

雷诺数对圆柱气动力和流场影响的试验研究

刘庆宽^{1,2,*}, 邵奇³, 郑云飞³, 李聪辉³, 马文勇^{1,2}, 刘小兵^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所, 石家庄 050043; 2. 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘要:通过刚性模型测压风洞试验,研究了圆柱的气动阻力、气动升力系数和风压系数随雷诺数的变化规律,从流场分布的角度分析了气动力变化的原因,并研究了雷诺数影响下的流场在圆柱轴向的相关性。结果表明:在亚临界雷诺数区域,在时间平均上流场沿模型两侧呈对称分布,雷诺数对平均阻力系数和流场影响较小,平均升力系数基本为零。在临界雷诺数区域,随着特定区域大负压区的出现,流场不再对称,出现不容忽视的平均升力和脉动升力。在超临界雷诺数区域,随着对称侧大负压区的出现,流场恢复对称状态,平均升力基本消失。雷诺数对流场的轴向相关性有显著的影响。在雷诺数较低时(亚临界区域),卡门涡在轴向上的尺度相对较大,而随着雷诺数的提高,该尺度逐渐减小,各断面流场的相关性降低。

关键词:圆柱体;气动力;流场分布;雷诺数;轴向相关性

中图分类号:U441⁺.3 **文献标识码:**A

Experimental study on Reynolds number effect on aerodynamic pressure and forces of cylinder

Liu Qingkuan^{1,2,*}, Shao Qi³, Zheng Yunfei³, Li Conghui³, Ma Wenyong^{1,2}, Liu Xiaobing^{1,2}

(1. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Hebei Province Key Lab of Structural Health Monitoring and Control, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: By wind tunnel tests, Reynolds number effect on drag force coefficient, lift force coefficient and wind pressure coefficient of cylinder were measured, the mechanism of the aerodynamic force variation from the point of view of the flow field distribution was analyzed, and the correlation of the flow field in the cylinder axis direction under the Reynolds number effect was studied. Results show that in the subcritical Reynolds number regime, the time averaged flow field around the cylinder model is symmetric, the Reynolds number has little influence on the averaged drag force coefficient and flow field, and the averaged lift force is around zero. In the critical Reynolds number regime, with the appearance of large amplitude negative pressure in certain areas, flow field becomes asymmetric, and the averaged lift force as well as fluctuation lift force appears. In the supercritical Reynolds number regime, with the appearance of large amplitude negative pressure on the two sides, flow field becomes to symmetric again, and the averaged lift force disappears. Reynolds number has obvious effect on the flow field correlation along the cylinder axis. In the subcritical Reynolds number regime, the scale of the Karman vortex in the cylinder axis direction is relatively large, while the scale becomes small with the increase of Reynolds number.

Keywords: cylinder; aerodynamic force; flow field distribution; Reynolds number; correlation in axis direction

收稿日期: 2015-08-28; 修订日期: 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378323, 51108280, 51308359); 河北省杰出青年科学基金(E2014210138)

* 通信作者 E-mail: lqk@stdu.edu.cn

引用格式: Liu Q K, Shao Q, Zheng Y F, et al. Experimental study on Reynolds number effect on aerodynamic pressure and forces of cylinder. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(4): 7-13. 刘庆宽, 邵奇, 郑云飞, 等. 雷诺数对圆柱气动力和流场影响的试验研究. *实验流体力学*, 2016, 30(4): 7-13.

0 引 言

随着斜拉桥设计和施工工艺的发展,其跨径逐渐增大,斜拉索上的风荷载占全桥风荷载的比例也随之增大。以苏通长江大桥为例,在横向风的作用下,斜拉索上的风荷载对主梁位移和内力的贡献占整个风荷载的 60%~70%^[1]。因此,准确掌握斜拉索上的风荷载,对于斜拉桥的设计具有重要意义。同时,由于斜拉索长细比大,柔度大,阻尼小,容易发生风致振动,尤其是风雨振因其振幅大、危害严重等,广受设计和研究人员的重视。

作为斜拉桥主要受力构件的斜拉索为典型的圆形断面,作为基本的结构断面形状,针对其气动特性研究者进行了较为广泛研究。V. Karmen、Taylor、Wieselsbeger、Fage、Warsap 等人先后进行了试验研究,Roshko 发现在超临界区边界层内出现分离气泡并伴随湍流再附^[2];Bearman 发现在亚临界与超临界区之间存在单侧分离气泡,结构出现升力^[3]。

上述研究表明,圆形断面的气动力与雷诺数、来流湍流度及结构表面的粗糙度密切相关。因为大跨径斜拉桥多建在近海地区,经常受到台风的侵扰,基本风速较大,同时由于通航的要求,其主梁和斜拉索等构件离水面较高,加上江面开阔(地表粗糙度低),这些因素使得其设计基准风速较高,斜拉索的雷诺数数值也较大,从低风速到设计基准风速,对应的雷诺数经常跨越亚临界、临界和超临界雷诺数。如苏通长江大桥 A1 索的索梁端和索塔端静阵风风速对应的雷诺数分别为 4.56×10^5 和 5.20×10^5 ^[4-5]。处在不同雷诺数区的气动力和流场都有明显的不同。

因此无论是斜拉索气动力计算,还是风致振动的机理研究,雷诺数效应引起的特殊的气动力及流场的变化、流场沿结构轴向相关性的变化等问题是需要考虑的重要因素^[6-10],有必要进行专门的研究。

本研究将斜拉索简化为二维圆柱结构,通过风洞试验研究了气动力和流场随雷诺数的变化,并研究了不同雷诺数下流场沿模型轴向分布相关性的问题,为气动力计算和机理分析提供依据和参考。

1 风洞试验介绍

试验在石家庄铁道大学风工程研究中心的 STU-1 风洞内进行。该风洞为串联双试验段回/直流边界层风洞,其低速试验段转盘中心处宽 4.4m,高 3.0m,长 24.0m,最大风速大于 30.0m/s;高速试验段宽 2.2m,高 2.0m,长 5.0m,最大风速大于 80.0m/s^[11]。风洞结

构如图 1 所示。

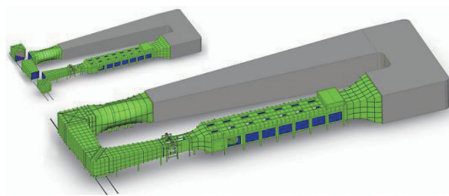
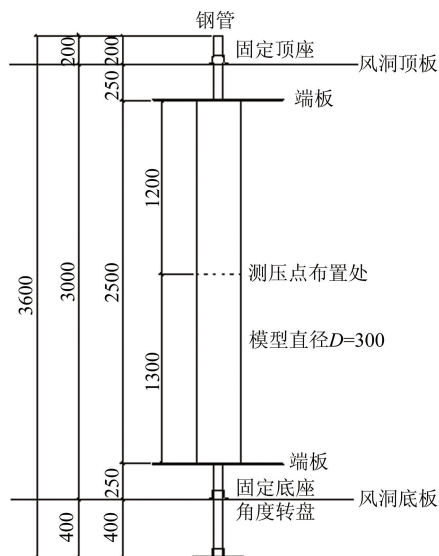


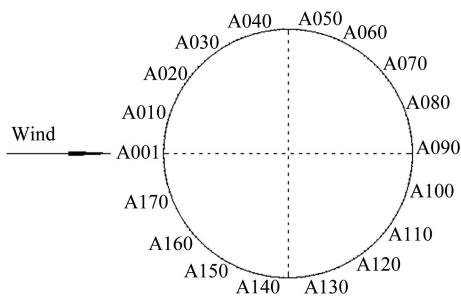
图 1 风洞结构示意图
Fig. 1 Sketch of wind tunnel

本研究共进行了 2 种试验,第 1 种试验在低速试验段中进行,通过表面测压研究雷诺数对斜拉索气动力和流场的影响,风场为均匀低湍流度风场(湍流度 $I \leq 0.4\%$),模型安装及测点布置如图 2 所示,模型两端与风洞顶部和底部固定连接,为了保证二维流动,在模型两端各安装 $\Phi 900\text{mm}$ 的端板。在模型圆周方向布置了一圈 180 个测压孔,其中编号 A001 的测压孔正对来流方向,试验工况如表 1 所示。

第 2 种试验在高速试验段中进行,研究轴向流场的相关性问题,风场为均匀低湍流度风场(湍流度 $I \leq 0.2\%$),模型安装及测点布置示意图如图 3 所示。



(a) 模型安装图(单位:mm)

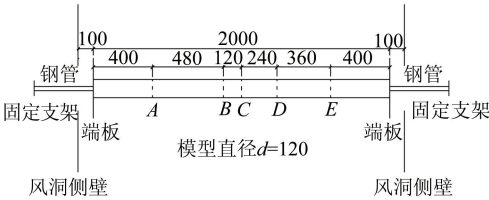


(b) 模型测点布置图

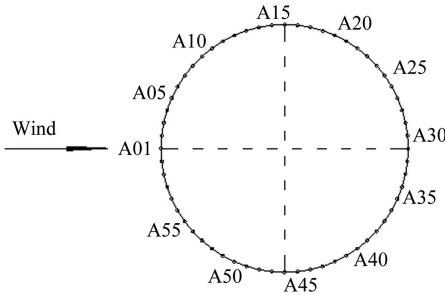
图 2 低速试验段模型安装及测点布置图
Fig. 2 Sketch of installation and pressure tap arrangement of test model in low speed test section

表 1 低速试验段模型试验工况

Table 1 Test cases in low speed test section		
风速范围/(m·s ⁻¹)	风速步长/(m·s ⁻¹)	Re/10 ⁴
5~13	2.0	9.3~24.3
13~21	0.3/0.4	24.3~39.2



(a) 模型安装图 (单位:mm)



(b) 模型测点布置图

图 3 高速试验段模型安装及测点布置图

Fig. 3 Sketch of installation and pressure tap arrangement of test model in high speed test section

该工况共布置了 A、B、C、D、E 共 5 圈测点,共有 8 种轴向间距,将测点轴向间距与模型直径 d ($d=120\text{mm}$) 的比值定义为无量纲轴向间距 s ,选取 7 个无量纲轴向间距 ($s=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) 进行相关性研究。同样每圈共布置 60 个测压孔,其中编号 A01 的测压孔正对来流方向,试验工况如表 2 所示。

表 2 高速试验段模型试验工况

Table 2 Test cases in high speed test section		
风速范围/(m·s ⁻¹)	风速步长/(m·s ⁻¹)	Re/10 ⁴
13.7~40.9	2.7	10~30
40.9~43.7	1.3	30~32

压力测试采用 PSI 电子扫描阀进行,压力信号采用文献[12]的方法进行了修正。以减小模型的阻塞度和获得较大雷诺数为原则,选取了低速试验段和高速试验段的模型直径,两者的阻塞度分别为 6.8% 和 6.0%,通过 Two-step Maskell 的方法^[13-14]对气动力进行了相应的阻塞度修正。

气动力的计算采用风轴坐标系,计算简图如图 4 所示,积分方法如公式(1)和(2)所示。

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^{180} p_i L_i \cos \theta_i}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} = \sum_{i=1}^{180} \pi C_{p_i} \cos \theta_i / 180 \quad (1)$$

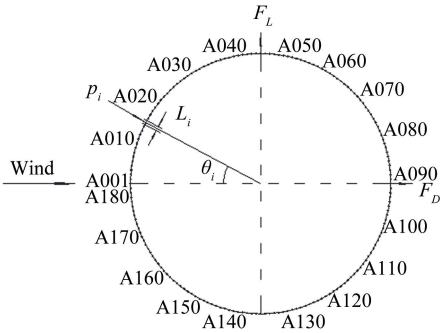


图 4 模型气动力计算图

Fig. 4 Aerodynamic force calculation diagram of test model

$$C_L = \frac{-\sum_{i=1}^{180} p_i L_i \sin \theta_i}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} = -\sum_{i=1}^{180} \pi C_{p_i} \sin \theta_i / 180 \quad (2)$$

式中: C_D 为平均阻力系数; C_L 为平均升力系数; p_i 为第 i 个测压点的动压; L_i 为第 i 个测压点的弧长; θ_i 为第 i 个测压点与束流方向的夹角; C_{p_i} 为第 i 个测压点的平均风压系数。

值得说明的是,因为是通过测压孔测试模型表面法向压力,并通过积分得到的阻力和升力,空气与模型表面的摩擦力无法计入其内,所以理论上测试结果应比实际值略小。

2 雷诺数对气动力的影响

模型的气动阻力系数和气动升力系数随雷诺数的变化情况如图 5 所示。

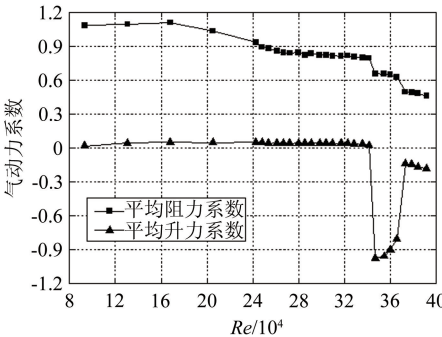


图 5 气动力系数随雷诺数的变化曲线

Fig. 5 Curve of aerodynamic force coefficient with Re

从图 5 中可以看出,在 $Re < 3.42 \times 10^5$ 的范围内,平均阻力系数缓慢减小,平均升力系数基本为 0,是亚临界雷诺数区域,根据前人研究结果,此区域结构表面的边界层在分离之前仍处于层流状态。在 $3.42 \times 10^5 \leq Re \leq 3.73 \times 10^5$ 的范围内,平均阻力系数快速下降,同时出现较大的平均升力,并随雷诺数的增大,阻力系数的变化趋于平缓,平均升力基本消失,是临界雷诺数区域;在进行风压分析中发现,结构

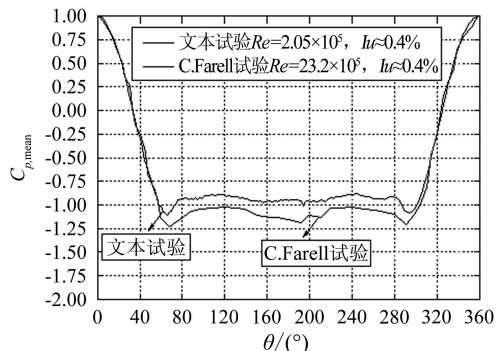
两侧的风压不对称,说明出现了单侧分离气泡;在 $Re > 3.72 \times 10^5$ 的范围内,阻力系数和升力系数基本不再随雷诺数的增大而变化,是超临界雷诺数区域。

目前对于圆柱形斜拉索的气动力计算,相关规范^[15]只考虑了阻力,没有考虑升力。该气动升力对整体风荷载的贡献,是值得考虑的问题。而目前斜拉索气动力的研究,针对阻力和脉动升力的较多,对临界雷诺数区域的平均升力没有引起足够的重视^[16-18]。

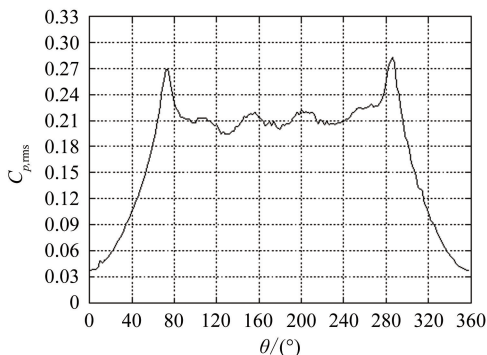
3 雷诺数对风压分布的影响

由上述内容可知气动力系数随着雷诺数的改变而发生较大变化。这是因为雷诺数的改变导致圆柱周围的流场发生了变化,为了分析模型周围的流场,分别取亚临界、临界和超临界雷诺数范围内的3个雷诺数数值,对其表面风压进行了分析。

图6为 $Re = 2.05 \times 10^5$ (亚临界)时模型表面平均风压和脉动风压的分布情况,本文结果与文献[19]的试验值总体趋势一致,在 $60^\circ \sim 300^\circ$ 范围内大于文献[19]的试验值,本研究中模型的雷诺数、模型表面的光滑度等因素与文献[19]之间存在的差异可能是导致差别的原因。由图可知, $0^\circ \sim 180^\circ$ 的分布同 180°



(a) 平均风压系数的周向分布



(b) 脉动风压系数的周向分布

图6 亚临界雷诺数区域模型风压系数周向分布 ($Re = 2.05 \times 10^5$)

Fig. 6 Wind pressure coefficient distribution around test model in subcritical regime ($Re = 2.05 \times 10^5$)

$\sim 360^\circ$ 的分布基本对称,说明模型两侧的流场在时间平均上呈对称状态,平均升力为0。

图7和8分别是瞬时表面压力系数和驻点在一个卡门涡脱落周期内的变化情况。随着卡门涡的交替脱落,驻点、分离点等在模型表面交替摆动。驻点摆动的周期对应卡门涡的脱落周期、脉动升力的周期和2倍脉动阻力的周期。其中图8描述的是在亚临界雷诺数区域一个周期 T 内,模型驻点位置随时间的摆动。摆动的角度是指驻点附近最大风压系数值对应位置与摆动范围的中心点所夹的角度。从图中可以看出摆动的角度随时间大致呈正弦曲线有规律地变化。

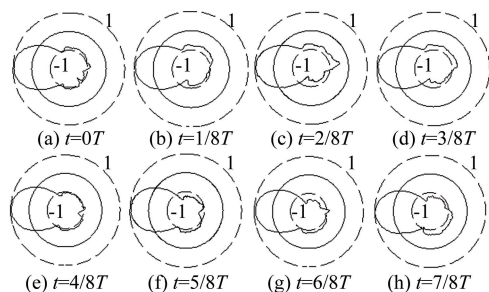


图7 亚临界雷诺数区域模型瞬时风压周向分布向量图 ($Re = 2.05 \times 10^5$)

Fig. 7 Instantaneous wind pressure distribution vector diagram around test model in subcritical regime ($Re = 2.05 \times 10^5$)

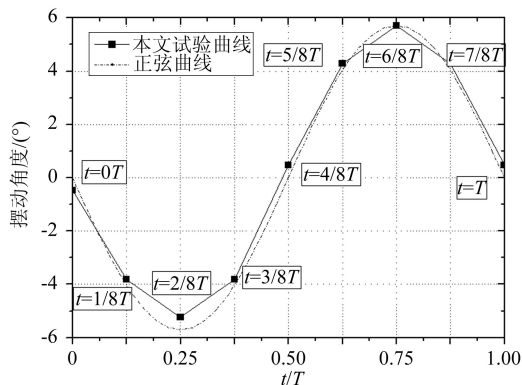


图8 亚临界雷诺数区域模型驻点位置摆动图 ($Re = 2.05 \times 10^5$)

Fig. 8 Stagnation point position of test model in subcritical regime ($Re = 2.05 \times 10^5$)

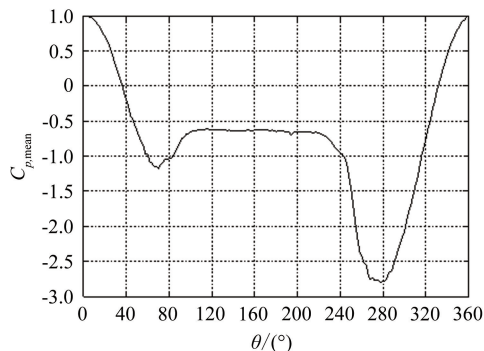
图9为 $Re = 3.55 \times 10^5$ (临界)时模型表面平均风压和脉动风压的分布情况。由图9可知,此时模型两侧的流场已经不再对称,一侧的负压绝对值明显大于另一侧,同时该侧的脉动风压也明显变大。

图10是瞬时表面压力系数的变化情况。此时的流场随时间基本不再变化,在特定区域有不随时间变化的较大负压出现。该不对称的负压,是平均升力产生的原因。

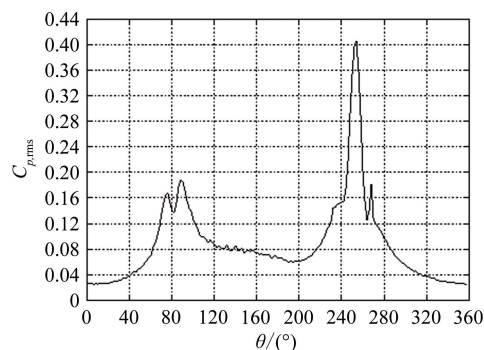
图11和12为 $Re = 3.79 \times 10^5$ (超临界)时模型表面平均风压和脉动风压的分布、瞬时表面风压系数的变化情况。由图可知,此时模型另一侧也出现大绝对值的负压,同原来出现的负压接近;同时2个大负

压区的脉动风压也接近一致。随着流场恢复到对称状态,平均升力基本消失。

需要说明的是,本研究只针对光滑表面模型进行了研究。针对斜拉索,为了防止风雨振采用气动措施



(a) 平均风压系数的周向分布



(b) 脉动风压系数的周向分布

图9 临界雷诺数区域模型风压系数周向分布($Re=3.55 \times 10^5$)

Fig. 9 Wind pressure coefficient distribution around test model in critical regime($Re=3.55 \times 10^5$)

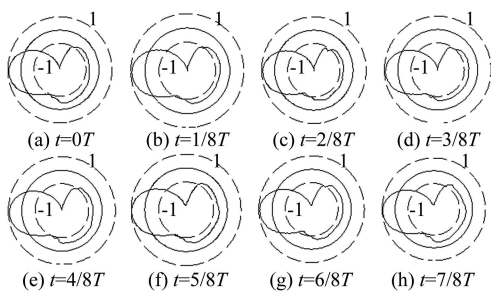
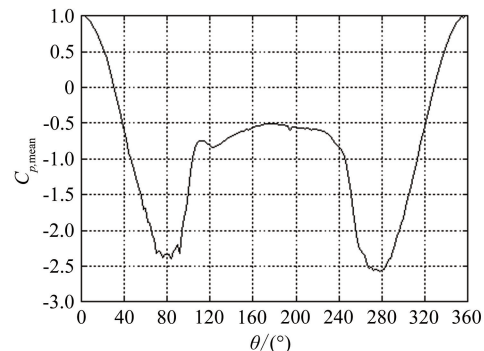
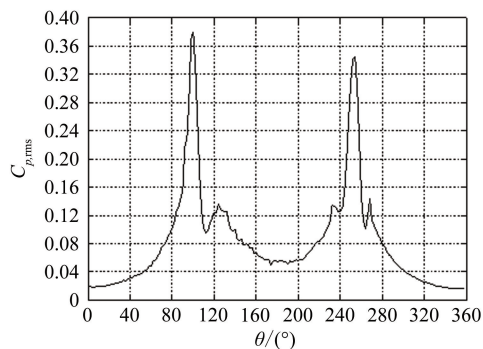


图10 临界雷诺数区域模型瞬时风压周向分布向量图($Re=3.55 \times 10^5$)

Fig. 10 Instantaneous wind pressure distribution vector diagram around test model in critical regime($Re=3.55 \times 10^5$)



(a) 平均风压系数的周向分布



(b) 脉动风压系数的周向分布

图11 超临界区域模型风压系数周向分布($Re=3.79 \times 10^5$)

Fig. 11 Wind pressure coefficient distribution around test model in supercritical regime($Re=3.79 \times 10^5$)

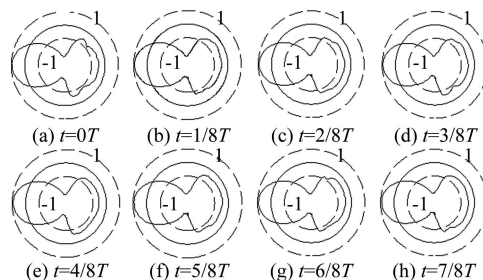


图12 超临界雷诺数区域模型瞬时风压周向分布向量图($Re=3.79 \times 10^5$)

Fig. 12 Instantaneous wind pressure distribution vector diagram around test model in supercritical regime($Re=3.79 \times 10^5$)

(表面缠绕螺旋线、设置凹坑等)后的情况有待进一步研究。

4 雷诺数影响下流场轴向的相关性

为了研究雷诺数影响下的流场沿模型轴向的相关性,定义了各圈测点之间的无量纲轴向间距 $s(1 \leq s \leq 7, s=L/d$, 其中 L 指 2 排测点间的距离, d 指模型的直径),以脉动升力系数为指标,来考察流场沿轴向的相关性。评价相关性的程度有 2 个无量纲参数,相关系数和相干函数,一个是时域上的分析,一个是频域上的分析,对于本研究的相关性分析,采用的是相关系数,如式(3)所示:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)y(n)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为 2 个各态历经平稳过程中的脉动信号 x 和 y 的互相关系数; N 为采样的样本数; n 为样本中第 n 个样本; $R_{xx}(0)$ 为脉动信号 x 初始时的自相关系数; $R_{yy}(0)$ 为脉动信号 y 初始时的自相关系数。

为了定性和定量地说明相关性问题,通常按表 3 给出的相关系数与相关程度对照表来进行说明。

表 3 相关系数与相关程度对照表

Table 3 Table of correlation coefficient and degree

相关系数	0~ ±0.30	±0.30~ ±0.50	±0.50~ ±0.80	±0.80~ ±1.00
相关程度	微相关	实相关	显著相关	高度相关

通过改变雷诺数 ($1.0 \times 10^5 \leq Re \leq 3.2 \times 10^5$) 和无量纲轴向间距 ($1 \leq s \leq 7$), 得到脉动升力系数的相关系数, 如图 13 所示。

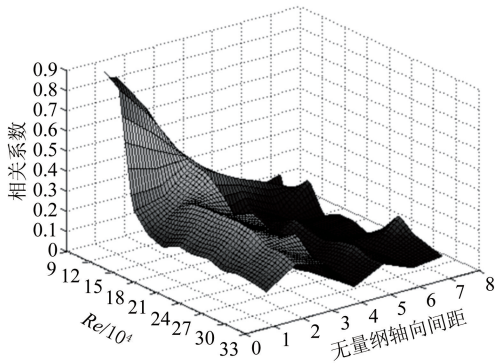


图 13 相关系数同雷诺数和无量纲轴向间距的关系

Fig. 13 Relation between correlation coefficient, Re , and dimensionless axial spacing

从图中可以看出, 随着雷诺数的增大、无量纲间距的增大, 相关性相应降低。对于区域 $1 \leq s < 3$ 和 $1.0 \times 10^5 \leq Re < 1.6 \times 10^5$, 模型升力系数相关性较强, 为显著相关或高度相关, 而对于其它区域相关系数很小, 基本为微相关。

由此可推知, 在雷诺数较低时 (亚临界区域), 结构表面为层流分离, 卡门涡在轴向上的尺度相对较大; 随着雷诺数的提高 (临界区域), 结构表面的边界层出现层流和湍流之间相互转换。这个过程对结构表面粗糙度较为敏感, 导致不同位置处的分离出现差异, 使其在轴向的分布不均匀, 从而导致轴向相关系数逐渐减小。

由于测试设备的量程所限, 该相关性研究的测试只做到了雷诺数为 3.2×10^5 , 高雷诺数下的相关性问题的有待进一步研究。

5 结 论

本文通过风洞试验, 研究了雷诺数对圆柱气动力和流场特性的影响, 并考虑了流场在轴向上的相关性问题的, 得到如下结论:

(1) 在亚临界雷诺数区域, 在时间平均上流场沿模型两侧呈对称分布, 雷诺数对平均阻力系数和流场影响不大, 平均升力系数基本为 0。在临界雷诺数区域, 随着特定区域大负压区的出现, 流场不再对称, 平均升力出现, 并出现较大的脉动升力。在超临界雷诺

数区域, 随着对称侧大负压区的出现, 流场恢复对称状态, 平均升力消失。

(2) 雷诺数对流场的轴向相关性有显著的影响。在雷诺数较低时 (亚临界区域), 卡门涡在轴向上的尺度相对较大, 而随着雷诺数的提高, 该尺度逐渐减小, 各断面流场的相关性降低。

(3) 对于具有圆形结构的斜拉索, 由于其气动力与风速的平方和气动力系数成正比, 在临界区, 随着风速的增大阻力系数减小, 同时出现较大的升力, 因此整个风速范围内的最大气动力不一定在最大风速处取得, 准确的气动力需要根据研究结果具体计算。

(4) 本文只是针对光滑表面的圆柱进行了分析, 对于采用气动减振措施 (如缠绕螺旋线、设置凹坑等) 的斜拉索的气动力和流场特性随雷诺数的变化有必要进一步研究。同时流场的轴向相关性在高雷诺数下的状态也有必要进行深入研究。

参考文献:

- [1] 裴岷山, 张喜刚, 朱斌, 等. 斜拉桥的拉索纵桥向风荷载计算方法研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(3): 26-30.
Pei M S, Zhang X G, Zhu B, et al. Study on longitudinal wind load calculation method of cables for cable-stayed bridge[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(3): 26-30.
- [2] Roshko A. Experiments on the flow past a circle cylinder at very high Reynolds numbers[J]. Journal of Fluids Mechanics, 1961, 10: 345-356.
- [3] Bearman P W. On vortex shedding from a circle cylinder in the critical Reynolds number regime[J]. Journal of Fluids Mechanics, 1968, 37: 577-585.
- [4] 崔冰, 曾宪武. 南京二桥南汉大桥主桥结构设计[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十三届年会论文集, 北京: 人民交通出版社, 1998: 264-272.
Cui B, Zeng X W. Structure design of the nancha bridge of nanjing yangtse river bridge[C]//Proceedings of the 13th National Conference on Bridge and Structure Engineering, Beijing: China Communications Press, 1998: 264-272.
- [5] 张忠义, 刘聪. 南京长江第二大桥桥位风速观测及设计风速的计算[J]. 气象科学, 2000, 20(2): 200-205.
Zhang Z Y, Liu C. Calculation of desighing wind velocity and wind observation at the Nanjing 2nd Yangtse River Bridge[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2000, 20(2): 200-205.
- [6] 刘庆宽, 郑云飞, 白雨润, 等. 斜拉索风雨振气动抑振措施的参数优化[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 31-35.
Liu Q K, Zheng Y F, Bai Y R, et al. Parametric optimization of aerodynamic and vibration measure for rain-wind induced vibration of cables[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8): 31-35.
- [7] 刘庆宽, 王毅, 郑云飞, 等. 水线-雷诺数效应-斜拉索振动关系的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 257-265.
Liu Q K, Wang Y, Zheng Y F, et al. Experimental study on the relation of water rivulet-Reynolds number effect-cable vibration[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 257-265.

- [8] 刘庆宽, 张峰, 马文勇, 等. 斜拉索雷诺数效应与风致振动的试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 114-119.
Liu Q K, Zhang F, Ma W Y, et al. Tests for Reynolds number effect and wind-induced vibration of stay cables[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12): 114-119.
- [9] Chen S, Irwin P A, Jakobsen J B, et al. Divergent motion of cables exposed to skewed wind[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Cable Dynamics. Santa Margherita Ligure, Italy, 2003: 271-278.
- [10] Matsumoto M, Yagi T, Shima T, et al. The effect of the Reynolds number in aerodynamic cable vibration of cable-stayed bridge[C]//Proceedings of the 19th National Symposium on Wind Engineering. Tokyo, Japan, 2006: 507-512.
- [11] 刘庆宽. 多功能大气边界层风洞的设计与建设[J]. 实验流体力学, 2011, 25(3): 66-70.
Liu Q K. Aerodynamic and structure design of multifunction boundary-layer wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(3): 66-70.
- [12] 马文勇, 刘庆宽, 刘小兵, 等. 风洞试验中测压管路信号畸变及修正研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(4): 71-77.
Ma W Y, Liu Q K, Liu X B, et al. Study on correction and distortion effects caused by tubing systems of pressure measurements in wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(4): 71-77.
- [13] Hackett J E. Tunnel-induced gradients and their effect on drag [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, 34(12): 2575-2581.
- [14] Cooper K R, Mercker E, Wiedemann J. Improved blockage corrections for bluff bodies in closed and open wind tunnels [C]//Wind Engineering into 21st Century: Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering. Copenhagen, Denmark, 1999: 1627-1634.
- [15] JTG/T D60-01—2004. 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
JTG/T D60-01—2004. Wind-resistant design specification for highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [16] Poulin S, Larsen A. Drag loading of circular cylinders inclined in the along-wind direction[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(9/10/11): 1350-1363.
- [17] 王卫华, 李明水, 陈忻. 斜拉索的阻力系数研究[J]. 空气动力学学报, 2005, 23(3): 389-393.
Wang W H, Li M S, Chen X. Investigation on drag coefficients of stay-cables[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2005, 23(3): 389-393.
- [18] 林志兴, 杨立波, 李文勃. 斜拉索顺桥向风阻系数的试验研究 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2005, 26(1): 38-41.
Lin Z X, Yang L B, Li W B. Experimental study on drag coefficients of stay-cables corresponding to wind direction along the bridge central line[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2005, 26(1): 38-41.
- [19] Farell C, Blessm A J. On critical flow around smooth circular cylinders[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 136: 375-391.

作者简介:



刘庆宽(1971-),男,河北保定人,博士,教授,博士生导师。研究方向:桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制。通信地址:石家庄铁道大学风工程研究中心(050043)。E-mail: lqk@stdu.edu.cn

(编辑:杨娟)