

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.115



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



气动干扰效应对串列双矩形断面气动特性 及流场结构的影响

陈增顺^{1a}, 崔正徽^{1a}, 许叶萌^{1a,1b}, 赵智航², 董炎民^{1a}

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 航空航天学院, 重庆 400045; 2. 中冶建工集团有限公司, 重庆 400084)

摘要:为探究气动干扰效应对5:1串列双矩形断面气动特性及其流场结构的影响,采用刚性模型测压试验与大涡模拟(LES)相结合的方法,在雷诺数 $Re=4.2\times 10^4$ 时,系统分析不同间距比($C/D=1\sim 10$,上下游结构间距 C 与断面高度 D 之比)工况,重点研究上、下游断面的表面风压分布、整体气动力响应及流场演变特征。结果表明,上游断面的风压分布与单幅断面基本一致,受气动干扰影响较小;而随间距比增大,下游断面风压分布虽逐渐趋近单幅断面,但在 $C/D=10$ 时仍存在明显差异。气动干扰效应对下游断面气动力特性的影响尤为显著,当结构间距比 $C/D=1$ 时,下游截面平均阻力系数仅为单幅截面的1/3,并随间距增加逐步回升但未完全恢复,而下游结构脉动阻力、脉动升力的峰值出现在 $C/D=3$ 附近,且当结构间距比 $C/D>5$ 时二者趋于稳定,但仍高于单幅截面。

关键词:串列双矩形断面;气动干扰;气动特性;流场机理;大涡模拟

中图分类号:U443.35 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Effects of aerodynamic interference on the aerodynamic characteristics and flow field structure of tandem double rectangular sections

CHEN Zengshun^{1a}, CUI Zhenghui^{1a}, XU Yemeng^{1a,1b}, ZHAO Zhihang²,
DONG Yanmin^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400084, P. R. China)

Abstract: To investigate the influence of aerodynamic interference effects on the aerodynamic characteristics and flow field structures of tandem rectangular sections with a 5:1 aspect ratio, a systematic analysis was conducted by combining rigid-model pressure measurements with Large Eddy Simulation (LES). The study

收稿日期:2025-09-04

基金项目:重庆市杰出青年科学基金(CSTB2022NSCQ-JQX0034);重庆市建设科技计划项目(城科字2023第5-5号)

作者简介:陈增顺(1988-),男,博士,教授,主要从事结构/桥梁风工程研究,E-mail:zengshunchen@cqu.edu.cn。

赵智航(通信作者),男,博士,E-mail:06648721@alu.cqu.edu.cn。

Received: 2025-09-04

Foundation items: Chongqing Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. CSTB2022NSCQ-JQX0034), Chongqing Municipal Construction Science and Technology Plan Project (No. 2023 5-5)

Author brief: CHEN Zengshun (1988-), PhD, professor, main research interest: structure/bridge wind engineering, E-mail: zengshunchen@cqu.edu.cn.

ZHAO Zhihang (corresponding author), PhD, E-mail: 06648721@alu.cqu.edu.cn.

focused on various spacing ratios ($C/D=1-10$, where C denotes the spacing between the upstream and downstream sections and D the section height), at a Reynolds number of $Re=4.2 \times 10^4$, examining the surface pressure distribution, overall aerodynamic response, and flow field evolution of both the upstream and downstream sections. The results show that the surface pressure distribution of the upstream section is generally consistent with that of an isolated section, indicating limited influence from aerodynamic interference. In contrast, the downstream section exhibits a pressure distribution that gradually approaches that of a single section as the spacing ratio increases, yet significant discrepancies remain even at $C/D=10$. The aerodynamic characteristics of the downstream section are particularly affected by interference: when $C/D=1$, its mean drag coefficient is only one-third of that of an isolated section, and although it recovers gradually with increasing spacing, full restoration is not achieved. Moreover, the peak values of fluctuating drag and lift on the downstream section occur around $C/D=3$. When $C/D>5$, both responses tend to stabilize, yet they remain noticeably higher than those of a single section.

Keywords: tandem double rectangular cross-sections; aerodynamic interference; aerodynamic characteristics; flow field mechanism; large eddy simulation

大跨桥梁在城市交通、区域互联和经济发展中扮演着重要角色^[1]。双幅桥梁作为一种特殊的桥梁形式,以其对称性强、空间利用率高等特点,广泛应用于大跨度桥梁设计^[2]。与单幅桥梁相比,双幅桥梁上下游桥面之间存在不可忽略的气动干扰效应^[3-4]。气动干扰效应往往对双幅桥梁整体的气动特性产生不利影响。因此,研究双幅桥梁结构的气动干扰效应并进一步揭示其作用机理对于桥梁抗风设计具有重要意义。

为阐明气动干扰效应对双幅桥梁结构的影响,学者们通过风洞试验和数值模拟开展了大量研究。研究发现,双幅桥梁的气动干扰效应与结构气动外形^[5]、雷诺数^[6]和间距比^[2,7]等因素密切相关。其中,结构间距比是影响双幅桥梁结构气动特性及流场特征的关键因素^[8-9]。He等^[10]研究了不同间距下气动干扰效应对双流线型箱梁的影响,指出双流线型箱梁气动干扰效应在间距比为0.25(上、下游结构间距与上游断面宽度的比值)时最剧烈,而在间距比为5时气动干扰效应开始消失。刘志文等^[11]、陈政清等^[12]分别采用测力法和测压法对某双幅桥面桥梁三分力系数的气动干扰效应进行了一系列节段模型风洞试验研究,结果表明:与单幅桥面相比,下游桥面的阻力系数有显著的降低,上游桥面的阻力系数略有降低,而上下游桥面的升力系数和升力矩系数的气动干扰效应不明显。郭震山等^[13]通过节段模型测力风洞试验研究了既有桥梁对其临近新建桥梁三分力系数的气动干扰效应,并引入气动干扰因子度量气动干扰效应对三风力系数的影响强弱。Kimura等^[14]研究发现,即使间隙宽度是箱梁宽度的7倍,气动干扰也可能显著。然而,Irwin等^[15]发现,当间隙约为梁宽的两倍时,并排桁架梁的升力和力

矩系数几乎没有变化。尽管当前研究已经积累了大量气动干扰现象的研究成果,然而部分研究侧重测力试验,缺乏风压分布及流场演化的深入解析,难以全面揭示气动干扰的内在机制。此外,关于气动干扰作用下流场结构的分析尚不充分,大涡模拟(LES)等高精度数值模拟方法在该领域的应用仍有待拓展。

以国际风工程协会发起的空气动力学基准(Benchmark on the Aerodynamic of a Rectangular 5:1 Cylinder, BARC)中的典型钝体断面为研究对象,选择雷诺数 $Re=4.2 \times 10^4$ 进行研究。通过开展风洞试验和大涡模拟(LES),归纳总结了双幅桥梁结构间的气动干扰效应随结构间距变化对结构气动特性的影响规律,并对流场结构进行详细分析,以揭示双幅桥梁典型钝体间气动干扰效应的一般规律。

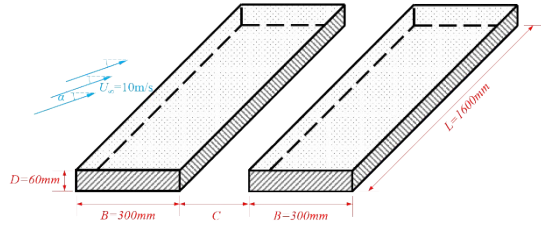
1 风洞试验及数值模拟设置

1.1 风洞试验设置

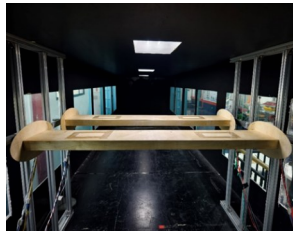
刚性节段模型测压风洞试验在重庆大学边界层风洞实验室进行。该风洞为直流吸气式风洞,气动轮廓最大尺寸为 $4.4\text{ m} \times 3.4\text{ m} \times 31.23\text{ m}$,试验段尺寸为 $2.4\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 15\text{ m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),风速可调节范围为 $0.5 \sim 45\text{ m/s}$,湍流度 $\leq 1.0\%$ 。试验采用均匀流场,风速设定为 10.0 m/s ,雷诺数 $Re=4.2 \times 10^4$ 。

实验采用两幅完全相同的节段模型,每个模型长(L) $1\,600\text{ mm}$ 、宽(B) 300 mm 、高(D) 60 mm ,为消除端部效应,模型两端设置端板。节段模型的布置如图1所示。试验共考虑6种工况,在 0° 风攻角下,通过调整上、下游模型的相对位置使双幅节段模型

的断面间距(C)为 $1D$ 、 $2D$ 、 $3D$ 、 $5D$ 、 $8D$ 、 $10D$ 。沿上、下游模型的长度方向设置5个测压断面,每个测压断面沿模型横断面周向均匀布置36个测压孔,具体测压点位置见图2。



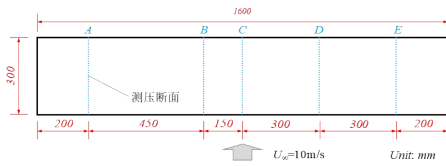
(a) 节段模型示意图



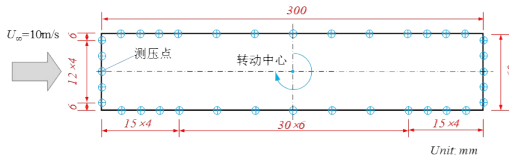
(b) 风洞实拍

图1 节段模型布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of segment model arrangement



(a) 测压断面位置示意图



(b) 横断面测点布置图

图2 节段模型测点布置示意图

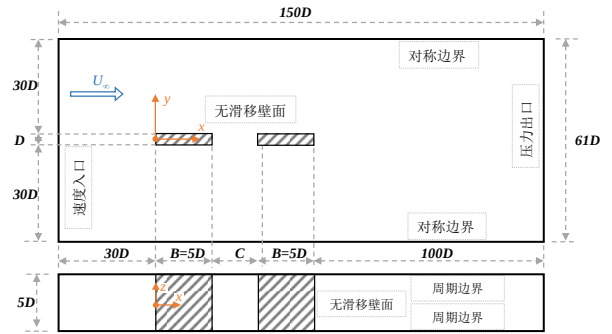
Fig.2 Schematic diagram of measurement point arrangement for segment model

1.2 数值模拟设置

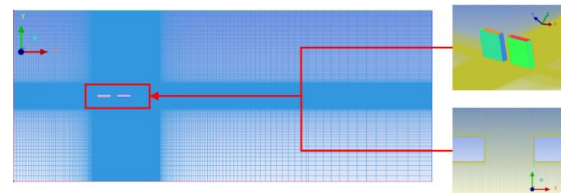
在CFD数值模拟中,节段模型的计算域及边界条件如图3(a)所示。上游模型迎风面距来入口 $30D$,下游模型背风面距压力出口 $100D$;左右边界距模型各 $30D$,设为周期边界条件;上下侧壁面分别距模型上、下侧面 $30D$,设为对称边界,其中 D 为模型高度。计算域上游为速度入口边界,风速设为 $U=10\text{ m/s}$;下游为压力出口边界,桥梁断面本身设为无滑移壁面。

网格划分采用结构化网格,断面附近设有25层边界层,第1层边界层厚度为 0.025 mm ,以满足 y^+

小于1的要求,网格的具体细节见图3(b)。数值模拟基于ANSYS Fluent进行大涡模拟(LES)。压力-速度耦合通过SIMPLEC算法实现,亚格子模型采用Smagorinsky-Lilly模型。对流项及速度分量采用二阶迎风格式进行求解,瞬态方程求解采用二阶隐式格式,残差设定为 $0.000\ 01$ 。时间步长设置为 $0.000\ 5\text{ s}$,每个工况计算 $6\ 000$ 步,其中前 $1\ 000$ 步用于流场发展阶段,后 $5\ 000$ 步的数据用于气动力与流场特性的统计与分析。



(a) 计算域及边界条件



(b) 网格划分示意图

图3 计算域及网格划分示意图

Fig.3 Computational domain and grid configuration

1.3 数值模拟验证

为验证方法的有效性,首先进行了单幅矩形断面的数值模拟工作,模拟得到的结构壁面无量纲距离 y^+ 严格小于1(如图4(a))。此外,为了评估网格参数实际的网格分辨率,采用Celik^[16]提出的空间分辨率指标 Q_{LES} 来衡量大涡模拟网格的解析率,并记为 Q_{LES} ,其定义为

$$Q_{LES} = \left[1 + a_v \left(\frac{v_{sgs} + v}{v} \right) \right]^{-a_e} \quad (1)$$

式中: v 为流体分子运动黏度, v_{sgs} 为亚格子流体黏度, a_v 和 a_e 为经验系数,分别取 0.05 、 0.53 。根据Celik^[16]的定义,当 $Q_{LES} \geq 80\%$ 时,表明网格分辨率符合壁面解析的大涡模拟(LES-NWR)的分辨率要求。如图4(b)所示,跨中 $x-y$ 平面及壁面区域的 Q_{LES} 值全域均值达 96.2% 以上,剪切层及近尾流区 $Q_{LES} > 85\%$,表明网格系统在湍流主导区域满足LES近壁面解析的分辨率要求。该结果验证了网格参数设置的合理性。

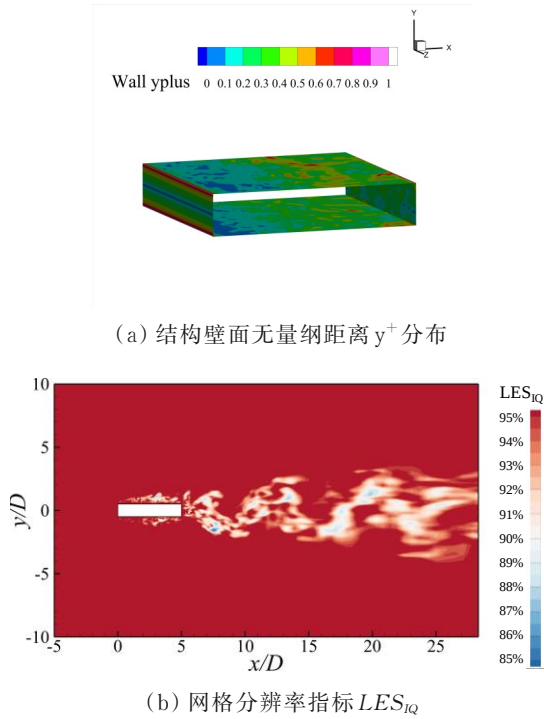
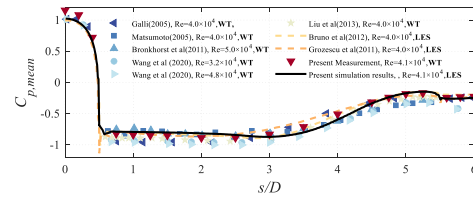


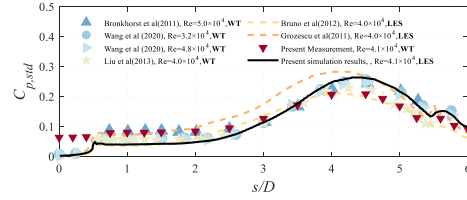
图 4 大涡模拟网格参数验证
Fig. 4 Validation of Grid Parameters in LES

此外,表 1 将模拟得到的雷诺数 Re_D 、湍流度 I_u 、平均阻力系数 $C_{d,mean}$ 、平均升力系数 $C_{l,mean}$ 、脉动升力系数 $C_{l,rms}$ 及斯特劳哈尔数 St 与现有文献中的相关结果及风洞试验结果进行对比,对比分析表明,数值模拟得到结果能够较为准确地反映结构的气动特征,验证了所采用数值模拟方法的有效性。

为了验证计算结果的准确性,将单幅矩形表面的风洞试验和大涡模拟的时均和脉动压力系数与文献结果进行对比,结果如图 5 所示。由于细长钝体结构的风压系数分布受到雷诺数效应的影响较大,因此对比文献结果均选择了雷诺数接近($Re=3.2 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$)的 5:1 矩形风洞试验和数值模拟结果。从图 5 中可以看到,风洞试验测量与大涡模拟(LES)结果与已有文献结果吻合良好,验证了风洞试验和数值模拟设置的合理性及测量、计算结果的准确性。



(a) 平均压力系数 $C_{p,mean}$



(b) 脉动压力系数 $C_{p,std}$

图 5 单幅矩形断面压力系数验证

Fig. 5 Validation of Pressure Coefficient for Single-Deck Rectangular Section

2 干扰效应下的气动特性变化规律

2.1 风压分布特性

图 6 展示了间距比 C/D 分别为 1、3、5、10 时,基于风洞试验数据得到的双幅矩形断面与单幅断面平均风压系数对比。其中, s 为来流流经结构表面的最远路程,从结构迎风面来流分离点开始,经结构上下表面后终止于结构背风面。由图 6(a)可知,在不同间距比下,上游断面平均风压系数与单幅断面几乎完全一致,表明间距比对上游断面风压的气动干扰效应影响较小。然而,如图 6(b)所示,下游断面的风压分布与单幅断面存在明显差异。在 $s/D=0 \sim 0.5$ 范围内,风压随间距比的变化呈现逐渐增大的趋势,表明气动干扰效应随结构间距的增大逐渐减弱。特别是在结构间距 $C=1D$ 时,下游断面平均风压系数为负值,原因可能是上游断面尾流漩涡未能充分发展,下游断面迎风面处于上游断面尾流漩涡影响范围内,导致这一范围内的平均风压为负值。

类似于单幅断面,下游断面的平均风压极小值出现在 $s/D=0.75$ 附近。随着间距比的增加,风压的极小值在逐渐减小,且在 $s/D=5$ 附近,下游断面

表 1 CFD 计算结果对比

Table 1 The comparison of CFD calculation results

文献	方法	雷诺数 Re_D	湍流度 $I_u/\%$	平均阻力系数 $C_{d,mean}$	平均升力系数 $C_{l,mean}$	脉动升力系数 $C_{l,rms}$	斯特劳哈尔数 St
Schewe(2013) ^[17]	Exp	4.0×10^4	<0.4	1.029	~ 0	0.08	0.111
Wang(2020) ^[18]	Exp	4.8×10^4	<1	1.0	~ 0	0.155	0.112
Bruno(2011) ^[19]	3D LES	4.0×10^4	0	1.03	-0.002 4	0.146	0.122
Grouzescu(2011) ^[20]	3D LES	4.0×10^4	<1	0.96	0.002 2	0.35	0.122
LES 模拟值	LES	4.0×10^4	<0.1	1.064	-0.009	0.109 1	0.121
风洞试验测量值	WT	4.0×10^4	<0.5	1.183	0.01	0.097	0.117

平均压力极小值已经接近单幅断面的水平。可以推断,在 $s/D = 0.75$ 附近平均压力出现极小值是多个涡旋主导,且这些涡旋的形成顺序随结构间距比不断增加而变化。在 $s/D = 0.75 \sim 6$ 范围内,下游断面表面平均风压逐渐恢复至接近零,且结构间距比越小,压力恢复越快。尽管如此,在结构间距 $C = 10D$ 时,下游断面平均风压分布仍与单幅断面存在明显差异,表明气动干扰效应对下游断面的影响依然不可忽视。

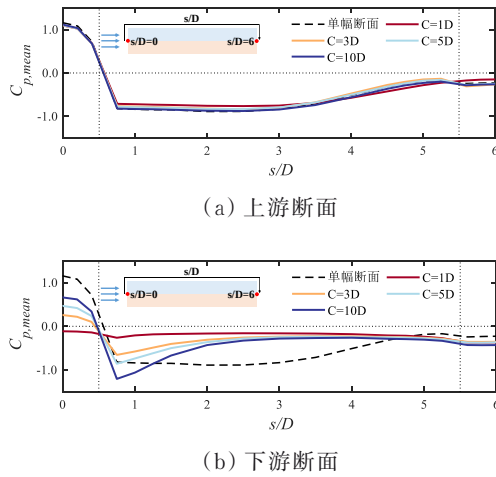


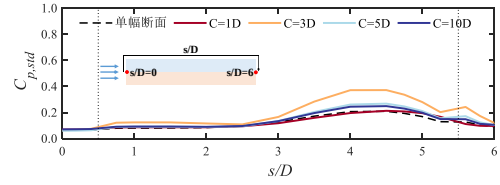
图6 不同间距下平均风压分布

Fig. 6 The average wind pressure distribution at different spacings

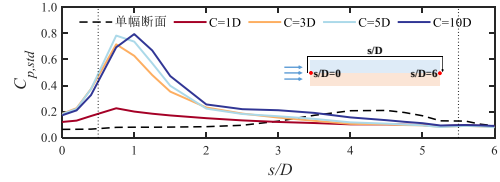
图7为不同间距下脉动风压系数的分布情况。对于上游断面,结构间距比的变化未显著改变风压分布的总体规律,尤其在结构间距比 $C = 3D$ 时,气动干扰效应对上游断面的影响较为显著,主要表现在 $s/D = 3 \sim 6$ 范围内的区域。此现象可能是下游断面的存在阻碍了上游断面尾流的发展,导致双幅断面结构上游断面在该区域内的风压力分布与单幅断面存在细微差距。如图7(b)所示,气动干扰效应对下游断面影响较为显著,这是由于上游断面对于来流的“遮挡效应”改变了下游断面的入流条件,使得下游断面 $s/D = 3 \sim 6$ 范围内的风压分布与单幅断面显著不同。

2.2 气动力特性

图8展示了双幅断面在不同间距条件下的气动力系数变化规律。上游结构的平均阻力系数 $C_{D,mean}$ 与单幅桥梁断面的阻力系数保持一致,仅在较小间距范围内($C \leq 3D$)出现了轻微下降。相比较而言,下游结构的平均阻力系数受结构间距影响更为显著。整体来看,下游结构的平均阻力系数始终低于单幅结构水平,且随着间距的增大呈现出缓慢上升的趋势。即使在 $C = 10D$ 时,其平均阻力系数仍低



(a) 上游断面



(b) 下游断面

图7 不同间距下风压系数标准差分布

Fig. 7 The standard deviation distribution of wind pressure coefficients at different spacings

于单幅结构约25%。与刘路路等^[2]流线型截面试验结果相比,下游阻力系数变化趋势一致,但脉动峰值出现位置不同,说明截面形状对干扰临界间距存在显著影响。此外,如图8(b)所示,随结构间距的增加,上、下游结构的脉动阻力系数均高于单幅截面水平。且当结构间距为 $C = 3D$ 时,阻力脉动水平达到峰值,此后,随结构间距的继续增加而逐渐回落,并在 $C = 5D$ 后趋于稳定,但仍高于单幅截面水平。

双矩形钝体断面具有较为显著的对称特性,其平均升力系数及力矩系数在 0° 风攻角时均接近于0,变化趋势无明显规律,因此不再展示。然而,脉动升力系数 $C_{L,std}$ 能反映上下游断面的整体升力脉动水平,图8(c)为脉动升力系数随着间距的变化曲线。在最小间距条件下,上下游断面的脉动升力接近单幅断面水平,但随着间距的增大,脉动强度迅速上升。上游断面脉动升力在 $C = 2D$ 处达到峰值,随后逐步降低并趋于单幅断面水平,表明气动干扰效应对结构脉动升力的影响随间距增大而减弱。而下游断面脉动升力则在 $C = 4D$ 处达到峰值 $C_{L,std} = 3.7$,之后随间距的增加缓慢下降。脉动力矩系数由脉动升力系数推导而来,具有与脉动升力系数基本一致的变化趋势。

2.3 力系数频谱特性

图9为不同间距下上、下游断面的升力功率谱,可以看到,双幅结构在不同间距下均表现出明显单峰分布特性,且功率谱幅值随结构间距的变化呈先减后增再减的趋势,上下游断面功率谱幅值分别在 $C = 2D$ 和 $C = 3D$ 时达到最大值,此时漩涡脱落强度较大。且仅在 $C = 1D$ 时双幅结构功率谱幅值小于单幅结构,气动干扰表现为抑制效应,当 $C > 1D$

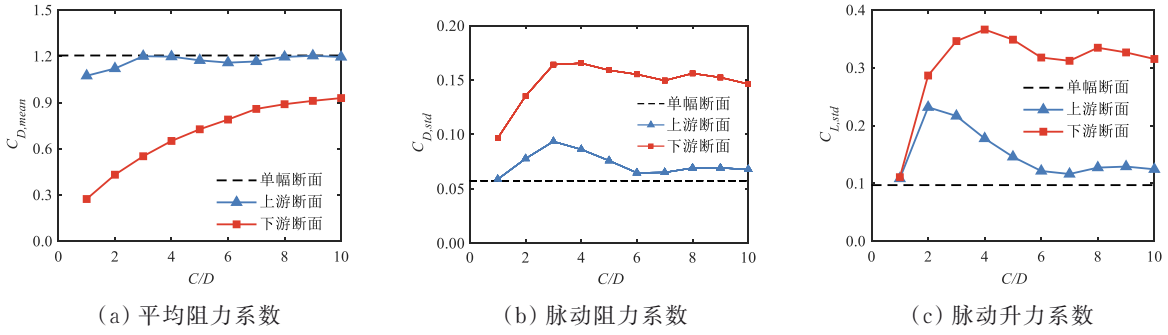
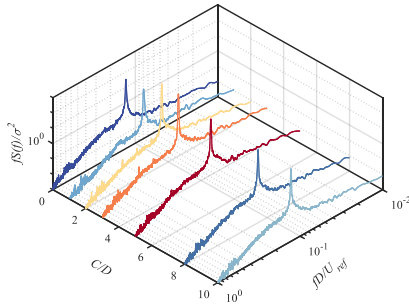


图8 不同间距下力系数变化曲线

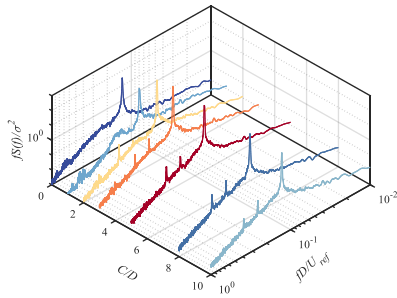
Fig. 8 The variation curve of force coefficients at different spacings

时,上下游断面功率谱幅值均不同程度地大于单幅结构,气动干扰效应则呈现放大作用,但随结构间距的增加干扰效应呈现减弱的趋势。

斯特罗哈数。在 $C = 3D$ 时,抑制效应最为显著,双幅断面的斯特罗哈数为单幅断面的 0.92 倍。



(a) 上游断面



(b) 下游断面

图9 不同间距下升力功率谱

Fig. 9 The Fourier amplitude spectrum of the lift coefficient at different spacings

基于风洞试验数据计算得到的斯特罗哈数如图 10 所示。由图 10 可见,上、下游断面具有相同的斯特罗哈数,表明上下游断面具有相同的涡脱频率,且随着结构间距的增加,斯特罗哈数先减小后增大,最小值发生在 $C = 3D$ 时。与 He 等^[10]流线型截面数值结果相比,斯特罗哈数随间距变化规律一致,但衰减速率更缓,表明钝体尾流能量耗散机制不同。与单幅断面对比,双幅结构的斯特罗哈数均较单幅断面有所减小,且气动干扰效应明显抑制了

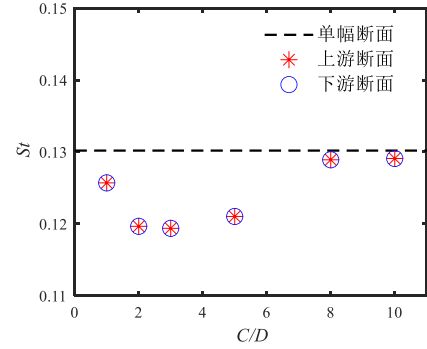


图10 不同间距下的斯特罗哈数

Fig. 10 Strouhal number at different spacings

3 气动干扰效应下的流场作用机理

3.1 平均流动结构

图 11 为结构间距 $C = 1D$ 、 $3D$ 、 $10D$ 及单幅断面在 $z = 0$ 切面处的整体时均流线图,背景填充为平均压力系数。从图 11 可以看出,上游断面流场形态与单幅断面几乎一致,验证了气动干扰效应对上游断面气动特性影响较小的结论。

然而,受上游断面“遮挡效应”的影响,下游断面的流场形态与单幅断面存在显著差异。当结构间距 $C = 1D$ 时,下游断面的存在抑制了上游断面尾流的发展,导致上游断面的尾流漩涡填满了整个间隙,改变了下游断面的入流条件,这使下游断面迎风面压力分布不同于单幅断面,表现为负压状态。因此,在 $C = 1D$ 时,下游断面平均压力系数整体表现为负值。随着结构间距的增加,上游断面尾流逐渐得到充分发展。当结构间距为 $C = 3D$ 时,下游断面剪切层逐渐形成,前缘分离涡开始出现,压力分布逐渐接近于单幅断面的规律。同时,由于剪切层的存在,下游断面侧面流动变得较为复杂。结构侧面的流动分离对结构气动升力有较大贡献。因此,当结构间距 $C > 3D$ 时,下游断面升力系数表

现出较大波动。当结构间距继续增加到 $C = 10D$ 时,下游断面流线形态与单幅断面相比仍存在较大差距,但压力分布规律已经趋于相似。

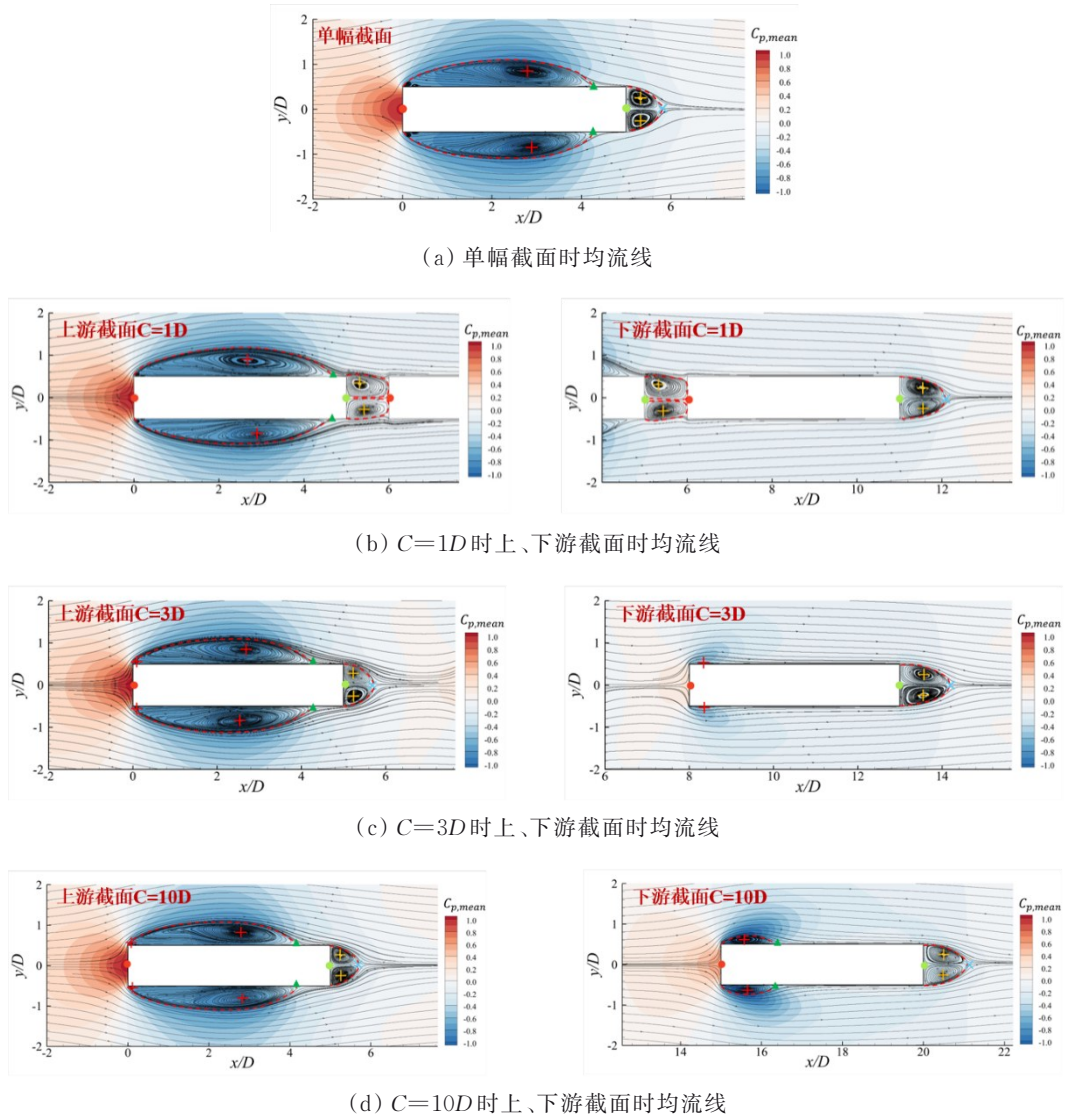


图 11 不同间距下的时均流线图

Fig. 11 Time-averaged streamline diagram at different spacings

此外,单幅断面在前缘角点处可见两明显涡旋,从而使得结构上表面靠近迎风面位置处($s/D = 0.75$ 附近)出现压力的极值。而下游断面剪切层形成受上游断面尾流的抑制,因此在较小的结构间距下,相同位置处压力极值的绝对值较小。随着下游断面剪切层的发展,结构前缘分离涡逐渐出现,导致结构表面压力的极值增大。值得注意的是,即便结构间距增到 $C = 10D$,下游断面剪切层分布与单幅断面仍有较大区别。此时, $s/D = 0.75$ 附近处压力分布由结构侧面分离涡主导,而这些侧面分离涡尺度明显大于前缘分离涡的尺度。因此,在 $C = 10D$ 时,下游断面表面压力极值的绝对值大于单幅断面。可以推断,若结构间距进一步增大,下游断面的侧面分离涡将沿顺流向后移, $s/D = 0.75$ 处压

力将主要由前缘分离涡主导。随着结构间距的增大,结构上表面靠近迎风面位置处的压力极值的绝对值呈现先增大后减小的趋势,在结构间距足够大时,下游断面压力极值将趋近于单幅断面。

3.2 瞬时流场结构

图 12 为不同间距下双幅矩形结构的瞬时涡量分布。从图 12 可以看出,上游断面表面的剪切层向结构尾部流动并形成涡旋。对于较小的结构间距,如 $C = 1D$ 时,结构间隙内未观察到明显的漩涡脱落现象,进一步证实了小间距时下游断面对上游断面尾流涡旋脱落的抑制作用。

随着结构间距的增大,当 $C = 3D$ 时,可以观察到上游断面的尾流涡脱交替地从两侧进入结构间隙,并随着间距的进一步增大,漩涡数量在结构间

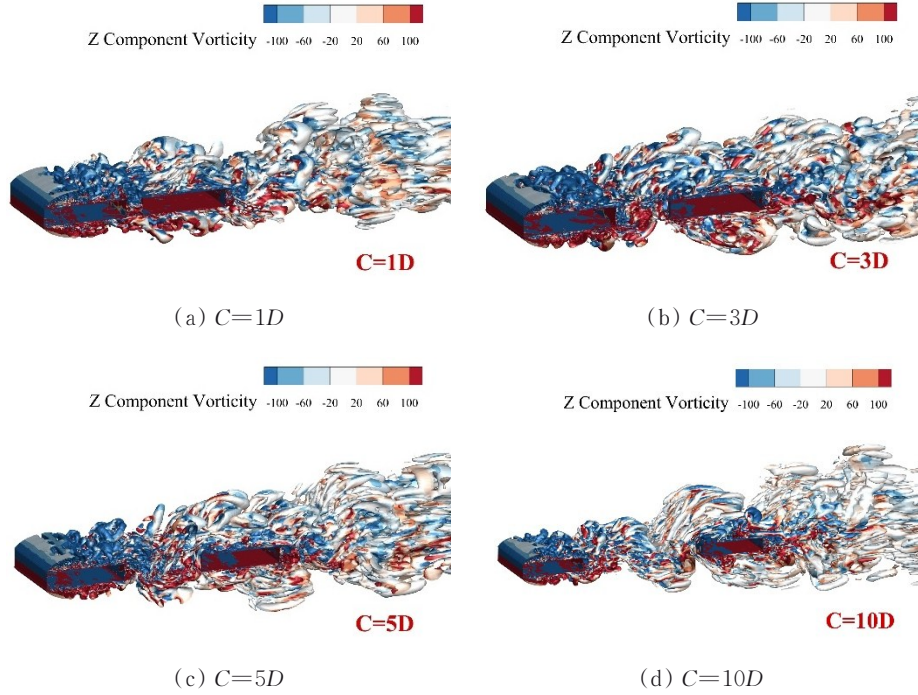


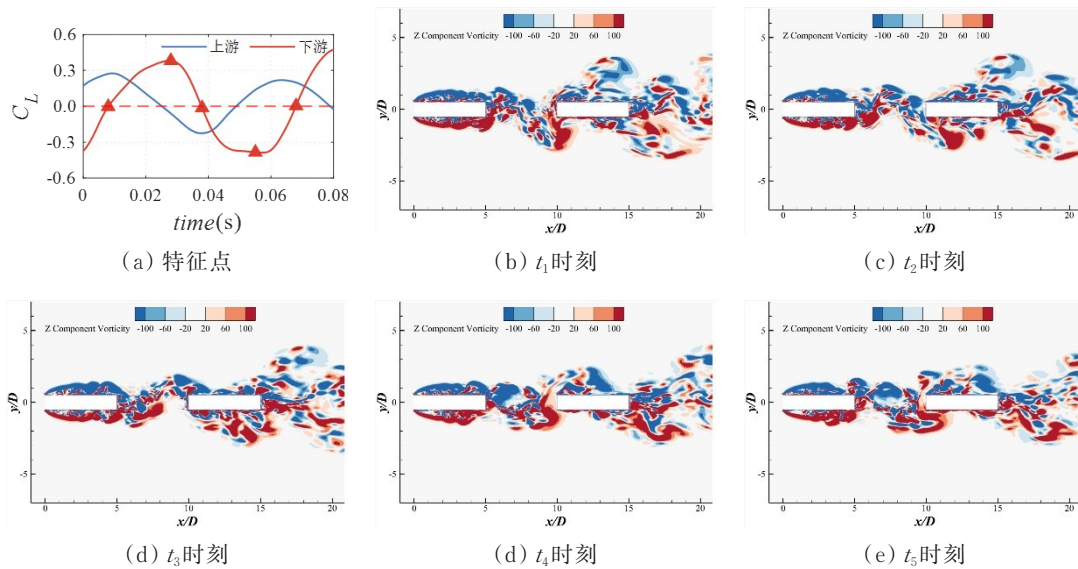
图 12 不同间距下的流场瞬时涡量图

Fig. 12 Instantaneous vorticity diagram of the flow field at different spacings

隙内逐渐增加。由于漩涡在交替过程中逐渐减弱, 涡旋对下游断面的冲击作用也随着结构间距的增大而逐步减弱。当结构间距继续增大到 $C=10D$ 时, 上游断面尾流漩涡得到充分发展, 呈现出由下游断面结构前缘交替消散的趋势, 但此时下游断面近壁面剪切层仍受上游断面尾流的影响, 气动干扰效应依然不容忽视。此外, 下游断面在上游断面尾流的影响下, 其尾流由两部分组成: 一部分是由近壁剪切流形成的漩涡, 另一部分是上游断面尾流的

湍流行为。

为阐明双幅桥梁结构间的气动干扰机理, 以结构间距 $C=5D$ 为例, 图 13 展示了单个周期内 $z=0$ 切面的瞬时涡量。从图 13 可以看出, 来流在上游断面近壁面形成剪切层后继续向尾部发展, 并在背风面形成交替脱落的漩涡进入结构间隙, 之后作用于下游断面前缘位置并发生破碎, 最后, 随下游断面近壁面剪切流一同向结构尾部流动。

图 13 $C=5D$ 时升力时程周期中不同位置处瞬态涡量Fig. 13 Instantaneous vorticity at different locations in the lift time series cycle when $C=5D$

受上游断面尾流涡脱的影响,下游断面前缘剪切层的发展受到抑制,结构两侧流动分离差异较大。由于上游断面尾流漩涡的冲击作用,下游断面前缘处压力产生较大波动。此外,由于近壁面剪切流及上游断面尾流湍流的共同影响,下游断面侧面流动分离呈现较为复杂的规律,结构整体气动升力出现较大波动。因此,对于实际桥梁断面(如流线型断面),气动外形优化可通过引入上游导流槽或底板通风结构来削弱尾流干扰效应。

4 结论

基于风洞测压试验与大涡模拟(LES),研究了宽高比为5:1的串列双矩形断面在不同间距比下的气动干扰效应,从风压分布、气动力特性及流场机理3个方面揭示了干扰规律及其内在联系。主要结论如下:

1)气动干扰效应对上游断面的影响较小,而对下游断面的气动特性影响显著。随着间距比的增大,下游断面表面负压区范围逐渐缩小,平均风压分布逐步恢复;但在 $C/D=10$ 时仍未完全与单幅断面一致。下游断面的平均阻力系数随间距比增大而逐步上升,但即使在 $C/D=10$ 时仍低于单幅断面约25%。阻力与升力的脉动幅值均在中等间距($C/D=3\sim 4$)区间内达到峰值,随后趋于稳定,说明该区间为气动干扰作用最强阶段。

2)在小间距条件下($C/D\leq 3$),上游尾流尚未充分发展,双断面间形成封闭负压区,导致下游迎风面出现反向压力分布。随着间距增大,尾流涡旋逐渐形成并交替脱落,下游断面剪切层得以充分发展,升力脉动显著增强。当 $C/D\geq 5$ 时,尾流干扰效应明显减弱,流场结构与单幅断面趋于一致,气动特性逐渐稳定,合理增大桥面间距($C/D\geq 5$)可有效降低下游桥面气动力脉动水平。

参考文献

- [1] 袁智杰,王浩,茅建校,等.限位吊索对三跨连续悬索桥静动力特性的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(3):395-401.
YUAN Z J, WANG H, MAO J X, et al. Influence of displacement limiting cable on static and dynamic characteristics of three-span continuous suspension bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(3): 395-401. (in Chinese)
- [2] 刘路路,何旭辉,邹云峰,等.间距对公铁双幅主梁气动特性影响的试验研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1482-1494.
LIU L L, HE X H, ZOU Y F, et al. Experiment study on spacing effect of the aerodynamic characteristics of twin parallel decks for rail-cum-road bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1482-1494. (in Chinese)
- [3] 王铖铖,丁德豪,朱玉.既有桥梁对新建斜拉桥主梁气动干扰效应的试验研究[J].桥梁建设,2023,53(增刊1):25-30.
WANG C C, DING D H, ZHU Y. Experimental study of aerodynamic disturbance effect of existing bridge on main girder of under-construction cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2023, 53(Sup 1): 25-30.
- [4] 赵智航,刘元杰,陈增顺,等.大跨双幅桥梁新型同步气弹-测压风洞试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(4):243-244.
ZHAO Z H, LIU Y J, CHEN Z S, et al. Novel synchronized aeroelastic-pressure measurement wind tunnel experimental analysis for long-span double-deck bridges [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(4): 243-244. (in Chinese)
- [5] ZHU L D, QIAN C, SHEN Y K, et al. Aerodynamic shape optimization emphasizing static stability for a super-long-span cable-stayed bridge with a central-slotted box deck [J]. Wind and Structures, 2022, 35(5): 337-351.
- [6] 刘路路,杨皓然,邹云峰,等.公铁同层双幅非对称主梁气动干扰特性研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(10):3861-3872.
LIU L L, YANG H R, ZOU Y F, et al. Aerodynamic interference effect of twin separated asymmetric parallel decks for a rail-cum-road bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3861-3872. (in Chinese)
- [7] FAN S W, CHEN W, TANG H J, et al. Aerodynamic interference between two boxes in parallel arrangement and flow field characteristics around the girder [J]. Advances in Bridge Engineering, 2022, 3(1): 21.
- [8] PARK J, KIM S, KIM H K. Effect of gap distance on vortex-induced vibration in two parallel cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 162: 35-44.
- [9] YANG Y X, WU T, GE Y J, et al. Aerodynamic stabilization mechanism of a twin box girder with various slot widths [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(3): 04014067.
- [10] HE X H, KANG X M, YAN L, et al. Numerical investigation of flow structures and aerodynamic interference around stationary parallel box girders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 215: 104610.
- [11] 刘志文,陈政清,刘高,等.双幅桥面桥梁三分力系数气动干扰效应试验研究[J].湖南大学学报(自然科学

- 版), 2008, 35(1): 16-20.
- LIU Z W, CHEN Z Q, LIU G, et al. Experimental study of aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of twin decks bridges [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008, 35(1): 16-20. (in Chinese)
- [12] 陈政清, 刘小兵, 刘志文. 双幅桥面桥梁三分力系数的气动干扰效应研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(7): 87-93.
- CHEN Z Q, LIU X B, LIU Z W. Study of aerodynamic interference effects on aerodynamic coefficients of twin-deck bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(7): 87-93. (in Chinese)
- [13] 郭震山, 孟晓亮, 周奇, 等. 既有桥梁对邻近新建桥梁三分力系数的气动干扰效应[J]. *工程力学*, 2010, 27(9): 181-186, 200.
- GUO Z S, MENG X L, ZHOU Q, et al. Aerodynamic interference effects of an existed bridge on aerodynamic coefficients of an adjacent new bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 181-186, 200. (in Chinese)
- [14] KIMURA K, SHIMA K, SANO K, et al. Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 954-962.
- [15] IRWIN P A, STOYANOFF S, XIE J M, et al. Tacoma Narrows 50 years later: Wind engineering investigations for parallel bridges [J]. *Bridge Structures*, 2005, 1(1): 3-17.
- [16] CELIK I, KLEIN M, JANICKA J. Assessment measures for engineering LES applications [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2009, 131(3): 031102.
- [17] 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.
- [18] WANG C Q, WEN Q, ZHOU S, et al. Effects of end condition and aspect ratio on vortex-induced vibration of a 5:1 rectangular cylinder [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2022, 109: 103480.
- [19] 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, 104/105/106: 203-215.
- [20] GROZESCU A, BRUNO L, FRANSOS D, et al. Large-eddy simulations of a benchmark on the aerodynamics of a rectangular 5:1 cylinder[C]//Atti del XX Congresso della Società Italiana di Meccanica Teorica e Applicata, 2011.

(编辑 XXX)