

# 大跨度不规则五边形双钢拱肋气动特性研究\*

刘小兵<sup>1,2,3</sup>, 张德旺<sup>3</sup>, 丰 斌<sup>3</sup>, 王 欣<sup>3</sup>, 杨 群<sup>1,2,3</sup>

(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** 针对大跨度拱桥不规则截面双拱肋的气动特性问题,以国内某座大跨度拱桥跨中不规则五边形截面双钢拱肋为工程背景开展研究。首先,通过刚性节段模型测压试验,测试该拱肋在 8 个不同间距比和 11 个不同风攻角下的气动力系数和斯托罗哈数,并与单拱肋的结果进行对比分析;然后,通过数值计算方法,研究风攻角  $\alpha=0^\circ$  条件下间距对气动特性的影响机理。结果表明:双拱肋的气动力系数存在明显的临界间距效应,当  $\alpha=-5^\circ$  时,临界间距比  $(L/B)_c=2.0\sim 2.5$ ,其他风攻角下,  $(L/B)_c=2.5\sim 3.0$ ;上游拱肋的气动力系数在  $L/B < (L/B)_c$  时表现为明显的减小效应,而在  $L/B > (L/B)_c$  时干扰效应不明显;下游拱肋的阻力和扭矩系数绝对值均表现为显著的减小效应,升力系数的干扰效应与风攻角密切相关;不同间距比下双拱肋的斯托罗哈数在不同程度上均小于单拱肋的斯托罗哈数。

**关键词** 不规则五边形双钢拱肋;气动力系数;斯托罗哈数;风洞试验;气动干扰

**中图分类号** U441.2;TH138

## 引 言

拱桥作为工程中常见的桥型,具有结构稳定、泄洪与通航能力强以及外形优美等特点。作为核心承力构件,钢拱肋凭借重量轻、承载能力强等优势,备受桥梁设计者的青睐。近年来,随着拱桥的跨径持续增大,钢拱肋的跨度也随之增大,导致其表现出阻尼小、刚度低、结构柔等力学特征,对风荷载也更加敏感。因此,亟需系统研究钢拱肋气动特性以确保抗风安全。

目前,大量学者对矩形、圆形等常规截面形式拱肋的气动特性进行了广泛研究。晏致涛等<sup>[1]</sup>对矩形截面的单拱肋及双拱肋进行了风洞试验,发现上游拱肋的平均气动力系数与单拱肋的结果相近,而下游拱肋的平均气动力系数受间距比与风攻角的影响较大。李先进等<sup>[2]</sup>基于风洞试验的方法对矩形截面的拱肋展开了研究,结果表明,拱肋在拱顶的阻力系数最大。于洪刚<sup>[3]</sup>运用风洞试验的手段分析了矩形截面拱肋的气动力系数,发现气动力系数中阻力系数的数值较大,且受风攻角的影响较小。严乃杰等<sup>[4]</sup>针对矩形截面的拱肋开展了一系列风洞试验,

发现拱肋在拱顶的阻力系数受风攻角的影响较为明显,但升力系数、扭矩系数基本不受影响。杨詠昕等<sup>[5]</sup>通过分段评估的方法对不规则六边形、矩形和圆形截面的拱肋进行了研究,证明了该方法的合理性。熊辉等<sup>[6]</sup>运用风洞试验的方法,测试了矩形截面拱肋的气动力系数,发现单拱只需考虑阻力系数,双拱的三分力系数主要由两拱的间距及转角决定。Cheng 等<sup>[7-8]</sup>通过风洞试验的方法研究了矩形截面拱肋的气动特性,发现拱肋的阻力系数对拱桥的抗风载能力具有显著影响。Ge 等<sup>[9]</sup>采用风洞试验的方法,在风攻角为  $-10^\circ\sim 10^\circ$  的范围内,研究了矩形截面拱肋的气动力特性,发现拱肋的阻力系数变化不大,且升力系数和扭矩系数均较小。郑史雄等<sup>[10]</sup>基于数值模拟的方法研究了不同高宽比的矩形截面拱肋,发现单拱的阻力系数受高宽比的影响小,双拱的阻力系数随着间距的变化存在跳跃现象。刘红波等<sup>[11]</sup>对椭圆形、圆形和矩形截面拱肋进行了数值模拟,得到了多种形状拱肋的局部体型系数。

现有研究多聚焦常规截面拱肋气动特性,为兼顾美观与功能需求,一些不规则截面钢拱肋时有出现,其气动特性也呈现显著差异,而文献[12]未对不

\* 国家自然科学基金资助项目(52008273,52078313);河北省自然科学基金资助项目(E2020210083);河北省自然科学基金创新研究群体资助项目(E2022210078);中央引导地方科技发展资金资助项目(236Z5407G,236Z5410G)

收稿日期:2022-10-15;修回日期:2023-10-13

规则截面外形钢拱肋给出相应的取值建议。为保障抗风安全,笔者以国内某座大跨度钢结构拱桥为工程背景,通过刚性节段模型测压风洞试验,对不规则五边形钢拱肋的气动力特性与旋涡脱落特性进行深入研究,并通过数值计算方法分析其流场机理。

1 试验概况

1.1 工程背景

试验以国内某座大跨度拱桥为工程背景,图1为拱桥总体布置图,拱桥总跨径为520 m,主拱肋跨径为300 m,两侧边拱跨径为50 m,辅助孔跨径为60 m。该拱桥的拱肋为飞燕式部分推力系杆拱体系,主拱轴线为抛物线形,跨中矢高为75 m,矢跨比为1:4。拱肋跨中截面实际尺寸见图2,截面形状为不规则五边形, $a$ - $b$ 边水平夹角为 $3^{\circ}$ ,宽为8.3 m,高为6.1 m,两形心间距为28.0 m。以拱肋跨中截面为对象开展刚性节段模型试验研究。

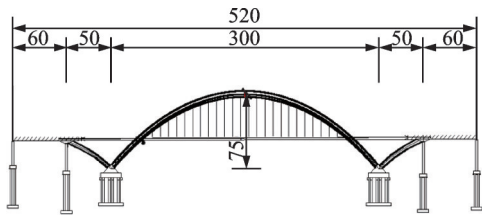


图1 拱桥总体布置 (单位: m)  
Fig.1 General layout of arch bridge (unit: m)

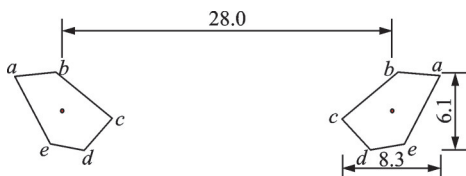


图2 拱肋跨中截面实际尺寸(单位: m)  
Fig.2 Actual size of cross section at mid-span of arch rib (unit: m)

1.2 试验模型与设备

刚性节段模型测压风洞试验在石家庄铁道大学风洞实验室低速试验段进行,低速试验段的长、宽、高分别为24.0、4.4和3.0 m,最大风速约为30.0 m/s,空风洞湍流度小于0.4%。

图3、4分别为试验安装示意图与测点布置及参数定义图。以ABS板为材料制作模型,缩尺比为1:30,长 $H=1.600$  m,高 $D=0.203$  m,宽 $B=0.277$  m。模型内部设加固钢管,与上下连接件固定,并在两端安装直径为2.0 m的圆形端板,以保证流场二元性。沿中部周向布置61个测点,并在尖角处加密。采用DTC系列微型ESP型压力扫描阀和DTC Initium型数据采集系统测量模型风压,扫描阀的采样频率为330 Hz,采样时长为30 s。模型上部连接旋转接头,下部固定于试验段转盘,通过转盘调节风攻角 $\alpha$ 。试验工况如表1所示,间距比定义为双拱肋形心距 $L$ 与拱肋宽度 $B$ 的比值,即 $L/B$ ,实桥双拱肋的 $L/B$ 为3.373。

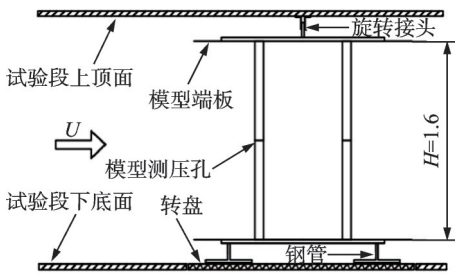


图3 试验安装示意图 (单位: m)  
Fig.3 Diagram of the experimental setup (unit: m)

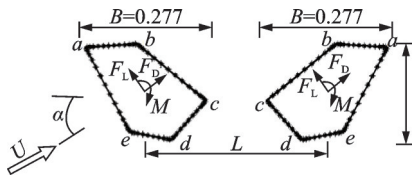


图4 测点布置及参数定义(单位: m)  
Fig.4 Tap arrangement and parameter definition (unit: m)

表 1 试验工况  
Tab.1 Test conditions

| 试验工况  | 不同试验工况示意图 | $L/B$                             | 风攻角/ $^{\circ}$         | 风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|-------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 上游单拱肋 |           | —                                 | —                       | —                                  |
| 下游单拱肋 |           | —                                 | 范围: $-5\sim 5$<br>间隔: 1 | 10.0                               |
| 双拱肋   |           | 1.5、2.0、2.5、3.0、3.373、4.0、4.5、5.0 | —                       | —                                  |

### 1.3 参数定义

拱肋模型表面的风压系数  $C$  定义为

$$C = \frac{P - P_s}{0.5\rho U^2} \quad (1)$$

其中:  $P$  为拱肋模型表面测点的总压;  $P_s$  为拱肋模型远前方参考点处静压;  $\rho$  为空气密度;  $U$  为拱肋模型远前方来流风速。

阻力系数  $C_D$ 、升力系数  $C_L$  与扭矩系数  $C_M$  分别定义为

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 B} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho U^2 B^2} \quad (4)$$

其中:  $F_D$ 、 $F_L$ 、 $M$  分别为模型表面测点压力通过积分得到的单位长度顺风向阻力、横风向升力和顺时针

方向的扭矩;  $B$ 、 $D$  分别为模型宽度和高度。

斯托罗哈数  $St$  定义为

$$St = fD/U \quad (5)$$

其中:  $f$  为旋涡脱落频率。

## 2 拱肋的气动力特性分析

图 5、6 分别为不同间距比条件下, 上游拱肋与下游拱肋的气动力系数随风攻角  $\alpha$  的变化规律, 并与单拱肋进行了对比分析。可以看出, 双拱肋的气动力系数在不同的风攻角下均存在临界间距效应<sup>[10]</sup>, 即在特定间距比范围内, 气动力系数发生跳跃现象。当  $\alpha = -5^\circ$  时, 双拱肋气动力系数的临界间距比  $(L/B)_{cr} = 2.0 \sim 2.5$ , 而当  $-4^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$  时,  $(L/B)_{cr} = 2.5 \sim 3.0$ 。在该风攻角区间内, 截面为方形<sup>[13-14]</sup>、圆形<sup>[15-17]</sup> 的双拱肋气动力系数中  $(L/B)_{cr} = 3.0 \sim 4.0$ , 这种差异可能源于截面外形不同的几何特性。

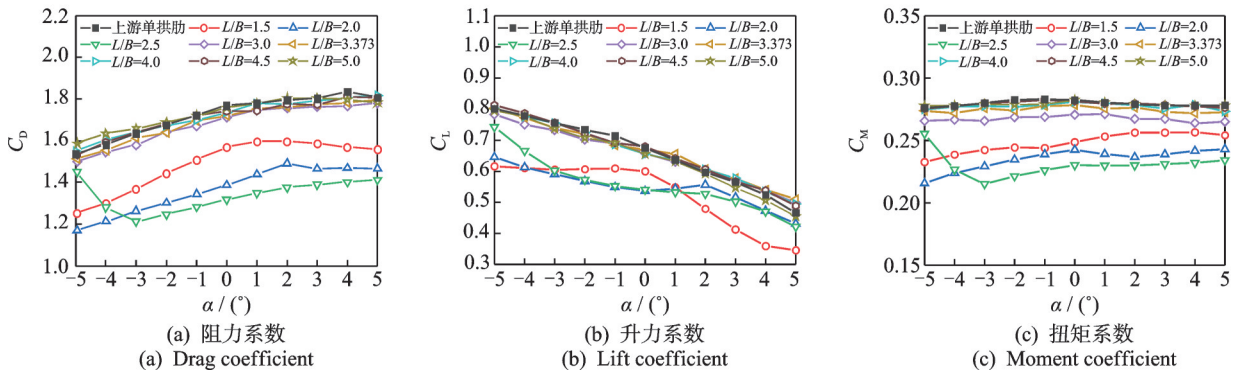


图 5 上游拱肋的气动力系数

Fig.5 Aerodynamic force coefficients of the upstream arch rib

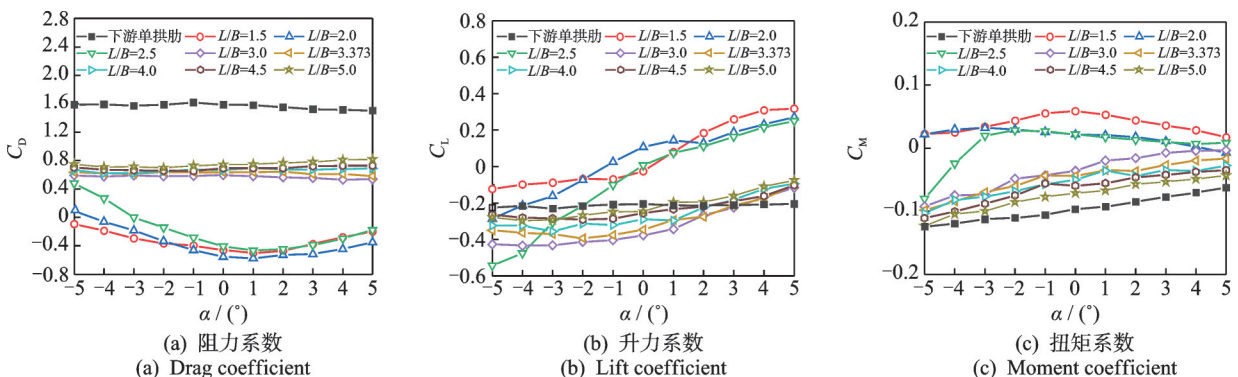


图 6 下游拱肋的气动力系数

Fig.6 Aerodynamic force coefficients of the downstream arch rib

由图 5 可知, 当  $L/B < (L/B)_{cr}$  时, 各间距比下的气动力系数均小于上游单拱肋的对应值, 此时气动力系数的干扰效应表现为减弱特征。在  $L/B = 1.5$ 、

2.0 的工况下, 阻力系数随着风攻角增大表现为先增后减的趋势。当  $L/B = 2.5$  时, 阻力系数呈现先减后增的特性, 而其他间距比时的阻力系数则均逐渐增

大。当 $L/B=1.5$ 时,升力系数随着风攻角的变化先基本保持不变后逐渐减小。而在 $L/B=2.0、2.5$ 的工况下,升力系数均为先减小后增大,最后再减小的规律。扭矩系数与阻力系数的变化规律类似。当 $L/B>(L/B)_c$ 时,气动力系数与上游单拱肋的值接近,干扰效应不明显。

由图6可知,当 $L/B<(L/B)_c$ 时,阻力系数多为负值,其随风攻角变化先减小后增大,且绝对值明显小于下游单拱肋对应值,干扰效应使阻力系数减小,这与文献[1]和[10]中的结果类似。随着风攻角变化,升力方向由向下变为向上,绝对值先减小后增大。扭矩系数随着风攻角变化先增加后减小,其绝

对值均小于单拱肋的绝对值。当 $L/B>(L/B)_c$ 时,各风攻角下的阻力系数随着 $L/B$ 的增加而基本保持不变。风攻角为负值时,升力系数绝对值随着 $L/B$ 的增大逐渐减小至单拱肋相应值附近。在不同风攻角下,扭矩系数绝对值虽随着 $L/B$ 的增大而逐渐增大,但均小于单拱肋的相应值。

### 3 拱肋的旋涡脱落特性分析

#### 3.1 升力系数幅值谱

图7、8分别为上、下游拱肋在不同风攻角下的升力系数傅里叶幅值谱。通过对比分析可以看出,

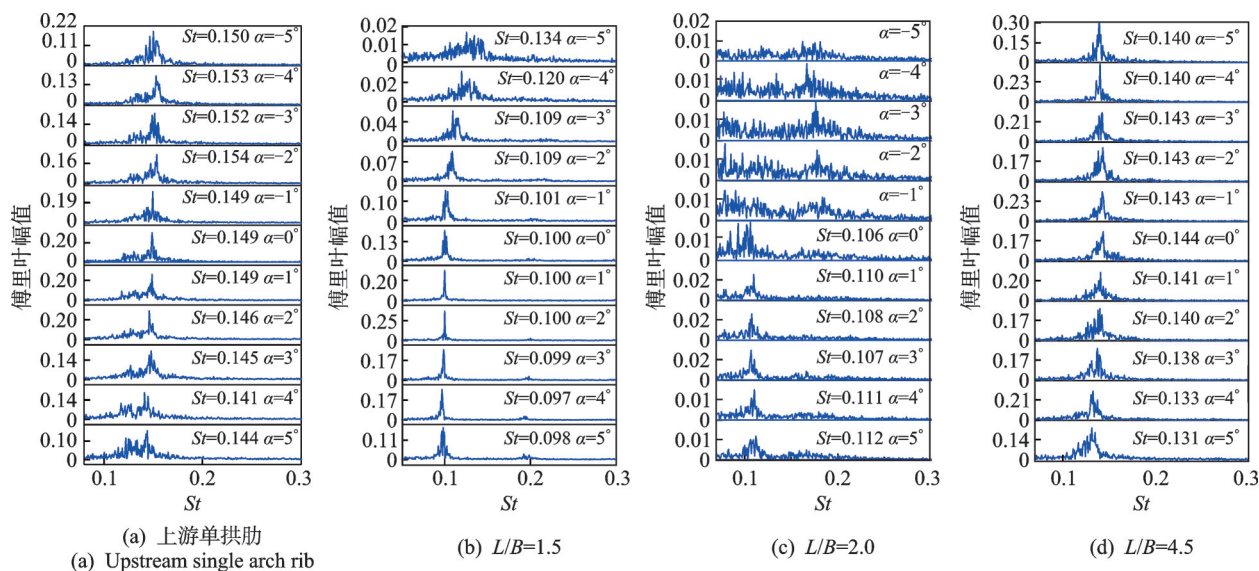


图7 上游拱肋在不同风攻角下的升力系数傅里叶幅值谱

Fig.7 Fourier amplitude spectrum of the upstream arch rib at different wind attack angles

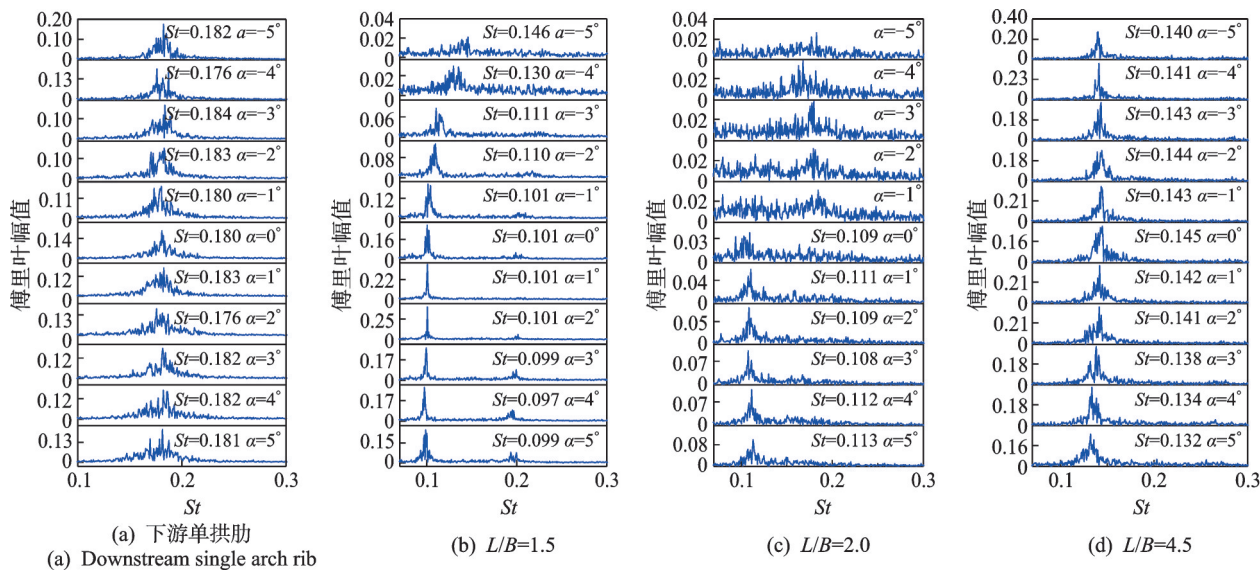


图8 下游拱肋在不同风攻角下的升力系数傅里叶幅值谱

Fig.8 Fourier amplitude spectrum of the downstream arch rib at different wind attack angles

在上、下游单拱肋、 $L/B=1.5$ 和 $4.5$ 的条件下,上、下游拱肋均呈现较为明显的卓越频率特性。然而,当 $-5^\circ \leq \alpha \leq -1^\circ$ 时,在 $L/B=2.0$ 工况下的上、下游拱肋均无明显卓越频率。这表明,在风攻角为负值时,该间距布置的上、下游拱肋均不存在明显的周期性涡脱。

### 3.2 斯托罗哈数

图 9 为 $-5^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$ 范围内双拱肋在不同间距比下斯托罗哈数的变化曲线,并与相应单拱肋工况下

的斯托罗哈数进行了对比。

图 9(a)为上游拱肋的斯托罗哈数变化曲线,上游单拱肋斯托罗哈数稳定在 $0.14 \sim 0.16$ 范围内,受风攻角变化影响较小。当 $1.5 \leq L/B \leq 2.5$ 时,斯托罗哈数显著降低,表明下游拱肋的近距离干扰抑制了上游涡脱。随着 $L/B$ 增大至 $2.5$ 及以上,上游拱肋斯托罗哈数逐渐增大至与上游单拱肋数据接近,这表明,在此工况条件时,下游拱肋对上游拱肋的干扰作用逐渐减弱。

图 9(b)为下游拱肋的斯托罗哈数变化曲线,下游单拱肋的斯托罗哈数高于上游单拱肋数据,说明下游单拱肋的涡脱效应更强。当 $L/B=1.5$ 时,下游斯托罗哈数骤降至 $0.09 \sim 0.15$ ,表明上游拱肋对下游拱肋涡脱产生遮蔽效应。斯托罗哈数随着 $L/B$ 的增大而逐渐增大,表明上游拱肋对下游拱肋的遮蔽效应逐渐减弱。然而,即便 $L/B$ 增大至 $5.0$ ,上游拱肋周期性的尾流涡脱仍会对下游拱肋的涡脱频率产生重要影响。

## 4 拱肋气动特性的流场机理分析

### 4.1 数值计算模型与边界条件

为进一步了解不规则五边形拱肋的流场机理,对 $0^\circ$ 风攻角下不同间距比工况的五边形拱肋建立计算模型,图 10 为该数值计算模型网格划分示意图。数值计算共设置 4 个工况,即上游单拱肋、下游单拱肋、 $L/B=1.5$ (小于临界间距比)时和 $L/B=4.0$ (大于临界间距比)时的双拱肋。其中,上、下游单拱肋作为参照组, $L/B=1.5$ 和 $4.0$ 的双拱肋为试验组。

数值计算在二维计算域中进行,计算域采用速度入口与压力出口,入口设置来流风速为 $10 \text{ m/s}$ 。上下边界采用对称边界条件,模型表面均采用无滑

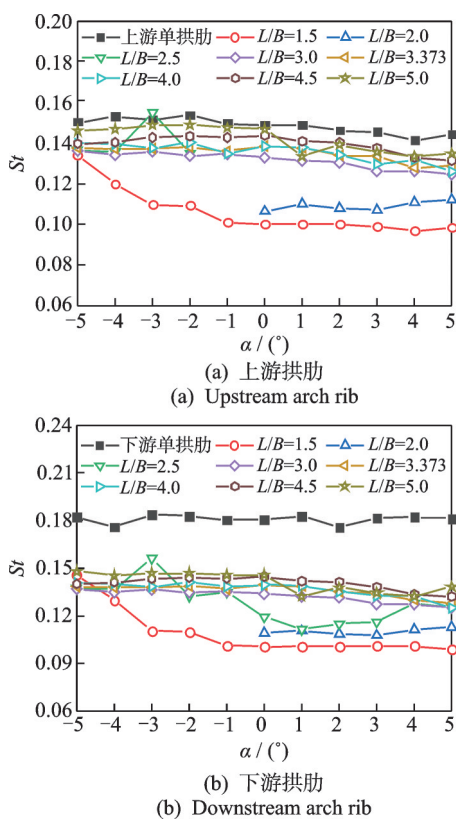


图 9 双拱肋的斯托罗哈数变化曲线  
Fig.9 Changing curves of Strouhal number of twin arch ribs

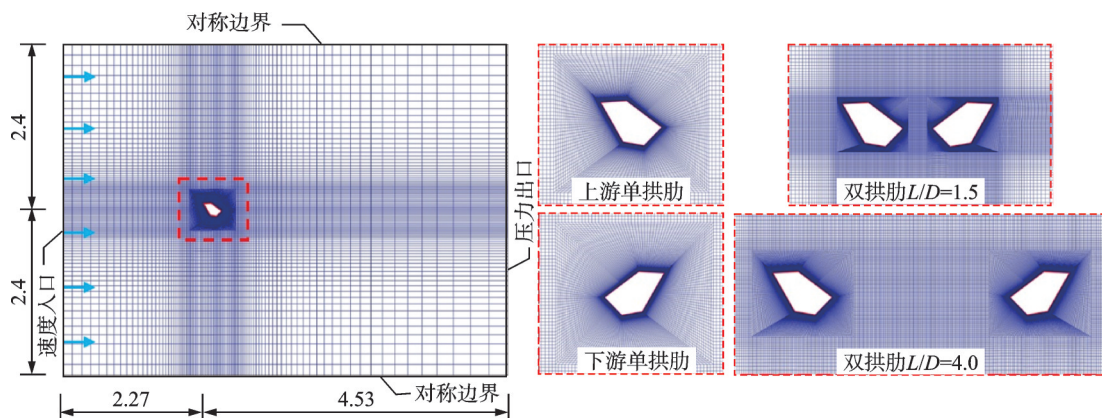


图 10 数值计算模型网格划分示意图(单位:m)  
Fig.10 Schematic diagram of numerical computation model meshing (unit: m)

移边界条件,模型与壁面间的距离阻塞度小于5%。采用结构化网格划分计算域,并对模型表面网格进行适当加密, $y^+$ 值控制在1附近。采用切应力运输(shear stress transport,简称 SST)湍流模型进行计算,时间步长为 $5\times 10^{-5}$  s,采用 Simplec 算法求解压力速度耦合方程组,收敛项残差设置为 $1\times 10^{-5}$ 。

### 4.2 结果与讨论

限于篇幅,表 2 中仅展示不同工况下阻力系数的模拟结果和试验结果对比。通过对比发现,各工况下三分力系数的数值计算结果与风洞试验结果具有良好的一致性,表明数值计算结果的准确性和可靠性较好。

| 表 2 阻力系数的模拟结果和试验结果对比                                                  |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| Tab.2 Comparison of simulation and test results for drag coefficients |       |       |
| 工况                                                                    | 试验结果  | 模拟结果  |
| 上游单拱肋                                                                 | 1.77  | 1.67  |
| 下游单拱肋                                                                 | 1.59  | 1.63  |
| 上游双拱肋 $L/B=1.5$                                                       | 1.57  | 1.43  |
| 下游双拱肋 $L/B=1.5$                                                       | -0.46 | -0.41 |
| 上游双拱肋 $L/B=4.0$                                                       | 1.74  | 1.71  |
| 下游双拱肋 $L/B=4.0$                                                       | 0.67  | 0.65  |

图 11 为在 4 种工况下时均流线与风压系数场,可以发现,上游单拱肋的  $a$ - $e$  面附近存在明显的正压区,在角点  $a$  和  $e$  处发生流动分离现象,并在背风侧形成涡脱,而在  $b$ - $c$  面存在较强的负压区。当  $L/B=$

1.5 时,在上游拱肋背风侧形成 2 个尺寸较大的旋涡,但旋涡环量却明显较少,旋涡结构较为松散,使得负压小于上游单拱肋相应值,导致其阻力系数和升力系数均小于上游单拱肋数据。在  $L/B=4.0$  的工况下,下游拱肋对上游拱肋尾部涡脱影响减弱,上游拱肋附近的时均流线与风压系数分布与上游单拱肋情况相似,因而两者三分力系数值接近。

下游单拱肋迎风侧存在正压区,在角点  $b$  和  $d$  处发生流动分离,在背风侧出现涡脱,形成了明显的负压区。当  $L/B=1.5$  时,上游拱肋的存在使得下游拱肋迎风侧未出现明显的正压区,且背风侧的负压明显小于下游单拱肋,导致其阻力系数小于下游单拱肋。当  $L/B=4.0$  时,上游拱肋尾流对下游拱肋的影响有所减弱,但没有消失。迎风侧出现较小的正压,背风侧负压逐渐增大,但仍明显小于下游单拱肋。这使得其阻力系数值明显大于  $L/B=1.5$  工况下的下游拱肋数据,但同时也明显小于单拱肋的值。

双拱肋的临界间距效应与文献[18]和[19]中双方柱的临界间距效应存在相似性。当双拱肋的  $L/B$  由 1.5 增加到 4.0 时,上游拱肋背风侧与下游拱肋迎风侧之间的 2 个旋涡逐渐收缩,直至仅附着于上游拱肋的背风侧,这与文献[18]中间距比由 3 增加到 4、文献[19]中间距比由 2 增加到 4 的情况类似。以上分析表明,研究不规则五边形双拱肋的气动特性,所得到的关于上游拱肋对下游拱肋的遮挡效应、临界间距效应等结论,可以为宽高比接近于 1 的双矩形或其他截面形式拱肋的气动特性研究提供参考。

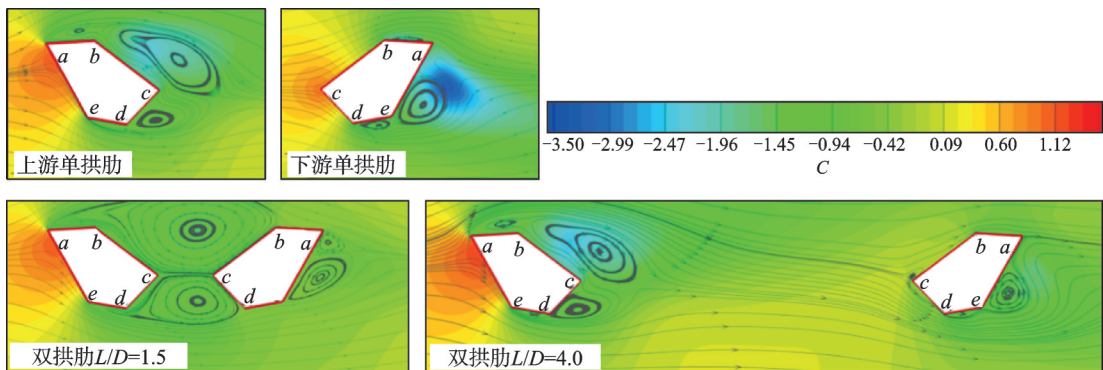


图 11 时均流线与风压系数场

Fig.11 Time-averaged streamlines and pressure coefficient fields

4 种工况下的时均流线与湍动能(turbulence kinetic energy,简称 TKE)场如图 12 所示,湍动能的物理意义是流体经过某点处的湍流程度,可以反映流场中不同位置的涡脱强度大小。上游单拱肋背风侧尾部涡脱强度,明显大于  $L/B=1.5$  时工况下的上、下游拱肋间的涡脱强度。当  $L/B=4.0$  时,上游拱肋的涡脱位置、强度恢复至与上游单拱肋相接近,说明此时下游拱肋对上游拱肋的涡脱特性几乎不产生影

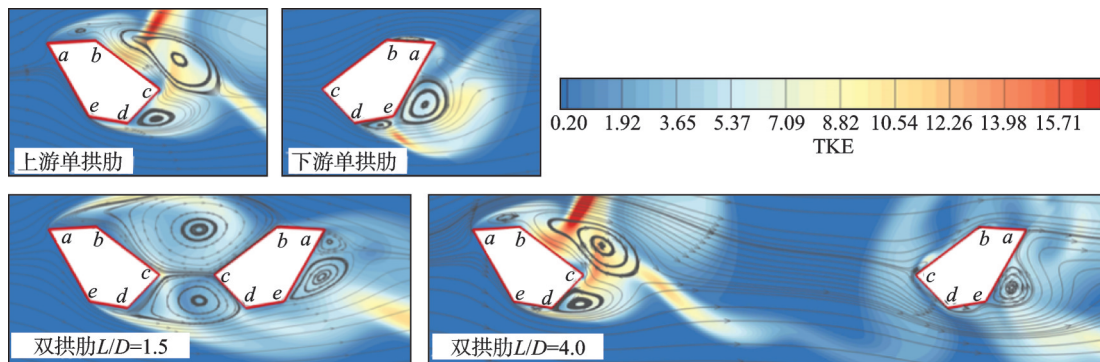


图12 时均流线与湍动能场

Fig.12 Time-averaged streamlines and TKE fields

响。下游单拱肋背风侧存在较强的涡脱,当 $L/B=1.5$ 时,受上游拱肋尾流的影响,下游拱肋的迎风侧涡脱强度有所增大,但背风侧的涡脱强度受到显著抑制。当 $L/B=4.0$ 时,下游拱肋的涡脱强度受上游拱肋的影响仍然较大,迎风侧的TKE值大于下游单拱肋数据,背风侧的涡脱强度仍然受到显著抑制。

## 5 结 论

1) 双拱肋在不同风攻角下的气动力系数均表现出明显的临界间距效应。当 $\alpha=-5^\circ$ 时,临界间距比 $(L/B)_c=2.0\sim 2.5$ ;当 $-4^\circ\leq\alpha\leq 5^\circ$ 时, $(L/B)_c=2.5\sim 3.0$ 。

2) 在 $L/B<(L/B)_c$ 时,上游拱肋的气动力系数表现出明显的减小效应,而干扰效应并不明显。下游拱肋的阻力、扭矩系数绝对值均表现为显著的减小效应,尤其在 $L/B<(L/B)_c$ 时更为明显。下游拱肋在正风攻角下的升力系数方向与下游单拱肋相反,在负风攻角下的数值与下游单拱肋的值差异较大。在 $L/B>(L/B)_c$ 时,正风攻角下的上游拱肋的气动力系数与下游单拱肋的数值差别较小,在负风攻角下升力系数绝对值表现为明显的放大效应。

3) 上游拱肋的斯托罗哈数在 $L/B=1.5、2.0$ 时明显小于上游单拱肋的相应值,其他间距比下的值与单拱肋的值相差不大。下游拱肋在不同间距比下的斯托罗哈数均明显小于下游单拱肋的值,尤其在 $1.5\leq L/B\leq 2.5$ 时更为显著。

4) 本研究聚焦于不规则五边形双拱肋的气动特性,研究发现的一些规律,如上游拱肋对下游拱肋的遮挡效应、双拱肋之间的临界间距效应等,可为宽高比接近1的双矩形拱肋的气动特性提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 晏致涛,李正良.中承式拱桥主拱静风载试验及数值模拟[J].重庆大学学报(自然科学版),2008,31(9): 1059-1063.  
YAN Zhitao, LI Zhengliang. Wind tunnel tests and numerical simulation on arches' static wind loads of half-through arch bridge[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31(9): 1059-1063. (in Chinese)
- [2] 李先进,卿仁杰,朱强,等.三主桁式大跨度钢拱桥气动力特性与风振性能研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(3): 628-636.  
LI Xianjin, QING Renjie, ZHU Qiang, et al. Aerodynamic characteristics and wind-induced vibration performance of long-span three main steel-truss arch bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(3): 628-636. (in Chinese)
- [3] 于洪刚.大跨度拱桥气动参数识别及风致响应研究[D].上海:同济大学,2008.
- [4] 严乃杰,李永乐,瞿国钊,等.钢桁拱肋三分力系数及涡振性能风洞试验研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(4): 102-107.  
YAN Naijie, LI Yongle, QU Guozhao, et al. Wind tunnel test for static wind loads and vortex-induced vibration characteristics of steel truss arch rib[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(4): 102-107. (in Chinese)
- [5] 杨詠昕,周锐,葛耀君.大跨度拱桥的等效风荷载[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(4): 490-497, 505.  
YANG Yongxin, ZHOU Rui, GE Yaojun. Equivalent wind loads of long-span arch bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(4): 490-497, 505. (in Chinese)
- [6] 熊辉,晏致涛,李正英,等.大跨度中承式拱桥静风

- 稳定性分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2012, 35(10): 51-56.
- XIONG Hui, YAN Zhitao, LI Zhengying, et al. Aero-static stability analysis of long span half-through arch bridges [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2012, 35(10): 51-56. (in Chinese)
- [7] CHENG J, JIANG J J, XIAO R C, et al. Wind-induced load capacity analysis and parametric study of a long-span steel arch bridge under construction[J]. Computers & Structures, 2003, 81(26): 2513-2524.
- [8] CHENG J, LI Q S. Reliability analysis of a long span steel arch bridge against wind-induced stability failure during construction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(3): 552-558.
- [9] GE J Y, YANG Y X, PANG J B, et al. Wind-induced damages to a three-span, continuous, concrete arch bridge under construction[J]. Structural Engineering International, 2007, 17(2): 141-150.
- [10] 郑史雄, 唐煜. 大跨度拱桥矩形拱肋静风阻力研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 33-38.
- ZHENG Shixiong, TANG Yu. Investigation of aerostatic drag forces on rectangular arch ribs of long span arch bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 33-38. (in Chinese)
- [11] 刘红波, 马景, 陈志华, 等. 筒形拱桥数值风洞模拟及体型系数研究[J]. 空间结构, 2021, 27(3): 88-96.
- LIU Hongbo, MA Jing, CHEN Zhihua, et al. Numerical wind tunnel simulation and shape factor of cylindrical arch bridge[J]. Spatial Structures, 2021, 27(3): 88-96. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国交通部. 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.
- [13] 杨群, 吴倩云, 姜会民, 等. 不同风向角下线形布置双方柱脉动气动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 159-166, 192.
- YANG Qun, WU Qianyun, JIANG Huimin, et al. Fluctuating aerodynamic force characteristics of two square cylinders arranged inline under different wind direction angles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 159-166, 192. (in Chinese)
- [14] 杨群, 吴倩云, 姜会民, 等. 线形布置双方柱平均气动力特性试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 503-510.
- YANG Qun, WU Qianyun, JIANG Huimin, et al. Experimental study on mean aerodynamic characteristics of two square cylinders arranged inline[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 503-510. (in Chinese)
- [15] ALAM M M, MORIYA M, SAKAMOTO H. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon[J]. Journal of Fluids & Structures, 2003, 18: 325-346.
- [16] ALAM M M, MEYER J P, et al. Two interacting cylinders in cross flow[J]. Physical Review E, 2011, 84(5): 304.
- [17] 杜晓庆, 顾李敏, 吴葛菲, 等. 错列双圆柱的脉动升力特性及其流场机理[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 62-71.
- DU Xiaoqing, GU Limin, WU Gefei, et al. Fluctuating lift and flow field mechanisms of two staggered circular cylinders[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 62-71. (in Chinese)
- [18] 杜晓庆, 陈丽萍, 董浩天, 等. 串列双方柱的风压特性及其流场机理[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 109-118.
- DU Xiaoqing, CHEN Liping, DONG Haotian, et al. Wind pressure characteristics and flow mechanism of two tandem square columns[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(3): 109-118. (in Chinese)
- [19] 杜晓庆, 施春林, 许汉林, 等. 串列双方柱气动干扰机理的数模模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(27): 181-186.
- DU Xiaoqing, SHI Chunlin, XU Hanlin, et al. Aerodynamics numerical simulation study on interference mechanism of two square cylinders in tandem arrangement[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27): 181-186. (in Chinese)



**第一作者简介:**刘小兵,男,1982年3月生,博士、教授。主要研究方向为桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制。曾发表《不同高宽比并列双幅箱梁气动升力的干扰效应》(《振动、测试与诊断》2023年第43卷第1期)等论文。  
E-mail: x\_b\_liu@126.com

**通信作者简介:**杨群,女,1981年11月生,博士、讲师。主要研究方向为桥梁与结构风工程。  
E-mail: quny123@126.com