

风攻角对宽高比为5的 矩形断面梁气动力特性的影响

杨 群¹, 刘小兵²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 风工程研究中心, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对宽高比为5的矩形断面梁进行了节段模型测压风洞试验, 研究了矩形断面梁的气动力特性随风攻角的变化规律。研究结果表明: 在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内, 风攻角对斯托罗哈数的影响很小; 不同风攻角下的驰振力系数均大于0; 与上表面中间位置的测点相比, 上表面边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关性更强; 上表面边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关性对风攻角的变化不敏感; 随着风攻角的增大, 上表面中间位置测点的压力与升力和扭矩的相关性显著增强。

关键词: 矩形断面梁; 气动力; 风洞试验; 测压

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2015)01-0006-07

矩形断面在土木工程中有着广泛的应用背景, 许多土木工程结构都是以矩形断面为原型发展起来的。由于矩形断面梁气动性能的研究可为桥梁主梁的气动性能研究提供参考, 国内外学者对矩形断面梁, 尤其是标准模型-宽高比为5的矩形断面梁的气动性能进行了许多研究工作。Larsen 采用离散涡方法对宽高比为5的矩形断面梁的气动性能进行了数值模拟, 得到了阻力系数、升力系数根方差及斯托罗哈数^[1]。刘志文采用风洞试验和数值模拟两种方法, 对比研究了宽高比为5的矩形断面梁的三分力系数、斯托罗哈数及风压系数的分布规律^[2]。近年来, 由国际风工程协会联合其它一些组织共同发起了针对宽高比为5的矩形断面梁气动性能的 Benchmark 问题研究, 简称 BARC (A Benchmark on the Aerodynamics of a Rectangular 5: 1 Cylinder)^[3]。在 BARC 框架下, 研究者通过数值模拟和风洞试验两种手段, 从流场、气动力系数、风压系数分布及气动力的展向相关性等多个角度对宽高比为5的矩形断面梁的气动性能进行详细深入的研究^[4-6]。以上这些研究工作大部分是在 0° 风向角下进行的, 对矩形断面梁气动力特性的风攻角效应关注较少。风攻角是矩形断面梁和实际桥梁主梁气动力特性的重要影响参数之一, 深入分析矩形断面梁气动力特性的风攻角效应对于研究实际桥梁主梁的气动力特性具有重要意义。鉴于此, 通过节段模型测压风洞试验, 分析了宽高比为5的矩形断面梁的气动力特性随风攻角的变化规律。

1 风洞试验介绍

如图1所示, 矩形断面梁风洞试验模型宽 B 和高 H 分别为300 mm和60 mm, 宽高比为5, 长度 L 为2 000 mm。模型由有机玻璃板制成, 在模型中央沿周向布置1圈测压孔, 测压孔的数目为60个。由于流动参数在尖角处变化比较剧烈, 因此在模型的棱边处测压孔布置较密。

风洞试验在石家庄铁道大学风工程研究中心 STU-1 风洞中进行。该风洞为串联双试验段回/直流边界层风洞, 低速试验段宽4 m, 高3 m, 长24 m, 风速1~30 m/s 连续可调; 高速试验段宽2.2 m, 高2 m, 长5 m, 风速3~80 m/s 连续可调。本试验在高速试验段中进行。如图2所示, 矩形断面梁节段模型通过刚

收稿日期: 2014-06-19 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxzb.2015.01.02

作者简介: 杨群(1981-), 女, 讲师, 主要从事桥梁工程的研究。E-mail: quny123@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51308359); 河北省自然科学基金(E2013210103); 河北省高等学校科学技术研究基金(QN20131169)

杨群, 刘小兵. 风攻角对宽高比为5的矩形断面梁气动力特性的影响[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 6-11.

性轴与洞壁外侧的转盘固定,通过转盘可以改变模型的来流风之间的攻角。试验风攻角为 $0^\circ \sim 6^\circ$, 变化步长为 1° 。风攻角正方向的定义如图 3 所示。试验流场为均匀流场,顺风向紊流度约为 0.2%。来流风速为 10 m/s,以模型断面宽度 B 为特征尺寸定义的雷诺数为 2.0×10^5 。不同风攻角下模型所有测点的风压可通过放置在模型内部的压力扫描阀测量得到。按照文献 [7] 介绍的方法对 60 个测点微元提供的阻力、升力和扭矩进行求和,即可得到作用在模型上的气动阻力、升力和扭矩。气动阻力、升力和扭矩的正方向定义如图 3 所示。

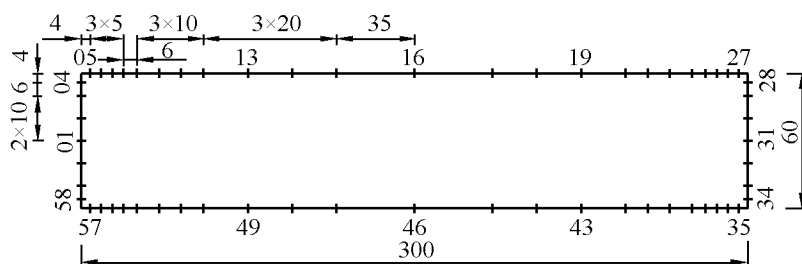
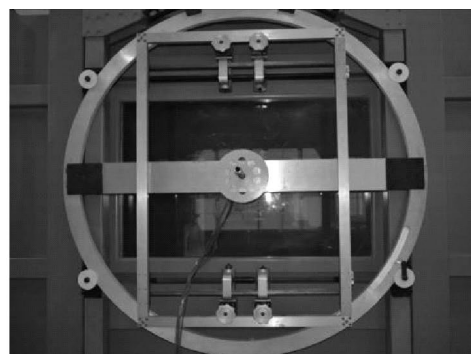


图 1 风洞试验模型的尺寸及测点布置(单位:mm)



(a)试验模型



(b)洞壁外侧的转盘

图 2 风洞试验照片

2 试验结果的可靠性检验

图 4 显示了 0° 风向角下模型的阻力系数时程、扭矩系数时程、升力系数时程及幅值谱。阻力系数、升力系数、扭矩系数的定义如下

阻力系数

$$C_d = F_d / 0.5 \rho U^2 B \quad (1)$$

升力系数

$$C_l = F_l / 0.5 \rho U^2 B \quad (2)$$

扭矩系数

$$C_m = F_m / 0.5 \rho U^2 B^2 \quad (3)$$

式中, F_d 、 F_l 、 F_m 为通过测点微元积分得到的模型单位长度上受到的阻力、升力、扭矩; U 为来流风速; B 为模型的宽度。

从图 4 可以看到,阻力系数均值在 0.2 附近,升力系数和扭矩系数均值接近 0,这与 0° 风向角下矩形断面上下对称的实际情况是相符的。与阻力系数时程曲线相比,升力系数时程曲线和扭矩系数时程曲线的谐波特性更明显。从升力系数时程幅值谱曲线可以看到,以模型宽度 B 为特征长度定义的斯托罗哈数为 0.545。表 1 将试验结果与已有的一些试验结果进行了对比,从表中可以看到,试验得到的阻力系数均值和斯托罗哈数与别人文献结果吻合较好。以上分析表明,测压试验结果是可靠的。

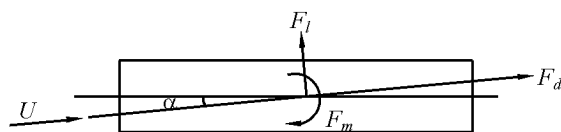


图 3 风攻角及三分力示意图

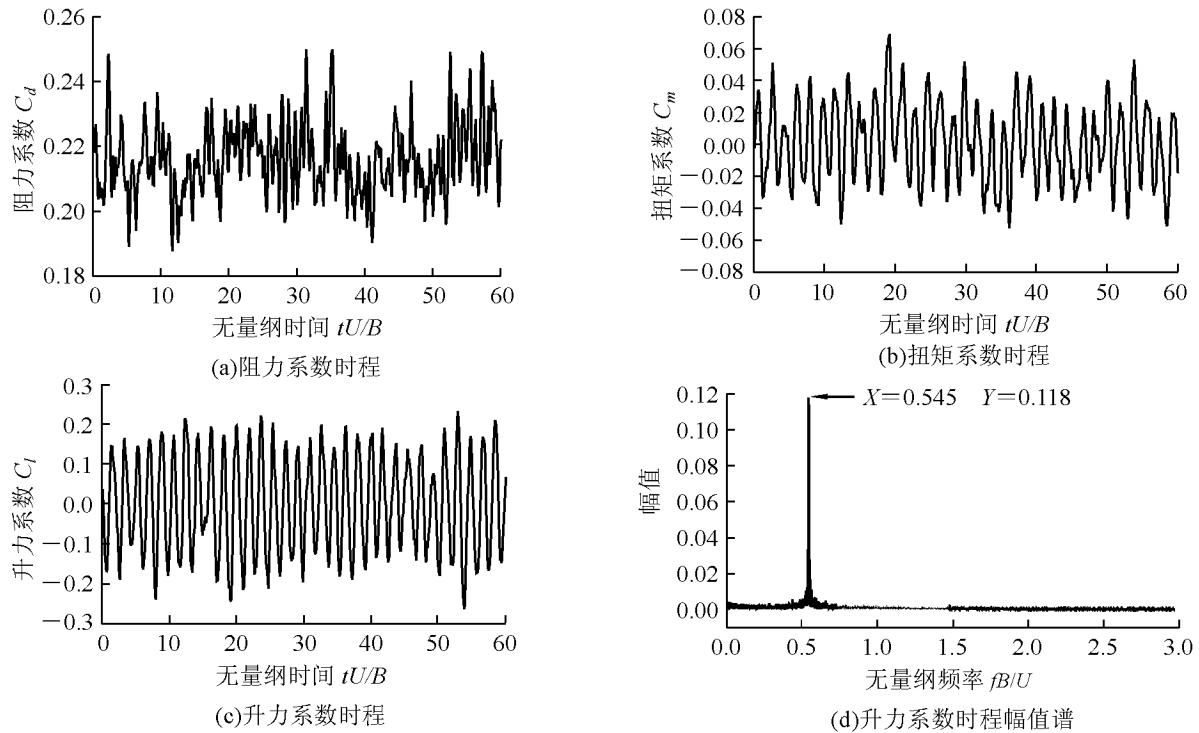
图 4 0° 风向角下的气动力系数时程及幅值谱

表 1 试验结果与别人文献结果对比

试验	雷诺数	阻力系数均值	斯托罗哈数
本文试验	2.0×10^5	0.209	0.545
刘志文试验 ^[2]	1.3×10^5	0.196	0.513
Schewe 试验 ^[8]	2.0×10^5	0.206	0.555

3 试验结果分析

3.1 斯托罗哈数及驰振力系数

图 5 和图 6 为模型的三分力系数均值和根方差随风攻角的变化曲线,可以看到,在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,阻力系数、升力系数和扭矩系数均值和根方差均随风攻角的增大而增大,只不过增大的幅度不同,阻力系数和扭矩系数均值与根方差的增幅较小,升力系数均值与根方差的增幅较大。

图 7 为模型的斯托罗哈数随风攻角的变化曲线。可以看到,在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,风攻角对斯托罗哈数的影响很小,其值基本在 0.5 ~ 0.55 之间。

图 8 为模型的驰振力系数随风攻角的变化曲线。可以看到,在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,驰振力系数均大于 0,表明宽高比为 5 的矩形断面梁在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内不会发生驰振现象。

3.2 测点的平均风压系数分布

为方便分析风攻角对测点平均风压系数分布规律的影响,定义各测点的无量纲距离 S/B 。 S 为从模型的左下角点 1 沿模型表面按顺时针方向到某测点的实际距离,以 S/B 表示测点的无量纲距离,则模型各个面的无量纲距离分别为:迎风面 $0 < S/B < 0.20$;上表面 $0.20 < S/B < 1.20$;背风面 $1.20 < S/B < 1.40$;下表面 $1.40 < S/B < 2.40$ 。

由图 10 可以看出,在试验风攻角范围内,迎风面测点的平均风压系数为正值,表明迎风面受到压力作用。上表面、背风面以及下表面测点的平均风压系数均为负值,表明这些面受到吸力作用。

由图 10(a) 可以看出:风攻角为 0° 时,迎风面测点平均风压系数以中点 ($S/B = 0.1$) 呈对称分布;迎风面下半部分测点 ($0 < S/B < 0.1$) 的平均风压系数随着风攻角的增大而增大;迎风面上半部分测点 ($0.1 < S/B < 0.2$) 的平均风压系数随着风攻角的增大而减小。由图 10(b) 可以看出:风攻角为 0° 时,上

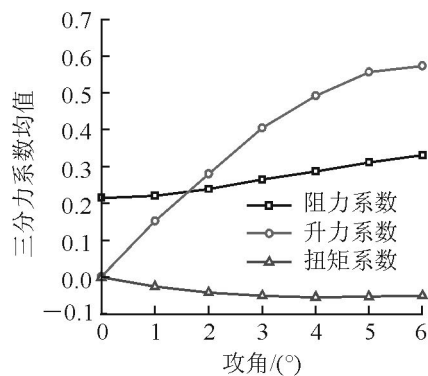


图 5 三分力系数均值随风攻角的变化曲线

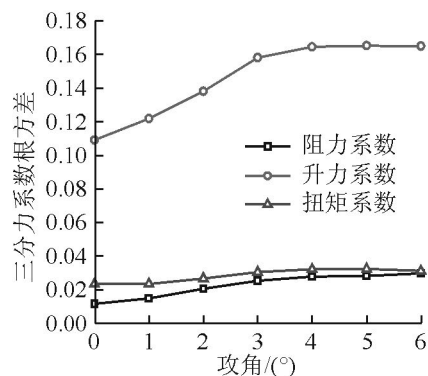


图 6 三分力系数根方差随风攻角的变化曲线

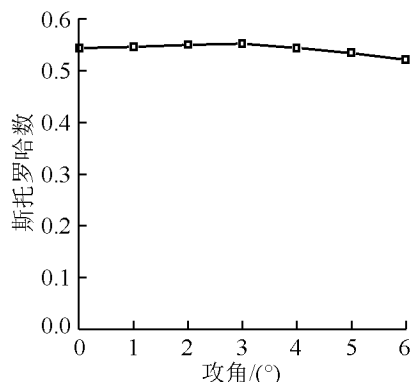


图 7 斯托罗哈数随风攻角的变化曲线

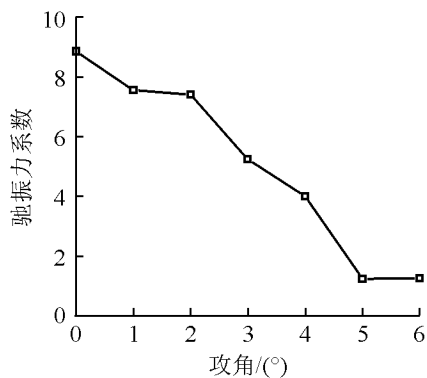
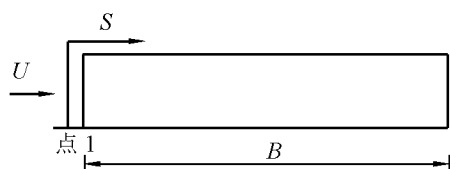
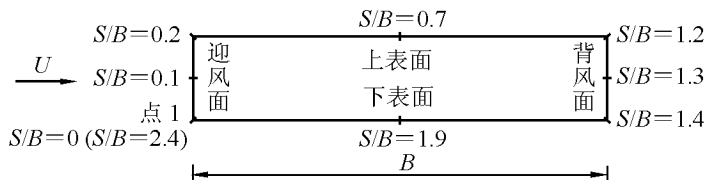


图 8 驰振力系数随风攻角的变化曲线

(a) S 的定义(b) 模型各表面关键点位置的 S/B 值图 9 无量纲距离 S/B 模型参数示意图

表面迎风端测点的平均风压系数绝对值远大于背风端测点的平均风压系数绝对值；随着风攻角的增大，上表面迎风端测点的平均风压系数绝对值变化不大，背风端测点的平均风压系数绝对值迅速增大。由图 10(c) 可以看出，风攻角为 0° 时，背风面测点的平均风压系数以中点 ($S/B = 1.3$) 呈对称分布；背风面各测点的平均风压系数绝对值均随着风攻角的增大而增大。由图 10(d) 可以看出，风攻角为 0° 时，下表面迎风端测点的平均风压系数绝对值远大于背风端测点的平均风压系数绝对值；下表面大部分位置测点的平均风压系数绝对值随着风攻角的增大而减小，与边缘位置的测点相比，下表面中间位置测点的平均风压系数绝对值减小的幅度更显著。

3.3 测点的脉动风压系数分布

桥梁主梁风致振动中，平均风压提供静力风荷载部分，对振动起主要作用的是风压的脉动部分。考虑到主梁的振动以竖弯振动和扭转振动为主，本节着重分析对模型的脉动升力和脉动扭矩起主要贡献的上下表面测点的脉动风压系数分布。模型上下表面测点的脉动风压系数分布见图 11。可以发现：(1) 各风向角下，上下表面背风端测点的脉动风压系数明显大于迎风端测点的脉动风压系数。这表明上下表面背风端测点的脉动风压对整个模型的脉动升力和脉动扭矩的贡献更大；(2) 上表面背风端测点的脉动风压系数随着风攻角的增大而增大，下表面背风端测点的脉动风压系数随着风攻角的增大而减小。这说明随着风攻角的增大，上表面背风端测点的脉动风压对整个模型的脉动升力和脉动扭矩的贡献逐渐增

大,下表面背风端测点的脉动风压对整个模型的脉动升力和脉动扭矩的贡献逐渐减小。

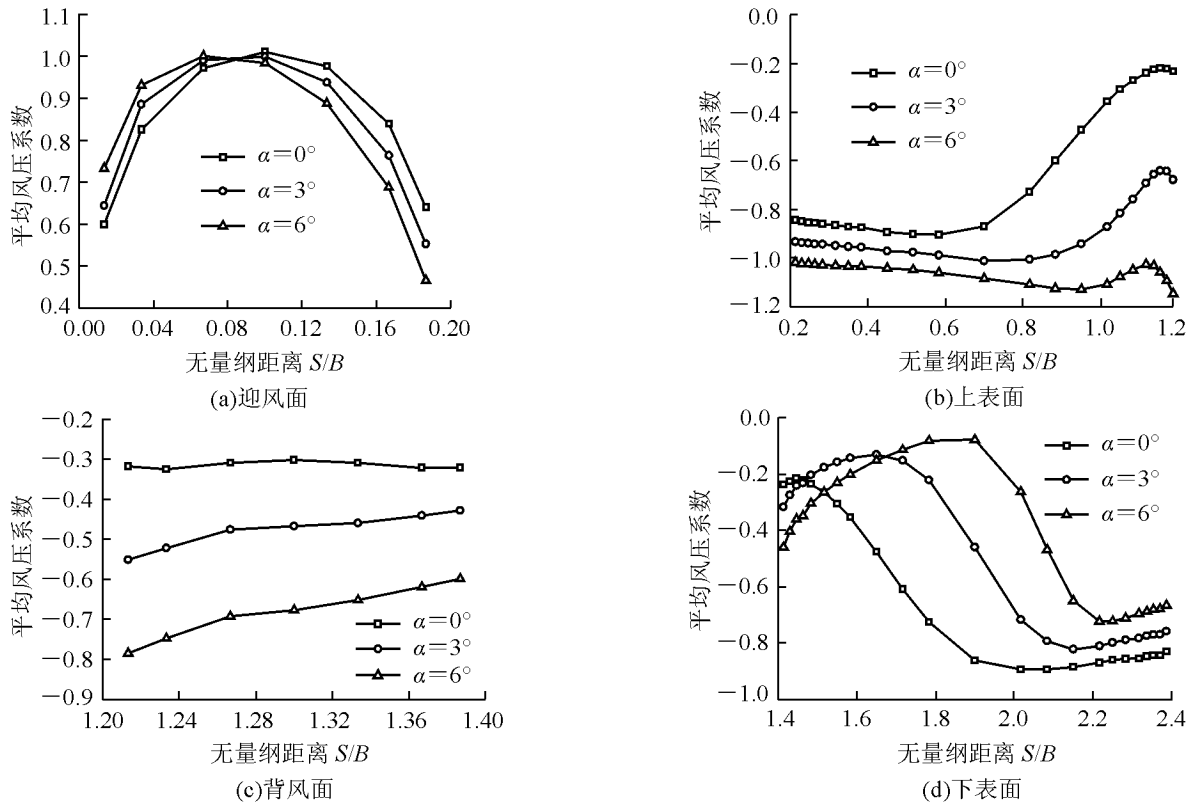


图 10 模型测点的平均风压系数分布

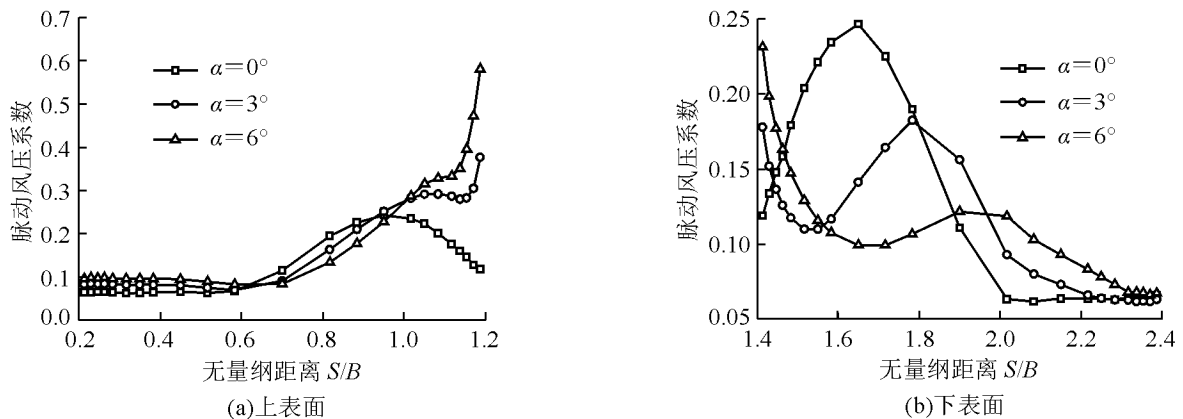


图 11 模型测点的脉动风压系数分布

3.4 测点压力与总气动力的相关性

在如图 3 所示正向风攻角的情况下,来流风经过矩形断面梁模型时,大尺度旋涡脱落形成的主要位置为模型的上表面,上表面测点的脉动压力对模型的脉动升力和脉动扭矩起主要贡献。因此,以下着重分析上表面测点的压力与升力和扭矩的相关性。

图 12 和图 13 分别给出了风攻角为 0° 、 3° 和 6° 时模型上表面的测点压力与升力和扭矩的相关系数。可以看出,虽然绝大部分测点的压力与升力的相关系数为负值,与扭矩的相关系数为正值,但二者在上表面的分布规律及随风攻角的变化规律却比较类似。上表面边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关系数绝对值较大,且随风攻角的增大变化不明显。上表面中间位置测点的压力与升力和扭矩的相关系数绝对值较小,且随风攻角的增大显著增大。这说明,与中间位置的测点相比,边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关性更强。随着风攻角的增大,边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关性变化不大,中间位

置测点的压力与升力和扭矩的相关性显著增强。

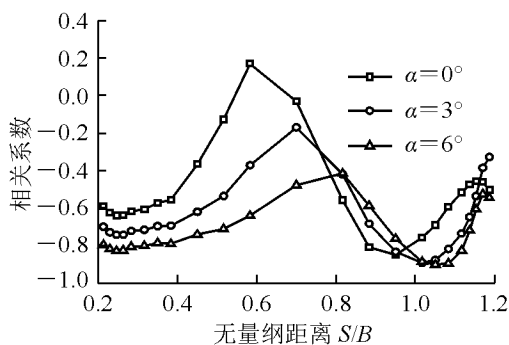


图 12 上表面测点压力与升力的相关系数

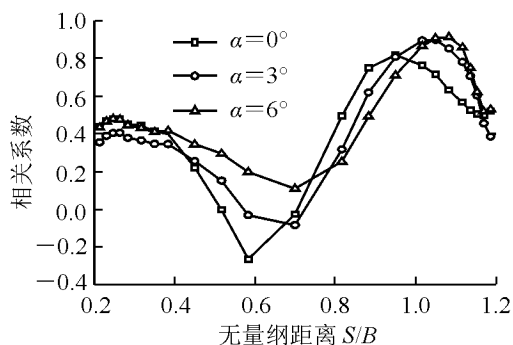


图 13 上表面测点压力与扭矩的相关系数

4 结论

通过节段模型测压风洞试验研究了风攻角对宽高比为 5 的矩形断面梁的气动力特性随风攻角的变化规律,主要得到了以下几点结论:

- (1) 在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,风攻角对斯托罗哈数的影响很小。
- (2) 在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,驰振力系数均大于 0,表明宽高比为 5 的矩形断面梁在此风攻角范围内不会发生驰振现象。
- (3) 在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,上下表面背风端测点的脉动风压系数明显大于迎风端测点的脉动风压系数。上表面背风端测点的脉动风压系数随着风攻角的增大而增大,下表面背风端测点的脉动风压系数随着风攻角的增大而减小。
- (4) 在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 的风攻角范围内,随着风攻角的增大,上表面边缘位置测点的压力与升力和扭矩的相关性变化不大,上表面中间位置测点的压力与升力和扭矩的相关性显著增强。

参 考 文 献

- [1] Larsen A. Advances in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/76: 73-90.
- [2] 刘志文,陈政清. $H/B=1/5$ 矩形断面气动性能研究 [C]//第十三届全国结构风工程学术会议论文集. 大连: 中国土木工程协会桥梁与结构工程分会风工程委员会, 2007: 91-99.
- [3] Bartoli G, Bruno L, Buresti G, et al. BARC: A Benchmark on the Aerodynamics of a Rectangular 5:1 Cylinder [J]. Journal of Fluids and Structures, 2009, 25: 586.
- [4] Bruno L, Coste N, Fransos D. Simulated flow around a rectangular 5:1 cylinder: Spanwise discretisation effects and emerging flow features [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 104/106: 203-215.
- [5] Bruno L, Fransos D, Coste N, et al. 3D flow around a rectangular cylinder: A computational study [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98: 263-276.
- [6] Bruno L, Salvetti M, Ricciardelli F. Benchmark on the Aerodynamics of a Rectangular 5:1 Cylinder: An overview after the first four years of activity [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 126: 87-106.
- [7] 李加武,林志兴,金挺. 压力积分法在桥梁断面雷诺数效应研究中的应用 [J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 505-508.
- [8] Schewe G. Reynolds-number-effects in flow around a rectangular cylinder with aspect ratio 1: 5 [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 39: 15-26.

(下转第 39 页)

- [5] 陈政清. 桥梁风工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 陈艾荣, 项海帆. 斜拉桥涡激扭转振动的被动控制 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1994, 22(4): 487-492.
- [7] 葛耀君, 丁志斌, 赵林. 缆索承重桥梁桥塔自立状态涡激共振及其控制 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1008-1012.
- [8] 朱乐东. 桥梁涡激共振试验节段模型质量系统模拟与振幅修正方法 [J]. 工程力学, 2005, 22(5): 204-208.
- [9] 李立, 廖锦翔. 涡激振动问题的有限元计算研究 [J]. 工程力学, 2003, 20(5): 200-203.
- [10] 何晗欣, 李加武, 周建龙. 中央开槽箱形断面斜拉桥的涡激振动试验与分析 [J]. 桥梁建设, 2012, 42(2): 34-40.

Researches on π -Section Vortex-Induced Vibration Wind Tunnel Testing and Aerodynamic Suppression Measures

Yang Guanghui, Qu Dongyang, Niu Jintao, Fang Cheng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A section model wind tunnel test is conducted for a large span cable-stayed bridge and the aerodynamic measures to restrain the bridge girder vortex-induced vibration with a π -section are studied. The comparison of the vortex-induced vibration tests for main beam segment model is made to verify the effectiveness of central stabilizer and drafty openings in rail. With CFD simulation technology, flow characteristics around the main girder section are also analyzed to find the mechanism of aerodynamic measures to resist vortex-induced vibration. The results indicate that the aerodynamic measures can improve the aerodynamic characteristics of π -section and reduce vortex-induced vibration.

Key words: cable-stayed bridge; π -section; vortex-induced vibration; damping measures; wind tunnel test
~~~~~  
(上接第 11 页)

## Influence of Wind Attacking Angle on Aerodynamic Characteristic of Rectangular Girder with Aspect Ratio 5

Yang Qun<sup>1</sup>, Liu Xiaobing<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** A pressure-measured sectional model wind tunnel test of rectangular girder with aspect ratio 5 was performed. The changing rule of aerodynamic characteristic of rectangular girder versus wind attacking angle was studied. The study results show that when wind attacking angle is in range of  $0^\circ \sim 6^\circ$ , the change of wind attacking angle has little effect on Strouhal number. The galloping force coefficients under different wind attacking angles are greater than zero. Compared with point-pressure in center of upper surface, point-pressure in the edge of upper surface is more correlated with lift force and torque. With the increase of the wind attacking angle, the correlation of point-pressure in edge of upper surface with lift force and torque changes little, while correlation of point-pressure in center of upper surface with lift force and torque increases dramatically.

**Key words:** rectangular girder; aerodynamic force; wind tunnel test; pressure-measured