

# 某新建斜拉桥抗风性能研究

王健

中铁二院工程集团有限责任公司, 中国·四川 成都 610031

**摘要:** 本研究以某新建斜拉桥为研究对象, 采用数值模拟手段对其抗风性能进行了系统性评估。基于有限元建模技术, 对成桥状态下的结构动力特性进行了模态分析; 同时, 运用计算流体动力学 (CFD) 方法, 确定了桥梁断面的三分力系数, 并据此计算了设计基准风速与检验风速。此外, 通过气动稳定性分析, 重点考察了主梁的颤振临界风速和涡振响应特性。研究表明, 该桥主梁断面气动外形设计合理, 其颤振临界风速显著高于规范限值, 涡振幅控制在允许范围内, 整体气动稳定性满足设计要求。

**关键词:** 斜拉桥; 动力特性; CFD; 颤振; 涡振

## Research on Wind Resistance Performance of a Newly Built Cable Stayed Bridge

Jian Wang

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

**Abstract:** This study takes a newly built cable-stayed bridge as the research object and systematically evaluates its wind resistance performance using numerical simulation methods. Based on finite element modeling technology, modal analysis was conducted on the dynamic characteristics of the structure in the completed bridge state; At the same time, using computational fluid dynamics (CFD) methods, the three component force coefficients of the bridge section were determined, and based on this, the design reference wind speed and inspection wind speed were calculated. In addition, through aerodynamic stability analysis, the flutter critical wind speed and vortex response characteristics of the main beam were mainly investigated. The research results indicate that the aerodynamic shape design of the main beam section of the bridge is reasonable, and its flutter critical wind speed is significantly higher than the specification limit. The vortex vibration amplitude is controlled within the allowable range, and the overall aerodynamic stability meets the design requirements.

**Keywords:** cable-stayed bridge; power characteristics; CFD; flutter; vortex induced vibration

## 0 前言

随着桥梁跨径的不断增大, 结构对风荷载的敏感性显著增加, 抗风性能已成为大跨度桥梁设计中的关键控制指标<sup>[1,2]</sup>。JTG/T 3360-01-2018 现行《公路桥梁抗风规范》<sup>[3]</sup>要求桥梁特别是大跨、轻柔桥梁在施工阶段及运营期不发生静力失稳、颤振和驰振, 涡振振幅应在规定范围内。因此, 大跨轻柔桥梁在施工前均需进行抗风性能研究, 为大桥施工及运营提供安全保障<sup>[4,5]</sup>。

## 1 桥梁结构动力特性

### 1.1 工程背景

某新建斜拉桥主桥跨度 178m【具体跨径布置为 (28+40)m 预应力混凝土薄壁箱梁 +110m (薄壁钢箱梁)】的中央单索面、独塔、混合梁斜拉桥。主塔为独柱塔, 高 57.8m, 桥上 47m, 桥下 10.8m。索塔截面形式为实心矩形断面和空心矩形断面结合。桥梁立面布置如图 1 所示。

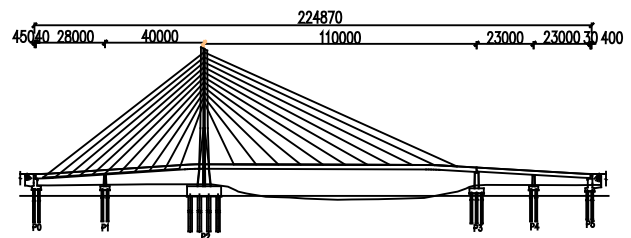


图 1 桥梁立面布置图

### 1.2 动力特性分析结果

在开展桥梁抗风特性研究前, 首先需要桥梁结构动力特性进行分析。只有计算出桥梁结构相应各阶段的动力特性, 才能够对风荷载作用下的结构进行静动力响应分析<sup>[6]</sup>。采用 ANSYS 和 BANSYS 两款软件对新建斜拉桥成桥状态结构动力特性进行分析, 分析结果见表 1。根据表 1 可知, 由两个软件计算的、各自有限元模型的前 10 阶自振频率吻合较好, 且振型也一致, 这也验证了新建斜拉桥有限元建模的可靠性。

由该桥成桥状态的前 10 阶模态频率及振型可知: 该桥

桥塔刚度相对较低，其横弯出现于第 1 阶模态振型。主梁第一扭转振型出现在两阶竖弯振型之后，扭弯频率比约达 2.47 (2.67/1.08)，表明其主梁抗扭刚度较高，有利于颤振稳定性的提高；主梁横、竖弯频率比约达 2.47 (2.67/1.08)，表明该桥主梁具有足够的横向刚度。

表 1 新建斜拉桥成桥状态结构动力特性分析结果

模态阶次	频率 (Hz)	振型描述	模态阶次	频率 (Hz)	振型描述
1	0.85/ 0.87	桥塔第 1 侧弯	6	2.93/ 2.96	钢箱梁第 2 扭转 + 侧弯
2	1.08/ 1.09	钢箱梁第 1 竖弯	7	3.54/ 3.61	钢、砼箱梁第 1 竖弯
3	2.28/ 2.24	钢箱梁第 2 竖弯	8	3.88/ 3.92	桥塔第 2 侧弯
4	2.67/ 2.65	钢箱梁第 1 扭转 + 侧弯	9	4.13/ 4.15	钢箱梁第 3 竖弯 + 砼箱梁竖弯
5	2.83/ 2.87	砼箱梁第 1 竖弯	10	4.47/ 4.39	钢、砼箱梁第 2 竖弯

## 2 抗风设计相关风速的确定

### 2.1 设计基准风速

根据 JTG/T 3360-01-2018《公路桥梁抗风规范》<sup>[1]</sup> (以下称“规范”)，桥址区地表粗糙度可偏于安全地定为 A 类，相应的地表粗糙度系数  $\alpha$  可取为 0.12，引起基本风速地表类别转换系数取 1.174，即桥梁设计基本风速  $U_{s10}$  为 38.51m/s，由此可得主梁处的设计基准风速  $U_d$  为 39.4m/s。

### 2.2 抗风稳定性验算风速

根据该设计基准风速，可以根据“规范”进一步计算主梁的静风稳定性检验风速、驰振检验风速和颤振检验风速。

#### 2.2.1 静风稳定性检验风速

主梁的静风横向失稳临界风速  $U_{lb}$  和静风扭转发散临界风速  $U_{ld}$  应分别满足以下要求：

$$U_{lb} > \gamma_{ai} U_d \quad (1)$$

$$U_{ld} > \gamma_{ai} U_d \quad (2)$$

式中， $\gamma_{ai}$  为静风稳定性分项系数，具体取值可参考“规范”。

#### 2.2.2 驰振稳定性检验风速

主梁的驰振稳定性检验应满足以下要求：

$$U_{cg} > \gamma_{cg} U_d = 1.2 \times 39.4 = 46.9 \text{ m/s} \quad (3)$$

式中， $U_{cg}$  为桥梁的驰振临界风速， $\gamma_{cg}$  为驰振稳定性分项系数，取 1.2。

#### 2.2.3 颤振稳定性检验风速

主梁的颤振稳定性可按下式进行检验：

$$U_f > \gamma_f \gamma_a \gamma_a U_d \quad (4)$$

式中， $\gamma_f$  为颤振稳定性分项系数， $\gamma_a$  为风速脉动空间影响分项系数， $\gamma_a$  为攻角效应分项系数，具体取值可参考“规范”。

施工阶段的设计风速可按照式 (5) 确定：

$$U_{sd} = k_{sf} U_d \quad (5)$$

式中， $k_{sf}$  为施工期抗风风险系数，桥址区的抗风风险区划为 R1，施工年限为 3 年，故  $k_{sf}$  取为 0.88。

以上计算了新建斜拉桥的主梁成桥状态和施工阶段的静风稳定性检验风速、驰振检验风速、颤振检验风速，相应的检验风速结果汇总于表 2。

表 2 主梁风速标准

风速类型 (m/s)	成桥状态	施工状态
设计基准风速	39.4	34.7
静风稳定性检验风速	78.8	69.3
驰振检验风速	46.9	41.3
颤振检验风速	71.5	62.9

## 3 主梁断面的 CFD 计算

作为在静风计算中起关键作用的主梁断面静力三分力系数，往往要通过风洞试验获得。而风洞试验虽然有效，但耗资较巨，耗时较长，参数调整也不方便。数值风洞与风洞试验或现场实测相比，除可以节约大量的人力物力之外，还具有重复性好、节约时间、能在较广泛的参数范围内较快地给出流场的定量结果、不受试验中固有约束条件 (风洞洞壁干扰、支架干扰等) 的影响等诸多优点。因此，数值风洞目前已经逐步成为研究桥梁结构气动特性、流场分布、湍流特性及流固相互作用的重要手段之一。

### 3.1 数值模型的建立

新建斜拉桥共有两种主梁断面，分别是钢箱梁断面和砼箱梁断面。采用 Gambit 生成网格，每个计算域网格保持在 20 万以上，图 2 和图 3 分别为钢箱梁和预应力钢筋混凝土箱梁的计算区域及网格。

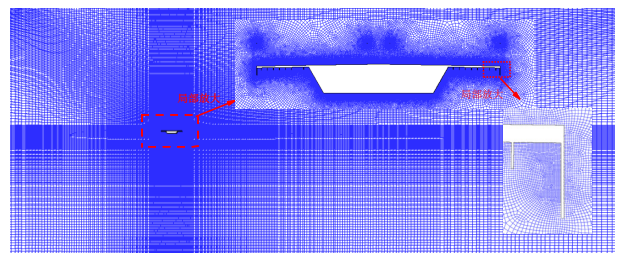


图 2 钢箱梁断面网格划分图

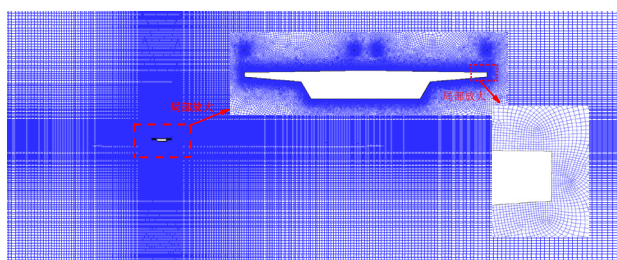


图 3 砼箱梁断面网格划分图

### 3.2 三分力系数计算结果

基于 CFD 进行计算, 得到主梁断面三分力系数。表 3 为在体轴坐标系下的三分力系数值, CH、CV、CM 分别为阻力系数、升力系数和扭矩系数。

表 3 不同风攻角下主梁断面三分力系数

主梁截面	攻角 (°)	CH	CV	CM
钢箱梁	-3	0.4480	-0.1975	-0.0258
	0	0.5155	-0.0901	-0.0688
	3	0.5670	0.018	-0.1108
砼箱梁	-3	0.7041	-0.0982	-0.1045
	0	0.6965	-0.0377	-0.1270
	3	0.6833	0.0397	-0.1521

主梁断面的升力系数随着风攻角从负到正变化而增大, 即在  $-3^{\circ}\sim 3^{\circ}$ , 升力系数保持着正斜率, 表明该桥主梁断面具备良好的气动稳定性条件。砼箱梁断面的阻力系数要大于钢箱梁断面的阻力系数, 这与前者断面稍钝是吻合的。

## 4 成桥颤振、涡振稳定性分析

### 4.1 成桥颤振稳定性分析

抗风设计要求桥梁的颤振临界风速必须高于相应的颤振检验风速, 这一要求是否满足需要通过颤振稳定性检验来判断<sup>[5]</sup>。

在进行颤振验算时, 选择的基本振型分别为其最低的主梁竖弯与扭转振型的组合: 即钢箱梁的一阶竖弯 (对应于结构的第二阶模态, 其频率  $f_b=1.088\text{Hz}$ ) 与一阶扭转 (对应于结构的第四阶模态, 其频率  $f_t=2.603\text{Hz}$ )。另外, 由于钢箱梁与砼箱梁均带有斜腹板, 其体型修正系数可偏于安全地取 0.6, 相应的攻角效应系数取 0.7。由此根据“规范”可得该桥成桥状态的颤振临界风速为  $U_{cr}=198.3\text{m/s}$ 。除根据“规范”所得的颤振临界风速之外, 由同样的参数, 分别根据常见的 ECSS、Vander Put、Selberg 及 Matsumoto 近似公式, 可得出颤振临界风速分别为 172.7、188.7、168.7 及 173.3m/s 的结果。综合以上五种近似公式的计算结果, 由于“规范”近似公式的结果为 5 种经验公式的最大值, 出于安全考虑, 推荐采用 Selberg 近似公式所得结果, 即:  $U_{cr}=168.7\text{m/s}$ 。

综上所述, 新建斜拉桥成桥状态的颤振检验风速 168.7m/s 远大于其颤振检验风速 71.5m/s, 故该桥的颤振稳定性应属可靠, 且具备充分的安全系数。

### 4.2 成桥涡振稳定性分析

当气流经断面产生旋涡脱落频率与桥面断面的结构频率较一致时, 就有可能激起断面明显的涡共振响应, 因此可通过风振响应结果判断该桥是否会发生较大的涡激振动现象<sup>[7]</sup>。

新建斜拉桥主跨为薄壁钢箱梁, 且第一扭转频率  $f_t=$

2.67Hz。因此, 成桥状态主梁的竖向与扭转涡激振动的发振风速分别为  $U_{cvh}=2.0f_bB=30.2\text{m/s}$  和  $U_{cv0}=1.33f_tB=49.8\text{m/s}$ 。根据“规范”可估算主梁竖向及扭转涡激振动振幅分别为  $h_c=0.026\text{m}$  和  $\theta_c=0.132\text{m}$ 。“规范”规定主梁竖向涡激振动振幅允许值  $[h_a]=0.04/f_b=0.037\text{m}$ , 扭转涡激振动振幅允许值  $[\theta_a]=4.56/f_t=1.707\text{m}$ , 显然  $h_c$  小于  $[h_a]$ , 并且  $\theta_c$  远小于  $[\theta_a]$ 。

该桥的设计基准风速约 39.4m/s, 稍高于主梁竖向涡激振动的发生风速 30.2m/s, 而稍低于主梁扭转涡激振动的发生风速 49.8m/s, 故在设计基准风速附近, 主梁有发生竖向或涡激振动的可能。但因此风速已经较高, 且相应的竖向涡激振动振幅小于“规范”允许值, 而扭转涡激振动振幅则远小于“规范”允许值, 故可认为, 该桥主梁具有良好的涡激振动性能。

## 5 结语

论文采用大型结构分析软件 ANSYS 和 BANSYS 对新建斜拉桥成桥状态动力特性进行了分析, 并且利用 CFD 计算了主梁断面的气动力系数。在此基础上, 根据“规范”, 对该桥主梁的颤振、静力扭转发散、涡激振动进行了初步验算。研究表明: ①主梁的颤振临界风速远高于其颤振检验风速, 因此具备良好的颤振稳定性; ②在设计风速附近, 该桥主梁有发生竖向或扭转涡激振动的可能性, 但估算振幅远小于“规范”允许值, 故该桥主梁涡激振动性能良好; ③主梁断面涡激振动的 CFD 模拟结果也表明该桥主梁具备良好的涡激振动性能。

### 参考文献:

- [1] 于海洋, 张卫强. 基于 CFD 的双边钝体箱梁涡振性能及抑振措施研究[J]. 河南科技, 2024, 51(20): 55-60.
- [2] 项海帆, 葛耀君. 大跨度桥梁抗风技术挑战与基础研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(9): 8-21.
- [3] 公路桥梁抗风设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [4] 陈政清, 张志田, 廖建宏. 矮寨大桥悬索桥抗风设计研究[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集(下册), 2008.
- [5] 李丙镇. 重庆郭家沱长江大桥抗风性能研究[J]. 价值工程, 2022, 41(29): 56-58.
- [6] 唐浩俊. 复杂山区峡谷大跨度钢桁梁悬索桥风致振动及气动措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [7] 陈策. 大跨径三塔悬索桥抗风性能分析[J]. 铁道标准设计, 2008 (2): 31-33.

作者简介: 王健 (1991-), 男, 中国山东德州人, 硕士, 工程师, 从事桥梁工程研究。

基金项目: 中铁二院铁路 (城轨) 装配式桥梁建造关键技术研究, 项目编号: KSNQ224035。