

# 斜拉桥非规则索塔自立状态风振试验研究

张天翼<sup>1</sup>, 王崇交<sup>1</sup>, 韩金<sup>2</sup>

(1. 四川路桥建设集团股份有限公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学 风工程试验研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为研究大跨度斜拉桥非规则索塔在自立状态下不同风向角的风致振动性能, 选取一座跨度为480 m的双索面斜拉桥为工程背景, 通过缩尺比为1:60的气弹模型风洞试验, 测量了均匀流场、紊流场中桥塔自立状态下的风致振动响应。试验结果表明: 桥塔在驰振检验风速范围内不会发生驰振现象, 在0°、3°、5°、10°风向角下会发生显著的顺桥向涡激振动, 在紊流场中桥塔抖振响应随风速增加而增大, 顺桥向抖振响应大于横桥向抖振响应。此外通过计算塔顶位置的运动加速度, 评估了桥塔自立状态下施工人员的舒适性指标, 结果表明: 塔顶最大运动加速为0.26 m/s<sup>2</sup>, 舒适性指标满足中国规范要求。

**关键词:** 桥涵工程; 非规则索塔; 自立状态; 气弹模型风洞试验; 风致振动; 舒适性评价

**中图分类号:** U446.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2025)05-0295-04

## Experimental Study on Wind-induced Vibration of Free-standing Irregular Pylon of Cable-stayed Bridge

ZHANG Tianyi<sup>1</sup>, WANG Chongjiao<sup>1</sup>, HAN Jin<sup>2</sup>

(1. Sichuan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Wind Engineering Test Research Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study the wind-induced vibration performance of free-standing irregular pylon of long-span cable-stayed bridge at different wind angles, a double-plane cable-stayed bridge with a span of 480 m is selected as the engineering background. The wind-induced vibration response of the free-standing bridge pylon in uniform flow field and turbulent flow field is measured by the aeroelastic model wind tunnel test with scale ratio of 1:60. The test results show that the galloping phenomenon will not occur in the galloping test wind speed range of the bridge pylon, and the significant forward bridge vortex-induced vibration will occur at the wind angles of 0°, 3°, 5° and 10°. In the turbulence flow field, the buffeting response of the bridge pylon increases with the increase of wind speed, and the forward bridge buffeting response is greater than the cross bridge buffeting response. In addition, the comfort indexes of the construction personnel are evaluated at the free-standing bridge pylon state by calculating the motion acceleration at the top of the pylon. The results show that the maximum motion acceleration of the pylon top is 0.26 m/s<sup>2</sup>, and the comfort indexes meet the requirements of Chinese specifications.

**Keywords:** bridge culvert engineering; irregular pylon; free-standing state; aeroelastic model wind tunnel test; wind-induced vibration; comfort evaluation

## 0 引言

随着桥梁跨度的不断提升, 其结构愈发轻、柔, 对风的作用十分敏感, 抗风性能已成为大跨度桥梁设计的关键控制因素。对于施工阶段的斜拉桥, 尤其是处于桥塔自立状态时, 由于结构未形成整体, 对

风的作用更为敏感。

近年来, 部分学者基于一些工程项目, 通过风洞试验研究了桥塔自立状态下的风致振动性能。试验结果显示相比成桥状态, 桥塔在自立状态下结构刚度低, 导致其振动频率较低<sup>[1]</sup>。桥塔在较低风速下可能发生明显的涡激振动, 振幅会随阻尼比的增大而减小, 且涡激振动对风向角的影响也十分敏感, 最大振幅往往出现在来流方向与桥梁正交时<sup>[2-4]</sup>。桥塔自立状态下的抖振响应随风速的增加呈二次非线性趋势增加, 且抖振响应最大值可能出现在非正交风向<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2024-ZL-18)

作者简介: 张天翼(1990—), 男, 博士, 工程师, 从事桥梁风工程及智能建造技术研究工作。

通信作者: 王崇交(1995—), 男, 博士, 工程师, 从事桥梁智能建造与智能运维决策研究工作。电子信箱: 604876299@qq.com

值得注意的是,随着桥梁美学的发展和景观设计的需求,桥塔的造型逐步向非规则、多样化的方向发展。使得以往的研究成果无法直接在这类结构上应用,故需要对新式非规则桥塔进行抗风性能的研究。本文以一座具有非规则索塔的大跨度斜拉桥为背景,通过风洞试验系统研究了桥塔在自立状态下的风致振动性能,以服务工程的顺利建设,并为后续工程提供一定参考。

1 工程概况

本文研究基于一座跨越长江的大跨度双索面斜拉桥,主跨为480 m,主梁采用主纵梁为钢箱的钢-混组合叠合梁,梁高3.8 m,桥面宽度为40 m。如图1所示,索塔为“江鱼”造型拱形塔,采用钢筋混凝土结构,两侧索塔高均为182.9 m,索塔最大横桥向宽度为49.6 m,纵桥向宽度由底部的11 m变化至顶部的6.6 m,设置下横梁和上横梁,其中下横梁对主梁起横向支承作用,上横梁和顶部装饰部件均采用轻钢结构制作,不参与整体受力。

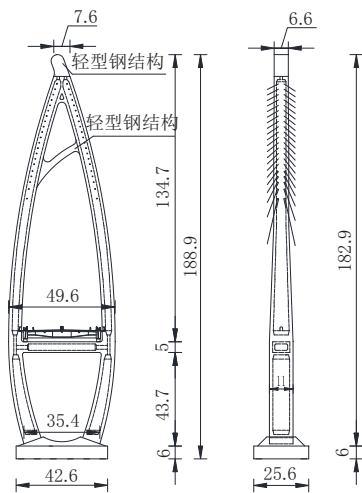


图1 索塔结构构造图(单位:m)

2 风洞试验布置

由于本文中桥塔造型独特,倒角处均为弧形,所以需要采用较大缩尺比制作桥塔模型,以准确模拟其气动外形。研究选取西南交通大学XNJD-3号工业风洞进行试验,该风洞工作段高4.5 m、宽22.5 m,可以满足大缩尺比的结构风洞试验要求,风速可在0.5~16.5 m/s实现自由调节,风洞内风速在大于1.5 m/s时紊流强度小于1.0%。试验分别在均匀流场和紊流场中进行,以分别检验桥塔的涡振、驰振和抖振性能。

2.1 桥塔模型制作及测试

根据风洞实验室工作段截面尺寸,桥塔气动弹性模型缩尺比选定为1:60,模型塔高3.05 m,横桥向最大宽度为0.83 m。为模型除了准确模拟桥塔的气动外形外,还需要满足弗劳德数(Froude Number)的一致性条件。研究采用通用有限元分析软件ANSYS 15.0模拟桥梁自立状态时的动力特性。桥塔按照实际的空间位置离散成三维有限元杆件单元,桥塔各支腿底部采用固结约束,根据桥塔截面特性、质量参数、材料参数计算结构动力特性。

试验采用机加工的钢芯梁模拟侧向、竖向和扭转刚度,采用优质木材附着于钢芯梁侧面模拟气动外形,其中每个支腿由17个节段组成,并在木模内部安装铅皮模拟主梁的质量和惯性矩,每两段节段间预留有1.5 mm间隙,避免额外的附加刚度影响试验精度。桥塔气弹模型的位移响应时程采用激光位移计测得,采样频率和采样时间分别为256 Hz和64 s。

在无风状态下,使用自由振动法测试桥塔气弹模型的动力特性,表1列出了有限元计算得到的目标值与试验结果。中国《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)<sup>[7]</sup>规定混凝土结构的阻尼比为2%,但由于桥塔自立状态下,结构未形成整体受力,较成桥状态更加轻柔,其阻尼比很可能低于规范推荐值,此外,英国和德国的桥梁设计规范规定混凝土结构最低阻尼比为0.8%,因此,风洞试验偏安全的选取较低的阻尼比进行试验。

表1 桥塔气弹模型动力特性

| 阶数 | 振动频率/Hz |      |      | 阻尼比/% | 振型   |
|----|---------|------|------|-------|------|
|    | 实际值     | 目标值  | 实测值  |       |      |
| 1  | 0.299 7 | 2.32 | 2.42 | 0.85  | 一阶侧弯 |
| 2  | 0.484 4 | 3.75 | 3.80 | 0.67  | 一阶横弯 |
| 3  | 1.224 3 | 9.48 | 9.21 | 0.45  | 一阶扭转 |

2.2 紊流风场模拟

参照桥梁抗风设计规范,桥址处地表类别为C类,对应的风剖面指数为0.22,设计基本风速 $V_{10}$ 为24.3 m/s,大桥桥塔施工阶段风速5 a重现期系数为0.78,计算得到桥塔的设计风速为41.82 m/s,驰振检验风速为50.18 m/s。

风洞中紊流风场采用尖塔加粗糙元的方式进行模拟,试验中将横桥向来流定义为0°风向角,将顺桥向来流定义为90°风向角。试验分别在均匀流和紊流条件下进行,分别在7个风向角(0°、3°、5°、10°、

30°、60°、90°)下考察结构的涡振、驰振和抖振响应,图2所示为紊流风场中的风洞试验照片。

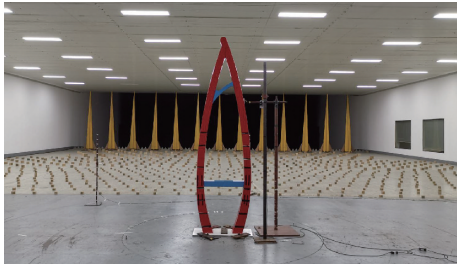


图2 风洞试验照片

3 风洞试验结果

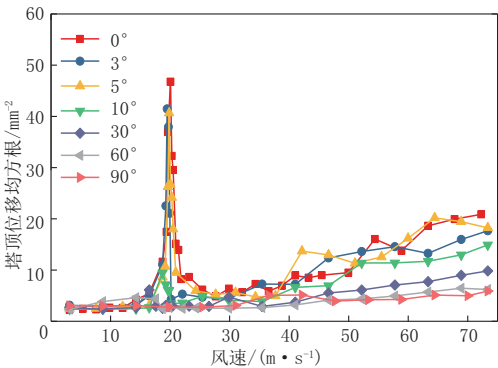
3.1 均匀流场中试验结果

试验首先在均匀流场中检验桥塔自立状态下结构的涡振和驰振性能,检验风速范围为3~71 m/s,塔顶横桥向和顺桥向位移均方根随风速的变化曲线如图3所示,图中结果均按实桥进行换算,其中模型与实桥风速比为 $1:\sqrt{60}$ ,位移比为1:60。

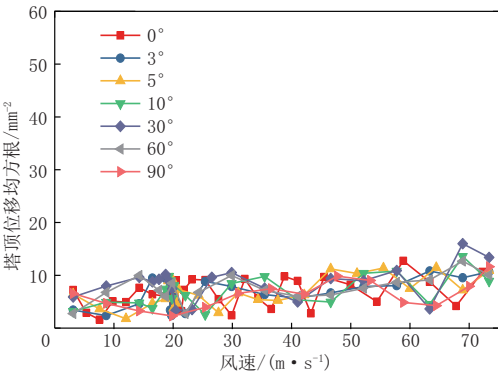
试验结果显示,桥塔在自立状态下会在0°、3°、5°、10°风向角下发生显著的顺桥向涡激振动,各风向角下涡振区间接近,其中涡振起振风速约为16 m/s,涡振区结束风速约为22 m/s,涡振最大振幅对应的风速约为20 m/s。当风向角为0°时,塔顶位置的涡激振动响应最大,对应的最大位移均方根值为46.78 mm,3°、5°和10°风向角对应的最大位移均方根值分别为41.46、40.65、9.46 mm,涡激振动最大位移响应随风向角的增加显著降低,而且可以看出桥塔的涡激振动对风向角的改变十分敏感。此外,桥塔在横桥向未发生显著的涡激振动,在风洞试验风速范围内未发生驰振现象。

3.2 紊流场中试验结果

试验在紊流场中主要检验桥塔自立状态下的抖振性能,同时检验紊流场中桥塔是否发生涡激振动和驰振,故风洞试验最大风速需大于桥塔驰振检验风速,本研究取最大检验风速为53 m/s。试验结果表明,在紊流场中桥塔自立状态下不会发生涡激振动和驰振,不同风速下对应的顺桥向和横桥向塔顶抖振响应详见图4,结果均按实桥进行换算。由抖振响应试验结果可知,桥塔的抖振位移将随风速的增加呈增大趋势,且不同风向角下抖振响应的变化规律并不相同,存在一定的随机性。当风速小于20 m/s时,桥塔顺桥向和横桥向的抖振位移均方根值均在15 mm以内,变化趋势较为平缓,随着风速的进一步



(a)顺桥向



(b)横桥向

图3 均匀流场中不同风速下桥塔顶部位移均方根值

提高,桥塔顺桥向抖振位移随风速增加的趋势较横桥向更为明显,这是由于桥塔顺桥向刚度更低导致的。桥塔顺桥向最大抖振位移发生在10°风向角、风速为53 m/s处,对应的均方根值为34.72 mm,横桥向最大抖振位移发生在90°风向角、风速为53 m/s处,对应的均方根值为19.76 mm。

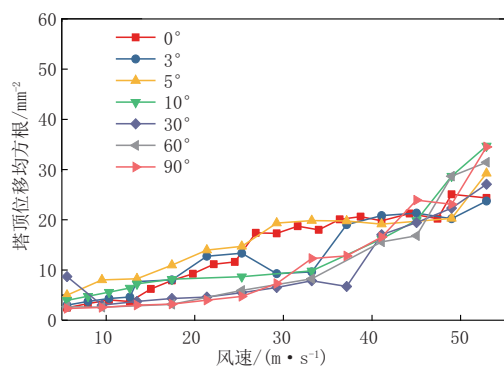
4 舒适性分析

目前多国公路桥梁设计规范都对桥梁行人或行车舒适性指标进行了规定,采用的评价指标多与加速度有关。本研究舒适性评价参照《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)<sup>[7]</sup>,该规范规定桥梁抖振或涡激共振引起的竖向加速度峰值不宜超过 $1.1\text{ m/s}^2$ ,横向加速度峰值不宜超过 $0.5\text{ m/s}^2$ 。

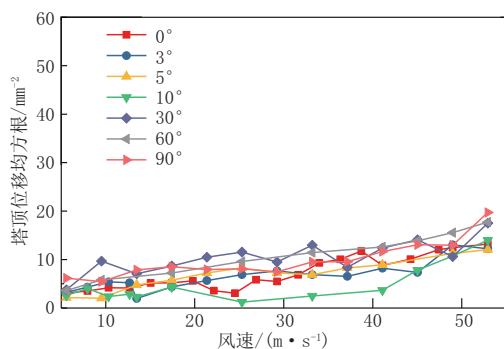
涡激振动为典型的简谐振动,位移时程可以表示为

$$y = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

式中: $y$ 为结构位移; $A$ 为简谐振动的振幅; $f$ 为结构振动频率; $t$ 为时间; $\phi$ 为相位差。通过对上式求二阶导,可以得到涡激振动运动加速度的表达式 $a = -4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft + \phi)$ ,根据结构涡激振动振幅 $A$ 为均方根 $\sigma$ 的 $\sqrt{2}$ 倍关系,可以得到结构最大运动加速



(a)顺桥向



(b)横桥向

图4 紊流场中不同风速下桥塔顶部位移均方根值

度与振幅的关系,即  $a_{\max} = 4\sqrt{2}\pi^2 f^2 \sigma$ 。

图5所示为均匀流场中桥塔顶部在各风向角下计算得到的顺桥向和横桥向振动的最大运动加速度。在均匀流场中,由于桥塔在0°、3°、5°、10°风向角下发生了显著的顺桥向涡激振动,因此,在风向角小于10°时,塔顶顺桥向的运动加速度明显大于其他风向角,其中最大加速度发生在0°风向角,对应的数值为0.23 m/s<sup>2</sup>,随着风向角的增加,桥塔顺桥向最大运动加速度逐渐减低,90°风向角时,顺桥向最大运动加速度为0.03 m/s<sup>2</sup>。由于桥塔横桥向振动频率较高,在相同振幅的情况下,横桥向运动加速度显著大于顺桥向的结果,计算结果显示,在风向角为0°时,塔顶最大运动加速度最小,对应的数值为0.13 m/s<sup>2</sup>,随着风向角的增加,在30°时达到最大,数值为0.21 m/s<sup>2</sup>,随着风向角的进一步增加,加速度又逐渐降低。对比顺桥向和横桥向最大运动加速度计算结果可知,当发生显著顺桥向涡激振动时,顺桥向振动对应的加速度显著大于横桥向的,当风向角大于10°后,即无明显涡激振动时,横桥向的最大运动加速度大于顺桥向的最大加速度。

图6所示为紊流场中桥塔顶部在各风向角下计算得到的顺桥向和横桥向振动的最大运动加速度。计算结果显示,塔顶顺桥向与横桥向抖振最大运动

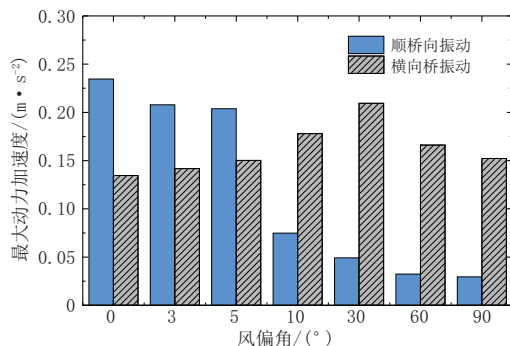


图5 均匀流场桥塔自立状态塔顶运动加速度计算结果

加速度均有随风向角增加而增加的趋势,这可能与风向角的增加降低迎风侧支腿对背风侧支腿的阻塞作用有关。此外,在相同风向角下,塔顶横桥向加速度均大于顺桥向加速度,其中,塔顶顺桥向加速度变化范围为0.12~0.18 m/s<sup>2</sup>,横桥向加速度变化范围为0.16~0.26 m/s<sup>2</sup>。

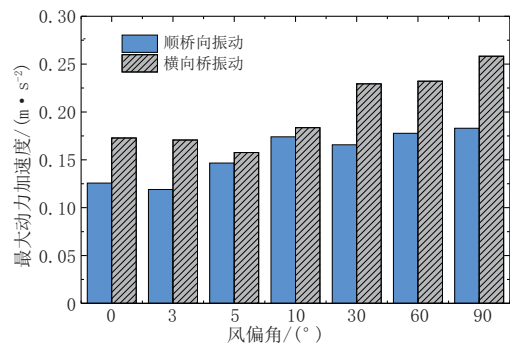


图6 紊流场桥塔自立状态塔顶运动加速度计算结果

值得注意的是,均匀流场中塔顶最大运动加速度为0.23 m/s<sup>2</sup>,紊流场中塔顶最大运动加速度为0.26 m/s<sup>2</sup>,均小于中国规范的限值0.5 m/s<sup>2</sup>。因此该桥塔在施工过程中风致振动满足规范要求,无需增加减振措施,抑制桥塔的风致振动。

## 5 结 语

本文以一座具有非规则索塔的大跨度斜拉桥为研究对象,通过采用气弹模型风洞试验,检验了桥塔在自立状态下的风致振动性能,得到如下结论。

(1)在均匀流场中,桥塔在0°、3°、5°、10°风向角下会发生显著的顺桥向涡激振动,涡激振动振幅随风向角的增大逐渐减小,0°风向角时,塔顶位置最大涡振振幅的均方根值为46.78 mm,此外,桥塔驰振检验风速范围内未发生驰振现象。

(2)在紊流场中,桥塔未发生显著的涡激振动和驰振,桥塔的风致振动表现为抖振,抖振响应随风速增大逐渐增加,在风速为53 m/s时,塔顶顺桥向最大抖振位移发生在10°风向角,对应的均方根值为

(下转第315页)