

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0304-05

# 群体高层建筑行人区域风环境试验研究

马文勇, 刘庆宽, 刘小兵, 尉耀元

(石家庄铁道大学风工程研究中心, 河北, 石家庄 050043)

**摘 要:** 结合风洞试验测试对 Irwin 探头的制作、标定以及使用进行分析, 并采用自制的 Irwin 探头和简便风向测试设备对某群体建筑行人区域风环境进行了研究, 结果表明: 经标定使用有机玻璃制作的 Irwin 探头具有很好的线性度, 可以得到相对准确的行人高度风速, 考虑到压力测试设备的精度, 应当在尽量高的风速下测试; 采用拍照方式记录的风向标基本上可以得到行人高度处的风向信息; 由于狭管效应与角区气流加速效应, 实例群体建筑夹缝与角区的风速比较大, 风环境问题突出, 需要采用风环境改善措施降低该区域风速; 另外通过对 200 名志愿者的测试对行人舒适度的阈值进行了讨论。

**关键词:** 群体高层建筑; 行人区域风环境; Irwin 探头; 风洞试验; 舒适度准则

中图分类号: P425.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S050

## TEST ON PEDESTRIAN AREA WIND ENVIRONMENT AROUND HIGH RISE BUILDINGS

MA Wen-yong, LIU Qing-kuan, LIU Xiao-bing, WEI Yao-yuan

(Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** The making, calibrating and using of Irwin probe are analyzed through a wind tunnel test, and the study on pedestrian area wind environment around high rise buildings is carried out by applying self-made Irwin probes and simple wind direction sensors. The results show that the Irwin probe with good calibration linearity, which made by organic glass, can be used at pedestrian level wind velocity. The high wind speed should be selected in the wind tunnel test considering the accuracy of pressure sensor precision. The pedestrian level wind directions are obtained by photographing the simple wind direction sensors. The wind environment problems are obvious in narrow streets among buildings and corners where the wind velocity ratio are relative larger because of narrow road effects and corner streams, the remedial action had to be taken to reduce the wind speed. At the same time, the discomfort critical wind speed on pedestrian is discussed, which is obtained from testing on 200 volunteers in a wind tunnel.

**Key words:** high rise buildings; pedestrian area wind environment; Irwin probe; wind tunnel test; comfort criteria

随着城市建筑群体, 尤其是城市公共建筑群体的发展, 建筑群体内行人舒适性成为风环境研究的重要方向之一。建筑周围行人高度风环境的研究主要包含建筑周围风速的确定<sup>[1-4]</sup>、风中行人舒

适度的判别准则<sup>[5-7]</sup>以及有效的改善建筑周边风场从而改善风环境的措施。

数值方法<sup>[3-4,8-9]</sup>和风洞试验方法<sup>[2,10-13]</sup>均用于行人高度风环境的确定中。尽管热线风速仪和热膜

收稿日期: 2012-05-01; 修改日期: 2012-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108280)

通讯作者: 马文勇(1981-), 男, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 从事结构抗风研究(E-mail: mawenyong@126.com)。

作者简介: 刘庆宽(1971-), 男, 河北保定人, 教授, 博士, 从事桥梁抗风研究(E-mail: lqk@stdu.edu.cn);

刘小兵(1982-), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: x\_b\_liu@126.com);

尉耀元(1984-), 女, 陕西渭南人, 助教, 硕士, 从事机械加工研究(E-mail: weiyayuan2001@yahoo.com.cn)。

法可以准确的进行建筑周边行人高度风测试，但是行人高度风测试探头使用起来最为方便<sup>[2]</sup>，其中 Irwin 探头就属于专门用于行人高度全方向风速测试的探头<sup>[1]</sup>。Irwin 探头并非标准的风速测量设备，由于制作工艺的限制，Irwin 探头在使用前需要进行详细的标定，同时由于是全方向风速测试探头，Irwin 探头无法确定测试风速对应的风向。

本文采用 Irwin 探头结合一种简单的风向测试设备对某高层建筑群的行人高度风进行了测试，通过测试给出了该建筑群的内部及周边行人高度风环境，为建筑群的设计提供了建议，同时也讨论了 Irwin 的标定、行人高度风速及风向测试技术。

### 1 Irwin 探头的制作及标定

一般低于 2m 的行人高度在缩尺模型风洞试验测试中，设备顶部距离风洞底面或者结构表面很近，因此要求行人高度风的测试设备一定要足够小。1981 年，Irwin<sup>[1]</sup>提出了一种方便有效的全方向行人高度风速测试设备，称为 Irwin 探头。

#### 1.1 探头制作及测试原理

Irwin 探头的示意图见图 1。本文的探头采用有机玻璃与中空钢针制作。

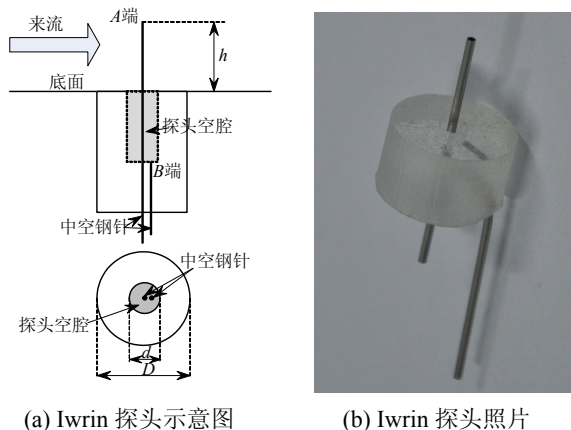


图 1 Irwin 探头示意图

Fig.1 Irwin probe diagram

Irwin 探头测试风速的基本原理是 A 端的风速与 A 端、B 端的压差成正比：

$$U_h = a + b\sqrt{\Delta p}, \Delta p = p_B - p_A \quad (1)$$

其中： $p_B$ 、 $p_A$  分别为探头两端的风压； $a$ 、 $b$  为探头的标定系数； $U_h$  为距离底面标高  $h$  处(即 A 点)的风速。

#### 1.2 探头标定

图 2 为 Irwin 探头标定示意图，其中标定支架平板采用 3mm 厚有机玻璃板制作，边长为 80cm，

端部采用 15°向下倒角，支架平板距离风洞底面高 50cm(测试位置处风洞边界层小于 26cm)。来流方向沿  $x$  正向。

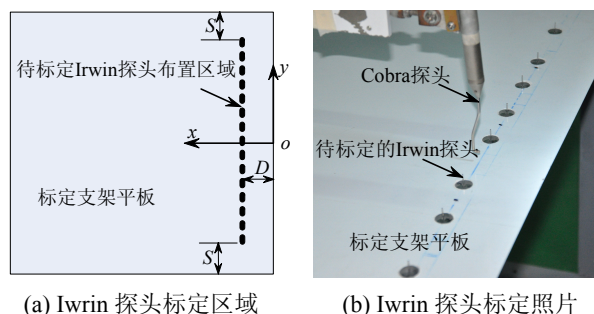


图 2 Irwin 探头标定示意图

Fig.2 Calibration of Irwin probe

本文风速测量采用澳大利亚 TFI (Turbulent Flow Instrucmentation)公司生产的 Cobra 探头；风压测量采用美国 Scanvival 公司生产的 ZOC33 压力扫描阀。

在选择待标定 Irwin 探头布置区域前，对标定支架平板表面风速进行了测试。图 3 给出了来流风速为 15m/s 时，平板  $y=0$ ， $x=15\text{mm}\sim 135\text{mm}$ ，距离平板面 10mm 高度处的风速。根据测试结果采用最小二乘法拟合的曲线可以计算得到，当来流风速为  $U_0=15\text{m/s}$  时，距离平板端部 39.96mm 处的风速最接近来流风速，因此标定时取图 2 中  $D=40\text{mm}$ ，经过测试在平板  $y$  方向，距离两端 120mm 以内，风速偏差在 1%以内，本文偏于保守的取图 2 中  $S=180\text{mm}$ 。通过不同风速下的测定验证，上述  $D$  与  $S$  的取值能保证待标定探头布置区域风速的均匀性，其风速偏差在 1%以内。

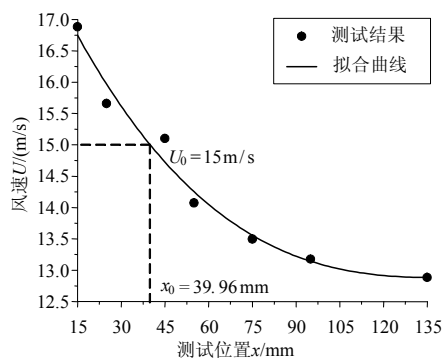


图 3 平板表面风速

Fig.3 Wind velocity on calibrating plate surface

图 4 为随机选取的 4 个探头的标定直线，其中图 4 括弧内的数据表示每个探头拟合直线回归分析的判定系数，该系数越接近 1 说明拟合度越大。本文随机取出的 4 个探头拟合数据的判定系数均大于

0.999, 因此用线性关系可以准确的描述  $\sqrt{\Delta p}$  与  $U_h$  的关系。

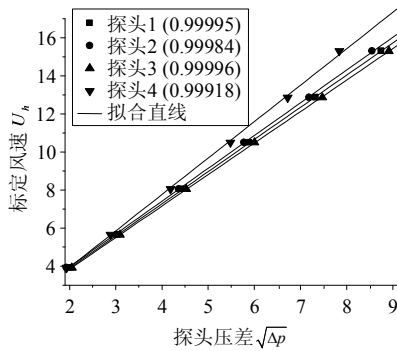


图4 探头标定系数

Fig.4 Calibration coefficients of probe

图4中探头按照同一种规格加工而成,得到的标定曲线有一定的差别,因此在不能严格保证加工精度的情况下,同每个探头需要单独标定。由式(1)可知由于探头标定线性关系中截距  $a$  的存在,当  $\sqrt{\Delta p} = 0$  时,  $U_h = a$ , 如本文中探头1的标定系数中  $a \approx 0.52$ , 因此对于小风速,按照标定直线计算得到的风速误差将会比较大,同时由图4可以看出,在接近4m/s的风速下,  $\Delta p$  的数值在50Pa~80Pa,考虑到风压测试设备的测量误差,因此无论从标定还是从测试角度来讲, Irwin 探头测试精度将会随风速的降低而降低。

由于 Irwin 探头是全风向风速测量设备,对不同来流方向下 Irwin 探头的标定结果表明,对于加工精度高的探头而言,各个方向的标定结果非常接近,本文试验中采用的探头均是以此为依据进行筛选后得到的。

## 2 风向测试

Irwin 探头为一全方向风速测试设备,因此仅采用测试设备无法得到行人高度处的风向信息,限制了行人高度风环境尤其是行人高度风环境改善措施的研究。

烟线法、丝线法、刷蚀法等都是简便的定性流动显示方法,本文采用一种更简单易加工的风向测试设备,通过拍照的形式得到行人高度处的平均风向信息。相比烟线法更简单一些,比丝线法更敏感。

图5为本文采用的风向测试设备。主要采用可以绕杆轴旋转的风向标来测试风向。本文采用大头针作为杆轴,空心塑胶管作为转轴,黑色胶带作为风向标,制作得到便于固定、使用方便、对风速更

为灵敏的风向测试设备。

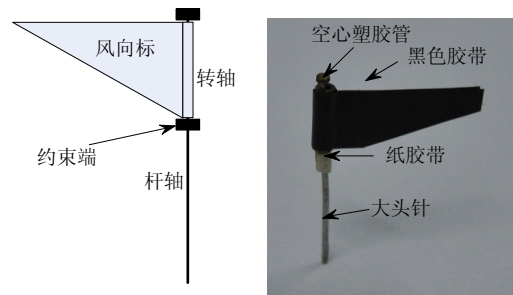


图5 风向测试设备示意图

Fig.5 Wind direction testing sensors diagram

## 3 某群体高层建筑风环境测试实例

### 3.1 风速比

行人高度风环境测试的一般结论是行人高度处测试风速与来流风速之比,该比值反映了建筑结构对来流风速的放大效应。定义  $i$  处的风速比为  $\beta_{Vi}$ :

$$\beta_{Vi} = \frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_0} \quad (2)$$

其中,  $\bar{V}_0$  为行人高度处自由来流的平均风速。

本文测试了以  $10^\circ$  为间隔  $360^\circ$  风向角下行人高度(2m 高度)处风速比,对不同风向角进行统计得到了最大风速比及对应的风向角见图6。

图6中斜线填充区域为高层建筑地面轮廓,其中包含高度超过100m的3栋高层建筑。共布置了47个 Irwin 探头进行测试,探头测试结果风速比(括弧内数据)表示发生该最大风速比时的风向角,  $0^\circ$  风向角如图6中所示,按逆时针旋转增加。

图6中虚线区域为风速比较大区域,可以看出,由于三栋建筑之间存在3个20m~30m的夹缝,形成了“窄道效应”,该区域内的风速比较大,最大风速比达到了3.12,即该处的风速为来流风速的3倍以上,放大效应明显。流体流经结构角部的加速效应造成结构角部的风速比也比较大。

### 3.2 风向

图7给出采用本文的风向测试设备测试得到的  $0^\circ$  风向角的风向,图7箭头表示风向。风向的记录方法是采用高清照相机记录风向测试设备的状态后,通过图像处理的方法获得测试位置的风向。

采用本文的方法基本可以得到风向,测试中发现,由于风向标在脉动风场中不停的摆动,部分流场复杂的区域,甚至发生风向标转动现象,因此该方法得到的风向无法描述方向变化幅度较大区域的风向信息。

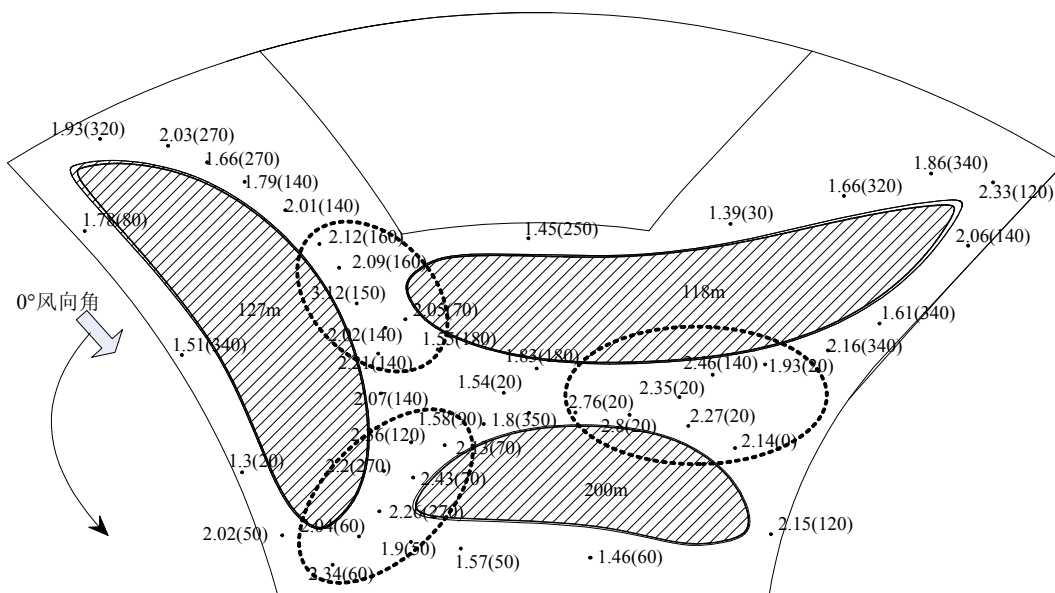


图6 最大风速比

Fig.6 The maximum wind velocity ratio

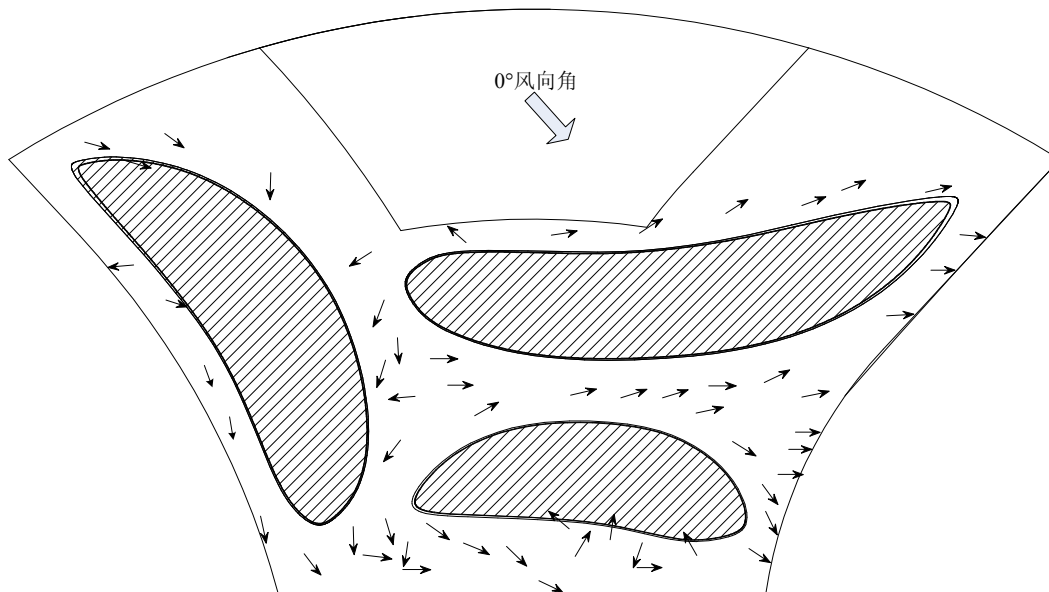


图7 0°风向角下风向

Fig.7 Wind direction in degree 0

### 3.3 舒适性评估

行人高度风环境主要通过来流条件、风速比与评价准则三方面对行人的舒适度进行评价。

文献[14]中提到,当风速大于6m/s时,行人开始感觉到不舒适;大于9m/s时,行人的动作会受到影响;当风速达到15m/s时,行人的步履控制会受到影响;处在大于20m/s的风速中的行人是比较危险的,这与Lawson<sup>[15]</sup>的危险性平均风速阈值是一致的。本文通过对200名年龄在20岁~25岁的志愿者进行了5种不同风速下的测量,受试者给出

了L1~L5这5个等级的感受,分别为:

- L1: 感觉不明显;
- L2: 可以感觉到风推力;
- L3: 风推力大,但无需调整站立或行走姿势;
- L4: 站立、行走困难,需要躲避;
- L5: 无法站立、行走。

测试结果表明,75%的测试者认为20m/s的风速下站立、行走困难,这与文献[14-15]的结论是一致的,考虑到本文测试的志愿者为大学生,年龄及身体状况较好,因此实际人群对应舒适度风速阈

值可能比本文的测试结果要小。

$U=20\text{m/s}$		4%	19%	75%	
$U=15\text{m/s}$		11%	79%	10%	
$U=10\text{m/s}$	6%	73%	21%		
$U=5\text{m/s}$	40%	60%			
$U<5\text{m/s}$	94%	6%			
	L1	L2	L3	L4	L5

图 8 不同风速下行人舒适度

Fig.8 The comfort in different wind velocities

按照风剖面指数为 0.22, 当 10m 高度处风速大于 10.7m/s 时, 本项目中风速比大于 2.0 的位置, 行人高度处风速将达到 15m/s; 当 10m 高度处风速大于 9.5m/s 时, 本项目中风速比大于 3.0 的位置, 行人高度处风速将达到 20m/s。对于项目所在地的北京地区, 大于 10m/s 的风速时有发生, 因此该项目行人高度风环境问题突出, 需要采用风环境改善措施。

## 4 结论

本文采用自制 Irwin 探头与简便风向测试设备测试了某群体建筑风速比及风向, 结果表明准确制作及标定的 Irwin 探头具有很好的线性度, 可以得到准确的风速, 测试中应当考虑到压力测试设备的精度, 尽量在较高的风速下测量; 采用拍照方式记录的风向标基本上可以得到行人风环境高度处的风向信息; 采用上述方法测试实例说明, 群体建筑狭管效应和角区气流效应造成该区域内风速比较大, 风环境问题突出, 需要采用风环境改善措施。由于行人高度处地面干扰物复杂, 风向不稳定, 采用本文提出的简易风向测试设备可以方便的给出相对稳定区域的风向, 测试方法简单, 可以为风环境改善措施的开发提供一定的依据。

### 参考文献:

[1] Irwin H P A H. A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian level winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981(7): 219—239.

[2] 王勋年, 李征初, 张大康, 等. 建筑物行人高度风环境风洞试验研究[J]. *流体力学实验与测量*, 1999, 13(1): 54—58.

Wang Xunnian, Li Zhengchu, Zhang Dakang, et al. Investigation of pedestrian level wind around a high rise building with wind tunnel simulation [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 1999, 13(1):

54—58. (in Chinese)

[3] 张爱社, 顾明, 张陵. 建筑群行人高度风环境数值模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(8): 1030—1033.

Zhang Aishe, Gu Ming, Zhang Ling. Computer simulation of pedestrian wind environment around buildings [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(8): 1030—1033. (in Chinese)

[4] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. Aij guidelines for practical applications of cfd to pedestrian wind environment around buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 1749—1761.

[5] Ratcliff M A, Peterka J A. Comparison of pedestrian wind acceptability criteria [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36(2): 791—800.

[6] Bu Z, Kato S, Ishida Y, et al. New criteria for assessing local wind environment at pedestrian level based on exceedance probability analysis [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(7): 1501—1508.

[7] Durgin F H. Pedestrian level wind criteria using the equivalent average [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 66(3): 215—226.

[8] He J, Song C C S. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, 81(1/2/3): 295—309.

[9] Blocken B, Persoon J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new dutch wind nuisance standard [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(5/6): 255—270.

[10] White B R. Analysis and wind-tunnel simulation of pedestrian-level winds in san francisco [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 44(1/2/3): 2353—2364.

[11] Ferreira A D, Sousa A C M, Viegas D X. Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(4/5): 305—319.

[12] 陈德江, 石碧青, 谢壮宁. 某高层建筑风环境风洞试验研究[J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2002, 17(1): 74—80.

Chen Dejiang, Shi Biqing, Xie Zhuangning. A simulation test on the wind environment around a high-rise [J]. *Journal of Shantou University (Natural Science)*, 2002, 17(1): 74—80. (in Chinese)

[13] Kubota T, Miura M, Tominaga Y, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(10): 1699—1708.

[14] Simiu E, Scanlan R H. *Wind effects on structures* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1996: 519—520.

[15] Lawson T V. The determination of the wind environment of a building complex before construction [R]. Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, Report Number TVL 9025, 1990.