

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.005

# 双塔单索面人行钢斜拉桥的设计与受力分析

蒋逸凡<sup>1</sup>, 唐瑜<sup>2</sup>, 章建彬<sup>3</sup>

(1. 福建工程学院 设计学院·海峡工学院, 福建 福州 350118;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116;

3. 厦门市市政工程设计院有限公司, 福建 厦门 361008)

**摘要:**以某双塔单索面人行钢斜拉桥为对象,采用 Midas Civil 建立全桥空间杆系有限元模型,进行恒载、活载和承载能力极限状态作用下结构受力性能分析,同时开展该桥的动力特性分析。研究表明:对于该异形斜拉桥,活载引起的主梁和主塔弯矩效应较恒载作用下的结果更加显著;承载能力极限状态作用下,该桥主梁、主塔、斜拉索等主要承重构件的最大应力均小于材料容许应力,满足规范要求;动力特性分析结果表明主梁面内刚度和主塔面外刚度较小,此外遮阳棚的局部振动在高阶振型中所占比例较大,在地震作用下可能发生破坏;该桥的一阶竖向自振频率为 1.92 Hz,不满足现行规范要求,建议采取有效的减振措施来控制人致振动响应。

**关键词:**斜拉桥;人行桥;有限元;受力性能;动力分析

**中图分类号:** U443.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2022)06-0537-07

## Design and mechanical analysis of a double-tower single-plane steel cable-stayed bridge for pedestrians

JIANG Yifan<sup>1</sup>, TANG Yu<sup>2</sup>, ZHANG Jianbing<sup>3</sup>

(1. School of Design · Straits College of Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

3. Xiamen Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Xiamen 361008, China)

**Abstract:** A double-tower single-cable plane pedestrian steel cable-stayed bridge was taken as the research object to establish a full-bridge spatial member finite element model with Midas Civil, so that mechanical performance can be conducted under the action of dead load, live load and bearing capacity limit state. Meanwhile, the dynamic characteristics analysis was carried out. Research shows that for this kind of special-shaped cable-stayed bridge, the bending moment effect of the main girder and the main tower caused by the live load was more significant than those of the dead load. The maximum stresses of the main load-bearing components, such as the main girder, the main tower, and stay cables, under the ultimate bearing capacity state were lower than the allowable stress of the material, which meets the requirements of the specification. The dynamic characteristic analysis results demonstrate that the in-plane stiffness of the main girder and the out-plane stiffness of the main tower were relatively small. In addition, the local vibration of the sunshade accounted for a large proportion in the high-order vibration mode, which would suffer damage under the action of earthquakes. The first-order vertical natural vibration frequency of the bridge was 1.92Hz, which did not meet the requirements of the current specification. It is recommended to take effective vibration reduction measures to control the human-induced vibration response.

**Keywords:** cable-stayed bridge; pedestrian bridge; finite element; mechanical performance; dynamic analysis

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 福建省交通运输科技项目(202034)

第一作者简介: 蒋逸凡(1986—),女,江苏淮安人,助教,硕士,研究方向:计算机辅助设计、环境设计。

异形斜拉桥与传统斜拉桥相比,通常是在主塔形式和拉索布置形式上进行创新变化,如主塔倾斜布置、主塔形状、拉索布置空间化、不对称化等<sup>[1-2]</sup>。目前异形斜拉桥多应用于中小跨径的市政桥梁。李志刚等<sup>[3]</sup>探究了一种简洁有效的异形钢结构人行桥主梁模拟方法。董宇航等<sup>[4]</sup>采用有限元方法开展了某蝴蝶兰异形拱塔斜拉桥的受力分析。张永健等<sup>[5]</sup>分析了某双肢人字形独塔斜拉桥在整体温度效应作用下主梁、主塔与副塔结构的应力分布情况。单索面斜拉桥的斜拉索往往集中布置在桥面中心线上,从桥梁美学角度来看,拉索布置简洁明了、桥面视野开阔,避免了常规斜拉桥拉索交错凌乱的视觉缺陷;但从力学角度来看,斜拉索对主梁抗扭不起作用,要求主梁采用抗扭刚度较大的截面<sup>[6]</sup>。杜鑫<sup>[7]</sup>、杨吉新<sup>[8]</sup>开展的双塔单索面混凝土斜拉桥的受力分析表明此类桥梁受力状态合理,应用前景比较广阔。

本研究以厦门市某双塔三跨单索面人行斜拉桥为对象,通过全桥杆系有限元建模分析,探究异形斜拉桥成桥时在恒载和人群荷载作用下的力学行为,并开展全桥动力分析,相关研究成果可为此类异形斜拉桥的设计提供参考。

1 桥梁设计概况

本研究对象位于厦门市环东海域新城,在进行桥梁的设计时,为了融合滨海浪漫风格,使其与周边海上建筑有机衔接,营造出造型优美、尺度宜人、高度人性化的慢行环境。如图 1 所示,该桥采用双塔三跨单索面钢斜拉桥的设计方案,从侧面看形似一艘帆船,全长 171 m,跨径布置为(46+72+46)m。桥梁标准段总宽 8.23 m,其中桥面净宽 6 m,设单向 2%横坡。主梁采用钢箱梁结构,标准段顶板宽 7.01m,底板宽 4 m,箱内设置 2 道腹板。箱梁顶板厚 16 mm,底板厚 16 mm,腹板厚 16 mm。主梁中心线的曲率半径为3 000 m。桥下无航运要求,仅以游船、快艇通行需求,设计按照平均潮水位 0.33 m 标高预留 6.61~8.36 m 净高运行空间。桥塔高 30.25 m,塔底端断面长 2.5 m、宽 1.7 m,采用直线型变截面。桥塔采用梭型箱型截面,壁厚 80 mm。在桥塔间距设置横隔板,横隔板厚 16 mm。塔上对应拉索的锚固位置设置耳板。桥塔基础采用群桩基础,承台尺寸 6.2 m×10.2 m×3.0 m,布置 6 根直径 1.2 m 的嵌岩桩。

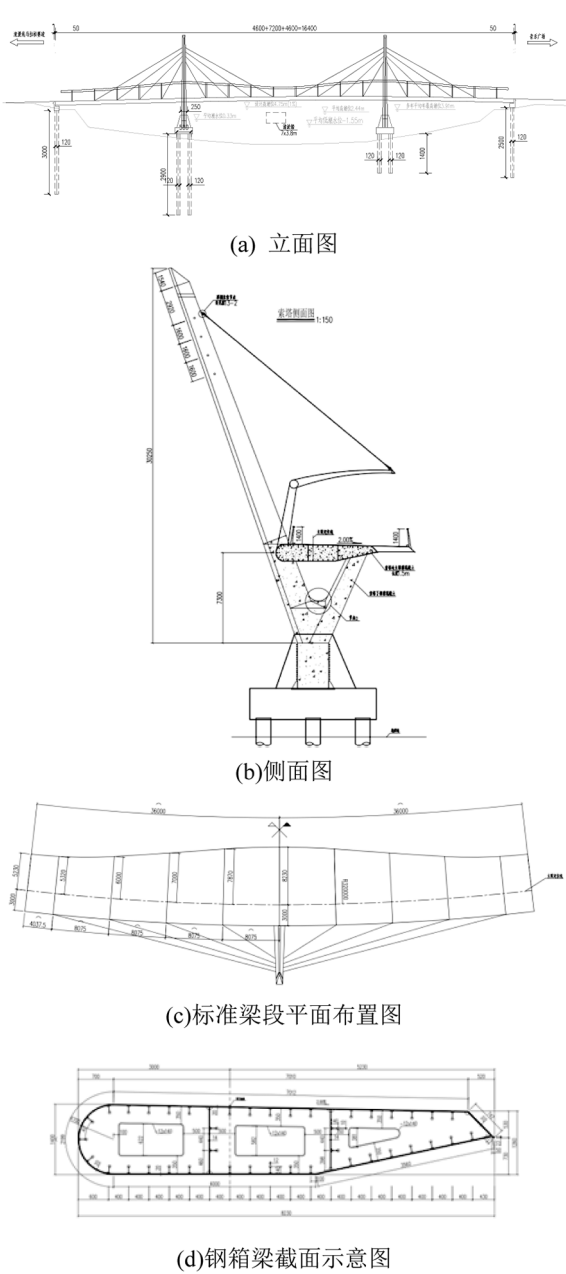


图 1 斜拉桥结构布置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the structural layout of the cable-stayed bridge (unit: mm)

与传统斜拉桥不同的是,本桥主桥单侧布置索塔及斜拉索,共设置两索塔,每索塔 8 根拉索,共 16 根拉索,斜拉索一端锚固在桥塔上,另一端锚固在主箱梁上,斜拉索的基本间距 8.06 m。主桥斜拉索及顶棚拉索采用全封闭高钒索,主桥斜拉索直径为 90 mm,顶棚拉索直径为 26 mm,拉索抗拉强度为 1 770 MPa。

桥梁顶棚总长 156 m,为契合滨海环境,顶棚平面及立面均呈波浪型,为镂空钢格栅形式,观景

台处局部覆盖铝单板。立柱高度由 5.54 m 渐变到 4.04 m,出挑长度由 8.17 m 渐变到 2.86 m。

主梁及主塔采用 Q345qD,顶棚采用 Q355B 钢材,承台、桥台盖梁、桥墩采用 C40 混凝土,桩基、桥塔与主梁内部填充的混凝土均采用 C35 混凝土。桥台处设置盆式橡胶支座。主塔、主梁、墩柱外观均涂装处理,颜色与周边环境相协调,采用 RAL 7035,光泽度 70。

## 2 有限元模型

采用桥梁计算专业软件 MIDAS/Civil 建立了上述双塔单索面人行钢斜拉桥的空间杆系有限元计算模型。本研究的重点为该类异形桥梁的受力特性,因此在计算模型中,采用梁单元模拟钢索塔与钢箱梁,用桁架单元模拟斜拉索,用板单元模拟遮阳棚。主梁、主塔与墩顶通过刚性连接模拟,两边跨端约束其竖向、横向平动自由度和纵向、竖向转动自由度;参照既有研究<sup>[9]</sup>,主塔承台往下 3 倍桩基直径处固结,以防止塔底应力过大。全桥共 261 个单元、217 个节点,全桥有限元模型如图 2 所示。恒载包括结构自重和桥面铺装。结构自重通过程序自动计算,其中混凝土容重 25 kN/m<sup>3</sup>,钢材 78.5 kN/m<sup>3</sup>。桥面铺装按照 0.2 kN/m<sup>2</sup> 计算。根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11-2011)<sup>[10]</sup> 的有关规定,人群荷载取值 3.9 kN/m<sup>2</sup>。



图 2 MIDAS/Civil 全桥模型

Fig.2 Full bridge model by MIDAS/Civil

## 3 静力分析

### 3.1 恒载作用

恒载作用下双塔单索面人行斜拉桥的内力和关键构件的应力分别如图 3、图 4 所示。由于全桥关于中跨跨中对称,图中仅示意了一半结构的分析结果。本研究的轴力或应力以受拉为正、受压为负。由图 3(a)可知,恒载作用下,双塔单索面斜拉桥的主梁轴力较小,可忽略不计;主塔底部轴压力较大,最大为 13 583 kN。由图 3(b)可知,

与主塔交界处的主梁根部负弯矩最大,可达 -2 656 kN·m,而主跨主梁弯矩均较小,但边跨靠近桥台处主梁正弯矩为 1 569 kN·m;主塔中下部弯矩较大,最大为 -2 643 kN·m。

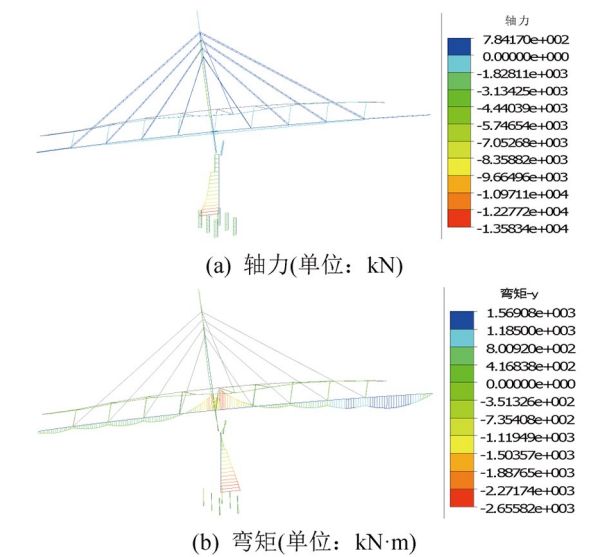


图 3 恒载作用下结构内力图

Fig.3 Internal force diagram under dead load

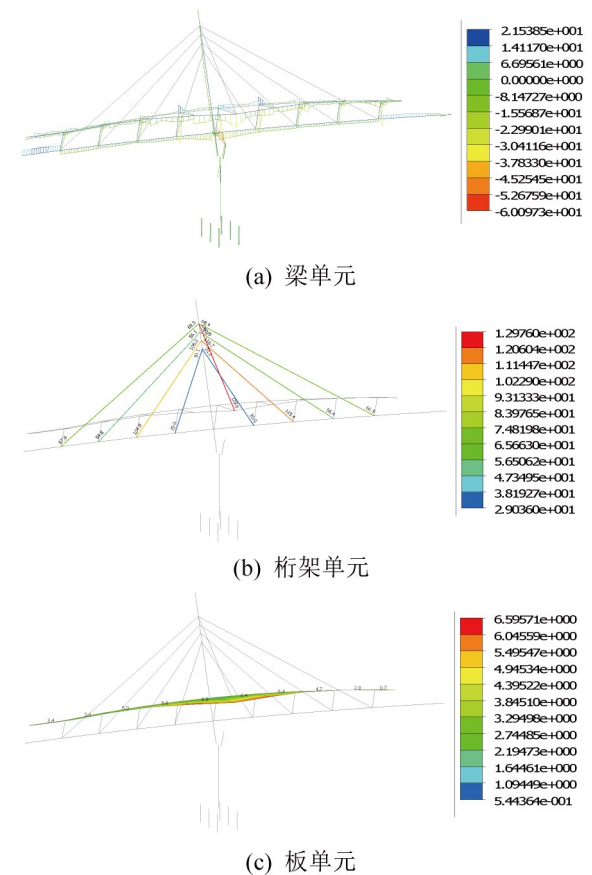


图 4 恒载作用下结构应力云图 (单位:MPa)

Fig.4 Stress contour under dead load (unit: MPa)

从图 4 可以知道,恒载作用下,该斜拉桥的钢主梁在主塔处压应力最大为 21.6 MPa、在主跨跨中处拉应力最大为 14.7 MPa;主塔塔身应力分布比较平均,最大压应力为 13.2 MPa,出现在最下一对拉索与遮阳棚之间的位置;遮阳棚内侧立柱根部压应力最大为 60.1 MPa、拉应力最大可达到 21.5 MPa;靠近主塔侧的第二根斜拉索的拉应力最大为 118.0 MPa,横桥向斜拉索最大拉应力为 129.8 MPa;遮阳棚最大应力为 6.6 MPa。此外,该斜拉桥基本不产生 X 向水平位移,以 Y 向和竖向位移为主,其中遮阳棚因自重作用在其边缘产生最大 Y 向位移为-12.5 mm、竖向位移为-23.4 mm。

由上述分析可知,恒载作用下双塔单索面斜拉桥的受力最不利位置主要在遮阳棚内侧立柱根部、主梁根部和主塔底部。

3.2 活载作用

活载作用下双塔单索面人行斜拉桥的内力、应力和竖向位移分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

由图 5(a)可知,活载作用对该斜拉桥主梁和主塔的轴力影响较小,增加比例约为恒载作用的 5%;但由图 5(b)可知,主梁主跨跨中截面弯矩效应为 326/-1094 kN·m,主梁根部截面弯矩为 293/-2 034 kN·m,主塔底部截面弯矩为 3 106/-2 455 kN·m。与恒载引起的弯矩相比,此类异形斜拉桥因活载产生的弯矩效应更加显著。

由图 6 可知,活载作用下,主梁在主塔处压应力最大为 10.5 MPa、在主跨跨中处拉应力最大为 5.8 MPa;主塔根部压应力最大为 7.9 MPa;遮阳棚内侧立柱根部压应力最大为 16.0 MPa;遮阳棚最大应力为 2.1 MPa;远离主塔的最外侧斜拉索的拉应力最大为 10.5 MPa。

由图 7 可知,活载作用下主跨最大下挠度为-10.1 mm,最大上挠度为 5.3 mm,最大挠跨比为 1/4 675;主跨最大下挠度为-6.2 mm,最大上挠度为 4.1mm,最大挠跨比为 1/4 466。即,主梁主跨和边跨的挠度均远小于规范限值要求  $L/500$  ( $L$  表示计算跨径)。

3.3 承载能力极限状态

按照《城市桥梁设计规范》<sup>[9]</sup> 规定,对该双塔单索面人行钢斜拉桥在承载能力极限状态持久状况作用下的受力性能进行分析验算,得到该桥钢构件的应力云图,如图 8 所示。分析结果表明,在承载能力极限状态荷载组合作用下,主梁最大拉

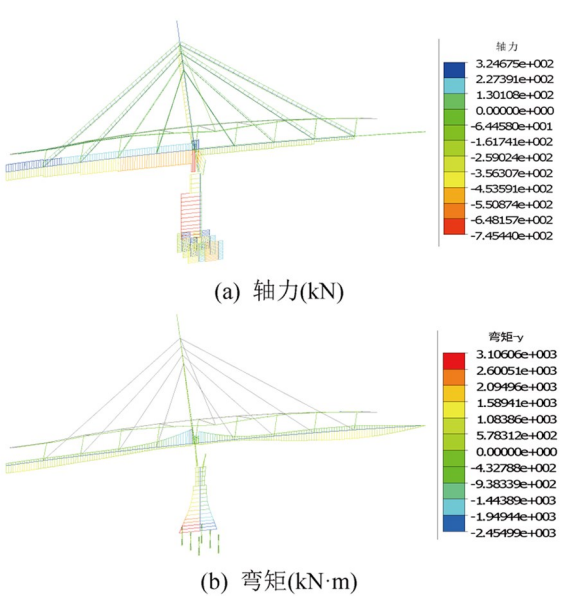


图 5 活载作用下结构内力图

Fig.5 Internal force diagram under live load

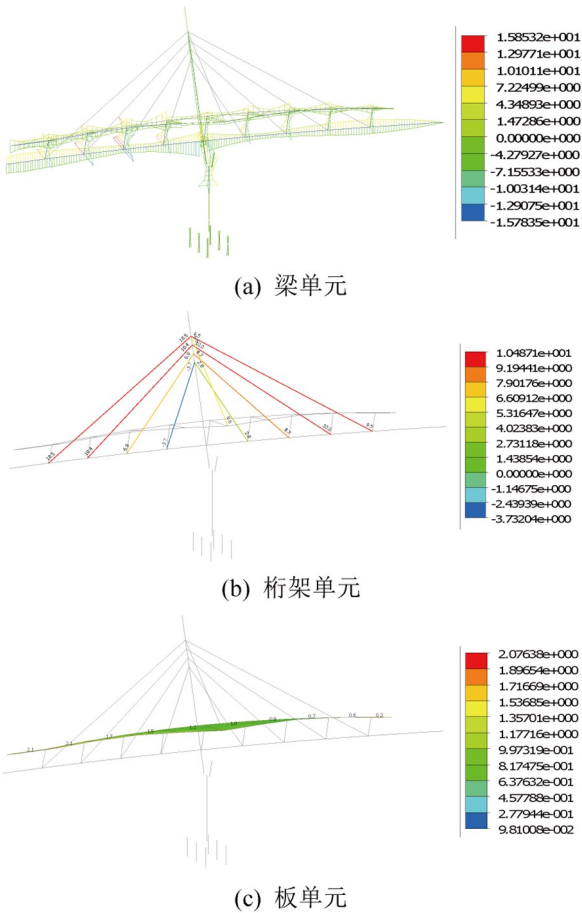


图 6 活载作用下结构应力云图 (单位:MPa)

Fig.6 Stress contour under live load (unit: MPa)



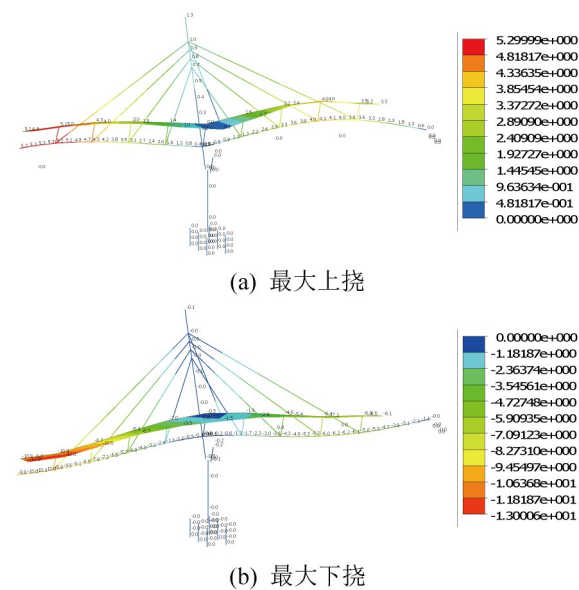


图 7 活载作用下结构竖向变形图 (单位:mm)

Fig.7 Vertical deformation contour under live load (unit: mm)

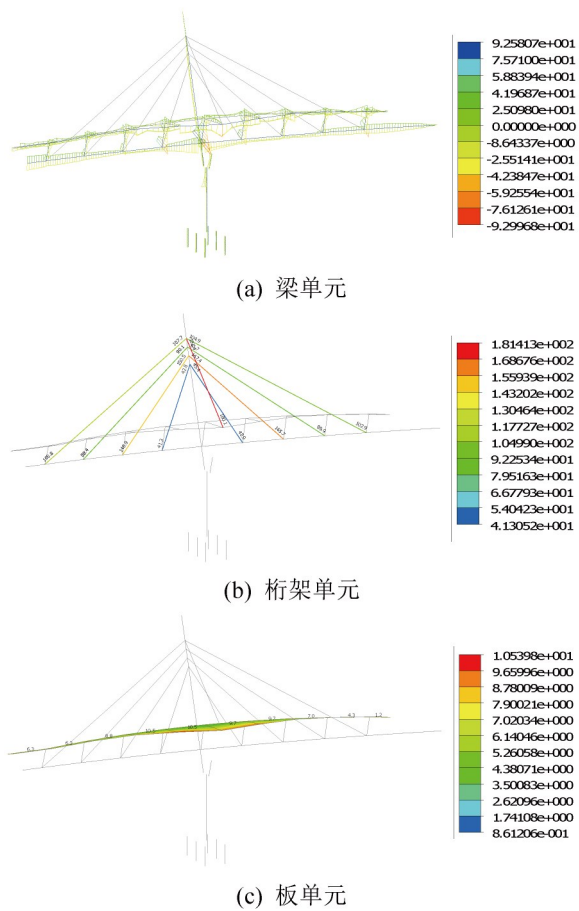


图 8 承载能力极限状态下结构应力云图 (单位:MPa)

Fig.8 Stress contour under the ultimate state of bearing capacity (unit: MPa)

应力为 28.4 MPa、最小压应力为 40.8 MPa;主塔最小压应力为 30.3 MPa,未出现拉应力;遮阳棚内侧立柱最大拉应力为92.6 MPa,最小压应力为 93.0 MPa;斜拉索最大拉应力为 168.0 MPa。综上可知,该双塔单索面人行钢斜拉桥的主梁、主塔、遮阳棚、斜拉索的最大应力均小于材料容许应力,满足规范要求。

4 动力分析

对该双塔单索面人行钢斜拉桥进行动力特性分析时,在 MIDAS/Civil 软件设置中采用 Lanczos 算法求解结构的特征值问题。为了使各振型参与质量之和达到 95%,共计算了 100 阶振型,表 1 和表 2 则分别列举了前 5 阶的振动频率和振型参与质量,图 9 和图 10 分别展示了有无遮阳棚时桥梁前 5 阶的振动模态。

表 1 桥梁前 5 阶频率和振型参与系数						
Tab.1 First five orders of frequencies and mode participation coefficients of the bridge						
频率/ Hz	振型参与质量系数/%					
	TRAN	TRAN	TRAN	ROTN	ROTN	ROTN
	-X	-Y	-Z	-X	-Y	-Z
1.92	0	0.04	0.26	2.34	0	0
2.54	14.31	0	0	0.01	12.73	1.43
2.64	0.01	13.38	0.03	39.95	0.01	0
2.77	3.63	0.01	0	0.02	1.81	6.74
3.59	0.12	0.02	0.18	0.03	0.43	0.02

表 2 无遮阳棚时桥梁前 5 阶频率和振型参与系数						
Tab.2 First five orders of frequencies and mode participation coefficients of the bridge without sunshade						
频率/ Hz	振型参与质量系数/%					
	TRAN	TRAN	TRAN	ROTN	ROTN	ROTN
	-X	-Y	-Z	-X	-Y	-Z
1.91	0	0.02	0.23	2.17	0	0
2.54	14.11	0	0	0	12.37	1.23
2.69	0	12.4	0.12	39.73	0	0
2.80	3.11	0.01	0	0.02	2.03	6.53
3.98	41.43	0.05	0.22	0.02	4.91	0.89

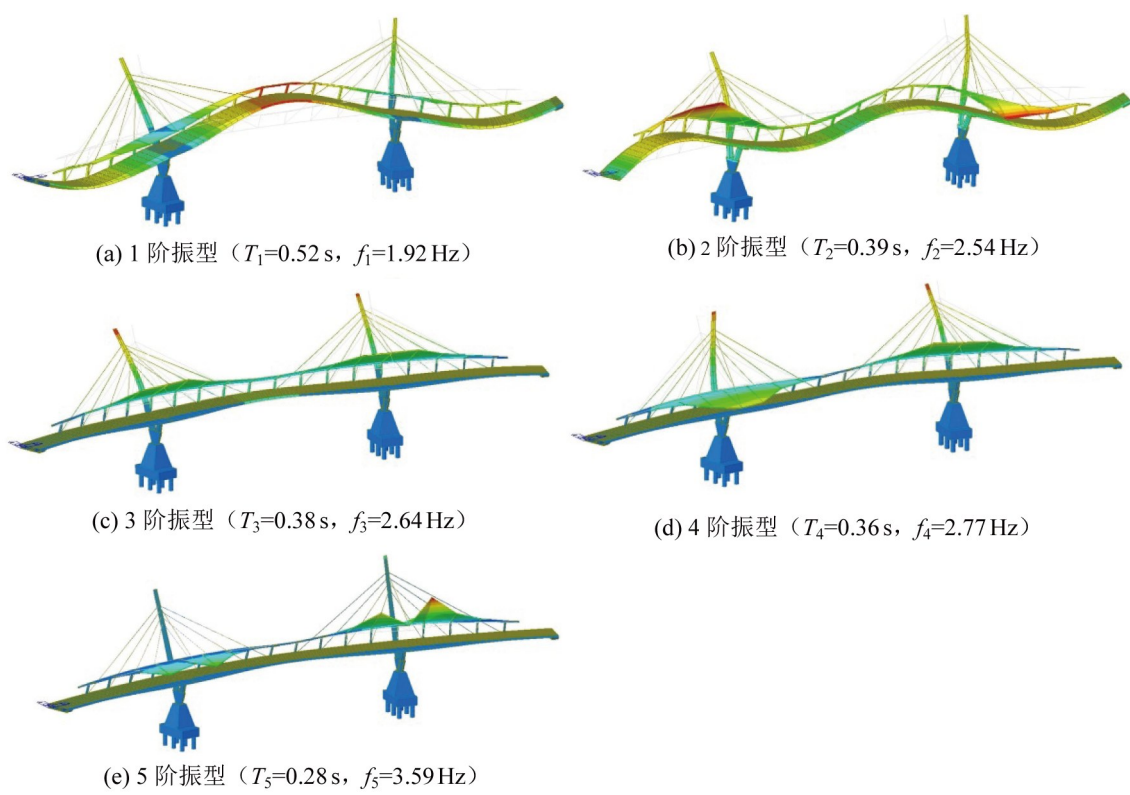


图 9 双塔单索面斜拉桥的振动模式

Fig.9 Vibration modes of the double-tower single-cable-plane cable-stayed bridge

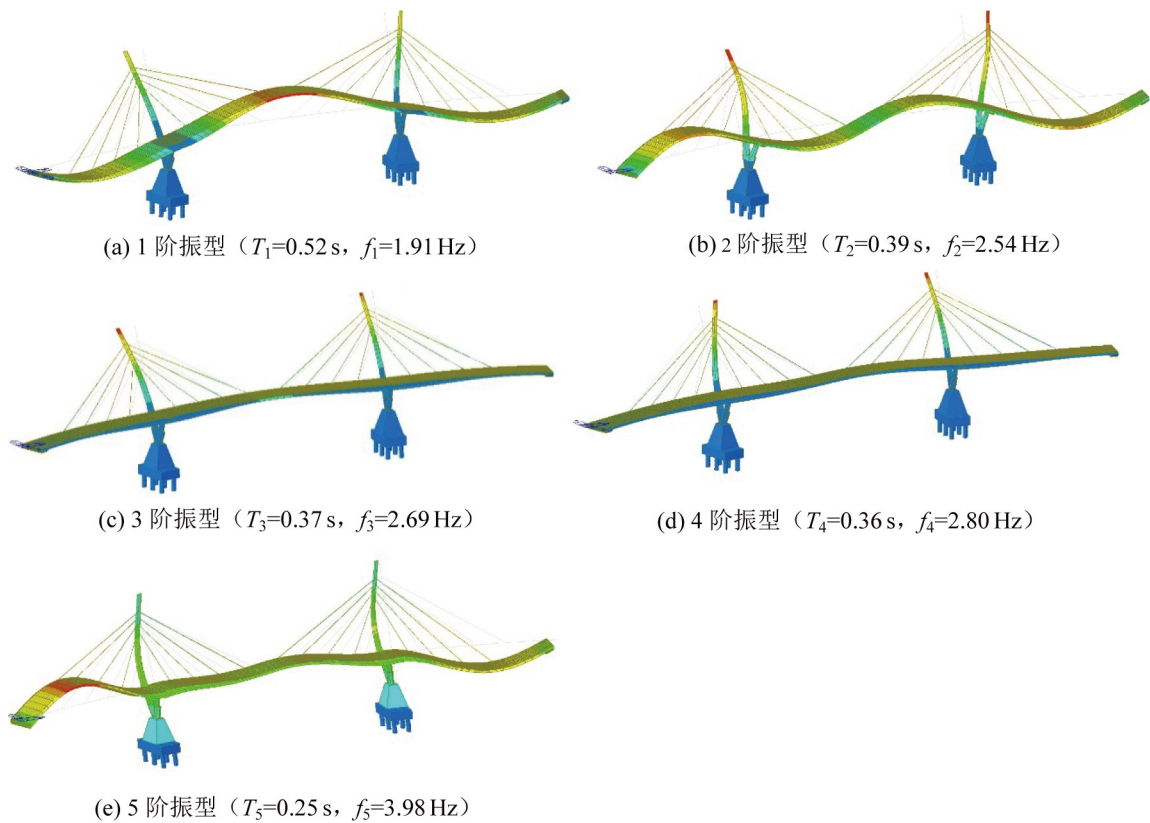


图 10 无遮阳棚时双塔单索面斜拉桥的振动模式

Fig.10 Vibration modes of the double-tower single-cable-plane cable-stayed bridge without sunshade

由图9和图10可以看出,无论主梁上是否设有遮阳棚,双塔单索面人行钢斜拉桥的第1阶振型表现为主跨主梁的一阶对称竖弯,第2阶振型表现为主梁的二阶反对称竖弯,说明主梁面内刚度较小。第3阶振型表现为钢索塔的一阶面外弯曲振动,第4阶振型表现为钢索塔的二阶面外反对称弯曲振动,说明钢索塔面外刚度较小,在面外方向地震作用下可能出现较大的变形与应力。与不带遮阳棚的动力分析结果不同,设置遮阳棚的双塔单索面人行钢斜拉桥的第5阶振型表现为遮阳棚的局部振动,说明属于附属结构的遮阳棚刚度较小,在地震作用下可能发生破坏。

此外,根据《城市人行天桥与人行地道技术规范》<sup>[10]</sup>的有关规定:“为避免共振,减少行人不安全感,天桥上部结构竖向自振频率不应小于3 Hz”。由上述分析可知,该人行斜拉桥的一阶竖向自振频率为1.92 Hz,动力特性不满足现行规范要求。由于行人步频主要集中在1.2~2.4 Hz内,要使结构自振频率与人的行走步频错开,就必须大幅提高结构自振频率,这对大跨桥梁设计既不美观也极不经济。住房和城乡建设部于2017年发布的《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》中进一步规定:“天桥结构竖向固有频率小于3 Hz,侧向固有频率小于1.2 Hz,应进行人致振动舒适度验算”,“当舒适度不能满足要求时,可通过提高结构刚度、或提高结构阻尼的措施来改善天桥的人致振动舒适度。”因此,建议该桥应采取在主梁内设置TMD减振措施来控制人

致振动加速度响应,且需要开展人致振动舒适性专项分析。

## 5 结论

1)恒载作用下,双塔单索面钢斜拉桥主塔承受较大轴力;主梁与主塔交界处负弯矩最大,而边跨靠近桥台处主梁正弯矩较主跨更为明显;遮阳棚内侧立柱根部压应力最大,达到-60.1 MPa。

2)活载作用下,双塔单索面钢斜拉桥主梁和主塔的轴力较小,但活载引起的弯矩效应较恒载作用更加显著;主梁主跨和边跨的挠度均远小于材料容许应力 $L/600$ ,满足规范要求。

3)承载能力极限状态荷载组合作用下,主梁最大拉应力为28.4 MPa、最小压应力为-40.8 MPa;主塔最小压应力为-30.3 MPa,未出现拉应力;遮阳棚内侧立柱最大拉应力为92.6 MPa,最小压应力为-93.0 MPa;斜拉索最大拉应力为168.0 MPa。桥梁各部件的最大应力均小于材料容许应力,满足规范要求。

4)双塔单索面钢斜拉桥的振动模态主要表现为主跨主梁竖弯和主塔面外弯曲振动,说明主梁面内刚度和主塔面外刚度较小。高阶振型中遮阳棚局部振动所占比例较大,说明属于附属结构的遮阳棚刚度较小,在地震作用下可能发生破坏。

5)双塔单索面人行钢斜拉桥的一阶竖向自振频率为1.92 Hz<3 Hz,动力特性不满足现行规范要求,建议采取诸如在主梁内设置TMD减振措施来控制人致振动加速度响应。

## 参考文献:

- [1] 周勇军,田瑞欣,吴领领.异形人行景观斜拉桥力学分析[J].科学技术与工程,2020,20(12):4909-4915.
- [2] 罗鹏.异形斜拉桥施工控制与力学行为研究[D].西安:长安大学,2014.
- [3] 李志刚,阳霞,任伟新.一座异形斜拉桥的动力有限元模型与验证[J].振动与冲击,2017,36(12):55-60.
- [4] 董宇航,张谢东,郭子会,等.蝴蝶兰异形拱塔斜拉桥受力研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(3):520-524.
- [5] 张永健,刘旭政,饶文真.双肢人字形独塔斜拉桥整体温度效应影响研究[J].公路,2017,62(2):65-70.
- [6] 李恩良.双塔三跨式单索面混凝土斜拉桥主梁变宽段受力分析及模型试验研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [7] 杜鑫,任正林.双塔独柱式单索面预应力混凝土斜拉桥结构设计与分析[J].北方交通,2018(7):42-47.
- [8] 杨吉新,余飞,吴爱平,等.双塔单索面曲线斜拉桥稳定性分析[J].工程与建设,2020,34(2):319-322.
- [9] 石兆敏,张启伟,季云峰.大跨钢-混凝土组合梁斜拉桥静动力特性研究[J].结构工程师,2015,31(6):158-165.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 中华人民共和国建设部.城市人行天桥与人行地道技术规范:CJJ 69—1995[S].北京:中国建筑工业出版社,1996.