

倾斜角对独柱式变截面钢桥塔气动特性的影响*

刘小兵^{1,2,3}, 姜会民³, 于文文³, 郑怡彤³

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 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. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

摘要 与竖直等截面桥塔相比, 倾斜变截面桥塔在风的作用下往往表现出更为复杂的三维效应。以国内一座拟建的独柱式变梯形截面倾斜钢桥塔为工程背景, 通过全桥塔刚性模型测压风洞试验, 测试了该桥塔在不同风向角 α 和倾斜角 β 下的气动力系数和斯托罗哈数, 研究了倾斜角对其气动特性的影响。研究表明: 当 $\alpha=0^\circ$ (顺桥塔倾斜方向来流) 和 $\alpha=30^\circ$ 左右时, 倾斜使桥塔上部截面的气动力减小, 下部截面的气动力增大; 当 $\alpha=140^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ (逆桥塔倾斜方向来流) 左右时, 规律与之相反。倾斜角的增大会使桥塔的旋涡脱落变得不明显。

关键词 钢桥塔; 风洞试验; 倾斜角; 气动力系数; 斯托罗哈数; 三维效应

中图分类号 U441.2; TH138

引言

变截面倾斜桥塔由于具有更好的视觉效果和通航适应能力, 被越来越多地应用于实际工程中。风流经此类桥塔时往往会表现出较为复杂的三维流动效应, 其气动特性与等截面竖直桥塔相比有很大的不同。仅按照等截面竖直桥塔的气动特性对变截面倾斜桥塔进行抗风设计, 可能会由于对风荷载的不合理取值导致桥塔抗风性能不足或建筑材料的浪费。因此, 准确掌握变截面倾斜桥塔的气动特性对其抗风设计具有重要意义。

对于截面沿塔高差异不明显的等截面竖直桥塔, 可依据条带假设采用节段模型风洞试验或二维数值模拟的方法研究其气动特性, 此类研究十分广泛^[1-5]。对于截面沿塔高差异明显的变截面倾斜桥塔, 不能把桥塔气动特性的研究简化为二维问题, 需要考虑三维效应的影响。文献[6-8]讨论了变截面竖直桥塔的气动特性。与变截面竖直桥塔相比, 变截面倾斜桥塔气动特性的研究更为少见。李永乐等^[9]测试了一座倾斜角(桥塔与竖直方向的夹角)为 25° 的独柱式变截面桥塔在不同风向角下的整体气动力系数, 并推算了阻力系数沿桥塔高度的变化规律, 发现倾斜改变了桥塔的整体气动力, 同时也改变了气动力沿塔高的分布状况。Marra 等^[10]以一座倾

斜角为 38° 的变截面桥塔为对象, 对比分析了全桥塔模型和桥塔节段模型的风洞试验结果, 研究发现, 桥塔节段模型得到的阻力系数较全桥塔模型高出 50% 左右。

目前, 针对变截面倾斜桥塔并考虑三维效应的研究较少, 研究对象一般为特定倾斜角的桥塔, 不同倾斜角对桥塔气动特性的影响规律尚不明确。鉴于此, 笔者以国内某座拟建的独柱式变梯形截面倾斜钢桥塔为工程背景, 进行了一系列全桥塔刚性模型测压风洞试验, 对比分析了不同倾斜角下桥塔各截面的气动力系数和斯托罗哈数随风向角的变化规律。研究可为倾斜变截面桥塔的风荷载取值和风致振动分析提供参考。

1 工程背景

该桥位于海南省三亚市, 为跨越人工河航道而建, 是一座独柱式钢斜塔斜拉桥。桥梁全长为 233.4 m, 主跨为 98.8 m。桥塔高为 73.6 m, 顺桥向倾斜, 倾斜角为 30° 。塔柱截面是底角为 60° 的等腰梯形, 截面尺寸沿塔高非线性地先变大后变小, 其中塔柱底端截面的底边边长为 2.7 m, 塔柱顶端截面的底边边长约为 0.2 m, 整体呈现出鱼腹形, 桥塔构造图和测点布置如图 1 所示。

* 国家自然科学基金资助项目(52078313, 52008273); 河北省自然科学基金资助项目(E2020210083); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2019118); 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室自主课题资助项目(ZZ2020-14)

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-12-18

当地风环境较为恶劣,基本风速高达 37.3 m/s。与钢筋混凝土桥塔相比,钢桥塔由于具有更小的刚度和更低的阻尼,在风的作用下易发生涡激共振现象。因此,对此桥塔的气动特性进行了分析研究。

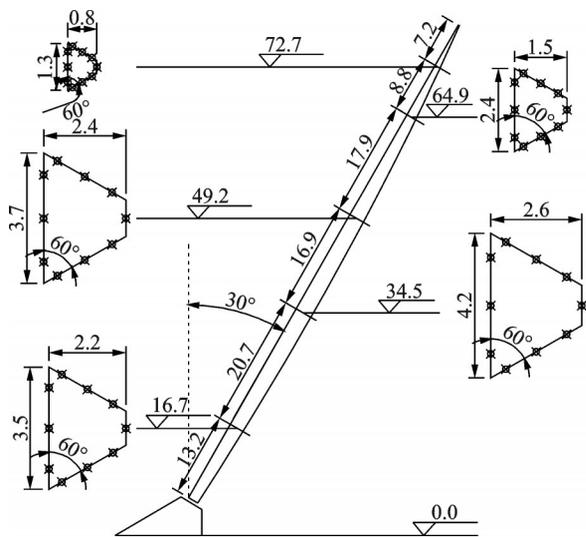


图1 桥塔构造图和测点布置(单位:m)

Fig.1 Structure diagram and pressure tap arrangement of bridge tower (unit:m)

2 试验概况

根据《公路桥梁抗风设计规范》^[11]对阻塞率的要求,采用ABS板以1:70的缩尺比严格按照原桥塔的几何外形制作了全桥塔刚性模型。根据塔柱截面变化的剧烈程度,在塔柱表面非等间距地布设了5圈测点,每圈10个测压孔,测点截面中心距离地面的高度分别为16.7,34.5,49.2,64.9和72.7m(图1)。为方便描述,定义 s 为测点截面距塔柱底端的距离与塔柱总长的比值,5圈测点由下到上 s 依次为0.16,0.40,0.60,0.81和0.92。全桥塔刚性模型测压风洞试验在石家庄铁道大学STU-1风洞低速试验段内进行,该试验段宽为4.4m,高为3.0m,长为24m,最大风速为30m/s。模型底端固定在转盘上,通过计算机控制转盘旋转来精确改变风向角,风洞试验如图2所示。

通过张拉钢丝和在模型内部布置多道纵肋的方式来保证模型的刚度,确保模型不发生明显的位移和变形。在试验过程中模型仅发生轻微抖动,不存在较大幅度的振动响应。风压测量以及数据采集采用电子压力扫描阀和DTC Initium数据采集系统,扫描阀采样频率为330Hz,连续采样时长为30s。本研究用到的仪器还有皮托管(用于测量来流风速)和高精度数显水平尺(用于测量桥塔倾斜角)。

根据项目工程所在地的地形地貌及桥梁周围的建筑环境,确定远方来流为A类风场,采用尖劈、粗糙元和格栅被动模拟方法进行风剖面模拟,地面粗糙度模拟装置如图3所示,采用该装置得到的平均风速剖面和紊流度剖面如图4所示。可以看出,风速剖面与理论风剖面吻合较好。



图2 风洞试验照片

Fig.2 Photograph of wind tunnel test



图3 地面粗糙度模拟装置

Fig.3 Simulator of terrain roughness

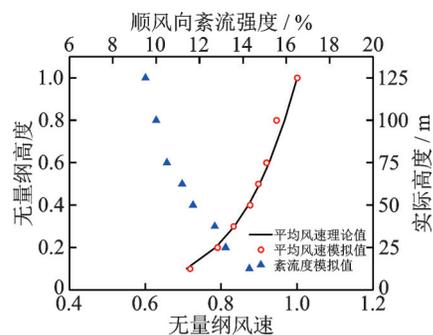


图4 平均风速剖面和紊流度剖面

Fig.4 Mean wind velocity profile and turbulence intensity profile

试验风速为16m/s,风向角 α 的定义如图5所示。以顺桥塔倾斜方向为 0° 风向角,由于对称性,风向角的变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,变化步长为 5° ,共进行37个风向角的测试。为了研究桥塔倾斜角度对气动特性的影响,变化原桥塔倾斜角 β 为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 及 40° ,分别进行了测试。

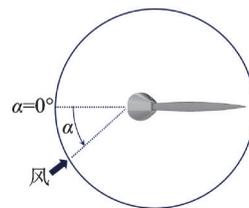


图5 风向角定义

Fig.5 Definition of incidence angle

3 桥塔的气动力特性

定义体轴系下桥塔阻力系数 C_H 、升力系数 C_V 分别为

$$C_H = F_H / 0.5\rho V^2 B \quad (1)$$

$$C_V = F_V / 0.5\rho V^2 L \quad (2)$$

其中： F_H, F_V 分别为由桥塔表面压力积分得到的单位长度的顺桥向阻力和横桥向升力。

试验参数定义如图6所示。需要说明的是，本试验的测试截面始终与桥塔轴线垂直，当桥塔倾斜时气动力系数所在平面与来流方向呈现出不平行的特点，这与常规节段模型试验有所不同。

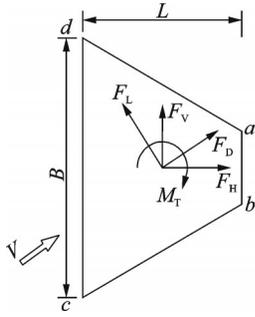


图6 试验参数定义

Fig.6 Definition of test parameters

定义风轴系下桥塔阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 分别为

$$C_D = F_D / 0.5\rho V^2 B \quad (3)$$

$$C_L = F_L / 0.5\rho V^2 L \quad (4)$$

其中： F_D, F_L 分别为由桥塔表面压力积分得到的单位长度的顺风向阻力和横风向升力。

定义扭矩系数 C_M 为

$$C_M = M_T / 0.5\rho V^2 B^2 \quad (5)$$

其中： M_T 为桥塔表面压力积分得到的单位长度的扭矩。

图7为不同风向角下桥塔的气动力系数(体轴坐标系,定义分别见式(1)、式(2)和式(5))。可以看到,当桥塔处于竖直状态时($\beta=0^\circ$),各截面的气动力系数相差不大,而桥塔不同高度位置截面的几何尺寸有所差异,且对应的风速也不一样,这说明竖直桥塔气动力系数的三维效应不明显。

1) 当 $\alpha=0^\circ\sim 35^\circ$ 时,竖直桥塔各截面的阻力系数基本不随 α 的变化而变化,其值稳定在1.75附近。升力系数随 α 的增大由0缓慢减小至-0.4左右;扭矩系数则由0逐渐增大至0.12左右。

2) 当 $\alpha=35^\circ\sim 180^\circ$ 时,随着 α 的增大,阻力系数先由1.75附近减小到-1.0左右,然后在该值附近波动;升力系数表现出了先增大后减小的规律,最大值发生在 $\alpha=105^\circ\sim 150^\circ$ 范围内,其值约为2.0;扭矩系数表现出了先减小后增大的规律,最大扭矩发生在 85° 附近,扭矩系数约为-0.25。这些结果可为此类截面柱体结构的抗风设计提供参考。

当桥塔处于非竖直状态时,各截面气动力系数随 α 的变化规律与竖直桥塔较为类似。由于三维效应,桥塔不同高度截面的气动力系数在一定风向角范围内表现出了明显差异。

1) 阻力系数绝对值在 $\alpha=0^\circ\sim 35^\circ$ 风向角范围内随 s 的增大而逐渐减小,在 $\alpha=90^\circ\sim 180^\circ$ 风向角范围内随 s 的增大而逐渐增大。当 α 为 0° 和 180° 时,各截面阻力系数的差异最为明显。随着 α 的增大或减小,这种差异表现出了逐渐减弱的趋势。

2) 升力系数和扭矩系数绝对值在 $\alpha=35^\circ$ 附近随 s 的增大而减小,在 $\alpha=140^\circ$ 附近随 s 的增大而增大。在这两个风向角附近,与桥塔下部(s 为0.16和0.40)相比,桥塔上部截面的气动力系数随塔高递增的规律更为显著。

3) 当 $\alpha=35^\circ\sim 90^\circ$ 时,桥塔各截面的气动力系数相差不大,并与竖直桥塔的气动力系数接近。这说明当 $\alpha=35^\circ\sim 90^\circ$ 时,气动力系数的三维效应不明显。对比不同倾斜角下桥塔的气动力系数可以发现,随着桥塔倾斜角度的减小,各截面气动力系数的差异逐渐减小,这说明气动力系数的三维效应逐渐减弱。

$\alpha=0^\circ$ (顺桥塔倾斜方向来流)和 $\alpha=180^\circ$ (逆桥塔倾斜方向来流)时不同倾斜角下桥塔的阻力系数如图8所示。由图可以看出,桥塔不同截面的阻力系数随倾斜角的变化规律明显不同。

1) 由图8(a)可知,顺桥塔倾斜方向来流时,截面 $s=0.60, 0.81$ 和 0.92 的阻力系数随倾斜角的增大而减小,截面 $s=0.16$ 和 0.40 的阻力系数随倾斜角的增大表现出先略有增大后逐渐减小的规律,在 $\beta=20^\circ$ 附近达到最大值,两截面的最大阻力系数分别为竖直桥塔的1.02和1.10倍。

2) 图8(b)可知,逆桥塔倾斜方向来流时,截面 $s=0.81$ 和 0.92 的阻力系数绝对值随倾斜角的增大表现出先增大后减小的规律,最大值同样发生在 $\beta=20^\circ$ 附近,两截面的最大阻力系数绝对值分别达到了竖直桥塔的1.25和1.39倍。截面 $s=0.16$ 和 0.40 的阻力系数绝对值随风向角的增大则表现出逐渐减小的规律。

3) 与其他截面相比,接近中间位置的截面($s=0.16$)的阻力系数随倾斜角的变化较为平缓。

综上可知,桥塔倾斜会使桥塔受到的气动阻力呈现出沿高度分布不均匀的特点。当顺桥塔倾斜方向来流时,倾斜会使桥塔上部截面的阻力减小,使桥塔下部截面的阻力增大。当逆桥塔倾斜方向来流时,倾斜会使上部截面的阻力增大,使下部截面的阻力减小。倾斜对桥塔阻力的放大效应在 $\beta=20^\circ$ 附近

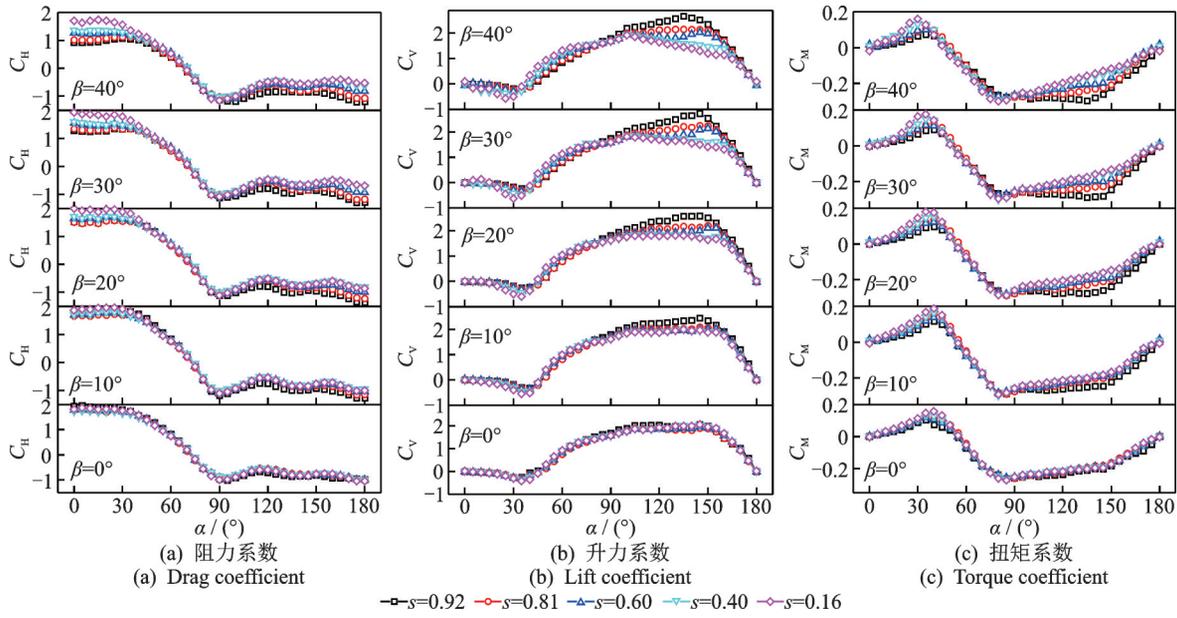


图 7 不同风向角下桥塔的气动力系数

Fig.7 Aerodynamic force coefficients of bridge tower at different incidence angles

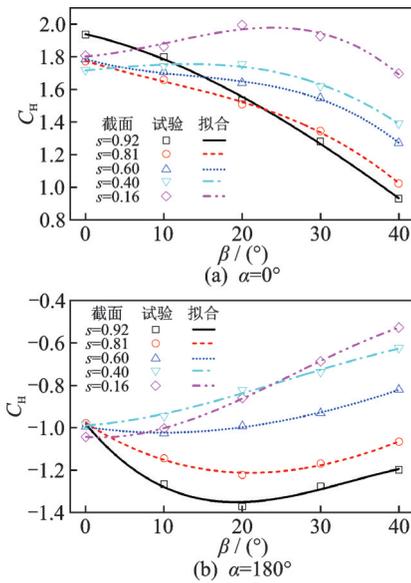


图 8 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时不同倾斜角下桥塔的阻力系数

Fig.8 Drag coefficients of bridge tower at different inclination angles when $\alpha=0^\circ$ and $\alpha=180^\circ$

最为明显,因此在进行桥塔设计时,宜避开此倾斜角。实际上,倾斜桥塔受到的气动力在 $\alpha=30^\circ$ 和 140° 附近也表现出了类似的规律。当 $\alpha=30^\circ$ 时,倾斜会使桥塔上部截面受到的气动力减小,使桥塔下部截面受到的气动力增大。当 $\alpha=140^\circ$ 时,倾斜会使桥塔上部截面受到的气动力增大,使桥塔下部截面受到的气动力减小。文献[12]以等截面方形断面柱体为对象,研究了升力系数随倾斜角的变化规律,得到了与本研究试验类似的规律。

为了给实际工程取值提供参考,笔者对 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=180^\circ$ 时桥塔各截面阻力系数随倾斜角的变化曲

线进行了三次多项式拟合,各截面阻力系数的拟合效果见图 8,阻力系数拟合公式各项系数见表 1。拟合公式为

$$C_D = A_0 + A_1\beta + A_2\beta^2 + A_3\beta^3 \quad (6)$$

其中: β 为倾斜角(弧度制); A_0, A_1, A_2 和 A_3 为三次多项式各项系数。

表 1 阻力系数拟合公式各项系数

Tab.1 The coefficient of fitting formula for drag coefficient

$\alpha/(\circ)$	s	A_0	A_1	A_2	A_3
0	0.92	1.939	-0.638	-1.496	0.496
	0.81	1.775	-0.851	1.056	-1.972
	0.60	1.786	-0.784	2.180	-3.021
	0.40	1.715	0.281	-0.153	-1.318
	0.16	1.802	0.204	2.075	-3.714
180	0.92	-0.983	-2.533	5.285	-2.996
	0.81	-0.978	-1.359	2.177	-0.586
	0.60	-0.996	-0.321	1.001	-0.262
	0.40	-0.989	0.149	1.105	-0.824
	0.16	-1.044	-0.150	2.553	-1.836

4 桥塔的旋涡脱落特性

定义无量纲参数斯托罗哈数 St 来反映桥塔的旋涡脱落特性

$$St = fL/V \quad (7)$$

其中: f 为旋涡脱落频率,可由风轴坐标系下的升力系数时程经过傅里叶变换获得。

$\alpha=0^\circ$ 时原桥塔风轴系升力系数时程如图 9 所示。可以看到,风轴系升力系数始终在 0 附近波动。随着 s 由 0.92 减小到 0.16,风轴升力系数波动的幅度呈现出逐渐增大的趋势。

$\alpha=0^\circ$ 时不同倾斜角下升力系数傅里叶幅值谱如图 10 所示,分别为无倾角($\beta=0^\circ$)、中等倾角($\beta=20^\circ$)和大倾角($\beta=40^\circ$)情况。可以看到,幅值

谱图中频率成分较多,这可能是由前方来流的紊流(A类风场)成分引起。截面 $s=0.92$ 和 0.81 的卓越频率较不明显,说明这两个截面未表现出明显的旋涡脱落现象,这可能与端部效应有关。当 $\beta=40^\circ$ 时(图 10(c)),桥塔各截面均未表现出明显的卓越频率,这表明随着倾斜角的增大,由于三维效应的增强,桥塔各截面旋涡脱落会变得不明显。

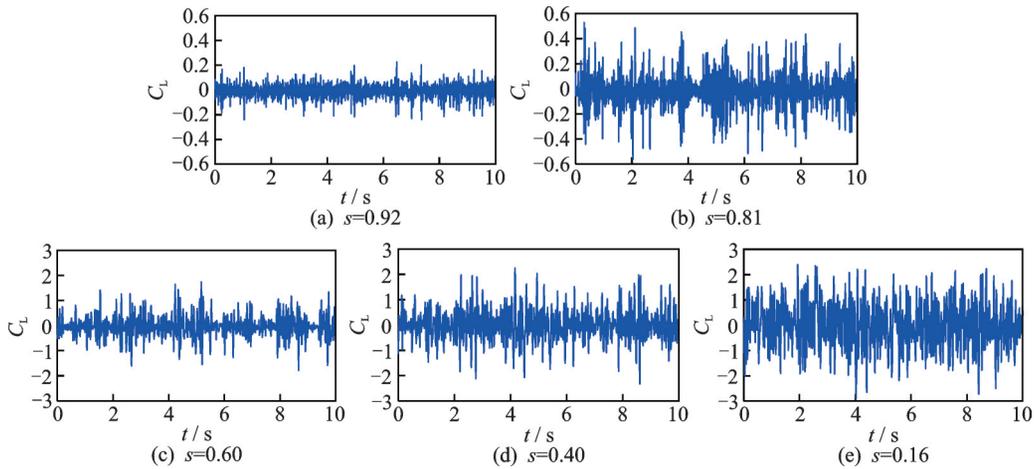


图 9 $\alpha=0^\circ$ 时原桥塔风轴系升力系数时程

Fig.9 Time history of lift coefficient in wind shafting of original bridge tower when $\alpha=0^\circ$

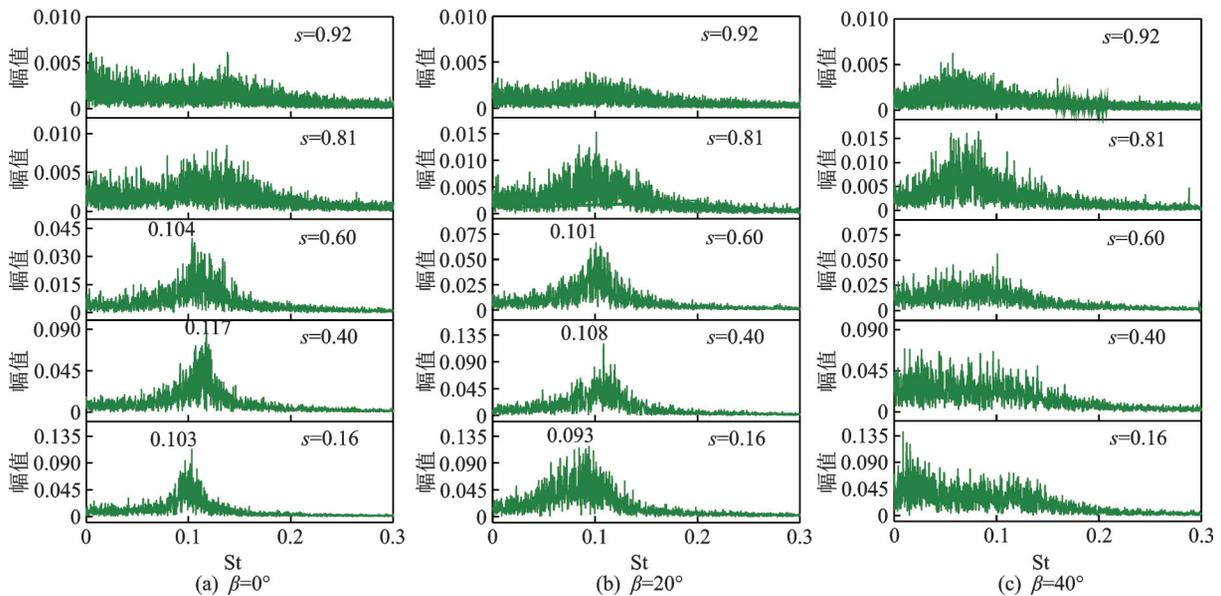


图 10 $\alpha=0^\circ$ 时不同倾斜角下升力系数傅里叶幅值谱

Fig.10 Fourier amplitude spectra of lift coefficient at different inclination angles when $\alpha=0^\circ$

不同风向角下桥塔的斯托罗哈数如图 11 所示。由图可以看出:截面 $s=0.92$ 在所有工况下均未表现出明显的旋涡脱落现象,只有当 α 在 0° 和 120° 附近的一定风向角范围内时,桥塔其他截面才会表现出较为明显的旋涡脱落,而这一风向角范围随着截面高度的变化而变化;随着 s 由 0.92 减小到 0.16,这一风向角范围呈现出逐渐扩大的趋势;当 $s=0.16$ 时,

风向角范围最大,为 $\alpha=0^\circ\sim 30^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ\sim 150^\circ$;桥塔各截面的斯托罗哈数随倾角变化不大,当 α 在 0° 附近一定风向角范围内时,各截面的斯托罗哈数在 0.11 附近波动;当 α 在 120° 附近一定风向角范围内时,各截面的斯托罗哈数在 0.15 附近波动。另外,当 $\alpha=0^\circ$ 时,来流与桥塔截面的底边垂直;当 $\alpha=120^\circ$ 时,来流与桥塔截面的腰垂直。

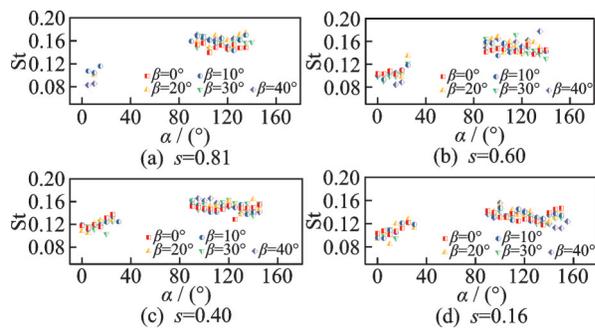


图11 不同风向角下桥塔的斯托罗哈数

Fig.11 The Strouhal number of bridge tower at different incidence angles

5 结论

1) 受倾斜的影响,桥塔不同高度位置的气动力系数表现出明显的差异。对于阻力系数,这种差异主要发生在 $\alpha=0\sim 30^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ\sim 180^\circ$ 时;对于升力和扭矩系数,这种差异主要发生在 $\alpha=30^\circ$ 和 $\alpha=140^\circ$ 附近。

2) 当 $\alpha=0^\circ$ (顺桥塔倾斜方向来流)和 30° 左右时,倾斜使桥塔上部截面的气动力减小,下部截面的气动力增大。当 $\alpha=140^\circ$ 和 180° (逆桥塔倾斜方向来流)左右时,倾斜使桥塔上部截面的气动力增大,下部截面的气动力减小。

3) 当 α 在 0° 和 120° (来流方向与等腰梯形截面的腰垂直)附近时,桥塔表现出较为明显的旋涡脱落现象,斯托罗哈数分别在0.11和0.15附近波动。倾斜角的增大使桥塔各截面的旋涡脱落变得不明显。

参 考 文 献

[1] CHARUVISIT S, KIMURA K, FUJINO Y. Experimental and semi-analytical studies on the aerodynamic forces acting on a vehicle passing through the wake of a pylon in cross wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 749-780.

[2] BELLOLI M, FOSSATI F, GIAPPINO S, et al. On the aerodynamic and aeroelastic response of a bridge tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99: 729-733.

[3] MIRAN S, SOHN C. Influence of incidence angle on the aerodynamic characteristics of square cylinders with rounded corners[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2016, 26 (1) : 269-283.

[4] WANG X, GU M. Experimental study on Re number effects on aerodynamic characteristics of 2D square prisms with corner modifications[J]. Wind and

Structures, 2016, 22(5): 581.

- [5] MA C, LIU Y, YEUNG N, et al. Experimental study of across-wind aerodynamic behavior of a pylon [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24: 04018116.
- [6] 何旭辉,方东旭,王汉封,等.超高多肢斜拉桥桥塔气动力系数研究[J].中国铁道科学,2017,38(4): 24-32.
HE Xuhui, FANG Dongxu, WANG Hanfeng, et al. Study on aerodynamic coefficient of ultrahigh multi-limb cable-stayed pylon [J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 24-32. (in Chinese)
- [7] 陶齐宇,李永乐,张明金,等.斜拉桥H形桥塔气动力系数风洞试验研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(13): 64-68.
TAO Qiyu, LI Yongle, ZHANG Mingjin, et al. Measurement for aerodynamic coefficients of H-shape pylon of cable-stayed bridge by wind tunnel test [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(13) : 64-68. (in Chinese)
- [8] YING X, XU F, ZHANG Z, et al. Large eddy simulation of aerodynamic forces on a bridge pylon [J]. Advanced Materials Research, 2011(243/249) : 1578-1582.
- [9] 李永乐,刘多特,李少波,等.独柱式变截面倾斜桥塔气动特性风洞试验研究[J].实验流体力学,2013,27(5): 38-43.
LI Yongle, LIU Duote, LI Shaobo, et al. Wind tunnel test on aerodynamic characteristics of inclined single-column pylons with variable cross section [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(5) : 38-43. (in Chinese)
- [10] MARRA A, MANNINI C, Bartoli G. Wind tunnel modeling for the vortex-induced vibrations of a yawed bridge tower [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(5): 04017006.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3360-01—2018 公路桥梁抗风设计规范[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [12] HU G, TSE K, KWOK K. Galloping of forward and backward inclined slender square cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 232-245.



第一作者简介:刘小兵,男,1982年3月生,博士、副教授。主要研究方向为桥梁结构的风荷载与风致振动研究。曾发表《并列双箱梁的气动干扰效应对阻力系数的影响》(《土木工程学报》2017年第30卷第11期)等论文。
E-mail: x_b_liu@126.com