

文章编号:1671-6833(2003)04-0090-03

# 在 $4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 风洞中模拟大气边界层

李会知<sup>1</sup>, 樊友景<sup>1</sup>, 庞涛<sup>2</sup>, 王婕<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州, 450002; 2. 河南省建筑设计研究院, 河南 郑州, 450005)

**摘 要:** 通过适当地延长风洞的试验段长度, 并利用尖塔、挡板、粗糙元等边界层发生装置, 在  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  航空风洞中模拟建立了大气边界层流场, 测量了模拟流场的平均风速剖面、湍流强度剖面、风谱等。结果表明: 在  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  风洞中建立的模拟大气边界层流场适宜于建筑物风荷载、风环境模型试验。

**关键词:** 大气边界层; 风洞; 模拟试验

**中图分类号:** V 211.73

**文献标识码:** A

## 0 引言

风吹过地面时受到地面上各种粗糙元(草、庄稼、树木、房屋建筑等等)产生的摩擦阻力作用而形成上大下小的平均风速剖面 and 上小下大的湍流强度剖面, 这一层受地表摩擦阻力影响的大气层称为大气边界层。在地面上的建筑物均处于大气边界层中, 因此, 在风洞中研究风对建筑物的作用时, 除必须满足模型与原型相似外, 还要求正确模拟大气边界层流场, 主要是其平均风速剖面 and 湍流结构。已有大量研究表明<sup>[1,2]</sup>, 大气边界层流场未能模拟的话, 试验结果是不足信的。

大气边界层模拟的方法主要有两种: 自然形成法和人工强迫形成法。按平板的湍流边界层理论, 自然形成  $1\text{ m}$  高的边界层, 约需  $21.6\text{ m}$  长的试验段, 而且, 湍流度不够大, 因此, 对于试验段较短的风洞而言, 人工强迫形成法是常用的模拟手段。本文介绍在  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  风洞中进行的大气边界层模拟试验, 可为类似的风洞模拟试验提供借鉴经验。

## 1 试验概况

$4\text{ m} \times 3\text{ m}$  风洞是一座航空风洞, 截面是  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  的切角矩形, 试验段长度为  $8\text{ m}$ 。要在这样的风洞中模拟大比例大气边界层流场的话, 试验段偏短, 需要通过适当的方式将试验段向收缩段和扩散段延长, 以获得足够长的试验段长度。采取的方式是制作一可拆装的刚架, 底部连接于风洞

底壁, 顶部铺盖木板, 使成为长  $15\text{ m}$ 、宽  $4\text{ m}$  的平板, 并在后部设计一直径  $3\text{ m}$  的转盘, 以便在建筑物模型试验时改变迎风角。在平板前部安装尖塔、挡板、粗糙元等边界层发生装置, 最终使成为高  $2.2\text{ m}$ 、宽  $4\text{ m}$ 、长  $15\text{ m}$  的边界层风洞, 示意图见图 1, 图 2 是一种边界层装置试验照片。

尖塔的设计参考了 Irwin 公式。对于平面型等腰三角形尖塔, 尖塔底宽  $b$ 、高  $h$ , 尖塔布置横向间隔  $h/2$  时 Irwin 给出了模拟平均风速剖面的尖塔设计经验公式<sup>[3]</sup>:

$$h = 1.39 z_g (1 + \alpha/2);$$

$$b/h = 0.7 [\Psi(H/z_g)/(1 + \Psi)](1 + \alpha/2);$$

$$\Psi = \beta [2/(1 + \alpha) + \beta - 1.13 \alpha] [(1 + \alpha)(1 + \alpha/2)] (1 - \beta)^2;$$

$$\beta = (z_g/H)^\alpha / (1 + \alpha).$$

式中:  $\alpha$  是模拟幂指数;  $H$  是试验段高;  $z_g$  是模拟边界层高。

试验表明, 由于风洞与边界层装置具有相关性 Irwin 公式只能作为一个出发点, 大气边界层模拟是一个逐渐逼近式的试凑过程, 不仅尖塔的几何参数对边界层参数有影响, 挡板和粗糙元对边界层的影响也很大, 如果挡板的高度过低, 则对边界层的影响小; 如果过高, 则边界层流场底部风速偏小。粗糙元的分布密度要在一定的范围内, 如果粗糙元的分布密度过小, 则底部流场不够均匀, 如果过大, 则会形成爬越而不是穿越粗糙元的流动, 降低了粗糙元的作用。根据试验经验, 建议粗糙元分布密度在  $2.5\% \sim 13\%$  之间调节。

收稿日期: 2003-08-20; 修订日期: 2003-09-28

作者简介: 李会知(1965-), 男, 河南省永城市人, 郑州大学副教授, 博士研究生, 主要从事风工程研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

在试验中,利用热线风速仪测量风速样本函数,由计算机采集数据并按照统计分析的数据处理方法给出平均风速、湍流强度、自相关系数、湍流积分尺度、风谱等.

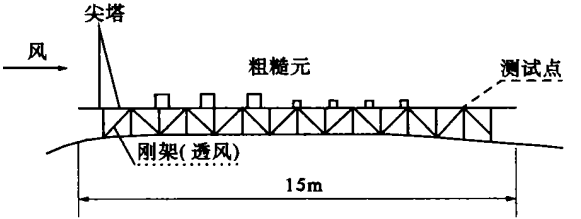


图 1 边界层装置风洞安装示意图

Fig. 1 Installing sketch of boundary layer device in wind tunnel

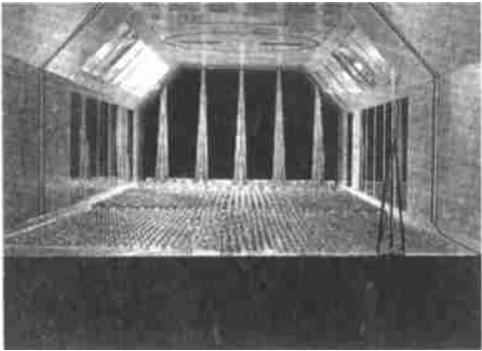


图 2 一种边界层装置照片

Fig. 2 Photo of a device

2 试验结果及分析

我国规范<sup>[4]</sup>指出,大气边界层平均风速剖面符合幂指数分布规律,即

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha,$$

式中: $v_r$ 、 $z_r$  分别是参考点风速和高度,不同的地面条件,幂指数  $\alpha$  不同,一般来说,  $\alpha$  在 0.14~0.40 内取值.我国规范<sup>[4,3]</sup>规定了几种典型地形地貌的平均风速剖面的  $\alpha$ ,见表 1.

表 1 大气边界层分类

Tab. 1 Category of atmospheric boundary layer			
类别	地貌	$\alpha$	大气边界层高/m
A	近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	0.12	300
B	田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的小城镇和大城市郊区	0.16	350
C	有密集建筑群的城市市区	0.22	400
D	有密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30	450

经过多次调整模拟装置参数,最终模拟了 A、B、C、D 四种典型的大气边界层流场.下面简单介绍 C 类大气边界层流场的模拟情况,边界层装置

由尖塔、挡板、粗糙元组成,挡板高 16 cm,尖塔高为 2.2 m,迎风面为上宽 31 mm,下宽 189 mm 的梯形,粗糙元由边长 10 cm、4 cm 两种规格的立方块组成,从前至后分布率分别为 6.25%,8.16%,模拟边界层流场参数如下.

2.1 平均风速剖面

图 3 是试验所得平均风速剖面.以 300 mm 处风速为参考点利用最小二乘法对 1.6 m 高度内的测试点按幂指数规律拟合计算得  $\alpha=0.218$ .从图中也可以看出,风速剖面符合幂指数律.

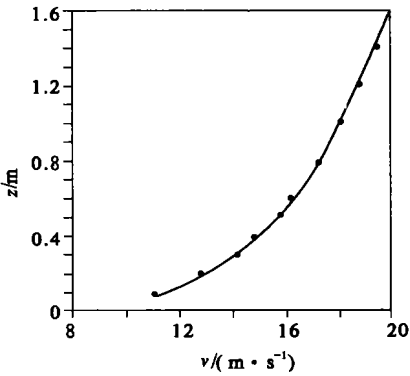


图 3 平均风速剖面

Fig. 3 Mean velocity profile

2.2 湍流强度剖面和风谱

图 4 是湍流强度剖面,湍流强度剖面表示风速沿高度的脉动程度,图 5 是在高 30 cm 处测得的风谱.风谱能够表示湍流脉动能量的频率分布,是分析风致结构振动的重要参数.所测风谱与冯·卡门(Von Karman)谱<sup>[9]</sup>做了比较,并按照谱拟合法<sup>[7]</sup>计算了纵向湍流积分尺度,边界层流场高 30 cm 处纵向湍流积分尺度为 0.49 m,模拟流场的湍流积分尺度比较大,这属一种大比例的模拟边界层流场,比较适合于建筑物风荷载、风环境试验研究.

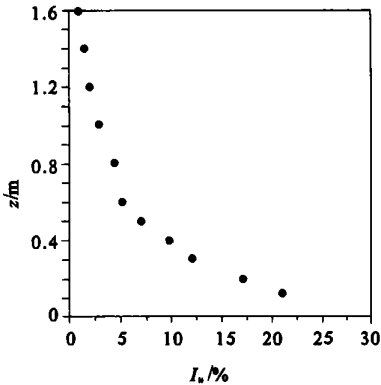


图 4 湍流强度剖面

Fig. 4 Turbulence intensity profile

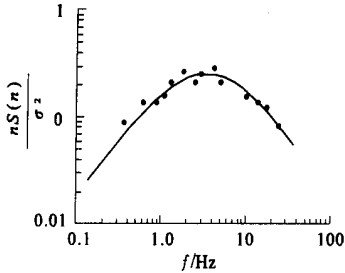


图 5 风谱  
Fig.5 Wnd spectrum

3 结束语

通过本次模拟试验工作,在  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  风洞中建立了城市、乡村等几种典型的大气边界层流场,为该风洞的建筑物风荷载、风环境试验奠定了基础.因为在风洞中模拟大气边界层是许多风工程试验研究的前提条件,所以,风工程风洞一般都有自己的模拟大气边界层的装置.从 20 世纪 70 年代,就开始了在风洞中模拟大气边界层的研究工作,本项试验是在航空风洞中进行的,模拟方法有一定的特点,而且,边界层装置与风洞具有一定的

相关性,本次试验工作对于类似风洞的模拟试验不失借鉴意义和参考价值.

参考文献:

[ 1 ] HUNT J C R, FERNHOLZ H. Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer :a report of euromech [J] . Fluid Mechanics , 1975,( 3) :543~559.  
[ 2 ] CERMAK J E. Advances in physical modeling for wind engineering[J] .J of Engineering Mechanics , 1987, 113 ( 5) :737~756.  
[ 3 ] IRWIN H P. The design of spires for wind simulation[J] . J of wind engineering and industrial aerodynamics , 1981, 7:361~366.  
[ 4 ] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S] .  
[ 5 ] 张相庭. 高层建筑抗风抗震设计计算[M] .上海:同济大学出版社,1997.  
[ 6 ] 埃米尔·希缪, 罗伯特·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M] .刘尚培, 项海帆, 谢黎明, 译. 上海:同济大学出版社,1992.  
[ 7 ] 李会知, 关 罡, 郑 冰. 风洞模拟大气边界层的数据处理[J] . 郑州大学学报(工学版), 2002, 23( 4) :64~67.

At mospheric Boundary Layer Simulation in  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  Aeronautical Wind Tunnel

LI Hu -zhi , FAN You -jing , PANG Tao , WANG Jie

( 1. College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China ; 2. Architectural Design & Research Institute of Henan , Zhengzhou 450005, China)

**Abstract :** Simulated fields of atmospheric boundary layers are made in  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  aeronautical wind tunnel by properly prolonging length of the test section and by using barrier , spires , rough elements . The mean velocity profiles , turbulence intensity profiles and fluctuating wind spectra have been measured . The results show model fields of atmospheric boundary layers built in  $4\text{ m} \times 3\text{ m}$  aeronautical wind tunnel are suitable to wind load and wind environment test of a building .

**Key words :** atmospheric boundary layer ; aeronautical wind tunnel ; simulation test