

小跨径独塔单跨人行景观斜拉桥设计与研究

于长久¹, 周 维², 王智刚³

(1. 武汉设计咨询集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉市挚诚工程项目管理有限责任公司, 湖北 武汉 430000;

3. 武汉市青山区建筑管理站, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 随着我国城市不断发展, 地铁线路密度显著提升。地铁保护范围内施工作业受到了严格限制, 桥梁建设面临巨大挑战。武汉市青山公园清风桥处于地铁安全控制区内, 采用独塔单跨斜拉桥方案。桥塔设置在建设条件较好的南岸, 借助斜拉索的竖向拉力, 北侧桥台可采用扩大基础, 避免施工限制。塔梁分离体系设计优化了结构受力, 降低施工难度。创新采用塔端闭合钢锚框, 解决小尺寸塔柱内部锚固空间不足问题, 提升拉索连接可靠性。桥梁注重景观建筑设计, 与周围环境完美融合。该桥于2023年9月竣工, 桥梁运行状态良好, 取得了良好的社会效益。

关键词: 斜拉桥; 地铁安全控制区; 塔梁分离体系; 闭合钢锚框

中图分类号: U448.27; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0210-05

Design and Research of Small-span Single-pylon Single-span Cable-Stayed Pedestrian Landscape Bridge

YU Changjiu¹, ZHOU Wei², WANG Zhigang³

(1. Wuhan Design Consulting Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Wuhan Zhicheng Engineering Project Management Co., Ltd.,

Wuhan 430000, China; 3. Wuhan City Qingshan District Construction Management Station, Wuhan 430000, China)

Abstract: With the continuous development of urban areas in China, the density of metro lines has significantly increased. The construction activities within metro protection zones are subject to stringent restrictions, and the bridge construction is faced with the considerable challenges. The Qingfeng Bridge in Wuhan Qingshan Park is located within a metro safety control area, and a single-pylon single-span cable-stayed scheme is adopted. The bridge pylon is situated on the south bank, where the construction conditions are more favorable. By utilizing the vertical tension of the stayed cables, a spread foundation can be adopted for the north abutment in order to avoid the construction constraints. The design of pylon-beam separation system optimizes the structural stress and reduces the construction difficulty. The closed steel anchor frame at the pylon end is innovatively adopted to solve the problem of insufficient internal anchoring space for small-sized pylon columns and enhance the reliability of cable connections. The focus is on the landscape and architecture design of the bridge, which is blended perfectly with the surrounding environment. The bridge was completed in September 2023 and is in good operating condition, achieving good social benefits.

Keywords: cable-stayed bridge; metro safety control zone; pylon-beam separation system; closed steel anchor frame

0 引 言

随着我国城市不断发展, 地铁线路密度显著提升, 施工期地铁安全保护已成为桥梁建设需要解决的重要问题。地铁保护范围内外部施工作业受到了严格限制, 如工程桩距离地铁结构外边线不得小于3 m, 隧道结构外壁附加荷载不得大于20 kPa等, 这些限制给桥梁建设带来了极大挑战。本文以武汉市

青山公园清风桥为背景, 为解决地铁保护范围内不能施工基桩的限制因素, 提出了独塔单跨人行景观斜拉桥方案。由于小跨径单跨斜拉桥的构件尺寸较小, 其塔端拉索锚固形式及整体结构体系具有一定特殊性。景观斜拉桥塔柱多采用钢结构, 南京幸福河人行桥采用了钢桥塔, 塔身焊有耳板连接拉索, 塔身下半段灌入C40混凝土以平衡拉索拉力^[1]。叶志荣设计的某景观斜拉桥采用了混合结构桥塔, 下塔柱为钢筋混凝土结构, 中塔柱为钢结构, 上塔柱为钢混组合结构, 拉索锚固在中部钢箱塔柱内^[2]。葫芦岛市龙湾商务区人行斜拉桥采用了倾斜钢筋混凝土

收稿日期: 2025-08-06

作者简介: 于长久(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

桥塔,斜拉索在塔端通过预埋管穿过塔身,于塔身另一侧张拉^[3]。对于钢筋混凝土塔柱拉索正面外部锚固形式,缺乏相关的设计研究成果。汪高斯分析研究了单跨独塔斜拉桥受力特点,桥跨对侧采用地锚连接,主梁与桥塔固结为整体^[4]。独塔单跨斜拉桥主梁与桥塔连接的其他结构体系,缺乏相关的设计研究成果。本文结合清风桥项目,对塔端拉索锚固形式及主梁与桥塔的连接结构体系进行了深入分析研究。

1 工程概况

清风桥位于武汉市青山公园园区内,桥梁跨越青山港排水渠道,桥头两侧顺接园区内部道路,周边建设条件见图 1。拟建桥址处原有一座钢筋混凝土单跨双曲拱桥,老桥开裂病害严重,需拆除重建。

建设场地整体地形较为平坦,最大相对高差约 0.71 m。地质分层共有五大类,分别为杂填土、粉质黏土、粉砂、强风化砾岩和中风化砾岩,不良地质作用不发育。地铁 5 号线下穿老桥,地铁与桥梁轴线夹角约为 35°^[5]。地铁建筑限界直径 5.3 m,隧道内径 5.5 m,采用盾构法掘进,桥位处地铁埋深约 19.7 m。衬砌环外径 6.2 m,内径 5.5 m,管片宽度 1/1.2 m,管片厚度 0.350 m。

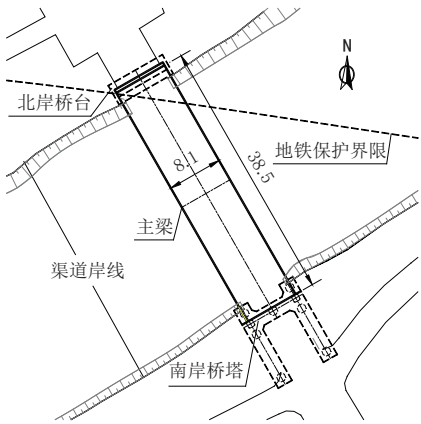


图 1 桥位平面图(单位:m)

综合考虑渠道岸线保护和现状路网衔接要求,北侧桥台位置的确定受到严格限制。经分析论证,桥台布置需与既有老桥桥台范围重合,位于地铁保护界限内。为满足地铁保护范围内禁止桩基施工的限制条件,本项目采用了独塔单跨斜拉桥结构方案。该方案将主塔设置于渠道南岸,主梁采用单跨跨越渠道,北岸桥台则采用扩大基础形式。通过斜拉索提供的竖向拉力,有效减小了北岸桥台支反力,从而显著降低了地铁隧道结构所承受的附加荷载。这一结构布置既满足了地铁保护要求,又实现了桥梁的

功能需求。

桥梁结构安全等级:一级;道路等级:公园内部道路;人群荷载:4 kPa;耐久性设计环境类别:I 类;抗震设防分类和设防标准:地震基本烈度 6 度,设计基本地震加速度 0.05g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,桥梁抗震设防类别为丁类,桥梁抗震设防措施等级为 6 度。

2 总体设计

桥梁跨径组合为 1×38.5 m,为半漂浮体系独塔斜拉桥^[6-8]。主梁为双边工字钢板梁,主梁两端均设置伸缩缝,通过橡胶支座支撑在桥台及桥塔支墩上。桥塔采用矩形双塔柱,基础采用承台接钻孔灌注桩,0 号桥台采用扩大基础形式。桥梁共设置 4 对 8 根斜拉索,包含桥跨范围内 3 对斜拉索及 1 对背索。桥梁主要构件的总体布置见图 2。

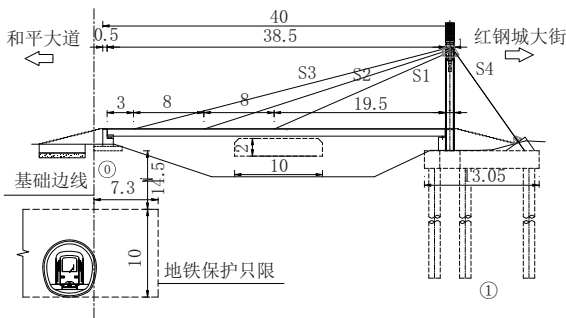


图 2 立面布置图(单位:m)

桥梁平面位于直线上,纵面位于平坡段上。桥面全宽为 8.1 m,桥面布置为 0.75 m(拉索区)+0.3 m(人行栏杆)+6.0 m(人行道)+0.3 m(人行栏杆)+0.75 m(拉索区)。

3 结构设计

3.1 塔梁连接形式

本工程钢主梁与钢筋混凝土塔柱的连接可采用塔梁固结和塔梁分离两种结构体系。塔梁固结体系通过将钢主梁嵌固于塔柱内实现刚性连接,其连接节点需承受弯矩、轴向压力及剪力等复合内力。塔梁分离体系则采用增设桥塔支墩的结构形式,并在梁端设置纵向及竖向橡胶支座^[9-10],使连接处塔柱仅承受主梁轴向压力,受力模式更为明确。桥面以下塔柱采用刚度较大的墙体结构,既可有效抵抗主梁传递的拉索水平分力,又能起到挡土墙的作用。两种塔梁连接结构体系比较示意及塔梁连接处实景见图 3、图 4。

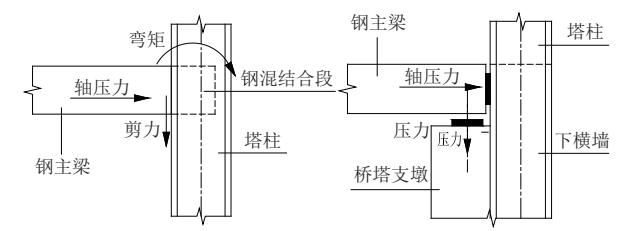


图3 塔梁固结体系及塔梁分离体系对比图



图4 塔梁分离体系实景

相较于塔梁固结体系,塔梁分离体系取消了钢混结合段的构造,不仅优化了塔柱的受力性能,还消除了连接部位混凝土开裂的风险,同时显著降低了施工难度。两种塔梁连接形式的桥梁内力及变形计算结果见表1。

表1 不同塔梁连接形式效应对比表

荷载效应	塔梁分离体系	塔梁固结体系
塔端主梁压应力/MPa	19.5	163.5
塔端主梁拉应力/MPa	29.7	21.8
塔端主梁剪应力/MPa	26.3	35.0
主梁跨中最大挠度/mm	76.0	47.0
梁端塔柱压应力/MPa	22.8	25.3
梁端塔柱拉应力/MPa	15.1	18.0
梁端塔柱剪应力/MPa	2.2	2.2
塔柱顶端水平位移/mm	20.0	17.0

3.2 约束体系

桥梁采用半漂浮结构体系,在桥台帽梁及桥塔支墩顶面设置板式橡胶支座,为桥梁结构提供可靠的竖向支承;同时设置横向限位装置,以有效约束主梁在偶然荷载作用下的横向位移。特别地,在桥塔侧主梁端部布置了板式橡胶支座,该支座支撑于桥塔下横墙结构上,限制主梁的纵向位移。

3.3 钢主梁

钢主梁采用双边工字梁形式,梁高为0.8 m。边主梁上、下翼缘宽500 mm,顶板厚度22 mm,底板厚度为25 mm;腹板标准段厚14 mm,两侧支承及S2、S3锚拉板对应梁段腹板局部加厚至20 mm,S1锚拉板对应梁段腹板局部加厚至50 mm。桥塔侧梁端设置端板作为纵向支座支撑面,在端板与腹板之间焊

接两道纵向加劲肋,提高端板面外刚度。主梁横断面布置见图5。

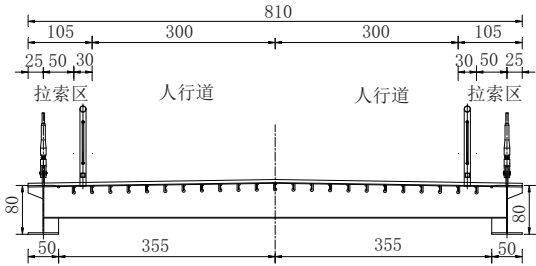


图5 主梁横断面图(单位:cm)

两边主梁之间设置标准间距2.0 m的横梁,横梁采用倒T型截面,支承及锚拉板处横梁采取加强设计。

斜拉索在钢梁上的锚固采用了拉板结构形式。锚拉板构造主要由拉板及加焊钢板组成。拉板中部开孔安装锚具,为了补偿开孔对截面的削弱,在拉板的两侧加焊钢板。

桥面板厚12 mm,顶板纵向加劲肋截面尺寸为100 mm×10 mm,按照300 mm标准间距布置。

3.4 斜拉索

斜拉索采用平行钢丝拉索,双索面扇形布置。桥跨侧布置3对斜拉索,桥塔背侧布置1对斜拉索,共计8根。钢主梁上索距为8 m,桥塔上索距为3 m。斜拉索共分为3种规格:PES5-55、91、151,抗拉强度标准值1 670 MPa。斜拉索采用冷镦镦头锚固系统,张拉端设置在梁端及桥塔承台顶面。

3.5 锚固系统

斜拉索在钢主梁及承台顶面采用锚拉板形式锚固。在承台内部及表面各设置1块30 mm厚承压板,承压板之间由φ40预应力高强螺纹钢筋连接。采用MIDAS FEA进行实体模型分析,取承台承压板及相应混凝土局部范围为研究对象。荷载标准组合作用下,内部承压板范围内混凝土最大拉应力为8 MPa,最大压应力为1.12 MPa,最大应力位于锚杆端头附近,应力集中效应明显,后应力逐渐分散均匀。顶面承压板范围内混凝土应力水平较低,均处于受压状态。根据实际受力特性,承台内部承压板下方混凝土抗裂验算按照轴心受拉构件考虑。荷载准永久组合作用下,单根背索最大拉力为1 773 kN。根据变形协调假设,内部承压板下方防裂纵向受拉钢筋等效应力 $\sigma_s=49.2$ MPa,最大裂缝宽度 $\omega_{max}=0.12$ mm<0.2 mm,结构抗裂验算满足规范要求。承台设计阶段的有限元模型及实施实景见图6。

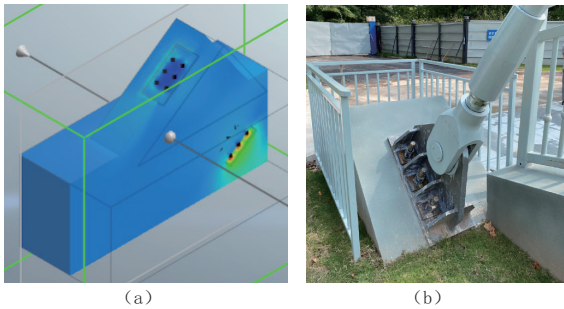


图6 承台有限元模型及实景图

由于塔柱截面为 100 cm×100 cm,采用内部锚固形式空间不足。一般可采用交叉后锚固形式,使张拉端塔柱承受压力^[11-13]。但该方式需在塔柱内部设置导管,削弱塔柱截面,占用了部分塔柱主筋布置空间。同时桥跨拉索与背索位于不同张拉面,对于小尺寸塔柱斜拉桥不是最优选择。

针对上述问题,提出了塔端闭合钢锚框连接形式^[4]。钢锚框中心为 50 mm 厚贯通拉板,拉板四周焊接 40 mm 厚闭合锚框。锚拉板及锚框内表面焊接 M22×150 剪力钉,垂直索力作用面布置间距约 10 cm,侧面布置间距约 20 cm。

采用 MIDAS FEA 进行实体模型分析,取塔顶锚拉框局部范围混凝土为研究对象。荷载标准组合作用下,钢锚框范围内塔柱混凝土最大拉应力为 6.25 MPa,最大压应力为 2 MPa,最大应力位于最先靠近索力传递的剪力钉周边。应力集中效应较明显,后应力逐渐分散均匀。偏保守考虑,不计入侧面锚框内部剪力钉作用,只对垂直索力作用面的锚框及剪力钉按预埋件验算。荷载基本组合作用下,单根背索最大拉力为 2 340 kN。剪力钉预埋件承受拉索的水平拉力及竖向剪力,所需剪力钉总面积为 $A_s=18\ 667\text{ mm}^2$,实配剪力钉面积 20 527 mm²,钢锚框结构设计满足规范要求,结构安全。钢锚框设计阶段的有限元模型及安装过程中的实景见图 7。

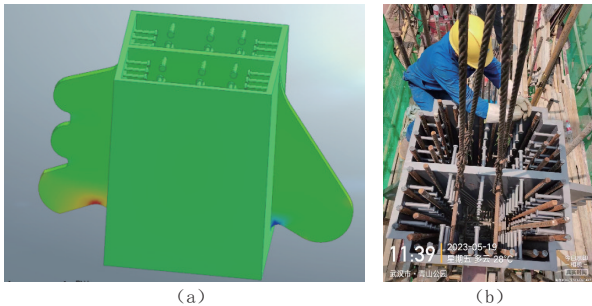


图7 钢锚框有限元模型及实景图

闭合钢锚框通过四周闭合钢板,加大了与钢筋混凝土塔柱的锚固范围,增加了索力传递面,减小了

应力集中的不利影响。该结构避免了对塔柱强度的削弱,提高了拉索连接构造的可靠性。

3.6 桥塔

桥塔采用“门”形钢筋混凝土结构,由塔柱、上横梁、下横墙、支墩及装饰件组成。

桥塔高度主要由拉索索力平衡决定,若桥塔过高则背索水平分力偏小,无法平衡桥跨侧拉索水平分力。若桥塔高度过小,则拉索竖向分力偏小,难以抵抗主梁自重。综合考虑索力平衡及景观效果,桥塔总高度(承台顶至塔顶)取为 14.5 m,塔柱采用矩形截面,截面尺寸为 1.0 m×1.0 m。

上横梁截面尺寸为 0.5 m×1.5 m(宽×高),横梁顶部主筋穿过钢锚框预留孔锚固在塔柱内部,底部主筋与钢锚框焊接。

下横墙变高,宽 8.6 m。通过下横墙的侧向刚度抵抗拉索水平分力,同时挡住梯道填土。

支墩截面尺寸为 0.8 m×0.8 m,用于搁置橡胶支座支撑钢主梁。

塔柱顶部设置直径 1 m,高 2 m 的大理石装饰件。装饰件内部开孔,与塔柱顶部预埋钢管连接,空隙部分灌注砂浆及建筑胶,确保装饰件稳定。桥塔设计阶段构造大样及建成实景图见图 8。

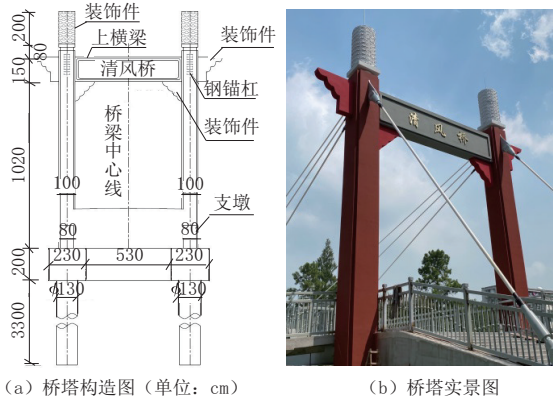


图8 桥塔构造设计及实景图

桥塔采用分离式承台,承台间设置系梁,承台尺寸为 13.05 m×2.3 m×2 m。承台下共设置 7 根直径 1.3 m 的基桩。由于需抵抗背索拉力,承台锚拉端下方的两根基桩按照抗拔桩设计。

4 景观设计

在公园桥梁设计中,建筑景观的协调性具有特殊重要性。本桥基于景观融合性原则,以中国传统牌坊为设计原型,通过两根直立塔柱与横梁的有机组合,构建了具有鲜明文化特色的桥梁景观体系。在色彩设计方面,采用暗红、明红及深青三色涂装方

案,塔顶祥云装饰构件选用白色天然石材,通过色彩对比与材质变化,实现了桥梁与青山公园自然景观的和谐统一^[14-15]。桥梁建成后的整体景观效果见图9。



图9 桥梁实景图

桥梁栏杆采用立柱、横梁与竖杆组成的结构体系,为突破传统形式的单调性,设计着重强化了景观艺术表现。通过在竖杆不同标高位置设置球形节点,形成富有韵律的波浪形空间曲线,显著提升了栏杆的立体层次感。同时巧妙融入荆楚文化元素,在上下横梁之间嵌装祥龙纹饰浮雕。通过文化符号的运用强化了地域特色表达,实现了功能性与艺术性的有机统一。栏杆设计阶段的构造大样及安装后的实景见图10。

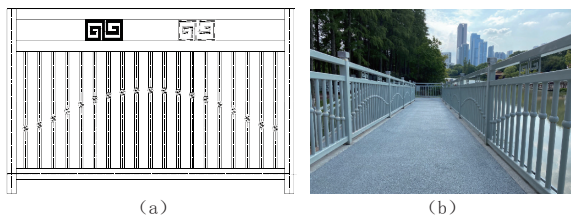


图10 栏杆构造设计及实景图

5 施工方案

在老桥两侧渠道施打钢管桩,搭设临时便桥。老桥下方固定泡沫漂浮板,防止建筑垃圾污染水体。在渠道两岸同步施工桥台及桥塔基础。搭设桥塔处钢管支架,模板现浇钢筋混凝土塔柱、横梁及部分装饰件。吊装钢锚框及塔顶大理石装饰件,完成桥塔施工。节段吊装钢主梁段,现场完成钢主梁焊接拼装。吊挂拉索,依次张拉桥跨侧拉索,同步对应分次张拉背索,确保塔柱受拉索水平分力基本平衡。拆除主梁临时支撑,完成桥梁主体结构施工。施工期间对地铁5号线进行了安全影响监测,共测量了54期数据。地铁道床竖向最大位移为 -0.8 mm ,道床水平最大位移为 -0.8 mm ,侧壁最大净空收敛为 -0.6 mm ,拱顶竖向最大位移为 -0.7 mm ,均小于预警值 7 mm ,桥梁施工期间地铁结构安全。

6 结语

(1)独塔单跨斜拉桥通过拉索作用减小桥台对地基的压力,使桥台可以采用扩大基础形式,从而有效解决了地铁保护区范围内不能施工基桩的限制。

(2)小跨径斜拉桥因其构件尺寸偏小,在设计中常面临特殊技术挑战。对于独塔单跨斜拉桥,塔梁分离结构体系的应用,使得塔柱受力简单明确,避免了钢筋混凝土塔柱在复合应力作用下的开裂风险。

(3)闭合钢锚框构造有效解决了小尺寸塔柱张拉端的锚固难题,构造措施安全可靠,避免了索导管对塔柱截面的削弱影响。

(4)桥梁注重景观设计,从色彩搭配、构件造型、文化元素表达等多方面考虑,实现桥梁建筑与周边环境的和谐统一。

清风桥于2023年9月竣工,桥梁运行状态良好,获得了广大市民的一致好评,取得了良好的社会效益。希望通过本文可以为相似建设条件的特殊复杂桥梁设计提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 程宏斌.独塔无背索曲线钢管梁斜拉桥设计与分析[J].中国市政工程,2023(1):16-19.
- [2] 叶志荣.某景观斜拉桥的设计[J].城市道桥与防洪,2024(12):74-77.
- [3] 王妍.葫芦岛市龙湾商务区滨海木栈道人行斜拉桥—星桥总体及关键节点设计[J].北方交通,2014(1):39-44.
- [4] 汪高斯.地锚式单跨独塔斜拉桥受力特点研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(5):1-6.
- [5] 武汉市规划设计有限公司.清风桥建设工程施工图设计[Z].武汉:武汉市规划设计有限公司,2022.
- [6] 黄永福,冯杨斌,刘斌,等.独塔混合梁斜拉桥总体设计及关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2023(2):52-58.
- [7] 陈亮,邵长宇.大跨径组合梁斜拉桥概念设计[J].城市道桥与防洪,2018(9):111-114.
- [8] 李坤丰,叶长允,陈洪涛.徐州和平路斜拉桥设计[J].世界桥梁,2009(1):26-28.
- [9] 张崇厚.减河3号人行景观桥—天目桥的总体设计[J].桥梁建设,2006(4):34-37.
- [10] 侯满.三亚海棠湾人行景观斜拉桥总体设计[J].世界桥梁,2021,49(3):1-6.
- [11] 王建国.独塔斜拉桥结构体系与受力分析[J].公路交通技术,2020,36(5):70-75.
- [12] 何奇.大跨径斜拉桥索塔锚固区结构形式比较及受力性能研究[J].公路,2025(6):168-176.
- [13] 卢继明.景观斜拉桥钢混组合索塔研究及设计[J].中国市政工程,2020(2):108-111.
- [14] 王鹏举,董辉.基于文化生态学下的城市桥梁景观设计思路[J].城市道桥与防洪,2023(7):121-124.
- [15] 乔云强,刘小飞,史建朋.人行桥美观设计研究[J].世界桥梁,2013,41(4):15-20.