

Experimental Study on Buffeting Performance of Main Bridge of Yuanhong Waterway in Pingtan Strait

Tao Hu¹, Chengjing Hong², Shixiong Zheng²

¹China Railway Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

²School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: zhengsx@swjtu.edu.cn

Received: Apr. 25th, 2019; accepted: May 10th, 2019; published: May 17th, 2019

Abstract

Truss beams are widely used in long-span bridges because of their unique cross-section features. However, due to the large number of truss members, the wind blocking effect is obvious, and a large buffeting response is likely to occur. In this paper, the main bridge of Yuanhong Waterway in Pingtan Strait was taken as the researching object, and the wind tunnel test method was used to study the buffeting problem in the construction stage. The results showed that in the maximum single cantilever construction stage, the wind direction angle has a significant effect on the buffeting response of the structure, especially for the torsional displacement. Due to the different structural characteristics, the maximum buffeting displacement of the largest single cantilever state occurs in the transverse bridge direction, and the maximum buffeting displacement of the maximum double cantilever state occurs in the vertical bridge direction. At the design reference wind speed, the maximum buffeting displacement of the maximum single cantilever state and the maximum double cantilever state occurs at 0° and 15° wind direction angles, respectively.

Keywords

Truss-Beam Bridge, Buffeting, Maximum Single Cantilever State, Maximum Double Cantilever State

平潭海峡元洪航道主桥施工阶段抖振性能试验研究

胡 涛¹, 洪成晶², 郑史雄²

¹中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉

²西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

Email: zhengsx@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019年4月25日; 录用日期: 2019年5月10日; 发布日期: 2019年5月17日

摘要

桁架梁因其独特的断面特征, 被广泛应用于大跨度桥梁之中。但由于桁架杆件众多, 阻风效应明显, 容易发生较大的抖振响应。本文以平潭海峡元洪航道主桥为工程背景, 采用风洞试验方法对其施工阶段的抖振问题进行研究, 结果表明: 在最大单悬臂施工阶段, 风向角对结构的抖振响应有明显的影响, 尤其是扭转位移; 由于结构特性的不同, 最大单悬臂状态最大抖振位移发生在横桥向, 而最大双悬臂状态的最大抖振位移发生在竖桥向; 在设计基准风速下, 最大单悬臂状态和最大双悬臂状态的最大抖振位移分别发生在 0° 和 15° 风向角下。

关键词

桁架梁桥, 抖振, 最大单悬臂状态, 最大双悬臂状态

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢桁架结构由于刚度大、自重相对较小, 被广泛应用于大跨度悬索桥、斜拉桥等结构之中[1]。对于大跨度桁架桥梁, 由于其跨度大、结构较柔, 对风的作用也更加敏感[1] [2]。钢桁架结构由于杆件较多, 阻风面积大, 在紊流场中的抖振响应相比于其他形式的主梁要更为剧烈一些。因此, 需要对大跨度桁架梁桥的抖振进行深入的研究。

目前对桥梁抖振的研究主要有数值模拟方法和风洞试验方法[3] [4]。数值模拟方法主要分为频域法和时域法, 但对桁架梁结构的应用相对较少, 且计算误差较大, 故在实际的工程应用中, 对桁架梁桥的抖振响应分析主要还是依赖于风洞试验。Hiroshi Tanaka [5]对金门大桥进行了相关的风洞试验, 并与现场实测数据进行对比, 发现二者吻合较好。郑史雄等[6] [7]对武汉天兴洲长江大桥进行了风洞试验, 对其施工阶段的抖振性能进行了研究分析。马存明等[8]对坝陵河大桥进行了风洞试验, 对比分析了不同的优化措施对桁架梁抖振性能的影响。

本文以平潭海峡元洪航道主桥为工程背景, 采用风洞试验方法研究其在施工阶段最大单悬臂状态和最大双悬臂状态时的抖振性能, 并根据试验结果指导施工。

2. 工程背景及动力特性计算

平潭海峡元洪航道主桥 132 + 196 + 532 + 196 + 132 m 的双塔斜拉桥, 主桥全长 1188 m, 为公铁两用大桥。主梁为倒梯型钢桁架, 主桁采用 N 形桁, 横向桁间距为 15 m, 桁高 13.5 m, 节间间距分 14 m 和 12 m 两种类型。斜拉索采用空间双索面, 扇形布置, 梁上纵向间距为 14 m, 锚点设在上弦节点处, 横向间距 35.7 m。塔上竖向索距 2.5 m, 横向索距 44 m。主塔为变截面钢筋混凝土桥塔, 塔高 221.5 m, 塔柱采用箱型截面, 截面横桥向宽度 6 m~10 m, 纵桥向宽 9 m~15 m。桥梁结构如图 1 所示。

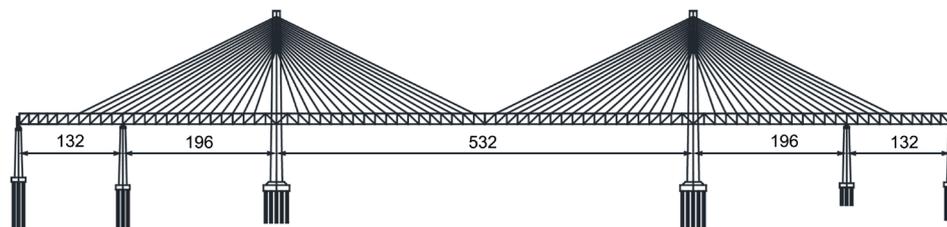


Figure 1. Bridge structure layout (unit: m)

图 1. 桥梁结构布置图(单位: m)

平潭海峡元洪航道主桥结构较为特殊、造型独特,塔较高、跨度大、弱阻尼,从结构抗风性能的角度来讲,其属于风敏结构。另外,桥位地处常年风速较高,易受台风影响的地区,桥梁所受的气象条件复杂,桥面离水面高,设计风速大,因而存在受强风作用而产生较大的风致响应的可能。因而,应针对该桥的抗风性能专门研究。

首先采用 ANSYS 软件对结构施工阶段中两个典型施工阶段进行动力特性分析,即最大单悬臂状态和最大双悬臂状态。桥塔各构件、主梁各杆件等均分别采用梁单元模拟;斜拉索用杆单元模拟;桥面板采用板单元进行模拟,以刚度等效的原则对板厚进行换算,二期恒载与压重采用质量单元模拟。建立的 ANSYS 计算模型见图 2。动力特性计算结果见表 1 和表 2,典型的主梁竖弯的振型图如图 3 所示。

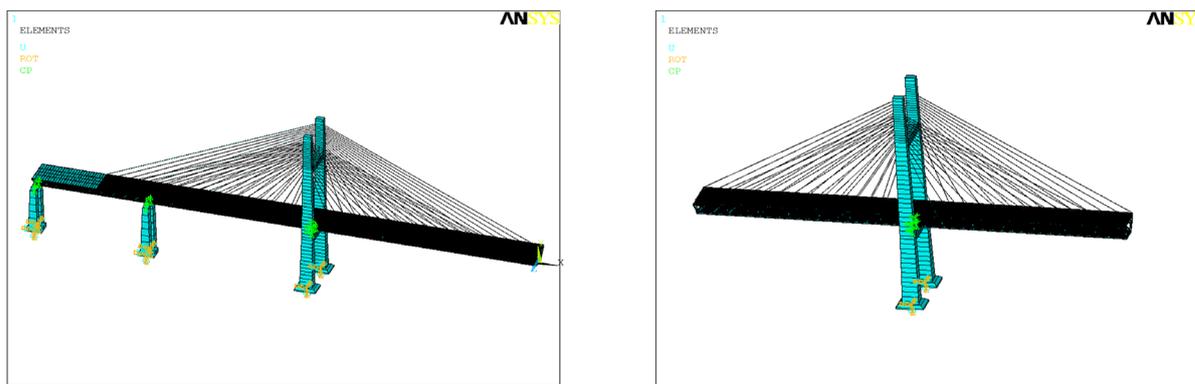


Figure 2. ANSYS model (left: maximum single cantilever state; right: maximum double cantilever state)

图 2. ANSYS 计算模型(左:最大单悬臂状态;右:最大双悬臂状态)

Table 1. Dynamic characteristics of maximum single

表 1. 最大单悬臂状态动力特性计算结果

阶次	频率 (Hz)	振型特点
1	0.2068	主梁侧摆
2	0.3462	塔侧弯
3	0.3495	主梁竖弯
4	0.5751	主梁竖弯+纵漂
5	0.6478	边跨侧弯
6	0.7554	主跨扭转
7	0.9416	主梁对称横弯
8	1.0883	主梁反对称横弯
9	1.1033	主梁反对称竖弯
10	1.1368	边跨竖弯

Table 2. Dynamic characteristics of maximum double cantilever state
表 2. 最大双臂动力特性计算结果

阶次	频率 (Hz)	振型特点
1	0.1707	主梁竖弯
2	0.2094	主梁侧摆
3	0.3427	塔侧弯
4	0.4523	主梁对称横弯
5	0.6969	主梁对称扭转
6	0.7255	主梁反对称竖弯
7	0.8107	主梁对称横弯
8	1.1032	塔向内对称侧弯
9	1.2176	塔反向侧弯
10	1.4035	主梁对称扭转

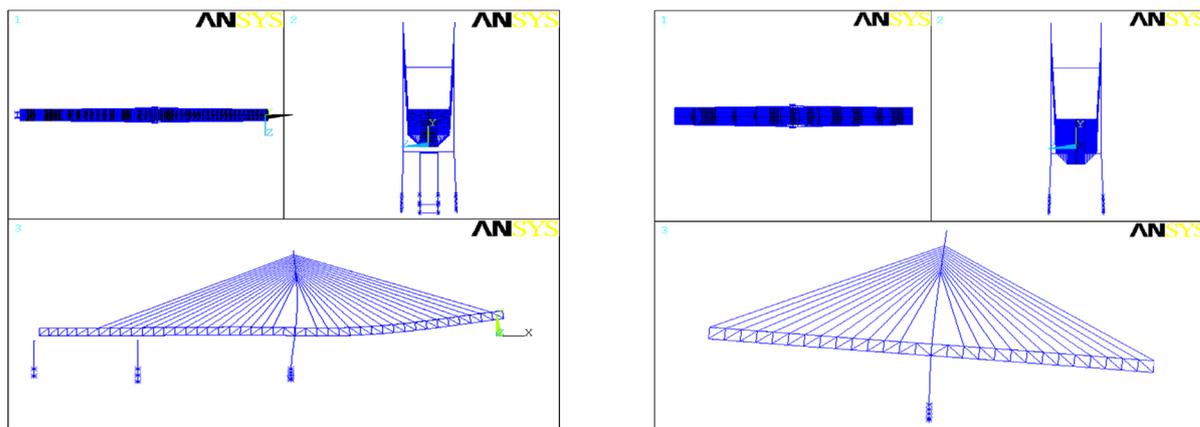


Figure 3. Typical mode diagram in construction (left: maximum single cantilever state; right: maximum double cantilever state)
图 3. 施工阶段典型振型图(左: 最大单悬臂状态; 右: 最大双悬臂状态)

3. 试验设计

3.1. 试验模型设计

根据力学相似理论, 用于风洞试验的气动弹性模型应遵循下述准则: 即在原型(实桥)和模型之间保持下列无量纲参数的一致性。根据上述准则, 综合考虑桥梁结构风洞模型设计要求、模型长度要求、塔高要求和西南交通大学 XNJD-3 大型低速风洞试验段的断面尺寸(宽 22.5 m, 高 4.5 m), 将模型的几何缩尺比和风速比定为 $C_L = 1/80$ 和 $C_U = 1/8.944$, 由相似条件可得频率比为 $C_f = 8.944/1$, 缩尺后模型全长为 14.85 m。试验模型主要参数见表 3。

Table 3. Test model parameters
表 3. 试验模型参数

参数名称	单位	相似比	实桥值	模型值
尺寸	主桥长		1188	尺寸
	桥面宽	m	36.8	
	桥塔高		221.5	
质量	主梁	Kg/m	67,920	质量
质量惯矩	主梁	Kgm ² /m	6605224	质量惯矩

3.2. 紊流场模拟

根据现场实测数据,平潭海峡元洪航道主桥所处的位置的大气边界层接近于 A 类地区,即风剖面幂指数 $\alpha = 0.10$ 。为此,在风洞试验中需对边界层进行模拟。大气边界层模拟装置采用挡板、尖塔、粗糙元的形式,根据模拟指标确定粗糙元排数及其间距,模拟了风剖面指数 $\alpha = 0.10$ 的湍流场。风洞试验中风剖面图和紊流度的模拟结果见图 4 和图 5。将图中的目标值和风洞试验中的实测值对比之后可以发现,两者吻合较好,能够满足试验要求。

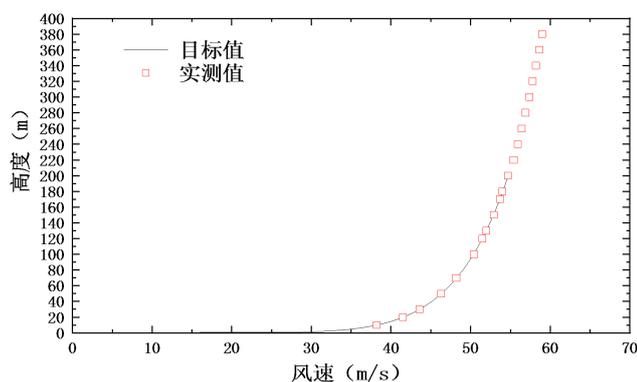


Figure 4. Wind speed profile

图 4. 风速剖面图

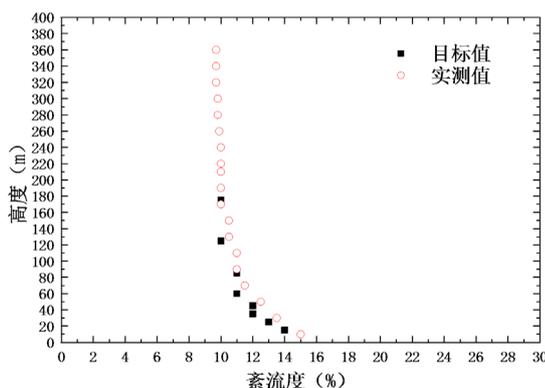


Figure 5. Turbulence profile

图 5. 紊流度剖面图

4. 试验结果分析

将试验模型置于风洞中,来流风速从 1 m/s 至 9 m/s 逐级递增,测量结构悬臂端在紊流场中的抖振响应。在试验中来流的风向角分别取 $\beta = 0^\circ$ 、 $\beta = 15^\circ$ 、 $\beta = 30^\circ$,风向角通过转动模型下面转盘来实现,其中 $\beta = 0^\circ$ 为横桥向来流。

4.1. 最大单悬臂施工阶段试验结果分析

图 6 中列出了最大单悬臂施工阶段结构悬臂端在各风向角和风速下的最大抖振响应。从图 5 中的数据可以看出:

1) 对于横桥向位移而言,当风速小于 67 m/s 时,横桥向位移的均方根值对风向角并不敏感,而当风速大于 67 m/s 后,随着风向角的增大,横桥向位移均方根值逐渐减小。特别是在风速为 80 m/s 时,此时

不同风向角的响应均方根值可以写成 $0.96 y_0 \cos^2 \beta$ (y_0 为 0° 风向角下的抖振响应, β 为风向角), 此时斜风向响应与斜风分解的 *Cosine* 近似算法则较吻合。

2) 从竖桥向位移图中可以很明显的看出, 总体而言, 随着风向角的增大, 竖桥向位移的均方根值逐渐减小。当有一定偏角时, 气动端部效应比较明显, 在大风速时(大雷诺斯)抖振响应波动较大。在风速为 $40 \text{ m/s} \sim 50 \text{ m/s}$, 此时不同风向角的响应均方根值可以写成 $1.02 y_0 \cos^2 \beta$, 此时斜风向垂向响应与斜风分解的 *Cosine* 近似算法则也较吻合。

3) 风向角为 0° 和 15° 时悬臂端扭转角均方根值十分接近, 说明风向角在 0° 到 15° 的区间内影响不大, 但风向角增加到 30° 之后, 扭转角均方根值出现了明显的下降。对于扭转响应未发现明显 *Cosine* 规则。

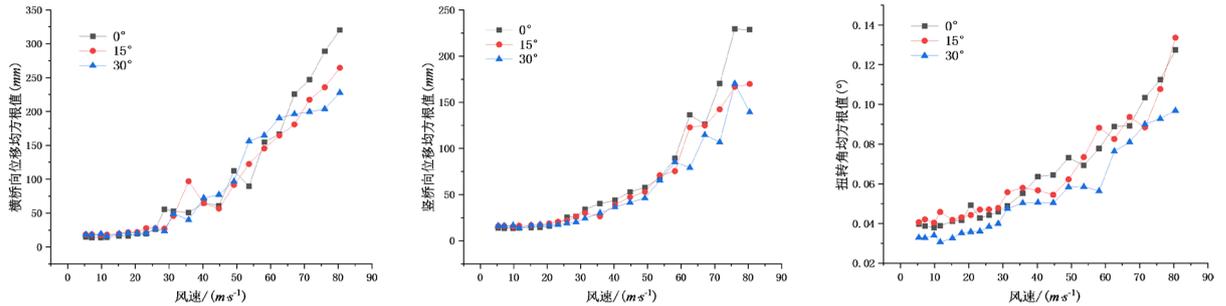


Figure 6. End displacement in maximum single cantilever state

图 6. 最大单悬臂施工状态悬臂端位移

4.2. 最大双悬臂施工阶段试验结果分析

图 7 中列出了最大双悬臂施工阶段结构悬臂端在各风向角和风速下的最大抖振响应。从图 6 中的数据可以看出:

1) 对于最大单臂施工状态, 风向角对结构最大抖振响应的影响并不明显。这是由于最大双悬臂状态相对于最大单臂状态模态频率较小, 风场主要能量集中于低频, 不同测试工程的风场特性误差可能导致了测试结果无明显 *Cosine* 规律。

2) 相比于最大单悬臂施工状态, 由于结构竖向刚度较弱, 最大抖振响应发生在竖桥向, 而对于最大单悬臂施工状态, 最大的抖振响应发生在横桥向。

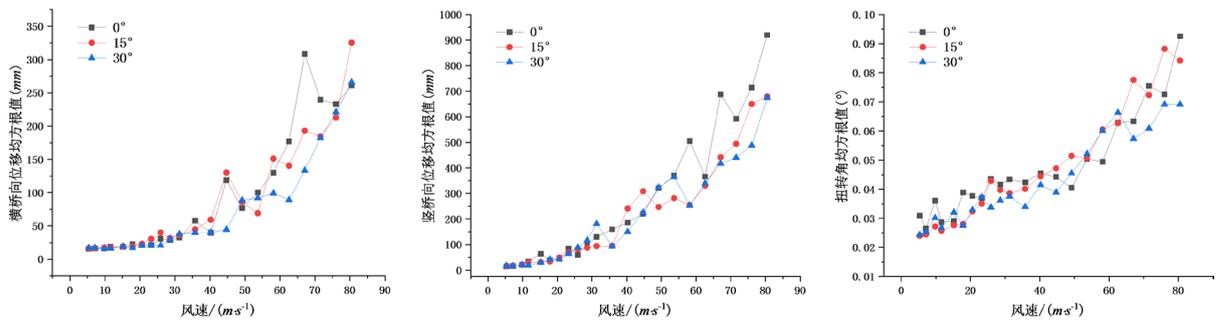


Figure 7. End displacement in maximum double cantilever state

图 7. 最大双悬臂施工状态悬臂端位移

4.3. 抖振响应汇总

施工阶段的设计基准风速, 依据《公路斜拉桥设计规范(试行)》(JTJ027-96)之附录 A, 取重现期为

30年,则可以确定施工阶段的设计基准风速为52.2 m/s。根据桥梁施工阶段全桥气弹模型风洞试验结果,将不同来流风向角各工况下在主梁在对应设计基准风速下的抖振响应结果列示于表4。

Table 4. Buffetting response at design reference wind speed

表 4. 设计基准风速下抖振响应

试验工况	风向角	横向(mm)	竖向(mm)	扭转(°)
最大单悬臂	0°	89.6	67.78	0.07
	15°	164.42	70.83	0.07
	30°	155.98	65.46	0.06
最大双悬臂	0°	100.2	370.41	0.06
	15°	69.18	281.72	0.05
	30°	92.07	364.43	0.05

从表4中汇总结果可以发现,在最大单悬臂施工阶段,主梁在相应设计基准风速下,来流风向角为15°时风致抖振响应最大,而在最大双悬臂施工阶段,则是来流风向角为0°时抖振响应达到最大值。

5. 结论

本文以平潭海峡元洪航道主桥为工程背景,研究了其在施工阶段最大单悬臂状态和最大双悬臂状态时的抖振性能,主要结论如下:

1) 在最大单悬臂施工阶段,风向角对结构抖振响应的影响比较明显,尤其是对扭转变移。并且对于横桥向位移,可以发现风速在80 m/s时位移响应和风向角之间可以满足斜风分解的Cosine近似计算法则。

2) 在最大双悬臂状态,由于结构竖向刚度较弱,最大抖振响应发生在竖桥向,而对于最大单悬臂状态,最大的抖振响应发生在横桥向。

3) 主梁在设计基准风速下,来流风向角为15°时风致抖振响应最大,而在最大双悬臂施工阶段,则是来流风向角为0°时抖振响应达到最大值。

参考文献

- [1] 刘孝辉,左太辉,何旭辉,邹云峰.大跨度公轨两用钢桁梁悬索桥抖振响应研究[J].公路交通技术,2017,33(6):49-54.
- [2] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [3] 王晓冬,曾宇.基于全桥气弹模型风洞试验的大跨度斜拉桥抖振响应研究[J].中国港湾建设,2018,38(9):20-24.
- [4] 范骏鹏.基于有理函数的大跨度斜拉桥抖振时域分析[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2018.
- [5] Tanaka, H. and Davenport, A.G. (1983) Wind-Induced Response of Golden Gate Bridge. *Journal of Engineering Mechanics*, **109**, 296-312. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1983\)109:1\(296\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:1(296))
- [6] 郑史雄,李永乐,陶奇.天兴洲公铁两用长江大桥气动参数风洞试验[J].中国铁道科学,2007,28(2):25-30.
- [7] 郑史雄,徐伟,高宗余.武汉天兴洲公铁两用长江大桥抗风性能研究[J].桥梁建设,2009(4):1-4.
- [8] 马存明,李丽,廖海黎,等.特大跨钢桁梁悬索桥主梁气动参数试验研究[J].四川建筑科学研究,2010,36(2):43-46.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org