

大跨高低塔斜拉桥抗风性能试验研究

郭 峰¹, 康福军¹, 王 俊²

(1.广东省佛山市顺德区工程建设中心, 广东 佛山 528300; 2.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:以顺德斜拉桥为工程背景,通过节段模型风洞试验研究桥梁的涡振、颤振性能,并分析桥梁的静风响应性,研究大跨高低塔斜拉桥抗风性能。研究发现:较小的风嘴有利于抑制和减小流线型箱梁的涡振振幅,且不影响颤振稳定性;大桥静风响应随风速变化具有显著的非线性特点,来流风攻角对静风响应影响较小。可为大跨高低塔斜拉桥抗风性能研究提供科学依据和参考。

关键词:桥梁工程;高低塔斜拉桥;风洞试验;涡振;颤振;静风稳定性

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0108-05

0 引 言

桥梁跨径不断增加导致结构阻尼更低、刚度更小,风荷载对桥梁的作用成为大跨桥梁设计施工必须关注和解决的问题。

自 1940 年旧 Tacoma 桥因扭转颤振失稳发生倒塌之后^[1],大跨桥梁的抗风性能得到了空前的关注,学者从风振机理、试验分析、振动抑制^[2-4]等角度,开展了深入的研究,虽桥梁未再因发散性颤振而垮塌,但颤振稳定性仍是大跨桥梁抗风性能研究需要解决的首要问题。

同时,涡激共振虽然属于限幅振动,但由于其对桥梁气动外形异常敏感,且起振风速较低,一直是大跨桥梁抗风研究的热点之一^[5-6]。Larsen 对大贝尔特大桥^[7]、Laima 对西堠门大桥^[8],就涡振机理和制振措施进行了详尽的研究。2020 年 5 月 5 日,广东的虎门大桥就因为涡激共振现象,引起了广泛的热议^[9]。

此外,研究表明,主跨 1 991 m 的明石海峡大桥静风失稳风速远低于颤振临界风速 92 m/s,仅为后者的 83.2%^[10]。因此有必要对大跨桥梁的静风稳定性做专门研究。薛晓峰等^[12]使用内外双重迭代法对某窄幅大跨人行悬索桥进行非线性静风稳定性分析。程进等^[11]考虑了初始风攻角、垂度效应等因素,对某双塔对称斜拉桥进行非线性静风稳定性分析,该方法是目前主流的非线性静风稳定性分析方法。

可以看出,对大跨桥梁抗风性能的研究一直是热点,国内外学者从分析方法,影响因素,气动措施等方面做了详尽的研究,取得了丰硕的成果,但是对于大跨非对称高低塔斜拉桥的抗风性能研究,鲜见报道。

由此,本文以顺德高低塔非对称斜拉桥为工程背景,通过节段模型风洞试验,研究了桥梁的涡振和颤振性能,分析来流风攻角对桥梁非线性静风响应的影响规律,具有一定的应用价值。

1 工程背景

佛山市顺德区南国东路延伸线工程大桥(以下简称顺德大桥)总长 2 222.50 m,为高低塔混合梁斜拉桥。其主桥布置为 $2 \times 66+626+59.5+2 \times 60+55=992.50$ m,其中主跨为流线型钢箱梁,边跨为流线型混凝土箱梁,箱梁宽为 44.90 m,高度为 3.80 m,原设计风嘴为 62° ;桥塔采用钢混组合高低塔形式,容桂侧桥塔高 204.00 m,大良侧桥塔高 151.00 m,高差 53.00 m,具有显著的不对称特点,桥型布置如图 1 所示,主梁断面如图 2 所示。顺德大桥整体结构造型美观独特,结构轻盈时尚,建成后将成为当地的地标性建筑之一,但桥梁跨径大、质量轻、阻尼小,属于风致敏感结构^[13],抗风性能需要重点研究。

2 节段模型风洞试验

2.1 动力特性分析

为了进行节段测振模型设计需要的动力参数,首先需要分析桥梁结构的固有动力特性。根据桥梁结构特点,本文采用 Beam4 单元来模拟主梁、桥塔、刚臂,

收稿日期: 2022-03-05

作者简介:郭峰(1979—),男,本科,工程师,从事路桥设计与施工管理。

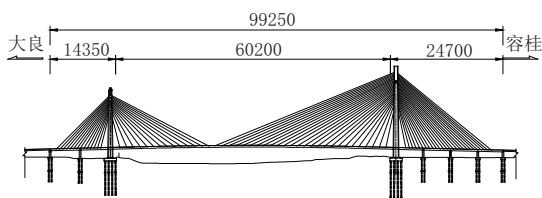


图1 桥型布置图(单位:cm)

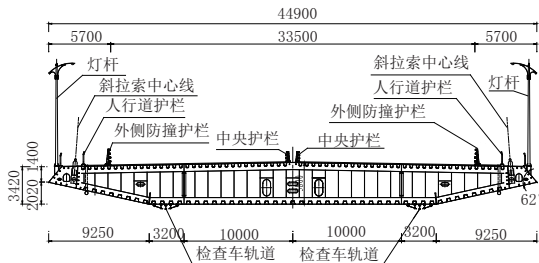
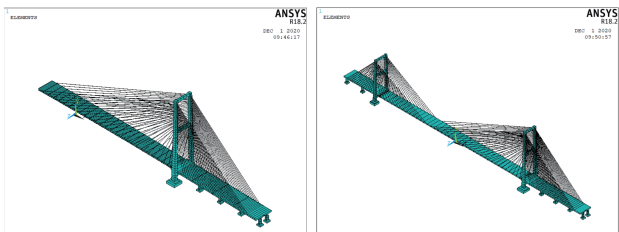


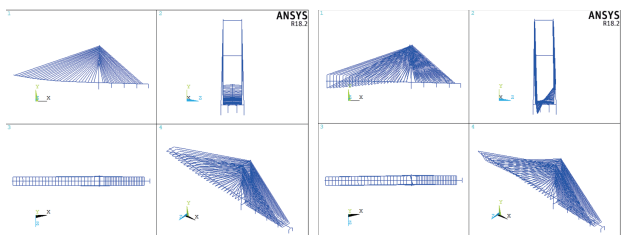
图2 钢主梁断面图(单位:mm)

Link10 单元来模拟斜拉索,并考虑垂度效应, MASS21 单元来模拟二期质量,建立了鱼骨梁有限元模型^[14],消隐形式的模型如图 3 所示。限于篇幅,仅给出桥梁的典型振动模态,如图 4、图 5 所示。桥梁结构动力特性见表 1。



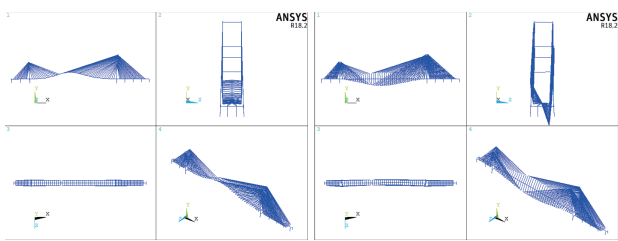
(a)施工阶段 (b)成桥阶段

图3 有限元模型



(a)竖弯振型(0.269 Hz) (b)扭转振型(0.603 Hz)

图4 施工阶段典型振型



(a)竖弯振型(0.281 Hz) (b)扭转振型(0.627 Hz)

图5 成桥阶段典型振型

2.2 模型设计与制作

规范指出^[15],用于节段模型风洞试验的二元刚体模型应满足几何外形相似、频率比、质量和阻尼比等无量纲参数的一致性条件,根据风洞试验阻塞率^[15]以及模型缩尺比的要求^[16],对节段模型进行设计,模型参数如表 1 所示。根据前述动力特性结果,使用铝合金、航空木板、ABS 板材等,制造了节段模型。节段模型缩尺比为 1 : 50,长 1.800 m,宽 0.940 m,高 0.076 m,限于篇幅,仅展示成桥阶段的测力模型和测振模型试验照片,如图 6 所示。



(a)测力试验 (b)测振试验

图6 成桥阶段节段模型

2.3 试验设备介绍

顺德大桥节段模型试验在长安大学风洞试验室 CA-1 大气边界层风洞中进行,风洞试验段规模为 3.0 m 宽 × 2.5 m 高 × 15.0 m 长,可调风速区间为 0 ~ 53.0 m/s,流场紊流度 $I_u < 0.3\%$ 。节段模型测振试验主要仪器有激光位移传感器、数据采集仪、计算机等。节段模型测力试验主要仪器有杆式 5 分量应变测力天平、数据采集仪、计算机等。

表 1 节段模型设计参数

状态	参数名称单位	实桥值	缩尺比	设计值	实测值	误差 /%	限值 /%
施工阶段	等效质量 / (kg · m ⁻¹)	2.56 × 10 ⁴	1/50 ²	10.238	10.149	-0.88	5.00
	等效质量惯矩 / (kg · m ⁻¹)	4.63 × 10 ⁶	1/50 ⁴	0.742	0.759	2.27	5.00
	竖弯基频 / Hz	0.269	50/2.2	6.109	6.200	1.47	5.00
	扭转基频 / Hz	0.603	50/2.2	13.705	13.600	-0.77	5.00
	竖弯阻尼比	—	—	0.50%	0.10%	—	—
	扭转阻尼比	—	—	0.50%	0.43%	—	—
成桥阶段	等效质量 / (kg · m ⁻¹)	3.30 × 10 ⁴	1/50 ²	13.219	13.193	-0.20	5.00
	等效质量惯矩 / (kg · m ⁻¹)	7.86 × 10 ⁶	1/50 ⁴	1.258	1.270	0.98	5.00
	竖弯基频 / Hz	0.281	50/2.5	5.781	5.610	-3.03	5.00
	扭转基频 / Hz	0.627	50/2.5	12.536	12.700	1.29	5.00
	竖弯阻尼比	—	—	0.50%	0.15%	—	—
	扭转阻尼比	—	—	0.50%	0.36%	—	—

2.4 试验工况安排

为了提高试验效率,首先进行节段模型涡振试验,在满足涡振性能要求的基础上开展节段模型颤振稳定性检验试验,如果不满足颤振稳定性,则需要修改节段模型气动外形,重新进行涡振颤振检验,直到满足要求为止。最后开展节段模型测力试验。顺德大桥节段模型试验工况如表 2 所示。

表 2 节段模型试验工况

状态	试验内容	风攻角/(°)	流场	风速(比)
施工 状态	涡振	-5、-3、0、+3、+5		1:2.2
	颤振	-3、0、+3		1:4.6
	测力	-10~10,间隔 1	均匀	10 m/s
成桥 状态	涡振	-5、-3、0、+3、+5	流场	1:2.5
	颤振	-3、0、+3		1:5.3
	测力	-10~10,间隔 1		10 m/s

3 风洞试验结果讨论

3.1 涡振性能

原方案成桥阶段节段模型涡振试验结果如图 7 所示,可以看出:(1)在 +5°时,涡振竖向振幅和扭转振幅均超出规范限值,在 0°和 +3°扭转涡振振幅均超出规范限值^[15],不满足设计要求;(2)在试验风速区间内,涡振振幅随着风速增加逐渐增加,且涡激共振均出现了两个锁定区间,依次为竖弯 1 次至竖弯 2 次至扭转 1 次至扭转 2 次。

因主梁断面原方案涡振性能不满足涡振要求,需借助气动措施来减小和抑制涡振振幅。以往研究指出^[17-18],可以通过改变风嘴改善流线型箱梁涡振性能,因此将两侧风嘴前端角度由 62°减小到 40°,如图 8 所示。试验结果如图 9、图 10 所示。可以看出:(1)在各工况下时,涡振振幅均未超过规范限值,说明新方案满足设计要求,较小的风嘴有利于优化桥梁钝体断面的气动外形,有利于抑制和减小可能存在的涡振;(2)在试验风速区间内,涡振振幅虽随着风速增加逐渐增加,但仅扭转涡振出现了一个锁定区间,且振幅远小于限值。

3.2 颤振性能

根据表 2 进行了颤振稳定性的检验,试验结果如表 3 所示,可以看出,该桥颤振稳定性满足规范要求,且在试验风速区间内,风嘴的减小对颤振临界风速的影响可以忽略。

3.3 静三分力系数

进一步开展节段模型测力试验,得到施工阶段

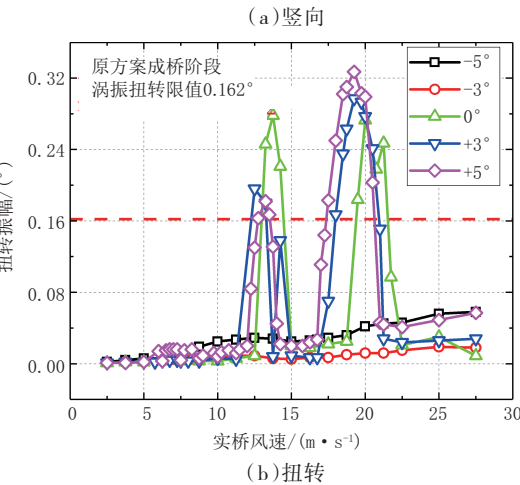
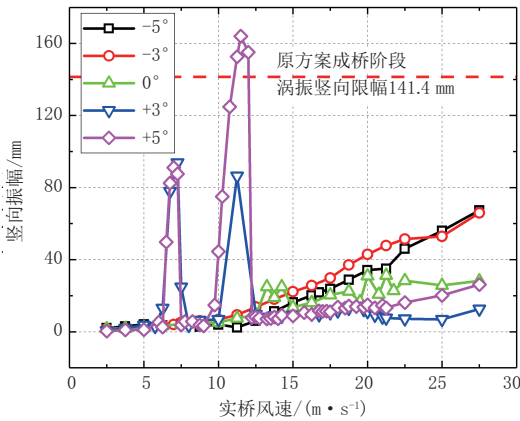


图 7 原方案成桥阶段涡振试验结果

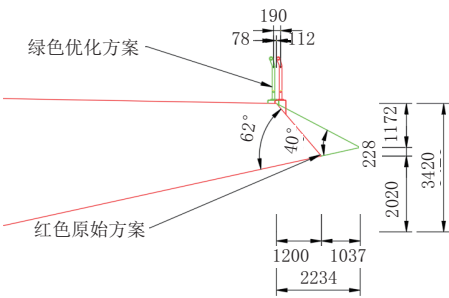


图 8 主梁新方案风嘴(单位:mm)

和成桥阶段的静三分力系数,如图 11 所示。

4 静风稳定性分析

根据内外双增量迭代法,具体原理见文献^[19-21]。根据来流风攻角不同,考虑了 3 个工况,分析了大跨高低塔斜拉桥跨中位置的非线性静风响应,限于篇幅,仅给出成桥阶段的静风稳定性结果。

经过多次迭代求解,该桥桥跨中位置非线性静风响应如图 12 所示,可以看出:(1)大跨高低塔斜拉桥静风响应具有明显的非线性特点,静风失稳风速远高于其设计的静风发散风速 63.81 m/s,有约 2 倍的安全储备;(2)跨中位置竖向静风响应比横桥向响应大,在设计静风稳定风速处,约为 3 倍;(3)风攻角

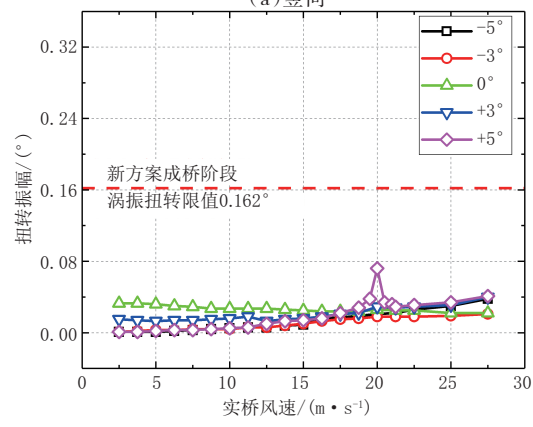
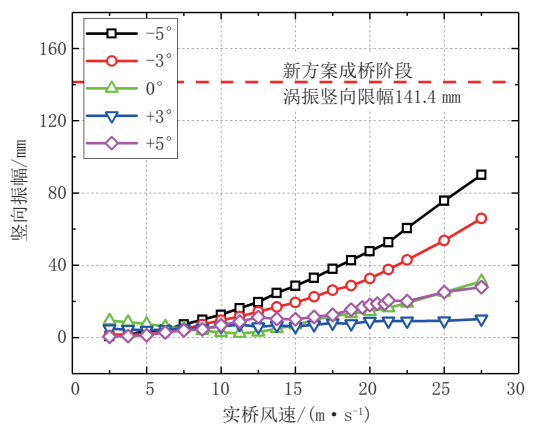


图9 新方案成桥阶段涡振试验结果

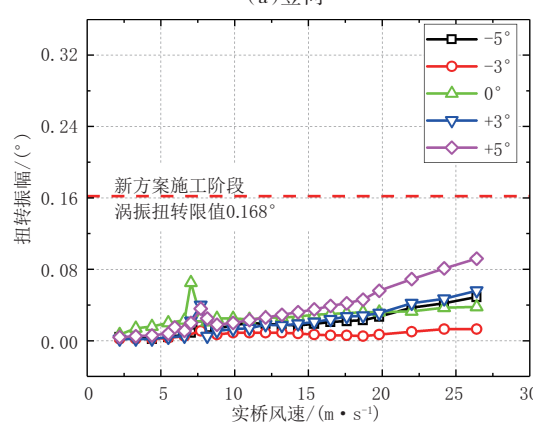
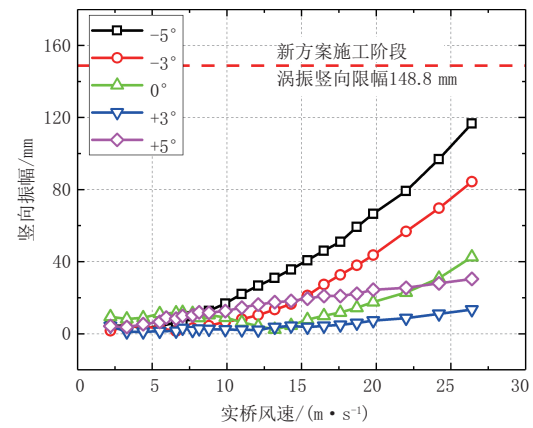


图10 新方案施工阶段涡振试验结果

表3 颤振性能检验试验结果

风攻角 $\beta(^{\circ})$	成桥阶段		施工阶段	
	试验临界风速 $/(m \cdot s^{-1})$	颤振检验风速 $/(m \cdot s^{-1})$	试验临界风速 $/(m \cdot s^{-1})$	颤振检验风速 $/(m \cdot s^{-1})$
原方案 62°	-3	>74.20	>55.20	
	0	>74.20	58.24	>55.20
	+3	>74.20	>55.20	41.39
新方案 40°	-3	>74.20	>55.20	
	0	>74.20	58.24	>55.20
	+3	>74.20	>55.20	41.39

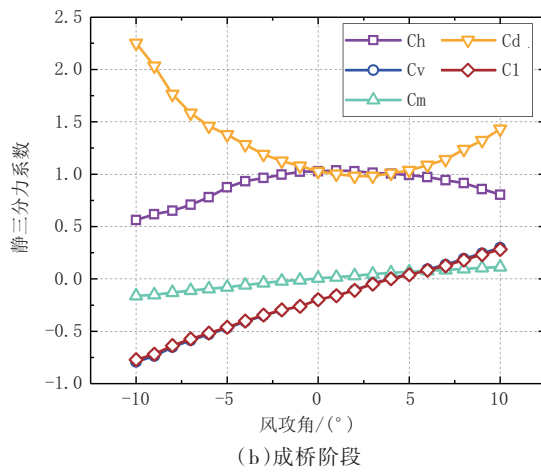
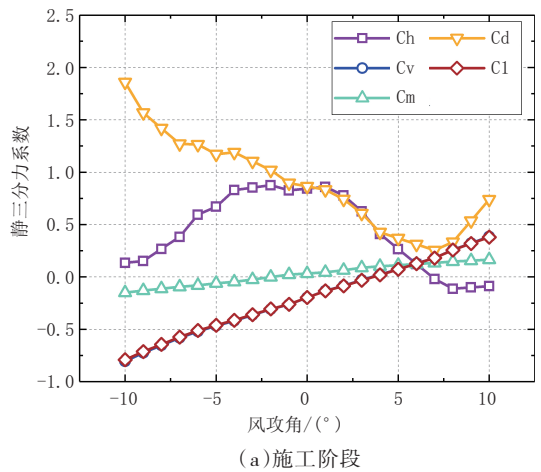


图11 静三分力系数

对跨中竖向位移、横桥向位移及扭转变形的影响较小,在 0° 风攻角下,桥梁的静风失稳风速均高于其他角度,约5%。

5 结 论

(1)通过节段模型测振风洞试验研究了大跨高低塔斜拉桥涡振性能,由于原方案涡振振幅超过规范限值,提出了减小风嘴的有效的气动措施,发现较小角度的风嘴有利于抑制流线型箱梁结构成桥阶段的涡振。

(2)通过节段模型测振风洞试验探了大跨高低塔斜拉桥的颤振性能,发现适当降低风嘴角度,不影响

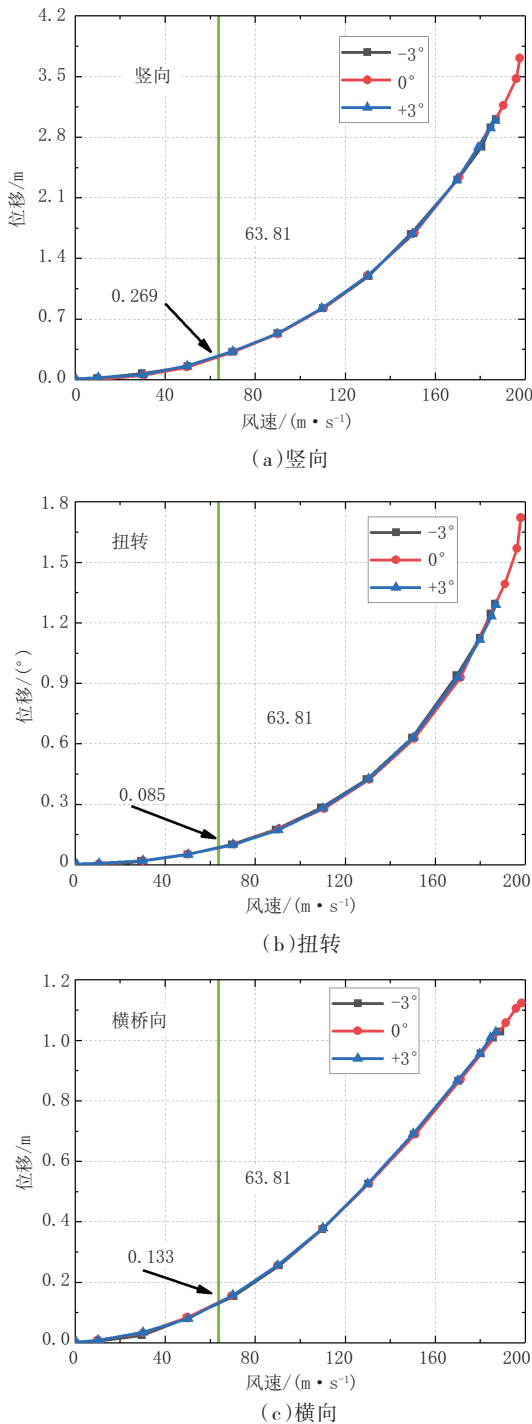


图12 成桥阶段跨中位置静风响应

桥梁的颤振性能。

(3)通过节段模型测力风洞试验测量了大跨高低塔斜拉桥三分力系数,为后续静风稳定性分析提供参数。

(4)使用内外双重迭代法研究了大跨高低塔斜拉桥静风响应,研究结果表明:大跨高低塔斜拉桥静风响应具有显著的非线性特征;跨中位置以竖向响应为主;风攻角对静风响应影响不明显。

参考文献:

- [1] Irwin P A, Stoyanoff S, Xie J, et al. Tacoma Narrows 50 years later—wind engineering investigations for parallel bridges [J]. Bridge Structures, 2005, 1(1): 3–17.
- [2] 王骑, 廖海黎, 李明水, 等. 流线型箱梁气动外形对桥梁颤振和涡振的影响[J]. 公路交通科技, 2012(29): 44–50, 70.
- [3] 廖海黎, 王骑, 李明水. 大跨桥梁颤振分析理论研究进展[J]. 中国公路学报, 2019(32): 19–33.
- [4] 高广中, 朱乐东, 吴昊, 等. 扁平箱梁断面弯扭耦合软颤振非线性特性研究[J]. 中国公路学报, 2019(32): 125–134.
- [5] 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): 1–18.
- [6] 张伟伟, 豆子皓, 李新涛, 等. 桥梁若干流致振动与卡门涡街[J]. 空气动力学学报, 2020(38): 405–412.
- [7] 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): 283–296.
- [8] Laima S, 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.
- [9] 佚名. 虎门大桥振动原因初步查明[J]. 中国公路, 2020(10): 26.
- [10] Boonyapinyo V, Lauhanon Y, Lukkunaprasit P. Nonlinear aerostatic stability analysis of suspension bridges [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 793–803.
- [11] 程进, 肖汝诚, 项海帆. 大跨径斜拉桥非线性静风稳定性全过程分析[J]. 中国公路学报, 2000(3): 27–30.
- [12] 薛晓峰, 管青海, 胡兆同, 等. 大跨人行悬索桥非线性静风稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 113–117, 148.
- [13] 项海帆, 葛耀君, 朱乐东, 等. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [14] 杨赐. 风与人群荷载共同作用下人行悬索桥的振动响应[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [15] JTG/T3360-01—2018, 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [16] Bowen A J. Modelling of strong wind flows over complex terrain at small geometric scales[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12–15): 1859–1871.
- [17] 孟晓亮, 郭震山, 丁泉顺, 等. 风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响[J]. 工程力学, 2011(28): 184–188, 194.
- [18] 胡长灿, 詹昊. 大跨度桥梁抗风设计常用气动措施分析[J]. 桥梁建设, 2015(45): 77–82.
- [19] 白桦, 胡庆安, 胡兆同, 等. 窄幅钢桁梁悬索桥抗风稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2010(29): 155–159.
- [20] 李加武, 方成, 侯利明, 等. 大跨径桥梁静风稳定参数的敏感性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 124–130.
- [21] 管青海, 周燕, 李加武, 等. 主跨 420 m 人行悬索桥非线性静风稳定影响参数分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 155–160.