

于丽娜, 张欣欣, 宋郁民, 等. 基于空间有限元方法的大跨度高速铁路矮塔斜拉桥力学特性研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(12): 104-111. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241214

# 基于空间有限元方法的大跨度高速铁路矮塔斜拉桥力学特性研究

于丽娜<sup>1</sup>, 张欣欣<sup>2</sup>, 宋郁民<sup>1</sup>, 张启研<sup>1</sup>

(1 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200040)

**摘要:** 为明确在不同组合作用下高速铁路矮塔斜拉桥的受力规律, 以某桥跨布置(48+118+228+228+118+48)m的三塔斜拉桥为背景进行研究。采用 Midas 建立该桥混合单元空间的有限元计算模型, 分别分析在恒载作用、ZK 活载作用、温度荷载作用、荷载组合下的桥梁结构响应, 并得到该桥梁结构动力特性。结果表明: 中央部分相比两端部分拥有较低的结构刚度, 振动能量在桥梁的结构中不是均匀分布的; 避免局部过载, 应在中跨跨中区和边跨尾索区的桥面配置纵向预应力, 以提高桥面板顺桥向的抗裂性能; 为了提高桥梁横向的抗裂性能, 需要在全桥范围内配置横向预应力。

**关键词:** 矮塔斜拉桥; 空间有限元法; 力学特性; DAS 有限元软件

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)12-0104-08

## Research on the mechanical characteristics of cable-stayed bridges for high-speed railway based on Midas

YU Lina<sup>1</sup>, ZHANG Xinxin<sup>2</sup>, SONG Yumin<sup>1</sup>, ZHANG Qiyang<sup>1</sup>

(1 School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

**Abstract:** To elucidate the stress patterns of low-pylon high-speed railway cable-stayed bridges under various combined effects, the study is conducted with a three-pylon cable-stayed bridge, featuring a span configuration of (48+118+228+228+118+48) m, as the subject. A finite element calculation model of the bridge in mixed elements space is established using Midas software to analyze the bridge structural response under permanent loads, ZK live loads, temperature loads, and combined load conditions. Furthermore, the dynamic characteristics of the bridge structure are obtained. The results indicate that the central section possesses lower structural rigidity compared to the two end sections, and the distribution of vibrational energy within the bridge's structure is not uniform. To avoid local overload, longitudinal prestress should be applied in the mid-span region and at the tail of the side spans to enhance the longitudinal crack resistance of the deck. Additionally, to improve the transverse crack resistance of the bridge, transverse prestress should be applied throughout the entire bridge. This not only compensates for the tensile stresses arising from shrinkage, creep, and temperature variations in advance, but also enhances the overall stability and durability of the deck under various loading conditions.

**Key words:** cable-stayed bridge; Finite Element method; mechanical properties; Midas

## 0 引言

高速铁路桥梁在高速列车活载的作用下, 振动效应较为显著。在自然环境、使用环境以及其他外部因素的共同作用下, 不可避免地会逐渐出现桥梁结构的缺陷和损伤现象。这些问题会随着时间不断恶化, 具有不可逆的特性, 导致桥梁结构产生病害和损坏, 进而影响其正常使用<sup>[1-3]</sup>。

分析可知, 当前对桥梁力学特性的分析主要以

有限元分析方法来进行研究, 本文以某矮塔斜拉铁路桥为背景, 采用 Midas 建立有限元计算模型, 分析不同荷载作用下该斜拉桥的受力分析特点, 为今后类似建设提供参考。

## 1 工程概况

论文研究对象为一座预应力混凝土矮塔斜拉桥, 全长为 789.7 m, 从两侧的梁端到支座中心的距离各为 0.85 m。桥梁计算的跨度是(48+118+228+

**作者简介:** 于丽娜(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁健康监测。

**通信作者:** 宋郁民(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 桥梁结构设计理论, 桥梁健康检测。Email: song-yumin@qq.com。

收稿日期: 2023-12-20

228+118+48)m。在这座桥中,中塔采用了塔梁墩固结体系,而边塔则采用了塔梁固结体系。防护墙的内侧净宽为 9 m,桥面的宽度为 14.1 m,而桥梁的整体建筑宽度为 14.3 m。梁体采用了单箱双室的截面设计,在中支点截面的中心线位置,梁的高度为 12.0 m;而在跨中 12.0 m 的直线段和边跨 62.8 m 的直线段,梁的高度为 6.0 m。边墩支座和次边墩支座的横桥中心距离是 9.3 m,中支座横桥中心距离是 8.5 m。在桥面之上,塔的高度为 49.22 m,而最顶部的斜拉索的理论锚固点与桥面的距离为 35 m,同时塔梁的高跨比达到了 1/6.514。每座桥塔都对称地配置了 9 对斜拉索,而斜拉索被对称地锚定在梁体的边腹板外侧,其跨中的无索区长度达到了 21.6 m,斜拉索在梁上进行张拉,而塔上则使用了分丝管鞍座设计。

## 2 有限元模型建立

采用 Midas Civil 2021 有限元分析软件建立了桥梁计算模型<sup>[4]</sup>。主梁采用变截面梁单元进行离散,斜拉索采用只承受拉力的桁架单元进行模拟。将桥塔、梁、墩台和桩基用梁单元进行模拟,将桩基

底部用固结进行约束<sup>[5]</sup>,将其他桥墩用节点支承进行模拟。节点和斜拉索之间采用刚臂连接,并对其进行了有限元分析计算。全桥共划分为 937 个节点和 889 个单元<sup>[6]</sup>。某高速铁路矮塔斜拉桥有限元模型如图 1 所示。

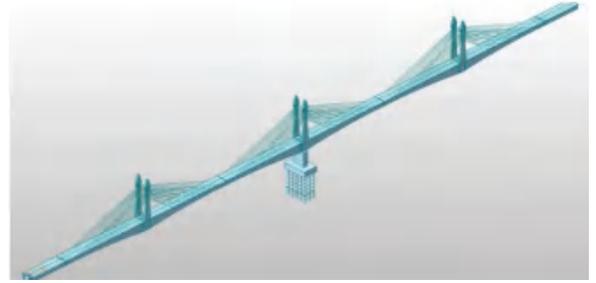


图 1 某高速铁路矮塔斜拉桥迈达斯有限元模型

Fig. 1 Midas finite element model of a high-speed railroad short tower cable-stayed bridge

### 2.1 计算参数

(1)材料特性。全桥的有限元仿真模型中一共定义了 5 种材料,分别为:C55 混凝土、C50 混凝土、C40 混凝土、Wire1860 钢绞线和 Strand1860 钢绞线。具体选用的材料主要特性见表 1。

表 1 材料特性表

Table 1 Material characteristics

名称	类型	弹性模量/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比	热膨胀系数	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	质量密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{g}^{-1}$ )
C55	混凝土	3.60e+07	0.2	1.00e-05	25.0	2.5
C50	混凝土	3.55e+07	0.2	1.00e-05	25.0	2.5
C40	混凝土	3.40e+07	0.2	1.00e-05	25.0	2.5
Wire1860	钢材	2.05e+08	0.3	1.20e-05	78.5	2.5
Strand1860	钢材	1.95e+08	0.3	1.20e-05	78.5	8.0

(2)截面特性。全桥的有限元仿真模型中一共定义了 3 种截面,其中包括了 20 种变截面、15 种数据库截面、9 种设计截面。

(3)施工阶段划分。本文采用 Midas 进行某高速铁路矮塔斜拉桥施工过程模拟<sup>[7]</sup>,0 号块和边跨现浇段选择了支架现浇法进行施工,而其他梁段则使用了挂篮悬臂浇筑技术。整个施工过程被分为 57 个不同的阶段,其中悬臂梁段的主要施工内容涵盖了挂篮的移动、梁段的浇筑、预应力筋的安装和张拉,以及斜拉索的安装和张拉<sup>[8]</sup>。

### 2.2 矮塔斜拉桥在恒荷载作用下有限元模型力学特性分析

#### 2.2.1 恒荷载作用下结构位移分析

恒荷载作用下结构位移如图 2 所示。分析图 2 可以得到,有限元模型在恒荷载的作用下主梁挠度

呈对称式分布,尤其是在主塔两侧的跨中截面处的变化影响最为突出,其中在主塔右侧的跨中截面处出现了最大竖向位移、为 46.31 mm,主塔左侧的跨中截面处竖向位移、为 46.33 mm<sup>[9]</sup>。

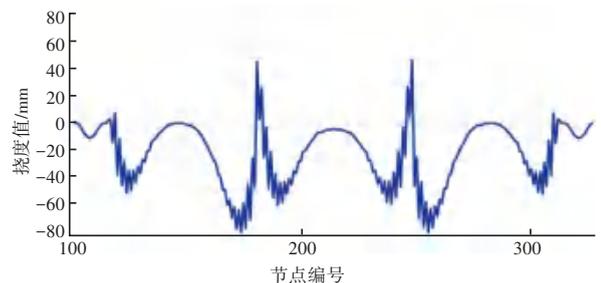


图 2 恒荷载作用下结构位移图

Fig. 2 Structural displacement under constant load

#### 2.2.2 恒荷载作用下结构应力分析

恒荷载作用下结构应力如图 3 所示。由图 3 可

以得到,有限元模型在恒荷载的作用下主梁应力呈对称式分布,正应力值均从塔柱向两侧逐渐增大,负应力最大值均在塔身附近产生,最大正应力值出现在左边跨梁端处、为 4.69 MPa,最大负应力值出现在主梁、为 1.85 MPa。



图3 恒荷载作用下结构应力图

Fig. 3 Structural stress diagram under constant loads

### 2.2.3 恒荷载作用下斜拉索索力分析

恒荷载作用下斜拉索索力如图4所示。分析图4可以得到,有限元模型在恒荷载的作用下斜拉索索力大小呈对称式分布,主塔斜拉索索力值的大小由内到外有逐渐递增的趋势,主塔两侧斜拉塔索力值的大小由外到内有逐渐递减趋势,主塔拉索所承受的最大索力值约为 7 266.4 kN。



图4 恒荷载作用下斜拉索索力图

Fig. 4 Diagram of the cable force of the inclined cable under constant loads

## 2.3 矮塔斜拉桥在 ZK 活载作用下有限元模型力学特性分析

### 2.3.1 ZK 活载作用下结构位移分析

ZK 单线 ZK 双线活载作用下结构位移如图5所示。分析图5可以得到,有限元模型在 ZK 单线和双线活荷载的作用下主梁挠度均呈对称式分布,尤其是在中跨的跨中截面处的变化影响最为突出<sup>[10]</sup>。在 ZK 活载单线作用下跨中挠度为 66.8 mm,边跨挠度为 17.4 mm。在 ZK 活载双线作用下跨中挠度为 133.6 mm,边跨挠度为 34.8 mm。

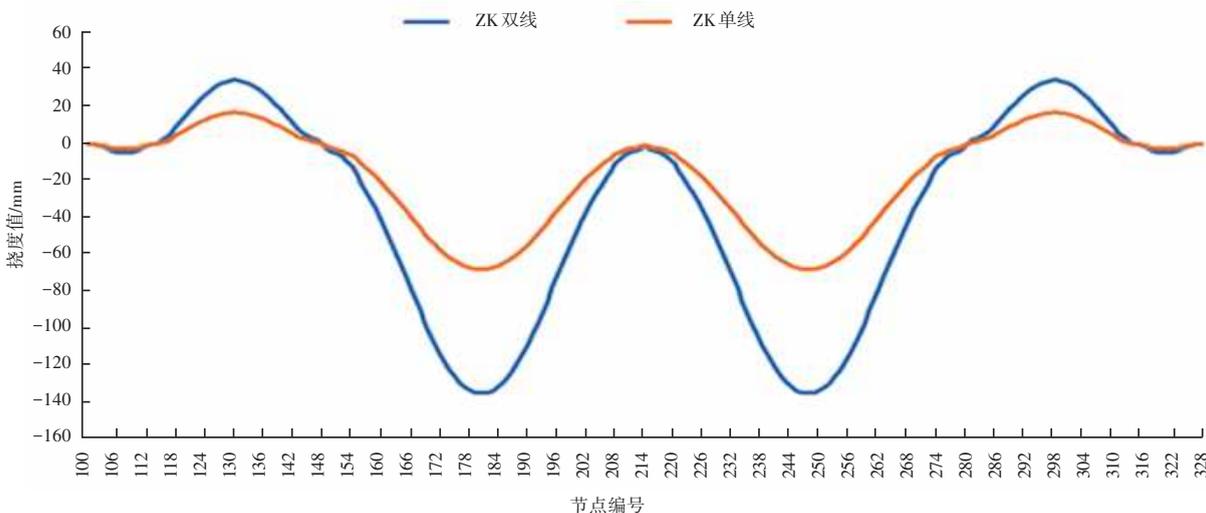


图5 ZK 单线 ZK 双线活载作用下结构位移图

Fig. 5 Structural displacement under live load for ZK single line ZK double line

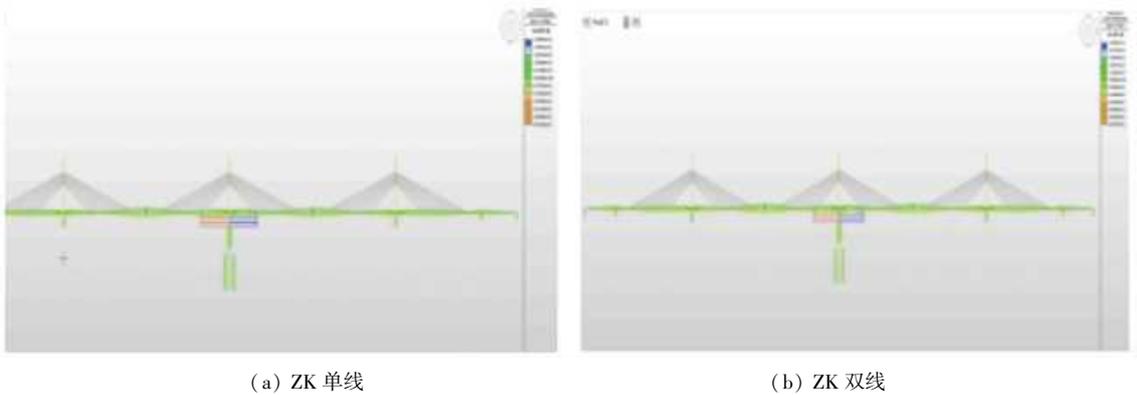
### 2.3.2 ZK 活荷载作用下结构应力分析

ZK 单线与 ZK 双线活荷载作用下结构应力如图6所示。分析图6可以得到,有限元模型在 ZK 单线和双线活载的作用下,最大值均出现在主梁右侧附近,分别为 23.9 MPa 和 44.38 MPa。

### 2.3.3 ZK 活荷载作用下斜拉索索力分析

ZK 单线 ZK 双线活载作用下索力增量如图7

所示。分析图7可以得到,有限元模型在 ZK 单线和双线活荷载的作用下主梁挠度均呈对称式分布,边跨的索力对 ZK 单线荷载和 ZK 双线荷载的敏感性小于中跨索力。计算得到在 ZK 单线活载作用下边跨的索力最小增加 119.3 kN,中跨索力最大增加 345.1 kN。在 ZK 双线活载作用下边跨的索力最小增加 230.6 kN,中跨索力最大增加 676.4 kN。



(a) ZK 单线

(b) ZK 双线

图 6 ZK 单线与 ZK 双线活荷载作用下结构应力图

Fig. 6 Structural stress diagram under ZK single line live loads and ZK bilinear live loads

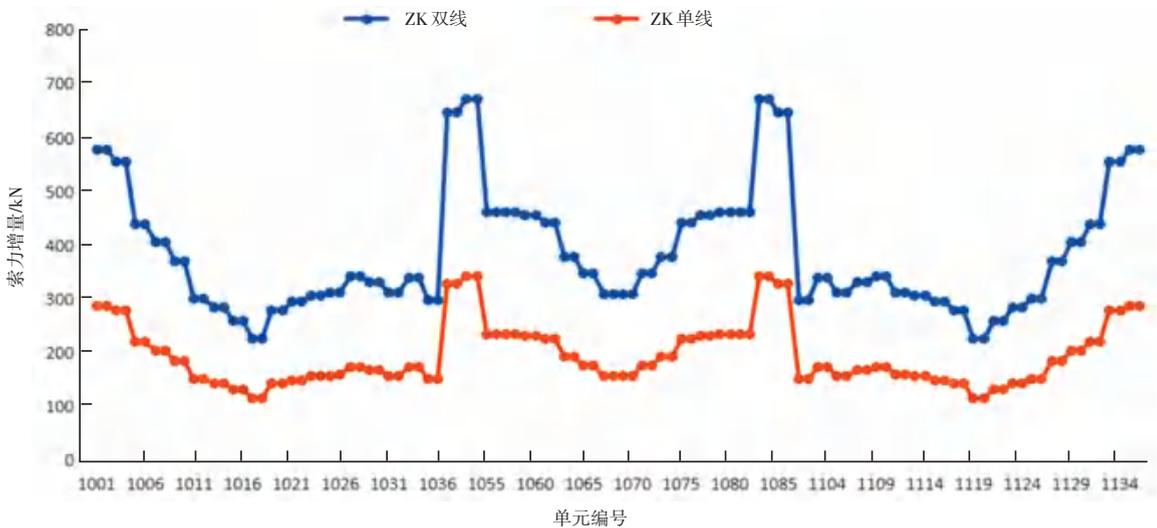


图 7 ZK 单线 ZK 双线活荷载作用下索力增量图

Fig. 7 Diagram of the cable force increment action under ZK single line ZK double line live load

## 2.4 矮塔斜拉桥在温度荷载作用下有限元模型力学特性分析

在桥梁的运营过程中,其温度会受到四季温差的制约,其中季节性温差主要涉及到整体的温度上升和下降。在此基础上对某预应力混凝土连续梁桥进行了温度效应有限元仿真分析,得出不同时间内各截面的温度场分布规律及内力变化情况。在考虑季节性温差荷载时,按照整体升温  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和降温  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的标准进行计算,研究讨论了温度变化如何影响桥梁的竖向位移、应力以及斜拉索的索力<sup>[11]</sup>。

### 2.4.1 温度荷载作用下结构位移分析

温度荷载作用下结构位移如图 8 所示。分析图 8 可以得到,在温度荷载影响下主梁挠度在有限元模型中呈现出对称的分布模式。与边跨相比,中塔位置的挠度对温度荷载的反应更为敏感。在温度荷载作用下,中塔位置的竖向变形对温度荷载的敏感性大于边跨。当整体升温时中塔最大竖向位移为

$22.9\text{ mm}$ ,当整体降温时中塔最大竖向位移为  $-22.9\text{ mm}$ ,同样在正负温差作用下主梁位移为  $13.3\text{ mm}$ 。

### 2.4.2 温度荷载作用下结构应力分析

结构整体升温与降温应力如图 9 所示。分析图 9 可以得到,同样在温度荷载作用下中塔位置的应力对温度荷载的敏感性大于边跨。当整体升温时最大应力为  $0.28\text{ MPa}$ ,当整体降温时最大应力为  $0.04\text{ MPa}$ 。

### 2.4.3 温度荷载作用下斜拉索索力分析

温度荷载作用下索力增量如图 10 所示。由图 10 可知,有限元模型在温度荷载的作用下斜拉索索力均呈对称式分布,与中跨索力相比,边跨索力对温度荷载的反应更为敏感。当整个结构温度上升时,边跨索力的最大值下降了  $83.9\text{ kN}$ ,中跨索力减少增加  $31.3\text{ kN}$ 。当结构体降温时,边跨索力最大增加  $83.9\text{ kN}$ 。中跨索力最大增加  $31.3\text{ kN}$ 。

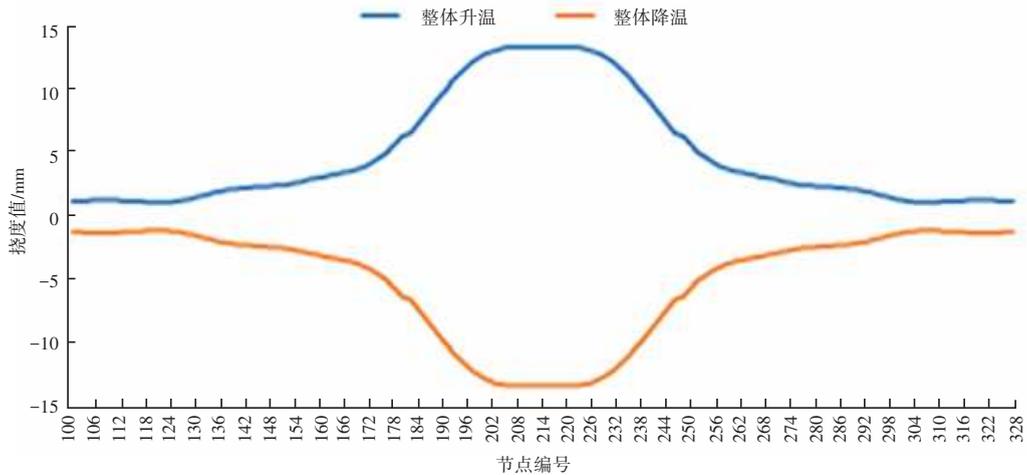
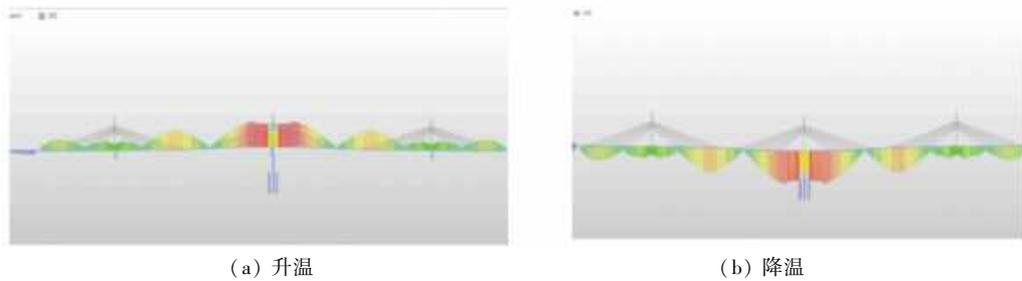


图8 温度荷载作用下结构位移图

Fig. 8 Structural displacement under temperature loads



(a) 升温

(b) 降温

图9 结构整体升温与降温应力图

Fig. 9 Stress diagram for overall structure warming and cooling of the structure

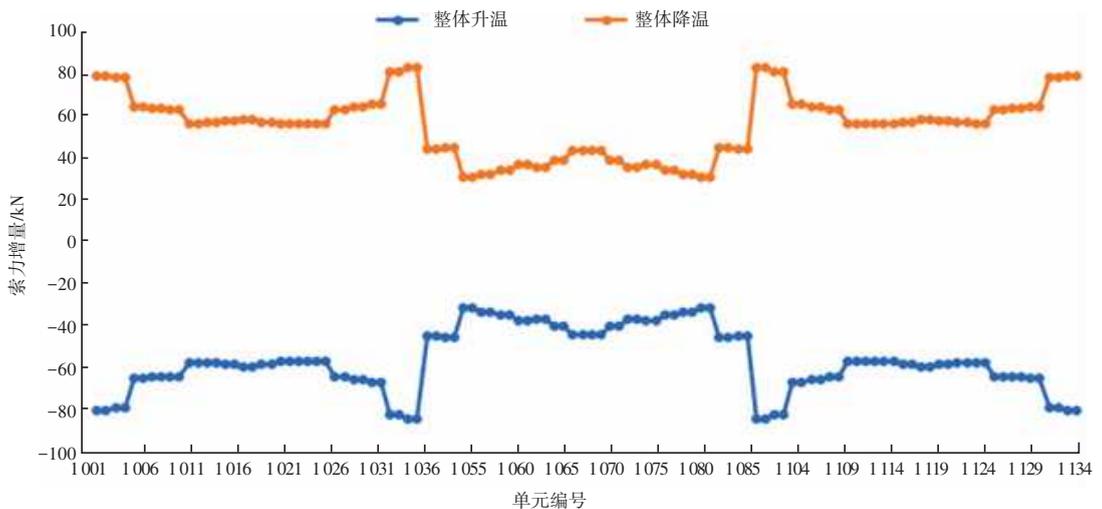


图10 温度荷载作用下索力增量图

Fig. 10 Plot of the incremental cable force under temperature loading

## 2.5 矮塔斜拉桥荷载组合作用下有限元模型力学特性分析

考虑到桥梁在实际通车运营的过程中可能遭遇的荷载组合工况,进行了详细的计算和分析,确定了位移、应力等重要数值,这为传感器的布局设计以及确定各个监测项目的阈值和权重提供了坚实的基础<sup>[12-14]</sup>。结合桥梁正式通车运营的具体状况,对2

种荷载组合方法进行了研究。荷载组合具体见表2。

表2 荷载组合表

Table 2 Load combination table

荷载类型	荷载工况
荷载组合一	横向摇摆力 ZK 双线 支座沉降
荷载组合二	横向摇摆力 ZK 双线 支座沉降 温度荷载

### 2.5.1 荷载组合作用下结构位移分析

荷载组合作用下结构位移如图 11 所示。分析图 11 可以得到,在组合荷载影响下,有限元模型显示主梁的挠度呈现出对称的分布模式。在荷载组合

一和荷载组合二的作用下,主梁所产生的最大竖向位移主要集中在主跨的中间部分。当主梁受到荷载组合一的作用时,最大位移达到 157.22 mm,而在荷载组合二的作用下,最大位移则是 180.59 mm。

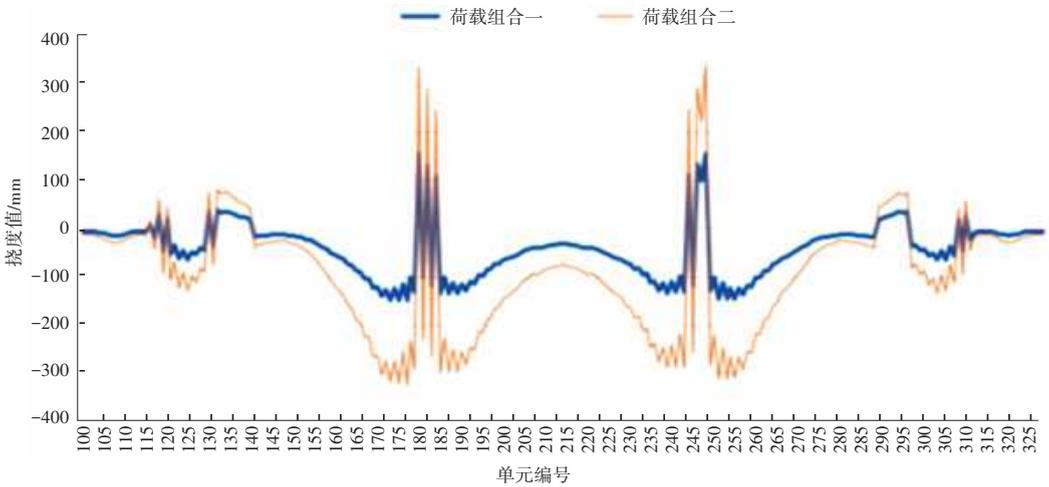


图 11 荷载组合作用下结构位移图

Fig. 11 Structural displacement under load combinations

### 2.5.2 荷载组合作用下结构应力分析

在荷载组合一和荷载组合二的影响下,主梁的应

力值会随着荷载的逐渐增加而上升,而与之相反,下缘的应力值则会相应地下降。主梁的计算结果见表 3。

表 3 主梁计算结果

Table 3 Calculation results of main beam

荷载类型	上缘应力/MPa		下缘应力/MPa		主应力/MPa	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
荷载组合一	12.78	2.03	11.88	1.77	12.78	-0.74
荷载组合二	16.01	0.42	12.99	0.96	16.01	-1.36

### 2.5.3 荷载组合作用下斜拉索索力分析

荷载组合作用下索力值如图 12 所示。分析图 12 可以得到,斜拉索索力值的变化趋势在各荷载组

合作用下随着荷载的增加,索力值也随之增大。在组合荷载一的作用下索力值最大为 8 138 kN,在组合荷载二的作用下索力值最大为 8 577 kN。

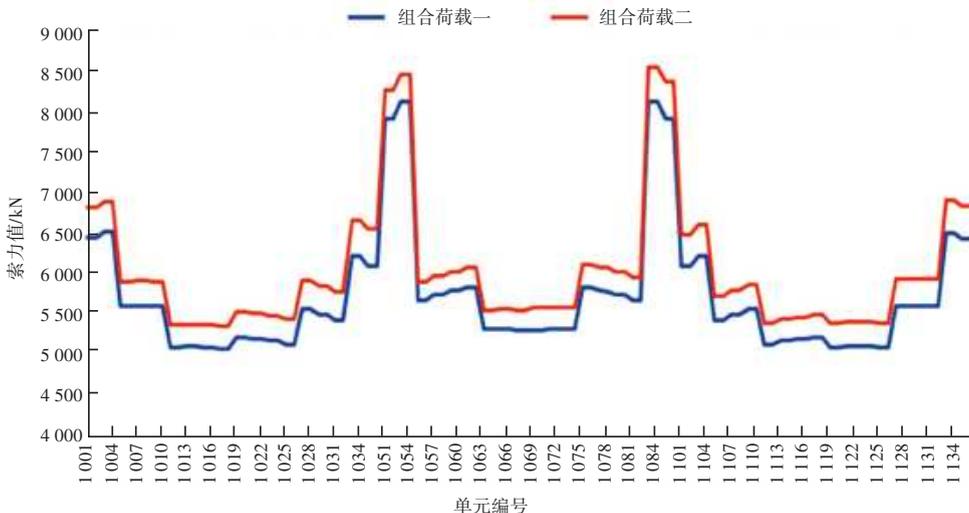


图 12 荷载组合作用下索力值

Fig. 12 Cable force value under load combination

### 3 矮塔斜拉桥结构动力特性分析

前10阶自振频率见表4。分析表4数据,可以得出前10阶自振频率和振型特征:由于边墩采用纵向活动支撑,因此全桥首先呈现纵向飘移的振型;在成桥状态下,主梁的前10阶振型均未出现扭转,说明主梁在竖向刚度和扭转刚度方面具有较高值,从而确保了结构的良好稳定性<sup>[15-17]</sup>。斜拉桥1~10阶振型如图13所示。

表4 前10阶自振频率

Table 4 First 10 orders of self-oscillation frequency

振型阶数	频率/Hz	周期/s
1	0.351	2.849
2	0.371	2.696
3	0.463	2.161
4	0.577	1.734
5	0.591	1.691
6	0.647	1.546
7	0.746	1.341
8	0.761	1.313
9	0.797	1.254
10	0.808	1.238

通常,桥梁的10阶振型图最重要的是前几阶振

型,尤其是第1阶和第2阶振型,因为其反映了桥梁在最基本动态荷载情况下的响应特性。这些振型对桥梁的安全性评估和维护计划制定尤为关键<sup>[18-20]</sup>。第1阶振型,反映了桥梁结构在最低自然频率下的振动模式,即桥梁在受到最常见的动态荷载作用时,可能表现出的最基本变形模式。需要对表现出最大位移的区域,如桥面中央、桥塔和接缝处进行重点检查,因为这些部位在第1阶振型中容易受到较大的应力。根据图13中第1阶振型图可知,桥面在中央的振幅最大,而向两端递减,这表明桥梁的中央部分相比两端部分拥有较低的结构刚度。第2阶振型展现了桥梁结构在次低自然频率下的振动模式。相比于第1阶,第2阶振型可能会揭示结构在不同方向上的弱点和应力集中区域。特别注意那些在第2阶振型中显示出显著变形或应力集中的部位,因为这些区域可能在特定的动态荷载作用下更易损坏。由于主梁在第2阶振型中显示出侧向位移,该区域应成为维护和检查的重点,着重关注的则是连接件和支座等部件。虽然第1阶和第2阶振型在桥梁分析中最为关键,但其他高阶振型也有助于识别桥梁在不寻常情况下(如大风、地震时)可能遇到的结构问题。

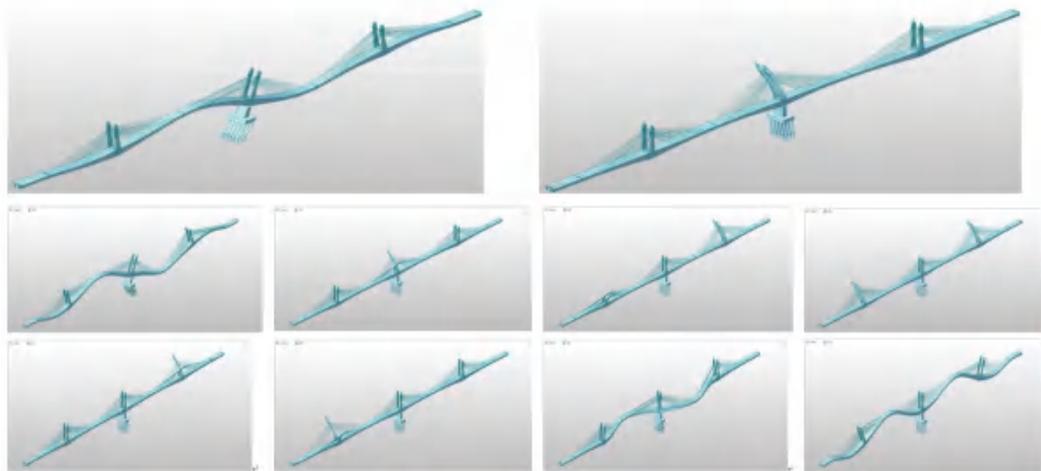


图13 斜拉桥1~10阶振型图

Fig. 13 Diagram of the first-order to tenth-order vibration pattern of cable-stayed bridge

### 4 结束语

(1)由第1阶振型图知,桥面在中央的振幅最大,而向两端递减,桥梁的中央部分相比两端部分拥有较低的结构刚度。在反对称弯曲模式下,振动能量在桥梁的结构中不是均匀分布的,这可能会导致

某些区域受力比其他区域更大。因此在桥梁设计时,需要对此加以考虑以确保结构的强度和稳定性。

(2)斜拉索不仅承担垂直荷载,还要抵抗水平方向的荷载(如风荷载和地震力)。因此,斜拉索的配置和预应力调整至关重要,以确保索力分配均匀,避免局部过载。根据上述有限元分析可得出,应在

中跨跨中区和边跨尾索区的桥面配置纵向预应力,以提高桥面板顺桥向的抗裂性能。

(3)桥梁在服务过程中,会因为混凝土的自然收缩、徐变、以及温度变化而受到影响。这些影响会在桥面板中产生横向拉应力,尤其是在边主梁附近,由于主梁刚性的局部效应,这种拉应力可能更加显著。如果恒载阶段的压应力储备较小、或者存在拉应力,那么在各类荷载共同作用下,桥面板的横向应力叠加可能会超过混凝土的抗拉强度,从而导致裂缝的产生。因此,为了提高桥梁横向的抗裂性能,需要在全桥范围内配置横向预应力。这种预应力不但可以提前补偿由于收缩、徐变和温度变化等因素产生的拉应力,还可以提高桥面板在各种荷载作用下的整体稳定性和耐久性。同时,也对高速铁路斜拉桥这类具有复杂动态行为和受力特点的桥梁尤为重要。

## 参考文献

- [1] 杨圣洁,邓年春,王晓琳,等. 拱桥吊索检测技术研究与应用[J]. 西部交通科技,2021(9):81-85.
- [2] 招启嵩,温敏韬. 某内河航道桥抗船撞安全性能评估分析[J]. 公路,2023,68(4):203-207.
- [3] 卢春房,班新林. 以检测技术为基础做好铁路桥梁健康管理[J]. 中国铁路,2021(9):11-17.
- [4] 郭东升. 简支转连续桥梁支点截面应力测试与研究[J]. 安徽建筑,2022,29(4):142-143.
- [5] 王少钦,万幸,王孝通,等. 大跨度斜拉桥在车辆动力加载作用下的振动响应计算与监测[J]. 科学技术与工程,2023,23(31):13556-13565.
- [6] 姚勇. 桥梁工程计算机辅助设计[M]. 重庆:重庆大学出版社,2019.
- [7] 曾宪营,王岳松,蒋田勇. 四柱式桥墩盖梁内力影响因素分析[J]. 中外公路,2023,43(5):104-108.
- [8] 卢思吉,刘矗东,张志强,等. 基于不同收缩、徐变模型的钢筋加劲混凝土连续刚构桥短期行为研究[J]. 建筑结构,2020,50(S1):752-756.
- [9] 孙英琳. 大跨度连续刚构桥下挠机理及预警研究[D]. 济南:山东大学,2023.
- [10] 杨梦月. 某矮塔斜拉桥结构验算及动力特性分析[J]. 四川建筑,2019,39(2):216-219.
- [11] 张溢洋,张辉,武铁路. 大跨度高铁两用斜拉桥钢主梁设计方案对比分析[C]//2022年工业建筑学术交流会. 北京:东北林业大学土木工程学院,中铁十六局集团有限公司北京轨道交通工程建设有限公司,2022:500-504.
- [12] 程瑞. 钢-混组合梁预制桥面板环形钢筋接头力学性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- [13] 杨辉. 基于 Midas 有限元分析的大跨斜拉桥成桥索力优化[J]. 城市道桥与防洪,2024(2):62-66.
- [14] 余磊. 独塔曲线斜拉桥地震响应分析及减隔震研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2023.
- [15] DAUD S A, DAUD R A, AL-AZZAWI A A. Behavior of reinforced concrete solid and hollow beams that have additional reinforcement in the constant moment zone [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021,12(1):31-36.
- [16] 陶友海. 黑木沟大桥悬臂挂篮结构施工有限元分析[J]. 施工技术(中英文),2021,50(22):65-68.
- [17] 肖庆,毛新莹,杨建华,等. 基于 Midas 的超大型双曲线型冷却塔结构有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(S2):176-180.
- [18] QI Dongchun, CHEN Xinghua, ZHU Yiwen, et al. A new type of wind-resistance cable net for narrow suspension bridges and wind-resistance cable element for its calculation [J]. Structures, 2021, 33: 4243-4255.
- [19] LANGLEY R. Tower road bascule bridge [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2022, 175(3):199-209.
- [20] 侯孝振. 基于 MIDAS Civil 的某跨河钢便桥设计验算有限元分析[J]. 安徽建筑,2021,28(7):176-177.