

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311038



桥面水马布置对大跨度悬索桥 涡激振动的影响

周椿彬¹, 周光伟², 陈昌萍^{1,2,3}

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361000;

2. 厦门理工学院 福建省风灾害与风工程重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 厦门海洋职业技术学院, 福建 厦门 361100)

摘要: 为研究桥面水马布置对桥梁涡激振动的影响,以某大跨度悬索桥为工程背景,基于计算流体力学(CFD)方法,研究不同风速、桥面水马布置方案下的桥梁断面受力情况及其周围流场的变化规律。结果表明:在桥面上布置水马能够改变桥梁断面周围流场的压力和速度分布,在桥梁上部和背风侧产生漩涡,可观察到明显的漩涡脱落现象,与无布置水马的桥梁相比,其发生涡激振动的可能性大大提升;水马与桥面边缘的距离越大,漩涡脱落现象越不明显,桥梁发生涡激振动的可能性越低。

关键词: 桥梁; 水马布置; 漩涡脱落; 涡激振动; 数值模拟

中图分类号: U 446.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0712-09

Influence of Bridge Deck Barriers Arrangement on Vortex-Induced Vibration of Long-Span Suspension Bridge

ZHOU Chunbin¹, ZHOU Guangwei², CHEN Changping^{1,2,3}

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering,

Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China)

Abstract: In order to study the influence of bridge deck barriers arrangement on bridge vortex-induced vibration, taking a long-span suspension bridge as the engineering background, based on the computational fluid dynamics (CFD) method, the stress situation of bridge section and the variation of surrounding flow field are studied under different wind speeds and bridge deck barriers arrangement. The results show that the arrangement of the barriers on the bridge deck can change the pressure and speed distribution of surrounding flow field of bridge section, and the vortex is generated in the upper part and the leeward side of the bridge, obvious vortex shedding phenomenon can be observed, and compared with the bridge without the barriers, the possibility of vortex-induced vibration increases greatly. The greater the distance between the barriers and the edge of the bridge deck, the less obvious the vortex shedding phenomenon, and the lower the possibility of vortex-induced vibration of the bridge.

Keywords: bridge; barriers arrangement; vortex shedding; vortex-induced vibration; numerical simulation

收稿日期: 2023-11-28

通信作者: 陈昌萍(1971-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事桥梁风工程的研究。E-mail:cpchen@hnu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178510);福建省科技计划项目(引导性项目)(2021Y0042)

水马作为桥梁临时维护的围挡措施,广泛应用于桥梁的检测、维修等市政工程中。因市政工程的特点,水马往往沿桥梁跨径采取紧密排列的形式进行布置,但这样的水马布置改变了桥梁的气动外形,增加了桥梁产生涡激振动的可能性。2020年5月5日,广东省的虎门大桥进行市政施工时,因水马的布置改变了桥梁的气动外形,进而产生了较大振幅的涡激振动。涡激振动是一种在低风速条件下,柔性桥梁因经过其结构表面的流体漩涡发生规律的周期性脱落而导致桥梁发生限幅振动的一种风致振动现象^[1]。虽然涡激振动不会在短时间内对桥梁结构造成毁灭性的破坏,但幅度较大的涡激振动会严重影响桥梁上行车、行人的舒适性,加速受力构件的疲劳破坏,导致桥梁出现结构损伤甚至断裂^[2]。桥梁涡激振动的产生不仅与桥梁本身的质量、刚度、阻尼有关^[3-4],也与桥梁截面的气动外形密切相关^[5]。

葛耀君等^[6]总结大跨度桥梁主梁涡激振动的研究进展,描述涡激振动控制措施的发展趋势,列举主流的桥梁气动控制措施,对未来的研究方向做出了一定判断。华旭刚等^[7]讨论大跨度悬索桥多个竖向振动模态分布的特性,发现仅以一阶模态进行涡振性能评估不够全面。黄俐等^[8]针对大宽高比桥梁断面的涡振锁定区间进行数值模拟研究,总结典型卡门涡街和“鱼尾摆动”两种尾流形态,发现“鱼尾摆动”是介于卡门涡街现象和平稳流场之间的流场形态。王维民等^[9]对桥梁竖弯涡激振动情况下的行车安全舒适性进行研究。上述研究主要针对涡激振动特性和采用永久性气动外形控制措施的影响,而针对桥面水马这样的临时施工措施对桥梁气动外形的改变而导致的涡激振动的研究较为缺乏。

鉴于此,本文采用计算流体力学(CFD)方法^[10],研究低风速情况下,不同的水马布置情况对桥梁断面周围流场的影响,探究桥梁涡激振动的发生机制,提出桥梁施工期间桥面水马的合理布置方法。

1 工程概况

1.1 工程背景

某桥全长 1 108 m (230 m + 648 m + 230 m), 为三跨悬索桥结构体系。全桥由钢箱梁、索塔及吊杆组成, 属于大跨度柔性悬索桥。

桥面设置 2% 的双向坡,桥面两侧为双向 6 车道,与虎门大桥主梁断面气动外形相近,主梁标准断面的宽为 36.6 m,高度为 2.67 m。桥面上设有路缘石,路缘石宽度为 240 mm,高度为 140 mm,桥梁两侧及中央区域设有栏杆。主梁标准截面的布置,如图 1 所示。

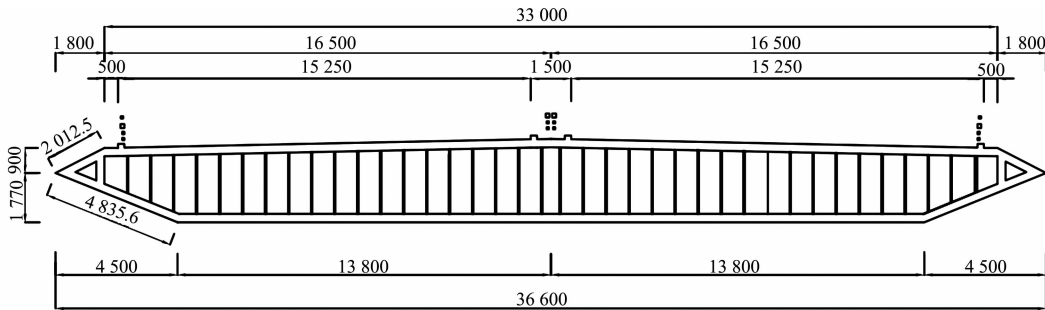


图 1 主梁标准断面的布置(单位:mm)

Fig. 1 Arrangement of standard section of main girder (unit: mm)

1.2 桥梁动力特性分析

桥梁的涡激振动与全桥的动力特性密切相关^[11]。采用 ANSYSAPDL 软件建立桥梁有限元模型^[12],主梁、索塔采用 BEAM4 单元进行模拟。

有限元模型中,钢箱梁弹性模量为 0.21 TPa,泊松比为 0.3,索塔弹性模量为 34.5 GPa,承台弹性模量为 30.0 GPa,桥梁主缆弹性模量为 0.198 TPa。

全桥有限元模型,如图 2 所示。图 2 中: X, Y, Z 为空间坐标系。

经计算,可得该桥梁低阶竖弯及扭转模态的动力

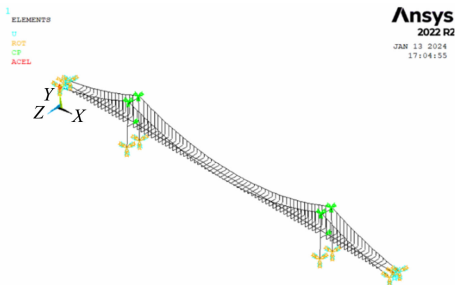


图 2 全桥有限元模型

Fig. 2 Finite elements model of full bridge

特性,如表 1 所示。表 1 中: f 为频率。

表 1 桥梁低阶竖弯及扭转模态的动力特性

Tab. 1 Dynamic characteristics of low order vertical bending and torsional modes of bridge

编号	f/Hz	振型描述
1	0.167 97	主梁一阶对称竖弯
2	0.175 76	主梁二阶反对称竖弯
3	0.226 08	主梁一阶正对称扭转

桥梁模态振型图,如图 3 所示。

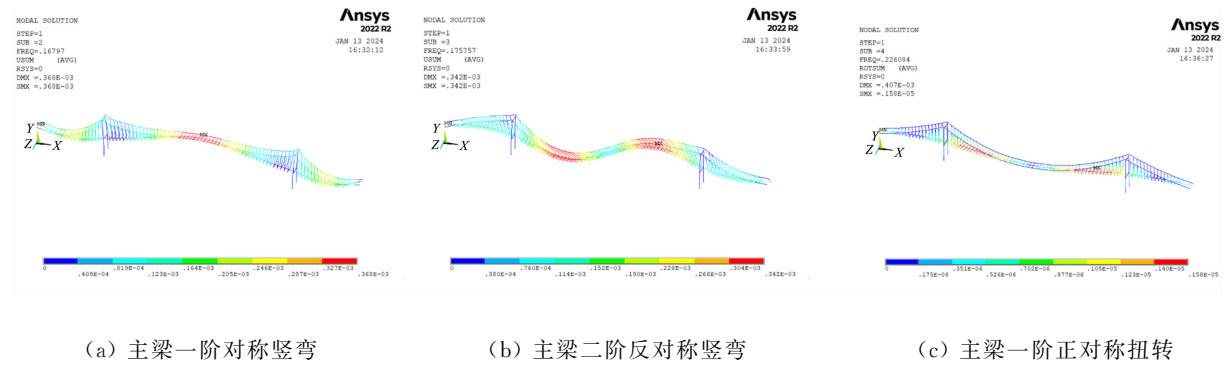


图 3 桥梁模态振型图

Fig. 3 Modal vibration mode of bridge

2 数值模拟方法

2.1 流体计算关系

静三分力系数是用于描述成桥主梁断面风荷载特性的无量纲参数,主要包括阻力系数(C_D)、升力系数(C_L)、扭矩系数(C_M),分别与因前后表面压强差而产生的阻力(F_D)、上下表面压强差产生的升力(F_L)、升阻力合力点与扭心不一致产生的扭矩(M_T)有对应关系^[13]。即

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 D}, \tag{1}$$

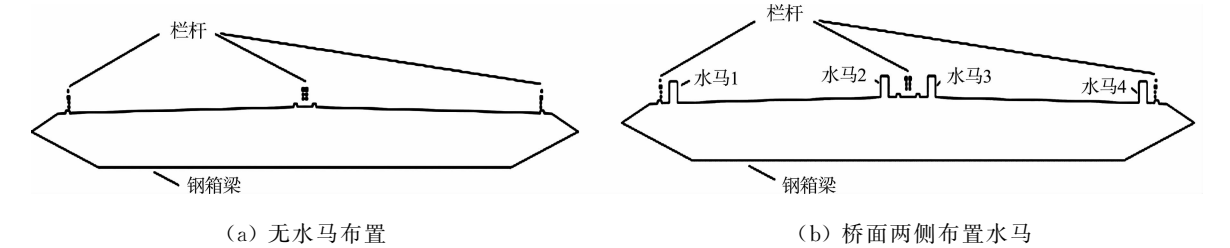
$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 B}, \tag{2}$$

$$C_M = \frac{2M_T}{\rho U^2 B^2}. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: ρ 为流体密度,即空气密度 $1.29\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; B 为桥梁断面的投影宽度; D 为桥梁断面的投影高度; U 为来风速。

2.2 计算模型及工况设置

采用 Model Designer 软件建立悬索桥主梁断面简化缩尺模型^[14],模型分为钢箱梁截面、栏杆、桥面水马 3 个部分。整体流场计算域尺寸(宽×长)设置为 $18.3\text{ m}\times 54.9\text{ m}$,为使桥梁周围流场的模拟结果更为准确,加密网格流场区域尺寸(宽×长)设置为 $4\text{ m}\times 8\text{ m}$,水马布置共计 4 排,由桥梁迎风侧至背风侧分别编号为水马 1~4,水马断面宽度为 0.5 m ,高度为 1.0 m ,气动外形简化为矩形。各方案主梁断面模型及计算域,如图 4 所示。



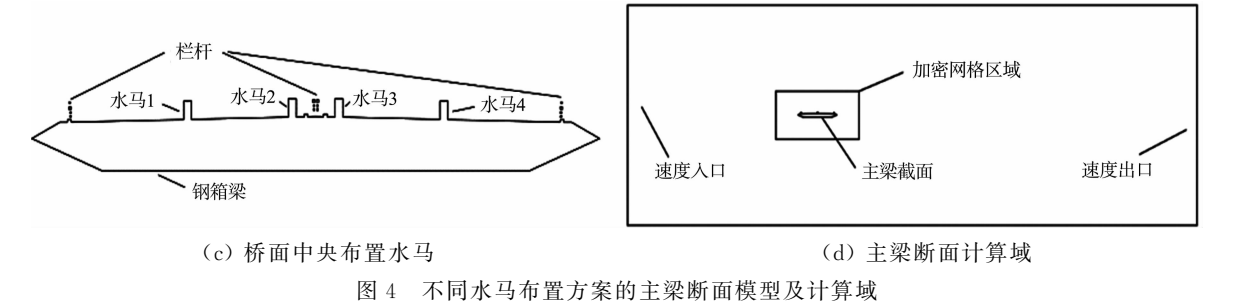


图 4 不同水马布置方案的主梁断面模型及计算域

Fig. 4 Main girder section models and calculation domains for different barriers arrangements

桥面两侧布置水马的方案中,每个水马与栏杆的距离为 0.5 m;桥面中央布置水马的方案中,水马 1,4 分别放置于桥面 1/4 和 3/4 处,水马 2,3 与栏杆的距离均为 0.5 m。

2.3 计算方法

计算模型建立后,采用 Fluent Meshing 软件进行网格划分,采用面网格剖分方法,网格形式为非结构化三角形网格,外部流场单元尺寸设置为 2 000 mm,加密网格区域流场单元尺寸设置为 500 mm,为满足湍流模型对壁面 Y+ 值的要求,对栏杆等细小构件部分及主梁做边界层网格膨胀处理^[15]。网格总节点数为 72 719,总单元数为 98 574。主梁断面周围流场网格划分,如图 5 所示。

为更好地得到主梁断面周围流场的参数,湍流模型选用 SST $k-\omega$,流场入口速度根据工况设置选取,湍流强度为 0.5%。流场出口定义为压力出口,上下边界定义为对称边界。设置计算步数为 10 000 步,计算步长为 0.01 s(总计算区间时长为 100 s)。采用 SIMPLE 方法处理压力与速度的耦合关系。在计算过程中,选取主梁断面的阻力、升力、力矩、压强和速度作为计算步长监控的参数,输出结果并进行分析。涡激振动带有自激性质,但振动的结构反过来会对漩涡脱落形成某种反馈作用,使涡振振幅受到限制。取流场发展和变化趋势较为稳定的时间作为研究区间,即来流后的 50~100 s。

涡激振动往往发生在低风速情况下,因漩涡脱落的频率接近桥梁低阶振型频率而发生较大振幅的振动。为探究漩涡脱落频率与风速之间的关系,找到桥梁断面有可能发生涡激振动的风速区间,设置风速区间为 1~10 m·s⁻¹,每次计算间隔为 1 m·s⁻¹。通过统计桥梁断面的升力卓越频率,可得漩涡脱落频率-风速关系图,如图 6 所示。图 6 中: f_v 为漩涡脱落频率; v 为风速。由图 6 可知:发生涡激振动可能性较大的风速区间为 4~7 m·s⁻¹,故选取该风速参数作为速度入口条件。

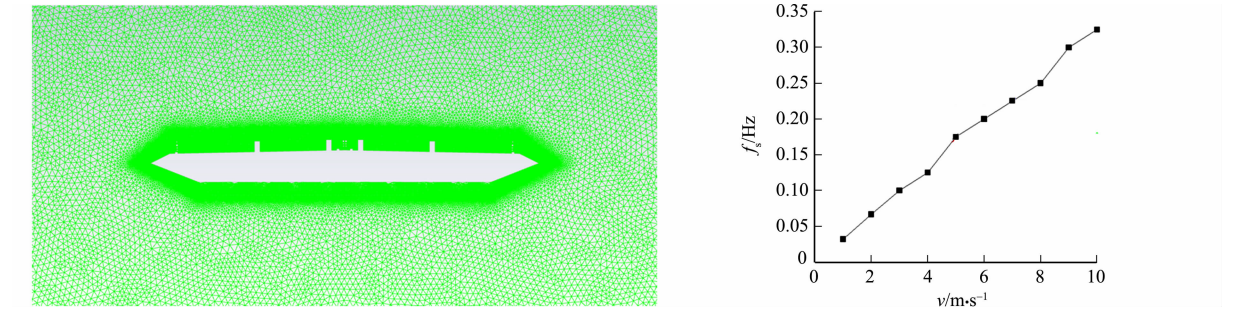


图 5 主梁断面周围流场网格划分

Fig. 5 Grid meshing of flow field around main girder section

图 6 漩涡脱落频率-风速关系图

Fig. 6 Relationship diagram of vortex shedding frequency-wind speed

为研究水马布置对主梁断面周围流场的影响,探究桥梁发生涡激振动的机制,共设置 6 种工况。工况设置,如表 2 所示。

表 2 水马布置工况设置			Tab. 2 Setting of working conditions for barriers arrangement		
工况	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	水马布置	工况	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	水马布置
1	4	无水马布置	4	7	无水马布置
2	4	桥面两侧布置水马	5	7	桥面两侧布置水马
3	4	桥面中央布置水马	6	7	桥面中央布置水马

3 实验结果与分析

3.1 静三分力系数

为研究不同风速情况下,不同水马布置方案对主梁断面静三分力系数的影响,采取 CFD 方法,选用 0° 风攻角对主梁断面周围流场进行数值模拟分析,可得各工况下的阻力、升力和扭矩时程图。设置较长的时间区间,使流场趋于稳定后,得到桥梁断面的阻力、升力和扭矩,分别根据式(1)~(3)计算对应的阻力系数、升力系数和扭矩系数。静三分力系数,如表 3 所示。

表 3 不同风速下水马布置方案的静三分力系数

Tab. 3 Static three-component force coefficient of different wind speeds for barriers arrangement schemes				
$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	水马布置	C_D	C_L	C_M
4	无水马布置	0.450 7	-0.279 6	0.013 6
4	桥面两侧布置水马	0.613 7	-0.238 3	0.002 3
4	桥面中央布置水马	0.509 8	-0.207 8	0.021 4
7	无水马布置	0.462 4	-0.288 3	0.013 5
7	桥面两侧布置水马	0.615 0	-0.240 6	0.003 5
7	桥面中央布置水马	0.498 1	-0.186 3	0.020 4

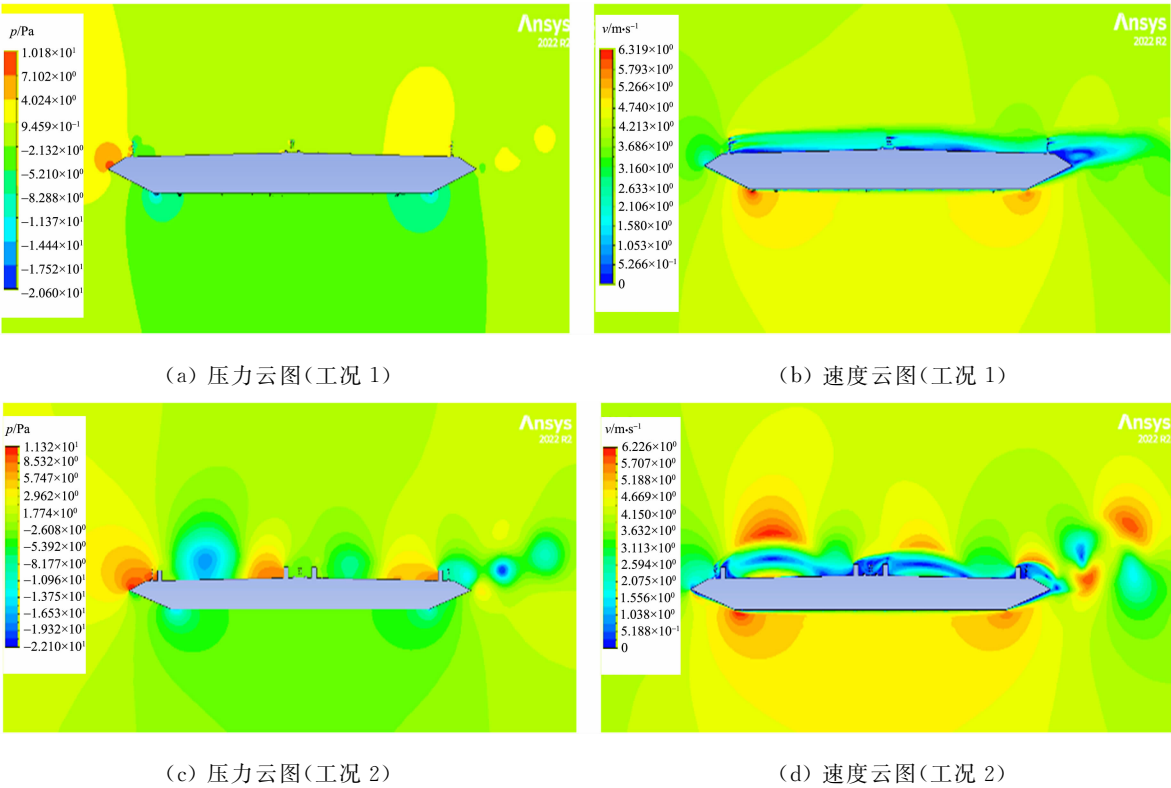
由表 3 可知:当桥梁断面的气动外形发生改变,如在桥面的两侧或中央布置水马时,在风速相同的情况下,静三分力系数发生较大的改变;阻力系数从大到小排序为桥面两侧布置水马、桥面中央布置水马、无水马布置,且阻力方向均为正向;升力系数绝对值从大到小排序为无水马布置、桥面两侧布置水马、桥面中央布置水马,且升力方向均为负向;扭矩系数从大到小排序为桥面中央布置水马、无水马布置、桥面两侧水马布置。因此,可推断桥梁断面的静三分力系数与水马的布置有较强的关联性。

3.2 不同工况下流场压力及速度分析

漩涡脱落导致的桥梁涡激振动是一个连续的过程,因此,在数值模拟中采用瞬时计算迭代的方法计算每一步长的流场情况,设置合理的时间步数,最终叠加每一瞬时的流场情况,可得漩涡脱落持续时间

内流场的持续变化过程。为了使计算结果更加精确,将时间步长设置为 0.01 s。

不同工况下流场模拟结果图,如图 7 所示。



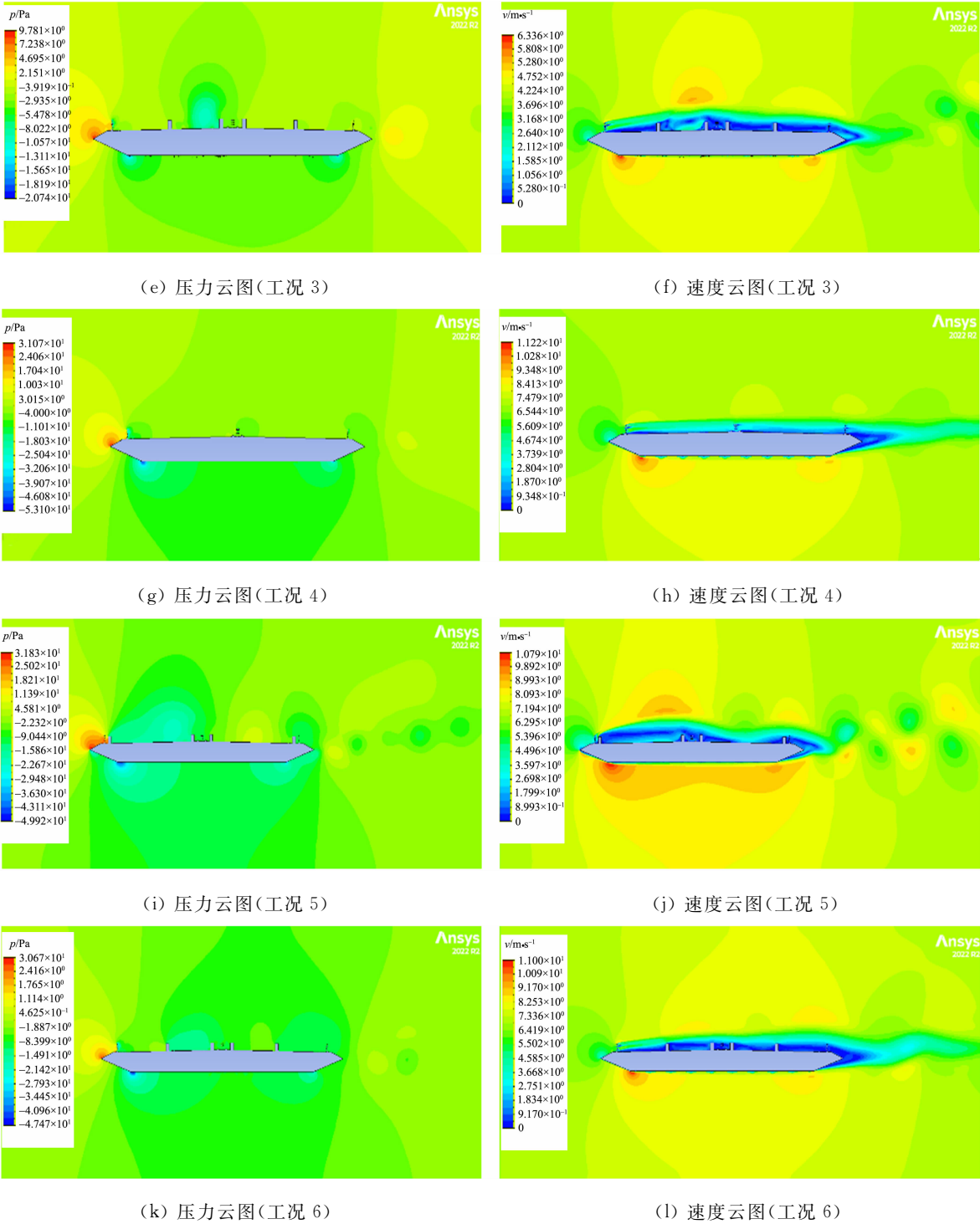


图 7 不同工况下流场模拟结果图

Fig. 7 Simulation result of flow field under different working conditions

由图 7 可知以下 6 个结论。

- 1) 当风荷载以一定速度流经主梁断面时，会在主梁钢箱梁迎风侧形成以风嘴为核心，逐渐向外扩散的正高压区，也会在钢箱梁截面底部的两个端点处形成范围较小的圆形负压区。
- 2) 流场速度沿钢箱梁边界梯度分布，越靠近钢箱梁表面速度越低，并在背风侧形成相同速度的漩涡，风速越大，主梁截面背风侧的涡量越大(图 7(b),(h))。
- 3) 工况 2,5(桥面两侧布置水马)发生明显的漩涡脱落现象，主梁背风侧可见明显的漩涡交替脱落，钢箱梁上端也因水马的阻隔作用出现较为明显的正负压交替分布；工况 3,6(桥面中央布置水马)也可于主梁背风侧观察到漩涡脱落现象，但相较于桥面两侧布置水马的工况并不明显。

4) 气流经过主梁截面风嘴时几乎沿着风嘴壁面运动,气流与壁面并未发生大角度碰撞,并在风嘴的分流下形成上、下两股气流,下端的气流因壁面边界层的粘性,始终沿着主梁截面下部行进至背风侧;上端气流受到了栏杆的阻挡,但由于栏杆镂空率较大,气流从栏杆截面间隔中穿过,沿着主梁上端截面流动,与下端气流汇聚于背风侧,形成上、下两个漩涡,二者共同作用下产生了一个较大的负压区(图 7(a),(b),(g),(h))。

5) 在桥面两侧布置水马,气流经过迎风侧风嘴被分为上、下两股气流后,下端气流仍沿主梁断面下部行进至背风侧,上端的气流受到迎风侧水马 1 的阻隔,使上部气流沿着钢箱梁上壁面先分离,再附着,进而在 1 号水马后侧形成较大尺寸的漩涡(图 7(c),(d),(i),(j))。上述现象同样发生在气流遭遇水马 2~4 的阻挡时,并分别形成了尺寸大小不一的漩涡。在上、下端气流在背风侧尾流区汇合后,因分离后的高速气流与低速漩涡之间的气压差交替变化,在主梁断面背风侧产生了较为明显的漩涡脱落现象。从相同的时间步长中脱落后的漩涡之间的距离大致相等可判断漩涡脱落有一个较为固定的卓越频率。

6) 在桥面中央布置水马,下端气流沿着主梁断面下部行进至背风侧。上端气流首先经过栏杆断面分流,受到水马 1 阻隔后,气流分离附着,在水马 1 前后各形成一个漩涡,且上端气流在经过水马 2~4 时也发生相同现象,前、后各产生 1 个大小相近的漩涡,并沿着钢箱梁上部截面连接形成扁平狭长的负压区。上端气流和下端气流各自产生一个大小不等的漩涡,并在分离气流的作用下发生较不显著的漩涡脱落现象(图 7(e),(f),(k),(l))。

桥面两侧布置水马的情况能够发生较为显著的漩涡脱落现象,但工况 2 中,流场升力、扭矩卓越频率分别为 0.110,0.139 Hz,与主梁一阶对称竖弯、主梁一阶正对称扭转模态频率相差较大,不会导致桥梁发生涡激振动。因此,取工况 5 为详细研究对象,若工况 5 的漩涡脱落频率与桥梁主要振型频率相近,则会发生共振现象,桥梁的涡激振动振幅也将大大增加,严重影响行车、行人的舒适性,甚至发生构件的疲劳破坏。

3.3 桥面水马布置对桥梁断面涡激振动的影响

为了进一步研究该桥梁断面在布置了桥面水马后是否会产生涡激振动,通过对比漩涡脱落频率与桥梁模态频率的方法来判断是否有共振现象的产生。

为研究桥面水马布置对于桥梁断面涡激振动的影响,选取具有代表性的工况 5,6 作为研究对象。漩涡脱落频率往往与升力、扭矩的变化频率相等,故选取升力、扭矩时程图,通过快速傅里叶变换(FFT)得到频谱图与漩涡脱落的卓越频率,进而判断桥梁断面是否会发生涡激振动。

为了探究不同的水马布置对升力、扭矩的影响,分别选取工况 5,6 的升力、扭矩时程图为研究对象。当气流并未完全流经桥梁断面时,桥梁断面的升力、扭矩时程图并不规则且偏差较大。模拟结果显示,气流经入口进入流场后 50 s,桥梁升力、扭矩时程曲线的变化基本趋于稳定。因此,选取来流后 50~100 s 作为时程图横坐标。工况 5,6 的升力、扭矩时程图及频谱图,如图 8,9 所示。

对比图 8,9 可知:在桥梁断面上的不同位置布置水马,在流场的作用下,在主梁断面上产生的升力和扭矩的大小、频率、特征均有明显不同。

由图 8 可知:在风速为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,桥面两侧布置水马的情况下,主梁断面的升力、扭矩时程图呈明显的周期性变化,推测是漩涡脱落的频率固定导致的;主梁断面升力在 $-99.37\sim-96.94\text{ N}$ 波动,平均值为 -98.01 N ,方向竖直向下;升力的卓越频率为 0.180 Hz,根据桥梁的动力特性分析,该卓越频率与主梁二阶反对称竖弯振型频率 0.175 76 Hz 接近,工况 5 在该模态下有可能产生桥梁的竖向涡激振动;工况 5 下主梁断面扭矩在 $102.21\sim169.51\text{ N}\cdot\text{m}$ 周期性波动,平均值为 $135.45\text{ N}\cdot\text{m}$,方向为顺时针;扭矩的卓越频率为 0.231 Hz,与桥梁的一阶正对称扭转模态振型频率 0.226 09 Hz 较接近,工况 5 在该模态下有可能产生桥梁的扭转涡激振动。

由图 9 可知:在风速为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,桥面中央布置水马的情况下,升力、扭矩时程图不再呈现类似工况 5 中明显的固定频率周期性变化,而是在发展一定时间后趋于平稳,但在早期仍有一定的波动;主梁断面升力在 $-92.71\sim-72.18\text{ N}$ 不规则波动,平均值为 -78.54 N ,方向竖直向下;升力的卓越频率为 0.06 Hz,该卓越频率与桥梁各模态振型相差较大,推测工况 6 产生桥梁竖向涡激振动的可能性较小;主梁断面扭矩在 $264.32\sim410.28\text{ N}\cdot\text{m}$ 不规则波动,平均值为 $307.62\text{ N}\cdot\text{m}$,方向为顺时针;扭矩存在多

个卓越频率,分别为 0.02,0.12 Hz,扭矩时程曲线的卓越频率与桥梁扭转模态的频率差距较大,推测产生桥梁扭转涡激振动的可能性较小。

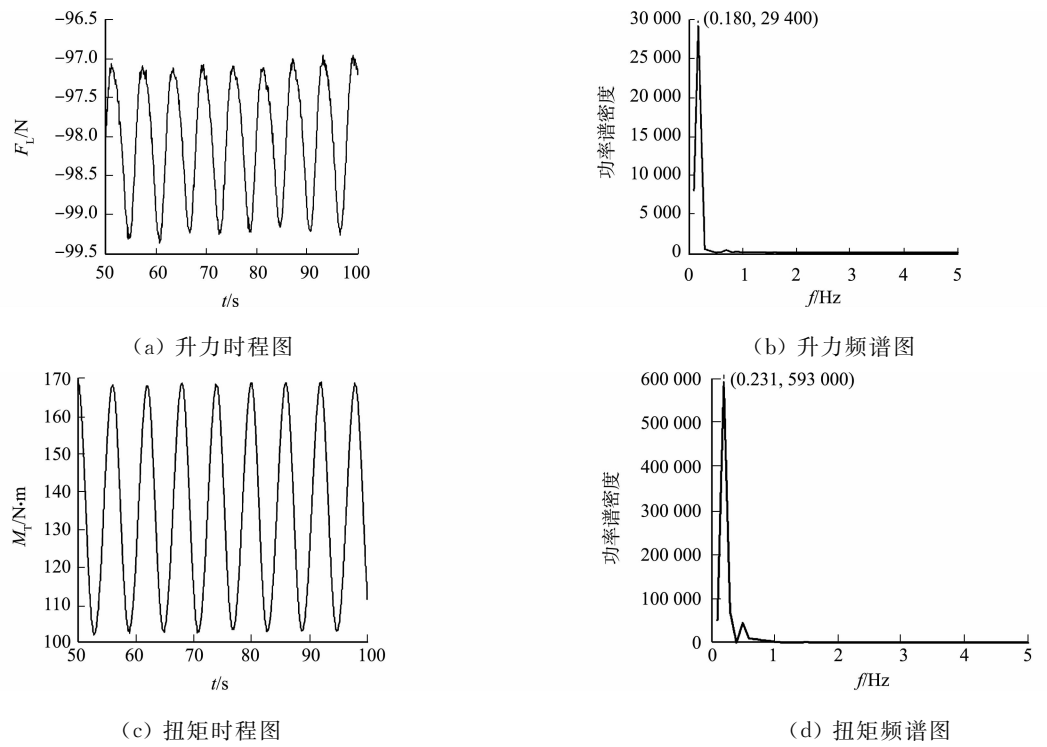


图 8 工况 5 的升力和扭矩时程图及频谱图

Fig. 8 Time-history diagram and spectrogram of lift and torque under working condition 5

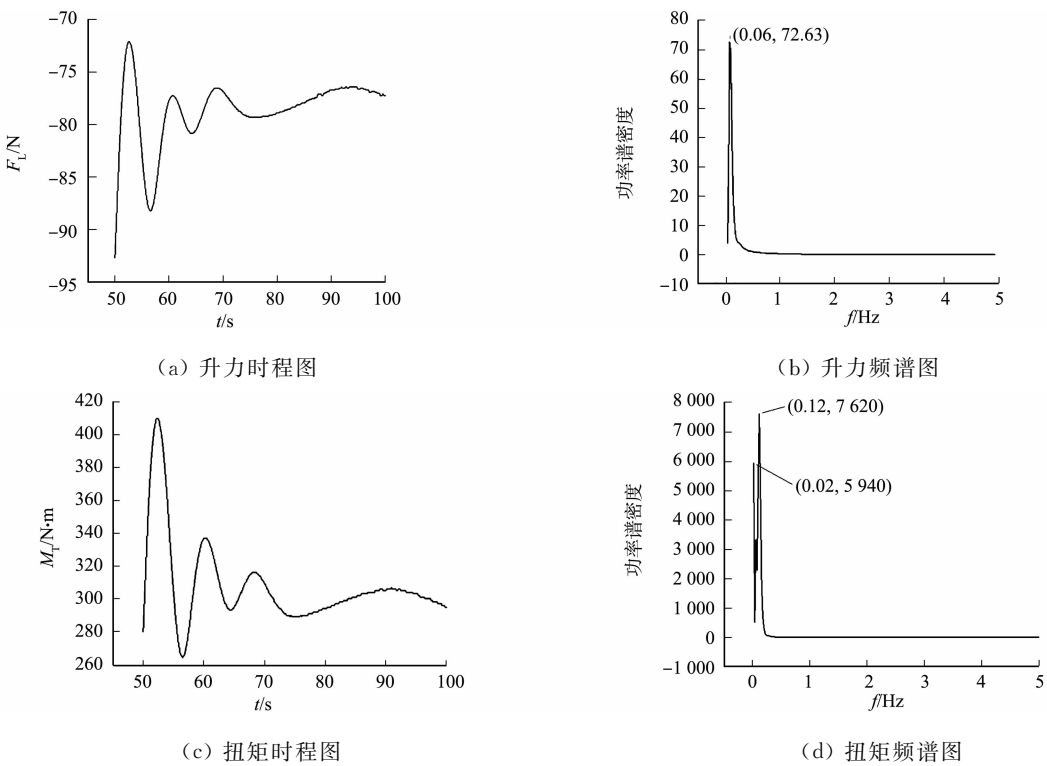


图 9 工况 6 的升力和扭矩时程图及频谱图

Fig. 9 Time-history diagram and spectrogram of lift and torque under working condition 6

由此可知:桥面中央布置水马相较于桥面两侧布置水马的升力、扭矩卓越频率与桥梁模态频率相差较大,在该布置方案下桥梁产生涡激振动的可能性较低。

4 结 论

1) 截面尺寸较小的水马依然能够显著改变主梁断面的气动外形,导致桥梁在一定的风速区间内发生涡激振动。在桥面两侧布置水马的情况下,流体绕过水马这一“钝体”,在桥梁上部及背风侧出现明显的漩涡脱落现象。

2) 桥面两侧布置水马的工况下, $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速处于桥梁发生涡激振动的风速区间内,推测桥梁在该工况下有较大可能发生大幅涡激振动。

3) 相较于桥面两侧布置水马,桥面中央布置水马的升力和扭矩卓越频率与桥梁一阶对称竖弯和一阶正对称扭转模态频率相差较大,且该工况下周围流场随着时间跨度的增大逐渐稳定,推测发生桥梁涡激振动的可能性较小。

4) 在桥梁两侧布置水马会提高桥梁在特定风速下发生涡激振动的可能性。在桥梁进行市政施工时,建议避免采用水马沿桥梁两侧摆放的布置方式。流体经过镂空率较大的栏杆时,并未在尾部产生漩涡脱落现象,建议使用开孔率较大的水马替代无孔水马,以降低桥梁涡激振动的风险。

参考文献:

[1] FAZL E L,SCANLAN R H. Vortex-induced vibrations of flexible bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990,116(6):1392-1411. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:6(1392).

[2] 张志田,陈政清. 桥梁节段与实桥涡激共振幅值的换算关系[J]. 土木工程学报,2011,44(7):77-82. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2011.07.009.

[3] 祝志文,石亚光,颜爽. 带防撞栏杆扁平箱梁高阶模态涡激振动的 CFD 研究[J]. 振动与冲击,2021,40(10):228-234,277. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.10.029.

[4] 陈平,陈强草,华旭刚,等. 结构-尾流振子耦合模型参数识别及桥梁涡激振动预测[J]. 世界桥梁,2021,49(2):84-89. DOI:10.3969/j.issn.1671-7767.2021.02.014.

[5] 樊书文,李永乐. 风嘴形式对桥梁断面三分力系数影响的数值模拟[J]. 四川建筑,2018,38(3):163-165.

[6] 葛耀君,赵林,许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J]. 中国公路学报,2019,32(10):1-18. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.

[7] 华旭刚,陈智文,陈政清. 大跨度悬索桥的多阶模态竖向涡振与控制[J]. 中国公路学报,2019,32(10):115-124. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.011.

[8] 黄俐,周帅,梁鹏. 桥梁断面两个涡振锁定区间的数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2016,35(11):47-53,73. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2016.11.008.

[9] 王维民,陈楚龙,刘叶,等. 竖弯涡振作用下桥上列车行车安全舒适性研究[J]. 桥梁建设,2023,53(增刊 1):38-45. DOI:10.20051/j.issn.1003-4722.2023.S1.006.

[10] SARWAR M W,ISHIHARA T. Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge section by aerodynamic countermeasures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2010,98(12):701-711. DOI:10.1007/s12205-018-0548-y.

[11] 鲜荣,廖海黎,李明水. 大跨度桥梁主梁沿跨向涡激振动响应计算[J]. 西南交通大学学报,2008,43(6):740-746. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.2008.06.011.

[12] 陈精一,蔡国忠. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.

[13] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[14] NAKAMURA Y,OHYA Y,TSURUTA H. Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges[J]. Journal of Fluid Mechanics,1991,222:437-447. DOI:10.1017/S0022112091001167.

[15] WISSINK J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2003,24(4):626-635. DOI:10.1016/S0142-727X(03)00056-0.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)