

圆角方形断面气动特性试验*

杨群^{1,2}, 刘庆宽^{2,3}, 孙亚松¹, 刘小兵^{2,3}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

(2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心 石家庄, 050043)

(3. 石家庄铁道大学风工程研究中心 石家庄, 050043)

摘要 通过刚性测压模型风洞试验,在均匀流场中测试了圆角率 $R/D=0.4$ 的方形断面在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 风向角、雷诺数 $Re=0.8\times 10^5\sim 3.8\times 10^5$ 时的气动特性。结果表明:试验雷诺数范围内,所有风向角下模型的阻力系数均值、升力系数均值、升力系数脉动值及斯特罗哈数基本上都受到雷诺数的影响。与其他风向角相比, $0^\circ\sim 17.5^\circ$ 风向角时,阻力系数均值和升力系数均值受雷诺数的影响更大; $7.5^\circ\sim 45^\circ$ 风向角时,升力系数脉动值受雷诺数的影响更大; $0^\circ\sim 12.5^\circ$ 风向角时,斯特罗哈数受雷诺数的影响更大。

关键词 圆角方形断面; 雷诺数; 风向角; 气动特性; 风洞试验

中图分类号 TU311.1; O355

引言

方形断面具有外形美观、设计简单及方便施工的特点,是工程结构中常见的结构形式之一。近年来,随着结构朝着长大化或高柔化方向发展,结构长细比增大、阻尼变小,使其对风变得越来越敏感。风对工程结构的作用与结构的外形有着密切的联系。对方形断面角部圆角化处理是减小结构风荷载或风致振动行之有效的气动措施之一^[1]。由于断面外形的差异,圆角方形断面的气动特性不同于标准方形或圆形断面,已有的研究多集中于方形和圆形断面的研究。研究表明:方形断面结构由于气流分离点固定,其气动特性受雷诺数的影响比较小,可以不考虑雷诺数的影响;圆形断面结构则由于表面流动的分离位置更加依赖于黏性力,因此结构气动特性存在明显的雷诺数效应^[2]。

目前,圆角方形断面气动特性的研究文献较少。Carassale 等^[3]测试了均匀流中圆角率分别为 0, 1/15 及 2/15 的方形断面在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 风向角下的表面风压及气动力。研究表明,在试验雷诺数范围 ($Re=1.7\times 10^4\sim 2.3\times 10^5$) 内,雷诺数对阻力均值、升力

均值、斯特罗哈数及升力脉动值影响不大,而风向角是模型绕流的一个重要因素。3 种断面均存在临界风向角,当风向角大于或小于临界风向角时,其绕流明显存在差别。Hinsberg 等^[4]研究了圆角率为 0.16 和 0.29 时方形断面在 $0^\circ, 22.5^\circ$ 及 45° 风向角时的雷诺数效应,其试验雷诺数范围为 $Re=8.0\times 10^4\sim 12\times 10^6$ 。结果表明:圆角率相同时,风向角大,临界雷诺数也大;风向角相同时,圆角率大,临界雷诺数小。王新荣等^[5]研究了 0° 风向角、圆角率为 0~40% 的方形断面气动特性随雷诺数 ($Re=1.0\times 10^5\sim 4.8\times 10^5$) 的变化规律。在试验雷诺数范围内,圆角率小于等于 0.15 的方形断面,其气动特性基本上不随雷诺数的变化而变化;当圆角率大于等于 0.2 时,其气动特性的雷诺数效应比较明显。文献^[6]通过风洞试验对比研究了均匀流和格栅紊流下,标准方形断面和圆角率为 1/6 的方形断面气动特性,试验雷诺数为 3.0×10^4 。研究表明,与标准方形断面相比,圆角方形断面阻力系数更小。

由以上文献可知:圆角率、风向角及雷诺数等参数对圆角方形断面的气动特性均有一定的影响;与标准方形断面相比,圆角方形断面尾流明显变窄,阻力明显减小。已有的关于圆角方形断面的气动特性

* 国家自然科学基金资助项目(51778381);河北省自然科学基金重点资助项目(E2018210044);河北省自然科学基金资助项目(E2018210105);河北省高等学校高层次人才资助项目(GCC2014046);河北省高等学校科学技术研究基金资助项目(ZD20191118);河北省大型基础设施防灾减灾协同创新中心资助项目
收稿日期:2019-02-27;修回日期:2019-06-08

的研究多是针对圆角率较小、仅 0° 风向角下及雷诺数不高的情况,对大圆角率、较高雷诺数下圆角方形断面气动特性随风向角的变化研究不够深入,因此有必要作进一步研究。此外,已有研究手段多为数值计算^[7-11]。鉴于此,笔者对角部圆角率为 0.4 的方形断面在全风向角下一定雷诺数范围内的气动特性进行了试验研究。

1 风洞试验

试验在石家庄铁道大学 STDU-1 风洞实验室高速试验段进行,其宽为 2.2 m,高为 2 m,长为 5.0 m。试验在低湍流度的均匀流场中进行,速度场不均匀性小于 0.5%,背景湍流度小于 0.5%。

1.1 试验模型

试验为刚性模型测压试验。模型尺寸及测点布置如图 1 所示,模型截面厚度 $D=120$ mm,长度 $L=1\ 700$ mm,两端设置直径 $D_e=600$ mm 的圆形端板,以保证风场的二维流动^[12]。模型圆角半径 $R=48$ mm,圆角率 $R/D=0.4$ 。在模型跨中位置沿周向布置一圈测点,共 56 个测点,其中截面直线段测点间距为 8 mm,圆弧段测点间距为 6.8 mm,测点具体编号如图 1 所示。模型采用 ABS 板制作并对表面进行喷漆处理。经表面粗糙度测量仪 SJ-410 对模型不同位置测试,其表面平均粗糙度在 1.3~2.9 μm 之间。为保证模型的强度和刚度,以通长的实心钢棒通过模型并支撑在风洞中央。试验照片如图 2 所示。

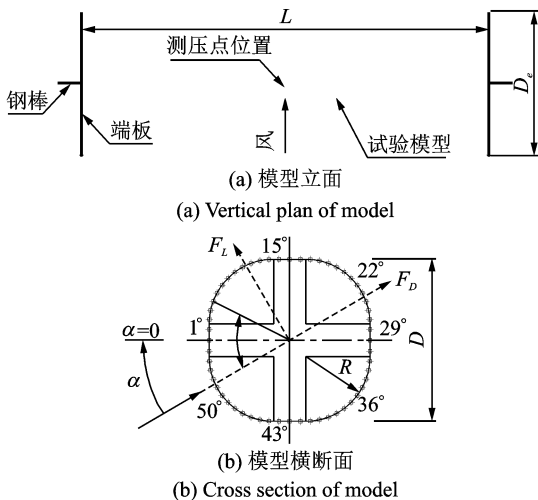


图 1 模型尺寸及测点布置

Fig. 1 Geometry parameters and tap arrangements of test model

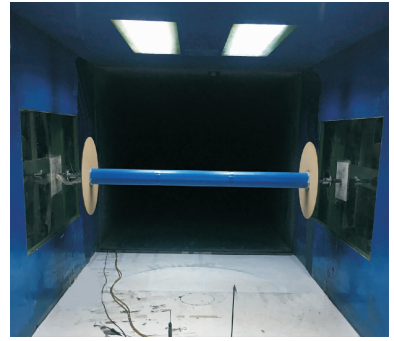


图 2 试验照片

Fig. 2 Test photograph

1.2 试验工况

由于模型断面的对称性,风向角 α 的变化范围为 0°~45°。其中:0°~25°时角度变化步长为 2.5°;25°~45°时角度变化步长为 5°。0°风向角时正对模型 1 号测点。测点风压通过电子压力扫描阀采集,采样频率为 330 Hz,采样时间为 30 s。

1.3 参数定义

雷诺数 $Re=UD/\nu$,为无量纲数。其中: U 为来流风速,由眼镜蛇测得,试验风速在约 10~50 m/s 范围内变化; D 为模型截面厚度; ν 为空气运动黏性系数,为黏度系数 μ 与空气密度 ρ 的比值。

空气密度 ρ 与黏度系数 μ 根据下式^[13-14]计算

$$\rho = \frac{0.003\ 484\ 3(p - 0.377\ 9\varphi p_s)}{T} \quad (1)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (2)$$

其中: p 为大气压强 (Pa); φ 为相对湿度 (%); p_s 为饱和水蒸气分压; $\mu_0=17.16 \times 10^{-6}$; T 为热力学温度 (K), $T=273.15+t$; t 为摄氏温度; $T_0=273.15\text{K}$; $C=110.6\text{K}$ 。

由以上计算公式得到试验雷诺数范围为 $Re=0.8 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 。

采用无量纲的气动力系数表述模型的风荷载,其计算公式为

$$\text{阻力系数 } C_D(t) = 2F_D(t) / \rho U^2 D \quad (3)$$

$$\text{升力系数 } C_L(t) = 2F_L(t) / \rho U^2 D \quad (4)$$

其中: $F_D(t)$ 和 $F_L(t)$ 为风轴坐标下的阻力时程和升力时程,其方向如图 1(b) 所示。

$F_D(t)$ 和 $F_L(t)$ 通过对测点代表的表面压力积分得到,计算公式为

$$F_D(t) = \sum_i P(i,t) \Delta S_i \cos \theta_i \quad (5)$$

$$F_L(t) = \sum_i P(i,t) \Delta S_i \sin(-\theta_i) \quad (6)$$

其中： $P(i, t)$ 为第*i*号测点压力瞬时值； ΔS_i 为第*i*号测点所代表的表面宽度； θ_i 为第*i*号测点法向沿逆时针方向与来流方向的夹角。

对阻力系数时程和升力系数时程取平均值，得到阻力系数均值 C_{D_mean} 和升力系数均值 C_{L_mean} ，取根方差得到阻力系数脉动值 C_{D_std} 和升力系数脉动值 C_{L_std} 。采用无量纲参数斯特罗哈数 St 描述绕流经过结构表面的尾流旋涡脱落现象，其定义为

$$St = fD/U \quad (7)$$

其中： f 为旋涡脱落频率。

2 试验结果分析

在雷诺数 $Re=0.8 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 范围内，对 $0^\circ \sim 45^\circ$ 风向角下，圆角率 $R/D=0.4$ 的圆角方形断面进行了测压试验，得到了阻力系数均值、升力系数均值、升力系数脉动值及斯特罗哈数的变化规律。

2.1 阻力系数均值

图3为模型阻力系数均值随雷诺数的变化规律。由图可知，在试验雷诺数范围内，模型在各个风向角下均表现出了随雷诺数变化而变化的特性，整体上表现为随雷诺数的增大而减小的规律，且基本上是风向角越小，变化越明显。因此，试验中风向角小于 25° 时，每 2.5° 变化一次角度；风向角大于 25° 时，则每 5° 变化一次角度。

在 0° 风向角， $Re \leq 2.0 \times 10^5$ 时，模型阻力系数均值变化不大，其变化范围为 $1.0 \sim 1.1$ ，随后开始下降。当 $Re=3.2 \times 10^5$ 时，阻力系数降至约 0.4 ，之后基本不再变化。在 2.5° 风向角， $Re \leq 1.8 \times 10^5$ 时，阻力系数均值在 $1.05 \sim 0.95$ 范围内变化。在 $1.8 \times 10^5 \leq Re \leq 3.0 \times 10^5$ 时，阻力系数均值出现了明显的下降，其值由 0.95 降至 0.4 左右，之后阻力系数均值变化不大。在 5° 风向角， $Re \leq 1.0 \times 10^5$ 时，阻力系数均值约为 0.96 。当 $Re=1.2 \times 10^5$ 突降至 0.65 ，之后一定雷诺数范围内，阻力系数均值变化很小。当 $3.2 \times 10^5 \leq Re \leq 3.8 \times 10^5$ 时，阻力系数均值又随着雷诺数的增大逐渐减小至 0.42 左右。在 7.5° 风向角， $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$ 时，阻力系数均值随雷诺数的增大由 1.14 逐渐减小为 0.70 左右。当 $1.6 \times 10^5 \leq Re \leq 3.6 \times 10^5$ 时，阻力系数均值随雷诺数的增大变化不大，仅在 $Re=3.0 \times 10^5$ 时，阻力系数均值稍有下降。当 $Re=3.8 \times 10^5$ 时，阻力系数出现较大的降幅，均值降至 0.45 左右。在 10° 风向角， $Re \leq 2.0 \times 10^5$ 时，阻力系数均值表现为

随雷诺数的增大逐渐减小。在 $2.0 \times 10^5 \leq Re \leq 3.6 \times 10^5$ 时，阻力系数变化幅度不大，而 $Re=3.8 \times 10^5$ 时，阻力系数均值出现较大的下降。在 12.5° 风向角时，在试验雷诺数范围内除几个小范围内变化不大外，阻力系数均值变化趋势为随雷诺数的增大而逐渐减小，其值从 1.33 减小至 0.50 左右。在 15° 风向角， $1.6 \times 10^5 \leq Re \leq 3.6 \times 10^5$ 时，模型阻力系数均值随雷诺数的增大而缓慢增大，之后则表现为随雷诺数的增大而逐渐减小，其值从 1.43 左右降至约 0.53 。在 $17.5^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时，其表现均为当 $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.2 \times 10^5$ 时，模型阻力系数均值随雷诺数变化不明显，之后表现为随雷诺数的增大逐渐减小，其数值下降幅度约为 $0.25 \sim 0.60$ 。

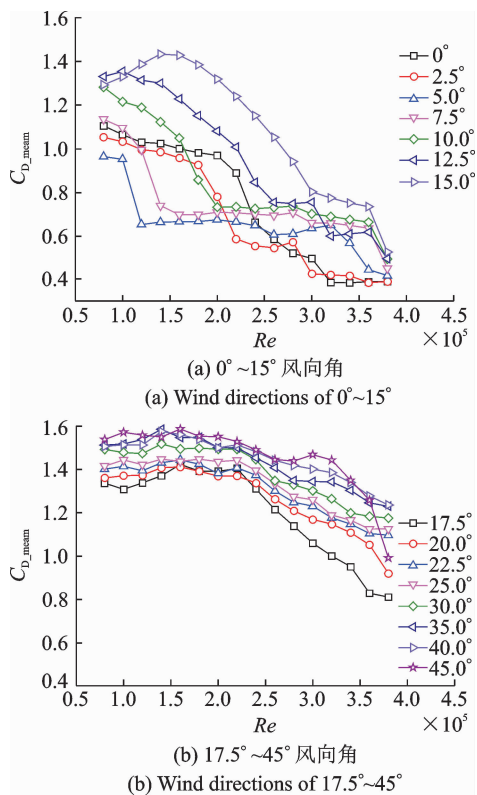


图3 不同风向角下阻力系数均值随雷诺数的变化
Fig. 3 Variation of mean drag coefficient with Reynolds number under different wind directions

为了更好地说明阻力系数均值随雷诺数变化的特点，图4~6为 0° 、 10° 及 45° 风向角在典型雷诺数时模型表面风压分布情况（图中数据为相应雷诺数大小）。由图可见，在来流作用下，模型迎风面为正压，侧面及背风面均为负压。无论模型与相对来流方向是否对称，随着雷诺数的增加，迎风面风压随雷诺数变化均不大，背风面则随雷诺数的增大明显减小。当雷诺数达到一定值时，模型一侧或两侧前缘风压值显著增大，因此模型阻力系数均值出现明显

下降。

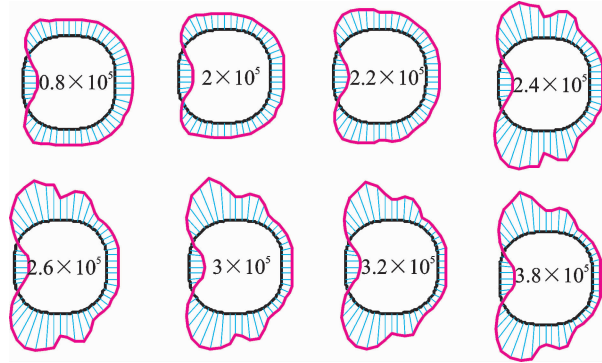


图 4 0°风向角典型雷诺数时模型风压分布

Fig. 4 Model wind pressure distribution in representative Reynolds numbers under 0° wind direction

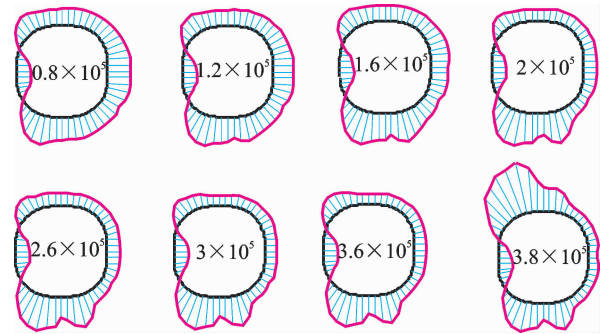


图 5 10°风向角典型雷诺数时模型风压分布

Fig. 5 Model wind pressure distribution in representative Reynolds numbers under 10° wind direction

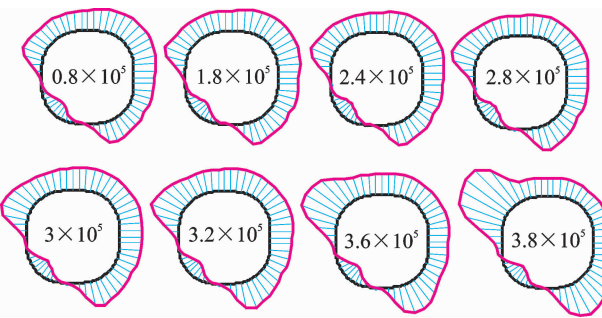


图 6 45°风向角典型雷诺数时模型风压分布

Fig. 6 Model wind pressure distribution in representative Reynolds numbers under 45° wind direction

由图 3 可得,当 $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.0 \times 10^5$,风向角小于 5° 时,相同雷诺数下随着风向角的增大,阻力系数均值变小;而当风向角大于 5° 时,则同雷诺数条件下阻力系数均值基本上随风向角的增大而增大,即阻力系数均值在 5° 风向角达到极小值, 5° 风向角为 $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.0 \times 10^5$ 时的临界风向角。当 $2.2 \times 10^5 \leq Re \leq 3.8 \times 10^5$ 时,临界风向角为 2.5° ,虽然 0° 风向角的阻力系数均值为最小值,但其与 2.5° 风向角的阻力系数也十分接近。

2.2 升力系数均值

图 7 为升力系数均值随雷诺数变化曲线。由图可见,不同风向角时模型的升力系数均值一定程度表现出随雷诺数变化的特性。

在 0° 风向角, $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 1.8 \times 10^5$ 时,升力系数均值基本上为 0,但在 $2.0 \times 10^5 \leq Re \leq 2.6 \times 10^5$ 时出现了负升力,最大负值为 -0.13 左右,之后随雷诺数的增大,升力系数均值重新降为 0 左右。在 2.5° 风向角, $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$ 时,升力系数均值稳定在 -0.06 左右,之后随着雷诺数的增大,出现很大的负升力, $Re = 2.2 \times 10^5$ 时最大负升力系数均值为 -0.85 。当 $3.0 \times 10^5 \leq Re \leq 3.8 \times 10^5$ 时,升力系数均值又升至 $0.04 \sim 0.14$ 左右。在 5° 风向角, $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 1.0 \times 10^5$ 时,升力系数均值约为 -0.14 , $Re = 1.2 \times 10^5$ 时突降至约 -0.95 。 $Re = 1.2 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ 时,升力变化较平缓,之后随着雷诺数的增加,升力系数均值迅速增加,当 $Re = 3.6 \times 10^5$ 时,其值达 0.18 左右, $Re = 3.8 \times 10^5$ 时,升力系数均值约为 0.20 。在 $7.5^\circ \sim 17.5^\circ$ 风向角时,模型的升力系数均值随雷诺数的变化规律类似,先随着雷诺数的增大而逐渐减小,当达到某雷诺数时,升力系数均值迅速增大,当 $Re = 3.8 \times 10^5$ 时升力系数均值均为正值。模型在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时,升力系数均值随雷诺数的变化趋势也基本一致。当雷诺数 $Re \leq 2.4 \times 10^5$ 时,升力系数均值都在 0 值附近,之后随着雷诺数的增加,升力增大。在 20° 风向角, $Re = 3.8 \times 10^5$ 时,升力系数均值达 0.76 左右。

模型在 0° 和 45° 风向角时为完全对称结构,但其升力系数均值却非完全为 0 值。由图 4 和图 6 的风压分布图可见, 0° 和 45° 风向角分别在 $Re = 2.2 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$ 和 $Re = 3.0 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时,模型两侧面前缘处风压显著增大,且两侧增大程度不一致,以致升力系数均值偏离 0 值。如图 5 所示,当模型与来流方向非对称布置时,以 10° 风向角模型风压分布为例,在来流作用下模型风压分布均明显呈非对称分布,其整体表现为模型侧面下缘风压绝对值大,侧面上缘风压绝对值小,雷诺数不大时,两侧面风压绝对值相差不大,风压分布相对比较均匀;当雷诺数达到某一数值时,表面分离流在模型侧面下缘形成了较大的分离泡和旋涡,导致模型侧面下缘前后端风压绝对值均增大很多,且前端增大程度比后端大。此外,模型侧面上缘风压绝对值减小,因此模型升力系数均值出现了较大的负值。随着雷诺

数进一步增大,模型侧面上缘前后端风压绝对值也出现突然剧增现象,且侧面上缘前端风压绝对值明显超过了侧面下缘前端风压绝对值,此时模型升力系数均值由负值变为正值。

对升力系数均值,其临界风向角与阻力系数均值不完全相同。图7为不同风向角下升力系数均值随雷诺数的变化曲线。由图7可知,试验雷诺数范围内除 $Re=3.8 \times 10^5$ 时升力系数均值均出现在 5° 或 7.5° 风向角,其中 $Re=0.8 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^5$ 及 $Re=3.2 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$ 时临界风向角为 7.5° , $Re=1.2 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ 时临界风向角为 5° ,且两风向角升力系数均值基本上都十分接近。在 $Re=3.8 \times 10^5$, 0° 风向角时,升力系数均值最小。

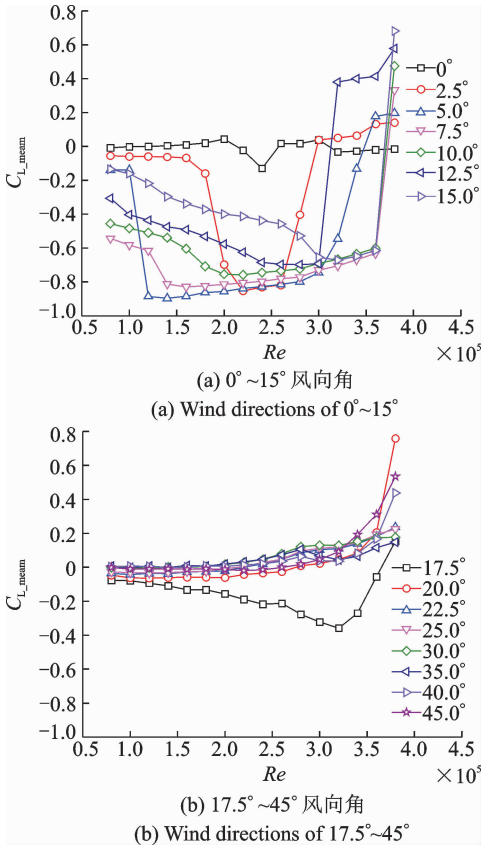


图7 不同风向角下升力系数均值随雷诺数的变化

Fig.7 Variation of mean lift coefficient with Reynolds number under different wind direction

2.3 升力系数脉动值

图8为升力系数脉动值随雷诺数变化曲线,其体现了升力系数变化波动程度。由图可知,试验雷诺数范围内,升力系数脉动值整体变化规律为随着雷诺数的增大而减小、随着风向角的增大而增大。

在 0° 风向角, $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 2.0 \times 10^5$ 时,升力系数脉动值随雷诺数的增大,逐渐由0.35减小为

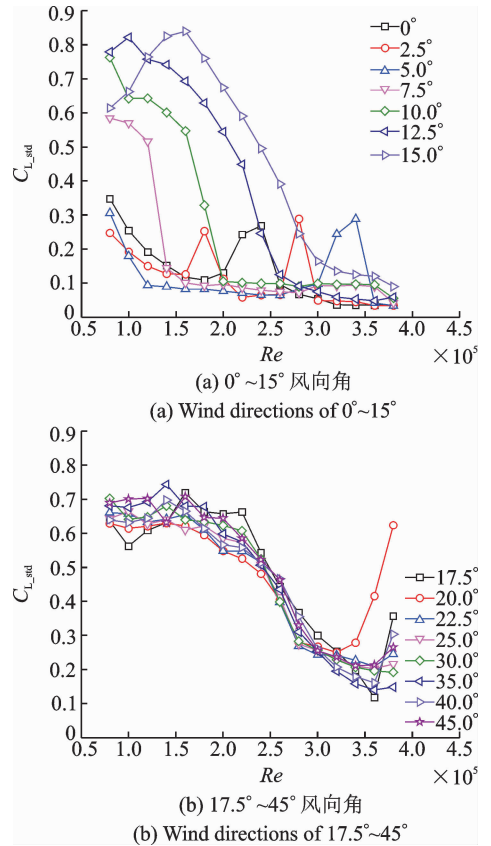


图8 不同风向角下升力系数脉动值随雷诺数的变化
Fig.8 Variation of fluctuating value of lift coefficient with Reynolds number under different wind direction

0.11左右,当 $2.2 \times 10^5 \leq Re \leq 2.4 \times 10^5$ 时又增加至0.27,之后随着雷诺数的增加,逐渐减小为0.04左右。在 2.5° 及 5° 风向角时,升力系数脉动值整体趋势都是随着雷诺数的增加而减小,但在个别雷诺数时出现了跳跃现象。在 $7.5^\circ \sim 12.5^\circ$ 风向角时,升力系数脉动值变化规律相似,先随着雷诺数的增加而迅速减小,当达到一定雷诺数时其变化趋于稳定。在 15° 风向角时,升力系数脉动值的变化表现为先随着雷诺数的增大而增大,其最大值达0.84,当 $Re \geq 1.6 \times 10^5$ 后又随着雷诺数的增大而逐渐减小。当风向角大于 17.5° 以后,升力系数脉动值在雷诺数较小时表现为缓慢减小, $Re \geq 2.2 \times 10^5$ 之后减小速度加剧。在 $17.5^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 风向角, $Re=3.8 \times 10^5$ 时,出现了向上跳跃的现象。

图8为不同风向角下升力系数脉动值随雷诺数的变化曲线。由图8可知,升力系数脉动值临界风向角在不同雷诺数时也不尽相同。当 $Re=0.8 \times 10^5$ 时, 2.5° 风向角为极小值。当 $1.0 \times 10^5 \leq Re \leq 2.6 \times 10^5$ 时, 5° 风向角为极小值。当 $2.8 \times 10^5 \leq Re \leq 3.8 \times 10^5$ 时,则 $0^\circ \sim 7.5^\circ$ 风向角的升力系数脉动值多数与雷诺数值比较接近。

2.4 升力系数功率谱与斯特罗哈数

2.4.1 升力系数功率谱

对升力系数时程进行傅里叶变化后的结果表明:试验雷诺数范围内,不同风向角升力系数功率谱(无量纲化)均明显受雷诺数的影响。雷诺数对升力系数功率谱的影响表现为以下几种情况。

1) 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 风向角时,以图 9 所示的 0° 风向角不同雷诺数下升力系数功率谱为例,试验雷诺数范围内升力系数功率谱曲线在低雷诺数时呈现出十分明显的峰值;随着雷诺数增大,升力系数功率谱曲线的峰值明显减小,但峰值对应的折算频率未发生大的变动;当雷诺数继续增大到某一数值时,卓越频率消失;雷诺数进一步增大,升力系数功率谱曲线上重新出现了新的峰值,与低雷诺数时相比,功率谱曲线峰值显著增大,对应的折算频率出现了明显的跳跃;此后,在雷诺数的增加过程中,峰值频率基本不变。

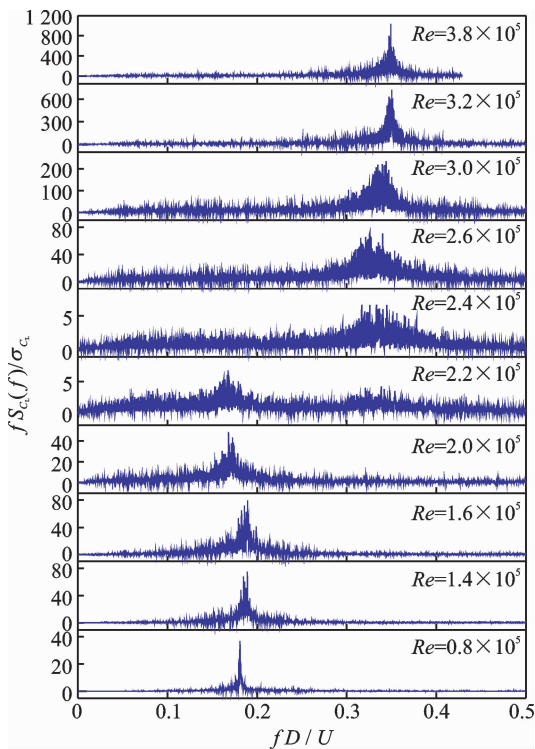


图 9 0° 风向角不同雷诺数下升力系数功率谱曲线

Fig. 9 Amplitude Spectrum of lift coefficient under 0° wind direction in different Reynolds numbers

2) 在 $17.5^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时,以图 10 所示的 45° 风向角不同雷诺数下升力系数功率谱为例,在试验雷诺数范围内,雷诺数较低时有明显的卓越频率,且其峰值对应的卓越频率基本上不变。雷诺数较高时卓越频率不明显。

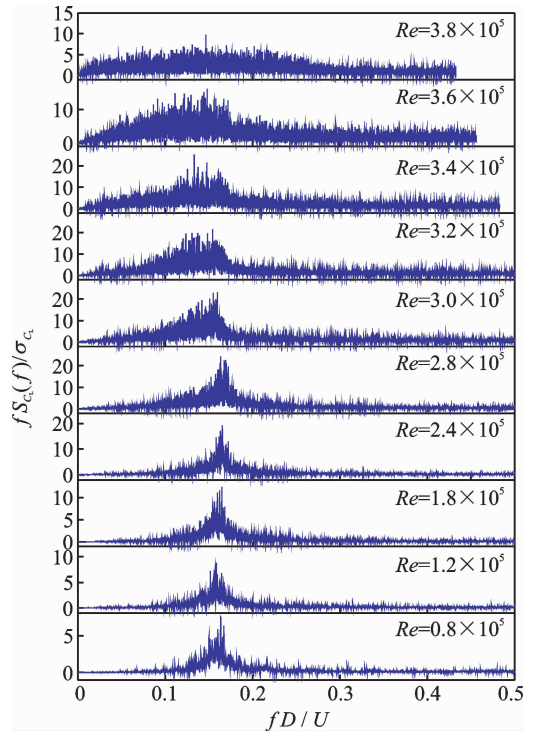


图 10 45° 风向角不同雷诺数下升力系数功率谱曲线

Fig. 10 Amplitude Spectrum of lift coefficient under 45° wind direction in different Reynolds numbers

2.4.2 斯特罗哈数

模型的斯特罗哈数为模型尾流旋涡脱落的卓越频率,此处为模型升力系数功率谱曲线峰值对应的折算频率。图 11 为不同风向角下斯特罗哈数随雷诺数的变化曲线。图 11 (a) 为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 风向角时斯特罗哈数随雷诺数变化曲线。由图可知,在 0° 风向角,雷诺数 $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数基本上不随着雷诺数而变化,其值约为 1.85。当 $Re = 2.0 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数下降 0.02 左右,之后未出现明显的峰值。当 $Re = 2.6 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数突然跳跃至 0.32 左右,且当 $2.4 \times 10^5 < Re < 3.2 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数随雷诺数增加稍增大,增大约 0.03,之后基本不随雷诺数变化。在 2.5° 风向角, $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数约为 0.18;当 $Re = 2.0 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 时未出现明显的峰值,当 $3.0 \times 10^5 < Re < 3.8 \times 10^5$ 时斯特罗哈数突变至约为 0.35。在 5° 风向角, $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数约为 0.18~0.20。当 $Re = 1.2 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数跳跃至 0.26 左右, $Re = 2.6 \times 10^5 \sim 3.4 \times 10^5$ 时未出现明显的峰值, $Re = 3.6 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时斯特罗哈数由跳跃至 0.34 左右。在 7.5° 风向角时,斯特罗哈数随雷诺数的变化与 5° 风向角类似。 $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 1.2 \times$

10^5 时,斯特罗哈数约为 0.19。 $Re = 1.4 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数随雷诺数的增加逐级增加至 0.25 左右,之后一段雷诺数范围未出现明显的峰值,而 $Re = 3.8 \times 10^5$ 时又出现了明显的漩涡脱落,此时对应漩涡脱落频率跃升至 0.33 左右。在 10° 风向角, $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数约为 0.18 左右, $Re = 2.0 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 时上跃至 0.23 左右,之后又将至 0.18 左右, $Re = 3.8 \times 10^5$ 时斯特罗哈数由 0.18 突变为 0.32。在 12.5° 风向角, $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 2.8 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数随雷诺数的增加由 0.17 上增加至 0.22, $Re = 3.0 \times 10^5$ 时又降至 0.19, $Re = 3.2 \times 10^5$ 时又向上跳跃至 0.39,之后随着雷诺数增加逐渐下降, $Re = 3.8 \times 10^5$ 时斯特罗哈数约为 0.32。在 15° 风向角, $Re = 0.8 \times 10^5 \sim 3.2 \times 10^5$ 时,斯特罗哈数随雷诺数的增加变化不大,其值在 0.16~0.18 之间,当 $Re = 3.4 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时未出现明显的漩涡脱落。

图 11(b) 为 $17.5^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时斯特罗哈数随雷诺数变化曲线。由图可见,斯特罗哈数整体上随着雷诺数的增加变化不明显,其值基本上在 0.17 上下变动。在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 风向角, $Re = 3.2 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时,没有出现明显的漩涡脱落。

斯特罗哈数与模型表面风压分布状态改变有关。结合图 4~6 及图 11 发现,斯特罗哈数产生跳跃时通常与模型测点风压分布状态发生改变时对应。例如,在 0° 风向角, $Re = 2.2 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$ 时、在 10° 风向角, $Re = 3.6 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时及在 45° 风向角, $Re = 3.2 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 时,此时模型一侧出现大的分离泡,使模型的漩涡脱落卓越频率发生明显的跳跃或消失。

3 结论

1) 阻力系数均值基本上随着风向角的增大而增大,随着雷诺数的增大而减小。风向角越小,变化越明显,在 $0^\circ \sim 17.5^\circ$ 风向角时,随着雷诺数的增大,阻力系数均值产生了明显的跳跃现象。

2) 不同风向角时,升力系数均值随着雷诺数的变化而变化,其中 $0^\circ \sim 17.5^\circ$ 风向角时变化最显著,其产生了明显的跳跃现象。升力系数均值最大值对应的风向角基本为 5° 或 7.5° 。

3) 升力系数脉动值整体上随着雷诺数的增加而减小。在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 风向角时,升力系数脉动值受雷

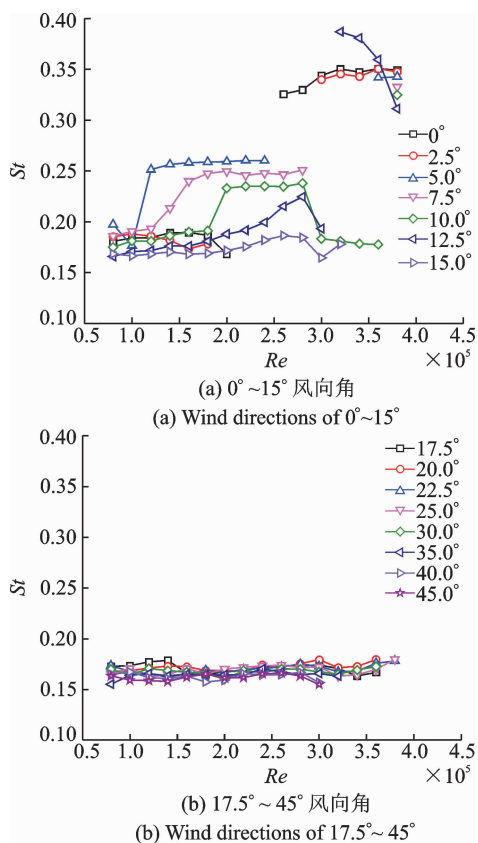


图 11 不同风向角下斯特罗哈数随雷诺数的变化
Fig. 11 Variation of Strouhal number with Reynolds number under different wind direction

诺数的影响较小;在 $7.5^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时,升力系数脉动值受雷诺数的影响较明显。

4) $0^\circ \sim 12.5^\circ$ 风向角时,斯特罗哈数随着雷诺数的增加变化十分明显,且发生了明显的跳跃现象;在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 风向角时,斯特罗哈数随着雷诺数的增加变化不明显。

参 考 文 献

- [1] LI Y, TIAN X, TEE K F, et al. Aerodynamic treatments for reduction of wind loads on high-rise buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 172: 107-115.
- [2] 顾明,王新荣. 工程结构雷诺数效应的研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 961-969. GU Ming, WANG Xinrong. Research progress of Reynolds number effect of engineering structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(7): 961-969. (in Chinese)
- [3] CARASSALE L, FREDA A, MARRÈ-BRUNENGHI M. Experimental investigation on the aerodynamic be-

- havior of square cylinders with rounded corners[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 44: 195-204.
- [4] Van HINSBERG N P, SCHEWE G, JACOBS M. Experiments on the aerodynamic behaviour of square cylinders with rounded corners at Reynolds numbers up to 12 million[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 74: 214-233.
- [5] 王新荣,顾明. 角部处理的二维方柱风压分布特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 79-88.
WANG Xinrong, GU Ming. Experimental study on wind pressure distributions of 2-D square prisms with various corner treatments[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 79-88. (in Chinese)
- [6] TAMURA T, MIYAGI T. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83:135-145.
- [7] ZHANG W, SAMTANEY R. Low re flow past an isolated cylinder with rounded corners[J]. Computers & Fluids, 2016, 136: 384-401.
- [8] BERNARDINI E, SPENCE S M J, WEI D, et al. Aerodynamic shape optimization of civil structures: a CFD-enabled Kriging-based approach[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 144: 154-164.
- [9] TAMURA T, MIYAGI T, KITAGISHI T. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74/76): 531-542.
- [10] TAMURA T, MIYAGI T. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83: 135-145.
- [11] STANDARD E. Eurocode 1 : actions on structures part 1-4 : general actions-wind actions[S]. [S. l.]: European Committee for Standardization, 2004.
- [12] 郑云飞,刘庆宽,马文勇,等. 端板对二维矩形风洞试验模型气动特性的影响[J]. 实验流体力学, 2017, 31(3): 38-45.
ZHENG Yunfei, LIU Qingkuan, MA Wenyong, et al. Effects of end plates on aerodynamic force of rectangular prisms in wind tunnel test[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(3): 38-45. (in Chinese)
- [13] 万勇,陈汉松,谢小芳,等. 湿空气典型计算公式的推导及应用[J]. 工业计量, 2016(S2): 69-73.
WAN Yong, CHEN Hansong, XIE Xiaofang, et al. Derivation and application of typical formula for wet air calculation [J]. Industrial Metrology, 2016(S2): 67-73. (in Chinese)
- [14] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 11-13.



第一作者简介:杨群,女,1981年11月生,博士生、讲师。主要研究方向为工程结构的风荷载与风致振动。曾发表《并列双箱梁的气动干扰效应对阻力系数的影响》(《中国公路学报》2017年第30卷第11期)等论文。

E-mail: quny123@126.com

通信作者简介:刘庆宽,男,1971年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为工程结构的风荷载与风致振动。

E-mail: lqk@stdu.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 30 元,全年 180 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail: qchen@nuaa.edu.cn

网址: http://zdcn.nuaa.edu.cn

