

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.037



全风向角下二维切角方形桥塔 气动措施数值模拟

张亮亮^{1,2}, 吴蕊恒¹, 倪志军¹, 吴波¹

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学城市科技学院, 重庆 402167)

摘要:采用 SST $K-\omega$ 湍流模型, 对二维切角方形桥塔气动措施进行了全风向角下的 CFD 数值模拟研究, 雷诺数为 5×10^4 。分析了添加气动措施对桥塔气动力系数、横风向气动力频谱、斯托罗哈数的影响, 并与试验结果进行了对比, 二者吻合较好。研究表明, 风向角 $\alpha \leq 25^\circ$, 升力系数呈下降趋势, 添加翼板会显著增大桥塔升力系数; $\alpha > 25^\circ$, 升力系数呈上升趋势, 添加气动措施对桥塔升力系数没有影响。添加气动措施后桥塔阻力系数会增大, 最小阻力系数出现在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 风向角范围内。不同风向角下的模型涡脱方式不同, 包含的涡脱频率也不同, 漩涡脱落不一定是单纯的正弦现象。添加气动措施会减小模型 St 数, 最大 St 数出现在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 风向角之间。

关键词:切角方形桥塔; 湍流模型; 气动措施; 气动特性

中图分类号: U443.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)02-0116-06

Numerical simulation on aerodynamic measures of 2D-corner-cutoff square cylinder under all yaw wind angles

Zhang Liangliang^{1,2}, Wu Ruiheng¹, Ni Zhijun¹, Wu Bo¹

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. City College of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 402167, P. R. China)

Abstract: Based on SST $K-\omega$ turbulent model, aerodynamic measures of 2D-corner-cutoff square cylinder were simulated under all yaw wind angles, at $Re = 5 \times 10^4$. The aerodynamic coefficient, lift frequency spectrum, strouhal number were studied after adding aerodynamic measures, which showed good agreement with other experiment test. The research results show that when wind yaw angle $\alpha \leq 25^\circ$, the lift coefficients show a decreasing trend and increase greatly after adding fins; $\alpha > 25^\circ$, The lift coefficients are on the rise and aerodynamic measures can't influence it. Drag coefficient increase after adding aerodynamic measures and the minimum of drag coefficient is at $\alpha = 5 \sim 10^\circ$. Different vortex shedding pattern include different vortex-shedding frequency when the wind yaw angle is changing and vortex shedding isn't always simple harmonic wave. St number will diminish after adding aerodynamic measures and the maximum St number is at $\alpha = 5^\circ \sim 15^\circ$.

Keywords: 2D-corner-cutoff square cylinder; turbulent model; aerodynamic measures; aerodynamic behavior

收稿日期: 2018-08-02

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K201802501); 国家自然科学基金(51778093); 重庆市研究生科研创新项目(CYB17042)

作者简介: 张亮亮(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁力学性能分析、桥梁抗风研究, E-mail: zll200510@126.com.

Received: 2018-08-02

Foundation item: Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission(No. KJZD-K201802501); National Natural Science Foundation of China(No. 51778093); Research and Innovation Project of Graduate Students in Chongqing(No. CYB17042)

Author brief: Zhang Liangliang (1956-), professor, doctoral supervisor, main research interests: bridge mechanics performance analysis & wind-resistance of bridge, E-mail: zll200510@126.com.

随着社会经济的飞速发展,桥梁跨度越来越大,因而桥塔高度也越来越高,在自然风作用下,桥塔越来越容易发生风致振动。尤其是钢结构桥塔,具有自重轻、阻尼小等特点,在较低风速下可能产生较大振幅,这会严重影响桥梁使用寿命和结构安全。因此,有必要对桥塔的气动措施进行研究。

方形截面是桥塔基本截面之一,以往很多学者^[1-5]详细研究了方柱模型的气动力系数、风压分布规律、斯托罗哈数、尾流特性等。但在很多情况下,方形截面抗风性能不能满足实际抗风需求。为提高桥塔抗风性能,通常对方形截面做角部处理,Tamura等^[6-7]通过风洞试验和 CFD 数值模拟方法研究了方柱切角和圆角处理气动特性的变化,结果表明,切角和圆角处理使模型尾流变窄,进而减小方柱的阻力系数。王新荣等^[8]对不同圆角和切角处理的方柱进行了风洞试验,雷诺数 $Re = 1 \times 10^5 \sim 4.8 \times 10^5$,结果表明,切角率 $\leq 15\%$ 的方柱,气动特性基本不随雷诺数而改变。李永乐等^[9]通过风洞试验方法,对桥塔进行了大缩尺比气弹模型试验,研究了不同挖角方式对桥塔涡振及驰振性能的影响,并确定了最优挖角方式。此外,还有学者^[10-12]通过数值模拟或风洞试验详细研究了大跨桥梁桥塔的风振性能。

适当的角部处理虽然能改善桥塔抗风性能,但在某些情况下仍不能抑制桥塔风振,这时需要考虑添加其他气动措施。朱乐东等^[13]采用多孔扰流板扰乱或削弱了桥塔两侧有规律的漩涡脱落,进而显著减小了杭州之江大桥钢桥塔的涡振。对于添加气动措施后的桥塔,周围流场更加复杂,对桥塔气动措施的研究,目前多采用风洞试验的方法。风洞试验造价高、周期长,而且很难显示桥塔周围流场特性。笔者采用 CFD 数值模拟方法研究了全风向角下切角方形桥塔切角部位增加垂直翼板(fins)和圆弧导流板(curved guided vane)对桥塔气动力系数、横风向气动力频谱、斯托罗哈数的影响,并与试验结果进行了对比。

1 控制方程及模型建立

1.1 控制方程

在直角坐标系下,对二维不可压黏性流体可用雷诺时均 N-S 方程描述。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

式中: ρ 和 μ 分别为空气密度和分子黏性; p 为压力; t 为时间; u_i 和 u_j ($j=1,2$)分别为气流沿 x_i ($i=1,2$)的平均和脉动速度; $-\rho \overline{u_i u_j}$ 为雷诺应力。

上述雷诺应力的引入使得控制方程不封闭,需要引入湍流模型求解。基于涡黏假设,可将雷诺应力表示为

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

式中: $\mu_t = \rho C_u k^2 / \epsilon$ 为湍流黏性系数; C_u 为经验常数; k 和 ϵ 分别为湍流动能和耗散率,需要通过求解湍流模型方程来确定。

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,该模型综合了标准 $k-\epsilon$ 模型和标准 $k-\omega$ 模型,且比标准 $k-\omega$ 模型有更高的精度和可信度^[14]。

1.2 模型设置

方形桥塔截面宽度 B 为 110 mm,切角长度 9 mm(切角率约 8%),如图 1(a)所示。分别在桥塔切角部位添加 10 mm 垂直翼板(fins)和半径为 8 mm 的圆弧导流板(curved guided vane),如图 1(b)、(c)所示。

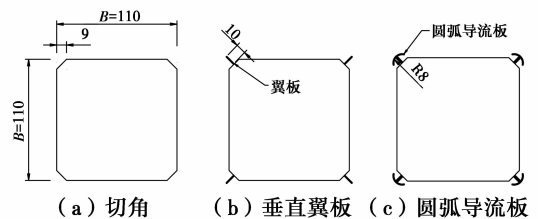


图 1 模型尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of model

由于对称性,每个模型风向角取 $0 \sim 45^\circ$,以 5° 为间隔按顺时针旋转,以图 1 中模型(a)为例,如图 2 所示,其他模型风向角设置同模型(a)。其中,各风向角下的升力系数、阻力系数与 St 数均以模型宽度 B 作为参考尺寸,气动力系数采用风轴坐标系下的定义,阻力系数为 X 方向,升力系数为 Y 方向。气动力系数及 St 数计算公式见式(4)~式(6)。

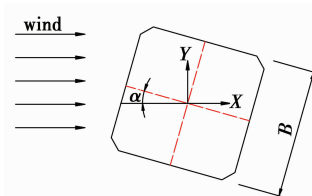


图 2 风向角示意图

Fig. 2 Wind yaw angle

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho U^2 BL} \quad (4)$$

$$C_l = \frac{F_l}{0.5\rho U^2 BL} \quad (5)$$

$$St = \frac{fB}{U} \quad (6)$$

式中： C_d 为模型阻力系数； F_d 为阻力； C_l 为升力系数； F_l 为升力； St 为斯托罗哈数； f 为涡脱频率； ρ 为空气密度，取 1.225 kg/m^3 ； U 为来流风速，取 6.8 m/s ； B 为模型宽度，取 0.11 m ； L 为模型展向宽度，取 1 m 。

2 网格划分及求解设置

2.1 网格划分

计算域及网格分区如图 3 所示， S_1 和 S_2 区域采用三角形非结构化网格， S_3 区域采用结构化网格，为了节约网格生成时间，将 S_1 区域网格旋转一定角度来实现不同风向角的模拟。其中， S_1 与 S_2 ， S_2 与 S_3 区域之间采用 interface 交界面。模型壁面生成一定数量的边界层网格，第 1 层网格高度为 0.036 mm ，网格增长率为 1.08 ，满足最大 $Y^+ \approx 1$ ，所有工况网格数量均在 10 万左右。以 30° 风向角添加翼板后的模型为例，网格划分示意图如图 4 所示。

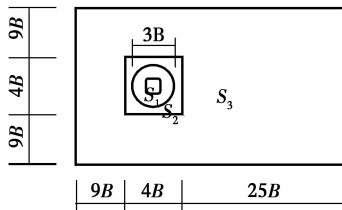
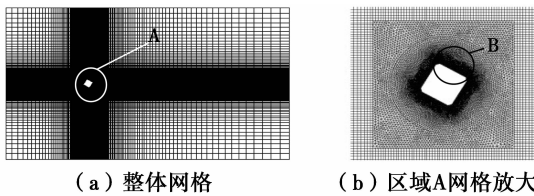


图 3 计算域分区示意图

Fig. 3 Grid partition among computational domain



(a) 整体网格
(b) 区域A网格放大
(c) 区域B网格放大
图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Computational grid in the domain

2.2 求解设置

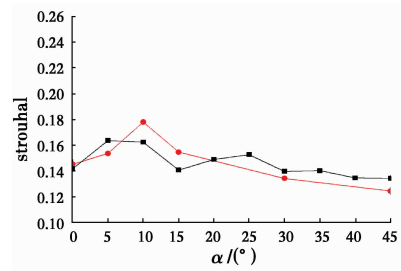
速度入口采用 velocity-inlet 边界条件，风速为 6.8 m/s 的均匀流，出口采用 outflow 边界条件，上

下采用 symmetry 对称边界条件，模型表面采用 no-slip wall 壁面边界条件。湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型，计算采用非定常二阶隐式格式，采用速度-压力解耦的 SIMPLE 算法，压力方程采用二阶格式离散，动量方程、湍流动能方程和湍流耗散率方程均采用 QUICK 格式。指定连续方程、速度场、 k 和 ω 的迭代收敛残差为 1×10^{-5} ，时间步长为 0.0005 s ，其他参数均采用默认值。

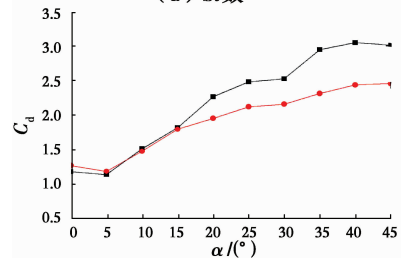
3 计算结果

3.1 计算结果与文献对比

全风向角下切角方柱绕流的文献较少，且有些文献给出的数据不全，能用于比较的非常有限。目前，切角率(切角长度/模型宽度)与本文最接近的只有 Yamagishi 等^[15]的试验结果。以图 1(a)中模型与 Yamagishi 等的试验结果进行对比，雷诺数为 5×10^4 ，切角率为 8% ；Yamagishi 等的试验雷诺数为 6×10^4 ，切角率为 10% ，来流均为均匀流，对比结果如图 5 所示。除 10° 和 15° 风向角 St 数与试验结果差别较大以外，其他风向角 St 数与试验结果吻合较好。平均阻力系数在 15° 以前与试验结果吻合很好， 15° 以后模拟结果大于试验结果且风向角越大差别越大，切角率的不同以及风洞试验湍流度的影响均可能改变平均阻力系数，使数值模拟结果与风洞试验出现较大差别，但模拟结果与试验结果趋势完全一致，并且本文目的在于研究气动措施对切角方柱的影响，可忽略与试验结果的差别。总体来说，模拟结果具有一定可靠性。



(a) St 数



(b) 平均阻力系数

注：—■— present result —●— Yanagishi(2009)

图 5 St 数、平均阻力系数与试验对比

Fig. 5 Comparison of present result and test result

3.2 气动力系数结果分析

增加垂直翼板和圆弧导流板以后,模型在不同风向角下的平均升力系数与平均阻力系数如图 6 所示。 $\alpha \leq 25^\circ$ 时,3 种模型平均升力系数均呈下降趋势,且添加翼板后模型升力系数绝对值明显变大,除 10° 风向角以外,增加圆弧导流板不会明显增加升力系数。 $\alpha > 25^\circ$ 时,3 种工况的升力系数均呈现上升趋势,但各个风向角对应的升力系数差别不大,添加圆弧导流板和翼板不会明显影响模型升力系数。升力系数最小值均出现在 25° 风向角。增加翼板和导流板以后会增加各个风向角对应的阻力系数,其中,添加翼板后各个风向角对应的阻力系数最大。因为增加气动措施后模型尾流区变宽,增加了压差阻力,使阻力系数变大,以 0° 风向角为例,如图 7 所示。不添加任何气动措施时,模型尾流区窄而长;添加导流板后,尾流区宽度变大,尾流长度变短;添加翼板后,尾流区宽度最大且长度最短。风向角 $\alpha < 5^\circ$ 时,3 种模型阻力系数均下降; $\alpha > 5^\circ$ 时,阻力系数逐渐上升。阻力系数最小值均出现在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 范围内。

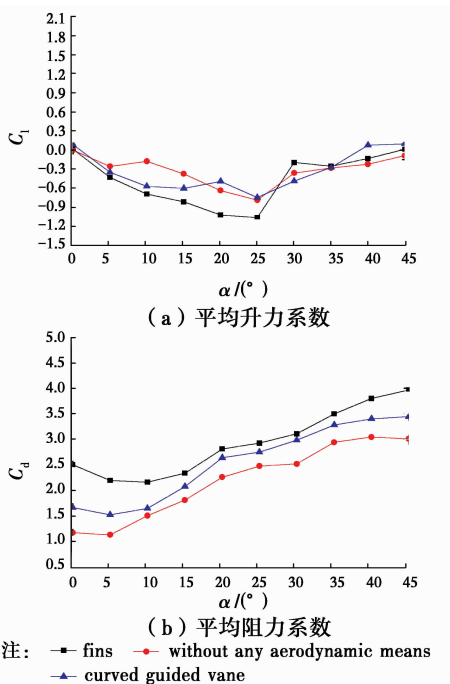


图 6 各风向角下模型平均升力系数与阻力系数
Fig. 6 Mean lift and drag under all wind angles

图 8 为模型升力系数和阻力系数均方差值,在 $0 \sim 5^\circ$ 风向角内,添加翼板后桥塔升力系数和阻力系数均方差值最大,圆弧导流板次之,不添加任何气动措施的桥塔最小。 10° 风向角以后升力系数和阻力系数均方差值差别不大,添加气动措施不会明显改变升力系数和阻力系数均方差值。

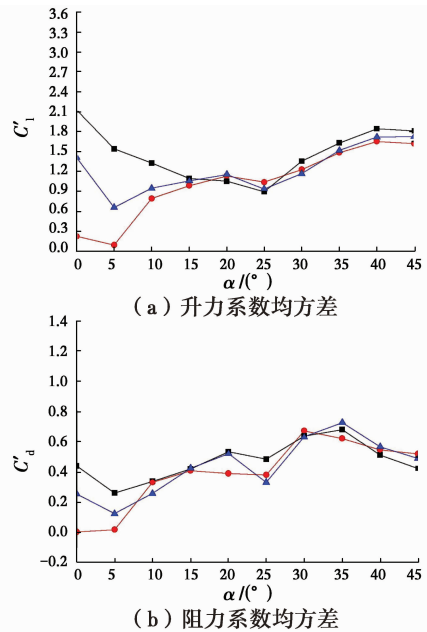


图 8 气动力系数均方差值
注: ■ fins ● without any aerodynamic means ▲ curved guided

Fig. 8 Standard deviation of aerodynamic coefficient

3.3 升力系数频谱与 St 数

气流流经模型表面会产生周期性漩涡脱落现象,通过分析升力系数频谱能识别 St 数,同时,也能识别不同频率的横向气动力分量。图 9 为不同风向角下 3 种模型对应的升力系数频谱图,横坐标为折算频率(fB/U),纵坐标为归一化幅值大小。从图 9 可以看出,对于不加任何气动措施的桥塔,除 15° 和 30° 风向角对应的频谱有两个明显峰值以外,其余风向角均只有一个明显窄带峰值。 15° 风向角对应峰值折算频率为 $0.141, 0.182$ 。 30° 风向角对应峰值折算频率为 $0.07, 0.14$ 。当风向角 $\alpha \leq 10^\circ$ 时,频谱图只有一个明显窄带峰值,说明漩涡脱落只有一个频率,当 $\alpha > 10^\circ$ 时,频谱图逐渐包含其他频率成分,说明漩涡脱落不再是单纯的正弦现象。对于添加翼板后的桥塔,同样也在 30° 风向角频谱出现了明显的两个峰值,对应折算频率分别为 $0.06, 0.119$,而在其他风向角均只有一个明显峰值。对于添加圆弧导流板后的桥塔,在 5° 风向角出现了两个明显峰值,对应折算频率为 $0.068, 0.133$ 。在 30° 风向角频谱图也有两个明显峰值,对应折算频率为 $0.054, 0.12$ 。结果表明,不同风向角下的模型漩涡脱落方式不同,包

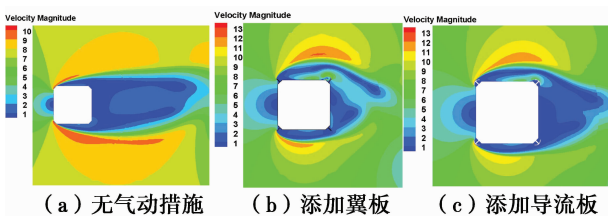


图 7 0° 风向角模型速度云图
Fig. 7 Distribution of velocity magnitude at 0°

含的涡脱频率分量也不同,对于一个结构有对应的固有频率,而不同频率分量对结构的涡激共振影响

巨大。因此,在做抗风设计时,有必要识别不同频率的气动力分量,指导实际工程应用。

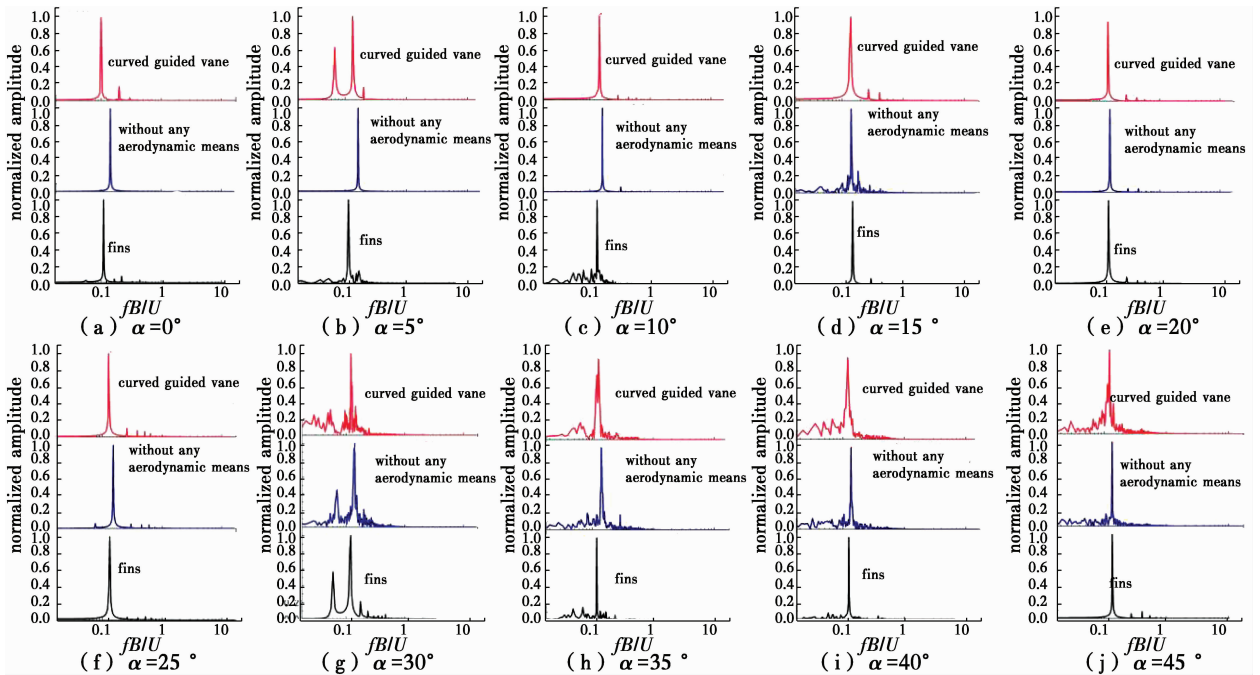
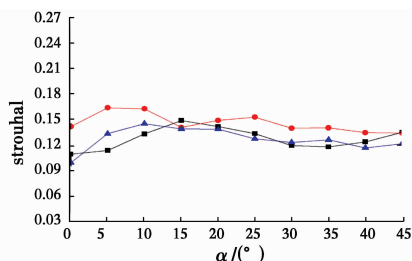


图 9 升力系数频谱

Fig. 9 Lift frequency spectrum

图 9 频谱图中幅值最大分量对应的折算频率即 St 数,现将不同风向角 3 种模型对应的 St 提取出来,如图 10 所示。增加翼板和圆弧导流板后, St 均变小,风向角 $\alpha < 15^\circ$ 时,两种气动措施使 St 数明显减小,当风向角 $\alpha \geq 15^\circ$ 后, St 数减小幅度变小。对于添加翼板和导流板两种模型的 St 数差别不大,说明两种气动措施对截面 St 数影响不明显。随着风向角的增大,3 种模型 St 数均出现先增大后减小的趋势,最大值均出现在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 风向角之间。由 St 数计算式(6)可知,对于同一结构固有频率 f 和尺寸 B 均不变, St 减小后对应的涡振风速将会增大,因此,增加圆弧导流板和翼板会增加桥塔涡振临界风速,但桥塔升力系数中含有其他频率分量,除了考虑最大振幅对应的频率分量以外,还应该考虑其他频率分量对结构涡振的影响。



注: —■— fins —●— without any aerodynamic means —▲— curved guided

图 10 斯托罗哈数随风向角变化

Fig. 10 Strouhal number

4 结论

1) 风向角 $\alpha \leq 25^\circ$, 模型升力系数曲线呈下降趋势,添加翼板会明显增加切角方形桥塔平均升力系数,除了 10° 风向角,添加圆弧导流板不会增加桥塔升力系数; $\alpha > 25^\circ$ 模型升力系数曲线呈上升趋势,添加气动措施对桥塔平均升力系数影响不大。添加翼板后桥塔平均阻力系数最大,圆弧导流板次之,不添加任何气动措施的桥塔阻力系数最小。每种模型阻力系数最小值均出现在风向角为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 范围内。

2) 在 $0 \sim 5^\circ$ 风向角内,添加翼板后桥塔升力系数和阻力系数均方差值最大,圆弧导流板次之,不添加任何气动措施的桥塔最小。 10° 风向角以后添加气动措施不会明显改变升力系数和阻力系数均方差值。

3) 不同风向角下的模型漩涡脱落方式不同,包含的涡脱频率分量也不同,漩涡脱落不一定是单纯的正弦现象。

4) 添加气动措施会减小桥塔 St 数,增大桥塔涡振临界风速, St 数最大值均出现在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 风向角之间。

参考文献:

[1] SAMANI M, BERGSTROM D J. Effect of a wall on

- the wake dynamics of an infinite square cylinder [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 55: 158-166.
- [2] TRIAS F X, GOROBETS A, OLIVA A. Turbulent flow around a square cylinder at Reynolds number 22,000: A DNS study [J]. *Computers & Fluids*, 2015, 123: 87-98.
- [3] 林纬,喻九阳,郑小涛,等. 脉动流方柱绕流特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(2): 338-341.
LIN W, YU J Y, ZHENG X T, et al. Numerical simulation of the pulsating flow past a square cylinder [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35 (2): 338-341. (in Chinese)
- [4] SISALAH S A, FILALI E G, CHERRARED D. A numerical study of coherent flow structures around a cubic bluff body using large eddy simulation [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2016, 38(3): 827-842.
- [5] JIANG X H, ANDREPOULOS Y, LEE T, et al. Numerical investigations on the vortex-induced vibration of moving square cylinder by using incompressible lattice Boltzmann method [J]. *Computers & Fluids*, 2016, 124: 270-277.
- [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(1/2/3): 135-145.
- [7] 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, 74/75/76: 531-542.
- [8] 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 X R, GU M. Experimental study on wind pressure distributions of 2-D square prism with various corner treatments [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 79-88. (in Chinese)
- [9] 李永乐,廖海黎,李佳圣,等. 大跨度斜拉桥钢桥塔基于涡振的气动选型及驰振性能风洞试验研究 [J]. *实验流体力学*, 2012, 26(1): 50-54.
LI Y L, LIAO H L, LI J S, et al. Vortex-induced-vibration-based aerodynamic optimization and galloping characteristics of steel pylon in long span cable-stayed bridge by wind tunnel test [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(1): 50-54. (in Chinese)
- [10] 唐浩俊,李永乐,胡朋. 串列双塔柱风荷载及涡振性能研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 378-383.
TANG H J, LI Y L, HU P. Wind loads and vortex-induced vibration of two tower columns in tandem arrangement [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30 (1): 378-383. (in Chinese)
- [11] 李永乐,朱佳琪,唐浩俊. 基于 CFD 和 CSD 耦合的涡激振和颤振气弹模拟 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(12): 85-89, 114.
LI Y L, ZHU J Q, TANG H J. Aeroelastic simulation of vortex-induced vibration and flutter based on CFD/CSD coupling solution [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(12): 85-89, 114. (in Chinese)
- [12] LARSEN A, LAROSE G L. Dynamic wind effects on suspension and cable-stayed bridges [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 334: 2-28.
- [13] 朱乐东,张宏杰,张海. 钢桥塔涡振气动控制措施研究 [J]. *振动工程学报*, 2011, 24(6): 585-589.
ZHU L D, ZHANG H J, ZHANG H. Aerodynamic mitigation measures for vortex-induced vibration of steel tower [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(6): 585-589. (in Chinese)
- [14] LIAW K F. Simulation of flow around bluff bodies and bridge deck section using CFD [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2005.
- [15] YAMAGISHI Y, KIMURA S, OKI M, et al. Effect of corner cutoffs on flow characteristics around a square cylinder [C] // 10TH International Conference on Fluid Control, Measurement, and Visualization, August 17-21, 2009, Moscow, Russia.

(编辑 胡英奎)