

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.014



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



矩形断面迎风面脉动压力特性试验研究

黄晖¹, 李少鹏¹, 张亮亮^{1,2}, 李智扬¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆建筑科技职业学院, 重庆 401331)

摘要: 当紊流流经矩形钝体时, 由于漩涡的拉伸和旋转运动, 其顺流向脉动压力具有明显的非定常性和空间三维性, 且主要依赖于紊流积分尺度与结构特征尺寸之比。为了深入研究紊流尺度效应作用机理, 以4:1矩形断面为研究对象, 基于三维谱张量理论和刚性节段模型测压试验, 系统研究矩形断面顺流向脉动压力的非定常气动特性。结果表明: 在紊流从矩形断面驻点至分离点运动过程中, 脉动压力的谱能量从低频向高频转移, 且该现象随着 L_u/D (L_u 为脉动风的纵向积分尺度, D 为迎风面高度)的减小更明显。与之相比, 紊流三维效应和畸变效应随 L_u/D 的增大而减弱, 在此过程中脉动压力的能量由于阻塞效应只在低频发生了明显的衰减, 在高频无明显变化。并通过引入三维压力导纳来揭示紊流作用下矩形断面迎风侧脉动压力的非定常效应机理, 对于驻点压力, L_u/D 越大, 压力导纳越接近准定常理论; 对于非驻点压力, 其距驻点位置越远, 阻塞效应对于低频能量的减弱作用越明显, 紊流三维效应越弱, 而高频的畸变效应则只由 L_u/D 控制。

关键词: 紊流; 迎风面风压; 非定常效应; 风洞试验; 压力导纳

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0143-08

Experimental investigation of fluctuating wind pressure characteristics of rectangular windward side

HUANG Hui¹, LI Shaopeng¹, ZHANG Liangliang^{1,2}, LI Zhiyang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing College of Architecture and Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

Abstract: When the turbulence flows through a rectangular blunt body, due to the stretching and rotating motion of the vortex, the downstream fluctuating pressure has obvious unsteadiness and spatial three-dimensionality, which mainly depends on the ratio of the turbulence integral scale to structural characteristic size. In order to further study the mechanism of turbulence scale effect, the unsteady aerodynamic characteristics of fluctuating pressure rectangular downstream direction on stationary rectangular cylinder with side ratio $B/D=4$ were investigated by the three-dimensional spectrum tensor theory and synchronically surface pressure measurement. The results show that when the turbulence moves from the stagnation point of the rectangular

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51978108); 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0937)。

作者简介: 黄晖(1998-), 男, 主要从事桥梁与建筑结构抗风研究, E-mail: hh0223@cqu.edu.cn。

李少鹏(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lishaopeng0314@163.com。

Received: 2021-11-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978108); Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-msxmX0937)

Author brief: HUANG Hui (1998-), main research interests: wind-resistance of bridges and building structures, E-mail: hh0223@cqu.edu.cn

LI Shaopeng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lishaopeng0314@163.com.

section to the separation point, the spectral energy of the fluctuating pressure shifts from low frequency to high frequency, and this phenomenon becomes more obvious with the decrease of L_u/D (L_u is the longitudinal integral scale of turbulence, D is the windward height). In contrast, the three-dimensional effect of turbulence and the distortion effect decrease with the increase of L_u/D . During this process, the energy of the fluctuating pressure is significantly attenuated only at low frequencies due to the blocking effect, and there is no significant change at high frequencies. Finally, the introduction of three-dimensional pressure admittance reveals the unsteady effect mechanism of the fluctuating pressure on the windward side of the rectangular section under the action of turbulence. For the pressure at the stagnation point, the greater the L_u/D , the closer the pressure admittance is to the quasi-steady theory; for the non-stagnation point pressure, the farther it is from the stagnation point, the more obvious the blocking effect of turbulence will weaken the low-frequency energy and the weaker the three-dimensional effect of turbulence. The distortion effect is controlled only by L_u/D .

Keywords: turbulence; pressure of windward surface; unsteady effect; wind tunnel test; pressure admittance

风荷载是高层建筑的主要控制性荷载之一,随着建筑物高度的增加,风的动力作用更加明显。在计算建筑顺风向脉动风荷载及风振响应时,为明确脉动风荷载空间分布特性,包括脉动风荷载的空间相关性和气动导纳。Davenport^[1]基于“片条假设”和准定常气动理论,将概率统计方法首次应用于线状结构的抖振响应分析。研究表明:当紊流尺度远大于结构的特征尺寸时,脉动压力可以通过“准定常”方式来确定,其空间相关性可以由脉动风速的空间相关性进行描述,即所谓的“片条理论”。然而,当紊流尺度接近或者小于钝体结构特征尺寸时,紊流中的漩涡在流经钝体过程中会发生拉伸、旋转,从而导致抖振力的相关性高于脉动风速的相关性,由此“准定常假设”和“片条理论”失效,这一气动现象也被称为“紊流三维效应”^[2-4]。Sankaran等^[5]、马存明^[6]、Li等^[7-8]也通过大量试验研究验证了这一现象。

针对钝体断面的非定常气动力特性,许多学者开展了大量试验和理论研究。Bearman^[9-10]研究了不同 L_u/D 条件下紊流在接近平板驻点过程中流线和脉动压力的畸变特性。结果表明,紊流在靠近钝体驻点时,流场的高频和低频特性分别由畸变效应和阻塞效应控制,导致能量由低频向高频转移的规律;而模型驻点脉动压力谱在不同 L_u/D 情况下低频保持一致, L_u/D 越小时高频能量衰减越快。Hunt^[11]、Durbin等^[12]基于快速畸变理论,对不同 L_u/D 情况下圆柱附近的流场开展了理论研究,也得到了类似的结论。针对1:1方柱,Kawai^[13]通过风洞试验研究了 L_u/D 对于迎风面脉动风压空间分布特性的影响规律,结果表明:在低频区风压谱基本保持一致,且与来流纵向脉动风谱相近,即低频区能量可以由“准定常理论”描述,而高频区脉动风压谱能量受畸变效应影响明显,其比纵向脉动风谱衰减更快,同时,Kawai引入压力导纳的概念来分析迎风面

压力的非定常特性,为非定常压力研究提供思路。李少鹏^[14]基于三维谱张量分析理论提出具有明确物理意义的钝体断面三维气动导纳闭合解理论识别方法,该方法为紊流三维效应研究提供理论基础。

综上所述,脉动风压的非定常特性与纵向脉动风尺度特性密切相关。有必要深入研究 L_u/D 对于脉动风压空间分布特性的影响规律和作用机理,以便更清楚地认识脉动风压的非定常特性。为此,笔者以4:1矩形断面迎风面脉动压力为研究对象,通过风洞测压试验深入研究 L_u/D 对迎风面脉动风压的影响规律,进而采用三维谱张量分析理论从能量角度阐明 L_u/D 对矩形迎风面脉动风压非定常特性的影响机理。

1 风洞试验

1.1 试验概况

为了研究 L_u/D 对钝体断面迎风面脉动风压分布特性的影响规律,试验分别在西南交通大学XNJD-1和XNJD-3风洞模拟了两种不同尺度的紊流场,并开展节段模型测压试验确定迎风面的脉动压力。XNJD-1风洞为回流式风洞,其高速试验段尺寸为2.4 m(宽)×2 m(高),试验中的小尺度紊流场由该风洞通过图1所示的均匀格栅模拟,而大尺度紊流则在世界最大的XNJD-3大型边界层风洞中采用尖塔和粗糙元产生,该风洞的试验段尺寸为22.5 m(宽)×4.5 m(高),其模拟的纵向积分尺度可达0.975 m(如表1所示)。测压模型采用高宽比(B/D)为4:1($B=400$ mm、 $D=100$ mm、 $L=2\ 300$ mm)的矩形断面,模型采用铝制骨架,表面安装有机玻璃,在模型中部1 135 mm范围内布置8排测压片条以研究脉动压力的空间相关性。为增加间距组合数,采用展向不等间距布置测压点的方法,详见图2(a),每排测压片条布置9排测压孔(见图

2(b)),迎风侧表面压力通过DSM-4000电子扫描阀同步测量。为了减少管路畸变的影响,试验将扫描阀置于测压模型内部,以便于将扫描阀和模型测压孔之间的连接管路长度控制在200 mm以内。测压试验采样频率设为256 Hz,采样时间为180 s。紊流场的空间分布特性采用两个Cobra Probe风速仪进行,从而确定关键紊流参数和其空间相关性,采样频率和采样时间设置与测压试验相同。在进行测压试验时,节段模型两端加装端板以降低端部效应影响。



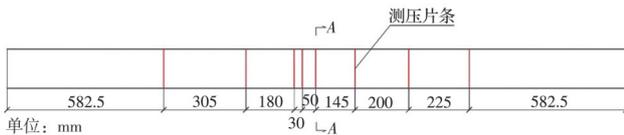
图 1 矩形断面测压试验

Fig. 1 Section model for pressure measurements

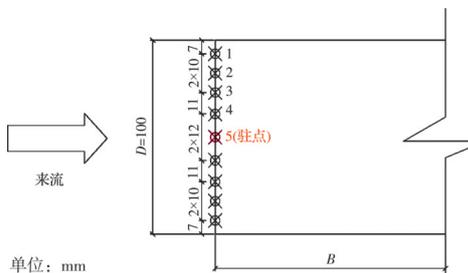
表 1 流场紊流特性

Table 1 Characteristics of turbulent flow

流场类型	积分尺度/m			紊流度/%		
	L_u	L_v	L_w	I_u	I_v	I_w
格栅流场	0.107	0.042	0.054	8.0	6.1	6.5
尖塔流场	0.975	0.348	0.209	11.0	9.2	9.0



(a) 模型迎风侧展向测点布置



(b) A-A 测压点布置详图

图 2 迎风面测点布置

Fig. 2 Distribution of windward pressure taps

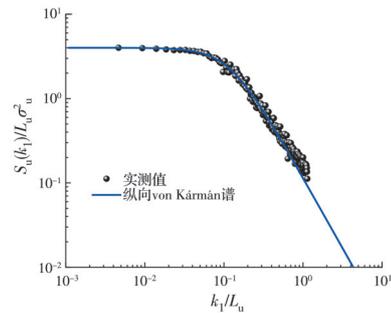
1.2 流场特性

由于将脉动风时程直接积分得到的结果误差较大,因此,采用最小二乘法通过拟合 von Kármán 谱来识别紊流积分尺度,两种紊流场的基本紊流参数如表 1 所示。

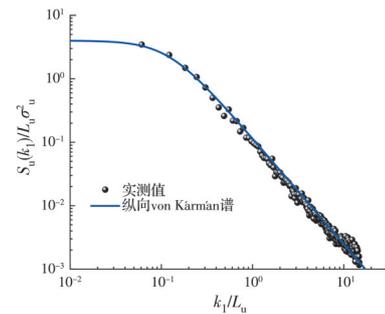
一般而言,格栅产生的紊流场基本满足各向同性假设。格栅产生紊流场可以用 von Kármán 谱(如式(1)所示)很好地模拟,图 3 给出了两种流场的一波数纵向脉动风谱,为了更好地分析纵向脉动风和脉动压力的关系,纵向脉动风谱以无量纲化的风谱表示,相应的横坐标为无量纲化的频率 $k_1 L_u$ 。两种流场的测量高度与模型离地高度一致。结果表明,两种流场实测纵向脉动风谱与 von Kármán 理论谱吻合良好,为后面的非定常压力研究提供了基础。

$$S_u(k_1) = \frac{4L_u \sigma_u^2}{\left[1 + 4\pi^2(1.339L_u)^2 k_1^2\right]^{5/6}} \quad (1)$$

$$S_u(k_1, k_2) = \frac{4\pi \sigma_u^2}{3} (1.339L_u)^2 \cdot \frac{1 + (1.339L_u 2\pi k_1)^2 + \frac{11}{3} (1.339L_u 2\pi k_2)^2}{\left[1 + (1.339L_u)^2 (4\pi^2 k_1^2 + 4\pi^2 k_2^2)\right]^{7/3}} \quad (2)$$



(a) $L_u=0.107$ m



(b) $L_u=0.975$ m

图 3 一波数纵向脉动风谱

Fig. 3 One-wavenumber spectra of the longitudinal velocity fluctuations

$k_2 = 0$ 时的二维 von Kármán 风谱为

$$S_u(k_1, 0) = \frac{4\pi \sigma_u^2}{3} (1.339L_u)^2 \frac{1}{\left[1 + (1.339L_u)^2 (4\pi^2 k_1^2)\right]^{4/3}} \quad (3)$$

式中: k_1 为顺流向波数; k_2 为展向波数; $k_i = n_i/U$, $i = 1, 2$, 其中 n_i 为频率, Hz, U 为平均风速, m/s; σ_u 为纵

向脉动风均方差; L_u 为紊流纵向积分尺度。

另外,为了考虑紊流中的非各向同性脉动分量的影响,利用 Kimura^[15]相干函数模型来拟合纵向脉动风和脉动压力的空间相关性,该模型为

$$\text{Coh}_i(k_1, \Delta y) = \frac{2^{1/6}}{\Gamma(5/6)} \left[\eta^{5/6} K_{5/6}(\eta) - \frac{\eta^{11/6} K_{11/6}(\eta)}{2} \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \eta &= A_i \Delta y \\ A_i &= \frac{C}{\alpha_1 L_u} \sqrt{1 + [(2\pi/c)(\alpha L_u k_1)]^\beta} \\ C &= \sqrt{\pi} \frac{\Gamma(5/6)}{\Gamma(1/3)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $i=(p, u)$, 分别表示压力和纵向脉动风速; $\text{Coh}_i(k_1, \Delta y)$ 为相干函数; $K_{5/6}$ 、 $K_{11/6}$ 为第二类修正贝塞尔函数; α 、 β 为待拟合参数、Gamma 函数。将式(4)进行 Fourier 变换可得到相应的两波数相干函数,即

$$\Phi_i(k_1, k_2) = \frac{\Gamma(4/3)}{3\Gamma(5/6)} \sqrt{\pi} A_i^{5/3} \left\{ \frac{11(2\pi k_2)^2 + 3A_i^2}{[(2\pi k_2)^2 + A_i^2]^{7/3}} \right\} \quad (6)$$

式中: k_2 为展向波数。

与理论的 von Kármán 相干函数模型相比,当紊流场满足各向同性假设时, Kimura 修正相干函数模型中的拟合参数应满足: $\alpha = 2, \beta = 2$ 。如表 2 所示, 格栅流场的两个拟合参数值都在 2 附近, 说明了该格栅流场基本满足各向同性假设; 而尖塔流场纵向脉动风的拟合参数与理论值相差较大。因此, 对于尖塔流场不能直接使用 von Kármán 相干函数模型来描述纵向脉动风速的空间相关性。如图 4 所示, 无论是格栅流场还是尖塔流场, 实测相干函数均能用 Kimura 相干函数模型很好拟合, 表明该模型可以较好地修正尖塔流场的非各向同性分量的影响。

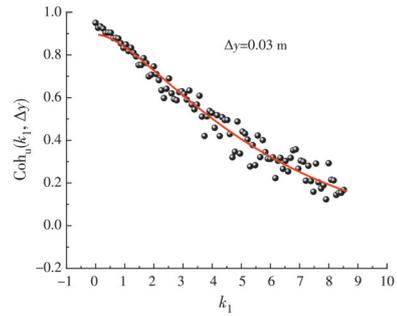
表 2 Kimura 相干函数模型拟合参数

流场类型	α	β
格栅流场	2.021	1.9416
尖塔流场	2.9327	1.817

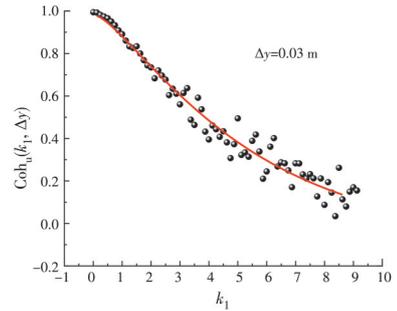
2 矩形迎风面脉动压力空间分布特性

2.1 脉动压力的空间相关性

为研究矩形迎风面脉动压力的紊流三维效应影响, 图 5 给出了脉动压力和纵向脉动风展向互相关系数。结果显示, 在紊流场中, 越靠近矩形断面流动分离点, 脉动压力的空间相关性越弱, 但其始



(a) $L_u=0.107$ m



(b) $L_u=0.975$ m

图 4 纵向脉动风横向相干函数

Fig. 4 The spanwise coherence of the longitudinal velocity fluctuations

终高于纵向脉动风的相关性, 表明紊流在从驻点向分离点流动过程中, 漩涡可能发生破碎, 导致脉动压力的展向相关性降低; 同时, 当 L_u/D 较小时, 紊流三维效应明显增强, 这与 Larose 等^[16]、李少鹏^[14]、Wu 等^[17-18]、杜树碧等^[19]的研究一致。开展压力谱特性分析, 进一步从频域角度分析流场畸变和紊流三维效应对脉动压力非定常特性的影响规律。

以驻点压力为例, 其相干函数可以通过 Kimura 模型进行拟合, 结果如图 6 所示。研究表明, Kimura 相干函数模型能够很好地描述迎风面脉动压力的空间相关性。值得注意的是, 紊流积分尺度越大, 驻点压力的空间相关性越强, 这与纵向脉动风的影响规律一致。

2.2 脉动压力功率谱

Hunt^[11]、Durbin 等^[12]的研究表明, 当紊流积分尺度较小时, 钝体表面压力的高频畸变作用更为显著。基于风洞试验, Kawai^[13]通过引入压力导纳的概念建立非定常风压谱模型以研究紊流畸变效应的影响, 公式为

$$S_p(k_1) = (\rho U)^2 |\chi_{pu}(k_1)|^2 S_u(k_1) \quad (7)$$

式中: ρ 为空气密度; $|\chi_{pu}(k_1)|^2$ 为一波数压力导纳; $S_p(k_1)$ 和 $S_u(k_1)$ 分别为脉动压力谱和纵向脉动风速谱; 基于三维谱张量分析理论, 通过在式(7)中引入

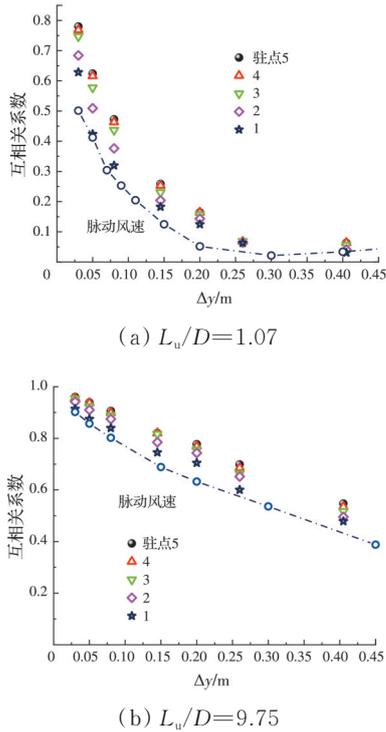


图 5 脉动压力互相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient of pressure fluctuations

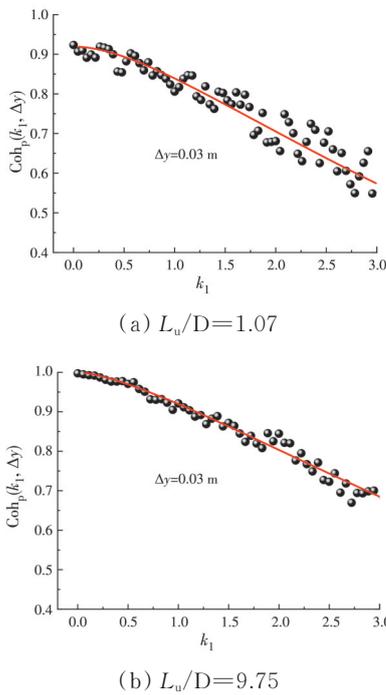


图 6 驻点脉动压力横向相干函数

Fig. 6 The spanwise coherence of pressure fluctuations at stagnation point

展向波数 k_2 来考虑紊流三维效应的影响,结果为

$$S_p(k_1, k_2) = (\rho U)^2 \left| \chi_{pu}(k_1, k_2) \right|^2 S_u(k_1, k_2) \quad (8)$$

式中: $\left| \chi_{pu}(k_1, k_2) \right|^2$ 为两波数压力导纳(3D AAF); $S_p(k_1, k_2)$ 和 $S_u(k_1, k_2)$ 分别为两波数脉动压力和纵向脉动风速谱。需要说明的是,当展向波数 $k_2 \rightarrow 0$ 时,

紊流中旋涡的展向尺度趋于无穷大,此时,紊流三维效应影响可以忽略。因此,应用 $S_p(k_1, 0)$ 来研究 4:1 矩形断面迎风面脉动压力的二维畸变问题。

参考 Bearman^[9-10] 和 Kawai^[13] 提出的无量纲谱模型,对式(7)进行无量纲化处理以研究 L_u/D 对矩形断面顺流向脉动压力的影响规律。无量纲一波数压力谱: $S_p(k_1)/\rho^2 L_u U^2 \sigma_u^2$; 无量纲约化波数: $k_1 L_u$ 。

图 7(a) 和 (b) 分别为 $L_u/D=1.07$ 和 $L_u/D=9.75$ 时迎风面的一波数脉动压力谱,其中纵向一波数 von Kármán 模型的无量纲形式与图 3 中的纵向脉动风谱约化形式一致。由图 7 可知,对于驻点(迎风面测点 5, 见图 2(b)), 两种工况下低频一波数脉动压力谱与来流纵向脉动风谱趋于一致,而高频能量衰减速率随着 L_u/D 的减小而显著增加,其表明驻点区域低频的非定常效应(或阻塞效应)不明显。对于非驻点脉动压力,两种风场下一波数脉动压力谱在低频都发生一定程度的衰减,其表明当测点远离驻点区域时,阻塞效应和紊流三维效应的贡献不可忽略。而对于高频区域(尤其是惯性子区),其谱能量受 L_u/D 影响明显。当 L_u/D 较小时,高频能量会呈现明显的增长,高频指数衰减减小且趋近于纵向脉动风的高频衰减速率(-5/3)。当 L_u/D 较大时,迎风面压力谱特性不依赖于空间位置,且与纵向脉动风谱更为接近,该现象可以做如下解释:当 L_u/D

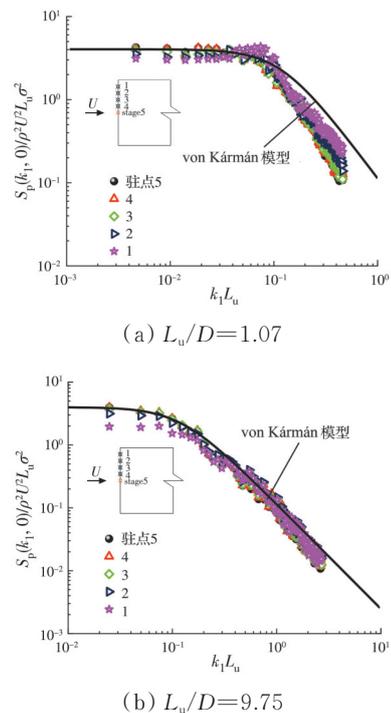


图 7 迎风面-波数脉动压力谱

Fig. 7 The one-wavenumber spectra of pressure fluctuations on the windward face

较小时,紊流在由驻点向分离点流动过程中,低频大尺度漩涡会破碎成高频小尺度漩涡,从而增强高频能量,在此过程中,漩涡发生拉伸和旋转,导致低频能量略有增加。而当 L_u/D 较大时,紊流三维效应影响较小,低频能量主要由阻塞效应控制,而高频能量由畸变控制。由于大尺度紊流情况下,畸变效应不明显,因此,迎风侧压力谱的高频能量与 von Kármán 谱吻合良好。

为了进一步研究紊流畸变的影响,引入二维压力谱的概念,即令式(8)中 $k_2=0$ 以得到 $S_p(k_1, 0)$, 以此剔除紊流三维效应的影响。与一波数无量纲谱类似,二维 von Kármán 模型的无量纲形式可通过式(3)中二维 von Kármán 谱变换而来,根据式(7)可对二维压力谱进行如下形式无量纲化处理。

$$\text{无量纲二维压力谱: } S_p(k_1, 0)/\rho^2 L_u^2 U^2 \sigma_u^2;$$

$$\text{无量纲约化波数: } k_1 L_u.$$

如图 8 所示,当剔除紊流三维效应影响后,两种风场下迎风面压力的高频畸变均不依赖空间位置。值得注意的是,小尺度紊流场中二维压力谱高频衰减速率要高于大尺度紊流场工况,表明高频畸变主要由 L_u/D 控制, L_u/D 越小,畸变作用越大,反之越小,其压力特性也就越接近“准定常理论”。相比之下,低频阻塞效应则依赖于迎风面压力的空间位置有关,而受 L_u/D 影响不显著。

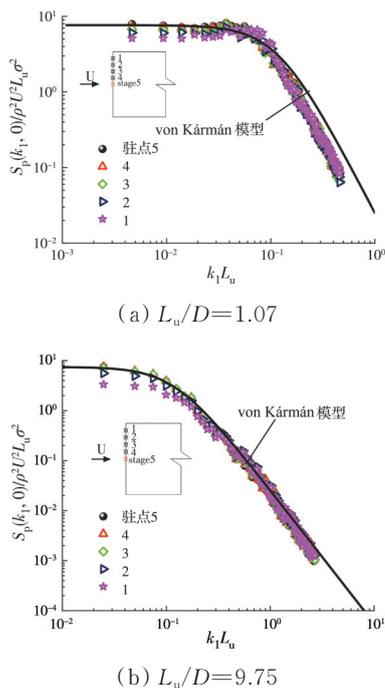


图 8 迎风面二维脉动压力谱
Fig. 8 The two-dimensional spectra of pressure fluctuations on the windward face

3 脉动压力与纵向脉动风速气动导纳

基于式(7)提出的压力导纳模型和风洞试验结果,可以得到两种流场下的驻点的一波数压力导纳,结果如图 9 所示。在低频区,两种流场下的压力导纳值都在 1 附近,说明在驻点区域,脉动压力的低频特性可由“准定常理论”来描述,而在高频区,气压力导纳随 L_u/D 的增大而增大,且在 L_u/D 达到 9.75 时趋向于 1。该结果表明驻点脉动压力高频分量由于受紊流畸变和紊流三维效应的共同影响而表现出明显的非定常特性。其规律是: L_u/D 越小,紊流非定常效应越显著,反之,“准定常理论”越适用。

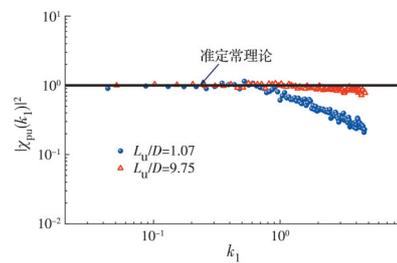


图 9 驻点-波数压力导纳
Fig. 9 1D AAF of the pressure at stagnation point

为了从压力导纳的角度进一步分析迎风面非驻点区脉动压力的非定常特性,图 10 给出了两种风场下迎风面不同位置测点的压力导纳。结果显示,从驻点至分离点,两种流场中的压力导纳在低频区

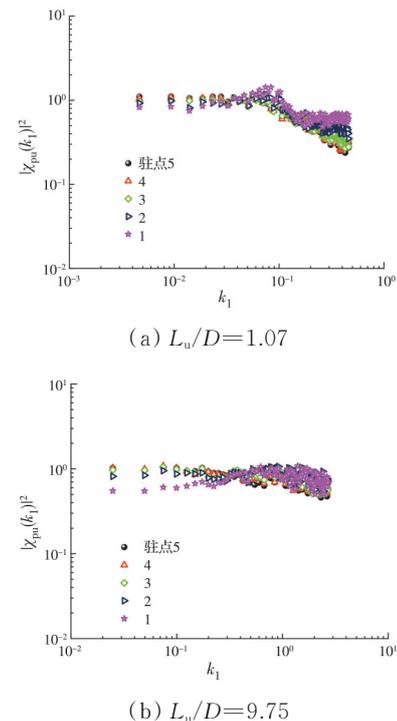


图 10 迎风面-波数压力导纳 $|\chi_{pu}(k_1)|^2$
Fig. 10 1D AAF of the pressure on the windward face

逐渐下降。与之相比,小尺度流场压力导纳在高频区有明显增加,表明高频区紊流三维效应和畸变效应的影响显著,而大尺度流场中压力导纳高频值接近“准定常理论”,表明紊流三维效应和畸变效应的影响可以忽略。

4 结论

从漩涡运动、能量的角度出发,基于三维谱张量理论和刚性节段模型测压试验,通过相关性分析和压力谱分析研究了矩形迎风面脉动压力空间分布特性,引入压力导纳的概念,从另一个角度探究了3种非定常效应对于迎风面脉动压力的影响机理,得到如下结论:

1)矩形迎风面一波数脉动压力谱,在靠近流动分离点时,低频区能量发生明显衰减且不依赖于 L_w/D ,而在高频区受 L_w/D 影响明显,当 L_w/D 较小时,非驻点区脉动压力在惯性子区的谱能量相比驻点区压力会增加,压力谱高频衰减速度减小,且在分离点附近接近纵向脉动风的衰减斜率($-5/3$)。当 L_w/D 较大时,迎风面脉动压力谱高频基本无变化且其高频斜率接近纵向脉动风谱。

2)阻塞效应导致分离点附近的脉动风压低频能量降低,该影响依赖于迎风面测点的空间位置,而受 L_w/D 影响不显著。

3)脉动压力谱高频能量的衰减是紊流的三维效应和紊流畸变共同作用的结果;在矩形迎风面各点压力的紊流畸变效应差别可以忽略,但紊流畸变效应受 L_w/D 影响显著,即, L_w/D 越小,畸变效应越显著;而紊流三维效应依赖于迎风面压力的空间位置,越靠近驻点区域,该影响越明显, L_w/D 越小,三维效应越显著,反之则趋向于“准定常理论”。

4)对于矩形迎风面驻点区,低频区可由准定常理论较好地描述,高频区由于紊流三维效应和畸变效应的影响,其非定常效应显著依赖于 L_w/D 。当 L_w/D 越大,紊流三维效应和畸变效应越小,当 L_w/D 趋于无穷大时,“准定常理论”可以适用。

参考文献

[1] DAVENPORT A G. The response of slender, line-like structures to a gusty wind [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1962, 23(3): 389-408.

[2] LI S P, LI M S. Spectral analysis and coherence of aerodynamic lift on rectangular cylinders in turbulent flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 830: 408-438.

[3] MASSARO M, GRAHAM J M R. The effect of three-dimensionality on the aerodynamic admittance of thin sections in free stream turbulence [J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 57: 81-90.

[4] YANG Y, LI M S, LIAO H L. Three-dimensional effects on the transfer function of a rectangular-section body in turbulent flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 872: 348-366.

[5] SANKARAN R, JANCAUSKAS E D. Measurements of cross-correlation in separated flows around bluff cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1/2/3): 279-288.

[6] 马存明. 流线箱型桥梁断面三维气动导纳研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

MA C M. 3D aerodynamic admittance research of streamlined box bridge decks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)

[7] LI M, LI M S, SU Y. Experimental determination of the two-dimensional aerodynamic admittance of typical bridge decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 193: 103975.

[8] LI M S, LI M, YANG Y. Strategy for the determination of unsteady aerodynamic forces on elongated bodies in grid-generated turbulent flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 110: 109939.

[9] BEARMAN P W. Some measurements of the distortion of turbulence approaching a two-dimensional bluff body [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 53(3): 451-467.

[10] BEARMAN P W. An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46(1): 177-198.

[11] HUNT J C R. A theory of turbulent flow round two-dimensional bluff bodies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, 61(4): 625-706.

[12] DURBIN P A, HUNT J C R. On surface pressure fluctuations beneath turbulent flow round bluff bodies [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 100(1): 161.

[13] KAWAI H. Pressure fluctuations on square prisms - applicability of strip and quasi-steady theories[M]//Wind Engineering 1983. Amsterdam: Elsevier, 1984: 197-208.

[14] 李少鹏. 矩形和流线型箱梁断面抖振力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

LI S P. Characteristics of buffeting forces on rectangular cylinder and streamlined box girder [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

[15] KIMURA K, FUJINO Y, NAKATO S, et al. Characteristics of buffeting forces on flat cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial

- Aerodynamics, 1997, 69/70/71: 365-374.
- [16] LAROSE G L, MANN J. Gust loading on streamlined bridge decks [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1998, 12(5): 511-536.
- [17] WU B, LI S P, CAO S Y, et al. Numerical investigation of the separated and reattaching flow over a 5:1 rectangular cylinder in streamwise sinusoidal flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 198: 104120.
- [18] WU B, LI S P, LI K, et al. Numerical and experimental studies on the aerodynamics of a 5:1 rectangular cylinder at angles of attack [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 199: 104097.
- [19] 杜树碧, 李明水, 杨雄伟. 积分尺度对矩形迎风面脉动风压特性的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(4): 769-776.
- DU S B, LI M S, YANG X W. Effect of turbulence integral scale on fluctuating wind pressure and its distribution characteristics on rectangular upwind surface [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(4): 769-776. (in Chinese)

(编辑 胡玲)