

文章编号:1673-2049(2017)06-0077-08

紊流风特性参数对矩形结构表面平均风荷载的影响

白桦^{1,2}, 回城玉^{1,2}, 刘建新^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路大型结构安全教育部工程中心, 陕西 西安 710064)

摘要:为了得到风特性参数变化对结构表面风压分布的影响规律,在风洞中采用格栅紊流,分别形成了紊流强度相同但积分尺度不同与积分尺度相同但紊流强度不同的几种局部紊流风场,以此来研究紊流风特性参数对矩形结构表面风压分布规律的影响,并给出了考虑这些影响的修正公式。结果表明:紊流强度增大会使矩形结构表面正压区体型系数增大,负压区体型系数绝对值减小;正压区风压变化规律与结构尺度无关,负压区体型系数除了受来流紊流强度影响外,还存在明显的尺度效应;紊流积分尺度增大会使矩形结构表面体型系数绝对值也增大,但不同区域变化幅度没有规律,很难进行统一修正。

关键词:风洞试验;紊流强度;紊流积分尺度;风压;体型系数

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

Effects of Turbulence Parameters on Surface Average Wind Load of Rectangular Structure

BAI Hua^{1,2}, HUI Cheng-yu^{1,2}, LIU Jian-xin^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Engineering Center of Highway Large Scale Structure Safety of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to obtain the laws about the effects of turbulent parameters on structural surface wind pressure distribution, the grid turbulence generators were used in wind tunnel to generate some identical turbulence intensities, different turbulence integral scale wind fields, and some different turbulence intensities, identical turbulence integral scale wind fields to study rectangular structural surface wind pressure distribution. Some correction formulas accounted for these influence were propounded. The results show that rectangular structural body-form coefficients in the positive pressure zone increase with the increasing of turbulence intensity, but the absolute values of the body-form coefficients in the negative pressure zone decrease. The change of wind pressure in the positive pressure zone has no relation with structural size. The body-form coefficients in the negative zone are influenced by not only turbulence intensity, but also structural size. With the rise of the turbulence integral scale, the absolute values of rectangular structure body-form coefficient increase, but the ranges of different regions are irregular and uniform correction is difficult.

Key words: wind tunnel test; turbulence intensity; turbulence integral scale; wind pressure; body-form coefficient

收稿日期:2017-06-07

基金项目:中国博士后科学基金项目(2014M560737, 2016T90876)

作者简介:白桦(1979-),男,甘肃西和人,高级工程师,工学博士,博士后, E-mail: baihua9810@163.com。

0 引言

建筑结构位于大气边界层风场中,随着高度增大,其对风的敏感性会逐渐增强。高耸结构抗风性能研究目前主要依赖风洞试验。风洞试验时,边界层风场模拟的准确性将对试验结果产生显著影响。由于风洞试验的各项相似准则在风洞中很难同时满足,必然导致风洞试验时的边界层风场与建筑所处的实际风场存在差异,从而造成风洞试验结果的偏差。

影响风洞试验结果准确性的各种因素一直是国内外学者研究的热点问题。边界层中紊流风特性参数是直接影响建筑结构抗风稳定性的关键参数之一,其模拟精度对风洞试验结果造成的影响在很多方面还存在争议。如美国国家标准委员会(America National Standard Institute, ANSI)指出应严格模拟紊流强度,紊流积分尺度的模拟可以放宽要求。Stathopoulos^[1]与 Hold 等^[2]在此问题上存在明显分歧。Tieleman^[3]的研究结果表明只要模型的特征尺寸大于 2 倍紊流积分尺度,则积分尺度的影响会很小,但紊流强度反映了小尺度紊流的作用,对模型负压区结果的影响非常明显,需要严格模拟。Bearman 等^[4]研究发现紊流积分尺度在三维空间的相互作用导致了部分影响抵消,使某些风效应对紊流积分尺度不敏感。Vickery 等^[5]通过实测数据分析认为要了解结构表面压力分布情况,仅模拟紊流强度是不行的,强调要模拟风剖面 and 紊流强度,紊流尺寸因子可以放宽到 2~3。Melbourne^[6]的研究表明,大比例尺模型在小尺度紊流场中试验会放大再附边界层的极值负压。华旭刚等^[7]对输电塔进行了研究,发现紊流积分尺度对抖振响应及风振系数有明显影响,试验结果偏保守,并给出了紊流积分尺度修正系数。卢占斌等^[8]采用不同紊流参数的局部紊流场对 CAARC 模型进行试验,发现紊流风参数会对风洞试验结果产生影响。白桦^[9]采用格栅形成局部紊流研究了紊流强度与积分尺度对桥梁与建筑结构的影响,认为紊流风参数应该准确模拟,放宽任何参数模拟都会对风洞试验结果产生影响。李春光等^[10]研究了紊流积分尺度对理想平板、流线形断面和某矩形断面颤振导数的影响,结果表明:随结构断面钝化,紊流积分尺度的影响逐渐减弱。潘韬等^[11]研究发现紊流积分尺度对顺风向抖振力影响明显,紊流强度越大,抖振力功率谱密度能量也越大。

以上研究表明紊流风特性参数可能会对建筑结

构风致振动试验结果产生影响,造成这种影响的根本原因可能是风特性参数的变化导致建筑结构表面风压分布规律发生变化。风洞试验时模拟的边界层风场一定会和实际结构所处的风场存在偏差,为了比较风参数的变化对建筑结构表面风压分布规律的影响,本文在风洞中采用格栅模拟了 16 种不同的局部紊流风场,分别形成了紊流强度相同但积分尺度不同与积分尺度相同但紊流强度不同的几种风场,以此来研究紊流风特性参数对矩形结构表面风压分布规律的影响。

1 紊流强度与积分尺度

1.1 紊流强度

紊流强度是描述边界层风场紊流情况的重要参数。设在一定基本时距内的水平平均风速和风向角分别为 U 和 Φ , t 为仪器坐标系下的时间序列,则有

$$U = \sqrt{u_x(t)^2 + u_y(t)^2} \quad (1)$$

$$\cos(\Phi) = \frac{u_x(t)}{U}$$

式中: $u_x(t)$, $u_y(t)$ 分别为基本时距内 x 向和 y 向的脉动风速均值; Φ 可通过 $u_x(t)$ 和 $u_y(t)$ 确定其所在的风向区域。

在基本时距内,纵向脉动风速 $u(t)$ 和横向脉动风速 $v(t)$ 可依据式(2)计算

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= u_x(t) \cos(\Phi) + u_y(t) \sin(\Phi) - U \\ v(t) &= -u_x(t) \sin(\Phi) + u_y(t) \cos(\Phi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于风的随机性,依据平稳随机过程均值为 0 的假定求出脉动分量均方差 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ 。定义顺风向、横风向、竖向紊流强度 I_u, I_v, I_w 分别为各自脉动分量与平均风速之比,即

$$\left. \begin{aligned} I_u &= \frac{\sigma_u}{U} \\ I_v &= \frac{\sigma_v}{U} \\ I_w &= \frac{\sigma_w}{U} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

紊流强度与边界层风场所处的地表粗糙度和高度有关,是影响结构风荷载的重要参数。

1.2 积分尺度

平均风“裹挟”的不同尺度涡旋相互叠加形成了大气边界层中某一点的紊流风场。紊流风特性参数是由不同尺度涡旋的组成比例决定的。每个涡旋尺度会引起某点出现频率为 n 的脉动,由平均风速 U 除以频率 n ,得到的波长 $\lambda = U/n$,就是涡旋尺度。

积分尺度就是紊流风场中涡旋平均尺度的量度。由于涡旋具有三维特性,沿顺风向、横风向、竖向 3 个方向的脉动风分量 $u(t), v(t), w(t)$ 各存在 3 个方向的积分尺度,因此共有 9 个紊流积分尺度。以顺风向紊流积分尺度为例,根据随机脉动过程的统计分析理论,积分尺度 L_u^x 表达式为

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

(4)

式中: $R_{u_1, u_2}(x)$ 为顺风向两点 $(x_1, y_1, z_1, t), (x_1 + x, y_1, z_1, t)$ 脉动风速 u 的互协方差函数; σ_u^2 为脉动风速 u 的方差。

由式(4)可见,要获得积分尺度,应该沿脉动风方向连续布置多个测点同步测试,但由于试验条件限制,同一方向连续布置多个测点可能因为上游测量装置产生的尾流影响下游测试结果,故多点同步测量很难实现。实际测试中,通常假设紊流不发生衰减,旋涡以平均风速向下游迁移,则脉动风速 $u(x_1, t + \tau)$ 可定义为 $u(x_1 - x, t)$,其中 $x = U\tau$,这就是泰勒假设。由于脉动风均值为 0,可用自相关函数代替协方差函数,故式(1)可由式(5)替代,即

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^{+\infty} R_u(\tau) d\tau$$

(5)

依据泰勒假定可以将多点测量转化为单点测量,简化了求解方法,已被多位学者证明采用泰勒假设计算得到的积分尺度是合理可靠的,本文也采用此方法进行分析。积分尺度在结构风荷载分析中具有重要意义,其大小决定了结构受影响范围。如果积分尺度大于结构特征尺寸,脉动风引起的荷载会叠加,反之,荷载可能会抵消,所以研究积分尺度这一单参数变化对结构风荷载的影响对工程设计具有重要的参考价值。

2 风洞试验

2.1 紊流风特性参数模拟

试验在长安大学风洞实验室进行,试验段尺寸为 $3\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 15\text{ m}$ 。风速为 $0 \sim 53\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 连续可调,均匀场紊流强度小于 0.5% ,风洞流场品质优良。改变格栅条布置形式形成不同的局部紊流风场,风场模拟照片如图 1 所示。16 种不同格栅风场形成的紊流强度与紊流积分尺度如表 1,2 所示。为表述方便,定义格栅 $0.1 \sim 0.2$ 表示格栅宽度为 0.1 m 和格栅中心方孔尺寸为 0.2 m 的格栅风场,依此类推。依据不同格栅得到局部紊流风参数结果,通过对比格栅 $0.1 \sim 0.3$ (紊流强度为 17% ,积分尺度



(a) 格栅0.1~0.2



(b) 格栅0.25~0.6

图 1 格栅风场

Fig. 1 Turbulence Field of Grilles

表 1 各工况紊流强度

Tab. 1 Turbulence Intensities of Different Schemes

格栅宽度/m	不同格栅中心方孔尺寸(m)下的紊流强度/%			
	0.60	0.40	0.30	0.20
0.25	35.13	37.97	33.44	37.57
0.20	31.73	25.84	23.35	29.13
0.15	25.65	25.98	20.93	18.21
0.10	22.28	17.84	17.39	18.61

表 2 各工况紊流积分尺度

Tab. 2 Turbulence Integral Scales of Different Schemes

格栅宽度/m	不同格栅中心方孔尺寸(m)下的紊流积分尺度/m			
	0.60	0.40	0.30	0.20
0.25	0.122 4	0.294 0	0.255 5	0.384 4
0.20	0.118 9	0.408 6	0.203 1	0.775 4
0.15	0.104 9	0.307 2	0.291 9	0.285 6
0.10	0.100 6	0.078 5	0.101 1	0.239 5

为 0.10 m)、格栅 $0.1 \sim 0.6$ (紊流强度为 22% ,积分尺度为 0.10 m)、格栅 $0.25 \sim 0.6$ (紊流强度为 35% ,积分尺度为 0.12 m)紊流场中的风洞试验结果可得紊流积分尺度相同时改变紊流强度对结构表面风压分布的影响,对比格栅 $0.1 \sim 0.2$ (紊流强度为 18% ,积分尺度为 0.24 m)与格栅 $0.1 \sim 0.3$ (紊流强度为 17% ,积分尺度为 0.10 m)可得紊流强度

相同时改变积分尺度对结构表面风压分布的影响。
模型试验照片如图 2 所示。

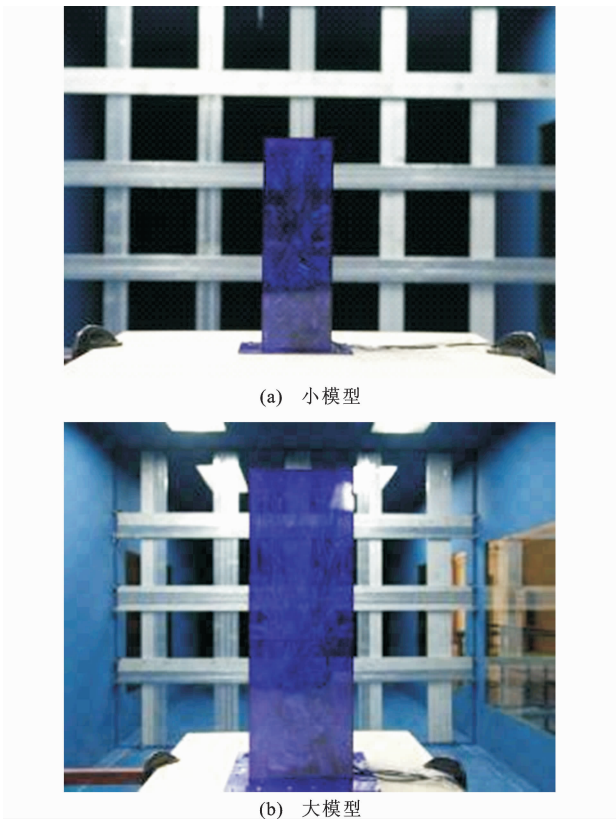


图 2 模型试验照片
Fig. 2 Photos of Model Test

2.2 试验模型

制作 3 种尺度模型,小尺度模型横截面为边长 0.1 m 的正方形,高 0.3 m。中尺度与大尺度模型尺寸分别为小尺度模型的 1.5 倍和 2 倍,外形相同,等比例放大。模型分区示意如图 3 所示。图 4 给出了各分区测点布置,3 种尺度模型测点的相对位置保持一致。

为保证数据的稳定性,试验风速选择 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 两种,每个风速下采集 3 组数据,将 6 组数据取平均值。试验装置选择美国 PSI 公司的电子压力扫描阀,采样频率为 312.5 Hz,采样时长 60 s。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 紊流强度对平均风压系数的影响

图 5 给出了大模型迎风面(A 区)、侧风面(B 区)、背风面(C 区)平均风压系数分布情况。迎风面

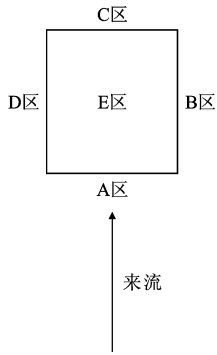


图 3 模型分区示意
Fig. 3 Model Partition

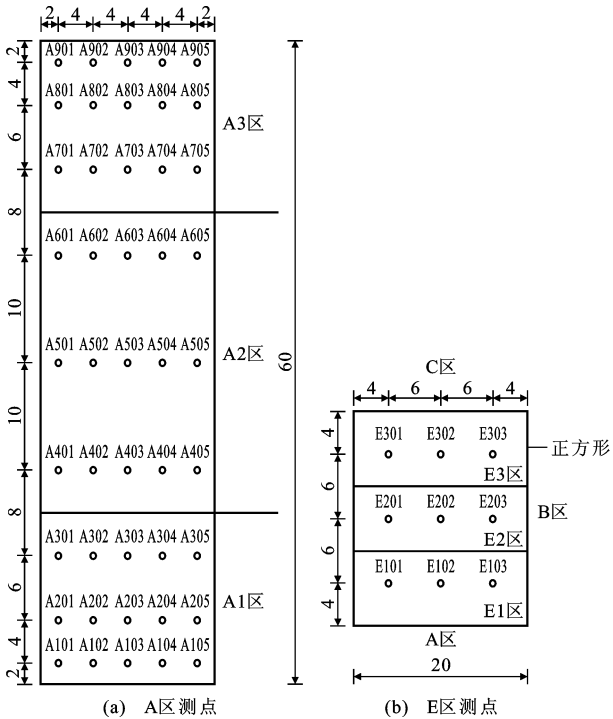


图 4 模型测点布置(单位:cm)

Fig. 4 Arrangement of Measuring Points (Unit:cm)

均为正压,正压极值出现在中部偏上位置,由中心向外侧逐渐减小,在边缘位置压力梯度变化较大。侧风面与背风面均为负压,背风面负压极值出现在中部偏上位置,侧风面从上游向下游负压风荷载逐渐减小。由风压系数分布情况可见,各面平均压力分布比较均匀,规律性较好,无突跳点和坏点。

2.3.2 紊流强度对分区体型系数的影响

图 6 给出了大模型与小模型的分区体型系数。由图 6 可见:A 区处于迎风面,均为正压,紊流强度增大会使正压区体型系数增大,大模型与小模型 A 区体型系数增大的幅度基本相同。侧风面与背风面均为负压,紊流强度增大会使负压区的体型系数绝对值减小。紊流强度由 17% 增大到 35%,大模型 B1~B3 区体型系数绝对值分别减小 33%,26%,32%,小模型相同区域分别减小 11%,8%,11%。除了 E1 区,其他顶面与背风面负压区的变化规律与侧风面 B 区相同。紊流强度对矩形结构负压区体型系数的影响明显存在尺度效应,大模型的变化幅度比小模型大。分析原因:A 区处于迎风面,直接受来流紊流的影响,正压区风压随来流紊流强度增大而增大,受结构尺度影响较小。侧风面与背风面的负压区除了受来流紊流影响,结构尺度自身造成的特征紊流也会影响。特征紊流是受结构外形影响,来流经过结构表面产生涡脱、分离、再附等绕流

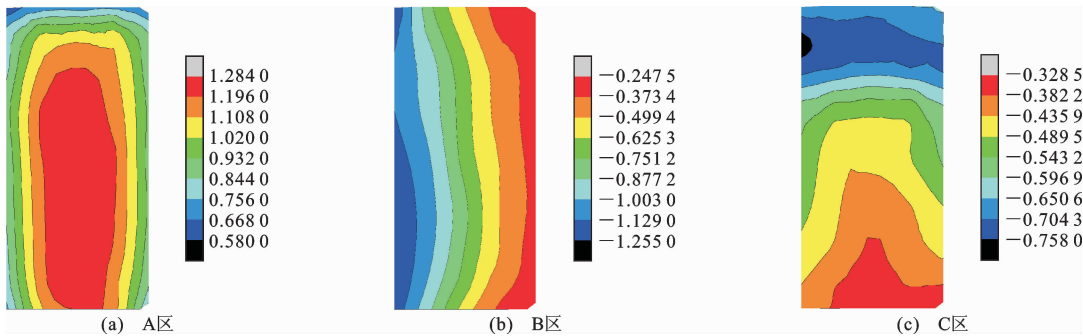


图 5 大模型表面平均风压系数分布

Fig. 5 Average Wind Pressure Coefficient Distributions of Large Model Surface

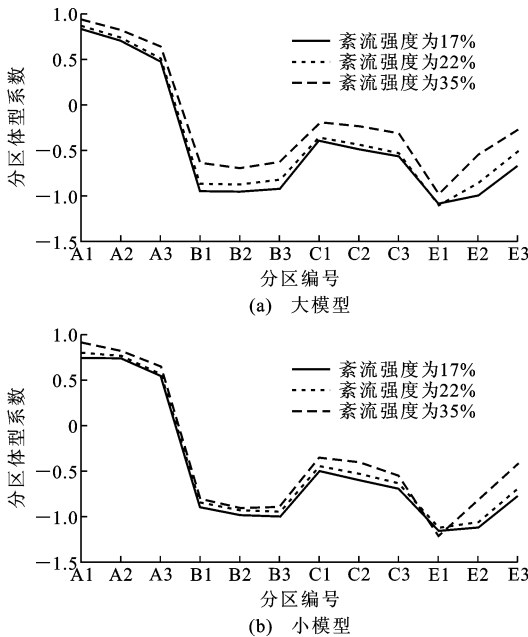


图 6 分区体型系数

Fig. 6 Body-form Coefficients of Different Partitions

现象。顶面、背风面、侧风面负压区均会受到绕流、尾流的影响,所以这些区域的体型系数表现出尺度效应,结构尺度变化后,导致特征紊流发生变化,从而影响到负压区的体型系数。模型尺度越大,紊流强度变化导致负压区的体型系数变化幅度也越大。E1 区的体型系数变化没有规律,因为其所处的位置正好是特征紊流所形成的柱状涡区域,如图 7 所示。此区域涡脱、分离、再附等现象比较复杂,是结构容易出现破坏的区域,所以体型系数变化不规律。

图 8 给出了紊流强度对 3 种尺度模型分区体型系数的影响情况。因为迎风面各分区体型系数随紊流强度的变化不受模型尺寸的影响,所以 3 个模型可以用一个公式拟合,针对迎风面上、中、下 3 个不同区域给出修正公式,根据紊流强度的偏差情况,可以估算出体型系数的修正值。由图 8(a)~(c)可知,紊流强度增大 10%,迎风面的分区体型系数会

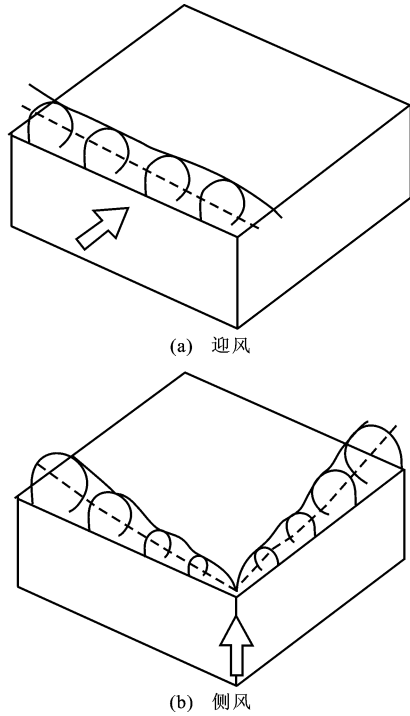


图 7 特征紊流典型旋涡形式

Fig. 7 Typical Vortex of Signature Turbulence

增大 10%~16%。

由图 8 还可知,侧风面与背风面当紊流强度变化时,小模型与中模型体型系数变化幅度相差不大,可认为当模型尺度变化小于 1.5 倍时,不用考虑尺度效应的影响,用统一的公式对紊流强度导致体型系数的变化进行修正(图 8 中实线)。当模型尺度变化大于 2 倍时,要用变化率更大的修正曲线进行修正(图 8 中虚线)。如紊流强度增大 10%,侧风面体型系数绝对值减小 16%~20%,背风面也减小 20% 左右。表 3 给出了结构表面不同区域体型系数受模型尺度与紊流强度影响的修正公式。有时为了克服雷诺数效应影响或更好地模拟细部构件,结构风洞试验会制作大比例尺模型,如果风洞模拟的紊流风参数与实际不一致,模型尺度增大可能导致体型系

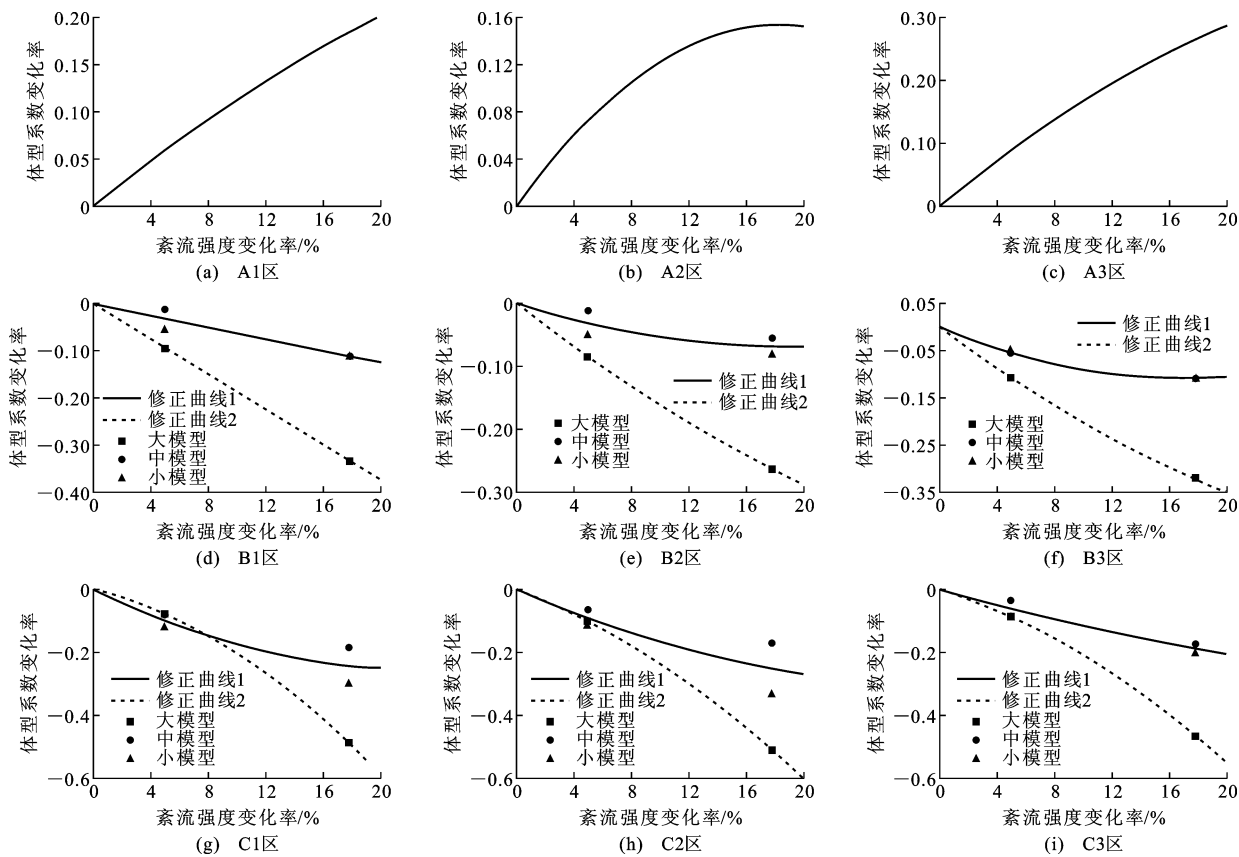


图 8 分区体型系数随紊流强度变化规律

Fig. 8 Change Laws of Body-form Coefficient with Turbulence Intensity in Model Partitions

数试验结果误差增大。

2.3.3 紊流积分尺度对平均风荷载的影响

图 9 给出了积分尺度对 3 种不同尺度模型体型系数的影响。由图 9 可见：积分尺度增大会使矩形结构表面体型系数绝对值也增大，但变化幅度没有规律，这与紊流强度对体型系数影响有一定规律不同，分析原因可能是由于积分尺度所形成的涡团影响范围与模型尺寸之间的相对比例关系会发生变化，导致涡脱、再附等流场影响区域发生变化，从而引起体型系数变化幅度不规律。

表 4 给出了 3 种尺度模型表面分区体型系数当积分尺度由 0.10 m 增大到 0.24 m 后的变化率。由不同分区变化率可见：3 种不同尺度模型的背风面与侧风面由上到下小模型变化幅度最小。当来流积分尺度增大后，小模型侧风面由上到下变化幅度均在 10% 左右，背风面均在 30% 左右。表明来流积分尺度由 0.10 m 增大到 0.24 m，小模型背风面与侧风面受到的影响相同。从积分尺度与模型尺寸比例关系看，小模型的横截面为边长 0.10 m 的正方形，所以 0.10 m 与 0.24 m 的来流紊流积分尺度均比模型的特征尺寸大，可以将模型“包裹”起来，因此

在这 2 种来流积分尺度影响下，背风面与侧风面的体型系数变化率是相同的。其他 2 种尺度模型的中模型特征尺寸为 0.15 m，大模型特征尺寸为 0.20 m，分别为 0.10 m 积分尺度的 1.5 倍与 2 倍，这就导致 0.10 m 的积分尺度无法完全覆盖中模型与大模型，在模型表面会出现更多的旋涡脱落、涡团破碎、再附等现象，特征紊流复杂后导致背风面与侧风面不同区域体型系数变化率没有小模型稳定，这就是图 8 中各种尺度模型不同分区体型系数变化幅度不规律的原因。积分尺度对平均风荷载的影响只能定性认为增大积分尺度会使矩形结构表面体型系数绝对值也增大，但变化幅度没有规律，很难进行统一修正。

3 结 语

(1) 风洞试验是获得结构风荷载的重要手段，受相似准则及边界层效应影响，风洞试验时紊流强度偏大会导致矩形结构表面正压区体型系数增大，负压区体型系数绝对值减小。风洞试验获得的结构顺风向风荷载会比实际值偏大，导致设计偏保守。本文给出了结构表面不同区域体型系数受模型尺度与

表 3 分区体型系数与紊流强度拟合曲线
Tab. 3 Fitted Curves of Partition Body-form Coefficient and Turbulence Intensity

分区编号	尺度因子 S	修正曲线公式
A1	1. 0	$y=-0.000\ 123x^2+0.012\ 5x$
	1. 5	
	2. 0	
A2	1. 0	$y=-0.000\ 462\ 7x^2+0.016\ 86x$
	1. 5	
	2. 0	
A3	1. 0	$y=-0.000\ 24x^2+0.019\ 1x$
	1. 5	
	2. 0	
B1	1. 0	$y=-0.006\ 2x-0.001\ 1$
	1. 5	
	2. 0	
B2	1. 0	$y=0.000\ 19x^2-0.007x$
	1. 5	
	2. 0	$y=0.000\ 175x^2-0.017\ 9x$
B3	1. 0	$y=0.000\ 38x^2-0.012\ 9x$
	1. 5	
	2. 0	$y=0.000\ 28x^2-0.023\ 2x$
C1	1. 0	$y=0.000\ 508x^2-0.022\ 65x$
	1. 5	
	2. 0	$y=-0.000\ 919x^2-0.011x$
C2	1. 0	$y=0.000\ 3x^2-0.019\ 85x$
	1. 5	
	2. 0	$y=-0.000\ 62x^2-0.017\ 6x$
C3	1. 0	$y=0.000\ 136x^2-0.013x$
	1. 5	
	2. 0	$y=-0.000\ 68x^2-0.014x$

注: x 为紊流强度偏差幅度; y 为体型系数偏差幅度。
紊流强度影响的修正公式。

(2)正压区风压变化规律主要受来流紊流强度影响,与结构尺度无关。负压区体型系数除了受来流紊流强度影响外,还存在明显的尺度效应,紊流强度变化后大模型体型系数的变化幅度比小模型大。因此,大比例尺模型风洞试验时需严格设定模型紊流风参数,否则可能导致获得的结构风荷载误差增大,特别是负压区。

(3)紊流积分尺度增大会使矩形结构表面体型系数绝对值也增大,但不同区域变化幅度没有规律,很难进行统一修正。受风洞尺寸及模型缩尺比影响,风洞试验时的紊流积分尺度会通常较实际边界层风场偏小,所以风洞试验得到的风荷载会偏危险,需尽可能减小试验时模拟的积分尺度误差。

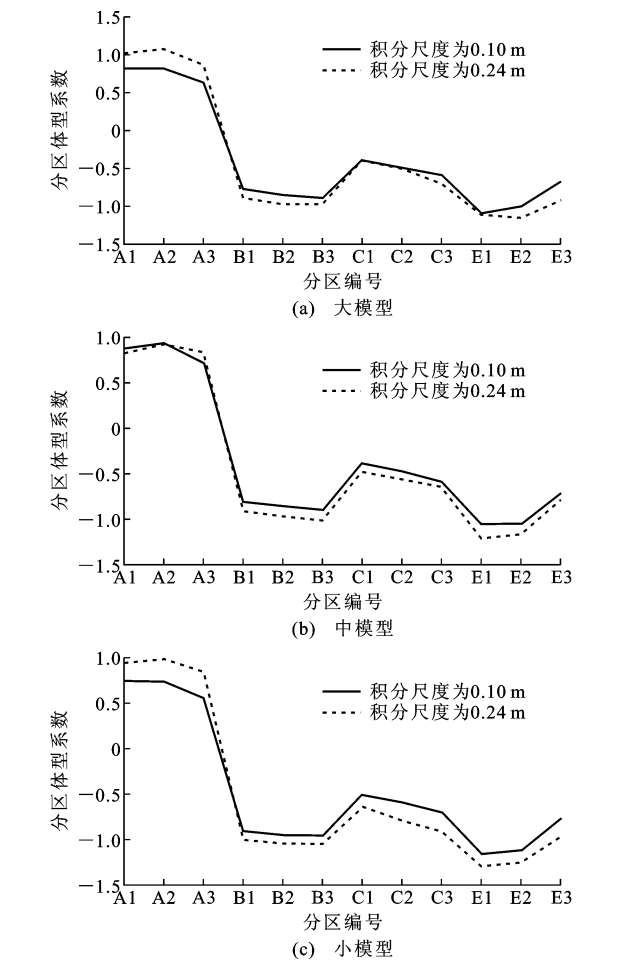


图 9 不同分区体型系数
Fig. 9 Body-form Coefficient of Different Partitions

表 4 分区体型系数随紊流积分尺度的变化率

Tab. 4 Body-form Coefficient Variation Ratio Versus Turbulence Integral Scale in Model Partitions			
分区编号	大模型变化率/%	中模型变化率/%	小模型变化率/%
A1	24	—6	27
A2	32	—1	32
A3	36	15	53
B1	16	14	11
B2	14	13	11
B3	9	12	9
C1	0	24	28
C2	2	19	32
C3	21	10	32
E1	2	15	11
E2	15	10	12
E3	37	10	25

参考文献:

References:

[1] STATHOPOULOS T. Scale Effects in Wind Tunnel

- Testing of Low Buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13: 314-326.
- [2] HOLD A E, HOUGHTON E L, BHINDER F S. Some Effects Due to Variations in Turbulence Integral Length Scales on the Pressure Distribution on Wind-tunnel Models of Low-rise Buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1982, 10(1): 103-115.
- [3] TIELEMAN H W. Wind Tunnel Simulation of the Turbulence in the Surface Layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36: 1309-1318.
- [4] BEARMAN P W, MOREL T. Effect of Free Stream Turbulence on the Flow Around Bluff Bodies[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1983, 20(2/3): 97-123.
- [5] VICKERY P J, SURRY D, DAVENPORT A G. Aylesbury and ACE: Some Interesting Findings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1985, 23: 1-17.
- [6] MELBOURNE W H. Turbulence Effects on Maximum Surface Pressures — A Mechanism and Possibility of Reduction[C]//CERMAK J E. Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering. New York: Pergamon Press, 1980: 541-551.
- [7] 华旭刚, 陈政清, 杨靖波, 等. 大缩尺比气弹模型风洞试验紊流积分尺度修正[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(10): 55-61.
- HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing, YANG Jing-bo, et al. Turbulence Integral Scale Corrections to Aeroelastic Wind Tunnel Experimental Results with Large Scale Model[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 55-61.
- [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 Zhan-bin, WEI Qing-ding. An Experiment on a CAARC Model in Grid Turbulent Flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2001, 19(1): 16-23.
- [9] 白桦. 影响桥梁及建筑结构风洞试验结果若干因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- BAI Hua. Research on the Effect of Several Factors on the Wind Tunnel Test Results of Bridge and Building Structure[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [10] 李春光, 张记, 陈政清. 紊流积分尺度对桥梁颤导数影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(11): 69-75.
- LI Chun-guang, ZHANG Ji, CHEN Zheng-qing. Experimental Study on Influence of Turbulence Integral Scale on Flutter Derivatives of Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(11): 69-75.
- [11] 潘韬, 赵林, 曹曙阳, 等. 多风扇主动控制风洞类平板断面抖振力识别研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 178-183, 230.
- PAN Tao, ZHAO Lin, CAO Shu-yang, et al. Buffeting Force Analysis of Thin Plate Section in Multiple Fans Active Control Wind Tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 178-183, 230.