DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.06.015 文章编号:1671-2579(2025)06-0127-10

双柳长江大桥主桥抗风性能风洞试验研究

李修坤[1],吴学伟[1],杨灿[2*],彭晓彬[2],黄智文[3,4]

(1.湖北交通投资集团有限公司,湖北 武汉 430051;2.湖北省交通规划设计院股份有限公司,湖北 武汉 430051;
3.桥梁工程安全与韧性全国重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
4.风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082)

摘要:武汉新港高速双柳长江大桥主桥为主跨1 430 m单跨悬索桥,桥塔高212.75 m,加劲梁采用闭口扁平钢箱梁,梁宽50.5 m。为研究大桥运营阶段的抗风性能,该文通过1∶60小比例和1∶30大比例加劲梁节段模型风洞试验,检验了大桥的涡振性能,分析了涡振响应对结构阻尼比的敏感性,并评估了在梁底检修车轨道内侧和双侧分别安装导流板对大桥涡振性能的效果。利用1∶60小比例加劲梁节段模型风洞试验检验了大桥的颤振性能,并分析了检修车轨道导流板对颤振性能的影响。最后,通过缩尺比1∶205全桥气弹模型风洞试验检验了大桥的颤振性能。结果表明:大桥在−3°～+3°风攻角范围内具有良好的颤振性能,各风攻角下的颤振临界风速均高于颤振检验风速20%以上;大桥涡振响应受结构阻尼比影响显著,当竖弯和扭转阻尼比分别为0.136%和0.048%时,在大比例节段模型风洞试验中观测到显著的竖向和扭转涡振现象,但将上述阻尼比分别增大到0.217%和0.164%后,竖弯和扭转涡振基本消失;安装检修车轨道导流板可降低大桥在小阻尼比下的涡振响应,同时对大桥颤振性能影响较小。

关键词:悬索桥;钢箱梁;节段模型;气弹模型;涡振;颤振;结构阻尼比;风洞试验

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A

Wind Tunnel Test Study on Wind-Resistant Performance of Shuangliu Yangtze River Bridge

LI Xiukun[1], WU Xuewei[1], YANG Can[2*], PENG Xiaobin[2], HUANG Zhiwen[3,4]

(1. Hubei Communications Investment Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430051, China; 2. Hubei Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430051 China; 3. State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience (Hunan University), Changsha, Hunan 410082, China; 4. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province (Hunan University), Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The main bridge of Shuangliu Yangtze River Bridge on the Xingang Expressway in Wuhan City is a single-span suspension bridge with a main span of 1 430 m and a bridge tower of 272.75 m. The stiffening girder is in the form of a closed flat steel box girder with a width of 50.5 m. In order to study the wind-resistant performance of the bridge during operation, the performance of vortex-induced vibration of the girder was tested through wind tunnel tests of section model with two different geometric scales of 1∶60 and 1∶30, respectively. The sensitivity of the vortex-induced vibration response to the structural damping ratio was analyzed, and the effect of installing a guide vane inside or on both sides of the maintenance rail on the performance of vortex-induced vibration was evaluated. The flutter performance of the bridge was tested in a wind tunnel by using the 1∶60 geometrically scaled section model, in which the effect of the guide vanes on the flutter performance was analyzed. Finally, the flutter performance of the bridge was tested through wind tunnel tests of the full-bridge aeroelastic model with a scale ratio of 1∶205. The results show that the bridge shows good flutter performance under the wind angle of attack from −3° to +3°, and the critical flutter wind speed at each angle of attack is more than 20% higher than the tested flutter wind speed. The vortex-induced vibration

收稿日期:2024-05-29 **修回日期:**2024-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278499)

作者简介:李修坤,男,硕士,高级工程师.E-mail:442150924@qq.com

***通信作者:**杨灿,男,硕士,高级工程师.E-mail:283268542@qq.com

response is significantly affected by the structural damping ratio. When the vertical bending and torsional damping ratios are 0.136% and 0.048% respectively, significant vertical and torsional vortex phenomena were observed in the large-scale wind tunnel test of the section model. However, if the former damping ratios are increased to 0.217% and 0.164%, respectively, the vertical vortex-induced vibration and torsional vortex-induced vibration almost disappear. Installing the guide vane on the maintenance rail can suppress the vortex-induced vibration under a small structural damping ratio, and has little influence on the flutter performance of the bridge.

Keywords: suspension bridge; steel box girder; section model; aeroelastic model; vortex-induced vibration; flutter; structural damping ratio; wind tunnel test

0 引言

大跨度钢箱梁悬索桥结构体系轻柔、频率低、阻尼小,极易发生颤振、涡振等各类风致振动[1-3]。为确保大桥在建设和运营期间的结构安全及正常使用,必须开展桥梁抗风研究。特别是常遇风速下的主梁涡振,可能产生大桥行车舒适性和行车安全问题[4-7],是近年来桥梁抗风研究关注的重点[8-10]。

大跨度钢箱梁悬索桥的涡振和颤振性能与加劲梁气动外形、结构阻尼比等因素密切相关,因模型缩尺而产生的雷诺数效应也可能对涡振和颤振试验结果产生重要影响。例如,刘志文等[11]采用大比例节段模型风洞试验研究了检修车轨道安装位置对扁平钢箱梁涡振性能的影响,揭示了扁平钢箱梁的涡振机理;Larsen等[12-13]结合实桥观测和节段模型风洞试验,研究了大带东桥的涡振响应特性,雷诺数对涡振响应的影响,以及导流板抑振措施;杨阳等[14]研究了大风攻角下扁平钢箱梁的涡振响应,并分析了涡振风速区间内钢箱梁表面的风压分布情况;李春光等[15]通过大比例节段模型风洞试验研究了栏杆基石对闭口箱梁桥梁涡振性能影响的机理;赵林等[16]以桥梁涡振和颤振控制为目标,对大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施进行了综述;刘继久等[17]开展了不同风攻角下的强迫振动风洞试验和节段模型自由振动试验,基于颤振导数研究了流线形闭口箱梁大攻角颤振性能及演变机理。由于影响桥梁结构涡振响应和颤振临界风速的因素众多且较为复杂,因此对于大跨度桥梁有必要开展系统的风洞试验对其涡振和颤振性能进行检验。虽然对扁平钢箱梁的颤振和涡振性能已有较多研究,但是考虑不同几何缩尺比和不同阻尼比研究的影响较少。

武汉新港高速公路双柳长江大桥是武汉都市圈环线高速东段跨越长江的控制性工程,位于武汉市东部,主桥位于长江武汉叶家洲段与团风河段交界处,项目路线全长35 km,采用双向八车道设计,设计速度120 km/h。新港高速公路双柳长江大桥主桥为单跨1 430 m简支悬索桥,垂跨比1/9。主缆横向间距43.2 m,吊索标准间距16 m,大桥立面布置如图1所示。加劲梁采用整体式闭口扁平钢箱梁,梁宽50.5 m,高4.0 m,钢箱梁两侧检修道宽2.5 m,检修道端部设有垂直裙板,高0.37 m,钢箱梁斜腹板水平倾角为12.2°,加劲梁断面如图2所示。本文采用不同缩尺比节段模型风洞试验、全桥气弹模型风洞试验对大桥成桥状态的涡振及颤振等抗风性能进行综合研究。

1 桥位风参数取值

双柳长江大桥位于武汉市东部,距离上游阳逻长江大桥约26.5 km,距离下游鄂黄铁路长江大桥约21 km。由于缺乏气象实测资料,需依据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)[18]并参考相邻的阳逻长江大桥[19]、鄂黄铁路长江大桥[20]的数据确定桥位设计风速。根据统计,桥址附近100 km范围内有5个气象台站点位,分别为黄石、麻城、英山、江夏和武汉,各气象台站与桥址之间的直线距离及其基本风速如表1所示,可偏安全地参考黄石气象台

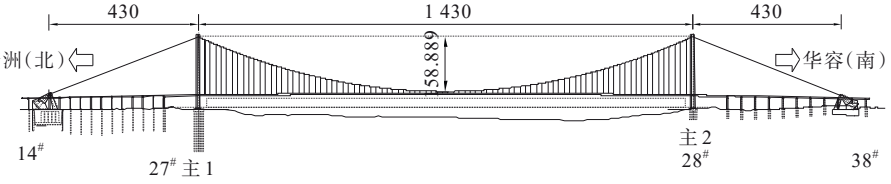


图1 主桥立面布置(单位:m)

Figure 1 Elevation layout of main bridge (unit: m)

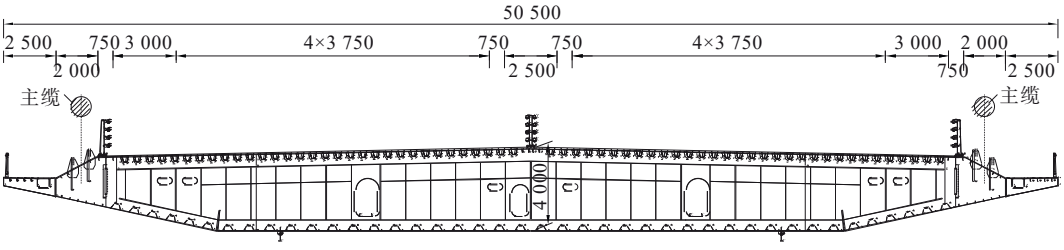


图 2　加劲梁标准断面（单位：mm）

Figure 2　Standard section of stiffening girder (unit: mm)

站数据，取基本风速 U_{10}=28.1 m/s。根据实测资料，鄂黄铁路长江大桥和阳逻长江大桥的基本风速分别取 U_{10}=30.1 m/s 和 U_{10}=29.9 m/s。由于现场实测风速标准稍高于规范计算结果，后续偏安全地参照鄂黄铁路长江大桥现场实测风速进行抗风性能检验。桥址区地表粗糙度类别为B类，依据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)，计算得到成桥运营阶段的设计基准风速为41.0 m/s，成桥状态颤振检验风速为57.9 m/s。

表 1　双柳长江大桥桥址附近气象台站

Table 1　Meteorological stations near Shuangliu Yangtze River Bridge site

气象台站	纬度/(°)	经度/(°)	基本风速/(m·s^{-1})	距桥址距离/km
黄石	30.14	115.02	28.1	57.7
麻城	31.11	115.01	27.6	61.3
英山	30.44	115.40	25.9	64.7
江夏	30.21	114.20	26.8	68.8
武汉	30.37	114.08	27.7	69.5

2　结构动力特性分析

采用大型通用有限元分析软件Ansys建立了双柳长江大桥的三维空间有限元模型，如图3所示。双柳长江大桥主桥成桥状态典型模态的频率、振型和等效质量如表2所示。

由表2可知：主梁一阶反对称扭转模态先于一阶正对称扭转模态出现，频率分别为0.244 Hz和0.251 Hz，对应的等效质量矩分别为12 820.4 t·m^2/m和11 706.1 t·m^2/m。主梁一阶反对称竖弯和纵漂模态呈现较强的振型耦合特性。其中，第一个耦合模态的频率为0.08 Hz，振型以主梁纵漂为主，与一阶反对称竖弯振型对应的主梁等效质量为73.2 t/m；第二个耦合模态的频率为0.124 Hz，其振型以一阶反对称竖弯为主，与之对应的主梁等效质量为52.9 t/m。主梁一阶正对称竖弯模态的频率为0.125 Hz，对应的主梁等效质量为44.2 t/m。

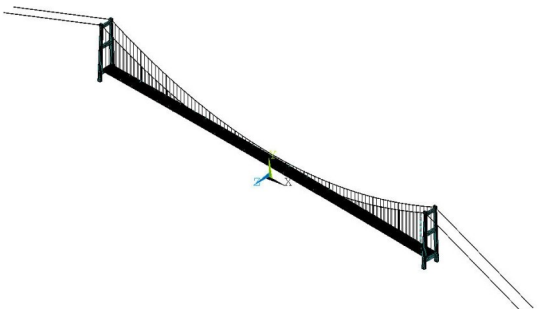


图 3　双柳长江大桥有限元模型

Figure 3　Finite element model of Shuangliu Yangtze River Bridge

对弯扭耦合颤振而言，扭转频率越高、扭弯频率比越大、主梁等效质量矩和等效质量越大，颤振临界风速就越高。对本桥而言，虽然一阶反对称扭转频率稍低于一阶正对称扭转频率，但其对应的一阶反对称竖弯模态的等效质量要显著大于一阶正对称模态。为了选择合理的扭转和竖弯模态进行节段模型颤振试验，采用理想平板颤振导数，对本桥进行了三维颤振分析，结果如图4所示。

由图4可知：采用一阶正对称扭转模态和一阶正对称竖弯模态组合，计算得到的颤振临界风速为82 m/s，而采用一阶反对称扭转模态和0.08 Hz的反对称竖弯-纵漂耦合模态组合，计算得到的颤振临界风速为90 m/s。因此采用一阶正对称扭转模态和一阶正对称竖弯模态的组合进行节段模型参数设计。

3　抗风特性研究

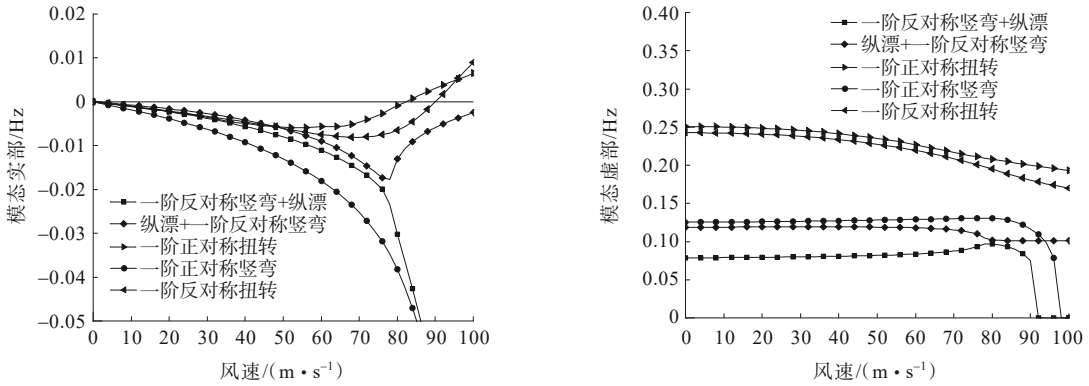
3.1　主梁涡振性能研究

大跨度悬索桥涡振响应对加劲梁气动外形和结构固有阻尼比高度敏感[21-23]。为了探明双柳长江大桥的涡振性能，该文开展了1∶60小比例节段模型风洞试验和1∶30大比例节段风洞试验，并研究了结构

表2 成桥状态典型模态振型

Table 2 Typical modal vibration shapes in completed state of bridge

振型	频率/Hz	等效质量/(t·m^{-1})	振型图	振型	频率/Hz	等效质量/(t·m^{-1})或质量矩/(t·m^2·m^{-1})	振型图
主梁一阶正对称横弯	0.052	41.7		主梁二阶正对称竖弯	0.174	44.7	
主梁纵漂+主梁一阶反对称竖弯	0.080	73.2		主梁二阶反对称竖弯	0.187	45.0	
主梁一阶反对称竖弯+纵漂	0.124	52.9		主梁一阶反对称扭转	0.244	12 820.4	
主梁一阶正对称竖弯	0.125	44.2		主梁一阶正对称扭转	0.251	11 706.1	



(a) 颤振敏感模态实部随风速变化曲线 (b) 颤振敏感模态虚部随风速变化曲线

图4 双柳长江大桥三维颤振分析

Figure 4 Three-dimensional flutter analysis of Shuangliu Yangtze River Bridge

固有阻尼比以及检修车轨道导流板等气动措施对大桥涡振性能的影响。

3.1.1 节段模型几何缩尺效应影响

鉴于雷诺数效应[24]和构造细节模拟精度对试验结果的影响,采用大比例节段模型风洞试验研究扁平钢箱梁的涡振性能,并研究不同缩尺比对加劲梁涡振响应的影响。该文分别开展了几何缩尺比为1:60和1:30的节段模型涡振试验,不同几何缩尺比节段模型的设计参数如表3所示,在风洞中的悬挂状态如图5所示。

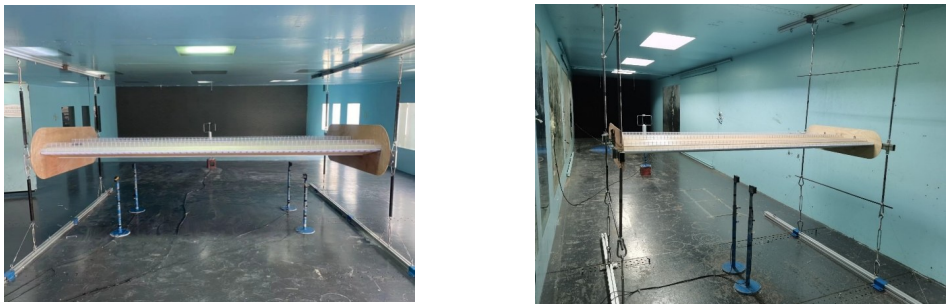
有研究表明,节段模型悬挂系统的竖弯阻尼比与模型振幅有关,而扭转阻尼比受模型振幅的影响较小[25-26]。因此,在开展涡振试验前,首先通过自由振动衰减法得到了不同风攻角下大比例(1:30)和常

表3 节段模型设计参数

Table 3 Designed parameters of section model

参数名称	符号	单位	实桥值	1:30节段模型		1:60节段模型	
				缩尺	模型值	缩尺	模型值
主梁长度	L	m	—	1/30	3.6	1/60	2.0
主梁宽度	B	m	50.5	1/30	1.683	1/60	0.842
主梁高度	H	m	4.08	1/30	0.136	1/60	0.068
等效质量	m_{eq}	kg/m	44 249	1/30^2	49.166	1/60^2	12.291
等效质量矩	J_{meq}	kg·m^2/m	11 706 100	1/30^4	14.452	1/60^4	0.903
对称竖弯基频	f_h	Hz	0.125	1:23.73	5.05	1:28(13.6)	3.54(1.70)
对称扭转基频	f_t	Hz	0.251	1:23.73	10.13	1:28(13.6)	7.11(3.47)
风速比	λ_V		2.12	1.69:1	1/1.69	2.12(4.41):1	1
竖弯阻尼比	ζ_h	%	0.30	1	0.062/0.17	1	0.24/0.30(0.17)
扭转阻尼比	ζ_t	%	0.30	1	0.035/0.16	1	0.08/0.17(0.16)

注:后续研究考虑了两组不同的模型阻尼比,在此一并标注,用"/"隔开;括号内为颤振试验模型参数。



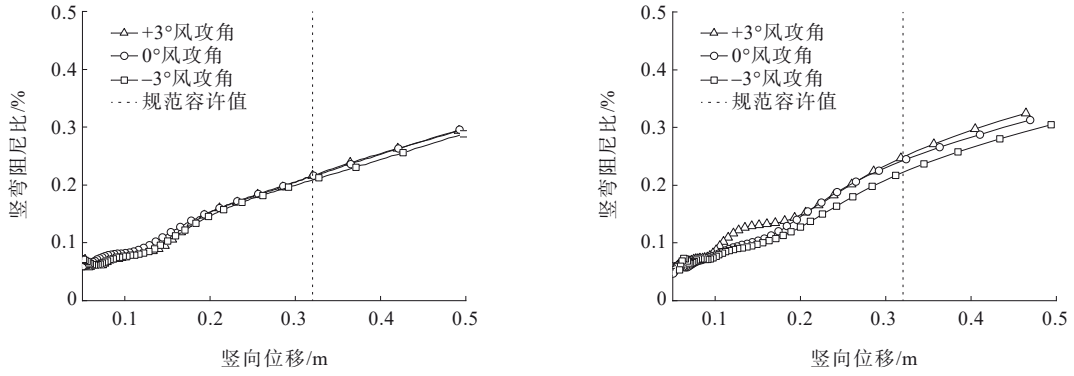
（a）1∶30节段模型　　（b）1∶60节段模型

图 5　节段模型在风洞中的布置

Figure 5　Layout of section model in wind tunnel

规比例(1∶60)节段模型悬挂系统的固有阻尼比随模型振幅的变化规律，分别如图 6(a)和图 6(b)所示。其中虚线表示按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)计算的涡振振幅允许值。由图 6 可知：在 0.1 m 以下的小振幅处，大、小比例节段模型的竖弯阻尼比分别约为 0.062% 和 0.080%；在规范容许值振幅处，竖弯阻尼比分别为 0.245% 和 0.250%。扭转阻尼比随振幅基本保持不变，大小比例模型的扭转阻尼比均在 0.08% 左右。上述阻尼比均小于规范建议值 0.3%，且大、小比例节段模型的竖弯和扭转阻尼比数值基本保持一致。

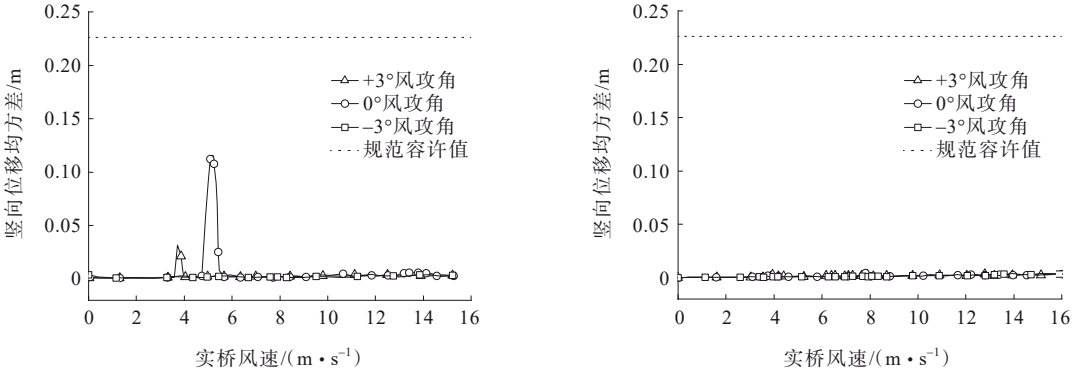
两种缩尺比节段模型的竖向涡振试验结果如图 7 所示。由图 7 可以看出：大比例模型在 0°和 +3°风攻角下都发生了竖向涡振，对应的锁定风速区间分



（a）1∶30节段模型　　（b）1∶60节段模型

图 6　低阻尼下的阻尼比与振幅的关系

Figure 6　Relationship between damping ratio and amplitude under low ramping ratio



（a）1∶30节段模型　　（b）1∶60节段模型

图 7　不同缩尺比试验的加劲梁竖向涡振响应

Figure 7　Vertical vortex-induced vibration response of stiffening girder in experiments of different scale ratios

别为4.8～5.4 m/s和2.7～4.0 m/s，其中，0°风攻角下的竖向涡振较为明显，其竖向涡振位移均方差最大值为0.116 m；常规比例模型在各风攻角下均未观测到明显的涡振响应。两种缩尺比节段模型的扭转涡振响应结果如图8所示。

由图8可以看出：大比例模型在0°和－3°风攻角下发生了较为明显的涡振响应，对应的锁定风速区间分别为12.7～14.7 m/s和7.5～8.4 m/s，其中，0°风攻角下的扭转位移均方差最大值为0.69°；常规比例模型仅在0°风攻角下观测到较为明显的扭转涡振，其锁定风速区间为7.4～8.2 m/s，扭转位移均方差最大值约为0.12°。

综上所述，受雷诺数效应等因素影响，大、小比例节段模型在不同风攻角下的涡振响应幅值与风速区间都存在一定的差异，宜采用大比例节段模型开展更加精细的涡振响应预测研究。

3.1.2 阻尼比影响

上一节研究表明，大比例节段模型在名义阻尼比0.136%下会发生较明显的竖弯和扭转涡振，但该阻尼比明显小于《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)建议的阻尼比0.3%以及欧洲规范[27]建议的阻尼比0.24%。因此，该文进一步研究增大阻尼比对加劲梁涡振响应的影响规律。采用缠绕电工胶带的方式给节段模型悬挂系统附加阻尼，附加阻尼前后节段模型悬挂系统的阻尼比随振幅的变化曲线如图9所示。

由图9可以看出：增加阻尼后，节段模型悬挂系统的竖弯名义阻尼比从0.136%增至0.217%，扭转名义阻尼比从0.048%增至0.164%。附加阻尼前后，竖弯阻尼比随振幅基本呈线性变化，而扭转阻尼比基本不变。

增大节段模型悬挂系统阻尼比后的风洞试验结果如图10所示。

由图10可以看出：当竖弯名义阻尼比增至0.217%，扭转名义阻尼比增至0.164%后，加劲梁在所有风攻角下均未出现明显的竖弯或扭转涡振。这说明该断面的竖弯和扭转涡振响应对结构阻尼比十分敏感。

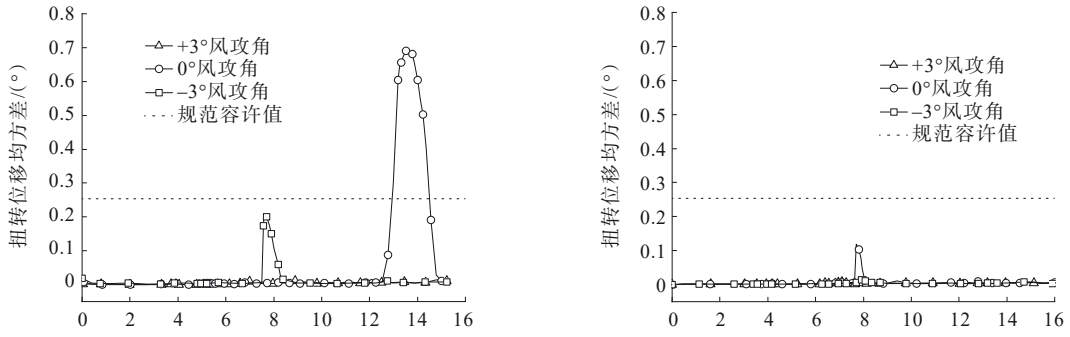


图8 不同缩尺比试验的加劲梁扭转涡振响应

Figure 8 Torsional vortex-induced vibration response of stiffening girder in experiments of different scale ratios

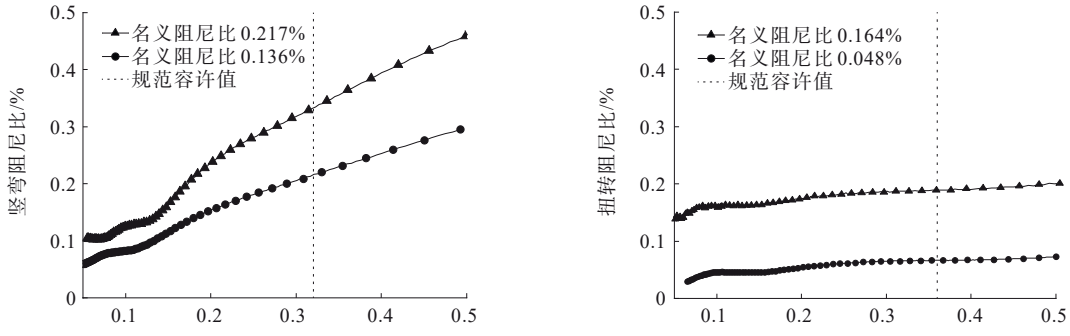
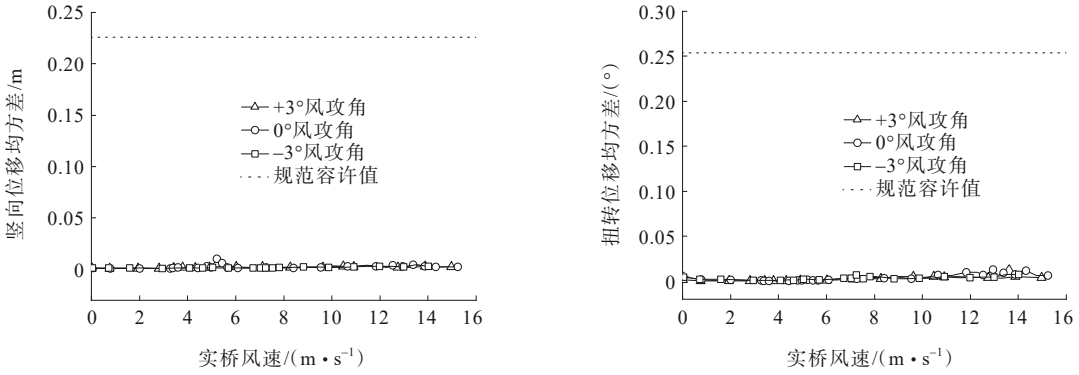


图9 两种阻尼下的阻尼比与振幅的关系

Figure 9 Relationship between damping ratio and amplitude under two damping ratios



（a）竖向位移响应　　（b）扭转位移响应

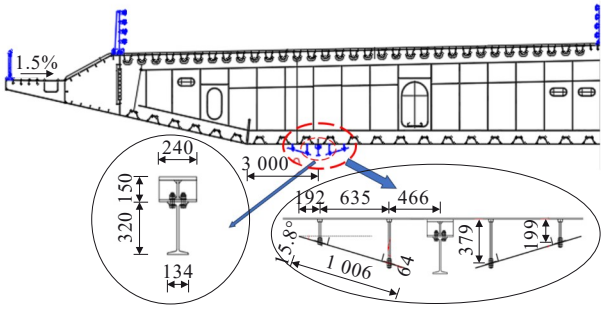
图 10　竖向名义阻尼比 0.217%、扭转名义阻尼比 0.164% 下的主梁涡振响应

Figure 10　Vortex-induced vibration response of main girder under vertical nominal damping ratio of 0.217% and torsional nominal damping ratio of 0.164%

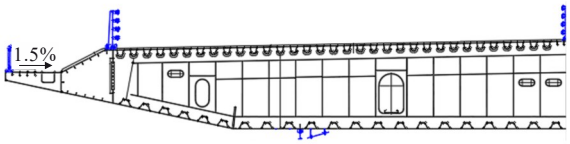
因此，准确评估实桥阻尼比对涡振响应的精确预测至关重要。

3.1.3　检修车轨道导流板影响

桥梁涡振响应对断面外形非常敏感[28]，针对桥梁在低阻尼比下的涡振响应，该文研究了安装双侧和单侧检修车轨道导流板的涡振控制效果，以作为涡振控制的储备方案。双侧导流板和单侧导流板的设计方案分别如图 11(a)和图 11(b)所示，对应的涡振响应预测结果分别如图 12 和图 13 所示。



（a）双侧导流板（单位：mm）



（b）单侧导流板

图 11　导流板涡振控制方案

Figure 11　Control scheme for vortex-induced vibration of guide vane

从图 12 可以看出：在基本相同的低阻尼比水平下，加装双侧导流板后，扭转涡振基本消失，0°风攻角下的竖弯涡振振幅降低了 75% 左右，说明安装双侧导流板进一步提高了主梁断面的涡振性能。从图 13 可以看出：安装单侧导流板后，加劲梁在各风攻角下的竖弯涡振基本消失，但在 +3°风攻角下仍出现了不同程度的扭转涡振响应；当名义阻尼比增加到 0.148% 后，扭转涡振现象基本消失。总体来看，安装双侧导流板和单侧导流板均能进一步改善加劲梁在低阻尼条件下的涡振性能，其中双侧导流板对扭转涡振的控制效果更好，而单侧导流板则对竖弯涡振的控制更好。

3.2　加劲梁颤振性能研究

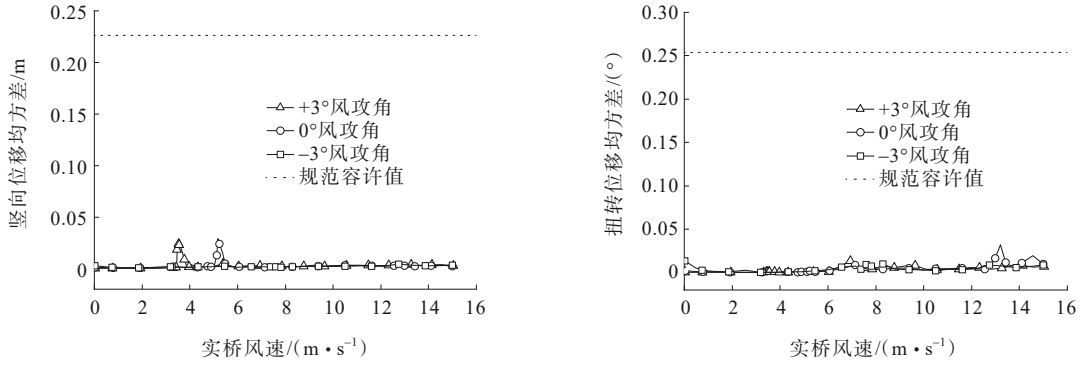
3.2.1　节段模型颤振试验

颤振是一种发散性的自激振动。在桥梁抗风设计中，应保证悬索桥加劲梁的颤振临界风速大于颤振检验风速。为此，本文采用 1∶60 小比例节段模型，在均匀流场中开展了原始断面颤振性能研究，并分析了涡振控制中可能采用的双侧导流板和单侧导流板对颤振性能的影响。不同工况下加劲梁颤振临界风速试验结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出：各个工况下的颤振临界风速均大于颤振检验风速，满足《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)要求，且均有 20% 以上的富余量。安装双侧导流板或单侧导流板在改善加劲梁的涡振性能的同时，对加劲梁颤振性能的影响较小。

3.2.2　全桥气弹模型颤振试验

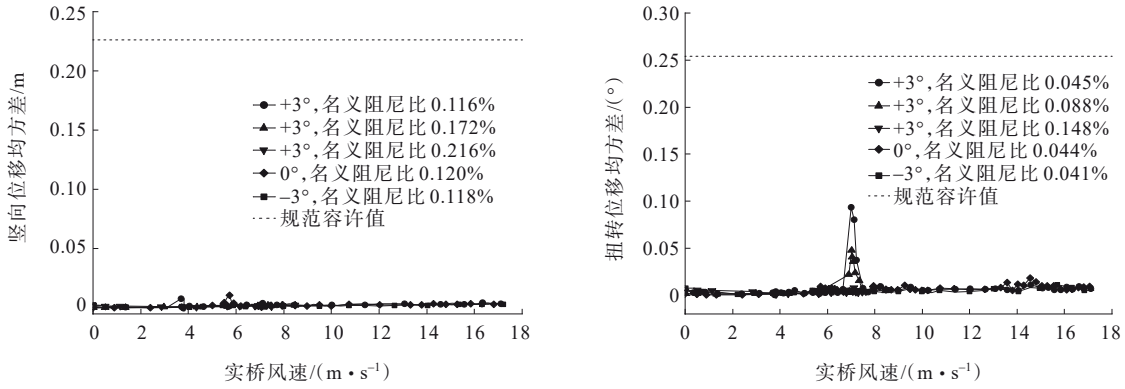
全桥气弹模型颤振试验在节段模型试验基础上进一步考虑了结构和流场的三维特性，以更加全面地评估大桥的颤振性能。全桥气弹模型的几何缩尺比为 1∶205。桥塔的芯梁采用钢材模拟，外衣采用 ABS 板模拟；主梁的芯梁采用铝材模拟，外衣采用木材模拟，其中检修车轨道两侧安装了导流



（a）竖向位移响应　　（b）扭转位移响应

图12　双侧导流板下的主梁涡振响应

Figure 12　Vortex-induced vibration response of main girder under two-side guide vane



（a）竖向位移响应　　（b）扭转位移响应

图13　单侧导流板下的主梁涡振响应

Figure 13　Vortex-induced vibration response of main girder under one-side guide vane

板；主缆采用钢丝模拟，配重及外衣采用铁柱和铝柱模拟；支座采用滑槽加滑轮模拟，充分考虑了实际边界条件。全桥气弹模型颤振试验在均匀流场中进行，研究了不同风偏角和风攻角对大桥的颤振性能的影响，图14为典型工况下全桥气弹模型颤振试验的照片。

表4　主梁的颤振临界风速

Table 4　Critical flutter wind speed of main girder

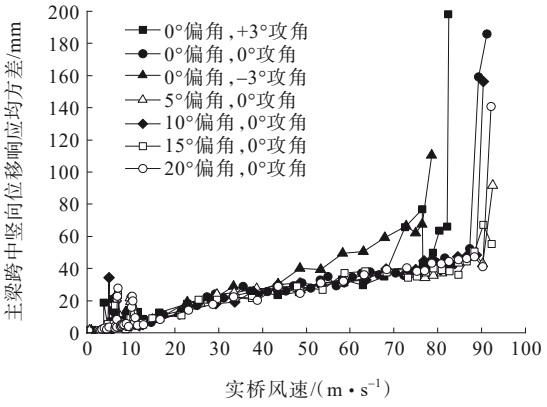
断面形式	不同风攻角下的颤振临界风速/(m·s⁻¹)				
	−5°	−3°	0°	+3°	+5°
无导流板	＞72	＞72	＞72	70	60
双侧导流板	—	＞80	84	74	—
单侧导流板	—	84	84	72	—
颤振检验风速	40.6	57.9	57.9	57.9	40.6

主梁跨中竖向位移响应均方差和扭转位移均方差随风速的变化曲线分别如图15(a)和图15(b)，各工况下的颤振临界风速汇总于表5。由表5可以看出：竖向和扭转位移均随着风速的增大逐渐缓慢增大，当风速达到某一临界值时，扭转和竖向位移陡然增加，表明桥梁出现了硬颤振。对比表5和表4可以发现，对于0°风攻角，全桥气弹模型和节段模型的颤振临界风速基本一致；对于−3°风攻角，全桥气弹模型的颤振临界风速稍小于节段模型；对于+3°风攻角，全桥气弹模型的颤振临界风速稍大于节段模型。对于0°风攻角，风偏角的存在有利于提高大桥颤振临界风速。

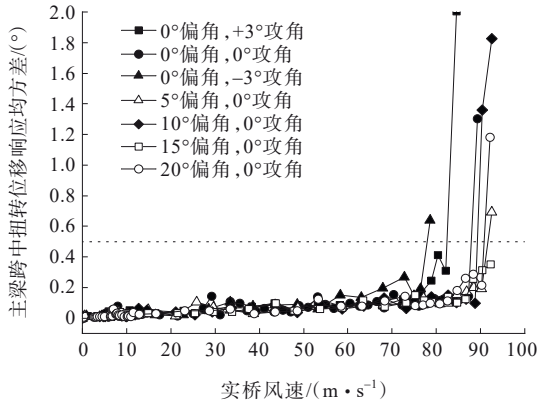
（a）20°风偏角0°风攻角　　（b）0°风偏角+3°风攻角

图14　全桥气弹模型试验照片

Figure 14　Test of full-bridge aeroelastic model



（a）竖向位移响应均方差



（b）扭转位移响应均方差

图15　主梁跨中位移响应均方差随风速的变化

Figure 15　Variation of mean square error of mid-span displacement response of main girder with wind speed

表5　基于全桥气弹模型的主梁颤振临界风速预测结果

Table 5　Forecasting results of critical flutter wind speed of main girder based on full-bridge aeroelastic model

风攻角	不同风偏角下的颤振临界风速/(m·s⁻¹)				
	0°	5°	10°	15°	20°
0°	79.20	82.02	80.56	＞83.92	81.92
−3°	71.39	—	—	—	—
+3°	74.66	—	—	—	—

4　结论

本文通过节段模型风洞试验和全桥气弹模型风洞试验，对新港高速双柳长江大桥的涡振和颤振性能进行了研究，并分析了模型缩尺、结构固有阻尼比和检修车轨道导流板等参数对主梁涡振和颤振性能的影响，主要结论如下：

（1）小比例节段模型颤振试验和全桥气弹模型颤振试验结果基本一致。大桥在不同风攻角下的颤振临界风速均大于颤振检验风速20%以上，表明大桥具有良好的颤振性能，满足大桥抗风设计要求。

（2）大桥涡振响应对阻尼比非常敏感。大比例节段模型试验表明：在竖弯名义阻尼比0.136%和扭转名义阻尼比0.048%下主梁出现了明显的竖弯和扭转涡振，但当竖弯名义阻尼比增至0.217%，扭转名义阻尼比增至0.164%后，竖弯和扭转涡振均基本消失。这表明在抗风规范建议的阻尼比0.3%条件下，大桥涡振性能满足要求。

（3）在检修车轨道内侧或两侧安装导流板（双侧或单侧）可以有效抑制主梁的竖弯和扭转涡振响应，从而进一步提升大桥的涡振性能，降低其在小阻尼比条件下发生涡振的风险。

参考文献：

References：

[1] 陈政清.桥梁风工程[M].北京：人民交通出版社，2005.
CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press,2005.

[2] LI H, LAIMA S J, OU J P, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements [J].Engineering Structures,2011,33(6):1894-1907.

[3] YANG Y X, ZHOU R, GE Y J, et al. Experimental studies on VIV performance and countermeasures for twin-box girder bridges with various slot width ratios[J]. Journal of Fluids and Structures,2016,66:476-489.

[4] 陈政清，黄智文.大跨度桥梁竖弯涡振限值的主要影响因素分析[J].中国公路学报，2015,28(9):30-37.
CHEN Zhengqing, HUANG Zhiwen. Analysis of main factors influencing allowable magnitude of vertical vortex-induced vibration of long-span bridges[J].China Journal of Highway and Transport,2015,28(9):30-37.

[5] 陈尚烽.考虑行车安全性的桥梁竖向涡振限值计算[J].中外公路，2019,39(6):114-117.
CHEN Shangfeng. Computation of threshold vertical vortex-induced vibration of bridges accounting for traffic safety[J].Journal of China & Foreign Highway,2019,39(6): 114-117.

[6] 朱金，李涵，熊籽跃，等.大跨度公路悬索桥涡振条件下驾驶员全身振动研究[J].土木工程学报，2023,56(8):60-74,84.
ZHU Jin, LI Han, XIONG Ziluo, et al. Evaluation of whole body vibration of vehicle drivers on long-span highway suspension bridge experiencing vortex-induced vibration [J].China Civil Engineering Journal,2023,56(8):60-74,84.

[7] 朱金，黄旭，熊籽跃，等.大跨度悬索桥竖弯涡振条件下驾驶员行车视线研究[J].西南交通大学学报，2023,58(1):191-201.
ZHU Jin, HUANG Xu, XIONG Ziluo,, et al. Study on driver's sight line under vertical vortex-induced vibration of long span suspension bridges[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2023,58(1):191-201.

[8] ZHAO L, CUI W, SHEN X M, et al. A fast on-site measure-

analyze-suppress response to control vortex-induced-vibration of a long-span bridge[J]. Structures, 2022, 35: 192-201.

[9] CAO Y W,HUANG Z W,ZHANG H Y,et al.Discrete viscous dampers for multi-mode vortex-induced vibration control of long-span suspension bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2023,243:105612.

[10] 喻宝金,乔张旺,付丽.风屏障对扁平箱梁气动稳定性的影响[J].中外公路,2020,40(2):99-102.
YU Baojin, QIAO Zhangwang, FU Li. Influence of wind barrier on aerodynamic stability of flat box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(2):99-102.

[11] 刘志文,江智俊,黎晓刚,等.流线型钢箱梁涡激振动机理与气动控制措施[J].中国公路学报,2022,35(11):133-146.
LIU Zhiwen, JIANG Zhijun, LI Xiaogang, et al. Study on mechanism and aerodynamic control measures for vortex-induced vibration of a streamlined-box steel girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 133-146.

[12] LARSEN A,ESDAHL S,ANDERSEN J E,et al.Storebælt suspension bridge-vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes[J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2000,88(2/3):283-296.

[13] LARSEN A, SAVAGE M, LAFRENIÈRE A, et al. Investigation of vortex response of a twin box bridge section at high and low Reynolds numbers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (6/7):934-944.

[14] 杨阳,张亮亮,吴波,等.宽体扁平钢箱梁气动力特性及涡振性能研究[J].桥梁建设,2016,46(1):70-75.
YANG Yang, ZHANG Liangliang, WU Bo, et al. Study of aerodynamic characteristics and vortex-induced vibration performance of wide flat steel box girder[J]. Bridge Construction,2016,46(1):70-75.

[15] 李春光,张佳,韩艳,等.栏杆基石对闭口箱梁桥梁涡振性能影响的机理[J].中国公路学报,2019,32(10):150-157.
LI Chunguang,ZHANG Jia,HAN Yan,et al.Mechanism of the influence of railing cornerstone on vortex-induced vibration of closed box girder bridge[J].China Journal of Highway and Transport,2019,32(10):150-157.

[16] 赵林,李珂,王昌将,等.大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述[J].中国公路学报,2019,32(10):34-48.
ZHAO Lin, LI Ke, WANG Changjiang, et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridges[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(10):34-48.

[17] 刘继久,刘圣源,方根深,等.流线型闭口箱梁大攻角颤振性能及演变机理研究[J].中国公路学报,2023,36(11):432-440.
LIU Jijiu, LIU Shengyuan, FANG Genshen, et al. Flutter performance and evolution mechanism analysis of a streamlined closed-box girder at large angles of attack[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 432-440.

[18] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
Tongji University. Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2018.

[19] 乐云祥,常英,胡晓伦.武汉阳逻长江大桥施工猫道抗风稳定性分析[J].公路交通科技,2005,22(8):40-43,60.
YUE Yunxiang,CHANG Ying,HU Xiaolun.Analysis of wind-resistant stability on the catwalk of Wuhan Yangluo Yangtze River bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2005,22(8):40-43,60.

[20] 范万祥,张敏,陈宁贤.黄冈公铁两用长江大桥钢桁梁大悬臂架设抗风措施[J].桥梁建设,2013,43(2):23-27.
FAN Wanxiang, ZHANG Min, CHEN Ningxian. Wind-resistant measures for long cantilever erection of steel truss girder of Huanggang Changjiang River rail-cum-road bridge[J].Bridge Construction,2013,43(2):23-27.

[21] LAIMA S J, LI H, CHEN W L, et al. Investigation and control of vortex-induced vibration of twin box girders[J]. Journal of Fluids and Structures,2013,39:205-221.

[22] MARRA A M, MANNINI C, BARTOLI G. Measurements and improved model of vortex-induced vibration for an elongated rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 358-367.

[23] 季建东,王彬.长挑臂闭口钢箱组合梁桥设计及其关键技术[J].中外公路,2024,44(3):137-144.
JI Jiandong, WANG Bin. Design and key technologies of bridges with long-cantilever closed steel box composite girder[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3): 137-144.

[24] 刘志文,林子楠,邵超逸,等.流线型箱梁涡激共振响应模型尺寸效应[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):109-118.
LIU Zhiwen, LIN Zinan, SHAO Chaoyi, et al. Model size effects on vortex-induced vibration responses of a streamlined box girder[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2023,50(1):109-118.

[25] XU F Y,ZHANG Z B.Numerical simulation of windless-air-induced added mass and damping of vibrating bridge decks[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,180:98-107.

[26] CAO F C, GE Y J. Air-induced nonlinear damping and added mass of vertically vibrating bridge deck section models under zero wind speed[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 169: 217-231.

[27] EN 1991-1-4: 2004, Eurocode 1: Actions on Structures - General Actions-Part 1-4:Wind Actions[S].

[28] 龙俊贤,李前名,任达程,等.上跨铁路桥梁主梁涡振性能及抑振措施研究[J].中外公路,2021,41(2):148-153.
LONG Junxian,LI Qianming,REN Dacheng,et al.Study on vortex vibration performance and vibration suppression measures of the main girder uncrossing a railway bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(2): 148-153.