

公铁两用非对称矮钢塔双层桁架梁斜拉桥 抗风性能研究^{*}

姜贺^{1†} 冯亚成²

(1. 鲁南高速铁路有限公司, 济南 250014)

(2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要 为研究主跨(84+144+228+240+300+120+60)m 的矮塔钢桁梁斜拉桥在设计风速下的抗风性能, 选择风洞试验作为主要研究方法, 通过节段模型试验和全桥气弹模型试验, 对济阳黄河大桥成桥状态和典型施工状态的风荷载及风致响应进行测试, 并与桥梁抗风规范进行对比. 弹性悬挂节段模型测振风洞试验结果表明, 该桥主梁的颤振性能和涡激共振性能均满足抗风安全要求; 而全桥试验结论则发现, 在 0~110m/s 的风力区域内, 未观测到主梁颤振和涡激振动现象, 也未发现静力失稳情况, 且主梁位移响应满足了安全要求和舒适性要求, 大桥的抗风性能得到了进一步验证. 钢桁架桥的抗风试验研究为设计提供了充分的检验依据, 可以供类似的钢桁架工程参考.

关键词 公铁两用桥, 斜拉桥设计, 风洞试验, 抗风性能, 风致振动

中图分类号: O357

文献标志码: A

Study on Wind Resistance of Double-Layer Truss Beam Highway and Railway Cable-Stayed Bridge with Asymmetric Low Steel Tower^{*}

Jiang He^{1†} Feng Yacheng²

(1. Lunan High-Speed Railway Co., Ltd., Jinan 250014, China)

(2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract To investigate the wind resistance performance of the low-tower steel truss cable-stayed bridge with a main span of (84+144+228+240+300+120+60)m under the design wind speed, wind tunnel tests were selected as the primary research method. Segment model tests and full-bridge aeroelastic model tests were conducted to measure the wind loads and wind-induced responses of the Jiyang Yellow River Bridge in both the completed state and typical construction conditions, and the results were compared with bridge wind resistance codes. Elastic suspension segment model vibration wind tunnel test results revealed that the flutter and vortex-induced resonance performance of the main beam meets the wind resistance safety requirements. The full-bridge tests concluded that no flutter or vortex-induced vibration of the main beam was observed in the wind speed range of 0~110m/s, nor were any static instability conditions detected. Moreover, the displacement response of the main beam satisfied both the safety and comfort requirements, thus further verifying the bridge's wind resistance performance. The wind resistance experimental study of the steel truss bridge provides a substantial basis for design verification and can also serve as a reference for similar steel truss construction projects.

Key words highway and railway bridge, cable stayed bridge, wind tunnel test, wind resistance performance, wind induced response

2024-03-29 收到第 1 稿, 2024-04-25 收到修改稿.

^{*} 山东省交通运输厅科技计划项目(2022B91), Science and Technology Plan of Shandong Provincial Department of Transportation (2022B91).

[†] 通信作者 E-mail: lz95770@163.com

引言

随着中国高速铁路桥梁的发展,钢桁架桥梁因具有跨越能力强、便于拼装建造等优点,得到了广泛采用^[1-3]。抗风性能是大跨度桁架桥设计中不容忽视的一部分,随着大跨度桥梁跨度逐渐增大,桁架桥的风敏感性逐渐提高,高速铁路行车平顺性及稳定性的要求愈加严格,因此有必要对大跨度桁架桥的抗风性能开展风洞试验研究。

《公路桥梁抗风设计规范》^[4]中明确了桁架桥的抗风标准,为桁架桥的抗风研究提供了规范性指导;曹少辉等^[5]建立了北盘江钢桁架桥的有限元模型,实测了前 10 阶频率,证明了北盘江大桥桥梁结构的自振特性理论计算与实际结构动态受力的一致性;Gao 等^[6]分析了苏通长江大桥的关键设计技术,通过使用透风性能良好的钢桁架梁和在桥塔上设置横向抗风轴承来提高结构的抗风性,通过采用由阻尼器和摩擦摆轴承构成的阻尼约束系统,显著提升了结构的阻尼和能量耗散效果;Yu 等^[7]提供了鸭池河特大桥的抗风数据支持,分析了环境温度变化和侧向风对桥梁稳定性的影响,在设计风速下,线弹性和非线性、非弹性的稳定性系数分别降低到 5.55 和 4.50 左右;范万祥等^[8]对黄冈公铁两用大桥的抗风措施进行了研究,提出了只受压抗风牛腿等措施,比较了桁架桥抗风措施的抗风性能;何旭辉等^[9]分析了金海特大桥的抗风性能,评估了强风环境下桥梁的稳定性和安全性,分析了不同风速和风向对桥梁结构安全性的影响。

为了获得影响桁架桥抗风性能的结构参数,已有研究对桁架桥的气动特性进行了多个角度的分析。Xu 等^[10]对桁架桥的抗风稳定性进行了深入分析,通过 CFD 数值模拟获得了影响桥梁抗风性能的结构参数,讨论了非线性参数和因素对桥梁抗风不稳定容量的影响,研究发现初始风攻角对桥梁的气动静态稳定性分析影响显著;何旭辉等^[11]对横风条件下桁架桥上车辆气动特性展开了研究,为改进桁架桥抗风性能提供了依据;李永乐等^[12]明确了风屏障在减少桁架桥风致振动方面的作用,通过设置风屏障,主梁颤振临界风速显著降低;Liu 等^[13]探讨了风屏障对公铁两用桁架桥一列车系统的气动特性的影响,安置在桥外侧的风屏障会增加桥梁的阻力系数,随着风屏障高度的增加,桥梁的阻力系数逐步增

大;Zhang 等^[14]通过风洞试验研究了桁架桥塔周围的局部风场特性,由于桥塔的遮挡效应,可能会形成局部较低的风速区域,设计时应充分考虑这些因素的影响;Carter 等^[15]研究了开放式桁架桥的风荷载,对桁架桥阻塞效应对风荷载的影响进行了评估,给出了桁架桥风速校正因子的确定方法。

在桁架桥风致振动控制方面,康厚军等^[16]汇总了主梁涡振控制研究进展,提出主动控制是未来振动控制与利用的发展方向;司洪伟等^[17]研究了采用自适应模糊控制器抑制桁架结构振动时的主动杆数目与位置优化问题,采用数值模拟方法优化了非线性反馈控制律;Tang 等^[18]通过 CFD 数值模拟分析了安装上下稳定板对桁架桥涡振的影响,结果发现安装稳定板后桁架桥涡振幅值有显著提高,不能采用稳定板抑制涡振;陈天瑀等^[19]对多种气动措施的抑振效果进行了系统研究,验证了展向波浪形风嘴的抑振能力。

本研究依托于济阳黄河公路铁路两用特大桥,该桥是济滨高速公路和 G308 高速的共通道共建项目,主桥梁孔跨布置为(84+144+228+240+300+120+60) m,主桥梁全长为 1178 m。主桥梁结构为四塔三主跨双索面矮塔斜拉加劲连续钢板桁架大桥,主桥梁正立面设计如图 1 所显示,主塔为扁箱钢塔,采用双钢板桁结合框架,整体结构体系为连续梁体系。大桥上层为六车道的公路,下层为有砟双线铁路。主梁断面如图 2 所示,主梁宽度为 15 m、长度为

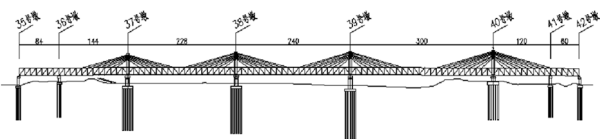


图 1 主桥立面布置
Fig. 1 Elevation layout of of main bridge of jiyang yellow river highway and railway bridge

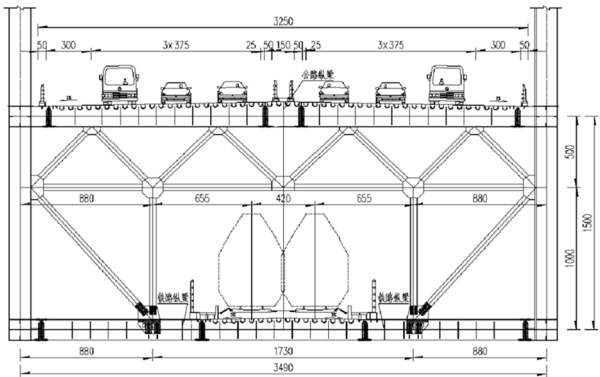


图 2 主梁标准断面
Fig. 2 Standard section of main beam

34.9m,公路桥面铺装的为正交异性钢桥板,而铁路桥上的两端镂空采用交叉杆,其中行车线部分使用了正交异型钢桥板.主梁采取悬臂拼装法浇筑,在风荷载的作用下,钢桁梁可能具有较大的侧向水平力和扭矩.为了保证大桥在安装和运行阶段的抗风安全性,必须开展抗风安全特性分析,为此采取了风洞试验方法,对典型施工过程(最大双悬臂)和成桥状态的风致响应开展试验.

1 结构动力特性分析

1.1 有限元模型

为了分析桥梁的动力特性,使用有限元软件 ANSYS 建立了有限元模型.采用 BEAM188 单元模拟主梁和桥塔,采用修正后的弹性模型反映索的垂度响应,采用 LINK10 杆单元模拟索;采用静力特性分析法

计算结构恒载内力,并计入恒载内力对结构动力特性的结果影响;成桥情况下,主梁在 39# 桥塔处固结,对桥塔的主墩进行竖向、横桥向以及绕大桥轴线扭转三个方向进行约束,过渡墩则对主梁端部进行竖向、横桥向和绕大桥轴线方向的约束;在最大双悬臂设计情况下,墩顶主梁两侧各一个节间处为固结.

1.2 结构动力特性分析

济阳黄河公铁两用桥动力特性计算结果见表 1.在成桥状态下,主要对 300m 跨径的主梁进行分析,其一阶对称模态的频率分别为 0.4470Hz(竖弯模态)和 0.9951Hz(扭曲模态),扭转频率比(扭曲频率/竖弯频率)为 2.2262;最大双悬臂情况下,37# 塔对应主梁一阶对称模态的扭转频谱比(2.0987)最小,38# 塔对应主梁阶段反对称模型的扭转频率比(0.7889)最小.

表 1 动力特性分析结果(单位:Hz)
Table 1 Dynamic characteristics of jiyang yellow river highway and railway bridge (Hz)

Bridge condition	Mode of vibration			
	Symmetric vertical bending of the first order	Antisymmetric vertical bending of the first order	Symmetric torsion of the first order	Antisymmetric torsion of the first order
Bridge status	0.4470	0.7946	0.9951	
Maximum double cantilever state of 37 #	1.1024	2.4423	2.3136	2.1838
Maximum double cantilever state of 38 #	0.9389	2.4916	2.0590	1.9655
Maximum double cantilever state of 39 #	0.9389	2.0590	2.0590	1.9656
Maximum double cantilever state of 40 #	0.8577	2.2195	1.8794	1.7573

2 桥梁抗风设计研究

依据大桥桥址地质资料及《公路桥梁抗风设计规范》^[4]可得出,桥址的地表性质为 B 型,基本风速值为 29.0m/s,主梁的跨中桥面位置标高为 Z = 31.73m,对应的主梁设计基准风速计算公式为:

$$V_d = K_f V_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^a \tag{1}$$

计算获得对应的主梁设计基准风速 35.6m/s,为取施工重现期取为 10 年,则对应的施工阶段的设计基准风速计算公式为:

$$V_{sd} = \eta V_d \tag{2}$$

式中,抗风风险系数 K_f 取值为 1.02,施工期抗风风险系数 η 取值为 0.88,计算获得对应的施工阶

段的设计基准风速为 31.3m/s.

依据规范,成桥状态颤振检验风速计算公式为:

$$[V_{cr}^c] = \gamma_f \gamma_i \gamma_a V_d \tag{3}$$

其中,颤振稳定性分项系数 γ_f 取为 1.4; γ_i 为考虑风速脉动空间影响分项系数,根据抗风设计规范表取值为 1.30; γ_a 为攻角效应分项系数,当攻角为 +3°,0°,−3°时取为 1.0.计算获得成桥状态颤振检验风速为 64.8m/s.

施工重现期取为 10 年,对应的施工状态桥梁颤振检验风速计算公式为:

$$[V_{cr}^c] = \gamma_f \gamma_i \gamma_a V_{sd} \tag{4}$$

其中,颤振稳定性分项系数 γ_f 、 γ_i 、 γ_a 取值同式(3),计算获得对应的施工状态桥梁颤振检验风速为 57.0m/s.

根据桥梁抗风设计规范,对涡激共振起振风速进行估算.成桥竖弯涡振基频为 0.4470Hz,参考多座桁架桥的 Strouhal 系数^[20-22],预估 Strouhal 系数范围为 0.1 至 0.3,主梁梁高 $D=16.5\text{m}$,大桥可能的涡激共振起振风速计算公式如下:

$$[U^c]=fD/S_t$$

(5)

计算获得该桥可能的起振风速在 18.5m/s~55.4m/s 范围内.

该桥允许的涡振限值按下式计算:

$$h_v<\gamma_v\frac{0.04}{f_v}$$

(6)

$$\theta_t<\gamma_v\frac{4.56}{Df_t}$$

(7)

其中,涡振分项系数 γ_v 取值为 1.0,计算得到竖弯和扭转涡振振幅限值分别为 120mm 和 0.2°.

2.1 节段模型抗风试验

通过节段模型试验测量主梁的风荷载和风致振动,进而检验大桥的抗风稳定性.节段模型风洞试验在中南大学风洞实验室的高速实验段完成,实验段最大截面尺度为宽 3.0m、高 3.0m.试验模型的几何缩尺比选为 1:50,宽×高×长=0.73m×0.33m×1.92m,实验模型长宽比约为 2.63,最大堵塞率小于规范规定的 5%,满足了试验要求.试验模型均采用了钢板和结皮板机械加工而成,并在主梁模型中布置了加劲梁,附属构件则采用 PVC 板雕刻加工而成.为避免模型端部气流对试验结果的干扰,在模型两端安装了长宽比大于 2 的端板^[23].节段模型试验参数缩尺比关系如表 2 所示.

表 2 节段模型试验参数
Table 2 Segmental model test parameters

Argument	Symbol	Unit	Similitude ratio
Length	L	m	1/50
Breadth	B	m	1/50
Height	H	m	1/50
Equivalent mass	meq	kg/m	1/50 ²
Equivalent mass moment	Jeq	kg·m ² /m	1/50 ⁴
Wind speed	U	m/s	1:4.3
Vertical bending frequency of first order	f_h	Hz	11.6
Torsional frequency of first order	f_t	Hz	11.6

测振试验通过弹性悬挂系统实现,调节弹簧刚度可实现竖弯频率的控制,调整配重块到桥梁纵轴

线的距离可调整扭转频率,在试验前调整节段模型频率同主梁频率相对应,图 3 为风洞试验模型布置图.试验时,将眼镜蛇探针(Cobra)置于远离模型和风洞壁影响处,采集来流风速大小;模型风致响应则采用激光位移计(基恩士)采集.

节段模式测振试验在匀流场完成,考虑 -3°、0°和 +3°风攻角,并采用扭转角均方值大于 0.5°的试验风速为颤振的临界速度,将试验风速根据速度比转化为实桥风速,试验结果如图 4 所示.当风速

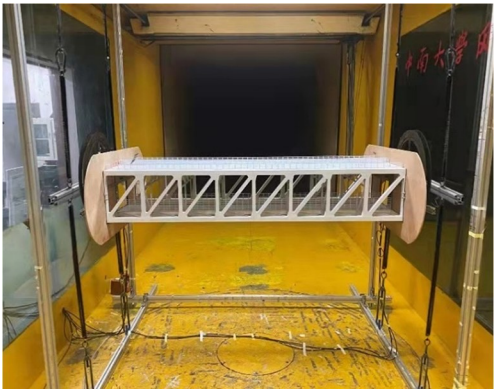


图 3 主梁节段模型风洞试验
Fig. 3 Layout of wind tunnel test of main beam segment mode

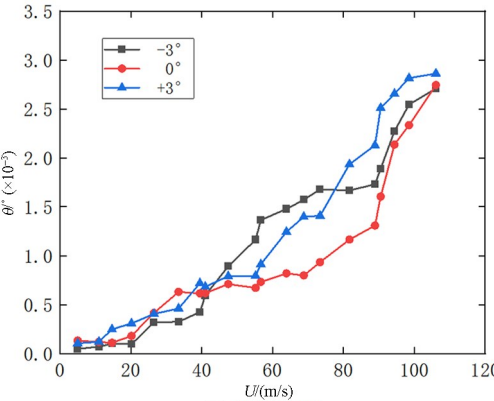
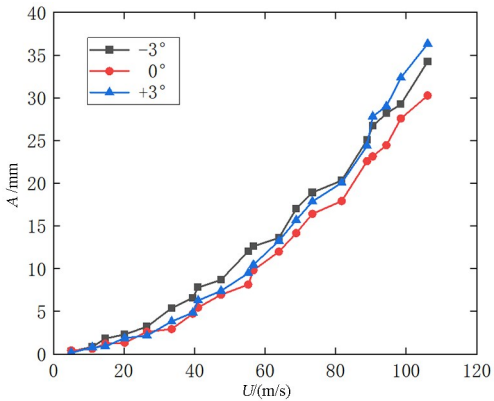


图 4 节段模型风洞试验结果
Fig. 4 Results of the segmented model wind tunnel test

2.2 全桥气弹模型抗风试验

达到 94 /s 以上时,主梁在三种风攻角下的最大扭转角均方值小于 0.5°,说明主梁均未发现过颤振,颤振临界风速高于试验风速范围,大桥的颤振稳定性已满足抗风要求。

涡振性能检验试验流场和攻角与颤振试验一样,将试验速度范围设定到 0~50m/s(实桥)之间,试验阻尼比约为 0.5%。在试验条件下,竖弯和扭转涡振幅值均低于了规范规定的允许幅值。

综上,节段模型测振试验结果表明济阳黄河公铁两用桥的满足抗风安全性要求。

通过对全桥气弹风洞试验,研究了该桥的静风性能,并对其颤振和涡振稳定性进行了校核。试验在低速试验段展开,试验段长×宽×高=18.0m×12.0m×3.5m,考虑试验场地的限制,将模型缩尺比选为 1:110,使用“U”形钢材模拟主梁刚度,外形则采用 ABS 板拼接模拟,在其内部安装了铅块平衡物。斜拉索严格考虑质量和风力相似,通过调节材料和配重实现索力的模拟。桥塔用钢料做芯柱,ABS 板模拟外衣,桥柱与地基固结,塔柱以及墩梁交叉处用滑轨模拟塔梁约束。全桥气弹模型缩尺比关系如表 3 所示。

表 3 全桥气弹模型试验参数

Table 3 Segmental model test parameters

Similarity parameter	Symbol	Similarity relation	Similarity parameter	Symbol	Similarity relation
Density	C_ρ	1	Wind speed	C_V	$1/\sqrt{110}$
Unit Mass	C_M	$1/110^2$	Frequency	C_f	$\sqrt{110}$
Unit mass moment of inertia	C_I	$1/110^4$	Time	C_t	$1/\sqrt{110}$
Tensile stiffness	C_{EF}	$1/110^3$	Damping ratio	C_δ	1

试验考虑成桥状态和最大双悬臂状态两类情况,流场考虑均匀流场和紊流场两种,其中紊流场采用被动方法模拟^[10],图 5 所示为典型工况现场布置照片,图 6 为风洞试验 B 类风速剖面 and 湍流度风剖面,试验风场与理论值对应较好。试验测得成桥状态和施工状态模型的一阶竖弯阻尼比分别为 0.596% 和 0.621%,满足试验要求。风攻角选取 +3°、0°和 -3°进行试验,试验结果表明 +3°风攻角为最不利风攻角,因此在 +3°风攻角下考虑风偏角

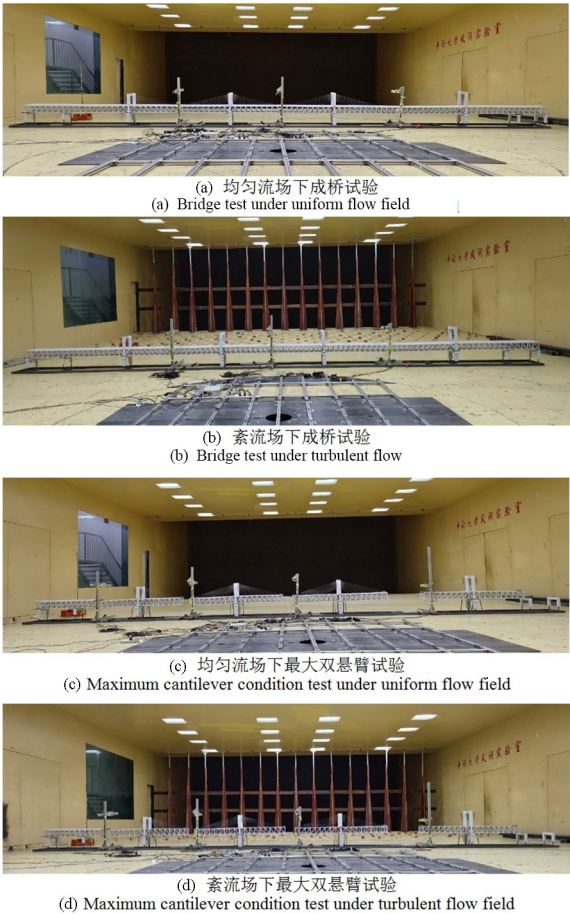


图 5 全桥模型风洞试验
Fig. 5 Layout of wind tunnel test of full bridge model

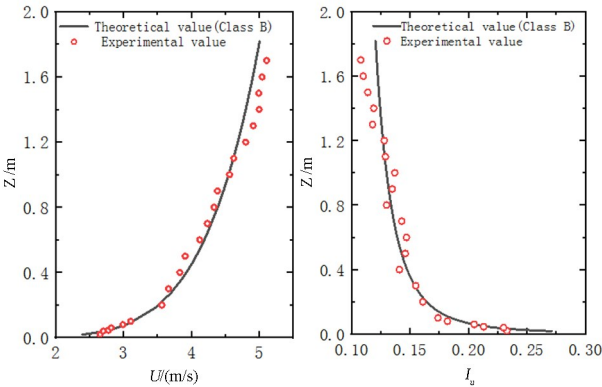


图 6 风速风剖面与湍流度风剖面
Fig. 6 Wind velocity profile and turbulence profile

的影响,风偏角选取 -45°~+45°范围,以 15°为间隔进行试验。

模型风致振动响应通过激光位移计进行采集,测点布置如图 7 所示。其中,成桥状态的测点布置如图(a)所示,在 300m 跨的跨中位置布置测点,最大悬臂状态的位移测点布置在各桥塔的悬臂端处。每个位移测点处沿横桥向对称安装两个位移计,以获得跨中位置的扭转角。

为方便对比,将试验结果统一转换为实桥值。

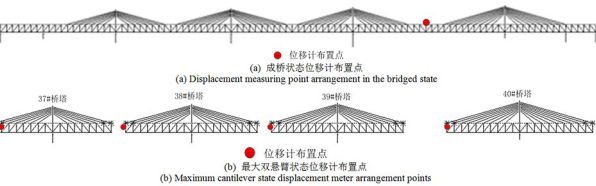


图 7 全桥气弹试验位移计布置位置

试验证明施工状态下四座桥塔的试验结果相似,仅列出悬臂端最长的 40# 桥塔的典型结果. 图 8 为均匀流场中位移响应随实际桥风速的变化形势,考虑了三种风攻角,由图可知,在 0~60m/s 的试验风

速区域中,成桥状态和施工状态之间的位移响应差异并不明显,但随着风速的增加,悬臂状态侧向移动均方根的增加速度更快,最大竖弯均方根与最大扭转角均方根之间在高风速下差异依然不显著;在 +3° 的风攻角下,悬臂状态与成桥状态的主梁位移均比其他攻角大,最大侧弯为 35.37mm,最大竖弯为 31.61mm,最大扭转角为 3.06×10^{-3} ,试验所得结果均远远低于规范允许值.

图 9 所示为 +3° 风攻角下,均匀流场中成桥状态的位移均方根曲线,从图中可看出,在试验风速内,位移响应随着风速的增大而缓慢增大,但未出现

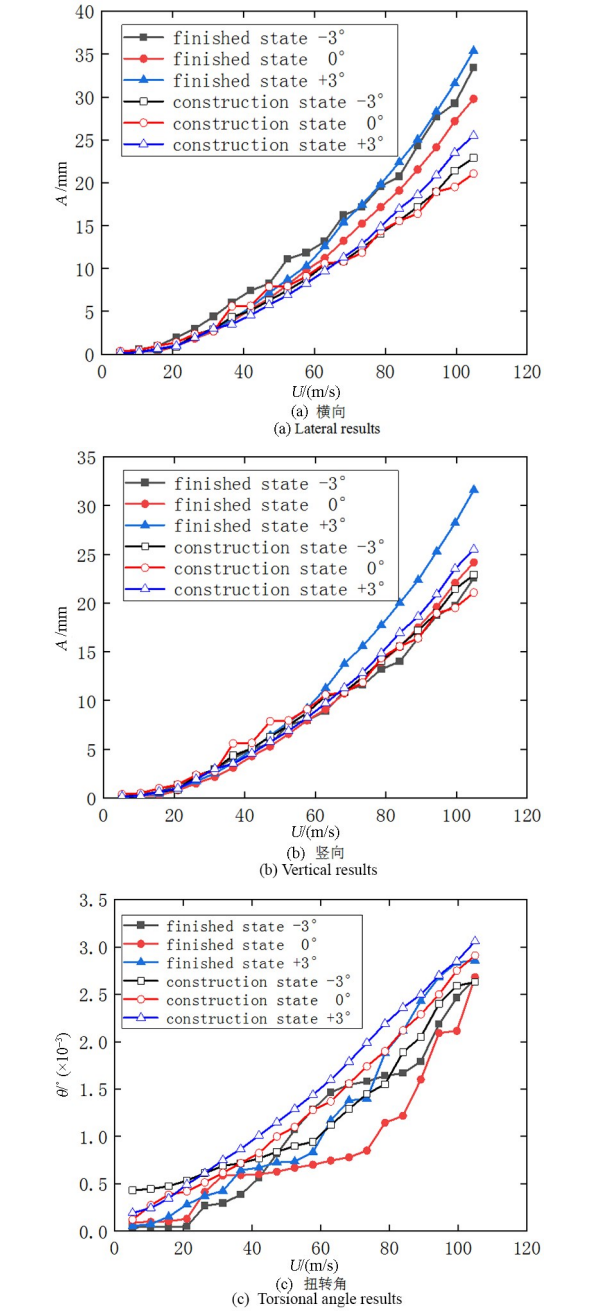


图 8 不同风攻角下成桥与悬臂状态位移均方根曲线
Fig. 8 Comparison of displacement response of finished bridge and cantilever under different wind attack angles

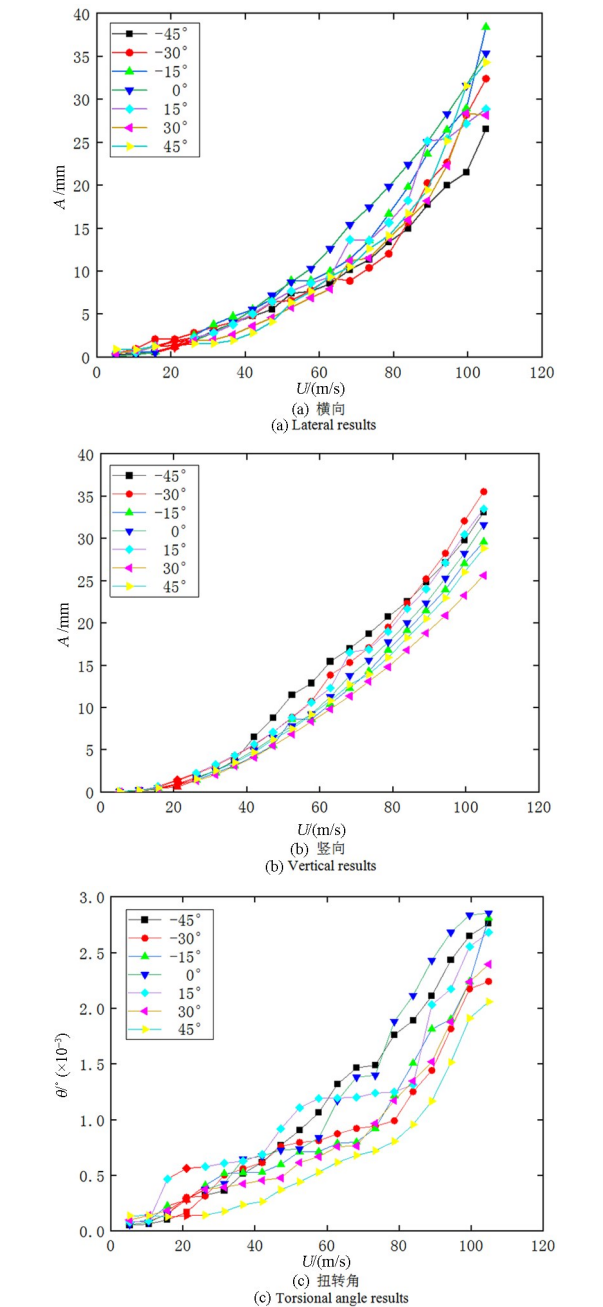


图 9 均匀流场中成桥状态下的位移均方根曲线
Fig. 9 Response curve of the finished bridge in uniform flow field under different wind deflection angles

明显的突变或发散振动,风偏角的变化对位移最大值的影响不甚明显,横向和竖向位移均未超出40mm,扭转角均小于 $3.0\times10^{-3}^{\circ}$ 。

图10为紊流场中的位移均方根曲线。紊流场中的位移随风速的变化规律与均匀流场相似,各个工况下位移响应较小,且均未发生位移均方根响应值骤增的现象,在试验风速内满足抗风要求。

验风速,证明该桥颤振稳定性符合设计规范要求;该桥在0~60m/s的风速范围内未发生明显的涡振现象,涡振性能符合设计规定。

(2)在 $-3^{\circ}\sim+3^{\circ}$ 试验风攻角范围内, $+3^{\circ}$ 风攻角下大桥响应最大,但该风攻角下的位移响应仍远小于规范允许值;风偏角对大桥响应影响不明显,在 $-45^{\circ}\sim+45^{\circ}$ 风偏角范围内,没有涡激振动和大幅抖振发生。

(3)主梁响应随风速的增大而缓慢增大,在试验风速范围内,未发现明显的骤增现象,风速达到110m/s时,其气动稳定性仍满足要求。

参考文献

[1] HE X H, WU T, ZOU Y F, et al. Recent developments of high-speed railway bridges in China [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13 (12): 1584—1595.

[2] 于祥敏, 陈德伟, 杜晓庆, 等. 山区钢桁梁斜拉桥设计和工程应用研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57 (2): 56—67.

YU X M, CHEN D W, DU X Q, et al. Reasearch on design and application of steel truss deck cable-stayed bridge in mountainous area [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57 (2): 56—67. (in Chinese)

[3] 尹国安, 王海波. 一种钢—混组合桁架桥下弦杆节点极限承载力研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49 (4): 88.

YIN G A, WANG H B. Study on ultimate bearing capacity of steel-concrete composite truss bridge bottom-chord joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 88.

[4] 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 Publishing House Co., Ltd., 2018. (in Chinese)

[5] 曹少辉, 田仲初. 世界第一高钢桁梁斜拉桥动力特性试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2): 1—6+67.

CAO S H, TIAN Z C. Experimental study on dynamic characteristics of the world's highest steel

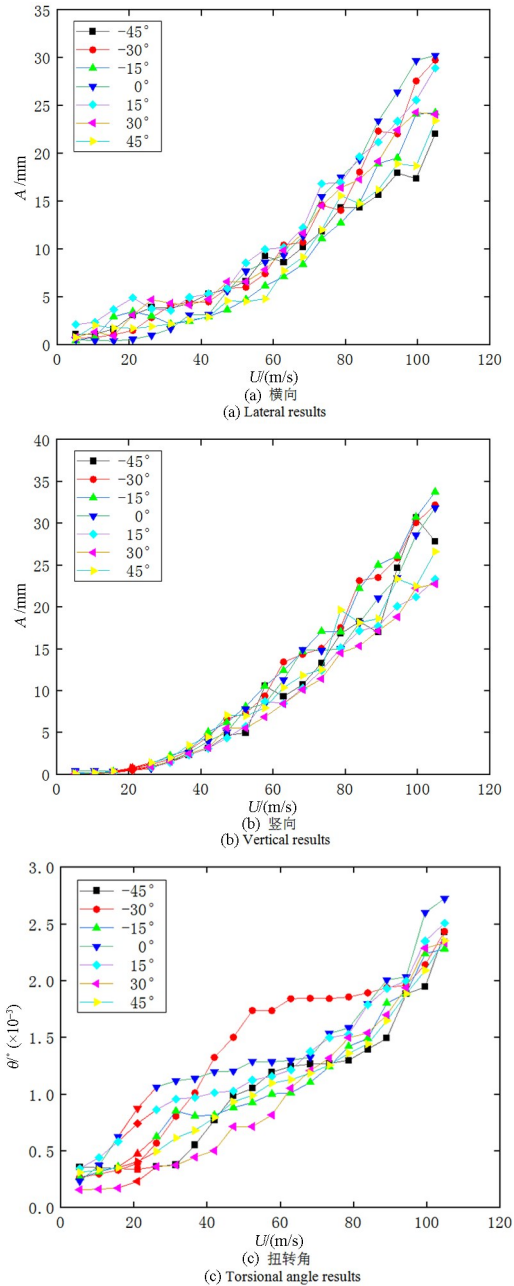


图10 紊流场中成桥状态下的位移均方根曲线
Fig. 10 Response curves of the finished bridge in the turbulent field under different wind deflection angles

3 结论

(1)济阳黄河高铁大桥典型施工状态(最大双悬臂)和成桥状态下的颤振临界风速远高于颤振检

- truss cable-stayed bridge [J]. Highway Engineering, 2020, 45(2): 1—6+67. (in Chinese)
- [6] GAO Z Y, XU W, MEI X Y, et al. Key construction technology of HuSuTong Yangtze River bridge [J]. Structural Engineering International, 2023, 33(1): 84—88.
- [7] YU X M, CHEN D W, BAI Z Z. A stability study of the longest steel truss deck cable-stayed bridge during construction [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1717—1724.
- [8] 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 W X, ZHANG M, CHEN N X. Wind-resistant measures for long cantilever erection of steel truss girder of Huanggang Changjiang River railcum-road bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(2): 23—27. (in Chinese)
- [9] 何旭辉, 谭凌飞, 敬海泉, 等. 金海特大桥主桥抗风性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2081—2088.
- HE X H, TAN L F, JING H Q, et al. Experimental study on wind resistance of main bridge of Jinhai Bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2081—2088. (in Chinese)
- [10] XU M, GUO W W, XIA H, et al. Nonlinear aerostatic stability analysis of Hutong cable-stayed railcum-road bridge [J]. Wind and Structures, 2016, 23(6): 485—503.
- [11] 何旭辉, 马清, 邹云峰等. 横风下公铁两用双层钢桁梁桥中汽车气动特性风洞试验研究[J/OL]. 中国公路学报, 2024: 1—15 [2024-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240313.1126.002.html>.
- HE X H, MA Q, ZOU Y F, et al. Wind tunnel test study on the aerodynamic characteristics of vehicle in the double-deck highway-railway steel truss bridge under crosswind [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024: 1—15 [2024-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240313.1126.002.html>.
- [12] 李永乐, 苏洋, 武兵, 等. 风屏障对大跨度桁架桥风致振动及车辆风载荷的综合影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12): 141—146+159.
- LI Y L, SU Y, WU B, et al. Comprehensive effect of wind screens on wind-induced vibration of long-span truss bridge and wind loads of vehicles [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 141—146+159. (in Chinese)
- [13] LIU L L, ZOU Y F, HE X H, et al. Effects of wind barriers on the aerodynamic characteristics of bridge-train system for a road-rail same-story truss bridge [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2690—2705.
- [14] ZHANG J Y, ZHANG M J, HUANG B, et al. Wind tunnel test on local wind field around the bridge tower of a truss girder [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 8867668.
- [15] CARTER A J, TAYLOR P H, SANTO H, et al. Wind loads on open truss structures: applications of blockage to historic transporter bridges [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2019, 377(2155): 20190017.
- [16] 康厚军, 韩艳, 徐军. 桥梁工程中动力学与控制研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(4): 1—6.
- KANG H J, HAN Y, XU J. Advances on dynamics and control in bridge engineering [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(4): 1—6. (in Chinese)
- [17] 司洪伟, 李东旭. 桁架结构振动的主动模糊控制中主动杆数目与位置优化[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(3): 259—266.
- SI H W, LI D X. Optimal design of number and locations of actuators when adopting the adaptive fuzzy control in active control [J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(3): 259—266. (in Chinese)
- [18] TANG H J, SHUM K M, TAO Q Y, et al. Vortex-induced vibration of a truss girder with high vertical stabilizers [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(4): 948—959.
- [19] 陈天瑀, 马存明, 段青松, 等. 大跨度公铁两用双层钢桁桥涡激振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 12—19.
- CHEN T Y, MA C M, DUAN Q S, et al. VIV control of a large-span dual-layer steel truss beam bridge for highway and railway dual-purpose [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(5): 12—19. (in Chinese)
- [20] FANG C, HU R J, TANG H J, et al. Experimental and numerical study on vortex-induced vibration of a truss girder with two decks [J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(5): 841—855.

- [21] OH S, SEO S I, LEE H, et al. Prediction of wind velocity to raise vortex-induced vibration through a road-rail bridge with truss-shaped girder [J]. *Shock and Vibration*, 2018(1):2829640.
- [22] YAO G, CHEN Y X, YANG Y, et al. Research on mechanism of vortex-induced vibration railing effect of double-deck large-span suspension bridge [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(16): 9314.
- [23] 白桦, 刘博祥, 姬乃川, 等. 节段模型二元端板合理尺寸估算方法[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(2): 312—320.
- BAI H, LIU B X, JI N C, et al. Reasonable size estimation of the binary end plates of a segmental model [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(2): 312—320. (in Chinese)