

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250217001

文章编号:1674-599X(2025)02-0070-09

引用格式:金彦,张天睿,徐智伟. 公铁并行梁间气动干扰效应随风攻角及行车位置的影响研究[J]. 交通科学与工程, 2025, 41(2): 70-78.

Citation: JIN Yan, ZHANG Tianrui, XU Zhiwei. Aerodynamic interference effects between parallel highway and railway bridges under the influence of wind attack angle and train position[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 70-78.

公铁并行梁间气动干扰效应随风攻角及行车位置的影响研究

金彦¹, 张天睿¹, 徐智伟^{1,2}

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要:【目的】探讨公铁并行桥梁的气动干扰问题。【方法】以泉州湾跨海大桥为研究对象, 建立主梁节段1:60缩尺计算流体动力学数值模型。通过引入气动力系数干扰因子, 系统研究风攻角(-5°至5°)、桥梁相对迎风位置及列车行车位置对铁路桥气动特性的影响。【结果】1) 列车行车位置显著影响铁路桥阻力系数与升力系数, 但对扭矩系数影响较小, 其中列车位于线1时引发的干扰效应最为显著; 2) 桥梁相对迎风位置主要影响铁路桥升力系数与扭矩系数, 尤其是在正风攻角的情况下, 铁路桥位于背风侧时升力系数的气动力系数干扰因子最高达1.8, 扭矩系数波动幅度达50%; 3) 风攻角演变导致气动力非线性响应, 阻力系数与扭矩系数随风攻角的增大总体上呈递减趋势(降幅最高分别达75%和78%), 而升力系数在多数工况下呈现出了减小-增大-减小的三阶段演化特征。【结论】揭示了复杂干扰环境下铁路桥气动力的敏感参数及其演变规律, 可为并行桥梁抗风设计提供理论依据。

关键词: 桥梁工程; 高速铁路; 计算流体动力学; 气动干扰; 风攻角

中图分类号: U448.2

文献标志码: A

Aerodynamic interference effects between parallel highway and railway bridges under the influence of wind attack angle and train position

JIN Yan¹, ZHANG Tianrui¹, XU Zhiwei^{1,2}

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to investigate the aerodynamic interference between parallel highway and railway bridges. [Methods] Focusing on the Quanzhou Bay Cross-sea Bridge, this paper developed a 1:60 scaled computational fluid dynamics (CFD) numerical model of the bridge girder section. By introducing the aerodynamic coefficient interference factor, it systematically investigated the effects of wind attack angle (-5° to 5°), the position of the bridge relative to wind direction, and the train position on the aerodynamic characteristics of the railway bridge. [Findings] 1) The train position significantly influences the drag and lift coefficients of the railway bridge, while its impact on the torque coefficient is relatively minor. The most pronounced interference occurs when the train is on Line 1. 2) The position of the bridge relative to wind direction primarily influences the lift and torque coefficients of the railway bridge. In particular, under positive wind attack angle, when the railway

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(24KJB580007)

通信作者: 徐智伟(1993—), 男, 讲师, 主要从事桥梁风工程方面的研究工作。E-mail: zhuwxu.be@njtech.edu.cn

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

bridge is on the leeward side, the aerodynamic coefficient interference factor of the lift coefficient reaches up to 1.8, and the torque coefficient fluctuates by as much as 50%. 3) Changes in the wind attack angle induce a nonlinear aerodynamic response. The drag and torque coefficients generally decrease as the wind attack angle increases with maximum reductions of 75% and 78%, respectively. Meanwhile, the lift coefficient exhibits a three-stage evolution pattern of "decrease-increase-decrease" in most cases. [Conclusions] This study identifies the parameters sensitive to aerodynamic interference and their evolution characteristics for railway bridges under complex interference conditions, providing theoretical support for the wind-resistant design of parallel bridges.

Key words: bridge engineering; high-speed railway; computational fluid dynamics; aerodynamic interference; wind attack angle

随着我国高速铁路的快速发展,公铁并行桥梁的应用日益广泛,邻桥间气动干扰效应对桥梁的稳定性和安全性的影响日益显著。因此,研究气动干扰效应对桥梁气动力系数的影响,不仅有助于提高公铁并行桥梁的设计精度和安全性,也可为桥梁工程的优化设计提供重要依据。

近年来,学者们通过风洞试验和数值模拟方法对桥梁间的气动干扰效应开展了大量研究。刘志文等^[1]通过风洞试验研究了双幅桥面桥梁的气动干扰效应,结果表明双幅桥面桥梁的颤振临界风速和下游桥面的阻力系数均有所降低;郭春平等^[2]采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法分析了某双幅桥面桥梁的气动干扰效应,结果表明下游桥梁的静力三分力系数受到较大影响,且气动干扰效应随着桥间距的增大而减弱;刘志文等^[3-4]对串列双矩形和双流线型断面进行风洞试验研究,结果表明间距比对气动干扰效应有显著影响;郭震山等^[5]、王铖铖等^[6]研究了既有桥梁对邻近新建桥梁三分力系数的气动干扰效应,结果表明既有桥梁对新建桥梁的三分力系数具有显著影响,且新建桥梁的三分力系数随着风攻角的变化呈现出了一定的变化规律;刘路路等^[7-9]研究了某大跨度公铁双幅斜拉桥的气动干扰效应,分析不同风向条件下桥梁的气动特性、间距对桥梁涡激振动性能的影响,以及双分离平行桥面大跨度公铁桥梁的涡激振动特性;HE等^[10]通过数值模拟对宽间隙比并行箱梁的气动干扰效应展开研究,发现并行桥梁周围形成的复杂涡流对桥梁产生了较强作用,且桥间距对桥梁的静气动力系数有显著影响;ARGENTINI等^[11]通过风洞试验研究了Ewijk桥的气动干扰效应,发现气动干扰效应的特点为:气动力系数变化显著,上游箱梁出现涡激振动,下游桥梁断面受压,不存在稳定性问题。

尽管已有研究对并行桥梁的气动特性进行了初步分析,但针对风攻角、列车行车位置和桥梁相对迎风位置对气动力系数的影响,尚未进行过系统分析。为此,本文以泉州湾跨海大桥这一公铁并行桥梁为研究对象,采用CFD数值风洞技术,探讨上述三因素对高铁桥梁气动力系数的影响规律,旨在今后为类似桥梁的设计优化提供参考。

1 桥梁气动力学数值仿真方法

1.1 数值模拟理论

1.1.1 控制方程

CFD通过数值方法研究流体的运动规律,目前已在多个领域得到了广泛应用。在工程实践中处理不可压缩牛顿流体的问题时,通常引入简化假设,即假设流体的密度恒定,且切应力与应变速率呈线性关系。基于这一假设,流场的控制方程即为由连续性方程和动量守恒方程构成的Navier-Stokes方程。

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中: u_i, u_j 为速度分量; x_i, x_j 为坐标分量; t 为时间; ρ 为空气密度; ν 为运动黏度; p 为空气静压。

1.1.2 湍流模型

湍流数值模拟主要有三种方法:直接数值模拟(DNS)、雷诺平均法(RANS)以及大涡模拟(LES)。

MENTER^[12]提出的SST $k-\omega$ 模型属于RANS方法,其在复杂流场中展现出了良好的适应性。湍动能输运方程和比耗散率输运方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中： k 为湍动能； ω 为湍动能耗散率； Γ_k 、 Γ_ω 为有效扩散项； G_k 、 G_ω 为生成项； Y_k 、 Y_ω 为发散项； S_k 、 S_ω 为源项； D_ω 为正交发散项。

1.1.3 壁面边界层

随着与固体表面距离的增大,流体的相对速度从零增长至自由流速,这一流速增长区域被称为边界层。如图1所示,流体经过固体壁面后呈现出明显的分层特征。

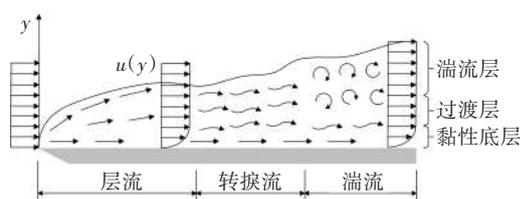


图1 近壁面流场分布

Fig. 1 Flow field distribution near the wall

无量纲参数 y^+ 可用于确定边界层厚度和第一层边界层网格的高度^[13]。对于SST $k-\omega$ 模型,通常要求 $y^+ < 1$ ^[14]。此外,边界层网格高度不宜超过模型基本尺寸的25%,其增长率应控制在1.1至1.2之间。

1.2 桥梁气动系数

三分力系数是表征结构在三个分量方向上受力特性的无量纲系数^[15],反映了风对桥梁的定常气动作用,是计算风荷载的重要参数。其与静力风荷载的关系式如下:

$$F_D = 0.5\rho U^2 C_D H \quad (5)$$

$$F_L = 0.5\rho U^2 C_L B \quad (6)$$

$$M_T = 0.5\rho U^2 C_M B^2 \quad (7)$$

式中： F_D 、 F_L 、 M_T 分别为阻力、升力和扭矩； U 为来流风速； C_D 、 C_L 、 C_M 分别为阻力系数、升力系数和扭矩系数； H 、 B 分别为桥梁断面的高度与宽度。

为量化气动干扰效应对气动系数的影响程度,本文以单独铁路桥工况作为基准,引入气动力系数干扰因子,其计算公式如式(8)~(9)所示^[16]。

$$F_{ACw} = C_{windward}/C_{single} \quad (8)$$

$$F_{ACl} = C_{leeward}/C_{single} \quad (9)$$

式(8)~(9)中： F_{ACw} 、 F_{ACl} 分别为铁路桥位于迎风侧和背风侧时的气动力系数干扰因子； $C_{windward}$ 、 $C_{leeward}$ 分别为铁路桥位于迎风侧和背风侧时的气动力系数均值； C_{single} 为单独铁路桥的气动力系数均值。

2 数值算例

2.1 工程概况

本文以福厦高铁泉州湾跨海大桥(以下简称为铁路桥)和泉州环城高速公路泉州湾跨海大桥(以下简称为公路桥)为研究对象。铁路桥与公路桥相邻并行,两桥中轴线的间距为85.00 m,净间距为46.50 m,桥面呈平行布置,桥位布置如图2所示。铁路桥为主跨长400 m的双塔双索面钢-混凝土结合梁斜拉桥,跨径布置为(70+130+400+130+70) m,桥面宽21.00 m,梁高4.25 m。公路桥为双塔横向无连接分幅叠合梁斜拉桥,跨径布置与铁路桥一致,单幅桥面宽27.41 m,梁高3.50 m,两幅主梁间的净距为1.67 m,主梁断面如图3所示^[17]。

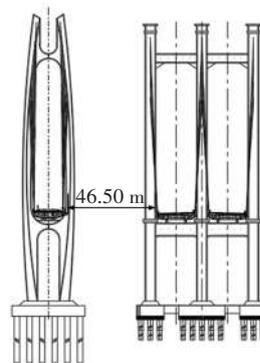
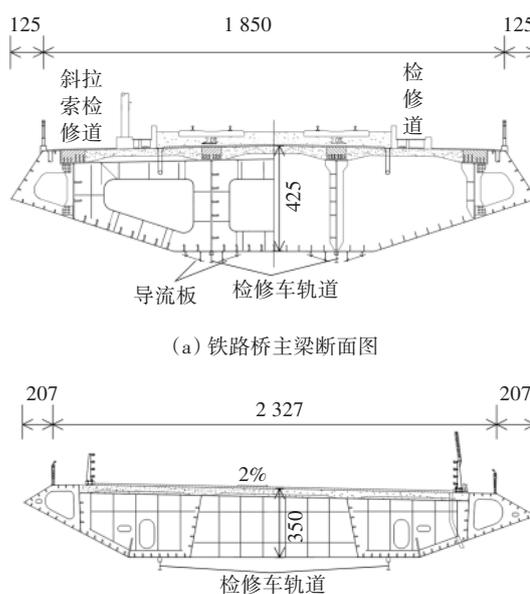


图2 桥位布置示意图

Fig. 2 Layout of the bridge



(a) 铁路桥主梁断面图

(b) 公路桥主梁断面图

图3 桥梁主梁断面图(单位:cm)

Fig. 3 Bridge girder section (unit: cm)

2.2 工况设置

本文的工况设置见表1,示意图如图4所示。

表1 数值模拟工况

Table 1 Numerical simulation cases

桥梁布置	列车位置	风速/(m·s ⁻¹)	风攻角/(°)
SB	T1	15	±5、±3、0
	T2		
TB-W	T1		
	T2		
TB-L	T1		
	T2		

注:SB指单独铁路桥;TB指铁路桥与公路桥并行;W、L分别指铁路桥位于迎风侧与背风侧;T1、T2分别指列车位于铁路桥的线1和线2上

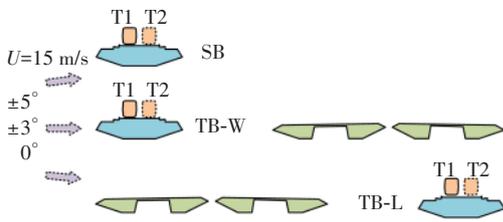


图4 计算工况设置示意图

Fig. 4 Computational cases configuration

2.3 CFD数值仿真模型

本文对主梁模型进行了简化处理,忽略附属设施的影响,缩尺比为1:60。简化模型如图5所示。

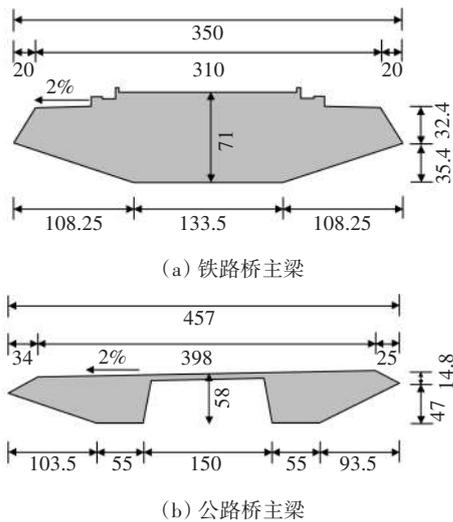


图5 桥梁主梁简化模型(单位:mm)

Fig. 5 Simplified models of the bridge girders (unit: mm)

在数值模拟中,为保障湍流充分发展并避免边界效应的干扰,需设置足够大的流体域。流体域的阻塞率不宜超过5%,缩尺模型计算域的阻塞率应控制在3%以内^[18]。计算域的布置需保证模型不受边界条件干扰,其中入口和出口的位置应与模型保

持适当距离,上下边界的设置也需避免对模型造成显著的阻塞效应。基于上述准则,本研究采用的计算域设置如下:入口距模型10B,出口距模型20B,上下边界距模型均为6B(其中铁路桥主梁断面的宽度B=0.350 m)。该设置满足《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)的规定。计算域示意图见图6,图中两座桥中心线的净间距D=0.775 m。

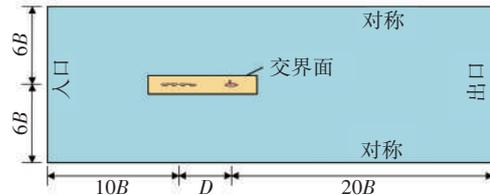


图6 计算域示意图

Fig. 6 Computational domain

本文采用ICEM CFD软件进行网格划分。桥梁主梁断面的周围区域采用四边形主导的非结构化网格,远场区域则使用结构化四边形网格。铁路桥主梁断面边界层第一层网格高度为0.028 7 mm,增长率为1.2,共设置18层。以工况T1-SB为例,铁路桥主梁近壁面y⁺值基本上都小于1(图7),满足SST k-ω模型的计算要求。图8展示了0°风攻角下工况T1-TB-L的整体网格划分情况。为进一步验证计算的可靠性,本文针对0°风攻角下工况T1-SB与T1-TB-L分别进行了网格数量与时间步长的独立性验证,结果列于表2。

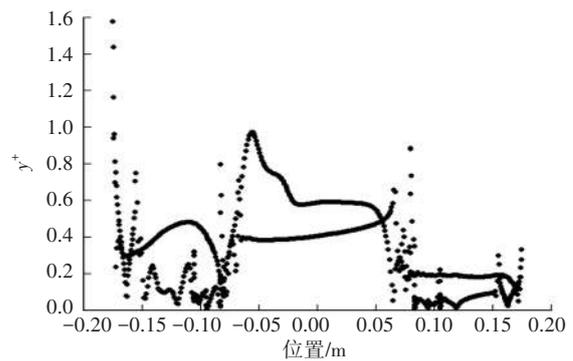


图7 铁路桥主梁断面y⁺分布图

Fig. 7 Distribution of y⁺ on the railway bridge girder section



图8 网格划分示意图

Fig. 8 Mesh division

由表2可知,独立性良好,故本研究采用中等的网格划分数量和时间步长设置,以平衡计算精度和计算资源的消耗。

表2 网格数量与时间步长独立性验证

Table 2 Independence tests of cell number and time step size

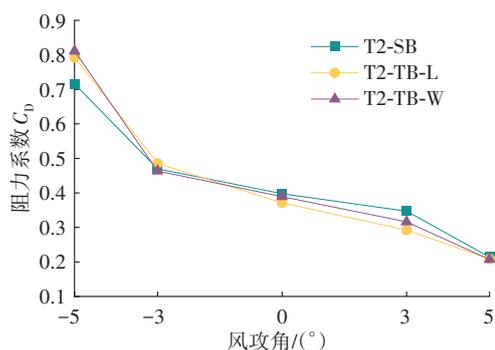
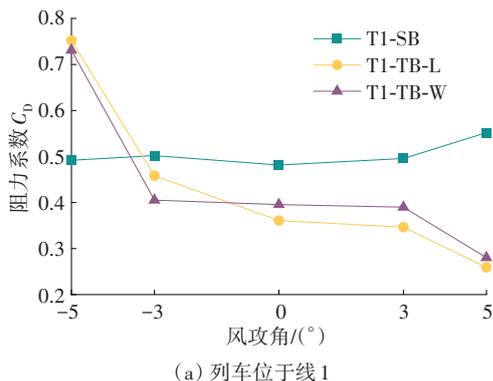
工况	网格数	时间步长/s	阻力系数	升力系数	扭矩系数
T1-SB	249 617	0.001 0	0.471	-0.769	0.222
	356 467		0.481	-0.774	0.208
	540 524		0.485	-0.778	0.213
	356 467	0.000 5	0.470	-0.771	0.205
		0.001 0	0.481	-0.774	0.208
		0.002 0	0.475	-0.784	0.216
T1-TB-L	397 907	0.001 0	0.357	-0.772	0.209
	550 953		0.361	-0.780	0.214
	805 797		0.364	-0.785	0.211
	550 953	0.000 5	0.366	-0.778	0.209
		0.001 0	0.361	-0.780	0.214
		0.002 0	0.363	-0.785	0.215

本研究采用商业 CFD 分析软件 Fluent® 开展气动力数值模拟研究。求解器选择压力基求解器,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型。入口边界采用速度入口,来流风速为 15 m/s,湍流黏度比和湍流强度采用默认值,出口边界采用压力出口。上下边界采用对称边界,桥梁断面和列车断面均设置为无滑移固体壁面。求解方法采用 SIMPLEC 算法,该算法在标准 SIMPLE 算法的基础上通过改进压力-速度耦合关系,显著提升了计算的收敛性和稳定性,特别适用于复杂流动问题的数值模拟。

3 铁路桥气动力系数的气动干扰效应

3.1 不同工况下铁路桥气动力系数随风攻角的变化

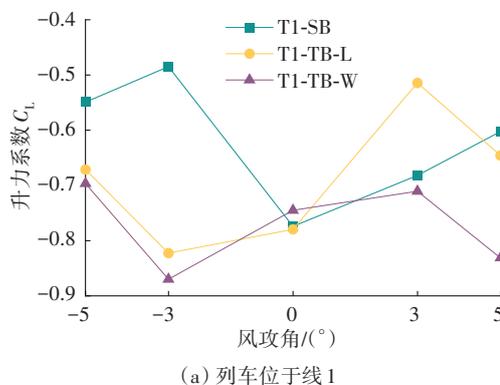
图 9~11 给出了不同工况下铁路桥气动力系数随风攻角的变化规律。



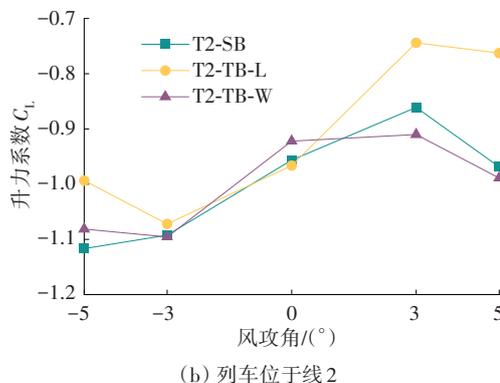
(b) 列车位于线2

图9 铁路桥阻力系数随风攻角的变化

Fig. 9 Drag coefficient of railway bridge versus wind attack angle



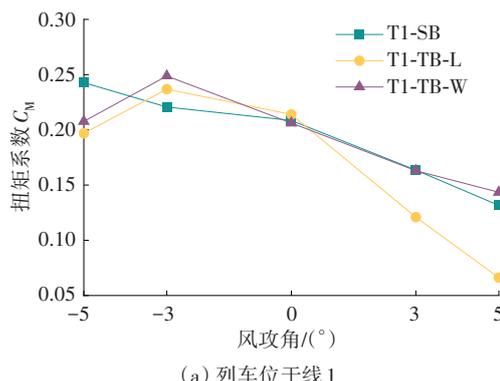
(a) 列车位于线1



(b) 列车位于线2

图10 铁路桥升力系数随风攻角的变化

Fig. 10 Lift coefficient of railway bridge versus wind attack angle



(a) 列车位于线1

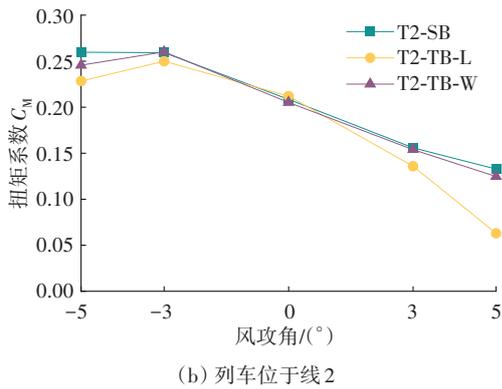


图 11 铁路桥扭矩系数随风攻角的变化

Fig. 11 Torque coefficient of railway bridge versus wind attack angle

由图9可见,随着风攻角的变化,铁路桥的阻力系数整体上呈下降趋势,且在负风攻角区间变化最为剧烈,而列车行车位置对铁路桥阻力系数的影响并不显著。当列车位于线1时,单独铁路桥工况下桥梁阻力系数随风攻角波动不大,维持在0.5左右。但在并行桥梁工况下,除-5°风攻角外,其余风攻角下的铁路桥阻力系数均比单独铁路桥工况下的小,且差距随风攻角的增大愈加明显,铁路桥阻力系数分别在-5°和5°风攻角时达到最大值和最小值,这表明邻桥气动干扰效应对铁路桥的阻力系数有显著影响,且这种影响随着风攻角的增大而增强。当列车位于线2时,铁路桥阻力系数同样分别在-5°和5°风攻角取得最大值和最小值,但区别在于各工况下该系数的差异较小。

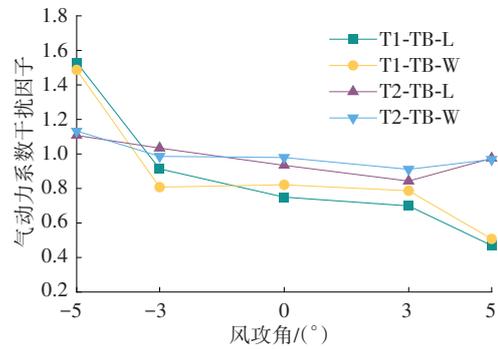
图10表明,铁路桥的升力系数均为负值,并行桥梁工况下其值基本上呈先减小后增大再减小的趋势。当列车位于线1时,单独铁路桥工况下升力系数的变化规律与并行桥梁工况下的相反;当列车位于线2时,铁路桥的升力系数整体上比相同工况、同一风攻角下列车位于线1时的小。

从图11可以看出,铁路桥的扭矩系数介于0.05到0.26之间。随着风攻角从-5°增大到5°,单独铁路桥工况下扭矩系数逐渐减小,并行桥梁工况下铁路桥的扭矩系数在风攻角递增至-3°时取得最大值,随后递减。当铁路桥位于背风侧时,扭矩系数减幅更大。这表明邻桥气动干扰对铁路桥扭矩系数影响显著,尤其是在铁路桥位于背风侧且为正风攻角的工况下,而列车行车位置的影响可以忽略。

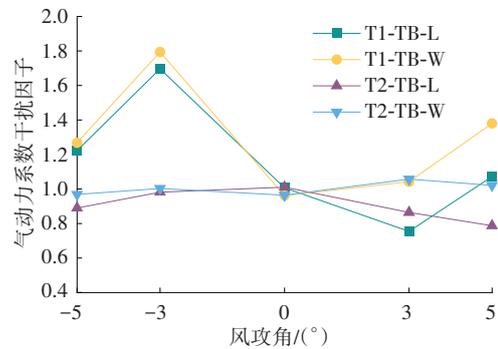
3.2 铁路桥气动力系数干扰因子演变规律

图12所示为铁路桥气动力系数干扰因子的演

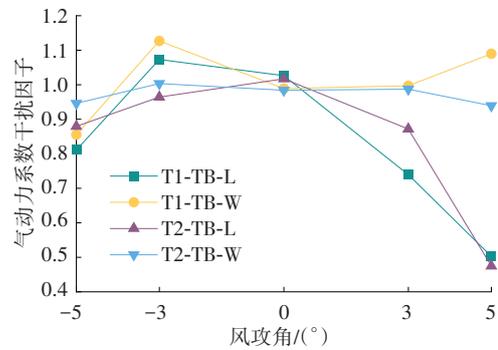
变规律,系统地展示了邻桥气动干扰效应对铁路桥气动力系数的影响程度。



(a) 阻力系数



(b) 升力系数



(c) 扭矩系数

图 12 气动力系数干扰因子演变规律

Fig. 12 Evolution law of aerodynamic coefficient interference factor

由图12可知,对于阻力系数而言,当列车位于线1时,铁路桥受邻桥气动干扰更显著。除-5°风攻角外,其余风攻角对应的气动力系数干扰因子均小于1,表明在-5°风攻角时铁路桥阻力系数受邻桥气动干扰效应的影响有所增加,在-3°~5°风攻角下邻桥气动干扰效应抑制了铁路桥的阻力系数;当列车位于线2时,气动力系数干扰因子在1附近小幅波动,表明铁路桥阻力系数对邻桥气动干扰效应并不

敏感。可见,列车行车位置对铁路桥阻力系数影响较大,列车位于线1时铁路桥阻力系数较低;当列车行车位置相同时,桥梁的相对迎风位置对铁路桥阻力系数的影响不大。

与阻力系数类似的是,当列车位于线1时,铁路桥的升力系数受邻桥气动干扰的影响更明显。在 -3° 风攻角时,气动力系数干扰因子达到 $1.7 \sim 1.8$;当列车位于线2时,气动力系数干扰因子的波动幅度较小。当列车行车位置相同时,在正风攻角下桥梁相对迎风位置对铁路桥升力系数影响较大。

对于扭矩系数,当铁路桥位于背风侧时,铁路桥扭矩系数受气动干扰的影响更显著,尤其是在正风攻角工况下。例如,在 5° 风攻角下气动力系数干扰因子在 0.5 左右。与阻力系数和升力系数不同的是,铁路桥扭矩系数对列车行车位置的变化不敏感。

3.3 流场图分析

本文选取风攻角为 -5° 、 0° 和 5° 时的流场图进行分析(来流风向均为由左向右),其压力云图和流线图如图13~15所示。

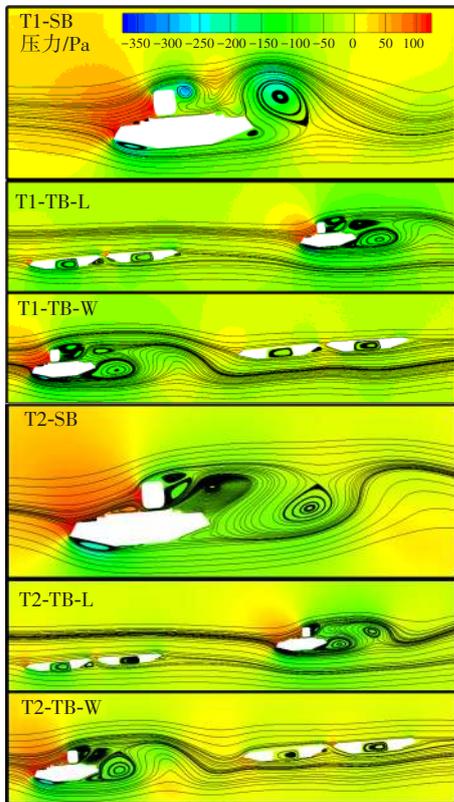


图13 风攻角为 -5° 时的压力云图和流线图

Fig. 13 Pressure contour and streamline plots at wind attack angle of -5°

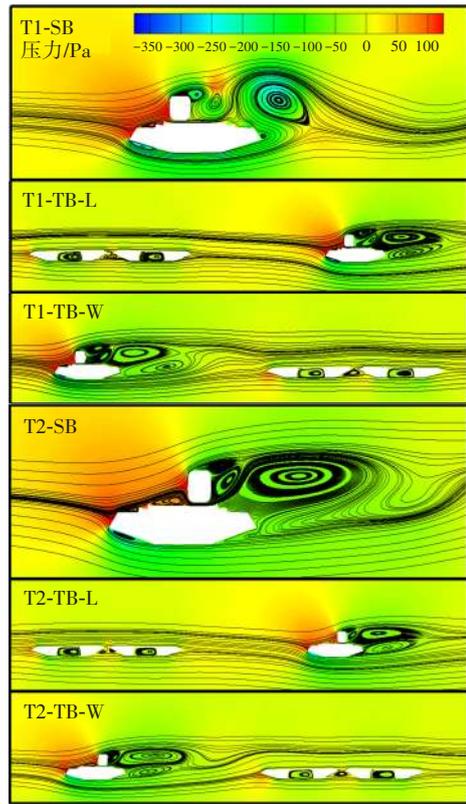


图14 风攻角为 0° 时的压力云图和流线图

Fig. 14 Pressure contour and streamline plots at wind attack angle of 0°

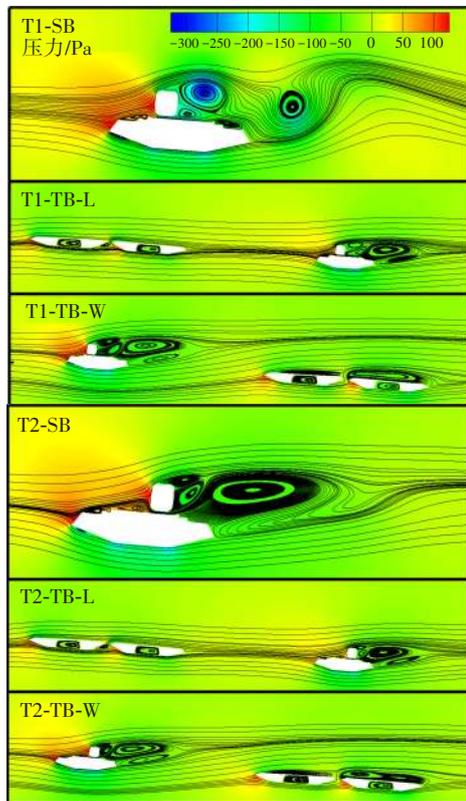


图15 风攻角为 5° 时的压力云图和流线图

Fig. 15 Pressure contour and streamline plots at wind attack angle of 5°

从图13~15可以看出,列车对周围流场产生了显著扰动,其位置变化直接影响着压力的分布。列车迎风侧区域出现明显的气流分离现象,流线呈现剧烈变化。压力云图显示,列车迎风侧形成高压区,而顶部和背风侧则形成明显的低压区,列车后部产生了涡旋。值得注意的是,当列车位于线2时,铁路桥上表面的正压区显著扩大。

流场分析结果进一步证实,桥梁相对迎风位置对气流分布产生了重要影响^[19-20]。在并行桥梁工况下,气流的涡旋结构与单独铁路桥工况下的相比存在明显差异,表明邻桥的存在会改变流场特性。当铁路桥位于背风侧时,上游公路桥产生的遮挡效应导致铁路桥迎风侧正压区的压力略微降低。

风攻角对压力的分布和流场的对称性具有显著影响。当风攻角为 0° 时,气流与铁路桥平行,流场基本上对称分布。而在 $\pm 5^\circ$ 风攻角下,气流偏转导致流场的对称性明显降低,涡旋的形成方式与位置出现显著差异,同时铁路桥上下表面的压力差明显增大,特别是当风攻角为 5° 时,流场整体的压力值偏小。

4 结论

本文以泉州湾公铁并行桥梁为研究对象,通过CFD数值模拟技术研究了风攻角、桥梁相对迎风位置和列车行车位置变化下邻桥气动干扰对铁路桥气动系数的影响,得出如下结论:

1) 列车行车位置对铁路桥的阻力系数和升力系数有显著影响,而扭矩系数对列车行车位置不敏感。当列车位于线1时,铁路桥阻力系数和升力系数所受气动干扰效应更显著。

2) 桥梁相对迎风位置对铁路桥阻力系数的影响不大,但对升力系数和扭矩系数有较大影响,尤其是在正风攻角时影响更为显著。当铁路桥位于背风侧时,其升力系数和扭矩系数受到的气动干扰效应比位于迎风侧时的更显著。

3) 风攻角对铁路桥气动系数的影响不可忽略。随着风攻角从 -5° 变化到 5° ,铁路桥阻力系数和扭矩系数均呈递减趋势。升力系数的变化较复杂,除列车位于线1的单独铁路桥工况外,其余工况下铁路桥的升力系数均呈先减小后增大再减小的趋势。

参考文献(References):

- [1] 刘志文,陈政清,胡建华,等.大跨度双幅桥面桥梁气动干扰效应[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(6):55-59.
LIU Zhiwen, CHEN Zhengqing, HU Jianhua, et al. Aerodynamic interference effects of twin decks bridges with long span [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(6): 55-59.
- [2] 郭春平,白桦,洪光.双幅桥静分力系数气动干扰效应研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(5):899-902,942. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2011.05.003
GUO Chunping, BAI Hua, HONG Guang. On effects of aerodynamic interference on aerodynamic coefficients of twin-deck bridges [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(5): 899-902, 942. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2011.05.003
- [3] 刘志文,栗小祜,陈政清.均匀流场串列双矩形断面涡激振动气动干扰试验[J].中国公路学报,2010,23(5):44-50.
LIU Zhiwen, LI Xiaohu, CHEN Zhengqing. Experiment of aerodynamic interference on vortex-induced vibration of two rectangular cylinders in tandem in smooth flow field [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 44-50.
- [4] 刘志文,陈政清,栗小祜,等.串列双流线型断面涡激振动气动干扰试验[J].中国公路学报,2011,24(3):51-57.
LIU Zhiwen, CHEN Zhengqing, LI Xiaohu, et al. Aerodynamic interference test on vortex-induced vibration of two streamline cylinders in tandem [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 51-57.
- [5] 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 Zhenshan, MENG Xiaoliang, ZHOU qi, 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.
- [6] 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. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.S1.004.
WANG Chengcheng, DING Dehao, ZHU Yu. 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. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.S1.004.
- [7] 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. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.

- t20222067.
- LIU Lulu, YANG Haoran, ZOU Yunfeng, 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. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20222067.
- [8] LIU L L, ZOU Y F, HE X H, et al. Effect of spacing on vortex-induced vibration performances for rail-cum-road bridges with twin asymmetric parallel decks [J]. Structures, 2024, 65: 106749. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106749.
- [9] LIU L L, ZOU Y F, HE X H, et al. Experimental investigation on vortex-induced vibration of a long-span rail-cum-road bridge with twin separated parallel decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 228: 105086. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105086.
- [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. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104610.
- [11] ARGENTINI T, ROCCHI D, ZASSO A. Aerodynamic interference and vortex-induced vibrations on parallel bridges: the Ewijk bridge during different stages of refurbishment [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 276-282. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.07.012.
- [12] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149.
- [13] 赖晨光, 王擎宇, 付中正. 基于湍流模型与边界层网格策略的汽车外流场数值计算精度分析[C]//2017汽车空气动力学分会学术年会论文集. 合肥: 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会, 2017: 75-83.
- LAI Chenguang, WANG Qingyu, FU Zhongzheng. Accuracy analysis of numerical calculation of outer flow field around vehicle based on turbulence model and boundary layer grid strategy [C]//Proceedings of 2017 Automotive Aerodynamics Committee of China-SAE. Hefei: Automotive Aerodynamics Branch of China-SAE, 2017: 75-83.
- [14] 韩艳, 胡揭玄, 蔡春声. 横风作用下公路车辆与桥梁静气动力的数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(1): 12-17. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2012.01.003.
- HAN Yan, HU Jiexuan, CAI Chunsheng. Numerical simulation on static aerodynamic forces of vehicles and bridges under cross winds [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(1): 12-17. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2012.01.003.
- [15] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 55-63.
- CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 55-63.
- [16] 刘志文, 陈政清. 串列双幅典型断面三分力系数气动干扰效应[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 6-13. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.05.002.
- LIU Zhiwen, CHEN Zhengqing. Aerodynamic interference effects on aerostatic coefficients of typical sections in tandem arrangement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 6-13. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.05.002.
- [17] 肖晗. 大跨度公铁并行桥梁主梁气动干扰效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2021.001637.
- XIAO Han. Research on aerodynamic interference effects of main girders of the parallel long-span highway and railway bridges [D]. Changsha: Hunan University, 2021. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2021.001637.
- [18] 曾镨, 汪丛军, 黄本才, 等. 计算风工程中几个关键影响因素的分析与建议[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(4): 504-508.
- ZENG Kai, WANG Congjun, HUANG Bencai, et al. Suggestion and analysis of several key factors in computational wind engineering [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(4): 504-508.
- [19] 王传福, 杨定军. 挪威哈罗格兰德大桥主缆猫道抗风系统构造与性能研究[J]. 公路与汽运, 2023(1): 107-110, 115. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.021.
- WANG Chuanfu, YANG Dingjun. Study on the structure and performance of the wind-resistant system of the main cable catwalk of Harrogand Bridge in Norway [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(1): 107-110, 115. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.021.
- [20] 邓朝归, 周光伟, 钱长照, 等. 桥塔风效应对异形斜拉桥抖振响应的影响[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 108-116. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202203122024061971.
- DENG Chaogui, ZHOU Guangwei, QIAN Changzhao, et al. Influence of tower wind effect on buffeting response of special-shaped cable-stayed bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(3): 108-116. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202203122024061971.

(责任编辑:石月珍)