–43.
- [ 18 ] 周兴, 李建兰. 3.5m×2.5m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.
- [ 19 ] 周兴. 大气边界层实验模拟及水平轴风力机叶片动力学特性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [ 20 ] 颜大椿. 实验流体力学[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2019.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 项海帆. 公路桥梁抗风设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [ 23 ] 魏芬洋. 基于振动格栅的大气边界层风洞模拟方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [ 24 ] 胡少华, 李陆军, 吴襄竹, 等. 环境风对自然通风海水冷却塔的性能影响原型观测及分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 45–50.

### Wind tunnel experiment of air velocity profile in the boundary layer induced by environment wind

WANG Shuxin<sup>1, 2</sup>, LI Lujun<sup>2</sup>, ZHAO Shun'an<sup>2</sup>, HUANG Chunhua<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The spires and roughness element methods are widely applied in the simulation of atmospheric boundary layer wind tunnel experiments. Although they can simulate the average profile velocity of different landforms, there are some problems such as long test preparation period and complex operation. In order to quickly and accurately carry out the air boundary layer average profile velocity experiment, a wooden board with a roughness of 50 $\mu\text{m}$  was laid at the bottom of the wind tunnel to simulate the environmental ground. The distribution of air velocity over the board was obtained by measuring the total air pressure and static pressure by pitot tube, and the contour line and wind profile index of the boundary layer above the board were given. The results show that the distribution of wind speed in the boundary layer above the wooden floor in the wind tunnel test section is a power function distribution, and the wind profile index ranges from 0.172 to 0.195, which is close to the geomorphic index of fields, villages, jungles, flat open land and areas with few low-rise buildings, areas with dense trees and low-rise buildings, areas with few med-high-rise buildings, and gentle hills. When the wind speed is greater than 9.77m/s, the exponent decreases with the increase of wind speed.

**Keywords:** atmospheric boundary layer; environmental wind tunnel; wind profile; velocity distribution; wood floor

(责任编辑: 王学风)