

DOI:10.11918/202303027

大跨协作体系桥梁吊跨比对主梁涡振性能的影响

游衡锐, 童子龙, 李永乐, 杨凌, 潘俊志

(桥梁智能与绿色建筑全国重点实验室(西南交通大学), 成都 611756)

摘要: 为研究斜拉-悬索协作体系中不同吊跨比对主梁涡振性能的影响,以某斜拉-悬索协作体系桥梁为工程背景,首先,开展了节段模型风洞试验,采用增长共振法获取桥梁断面涡激振动过程中的发展时程与稳态振幅;其次,基于考虑跨向振幅依存性的非线性涡激力模型,对节段模型振动位移时程进行希尔伯特变换识别得到主梁截面的气动阻尼随无量纲振幅变化的关系曲线;最后,计算了8种不同吊跨比备选方案的主梁涡振振幅,明确了大桥从斜拉体系逐渐过渡到悬索体系时主梁涡振的变化规律,提出了一种综合考虑涡振幅值和跨向影响范围的辅助性指标对结果进行评价和对比。结果表明:随着吊跨比增加,基频降低,对应的1阶竖弯模态振型不断变宽;随着吊跨比的增加,跨中涡振幅值不断减小,不同吊跨比下跨中涡振幅值差异约11.1%,同时主梁起振风速有所下降;结合主梁涡振幅值指标 η^* 和主梁加速度指标 a^* 对不同吊跨比下大桥的涡振程度进行综合比较,发现随着吊跨比的增加,虽然跨中涡振幅值不断减小,但主梁的涡振影响范围不断加宽,主梁整体涡振程度显著增加,不同吊跨比下 η^* 差异约59.5%。吊跨比对主梁平均加速度 a^* 影响有限。

关键词: 斜拉悬索协作体系; 涡激振动; 风洞试验; 气动参数; 吊跨比

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0072-08

Influences of hanging-span ratios on the vortex-induced vibration performance of the main girder in large-span collaborative system bridges

YOU Hengrui, TI Zilong, LI Yongle, YANG Ling, PAN Junzhi

(State Key Lab of Bridge Intelligent and Green Construction(Southwest Jiaotong University), Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to study the influence of different suspension-span ratios on the vortex-induced vibration performance of the beam in the cable-stayed-suspension cooperative system, a bridge with a cable-stayed-suspension cooperative system is used as the engineering background. Firstly, based on wind tunnel test, the method of Growth-to-resonance is used to obtain the development time history of the bridge section, which is in the process of VIV. Secondly, based on the nonlinear vortex-induced force model considering the span-direction amplitude dependence, the relationship curve of the aerodynamic damping parameters of the main girder section with the dimensionless amplitude is obtained through Hilbert transform. Finally, through iterative calculation of the beam VIV amplitude of eight alternatives. The change law of VIV in the processing of changing from the near-cable-stayed system to the suspension-cable system is clarified and a new evaluation index is proposed that considers the VIV amplitude value and the span-direction influence range. The results show that: with the increase of the hanging-span ratios, the corresponding first-order vertical bending mode shape changes from sharp to flat and the fundamental frequency decreases. As the hanging-span ratios increases, the vortex-induced vibration amplitude at mid-span consistently decreases. The variation in mid-span vortex vibration amplitude across different hanging-span ratios is approximately 11.1%. Additionally, the onset wind speed for the main girder's vibration decreases with increasing hanging-span ratios. Combined with the average VIV amplitude value of the bridge (η^*) and the average acceleration of the bridge (a^*), the difference in η^* under different hanging-span ratios is about 59.5%, and the influence on the overall VIV performance of the bridge is increasing, but the a^* has limited change.

Keywords: cable-stayed-suspension bridge; vortex-induced vibration; wind tunnel test; aerodynamic parameters; hanging-span ratios

收稿日期: 2023-03-07; 录用日期: 2023-03-28; 网络首发日期: 2024-10-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241015.1058.006>

基金项目: 国家自然科学基金(52008349); 中国博士后科学基金特别资助(2021T140573); 四川省自然科学基金青年项目(22NSFSC0857)

作者简介: 游衡锐(1999—),男,硕士研究生; 李永乐(1972—),男,教授,博士生导师

通信作者: 童子龙, zilongti@swjtu.edu.cn

斜拉-悬索协作体系作为一种组合桥梁结构体系,因受力合理、跨越能力好、兼顾斜拉桥与悬索桥的特性等优点在桥梁方案比选时受到广泛重视。吊跨比是指悬吊段长度与主跨跨度的比值,作为协作体系重要设计指标之一,是协作体系设计中的重要设计参数。改变吊跨比会直接改变结构体系的刚度与动力特性,从而间接可能对主梁的涡振性能产生显著影响。虽然涡激振动^[1-2]具有自激性和振幅自限性,但频繁的涡振对大跨度桥梁的行车安全不利,并容易引起结构疲劳破坏。如鸚鵡洲大桥、虎门大桥以及丹麦 Great Belt East 桥^[3]等均在运营期间出现过明显的涡激振动。因此在协作体系桥梁设计阶段,研究不同吊跨比对桥梁涡振性能的影响对桥梁的抗风安全十分重要。

针对斜拉-悬索协作体系的抗风性能,一些学者进行了相关研究。文献[4]对金州海湾大桥协作体系桥方案在静风荷载作用下的结构非线性响应展开研究,同时研究了缆索体系风荷载等因素对结构体系的影响规律。文献[5]基于主跨 1 400 m 的协作体系桥方案,研究了斜索面布置、吊跨比等设计参数对静风稳定性的影响。文献[6]基于有限元理论对斜拉-悬索协作体系的静风失稳临界风速进行了计算。综上所述,虽然国内外对于协作体系桥的抗风性能进行了相关研究,但主要围绕该结构体系的静风稳定、颤振性能,而对于协作体系桥吊跨比的不同对实桥涡振性能影响的研究较少。

目前基于半经验半理论模型并结合风洞试验对涡激振动展开研究仍是桥梁风工程领域中主要手段之一。最早文献[7]为了描述涡振时结构与流体之间的相互耦合作用,基于 Van der Pol 振子模型通过风洞试验建立了多种线性和非线性涡激力半经验模型来描述桥梁断面涡激振动现象。文献[8]基于非线性涡激力模型,说明考虑阻尼比振幅依赖性能够降低阻尼比识别误差对涡激力参数识别的影响。文献[9]基于气弹模型对高阶模态下气动力展向相关性开展研究。此外,文献[10]通过风洞试验测得箱梁涡振时的气动效应特性,在经验非线性模型的基础上建立了新的涡激力模型,更好的预测了箱梁的涡振响应。文献[11]基于非线性最小二乘法对单自由度经验非线性涡激力模型气动参数开展识别,证明识别结果稳定性高,并能够有效应用于风洞试验。文献[12]将非线性涡激力模型和气动阻尼模型相结合,并基于风洞试验描述了大跨度桥梁多断面的涡振性能。

现有研究对常规体系桥梁的涡激振动已进行了许多系统的研究,而对协作体系特别是吊跨比对主

梁涡振性能的影响报道较少。由于协作体系桥梁在结构上的特殊性,不同的吊跨比会影响结构的等效质量以及刚度的分布,使其动力特性和振型形状与常规体系有差异,对桥梁涡振性能造成影响。此外,桥梁的涡振性能不仅与结构质量-阻尼参数有关,还与涡激振动的振幅依存性相关,对准确预测桥梁涡振响应具有重要的影响。因此,本文以斜拉-悬索协作体系为背景,通过节段模型风洞试验^[13],在涡振锁定风速区间内,采用增长共振法获取节段模型涡激振动的发展时程,在此基础上,使用非线性气动阻尼模型描述桥梁结构主梁断面与流场之间的耦合作用,并使用主梁断面的位移发展时程,对主梁断面的气动参数进行识别。最后,综合考虑非线性自激力的振幅依存性对全跨涡振响应的影响,计算不同吊跨比下备选方案的主梁涡振幅值,明确了从斜拉体系逐渐过渡到悬索体系时主梁涡激振动的变化规律,并对计算结果进行分析和对比,研究结论可为斜拉-悬索协作体系的初步设计及方案选取提供参考。

1 工程概况

某沿海城市风景区内受地势、施工影响,并在保证较好环境适应性的前提下,修建一单跨无背索斜拉-悬索协作体系桥梁。主缆跨径布置为(122 + 345 + 100)m,主梁形式为钢箱梁,高 2.2 m,桥面宽 10 m,其标准截面形式如图 1 所示。

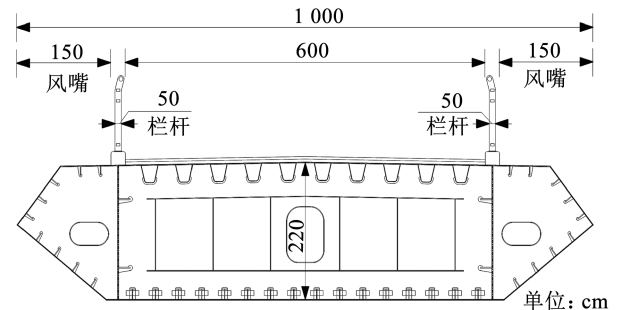


图 1 主梁标准断面

Fig. 1 Standard section of bridge deck

该协作体系沿桥跨方向跨中部分布置吊索,两侧对称布置斜拉索且无背索,桥面斜拉索锚固点标准间距 12 m,吊索锚固点间距 6 m,斜拉-悬索过渡区拉索锚固点间距 12 m,同时桥梁方案的预选吊跨比为 37.67%,立面如图 2 所示。通过对上述体系进行动力特性分析,得出其 1 阶竖弯频率为 0.482 7 Hz,主梁每延米等效质量为 8 070 kg,本文以该方案为基础开展主梁断面的风洞试验,并对该桥成桥阶段的 1 阶竖弯涡振问题开展研究。

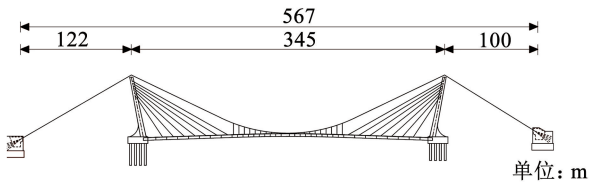


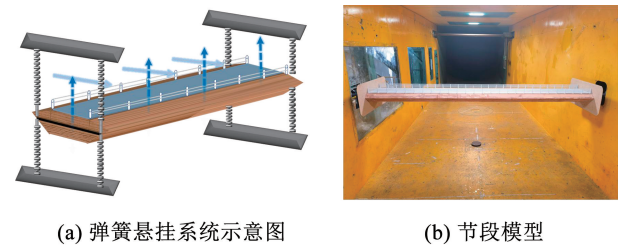
图 2 桥梁立面

Fig. 2 Elevation of bridge

2 截面气动参数识别

2.1 试验环境及试验系统

以前文所述案例的流线型箱梁断面为研究对象,通过风洞试验^[14-15]获取该断面的涡振性能与气动特性。节段模型采用的缩尺比为 1/25,模型宽度 $B=2b=0.4\text{ m}$,模型高度 $D=0.088\text{ m}$,模型长度 $L=2.1\text{ m}$,栏杆和防撞护栏进行外形缩尺并按透风率设计。试验所用模型单位长度质量为 12.91 kg ,竖弯频率为 3.42 Hz ,阻尼比为 0.307% (标准阻尼比)。本试验在 XNJTD-1 号风洞试验室进行。该风洞为环流式风洞,试验段的尺寸为高 2 m 、宽 2.4 m ,均匀来流下的紊流度小于 0.5% 。采用两自由度弹簧悬挂模型系统,允许模型发生竖向和扭转两个自由度方向的振动,如图 3 所示。



(a) 弹簧悬挂系统示意图

(b) 节段模型

图 3 风洞试验现场

Fig. 3 Wind tunnel test site

对主梁在 0° 攻角下的涡振性能开展风洞试验,竖向涡振试验结果如图 4 所示。由试验结果可以看出,在标准阻尼下实桥最大竖弯振幅约 56 mm ,对振幅 A 和风速 U 进行无量纲化后,主梁断面的无量纲涡振幅值为 0.011 ,无量纲风速区间基本锁定在 $2.5\sim 4.0$,对应实桥风速为 $6.8\sim 9.5\text{ m/s}$ 。其中无量纲振幅为 $(A/b)\times 10^{-3}$,无量纲风速为 $v=2\pi U/(\omega_h b)$ 。

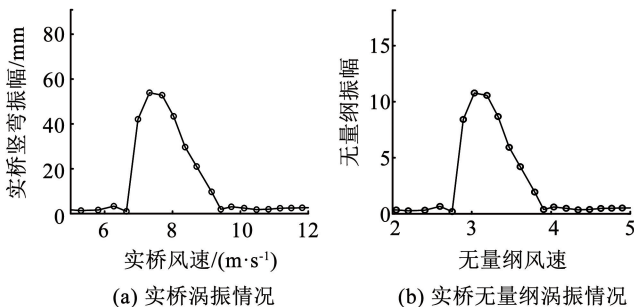


图 4 主梁断面涡振幅值风洞试验结果

Fig. 4 Test results of VIV

2.2 非线性气动导数识别

Scanlan 提出的颤振导数表达式被广泛应用于桥梁风工程领域的颤振分析,并沿用至今。本文采用类似的桥梁断面自激气动力模型,即非线性气动阻尼模型^[16],针对节段模型其运动方程为

$$m(\ddot{h} + 2\xi_s \omega_s \dot{h} + \omega_s^2 h) = \frac{1}{2} \rho U^2 (2b) \left(k H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + k^2 H_4^* \frac{h}{b} \right) \quad (1)$$

其中: m 为单位长度质量, h 为模型竖向位移, ρ 为空气密度, b 为桥梁断面宽度的一半, ω_s 为结构竖向自振圆频率, $k=\omega_h b/U$ 为折减频率, ω_h 为竖向振动圆频率, H_1^* 、 H_4^* 分别为气动阻尼和气动刚度相关的气动导数。

由于气动刚度^[17]项 H_4^* 对结构频率的影响可以忽略不计,即 $\omega_h \approx \omega_s$ 。通过分析式(1),可以发现气动阻尼比 ξ_a 与气动导数 H_1^* 的函数关系如式(2)所示。

$$\xi_a = \frac{1}{2m} \rho b^2 H_1^* \quad (2)$$

为了对主梁截面的气动参数 H_1^* 进行识别^[18],需要用到系统的增长-共振瞬变段位移时程。并且为了考虑气动阻尼的振幅依存性,需对所测增长曲线进行希尔伯特变换(HT)变换,获得主梁断面的时变振幅,在此基础上求解系统阻尼和气动阻尼。

由于气动参数只与截面形状有关,并且为了获得较高振幅的阻尼曲线,故在低阻尼下选取多个包含涡振区间特性的风速点进行增长-共振试验。因此,首先在无量纲风速 $2.5\sim 4.0$ 之间选取多个能反应涡振区间特征的风速点进行小阻尼增长共振试验,对所测时程信号 $x(t)$ 进行 HT 变换,其解析信号 $S(t)$ 如式(3)所示。

$$S(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) = A(t)e^{-i\theta(t)} \quad (3)$$

式(3)中幅值 $A(t)$ 和相位 $\theta(t)$ 可以表示成如下形式:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \omega_d t + \varphi_0 \quad (5)$$

直接通过 HT 变换得到的时变振幅是离散信号,为了方便求导来计算系统总阻尼,本文利用 Gompertz 模型^[19]对时变振幅进行拟合得到其解析方程,如式(6)所示。

$$\ln A(t) = a_0 \exp[-\exp(a_1 t - a_2)] \quad (6)$$

其中 a_0 、 a_1 、 a_2 为常数。试验中在所选包含涡振区间特性的风速点下,利用增长共振法,使系统振动幅值从 0 开始增长,随着能量的不断积聚,主梁再次被漩涡脱落所捕获,气动负阻尼不断减小,最终系统总

阻尼为 0, 主梁竖向振动幅值达到最大值并稳定, 如图 5(a) 所示, 同时图 5 给出了通过该模型拟合得到的主梁竖向涡激振动时程曲线的包络线, 可见拟合

效果较好。再根据式(4)和式(5), 计算得到系统总阻尼及系统固有频率。最后通过对无风状态弹簧悬挂系统进行自由衰减试验, 测得位移变化时程, 见图 5(b)。

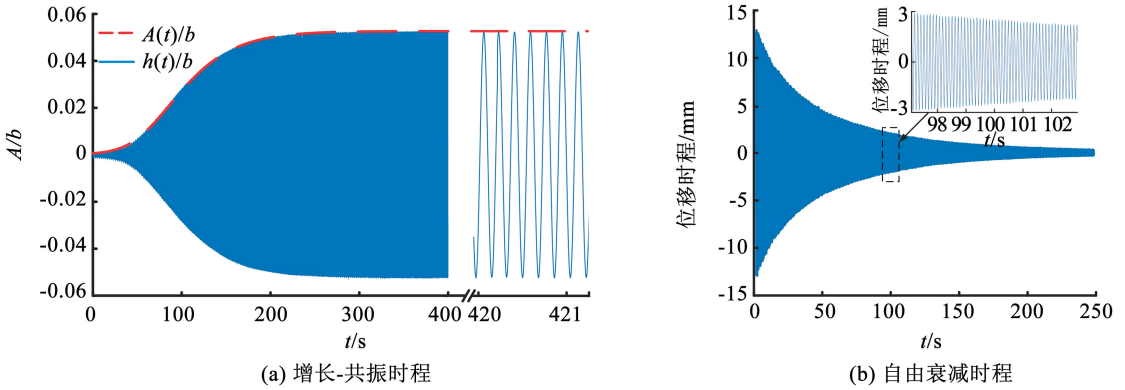


图 5 模型增长-共振时程及自由衰减曲线

Fig. 5 "Growth-to-resonance" displacement of the cross-sectional model during VIV and free decay curve

根据式(4)对图 5 中自由衰减时程进行分析, 计算得到系统机械阻尼比 ξ_s , 进而求得系统气动阻尼比。根据式(2)气动导数与气动阻尼比的函数关系, 结合识别得到的同一风速下系统的总阻尼比 ξ 得到气动导数 H_1^* , 即

$$H_1^* = \frac{(\xi - \xi_s) \times 2m}{\rho b^2} = \frac{2m\xi_a}{\rho b^2} \quad (7)$$

随着试验风速从起振风速点增加至涡振最大幅

值所对应的风速, 系统总阻尼比逐渐增大并无限接近于 0, 最终主梁断面在锁定风速区间内发生有限振幅振动。图 6 给出了 7 个风速点下通过增长-共振法识别得到的气动导数与无量纲竖向振幅的函数关系曲线。以上在考虑振幅依存性的情况下, 识别得到主梁断面的气动参数, 为后续评估协作体系在不同吊跨比下实桥的涡振性能提供理论与数据基础。

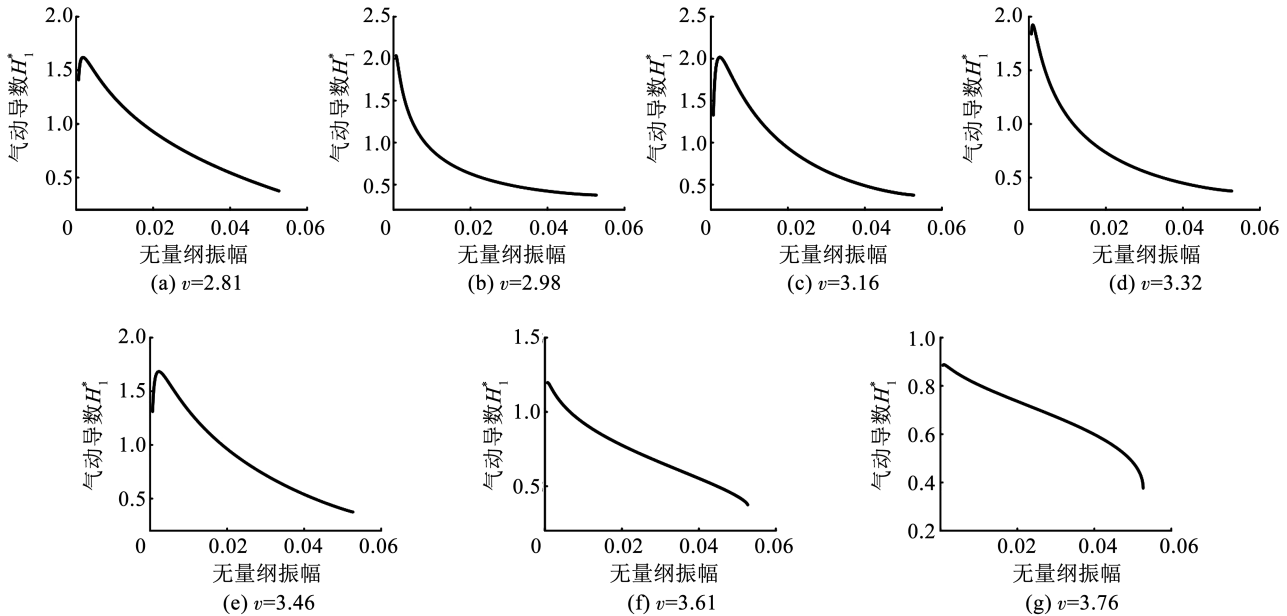


图 6 无量纲风速下主梁断面气动导数

Fig. 6 Aerodynamic parameters of main beam section under the dimensionless wind speed

3 吊跨比对主梁涡振性能的影响

3.1 主梁涡振计算方法

在实际工程的初步设计阶段,为了满足抗震需要,通常设计采用的吊跨比在 0.3~0.6 之间^[20],但不同吊跨比可能改变体系的一阶竖弯振型和模态广义质量,从而影响实桥涡振性能。因此,本文考察了该桥设计阶段吊跨比为 22.61%~100% 时的 8 种不同备选方案,如图 7 所示,分别计算相同截面下不同吊跨比的主梁涡振幅值。这 8 种方案基本涵盖了大桥从斜拉体系逐渐过渡到悬索体系的结构变化特征。为了保持“塔直梁平”,不同方案中,主塔竖向偏角与大缆直径均有所改变。

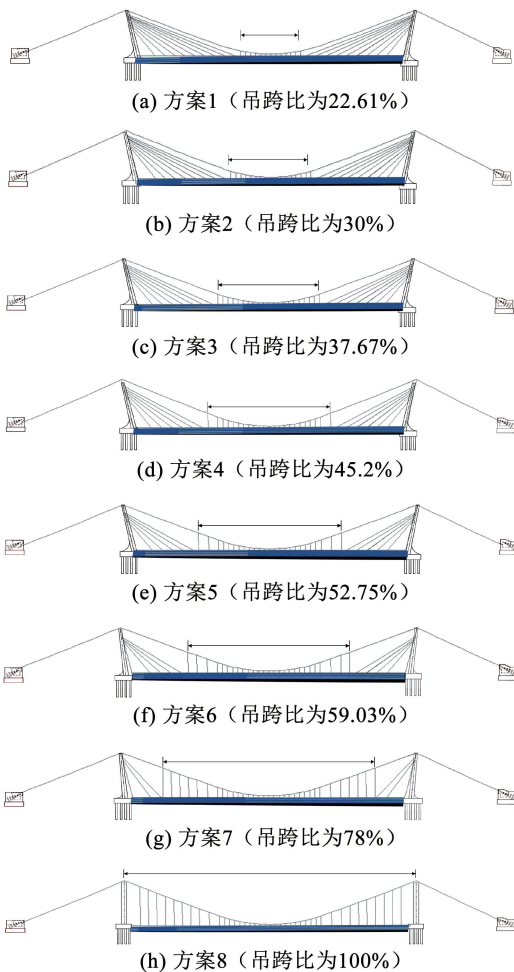


图 7 吊跨比变化情况

Fig. 7 Variation of the Hanging-span ratios

基于前文试验得到的不同风速点下无量纲振幅与气动导数 H_1^* 的关系曲线,计算实桥沿跨向不同位置处的涡振幅值。因此,对式(1)进行广义化处理,即将 $h(x) = R(x)q(t)$ 代入式(1),并忽略气动刚度的影响,如式(8)所示。其中 $R_i(x)$ 表示实桥在第 i 阶竖弯模态下的振型函数, $q_i(t)$ 表示第 i 阶竖弯模态下的广义坐标。

$$M_i(\ddot{q}_i(t) + 2\xi_{si}\omega_{si}\dot{q}_i(t) + \omega_{si}^2q_i(t)) = \frac{1}{2}\rho U^2(2b) \left(k \frac{\dot{q}_i(t)}{U} \int_0^L R_i^2(x) H_1^*(x) dx \right) \quad (8)$$

式(8)中 $M_i = \int_0^L R_i^2(x) m_0(x) dx$, $m_0(x)$ 是桥梁

单位长度质量; ξ_{si} 和 ω_{si} 表示第 i 阶竖向阻尼比和圆频率。右侧气动力项考虑了振幅非线性的影响,将其移至等式左侧与速度项进行合并,此时系统总阻尼由机械阻尼和气动阻尼组成,利用节段模型试验所获得包含涡振特征的气动导数与无量纲振幅曲线,在同一风速下进行计算,当系统总阻尼为 0 时,结合实桥 1 阶竖弯振型即可获得沿跨向主梁在同一风速下的涡振响应,上述具体流程如图 8 所示,在此基础上根据图 8 所示流程在不同风速点下进行计算,即可获取实桥涡振区间内的涡振幅值。并通过该流程实现对不同吊跨比下主梁涡振幅值的计算。

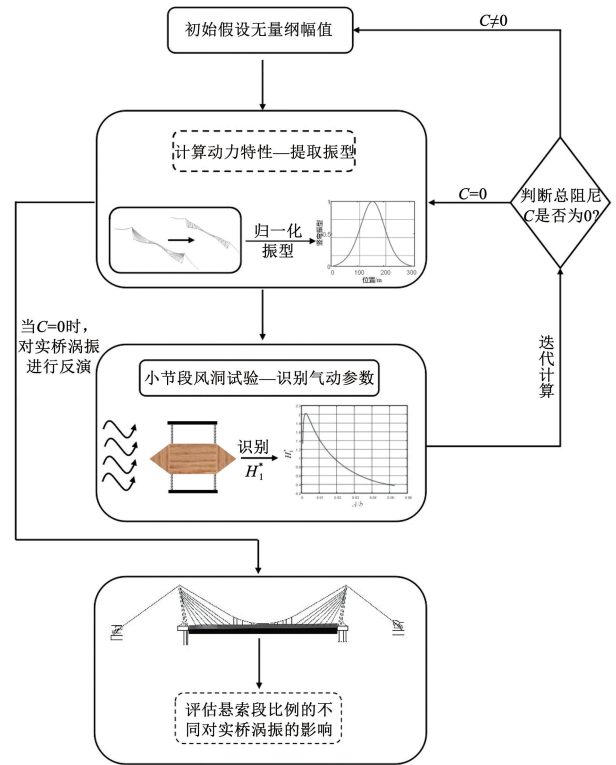


图 8 实桥涡振计算流程

Fig. 8 Iterative calculation process of vortex-induced vibration for real bridge

上述 8 种方案的动力特性与归一化振型如表 1 与图 9 所示,随着吊跨比增加,主梁振型逐渐由“尖”变“平”,影响范围不断由跨中向两侧扩大。当前研究多采用跨中最大幅值来评价主梁 1 阶竖向涡振性能。不同吊跨比下,跨中涡振幅值结果如图 10 所示。可见,随悬索段占比增加,涡振风速^[21]下降。这是由于悬索段占比增加时,桥梁总体竖向刚度下降,基频降低,由于断面的斯托罗哈数不变,因此涡

振风速也相应下降。同时,跨中涡振幅值随吊跨比增加不断下降。由式(1)可知,当锁定风速减小,作用在主梁截面的涡激力降低,同时模态广义质量随吊跨比增加不断增大,在二者的共同作用下,跨中幅值随吊跨比增大有所下降。

表 1 不同方案相关信息

Tab. 1 Information about different programs

方案编号	吊跨比/%	频率/Hz	主梁每延米模态广义质量/kg
1	22.61	0.489 9	1 967
2	30.00	0.486 2	2 258
3	37.67	0.482 7	2 351
4	45.20	0.470 5	2 491
5	52.75	0.459 4	2 689
6	59.03	0.449 0	2 940
7	78.00	0.427 7	3 813
8	100.00	0.402 2	4 242

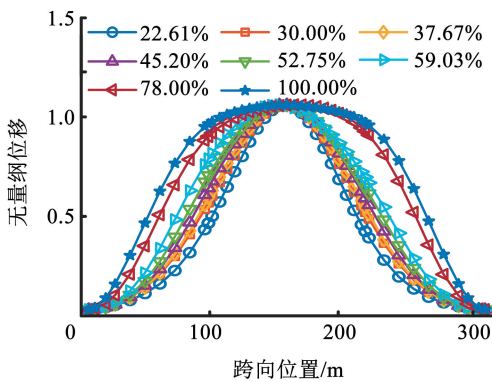


图 9 不同方案的归一化振型

Fig. 9 Normalized pattern shapes of different scene

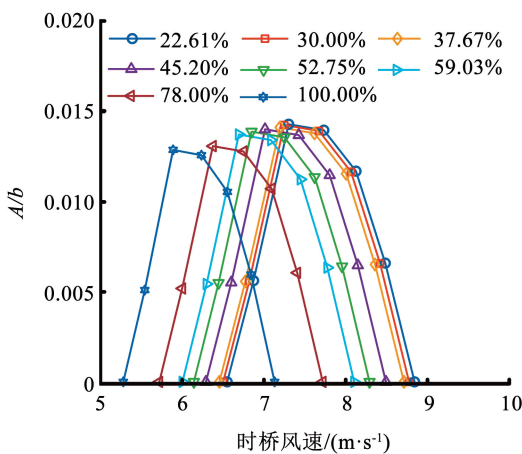


图 10 不同吊跨比下跨中无量纲涡振幅值计算结果

Fig. 10 Calculation result of dimensionless mid-span VIV amplitude under different hanging-span ratios

3.2 主梁涡振综合评价

根据上节分析,若以跨中最大幅值进行涡振评价,容易得出“随吊跨比增加,体系变柔,涡振幅值

减小,性能有所提高”的结论。然而,如图 9 所示,随着协作体系中悬索段的占比不断增加,主梁振型不断变宽,这是由于悬索段的竖向刚度较斜拉段更小引起的。反映到主梁涡振上,随着吊跨比增加,虽然跨中最大振幅有所下降,但涡振的影响范围从跨中向两侧增加,这对抗风与行车安全是不利的。为考察不同吊跨比下主梁的涡振情况,对 22.61%、52.75% 和 100.0% 3 种典型吊跨比方案的主梁无量纲涡振幅值进行对比,如图 11 所示。可见,随着吊跨比增加,虽然跨中涡振幅值有所减小,但由于缺少斜拉索的约束,主梁两侧的涡振幅值不断增加,即涡振沿跨向的影响范围有所增加,这时主梁的涡振程度是否增加并不明确。因此,对于协作体系桥梁不同吊跨比下的涡振程度,仅从跨中幅值大小进行评估是不全面的,还需考虑涡振沿主梁的影响范围。针对此问题,为了对比不同吊跨比下主梁整体涡振的发展程度,本文在将跨中幅值大小作为评估指标的同时提出一种辅助性指标,即主梁平均涡振无量纲振幅指标 η^* 来表征大桥的总体涡振情况:

$$\eta^* = \frac{\int_0^L A^*(x) dx}{L} \quad (9)$$

其中: $A^*(x)$ 表示沿跨向各位置的无量纲涡振幅值, L 表示主跨长度。

该指标对主梁涡振无量纲幅值沿跨向积分后再平均,其几何意义是图 11 中曲线与横轴所围成的面积对桥长的平均,可综合考虑主梁涡振幅值的大小与影响范围,从图 11 中明显看出随吊跨比的不断增加,跨中幅值虽有所降低,但主梁四分点位置处差异明显,对应主梁的涡振影响范围不断从跨中向两侧加宽。不同吊跨比方案下, η^* 的计算结果见图 12。

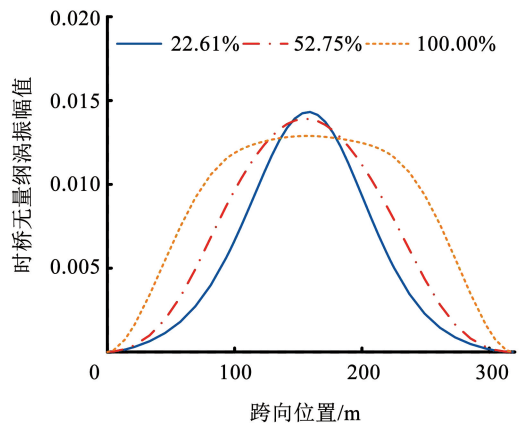


图 11 主梁涡振响应变化情况

Fig. 11 The changes of VIV amplitude of the whole beam

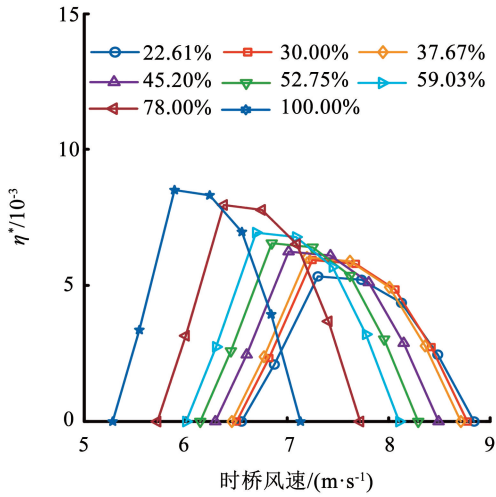


图 12 不同吊跨比下 η* 计算结果

Fig. 12 Calculation result of η* under different suspension-span ratios

可以看出,当桥梁吊跨比增加时,主梁平均涡振无量纲振幅指标 η* 快速增加,即主梁整体涡振程度增加。不同吊跨比下,η* 最大差异约为 59.5%。这表明,随着吊跨比增加,虽然跨中振幅不断降低,但涡振沿主梁跨向的影响范围不断变宽,主梁的总体涡振程度实际上是增加的。

涡振本身是限幅振动,不会直接造成结构破坏,但对行车舒适性有较大影响。因此,有研究^[22]从涡振时桥面的加速度来衡量大桥的涡振性能。为评估不同吊跨比下主梁涡振时的加速度,本文在式(9)的基础上,进一步考察主梁平均加速度指标 a*:

$$a^* = (2\pi f)^2 \times \eta^* \quad (10)$$

其中:f 为大桥一阶竖弯频率,a* 可以近似代表在桥上行人或车辆感受到的加速度平均水平。

对不同吊跨比下主梁平均加速度 a* 的结果进行计算,结果如图 13 所示。

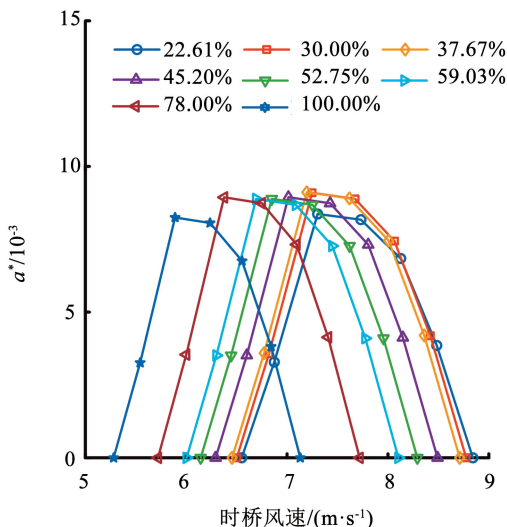


图 13 主梁平均加速度

Fig. 13 The average acceleration of the beam

随着吊跨比的逐渐增加,加速度 a* 在涡振区间的最大值呈现先增加后减小的趋势,最大 a* 对应吊跨比为 37.67%,但不同吊跨比下最大平均加速度整体差异较小。这是由于随吊跨比增加,虽然 η* 不断增加,但由于自振频率随吊跨比增加不断减小,加速度整体变化有限。然而,起振风速随吊跨比增加不断减小,大桥发生涡振的概率增加。因此,不同吊跨比下,主梁涡振加速度 a* 的最大值差异有限,但较大的吊跨比会导致起振风速降低,涡振发生概率增加。

综上,通过跨中幅值可能无法全面评价不同吊跨比下协作体系桥梁的整体涡振情况。因此需在跨中幅值的基础上,综合主梁平均涡振指标 η* 和平均加速度指标 a*,可以更全面反映不同体系的整体涡振性能,为斜拉-悬索协作体系的吊跨比选择和抗风性能设计提供参考。

4 结 论

本文以某无背索斜拉-悬索协作体系桥梁工程为背景,首先在涡振区间内,采用风洞试验与 HT 变换识别主梁的涡振气动导数 H₁^{*} 与无量纲涡振振幅的函数关系曲线,其次,在考虑振幅依存性的基础上,使用风洞试验气动阻尼参数对 8 种不同吊跨比的大桥备选方案进行主梁涡振振幅的预测,并对比研究结果,得出以下结论:

1) 随着吊跨比增大,协作体系的起振风速降低,主梁模态质量增加,跨中最大涡振幅值下降。不同吊跨比下跨中幅值最大相差约 11.1%。

2) 通过改变吊跨比,使结构体系从斜拉体系往悬索体系逐渐过渡,发现随吊跨比增加,竖弯振型由“尖”变“平”,向两侧不断变宽。反映到实桥涡振,随吊跨比增加,跨中最大振幅有所降低,涡振发生风速降低,但涡振影响范围不断从跨中向两端增加。因此,仅从跨中最大涡振幅值不能全面评估不同吊跨比下协作体系的整体涡振性能。

3) 为了对不同吊跨比下协作体系桥梁的整体涡振性能进行评价,在考虑跨中幅值作为评价指标的基础上,提出了辅助性指标主梁涡振平均无量纲振幅 η* 与主梁平均加速度指标 a*。通过对指标 η* 和 a* 的计算表明,随着吊跨比的增加,虽然跨中涡振幅值减小,但涡振沿跨向的影响范围不断变宽,η* 快速增加,大桥整体涡振程度增加,不同吊跨比下 η* 最大差异约为 59.5%;同时,随着吊跨比增加,加速度 a* 整体变化有限,但起振风速随吊跨比的增加而降低,这增加了涡振的发生概率。

参考文献

- [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 Communication Press, 2005
- [2] 李春光, 毛禹, 颜虎斌, 等. 非对称异型箱梁斜拉桥涡振性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 87
LI Chunguang, MAO Yu, YAN Hubin, et al. Experimental study on vortex induced vibration performance of asymmetric special shaped box girder cable stayed bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 87
- [3] SCHEWE G, LARSEN A. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 829
- [4] 陈国芳, 张哲, 吴宏业, 等. 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥静风响应分析[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 208
CHENG Guofang, ZHANG Zhe, WU Hongye, et al. Study on mechanism and aerodynamic control measures of vortex-induced vibration of a streamlined-box steel girder [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(2): 208
- [5] ZHANG X J, STERN D A. Wind-resistant design of cable-stayed-suspension hybrid bridges [M]//Transportation and Development Innovative Best Practices. Beijing: ASCE, 2008: 444
- [6] 李东民. 斜拉-悬索协作体系桥合理结构状态及抗风性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021
LI Dongming. Study on rational structural states wind-resistance performance of cable-stayed suspension bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2021
- [7] 井昊坤. 斜拉悬索协作体系桥梁无吊索边跨主缆涡激振动试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021
JING Haokun. Experimental research on vortex induced vibration of non-hangers side span main cable on a stayed cable and suspension hybrid bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2021
- [8] 陈政清, 肖潇, 黄智文, 等. 节段模型弹性悬挂系统的阻尼非线性对涡激力模型参数识别结果的影响[J]. 铁道科学与工程, 2021, 18(4): 821
CHEN Zhengqing, XIAO Xiao, HUANG Zhiwen, et al. Influence of the nonlinearity of spring-suspended sectional model systems on identification of vortex-induced vibration parameters[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 821
- [9] 华旭刚, 李龙龙, 陈政清, 等. 高阶模态涡振锁定区间气动力学展向相关性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1436
HUA Xugang, LI Longlong, CHEN Zhengqing, et al. Experimental study of spanwise correlation of vortex shedding lift forces of sectional models undergoing different modes of vibration [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1436
- [10] ZHU L D, MENG X L, GUO Z S. Nonlinear mathematical model of vortex-induced vertical force on a flat closed-box bridge deck [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 122: 69
- [11] 翁祥颖, 葛耀君, 陈海兴. 非线性涡激力模型气动参数识别新方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 82
WENG Xiangying, GE Yaojun, CHEN Haixing. New approach for identifying aerodynamic parameters in nonlinear vortex induced force model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 82
- [12] PAN J Z, TI Z L, SONG Y B, et al. An integrated approach of vortex-induced vibration for long-span bridge with inhomogeneous cross-sections [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 222: 104942
- [13] 邓扬, 李雨航, 李爱群. 利用人工植林削减古塔风荷载的风洞试验[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 58
DENG Yang, LI Yuhang, LI Aiqun. Wind load reduction for ancient pagoda using artificial forest planting via wind tunnel test [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 58
- [14] 李永乐, 潘俊志, 迺子龙, 等. 设置分段式声屏障桥梁的涡振幅值反演方法[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 183
LI Yongle, PAN Junzhi, TI Zilong, et al. Inversion method of vortex-induced vibration amplitude for long-span bridges with partially installed noise barrier [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 183
- [15] 董国朝, 黄佳颖, 韩艳. 风屏障对桥梁及列车的气动特性影响研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 75
DONG Guochao, HUANG Jiaying, HAN Yan. Research on the influence of wind barrier on the aerodynamic characteristic of bridge and train [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 75
- [16] WANG Y, CHEN X, LI Y. Nonlinear self-excited forces and aerodynamic damping associated with vortex-induced vibration and flutter of long span bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104207
- [17] 许坤, 葛耀君, 曹丰产. 桥梁断面涡激振动气动效应特性识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 86
XU Kun, GE Yaojun, CAO Fengchan. Identification of aeroelastic effects on bridge decks during vortex induced vibration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 86
- [18] 葛耀君, 赵林, 许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 1
GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and vortex-induced vibration of main girders of long-span bridge [J]. Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10): 1
- [19] 王云飞. 大跨度桥梁非线性风荷载及风致振动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021
WANG Yunfei. Study on nonlinear wind load and wind-induced vibration of long span bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021
- [20] 张新军, 徐江江, 虞周均. 斜拉-悬吊协作体系桥抗震性能参数分析[J]. 浙江工业大学学报, 2014, 42(6): 665
ZHANG Xinjun, XU Jiangjiang, YU Zhoujun. Parametric analysis on the seismic performance of cable-stayed-suspension hybrid bridge [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2014, 42(6): 665
- [21] 迺子龙, 李永乐, 徐昕宇. 大跨钢桁拱桥局部杆件动力特性及涡振发生风速的影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(6): 174
TI Zilong, LI Longle, XU Xinyu. Influencing factors of dynamic characteristics and onset wind speed of the vortex-induced vibration of local members in a long-span steel truss arch bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 174
- [22] ZHAO H W, DING Y L, LI A Q, et al. Evaluation and early warning of vortex-induced vibration of existed long-span suspension bridge using multisource monitoring data [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(3): 04021007