

川滇金沙江特大桥主桥钢桁梁安装缆索吊机设计与施工关键技术

孙熙敏

(四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要: 川滇金沙江特大桥主桥为主跨1 060 m的双塔单跨简支钢桁悬索桥,主桥钢桁梁共分71个节段,标准节段最大重量约269.3 t。大桥位于构造剥蚀高中山峡谷地貌区、不具备支架法施工条件,因此采用缆索吊安装钢桁梁节段。结合大桥既有结构及现场总体布置,缆索吊机跨径设计为(193.605+1 060+220.908)m,设计最大吊重为269.3 t,并考虑1.1倍冲击系数,包括主索、锚固系统、塔顶设计、牵引与起吊系统设计(跑车系统、起吊索、牵引索)、支索器设计和吊耳及吊具设计等;最后对缆索吊装的施工关键技术展开论述,以为同类桥梁工程提供宝贵的参考和借鉴。

关键词: 悬索桥;钢桁梁;缆索吊机;吊机设计;施工关键技术

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0220-05

Design and Key Construction Technology of Cable Crane for Installation of Steel Truss Girders of Main Bridge for Chuan-Dian Jinsha River Bridge

SUN Ximin

(Huadong Construction Co., Ltd., of Sichuan Road and Bridge, Chengdu 610200, China)

Abstract: The main bridge of Chuan-Dian Jinsha River Grand Bridge is a double-pylon single-span simple-supported steel truss suspension bridge. Its main span is 1 060 m. The steel truss girder of the main bridge is divided into 71 segments, and the largest weight of the standard segment is about 269.3 t. The bridge is located in a geological area of structural weathering and high mountain gorges. The conditions for construction by the support method are not met. Therefore, the steel truss segments are installed using cable crane. Combined with the existing structures of the bridge and overall layout of the site, the spans of cable crane are designed as (193.605+1 060+220.908) m. The design maximum hoisting capacity is 269.3 t, and 1.1 times of impact coefficients are considered including the main cable, anchorage system, pylon top design, traction and hoisting system design (car system, hoisting cable and traction rope), cable supporting equipment design, and lifting lug and lifting gear design. Finally, the key construction technology of cable hoisting is discussed to provide the valuable references and lessons for similar bridge projects.

Keywords: suspension bridge; steel truss beam; cable crane; crane design; key construction technology

0 引言

川滇金沙江特大桥为G4216线金阳至宁南段高速公路的关键工程,其主桥设计为(172+1 060+230)m跨度的双塔单跨简支钢桁悬索桥(见图1),矢跨比为1/9,该桥的主缆采用高强度平行镀锌铝合金钢丝制成,钢丝抗拉强度1 960 MPa,主缆横桥向间距为27.5 m,吊索顺桥向理论间距为15.0 m^[1]。



图1 川滇金沙江特大桥效果图

大桥的钢桁梁主桁架采用了带竖腹杆的华伦式结构,其高度为7.0 m,标准节段长度为15.0 m,两片主桁架的弦杆中心间距为27.5 m^[1]。全桥钢桁梁共有71段,包括1个跨中节段(重204.4 t,编号HLD)、

收稿日期: 2024-12-17

作者简介: 孙熙敏(1992—),女,本科,工程师,从事路桥建设质量管理工作。

78个标准节段(最大重269.3t,编号NZ02~NZ35、QZ02~QZ35)和2个端头节段(重287t,编号NZ01、QZ01)。

桥位位于由构造剥蚀形成的高中山峡谷地带,其延伸方向为西东至东向,近乎直角地与沟谷交会,桥面与谷底间的高差达到约348 m。现场实测数据显示,该区域的最大瞬时风速高达33 m/s。经过对吊装覆盖范围、材料与设备成本、操作复杂程度以及施工进度等多重因素的全面评估,对缆索吊机法^[2-9]、缆载吊机法^[10-16]、浮吊法^[17-24]以及桥面吊机法^[25-31]等悬索桥钢桁梁常见安装方法进行了深入对比分析,综合考量后,最终推荐采用缆索吊机法作为最优实施方案。

1 缆索吊机设计

1.1 总体设计

川滇金沙江特大桥因其超大的跨度和吊装重量,显著提升了缆索吊机的跨径与吊重要求,从而极大地增加了整个缆索吊机系统的成本投入。加之钢桁梁吊装距离远且悬拼施工周期长,这无疑进一步加剧了工程的复杂性和难度。在这样极端复杂的条件下确保缆索吊机的安全稳定运行,其控制技术的挑战性和难度也显得尤为突出。

经研究,缆索吊机系统设计主要利用已建的锚碇基础、主塔桥塔作为系统的主索地锚和塔架,主索分别锚固在巧家岸、宁南岸锚碇基础上,缆索吊布置(见图2)参数如下:

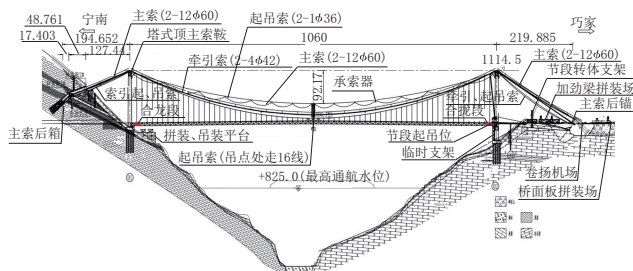


图2 缆索吊装系统总体布置图(单位:m)

(1)最终缆索吊机跨径布置设计为(193.605+1 060+220.908)m;

(2)设计最大吊重为269.3 t,为NZ35、QZ35节段,并考虑1.1的冲击系数;

(3)主索垂度:根据节段吊装重量、承重索安全系数、垂度对牵引索的影响等因素综合考虑,故将中跨主索工作状态最大垂度选取为 $f=92.17\text{m}$,最大矢跨比为 $L/11.5$;

(4)最大纵移动距离1 020 m;最大提升距离

80 m。

1.2 结构设计

缆索吊机结构设计主要包括:主索设计、锚固系统设计、塔顶设计、牵引与起吊系统设计(跑车系统、起吊索、牵引索)、支索器设计和吊耳及吊具设计等。

1.2.1 主索设计

缆索吊机的主索采用 $\phi 60\text{ mm}$ (规格为8×36WS+PWRC-1960)的钢丝绳,左右两侧各配置一组,每组均包含12根 $\phi 60\text{ mm}$ 的钢丝绳。该主索以桥梁中心线为基准进行对称布置,相邻主索之间的间距设定为16 m。主索的支撑点分别设立在巧家岸和宁南岸的主桥锚碇以及索塔的横梁之上。主索现场布置见图3。

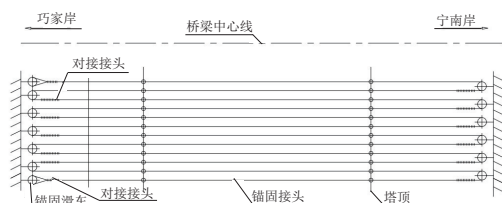


图3 主索现场布置(单位:m)

1.2.2 锚固系统设计

巧家岸的主索被牢固地锚固在重力式锚碇基础之上,该锚碇作为主要承重结构承担着主索的拉力。宁南岸的主索则锚定在隧道锚锚碇的锚塞体前锚面上,锚塞体成为主要的承载结构。为了实现主索的稳固锚固,系统采用了锚固钢带的形式,并且在设计过程中充分考虑了主索的走线方式,以确保锚固装置的数量、位置以及整体布局达到最佳状态。

(1)巧家岸主索锚固

巧家岸主索从塔顶经过后直接锚固于重力锚基础上。巧家岸后锚从平面位置看位于路基外侧。巧家岸单幅共锚固7根钢带,锚固5根钢带A,锚固深度为7.4 m,锚固2根主索;锚固2根钢带B,锚固深度为5.4 m,锚固1根主索。

(2)宁南岸主索锚固

宁南岸主索从塔顶经过隧道锚洞口及散索鞍支墩旁的转向索鞍(1#转索鞍、2#转索鞍)后,锚固于隧道锚锚塞体前锚面上。宁南岸缆索吊主索锚固于靠近桥梁中心线的一侧(见图4)。宁南岸锚固钢带共6根,均为锚固钢带A。

(3)后锚结构形式

主索的后锚设计采用了将钢带直接埋入混凝土的方式,同时,在主索与锚固钢带之间设置了一个转换节以确保连接的顺畅。这些锚固钢带由厚度为

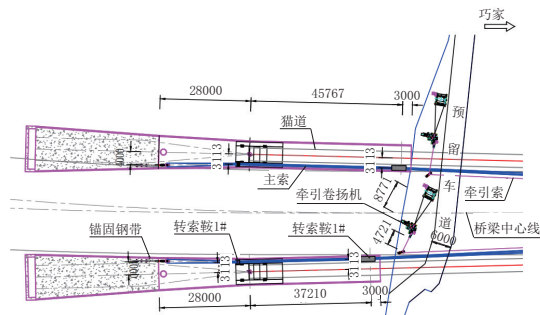


图4 宁南岸缆索吊主索锚固平面布置位置示意图(单位:mm)

4 cm、宽度为50 cm的钢板制成,其长度分为两种规格。第一种是锚固钢带A,它在两岸均有设置;第二种是锚固钢带B,仅在巧家岸使用。为了增强钢带的抗拔性能,在钢带的两侧布置了抗剪型钢。此外,在钢带埋入混凝土的前40 cm区域内,涂抹了隔离剂,以减少对锚碇混凝土可能产生的负面影响。

1.2.3 塔顶设计

塔顶的布置结构从上至下依次为:主索鞍、支垫钢箱以及预埋件。索塔的上横梁宽度设定为7.4 m。考虑到当缆索吊机在塔前附近起吊时,塔前的主索会产生较大的变形,并且边跨主索的角度也会产生影响,因此,每组主索的主索鞍在纵桥向上被巧妙地设计为两个主索鞍,以避免主索与索塔上横梁的边线发生干涉。最终,根据主索的线形设计和受力要求,两个主索鞍之间的纵向间距确定为5.2 m,并且它们关于索塔横梁的中心线呈对称布置。为了确保起吊索和牵引索能够顺畅通过,在主索鞍下方的支垫钢箱上开设了纵向孔,并安装了转向轮。宁南岸塔顶现场布置见图5。

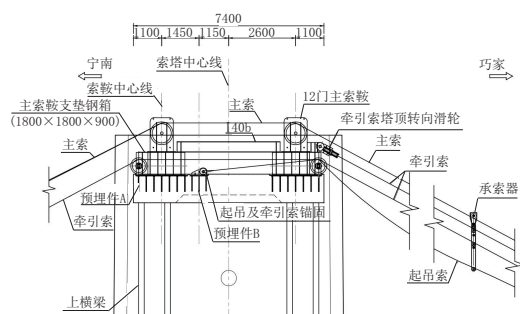


图5 宁南岸塔顶现场布置图(单位:mm)

1.2.4 牵引与起吊系统设计

牵引与起吊系统设计由跑车系统、起吊索与牵引索组成。

(1) 跑车系统

跑车系统是缆索吊系统的关键组成部分,负责构件的垂直起吊、水平运输及精确定位(见图6)。该系统主要由行走小车、牵引滑车、上下挂架、牵引索

和起吊索等关键部件构成。在缆索吊的左右两侧,各自独立装配一套跑车系统,每套系统均配备两台行走小车。小车的行走轮直径为400 mm(内径),在纵桥向上呈两排布置,每排包含12个行走轮,因此单组主索上共有48个行走轮。跑车之间通过分配梁进行连接,分配梁下方设有上挂架,而下挂架则通过起吊索与上挂架相连。通过操作起吊卷扬机来收放钢绳,从而实现对构件的升降操作。

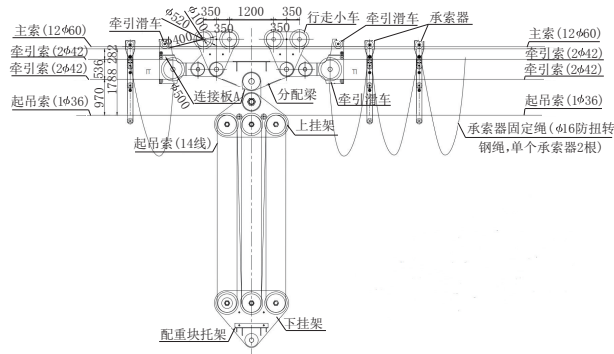


图6 跑车系统示意图(单位:mm)

(2) 起吊索

起重索单组主索采用1根 $\phi 36$ mm钢丝绳(6 $\times$ 37S+FC-1870)走14线。该起重索的一端连接至位于巧家岸重力式锚碇基础处的起重卷扬机,另一端则锚固在宁南岸索塔的塔顶。所有起重卷扬机均安装在巧家岸的锚碇基础上,而其固定端则统一锚定在宁南岸索塔的顶部。起吊索现场布置见图7。

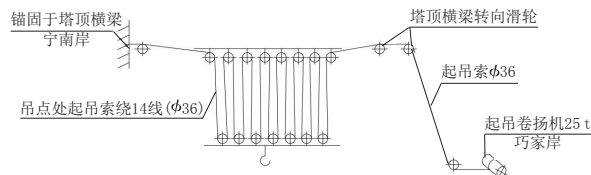


图7 起吊索现场布置示意图

(3) 牵引索

缆索吊左右幅各设一套牵引系统,每套分2组,每组为两岸各1根,采用 $\phi 42$ mm钢丝绳(6 $\times$ 37S+FC-1870),分别在两岸牵引滑车和塔顶之间走4线布置,单根牵引索长度约为5 000 m,由1台牵引卷扬机牵引,缆索吊系统牵引卷扬机为2台35 t卷扬机(巧家岸)和2台35 t(宁南岸)卷扬机,见图8。

1.2.5 支索器设计

支索器采用不等间距布置,起重小车单侧需支

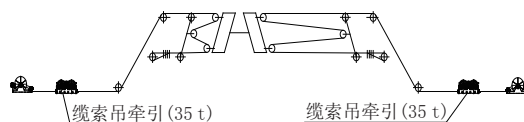


图8 牵引索示意图

索器19个,全桥支索器数量为76个。以左塔至行走小车为例,间距分别为 $[90+90+80+65+60+5\times(50+45+40)]\text{m}$,另一侧对称布置。对承索器从塔顶向跨中方向依次编号1-19#。本系统中不设置承索器牵引索,承索器运动依靠小车动力。支索器采用2根(对称布置) $\phi 16(4V\times 39S+5FC-1\ 670)$ 防扭转钢丝绳定位。跑车在右塔前时支索器布置见图9。

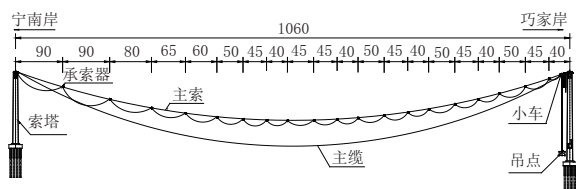


图9 跑车在右塔前时支索器布置图(单位:m)

1.2.6 吊耳及吊具设计

(1)吊具设计

根据主梁施工阶段划分及主梁重心的具体位置,吊具设计成三角架结构。其上部构造由钢板吊带构成,而下部则采用型钢横梁进行加固。在横梁上,根据各不同节段的重心位置精确焊接了吊耳,这些吊耳通过钢销与吊具的横向分配梁实现稳固连接,见图10。

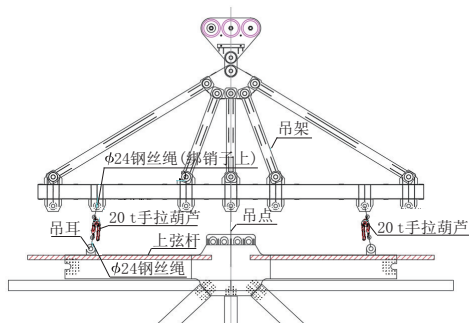


图10 吊具设计示意图

(2)主梁上吊耳设计

主梁上吊耳布置于主梁横桁架上弦杆上,横桁架竖腹杆节点处,距离桥梁中心线7m,关于桥梁中心线对称布置,主梁上吊耳位置布置见图11。

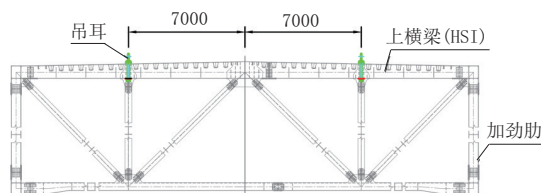


图11 主梁上吊耳位置布置图(单位:mm)

(3)吊具横向分配梁

主梁上的吊耳在横桥向上的间距设定为14m,而缆索吊的吊点间距则为16m。为了在这两者间实现有效的连接,设计了吊具横向分配梁。该分配梁

采用2H800型钢制作,总长度达到16.7m。为了运输的便捷性,将横梁分为两段进行制作,并在现场通过节点板和高强度螺栓进行牢固连接。

2 缆索吊施工技术

宁南岸在钢筋场设置桥面板拼装场,在承台前方设置钢平台作为主梁拼装和起吊平台;巧家岸在钢筋场设置桥面板拼装场,在引桥桥台和重力锚之间设置主梁拼装,通过引桥运输至QZ01节段上吊装。

主梁的吊装作业采用缆索吊机完成。吊装顺序按先吊跨中节段,随后以此为基准,依次且对称地从跨中向两岸推进吊装作业。鉴于在主梁吊装过程中主缆会持续发生形变,为了确保已吊装节段的稳定性,采取了“两两刚接”的方式将节段梁连接成稳定的单元。在这些单元之间,上弦杆采用临时铰接方式连接,而下弦杆则保持自由状态,该连接方法能够保证在钢桁梁整体体系形成之前,其结构依然能够保持稳定。吊装流程见图12。

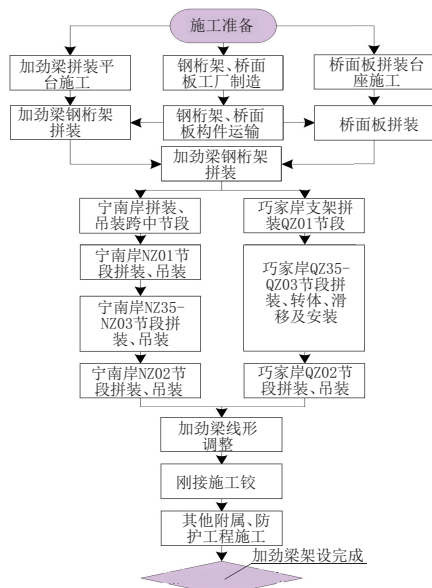


图12 主梁吊装流程

2.1 跨中节段吊装

将跨中节段(HLD)吊装至预定安装位置,并将吊索牢固地连接到梁端的吊耳上。为确保稳定,在两根上弦杆的两端共设置了四个临时固定点,每个固定点均通过在主缆和上弦杆端头分别绑定一根 $\phi 24\text{mm}$ 的钢丝绳。绑定时,在接触位置包裹胶皮或使用带有胶管的钢丝绳以保护结构,同时,上弦杆上的钢丝绳在吊装作业开始前被紧密地固定在弦杆上。这四个固定点之间,通过两根钢丝绳各自连接

一个20 t的滑车来相互联结。完成吊索的连接工作后,将手拉葫芦连接到主缆上的钢丝绳,并逐一收紧,确保四个点位的手拉葫芦都均匀受力,从而使弦杆保持大致水平状态。

2.2 标准节段吊装

(1) 宁南岸节段起吊

宁南岸节段(NZ35-QZ03)可直接从拼装台座上起吊,宁南岸节段拼装完成后,下放缆索吊装系统吊点,根据起吊节段编号连接吊具上相对应的耳板,穿入销轴并安装保险插销。

(2) 巧家岸节段起吊

当巧家岸的节段(从QZ35至QZ03)被滑移至QZ01节段的位置后,随即降低缆索吊的吊点。此时,预先与吊点相连的千斤绳会与后方的水平牵引滑车组紧密相连。通过逐步收紧后方的水平牵引索,吊点会朝着边跨的方向平稳移动,直至接近待吊装的节段。根据待起吊节段的编号,将吊具上相应的耳板进行连接,并穿入销轴,最后安装保险插销确保安全。

主梁滑移作业采用专门定制的电动滑移小车,在引桥的滑移轨道上进行平稳移动。为确保安全,滑移过程中需严格控制速度,保持缓慢而稳定的移动状态。电动小车均配备了刹车锁紧装置,从而有效防止了在停止运行后出现溜车或意外滑移的现象。

2.3 合龙段吊装

主梁合龙段分别为两岸的第二节段,即QZ02与NZ02。为确保合龙作业具备充分的操作空间,在安装宁南、巧家两岸的首个节段(QZ01、NZ01)时,预先向边跨方向偏移10 cm。此外,合龙段以及后续的QZ03、NZ03节段,其悬臂一端的桥面板可以暂时不安装,待合龙作业完成后再进行安装。合龙段吊装见图13。



图13 合龙段吊装

3 结 语

川滇金沙江特大桥主桥是一座主跨达1 060 m

的双塔单跨简支钢桁悬索桥,位于构造剥蚀高中山峡谷,桥面距谷底高差约348 m。鉴于其独特的结构形式、复杂的地质条件以及特殊的桥位地形,同时综合考虑安全、施工进度及经济性等多方面因素,因此采用无缆塔缆索吊施工。无缆塔缆索吊机(主索、锚固系统、塔顶、牵引与起吊系统(跑车系统、起吊索、牵引索)、支索器和吊耳及吊具等)的成功设计,不仅能在短时间内完成了71个钢桁梁节段的吊装,也为未来更大跨径悬索桥缆索吊机的设计与应用提供了宝贵的参考与借鉴。

参考文献:

- [1] 王三文. 川滇金沙江特大桥干式旋挖桩成孔技术[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(12): 37-39.
- [2] 徐伟, 李松林, 胡文军. 大跨度铁路悬索桥钢桁加劲梁设计[J]. 桥梁建设, 2021, 51(2): 10-17.
- [3] 方乃平, 许鑫, 王帅. 秭归长江公路大桥重型缆索吊机设计[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 116-123.
- [4] 张勇. 重庆长寿长江二桥钢箱梁吊装关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(2): 34-38.
- [5] 孙战赢, 王文清, 庄值政, 等. 山区大跨径悬索桥缆索吊安装与施工工艺研究[J]. 建筑机械, 2023(3): 104-107.
- [6] 潘桂林, 杨建平, 汪仁威. 温州瓯江北口大桥主桥钢桁梁施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(8): 62-66; 75.
- [7] 左孝庆, 刘旭, 夏赞良. 世界最大跨径缆索吊安装与拆除技术[J]. 公路, 2021, 66(8): 158-162.
- [8] 田国兵, 杨杰, 徐量, 等. 悬索桥上部结构缆索吊机施工安全风险控制措施[J]. 公路, 2020, 65(12): 107-111.
- [9] 李兴华, 潘东发. 武汉杨泗港长江大桥主桥施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 9-16.
- [10] 叶建良. 瓯江北口大桥主桥缆索相交段钢梁吊装工艺及主缆防火技术[J]. 公路, 2023, 68(2): 108-113.
- [11] 赫勇. 液压提升式缆载吊机在恰纳卡莱大桥中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023(7): 263-265.
- [12] 李陆平, 李兴华, 罗瑞华. 武汉杨泗港长江大桥主桥加劲梁架设施工技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 7-12.
- [13] 黄峰. 杨泗港长江大桥主桥全焊结构钢桁梁安装施工技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 11-16.
- [14] 石强, 刘钊, 宋冰. 洞庭湖大桥600 t液压提升式缆载吊机的设计[J]. 公路交通科技, 2018, 35(增刊1): 52-56.
- [15] 刘显晖, 伍柳毅, 李海峰, 等. 缆载吊机主缆上行走原理和安装工艺的探索与实践[J]. 施工技术, 2015, 44(增刊2): 213-217.
- [16] 杜传鹏, 卢伟, 任海滨, 等. 土耳其1915恰纳卡莱大桥无索区钢箱梁安装关键技术[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1): 7-12.
- [17] 舒大勇, 王建文, 夏赞良, 等. 大跨度悬索桥钢桁梁架设方法对比分析[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊1): 1193-1196.
- [18] 邹睿, 张明见. 钢桁架桥整体浮吊施工方案研究[J]. 北方交通, 2024(8): 16-20.
- [19] 张起, 张明远, 苏顺, 等. 大跨度钢箱梁过桥孔双浮吊吊装技术研究[J]. 工程机械与维修, 2024(8): 35-37.
- [20] 唐辉. 钢拱肋水中浮吊大节段吊装施工技术研究[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(1): 84-86.

(下转第251页)