

文章编号:1001-4888(2019)03-0427-07

格栅湍流风场风参数变化规律的风洞试验研究^{*}

张明月, 李永贵, 谭文俊, 刘玉红, 刘哲

(湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

摘要: 格栅湍流风场常用于研究来流风参数对结构风效应的影响规律与作用机理。本文对不同格栅湍流风场的风参数随横栅板起始高度、孔隙率、距离和栅板宽度的变化规律进行了研究, 结果表明: 横栅板起始高度为横栅板间距一半时, 格栅湍流风场的均匀性较好。湍流积分尺度离散性较大, 可采用一定范围内的湍流积分尺度的平均值衡量试验横断面湍流积分尺度的总体大小。随着距离增大, 湍流强度呈指数衰减趋势, 湍流积分尺度呈增大趋势; 随着栅板宽度增大, 湍流强度和湍流积分尺度均增大; 基于试验结果提出了湍流强度和湍流积分尺度关于距离和栅板宽度的计算公式。根据风参数的变化规律, 调试出了两组特定的格栅湍流风场, 一组湍流强度接近, 湍流积分尺度相差较大, 反映了脉动风的涡旋结构不同; 另一组湍流积分尺度接近, 湍流强度相差较大, 反映了脉动风的能量大小不同。上述研究结果为下一步研究风参数对高层建筑风效应的影响规律打下了基础。

关键词: 格栅湍流风场; 平均风速; 湍流强度; 湍流积分尺度; 脉动风速谱; 风洞试验

中图分类号: TU317.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-214

0 引言

风洞试验是结构风工程中常规有效的研究方法, 风洞试验中, 常采用格栅模拟的格栅湍流风场来研究来流风参数对结构风效应的影响规律与作用机理。格栅湍流风场风参数在距离格栅一定距离后逐渐趋于均匀, 且可以实现湍流强度和湍流积分尺度的独立变化, 即保证湍流强度基本相同但湍流积分尺度规律变化或者湍流积分尺度基本相同但湍流强度规律变化。国内外学者^[1-9]采用格栅湍流风场研究了湍流参数对桥梁断面、柱体、平板、建筑等结构风荷载和风振响应的影响。卢占斌等^[8]研究了来流风速、格栅孔隙率以及测点与格栅间的距离(下文简称距离)对湍流强度、湍流积分尺度和脉动风速谱的影响规律, 并得到了湍流强度基本相同但湍流积分尺度不同和湍流积分尺度基本相同但湍流强度不同的两组湍流风场, 但湍流强度和湍流积分尺度的变化较为有限。丁思华^[10]研究了来流风速、距离和孔隙率对风速、湍流强度和湍流积分尺度的影响, 得到了一系列定性的结论, 受风洞边界层和近地面栅板的影响, 1m 以下风速沿高度并不均匀, 且不均匀性随来流风速的增大而增大。周蓉^[11]研究了格栅湍流风场在不同水平间距和湍流积分尺度下的顺风向脉动风速的相关性。严磊等^[12]研究了格栅湍流风场风参数沿风洞轴向的变化规律, 发现风参数主要与距离、栅板宽度和单元格栅边长有关, 并调试出了两类特定的湍流风场, 由于风场调试的目的是研究风参数对桥梁断面气动参数的影响, 因此没有关注流场竖向的均匀性。

上述研究大多没有关注风速沿风洞高度的均匀性, 从文献^[10]的研究结果可以看出, 近地面效应的

^{*} 收稿日期: 2017-10-18; 修回日期: 2018-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51508183, 51578237)资助、湖南省教育厅开放基金(15K044)资助

通讯作者: 李永贵(1981—), 男, 博士, 副教授。Email: lyg313@126.com

影响明显,1m 以下风速沿高度不均匀。本文结合被动格栅湍流风场测试工作,研究了格栅湍流风场风参数的变化规律,并调试出了两组特定的格栅湍流风场,为研究风参数对高层建筑风效应的影响规律打下基础。

1 试验概况

试验在湖南科技大学风工程试验研究中心大气边界层风洞中完成。风洞试验段尺寸为 $4\text{m} \times 3\text{m} \times 21\text{m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),空风洞风速 $0 \sim 30\text{m/s}$ 连续可调,流场性能良好。采用三维脉动风速仪测量风速时程数据。为了产生不同湍流特性的格栅风场,试验采用了 6 种木质格栅(图 1),栅板厚度 20mm ,栅板宽度 a 分别为 75mm 、 100mm 、 150mm 、 200mm 、 300mm 、 420mm 。以风洞底面试验转盘(用于放置试验模型)中心点为直角坐标系原点,来流方向对称线为 x 轴,正方向指向上游; z 轴过原点与风洞底面垂直向上; y 轴及其正方向由右手法则确定。为确保模型风洞试验流场与流场特性测试结果一致,试验中保持风速测点的 x 坐标值为 0,通过调整格栅位置来调整距离。根据定义,顺风向平均湍流积分尺度 L_u^x 可写为

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_{u_1 u_2}(x) dx \quad (1)$$

式中, $R_{u_1 u_2}(x)$ 是两个顺风向速度分量 $u_1 = u(x_1, y_1, z_1, t)$ 和 $u_2 = u(x_1 + x, y_1, z_1, t)$ 的互协方差函数; σ_u^2 是 u_1 和 u_2 的方差。

根据泰勒假设自相关函数积分法^[13],如果湍流旋涡以平均风速 U 迁移,则脉动速度 $u(x_1, t + \tau)$ 可以定义为 $u(x_1 - x, \tau)$, $x = Ut$,则式(1)可改写为

$$L_u^x = \frac{U}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_u(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中, $R_u(\tau)$ 为脉动风速 $u(x_1, t + \tau)$ 的自相关函数, $R_u(0) = \sigma_u^2$ 。

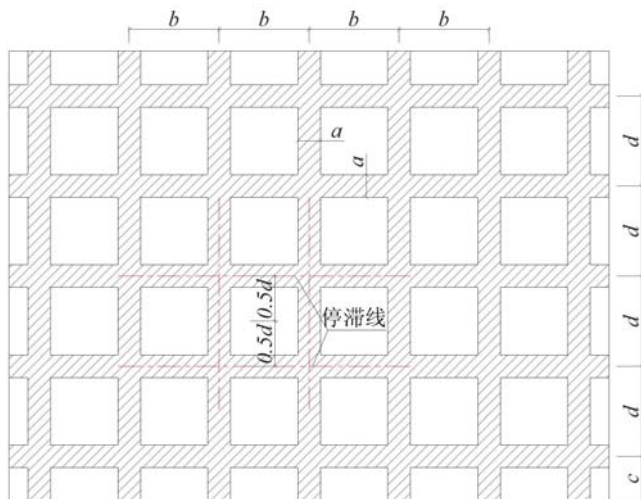


图 1 格栅示意图

Fig. 1 The grid

域,栅板布置均匀,气流在栅板对称轴上形成停滞线(图 1),并就近流经格栅孔隙,中部横栅板对来流的阻塞影响范围为其上下各 $0.5d$ 。 $c=d$ 时,由于格栅在近地面的孔隙率比中部区域大,起始横栅板对近地面气流的阻塞效果不如格栅中部区域,而风洞近地面效应的影响不足以弥补格栅阻塞效果的差异,所以 0.5m 以下风速比上部风速大。 $c=0.5d$ 时,格栅在近地面的孔隙率与中部区域一致,对气流的阻塞效果一样,所以 0.5m 以下风速减小,风速沿高度的均匀性明显改善,但仍可看出风洞近地面效应对风速的影响,只是相比格栅的阻塞效果要小得多。与 $c=d$ 时相比, $c=0.5d$ 时, 0.6m 以下的湍流强度略有减小; 0.6m 以上的湍流强度基本相同,整体而言,湍流强度的均匀性稍有改善。两种格栅下的湍流

2 试验结果

2.1 流场特性

2.1.1 横栅板起始高度的影响

横栅板通常从风洞底面开始布置,或按横栅板起始高度 c 与横栅板间距 d 相等进行布置。从风洞底面开始布置,风洞近地面效应会增大^[10],导致平均风速沿高度分布不均匀。

图 2 给出了栅板宽度为 100mm 的格栅距离 $D=10\text{m}$ 时, $c=0.5d$ 和 $c=d$ 两种情况下的平均风速、湍流强度和湍流积分尺度沿高度的分布。可以看出,两种布置的格栅, 0.5m 以上的风速分布基本一致,都比较均匀。在格栅中部区

积分尺度的大小及沿高度的分布基本相当,都有一定的离散性,本文两种布置与文献[10]横栅板沿风洞底面布置下的各种格栅湍流风场的湍流强度和湍流积分尺度沿高度的分布规律基本一致。横栅板起始高度对湍流强度和湍流积分尺度的均匀性的影响可以忽略。下文所有格栅均按横栅板起始高度为横栅板间距一半进行布置。

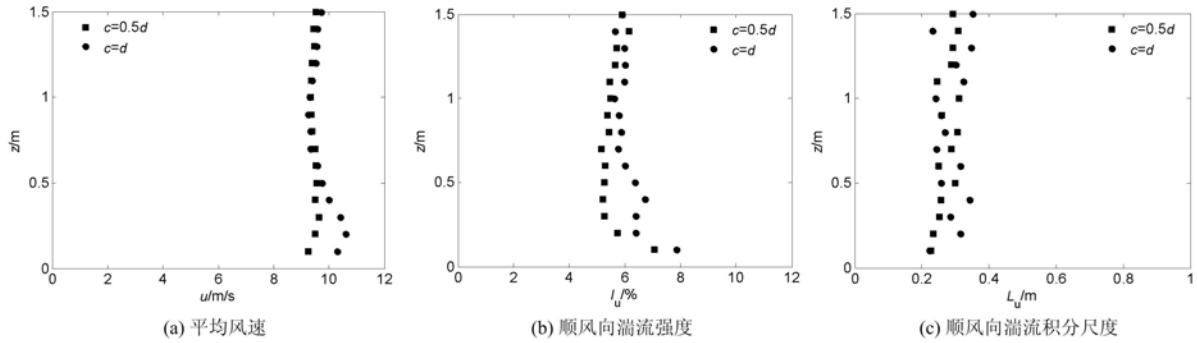


图2 横栅板起始高度对风参数的影响

Fig. 2 Wind characteristics with different layout of horizontal bar

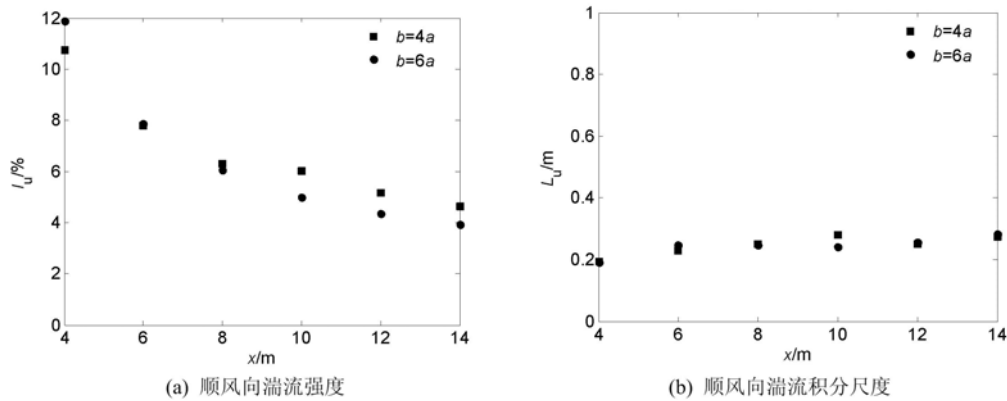


图3 孔隙率对风参数的影响

Fig. 3 Wind characteristics with different hole rate

2.1.2 孔隙率的影响

式(3)为文中孔隙率的计算公式:

$$\epsilon = \frac{(b-a)(d-a)}{bd} \quad (3)$$

式中, a, b, c, d 分别为栅板宽度、竖栅板间距、横栅板起始高度、横栅板间距。

图3给出了栅板宽度为100mm的格栅孔隙率分别为56.3%($b=d=4a$)和69.4%($b=d=6a$)的湍流强度和湍流积分尺度的对比情况,图中湍流强度和湍流积分尺度为0.2m~1.5m高度所有测点的均值(图4同)。可以看出,距离为4m时,孔隙率大的格栅产生的湍流强度较大,距离在8m以上时,孔隙率大的格栅产生的湍流强度较小,说明格栅孔隙率越大,格栅下游流场中脉动风的能量衰减越快,这与文献[8]的试验结果一致。两种孔隙率的湍流积分尺度无明显差别,互有大小但无规律性,与文献[8]的试验结果的规律性不一致,这可能是试验条件不一致导致的,文献[8]中的距离和栅板宽度均比本文小得多。根据上述试验结果,确定格栅具体参数见表1。

2.1.3 距离的影响

图4给出了多种格栅湍流风场的湍流强度和湍流积分尺度随距离的变化情况,可以看出,湍流强度随距离的增大呈指数衰减趋势,距离小时衰减快,距离大时衰减慢。湍流积分尺度随距离的增大而总体上呈增大趋势,栅板宽度150mm及以下的风场湍流积分尺度在距离达到一定值时增加不明显且有所波动,说明此时增大距离对增大湍流积分尺度贡献不大。

表 1 格栅参数

Tab. 1 The parameters of grids

格栅编号	栅板宽度 a/mm	竖栅板间距 b/mm	横栅板起始高度 c/mm	横栅板间距 d/mm	孔隙率/%
1	75	300	150	300	56.3
2	100	400	200	400	56.3
3	150	600	300	600	56.3
4	200	800	375	750	55.0
5	300	1300	500	1000	53.8
6	420	1350	750	1500	49.6

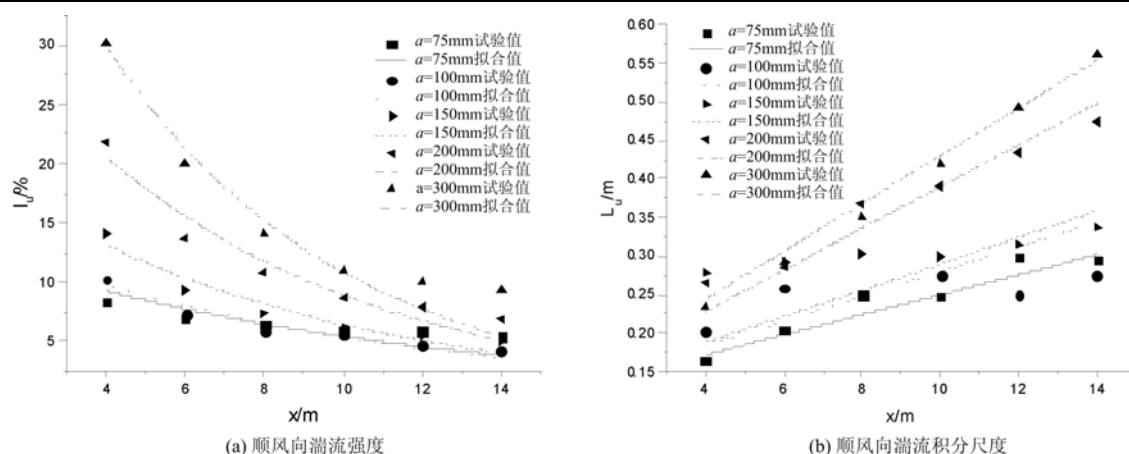


图 4 距离和栅板宽度对风参数的影响

Fig. 4 Wind characteristics with different distance or bar width

2.1.4 栅板宽度的影响

从图 4 还可以看出,栅板宽度对湍流强度和湍流积分尺度的影响明显。随着栅板宽度的增大,湍流强度和湍流积分尺度均增大,距离较小时,湍流强度增大的效果明显,距离较大时,湍流积分尺度增大的效果明显。对图 4 中湍流强度和湍流积分尺度随距离和栅板宽度变化规律进行拟合可得

$$I_u = (212.3a - 6.21)e^{-(0.38a+0.06)x} \quad (4)$$

$$L_u^x = (0.08a + 0.007)x + 0.12 \quad (5)$$

式中, x 为距离; a 为栅板宽度。从图 4 可以看出,湍流强度的拟合值与试验值较为接近,拟合效果较好;当栅板宽度较大时,湍流积分尺度的拟合值与试验值较为接近,拟合效果较好,当栅板宽度较小时,拟合效果较为一般。根据距离和栅板宽度对湍流强度和湍流积分尺度的影响规律可知,要获得较大的湍流强度,可以控制距离或者增大栅板宽度;要获得较大的湍流积分尺度,可以增大距离或者增大栅板宽度;要同时获得较大的湍流强度和湍流积分尺度,需要在较远处布置栅板宽度较大的格栅。

2.2 两组特定的格栅湍流风场

按上述横栅板起始高度和孔隙率(详细尺寸见图 1 和表 1),结合湍流强度和湍流积分尺度随距离、栅板宽度的变化规律,通过改变距离和栅板宽度,得到以下两组特定湍流风场,A 组湍流强度在 10.4% 左右,湍流积分尺度相差较大(表 2),按高层建筑模型通常采用的比例 1:300 换算成实际值为 41.7m~180.6m;B 组湍流积分尺度在 0.3m 左右,湍流强度相差较大(表 3),表中平均值均指 0.2m~1.5m 高度所有测点的均值。

图 5 给出了 A 组湍流风场的风参数沿高度的分布情况。各风场的风速和湍流强度总体上较为均匀,湍流积分尺度总体上呈增大趋势,有一定的离散性。

图 6 给出了 ABL4 和 ABL6 在 0.61m 高度处(对应于 1:300 标准高层建筑模型高度)风参数沿横风向的分布情况,可以看出,平均风速非常均匀,平均值分别为 10.17m/s、9.11m/s,与竖向均值非常接

近;湍流强度较为均匀,平均值分别为 10.5%、10.5%,与竖向均值也非常接近;湍流积分尺度有一定的离散性,平均值分别为 0.344m、0.623m,与竖向均值仍非常接近,说明用均值衡量测点横断面的湍流积分尺度是可行的。结合风参数沿高度的分布规律,可知横断面上流场特性均匀性很好。

表 2 A 组格栅湍流风场的参数列表
Tab. 2 The parameters of grid-generated wind filed A

流场名称	栅板宽度/mm	距离/m	平均风速/(m/s)	平均湍流强度/%	平均湍流积分尺度/m	实际平均湍流积分尺度/m
ABL1	75	3.0	10.1	9.9	0.139	41.7
ABL2	100	4.1	9.9	10.3	0.183	54.9
ABL3	150	5.5	9.7	10.6	0.251	75.3
ABL4	200	7.5	10.1	10.7	0.339	101.7
ABL5	300	11.3	9.2	10.2	0.448	134.4
ABL6	420	14.7	9.0	10.7	0.602	180.6

表 3 B 组格栅湍流风场的参数列表
Tab. 3 The parameters of grid-generated wind filed B

流场名称	栅板宽度/mm	距离/m	平均风速/(m/s)	平均湍流强度/%	平均湍流积分尺度/m	实际平均湍流积分尺度/m
BBL1	150	8.0	9.8	7.2	0.291	87.3
BBL2	200	6.0	10.1	13.3	0.299	89.7
BBL3	300	6.3	9.3	18.1	0.317	95.1

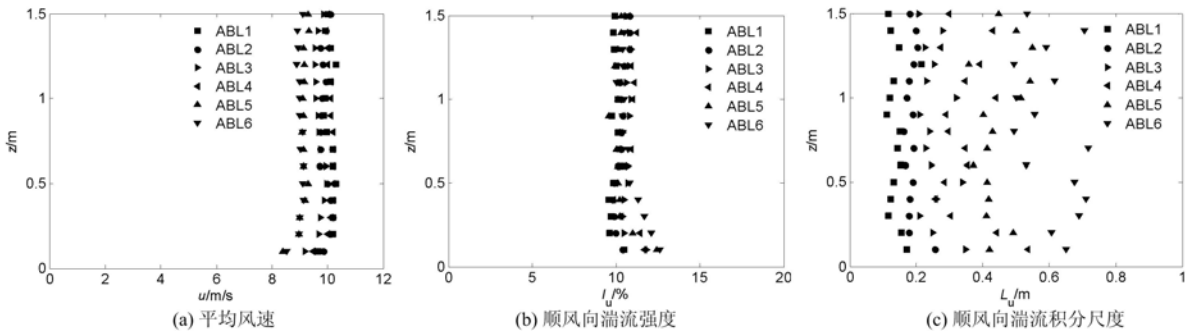


图 5 A 组格栅湍流风场的风参数

Fig. 5 Wind characteristics of grid-generated wind filed A

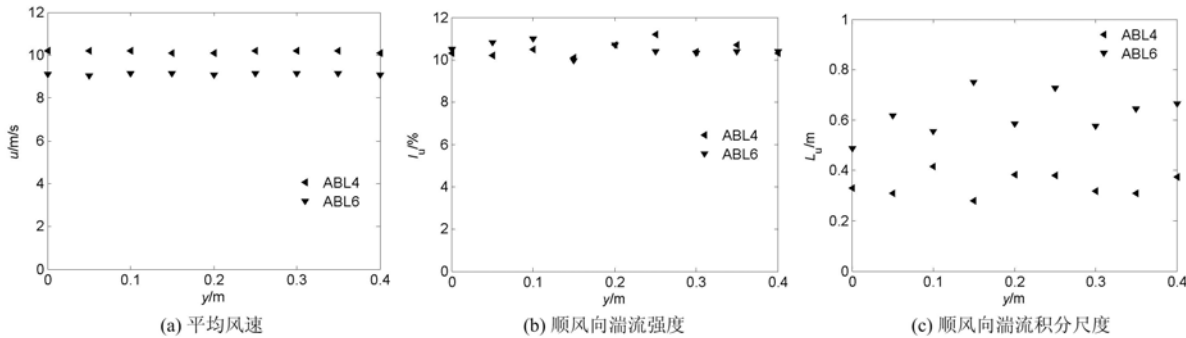


图 6 风参数沿横风向的分布

Fig. 6 Wind characteristics distribution along across wind direction

图 7(a)给出了 ABL1、ABL4、ABL6 在 0.7m 高度处顺风向脉动风速谱,可以看出,随着湍流积分尺度的增大,谱峰频率呈减小趋势,脉动风高频能量减小,低频能量增加,说明脉动风涡旋尺度增大,与湍流积分尺度数值变化趋势一致。图 7(b)分别为 BBL1、BBL2、BBL3 在 0.7m 高度处顺风向脉动风速谱,由于湍流积分尺度相近,功率谱曲线形状与谱峰频率也相近,随着湍流强度的增大,脉动风在整个频段范围内的能量均增大。将两组风场脉动风功率谱进行归一化(图 7(c)),所有功率谱曲线基本重合。

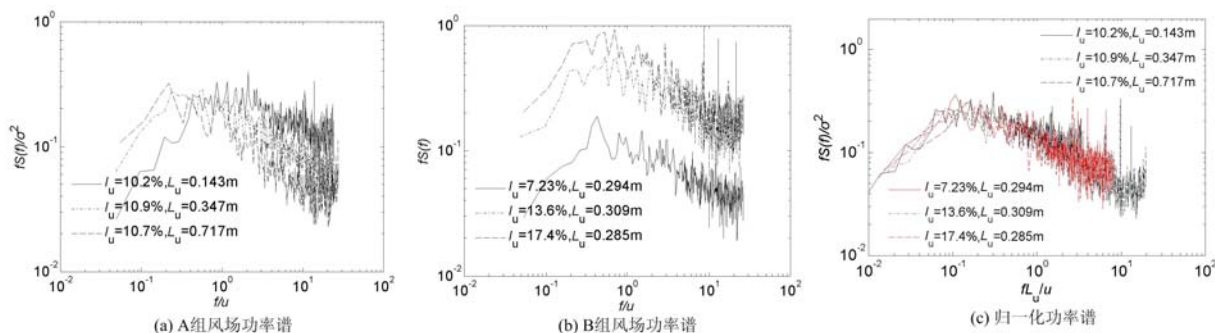


图 7 顺风向脉动风速谱

Fig. 7 Longitudinal velocity power spectra

3 结论

从格栅湍流风场测试结果和两组特定格栅湍流风场风参数分布规律,可以得到以下结论:

- (1) 横栅板起始高度为横栅板间距一半时,格栅湍流风场的均匀性较好。
- (2) 湍流积分尺度离散性较大,用一定范围内的均值衡量断面湍流积分尺度的总体大小是可行的。
- (3) 随着格栅与测点间的距离增大,湍流强度呈指数衰减趋势,湍流积分尺度呈增大趋势,栅板宽度较大时更为明显。
- (4) 随着栅板宽度增大,湍流强度和湍流积分尺度均增大,湍流强度的增大在距离较小时更为明显,湍流积分尺度的增大在距离较大时更为明显。
- (5) 拟合得到了湍流强度和湍流积分尺度关于距离和栅板宽度的计算公式,总体效果较好。
- (6) 调试出了两组特定格栅湍流风场,一组湍流强度接近,湍流积分尺度相差较大,反映了脉动风的涡旋结构不同;另一组湍流积分尺度接近,湍流强度相差较大,反映了脉动风的能量大小不同。为下一步研究风参数对高层建筑风效应的影响规律打下了基础。

参考文献:

- [1] Simiu E, Leigh S D. Turbulent wind and tension leg platform surge[J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(4):785—802.
- [2] Bucher C G, Lin Y K. Effects of wind turbulence on motion stability of long-span bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36:1355—1364.
- [3] Kimura K, Fujino Y, Nakato S, et al. Characteristics of buffeting forces on flat cylinders[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69:365—374.
- [4] Haan F L, Kareem A, Szewczyk A A. The effects of turbulence on the pressure distribution around a rectangular prism[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77:381—392.
- [5] Li Q S, Melbourne W H. The effect of large-scale turbulence on pressure fluctuations in separated and reattaching flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83:159—169.
- [6] Lee S, Kwon S D. Effect of turbulence properties on bridge aerodynamics[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering, 2011.
- [7] 孙亚伟. 湍流对二维矩形柱体空气动力学性质的影响[J]. 空气动力学学报, 1989, 7(3):358—363 (SUN Yawei. The effects of turbulence on the aerodynamic properties of two-dimensional rectangular cylinders[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1989, 7(3):358—363 (in Chinese))

- [8] 卢占斌, 魏庆鼎. 网格湍流 CAARC 模型风洞实验[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(1):16—23 (LU Zhanbin, WEI Qingding. An experimental on a CAARC model in grid turbulent flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2001, 19(1):16—23 (in Chinese))
- [9] 朱乐东, 赵传亮, 丁泉顺. 扁平箱主梁断面抖振力频谱特性以及桥跨方向相关性研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(4): 96—101 (ZHU Ledong, ZHAO Chuanliang, DING Quanshun. Spectral characteristics and spanwise coherence of buffeting forces on a flat box-girder deck[J]. Structural Engineers, 2009, 25(4):96—101 (in Chinese))
- [10] 丁思华. 近地湍流被动模拟实验技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013 (DING Sihua. Experimental study on the passive simulation of turbulence in the boundary layer[D]. Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese))
- [11] 周蓉. 被动格栅紊流场横向风速相关性实验研究[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(12): 51—53 (ZHOU Rong. Experimental research on coherence of lateral wind velocity in passive grid-generated wind field [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013, 35(12):51—53 (in Chinese))
- [12] 严磊, 朱乐东. 格栅湍流场风参数沿风洞轴向变化规律[J]. 实验流体力学, 2015, 29(1):49—54 (YAN Lei, ZHU Ledong. Wind characteristics of grid-generated wind field along the wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(1):49—54 (in Chinese))
- [13] Flay R G J, Stevenson D C. Integral length scales in strong winds below 20m[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1984, 28:21—30.

Wind tunnel experimental study of the variation of wind parameters in grid turbulent wind field

ZHANG Ming-yue, LI Yong-gui, TAN Wen-jun, LIU Yu-hong, LIU Zhe

(Hunan Provincial Key Laboratory of Structural Engineering for Wind Resistant and Vibration Control, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Grid turbulent wind field is commonly applied to study the influence of wind parameters on structural wind effect and its mechanism. In this paper, the variation of wind parameters of different grid turbulent wind fields with the initial height, porosity, distance and grid width of the grid plate is studied. Results show that when the initial height of the grid is half of the horizontal grid spacing, the uniformity of the turbulent wind field in the grid is better. The scale of turbulence integral is discrete, and the mean value of turbulence integral scale in a certain range can be used to measure the total scale of cross section turbulence integral. With the increase of distance, the intensity of turbulence decreases exponentially and the scale of turbulence integral increases. The turbulence intensity and turbulence integral scale increase with the increase of grid width, and the formulas of turbulence intensity and turbulence integral scale about distance and grid width are obtained by fitting. According to the variation pattern of wind parameters, two groups of special grid turbulent wind fields are adjusted. One presents similar turbulence intensity and different turbulence integral scale reflecting different fluctuating wind vortex. And another presents similar turbulence integral scale and different turbulence intensity reflecting different fluctuating wind energy. Based on such works, studies on wind effects on high-rise buildings under various wind characteristics will be carried out.

Keywords: grid turbulent wind field; mean wind velocity; turbulence intensity; turbulence integral scale; pulsating wind speed spectrum; wind tunnel experiment