

超大跨桁架梁悬索桥颤振性能气动优化试验研究

王维民¹, 梁爱鸿², 刘新华¹, 李春光^{2*}, 彭元诚¹, 韩艳²

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 钢桁架主梁悬索桥因可采用化整为零、集零为整的施工方法, 在山区峡谷桥址具有极大的优越性。但峡谷桥址位置处风场环境复杂, 主梁的气动稳定性往往难以满足要求。该文以某大跨桁架梁悬索桥为工程背景, 通过风洞试验研究桁架梁断面的颤振性能并提出合理的气动优化措施。首先采用 1:50 节段模型风洞试验, 测试各攻角下主梁的颤振临界风速。在最不利攻角下, 研究上中央稳定板、下中央稳定板、水平分流板、栏杆透风率对主梁颤振性能的影响, 探讨主梁断面形式对颤振性能的影响; 最后根据试验结果, 在考虑安全、经济和美观等因素的条件下, 选择最优气动方案, 满足桥梁抗风设计的要求。

关键词: 桁架梁; 节段模型; 颤振; 气动优化; 风洞试验

中图分类号: U441+.3 **文献标志码:** A

桁架主梁因其抗扭刚度大、透风性能好、预制安装方便快捷等优点, 在大跨度悬索桥中运用广泛, 世界上早期修建的悬索桥采用钢桁架加劲梁为主。随着桥梁跨径的不断增大, 结构将变得更加轻柔, 阻尼比更小, 对风的作用愈加敏感。在加劲梁截面形式已定的情况下, 采用适当的气动措施来改善主梁的颤振稳定性往往是一种最可靠、最具现实意义的途径^[1]。因此研究桁架加劲梁悬索桥气动稳定措施具有重要的理论和实际应用价值。

以往研究表明: 桁架梁悬索桥的颤振性能在初步

设计阶段通常难以满足要求, 特别是当桥址处的设计风速较高时, 钢桁梁的颤振稳定性已成为设计过程中的控制性因素。Ueda 等^[2]通过流迹显示和测压试验研究了竖向稳定板的制振机理, 发现桁架梁的颤振是由于分离流的再附引起的, 当安装竖向中央稳定板后减弱了气流的再附程度, 进而抑制了主梁颤振; 李加武等^[3]研究了抗风缆、中央稳定板、风嘴等措施对窄桁架悬索桥颤振稳定性的影响; 李春光等^[4]通过对桁架加劲梁桥面板增设上下稳定板, 发现稳定板的高度存在一个最优值, 且分离式中央稳定板的抑振效果优于整

[4] PANDEY A K, BISWAS M. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3-17.

[5] Y. S L, CHUNG M. A Study on Crack Detection Using Eigenfrequency Test Data[J]. Computers & Structures, 2000, 77(3): 327-342.

[6] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage Detection from Changes in Cuructures Mode Shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.

[7] 薛松涛, 钱宇音, 陈谔, 等. 采用二阶频率灵敏度的损伤识别和试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 263-267.

[8] 陈小超, 毛崎波. 应用移动质量法与分形维数实现梁损伤检测[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(3): 155-159.

[9] ZHONG S, OYADIJI S O. Identification of Cracks in Beams with Auxiliary Mass Spatial Probing by Stationary Wavelet Transform[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2008, 130(4): 1 257-1 261.

[10] 李雪松, 马宏伟, 林逸洲. 基于卷积神经网络的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 167-175.

[11] 张冬兵, 江祥林, 曾国良. 附加质量对桁架桥频率影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(3): 97-100.

[12] 方水平. 基于模态分析理论的桥梁结构损伤诊断研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.

收稿日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51978087, 51822803); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2020JJ14607)

作者简介: 王维民, 男, 高级工程师. E-mail: 1275249556@qq.com

* 通信作者: 李春光, 男, 博士, 副教授. E-mail: mrlcg@126.com

体式中央稳定板;陈政清等^[5]从能量角度研究了中央稳定板对桁架梁悬索桥颤振稳定性的作用机理,发现中央稳定板提高了颤振发生时竖向自由度的参与程度和扭弯耦合程度,使颤振形态由单自由度扭转振动向弯扭耦合振动转移,从而提高颤振临界风速;夏锦林等^[6]通过对比上、下稳定板及相组合对箱梁断面的颤振性能影响,发现采取组合措施对箱梁断面颤振的抑振效果最明显;Tang 等^[7]通过对开槽钢桁架加劲梁断面进行颤振稳定性风洞试验研究,发现封闭桥面中央槽位、竖向稳定板以及栏杆透风率等对加劲梁断面颤振稳定性有明显作用;欧阳克俭等^[8]通过 CFD 数值模拟及 PIV 风洞试验对中央稳定板在桥梁颤振稳定性分析中的影响作了细观作用机理分析,发现中央稳定板可以将气流在桥面中央形成上下旋涡对,是主梁断面在颤振中竖向自由度参与作用。

综上所述,国内外许多学者分别从桥梁结构体系、主梁断面气动外形以及气动措施等角度对大跨度桥梁颤振稳定性进行研究,并得到了一些具有重要工程应用价值的研究成果。但是由于实际大跨度桥梁因其结构体系、断面形式的差异,当桥位颤振检验风速较高且采用钢桁架梁断面时需要进行针对性的试验研究,以提高颤振稳定性^[9]。该文以主跨为 1 080 m 的某跨越峡谷大跨度钢桁架悬索桥为工程背景,利用风洞试验对其桁架主梁断面进行测试及气动性能优化,研究结果可为类似实际工程提供参考。

1 工程概况

1.1 背景工程

某主跨 1 080 m 的超大跨度钢桁架悬索桥,桥位处于峡谷地带,峡谷风效应明显且风场较为复杂。峡谷两侧山体不等高,跨中桥面距谷底高度 330 m。钢桁架包括钢桁架和正交异性钢桥面板两部分,板桁结合,主缆矢跨比为 1 : 10,钢梁宽 28 m、高 7.5 m,桥形布置如图 1 所示,主梁立面图如图 2 所示。由于桥址区无可靠气象记录数据,按照规范 100 年重现期最不利基本风速为 25.9 m/s(10 m 高度、10 min 时距、100 年重现期),由 JTG/T 3360-01-2018《公路桥梁抗风设计规范》确定大桥的设计基准风速为 37.4 m/s,成桥阶段的颤振检验风速为 64 m/s。

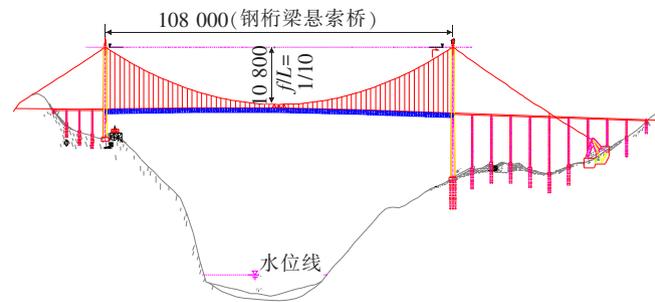


图 1 桥形布置图(单位:cm)

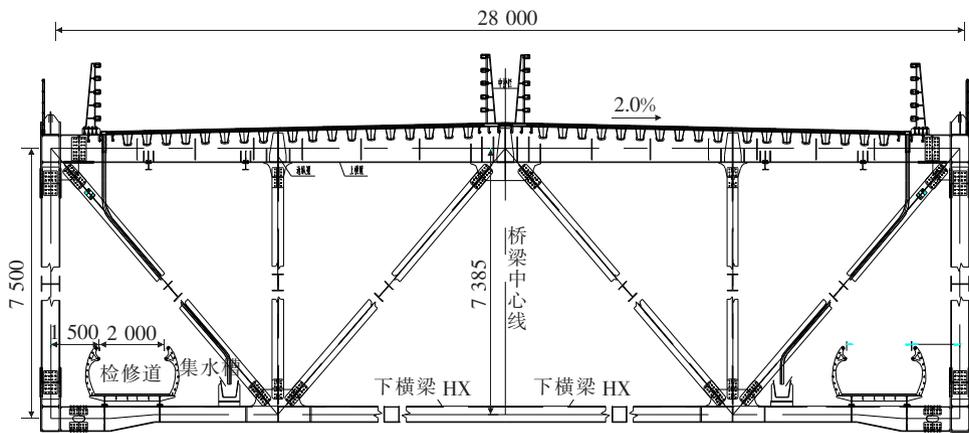


图 2 桁架加劲梁设计断面图(单位:mm)

1.2 结构动力分析

基于有限元软件 Ansys 分析桥梁的结构动力特性^[10],建模时以 Beam188 模拟钢桁加劲梁,以 Link10 模拟主缆及吊杆,以 Beam4 模拟桥塔,桥面系正交异性板和 UHPC 采用 Shell181 模拟,忽略桥面的横坡。

采用等效密度计算方法准确模拟质量分布,桥梁有限元模型如图 3 所示,桥梁的自振特性如表 1 所示。该桥选择 1 阶正对称竖弯及扭转的频率进行试验,对应振型如图 4 所示。

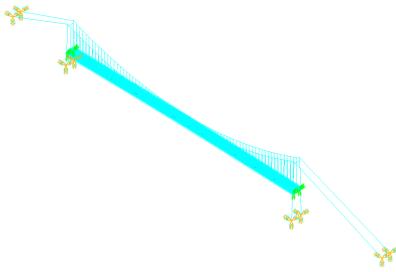


图3 桥梁有限元模型

表1 桥梁自振特性

模态阶次	频率/Hz	振型
1	0.061 49	1阶正对称横弯
2	0.110 83	1阶反对称竖弯+纵漂
3	0.153 21	1阶正对称竖弯
4	0.173 13	1阶反对称横弯+微扭
11	0.306 17	1阶正对称扭转+横弯
17	0.432 39	1阶反对称扭转+微扭

2 节段模型试验布置

主梁节段模型风洞试验在长沙理工大学风工程与

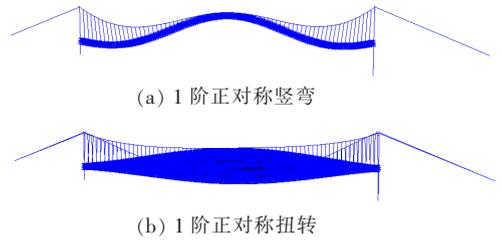


图4 振型示意图

风环境研究中心边界层风洞中进行,该风洞风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的调速系统。试验段截面尺寸为 $4.0\text{ m}\times 3.0\text{ m}\times 21.0\text{ m}$,风速范围为 $0\sim 45.0\text{ m/s}$ 。为保证节段完整性,节段模型的几何缩尺比设为 $1:50$ 。为减少节段模型端部三维流动的影响,主梁模型长度取 $L=1.5\text{ m}$,主梁宽度 $B=0.56\text{ m}$,模型高度 $H=0.15\text{ m}$,模型长宽比约为 2.68 。主梁常规比例节段模型骨架采用不锈钢框架制作而成,外衣采用优质PVC制作,以保证几何外形的相似。模型两端采用轻质PVC板作为端板,以保证主梁断面附近气流的二元特性。主梁上的检修道栏杆、防撞护栏以及水槽等附属设施采用ABS板制作,并模拟了栏杆及护栏的形状与透风率。表2为节段模型风洞试验参数。图5为安装在风洞中的桥梁节段模型。

表2 节段模型风洞试验参数

断面参数	单位	实桥值	缩尺比	模型值
主梁高 H	m	7.5	1/50	0.15
主梁宽 B	m	28	1/50	0.56
单位长度质量 m	kg/m	32 227	$1/50^2$	19.336 6
单位长度质量惯矩 I_m	$\text{kg}\cdot\text{m}$	6 115 710	$1/50^4$	1.467 8
竖弯频率 f_v	Hz	0.153 2		1.782 4
扭转频率 f_t	Hz	0.306 2		3.561 9
竖弯阻尼比 ξ_v	%	0.5	1	0.31
竖弯阻尼比 ξ_t	%	0.5	1	0.326



图5 节段模型试验布置

3 试验结果分析

3.1 原设计断面颤振性能

节段模型颤振稳定性试验在均匀流场中进行,采用自由悬挂安装方式,模拟主梁断面的竖弯与扭转模态。原设计主梁断面颤振试验结果如表3所示,颤振形态表现为单自由度扭转振动。 $+5^\circ$ 和 $+3^\circ$ 攻角的颤振临界风速低于颤振检验风速,其他攻角均高于颤振

表 3 各攻角原设计主梁断面颤振试验结果

试验状态	攻角/ (°)	试验颤振风 速/(m·s ⁻¹)	风速比	实桥颤振风 速/(m·s ⁻¹)	颤振检验风 速/(m·s ⁻¹)
成桥态	+5	14.63	4.17	61.0	64
	+3	15.11		63.0	
	0	17.51		73.0	
	-3	18.47		77.0	
	-5	>19.10		>79.6	

检验风速。需要采取一定的措施来改善大桥的气动稳定性,保证大桥的气动安全。

3.2 颤振性能优化研究

依据原设计主梁断面节段模型试验结果,主梁断面在部分攻角范围内,颤振临界风速低于规范颤振检验风速,因此需要采取一定的措施来改善大桥的颤振稳定性,保证大桥的气动安全。以往研究表明,设置稳定板,改变栏杆透风率等措施可明显影响桁架梁断面主梁的颤振稳定性。试验中选择最不利攻角+5°进行优化措施试验。为方便比较不同气动措施的抑制效果,定义颤振临界风速增长率 β , β 按照式(1)计算:

$$\beta = (U_e - U_{e0}) / U_{e0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_{e0} 、 U_e 分别为原设计主梁断面及其气动优化后的颤振临界风速值。

3.2.1 稳定板

桁架梁的颤振稳定性中,中央稳定板是一种有效的抑制措施,因此对不同高度的上中央稳定板进行研究,并与带水平分流板主梁断面进行对比,具体实施位置如图6、7所示,气动措施的具体内容如表4所示。

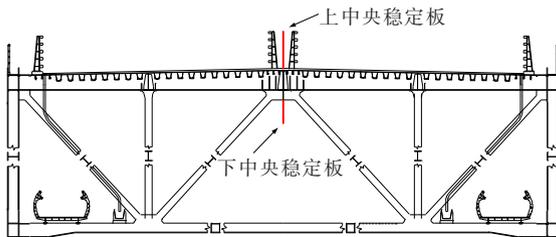


图 6 原设计主梁断面稳定板位置示意图

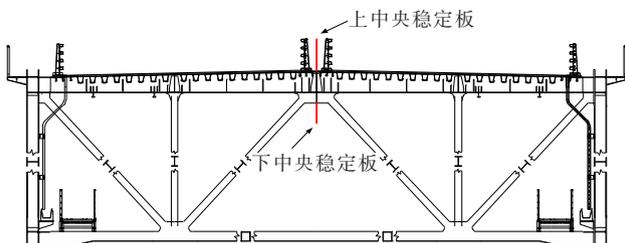


图 7 水平分流板主梁断面稳定板位置示意图

表 4 主梁断面气动措施

工况	措施
1	设置 0.5 m 上中央稳定板
2	设置 1 m 上中央稳定板
3	设置 2 m 上中央稳定板
4	设置 1 m 下中央稳定板
5	带水平分流板断面
6	带水平分流板断面设置 2 m 上中央稳定板
7	带水平分流板断面设置 1 m 下中央稳定板

试验结果如表5所示,主梁上增设上中央稳定板,对提高其颤振临界风速有很好的作用,且随着高度的增加,气动优化效果逐渐明显。上中央稳定板需要考虑整体视觉效果,高度不宜超过栏杆高度,因此高度最大采用与栏杆齐平2 m。对于2 m的栏杆,0.5 m的上中央稳定板对其美观性和行车可视性效果良好,但优化后的颤振临界风速增长率为2.1%,颤振临界风速仅为62.3 m/s,低于颤振检验风速,不能有效改善大桥的颤振稳定性。1 m上中央稳定板的颤振临界风速增长率达到10.2%,颤振临界风速67.23 m/s也高于颤振检验风速,但其仅高于颤振检验风速5.04%,安全余量不足。增设与栏杆齐平的上中央稳定板,颤振临界风速增长率达到28.4%,颤振临界风速78.3 m/s也高于颤振检验风速,安全余量充足,可作为气动优化的备选方案。下中央稳定板的设置,颤振临界风速小于颤振检验风速,对大桥颤振稳定性起到负作用,与其他研究结论相近^[11]。

带水平分流板断面的颤振临界风速增长率为-21.6%,水平分流板增加了桥面宽度,增大了桥面上的气动力,颤振性能降低。带水平分流板断面设置2 m上中央稳定板,对大桥颤振稳定性是有利的,但其颤振临界风速增长率为-18.1%,且颤振临界风速远低于颤振检验风速,2 m上中央稳定板对此断面效

果不明显。增设 1 m 下中央稳定板的气动措施不利于大桥的颤振稳定性,与上述未带水平分流板断面结果一致。

两种断面仅存在是否带有水平分流板的差异,但颤振性能相差较大,不带水平分流板断面颤振性能更好,对上中央稳定板的气动措施更显著。两种断面对于中央稳定板的结果趋势保持一致,上中央稳定板提高其颤振临界风速,下中央稳定板降低其颤振临界风速。

表 5 稳定板颤振试验结果

工况	颤振检 验风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	颤振临界风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		颤振临界 风速增长 率 $\beta/\%$
		原设计	气动优化	
1			62.30	2.1
2		61.0	67.23	10.2
3			78.30	28.4
4	64		52.46	-14.0
5			47.84	-21.6
6		47.8	49.45	-18.1
7			45.60	-25.2

3.2.2 栏杆透风率

鉴于中央稳定板对提高颤振临界风速有明显作用,因此,采用封闭桥面两侧栏杆的措施,使封闭的栏杆起到上稳定板的作用,进行改变栏杆透风率风洞试验研究大桥颤振性能。不同栏杆封闭措施其透风率如图 8 所示,各气动措施内容如表 6 所示,栏杆透风率颤振试验结果如表 7 所示。

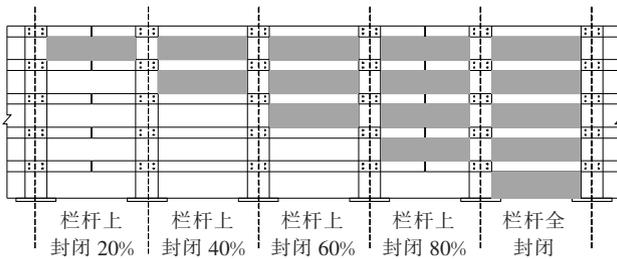


图 8 栏杆透风率措施内容示意图

由表 7 可得:随着栏杆上封闭的增加,大桥颤振稳定性逐渐提高,颤振临界风速增长率从 -6.1% 增加到超过 30.5%,栏杆全封闭下,大桥颤振临界风速超过了 79.6 m/s,说明栏杆全封闭下,桥面上的旋涡减小,桥面上的气动力减小,起到了与上中央稳定板相同的效果。栏杆上封闭低于 40% 时,所增设的气动措施产生的是负影响,来流风通过栏杆时,将来流风分离,在

表 6 主梁断面气动措施内容

工况	措施
8	栏杆上封闭 20%
9	栏杆上封闭 40%
10	栏杆上封闭 60%
11	栏杆上封闭 80%
12	栏杆全封闭
13	栏杆下封闭 40%
14	水平分流板断面栏杆上封闭 40%
15	水平分流板断面栏杆下封闭 40%

表 7 栏杆透风率颤振试验结果

工况	颤振检 验风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	颤振临界风 速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		颤振临界 风速增长 率 $\beta/\%$
		原设计	气动优化	
8			57.28	-6.1
9			58.60	-3.9
10		61.0	77.36	26.8
11			79.60	30.5
12	64		>79.60	>30.5
13			>79.60	>30.5
14		47.8	56.00	17.2
15			48.50	1.5

栏杆高度处分离的来流风,使桥面上的旋涡增大,栏杆下的空隙使桥面上旋涡进一步增大,降低了大桥的颤振临界风速。栏杆上封闭超过 60% 后,封闭栏杆的效果明显提升,大桥的颤振临界风速达到 77.36 m/s,颤振临界风速增长率 26.8%,栏杆全封闭时颤振临界风速超过 79.6 m/s,可以满足规范要求。栏杆下封闭 40% 的效果与栏杆全封闭结果相似,表明栏杆下半段对桥面的气动力影响明显,可以减小气流在桥面上的旋涡尺寸,提高大桥颤振性能。

带水平分流板断面栏杆封闭与上述结果相反,栏杆上封闭 40% 时效果明显,颤振临界风速增长率达到 17.2%,而栏杆下封闭 40% 时颤振临界风速增长率仅 1.5%。与增长的桥面宽度使得气流流过栏杆所产生的旋涡位置发生改变有一定的关系。

栏杆的封闭对颤振性能的影响有很明显的作用,但封闭会影响行车的观景效果,同时导致主梁阻力系数增大,进而导致静风位移过大,因此栏杆的封闭应综

合考虑进行气动优化。

3.2.3 气动措施下颤振性能验证

综上所述,在最不利 $+5^\circ$ 攻角下进行气动优化措施,原设计断面最终选取2 m上中央稳定板作为最优气动措施来进行各攻角的颤振试验。

采取气动措施的主梁节段模型在 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ 、 0° 各攻角下的颤振试验结果如表8所示。采取最优方案进行气动措施优化后,各攻角下主梁的颤振稳定性均能满足要求且具有充裕的安全余量,符合规范要求^[12]。

表 8 采取气动措施的主梁节段模型颤振试验结果

节段模型	不同风攻角($^\circ$)下颤振临界风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)					颤振检验风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	-5°	-3°	0	$+3^\circ$	$+5^\circ$	
原设计	>79.6	77.0	73.0	63.0	61.0	64
优化措施	>79.6	>79.6	>79.6	>79.6	>79.6	

4 结 论

通过节段模型颤振性能风洞试验对大桥的颤振稳定性及其气动优化进行研究,分析中央稳定板和不同栏杆透风率对主梁的气动优化效果,并对比带水平分流板断面与原断面的颤振性能差异,得出以下结论:

(1) 在主梁断面增设上中央稳定板可明显提高大桥的颤振稳定性,并随着高度的增加,颤振稳定性进一步增强,但上中央稳定板不宜超过栏杆高度,不仅影响桥体整体美观性,还会增加主梁的阻力系数,增加静风稳定位移,不利于桥的气动稳定性。

(2) 带水平分流板断面的颤振性能要弱于未带水平分流板断面,且颤振临界风速低于未带水平分流板断面 -21.6% ,气动措施优化后的颤振稳定性也弱于原断面,结果差异明显。结论对桁架悬索桥的断面设计可起到指导作用。

(3) 对栏杆进行封闭会影响大桥的颤振稳定性,不同断面表现不同,原设计断面随着封闭比例增大,对主梁的气动优化作用越显著,但全封闭时景观效果较差,栏杆下封闭 40% 能更好地改善主梁的颤振稳定性。

参考文献:

[1] 项海帆,葛耀君.现代桥梁抗风理论及其应用[J].力学与实践,2007,29(1):1-13.
[2] UEDA T, YASUDA M, NAKAGAKI R. Mechanism of

Aerodynamic Stabilization for Long-Span Suspension Bridge with Stiffening Truss-Girder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1-2):333-340.

- [3] 李加武,车鑫,高斐,等.窄悬索桥颤振失稳控制措施效果研究[J].振动与冲击,2012,31(23):77-81,86.
[4] 李春光,张志田,陈政清,等.桁架加劲梁悬索桥气动稳定措施试验研究[J].振动与冲击,2008,27(9):40-43,181.
[5] 陈政清,欧阳克俭,牛华伟,等.中央稳定板提高桁架梁悬索桥颤振稳定性的气动机理[J].中国公路学报,2009,22(6):53-59.
[6] 夏锦林,杨咏昕,葛耀君.上、下组合中央稳定板对于箱梁颤振性能的影响[J].中国公路学报,2017,30(7):86-93.
[7] TANG Haojun, LI Yongle, WANG Yunfei, et al. Aerodynamic Optimization for Flutter Performance of Steel Truss Stiffening Girder at Large Angles of Attack[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 168:260-270.
[8] 欧阳克俭,陈政清.中央稳定板提高颤振稳定性的细观作用机理[J].振动与冲击,2016,35(1):11-16.
[9] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
[10] 祝志文,王艺静,吴其.大跨度悬索桥主缆空缆状态振动模态分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):2833-2841.
[11] 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.
[12] 白桦,李宇,李加武,等.钢桁架悬索桥颤振稳定性研究[J].振动与冲击,2013,32(4):90-95.