

大跨度混凝土梁斜拉桥挂篮设计及安装技术

曾宪柳, 庞建国, 陈诚

(中交第二航务工程局第五工程分公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:准格尔黄河特大桥主桥为(160+440+160)m双塔双索面全漂浮体系混凝土梁斜拉桥,主梁宽为28.4m双边箱预应力混凝土结构,采用前支点挂篮悬臂浇筑施工,最大悬浇节段重5800kN。为了保证挂篮整体刚度,挂篮承载平台采用钢箱梁结构,为方便挂篮运输及安装,长大构件采取分段制作高强螺栓连接;挂篮采用“二次接长”技术减少高空支架搭设工程量;挂篮下放、行走、提升采用一键启动自动化同步控制技术,斜拉索索力转换装置、挂篮安装支架设计了一系列新工艺和创新技术。

关键词:斜拉桥;悬浇主梁;挂篮;设计;安装

中图分类号:U445.38

文献标志码:A

Design and Installation Technology of Hanging Basket for Long-Span Concrete Girder Cable-Stayed Bridge

ZENG Xianliu, PANG Jianguo, CHEN Cheng

(CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., No.5 Branch, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: The main bridge of Zhungeer Yellow River Super Major Bridge is a (160+440+160)m double tower double cable plane full floating system concrete girder cable-stayed bridge. The main beam is a 28.4m wide double box prestressed concrete structure. It was constructed by cantilever pouring with a front fulcrum hanging basket. The maximum weight of the cantilever pouring section is 5800 kN. To ensure the integral rigidity of the hanging basket, the hanging basket bearing platform adopted the steel box girder structure. The long and large components were connected by high-strength bolts made in sections to facilitate the transportation and installation of the hanging basket. The hanging basket adopted the “secondary lengthening” technology to reduce the quantities of high-altitude support erection; The one-click start automatic synchronous control technology was adopted for the lowering, walking, and lifting of the hanging basket. A series of new processes and innovative technologies are designed for the cable-stayed cable force conversion device and the hanging basket installation support.

Keywords: cable-stayed bridge; cantilever cast main beam; hanging basket; design; installation

1 工程概况

准格尔黄河特大桥位于内蒙古自治区准格尔旗,大桥全长1368m,主桥跨径布置为(160+440+160)m双塔双索面预应力混凝土梁斜拉桥。桥梁宽28.4m,主梁为双边箱形结构,共布设26对208根斜拉索。每个主塔设中跨悬浇段25个、边跨悬浇段10

个、支架现浇梁4个、中边跨合龙段各1个。主梁为C55预应力混凝土箱梁,梁高2.87m(中心),梁面宽26m,梁顶设2%双向横坡(图1)。索塔处0[#]、1[#]块采用支架现浇施工,主梁Z2[#]~Z26[#]、B2[#]~B10[#]采用前支点挂篮悬臂浇筑施工,标准节段长度为8m,单节混凝土最大重580t^[1]。

收稿日期:2023-10-25(修改稿)

作者简介:曾宪柳,男,大学本科,正高级工程师.E-mail:105423441@qq.com

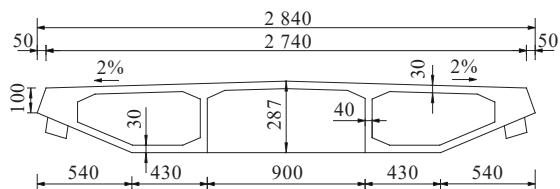


图1 主梁标准节段布置(单位:cm)

Figure 1 Standard section layout of main beam(unit:cm)

2 挂篮设计特点与难点

准格尔黄河特大桥与中国国内同类桥梁建设相比,挂篮设计难点与特点在于:

(1) 主梁跨度达440 m,梁宽28.6 m,悬浇标准节段长8 m,最大节段浇注混凝土重量达580 t,对挂篮变形及刚度设计要求高。

(2) 桥位处常年6~7级大风,冬季气候寒冷,最低气温达 -20°C ,保证超大型挂篮结构抗低温及抗风颤振等结构安全和稳定性非常重要。

(3) 挂篮结构尺寸大、浇筑节段多,挂篮升、降、行走操作同步性及机构之间配合精度要求高。

(4) 主墩位于黄河峡谷地带,挂篮安装高度达120 m,挂篮设计需要综合研究单元构件尺寸及重量、拼装平台及挂篮安装方案。

3 挂篮设计

3.1 挂篮结构组成

挂篮总长19.85 m,宽32.40 m,重量235 t(包括内外模板),设计承受荷载650 t,荷重比0.36。挂篮主要包括承重平台、行走装置、牵索机构、定位装置、锚固系统、内外模板、操作防护平台等(图2)。

承重平台由主次纵梁、前后横梁、联系梁、挂腿等组成,梁系结构为钢箱梁(图3),材料采用抗低温Q345E板材制作^[2]。根据运输及现场吊装情况,横梁、纵梁分段制作,采用10.9S高强度螺栓连接。

行走系统主要由轨道、液压油缸、滑船及反滚轮组成。挂篮行走时由主油泵同时对两侧行走油缸进行供油、回油,油缸往复伸缩带动挂篮步履式前进。反滚轮支撑在箱梁斜腹板底面平衡挂篮前端重量。

牵索机构包括斜拉索张拉装置、索力转换装置。张拉装置设在主纵梁最前端,张拉滑块可沿主纵梁前端圆弧形承力槽口滑动,可满足所有梁段斜拉索角度调整^[3]。索力转换装置设计为套筒连接式结构,

通过斜拉索与套筒连接可实现斜拉索张拉,断开完成斜拉索与挂篮分离。

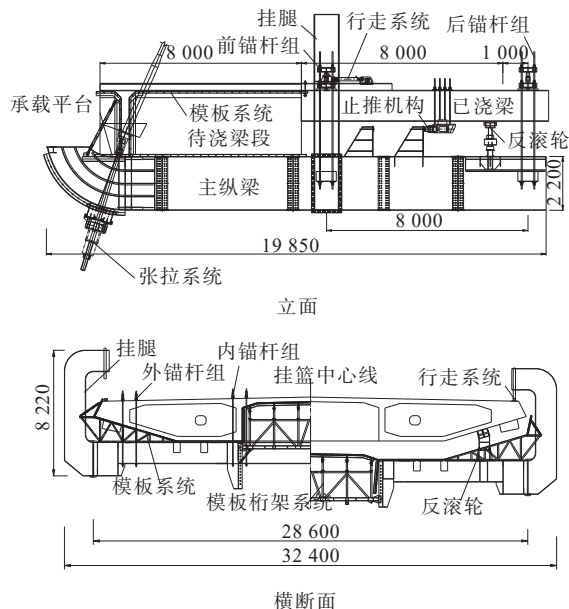


图2 挂篮结构(单位:mm)

Figure 2 Hanging basket structure(unit:mm)

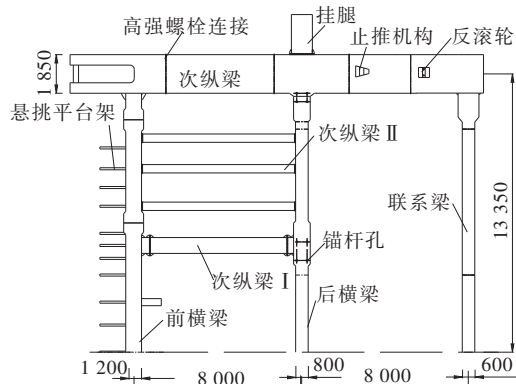


图3 承载平台结构(单位:mm)

Figure 3 Bearing platform structure(unit:mm)

挂篮锚固系统由前、后锚杆组成,前、后锚杆分别为4组和2组,每组为4根 $\phi 40$ mm 40Cr螺杆。前锚杆2组设在主纵梁上,另外2组设在后横梁上,等间距布置;后锚杆锚固在主纵梁后端与联系梁交叉处,以抵抗索力张拉时对挂篮产生的倾覆力。

挂篮四周和底部设置操作平台,平台采用型钢与挂篮焊接,底板铺设4 mm钢板,四周设置高150 cm钢管防护栏杆和钢丝防护网。

3.2 挂篮创新设计

3.2.1 自动化、智能化控制系统

针对传统前支点挂篮操作同步性差、精度低、效

率低、挂篮多点操作劳动力投入大等问题,本挂篮设计采用一套集机械、电气、液压一体的自动化、智能化控制系统,并增加了远程操作、监控等功能,提高了挂篮施工效率、安装和定位精度。

挂篮自动化控制系统由执行机构、控制系统、监控系统、液压泵站组成。挂篮执行机构由行走装置、提升机构、后顶升装置、行走反滚轮、拱架升降机构组成。液压泵站为挂篮执行机构工作提供动力,主要由油泵、电机、阀组合、集成块组成。控制系统由主控台、分控柜、应力和位移传感器、电源及信号电缆组成^[4]。本挂篮设计使用多点液压同步控制技术,由主控台操控指挥多台油泵,一台油泵同时连接多台油缸,保证各执行机构运行时同步。

3.2.2 挂篮一键启动步履式自动行走

前支点挂篮行走传统方法是由一台油泵连接一台穿心式千斤顶推、拉挂篮挂腿前进。由于千斤顶行程小,单点间歇式作业,使挂篮行走慢、同步性差、易走偏。该前挂篮设计了一键启动步履式自动行走装置。该装置包括:控制台、轨道、滑船、液压油缸及反力座(图4)。轨道通过预埋螺栓固定在已浇混凝土梁面,固定在挂腿上的滑船与安装在轨道上的反力座通过大行程(1 500 mm)液压油缸连接,由一台主油泵同时对左右侧油缸供油,通过主控制柜按钮控制主油泵,主油泵分油阀自动控制各油缸进回油速度,确保挂篮左右侧行走同步。一键启动步履式自动行走装置同步性误差可达2 mm,单节段行走只需1 h,操作人员可减至3人。

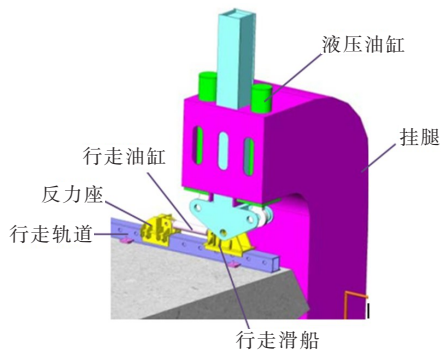


图4 挂篮自动行走装置

Figure 4 Automatic walking device of hanging basket

3.2.3 挂篮自动升降机构

前支点挂篮提升、下放传统设计是梁顶多台穿心式千斤顶提升、下放前锚杆组,通过多个行程、多

次锚固转换完成。穿心千斤顶行程短、间歇式作业,每台油泵配一台千斤顶和一名操作工人,多点操作存在各组千斤顶下放、提升速度不一致,挂篮提升、下放时前后端及左右侧升降速度不同步,存在施工安全隐患。

该挂篮设计一套自动化提升、下放装置,在挂腿内各安装2个行程1 500 mm液压油缸(图4),梁底挂篮后端左右侧各安装一个行程1 500 mm顶升油缸,挂腿内升降油缸与挂篮后端的顶升油缸采用同一台主油泵供油,油缸上安装位移与压力传感器,由总控制柜控制油泵进回油速度,保证挂篮尾端顶升油缸与挂腿内油缸伸缩一致,使挂篮同步升降,始终保持水平,确保操作安全。

3.2.4 行走反滚轮自动化翻转装置

行走反滚轮倒、立转换传统设计是采用手拉葫芦操作,由于梁底空间小,手拉葫芦操作效率低,需要多人配合,施工安全风险大。

该挂篮设计一种行走反滚轮自动化翻转装置,装置主要包括滚轮架、滚轮、摆动油缸、固定销轴、撑杆。反滚轮由倒立状态转换为直立时,开启油泵加油使摆动油缸摆动反滚轮直立,插入滚轮架内侧固定销轴,连接顶升撑杆销轴固定滚轮架(图5),反滚轮倒立步骤相反^[4]。采用该设计反滚轮放倒、直立转换平稳,不需要借助辅助设备和外力,操作简单,施工安全。

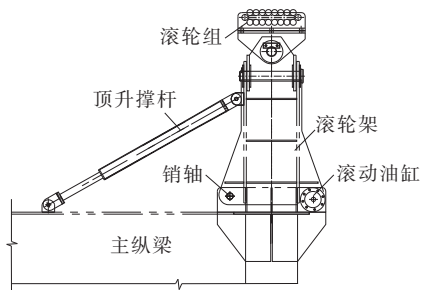


图5 行走反滚轮自动化翻转装置

Figure 5 Automatic turnover device of walking counter roller

3.2.5 索力快速转换装置

传统斜拉索索力转换工艺是销轴连接法,即张拉系统与牵索系统间采用销轴连接。斜拉索安装、索力转换时需要吊车和卷扬机等起重机械配合,在受限空间操作难度大,耗费时间长,投入人员多。针对传统工艺缺点,该挂篮设计了套筒连接式索力转

换装置,其组成为张拉杆、连接套筒(设内螺纹)、连接杆。斜拉索安装时,张拉系统通过张拉杆与套筒连接,斜拉索通过连接杆与套筒连接,完成斜拉索安装;索力转换时,顺时针转动套筒内连接杆,连接杆从连接套筒内退出,完成斜拉索索力转换。施工操作简单、占用空间小、投入人员少,能快速完成索力转换。

3.3 挂篮结构计算

3.3.1 计算荷载

混凝土荷载:荷载取值 26 kN/m^3 ,主梁最重节段(边跨 $10^\#$)重量为 $5\,800 \text{ kN}$,标准节段重量 $4\,700 \text{ kN}$;模板荷载:根据模板设计方案,模板自重荷载 430 kN ;人群及施工荷载取 1.5 kN/m^2 ;风荷载:非工作状态桥面处基本设计风速 $v=25 \text{ m/s}$,根据规范计算,非工作状态风荷载为 1.143 kN/m^2 。

3.3.2 计算工况

工况 1:挂篮锚固在 $Z1^\#$ 块前端,斜拉索没有安装,没有浇筑混凝土,风向垂直向下(风速 25 m/s),计算挂篮受力和变形。

工况 2:挂篮位于 $Z1^\#$ 块,悬臂浇注完成(重 $4\,700 \text{ kN}$)但未凝固,风向垂直向下(风速 25 m/s),二次张拉索力 $1\,930 \text{ kN}$,计算挂篮应力和变形。

工况 3:挂篮空载前移至 $Z2^\#$ 节段前端,风向垂直向下(风速 25 m/s),计算挂篮前进时应力和变形。

工况 4:挂篮锚固于 $B10^\#$ 块,悬臂浇注 $1/2$,风向垂直向下(风速 25 m/s),二张完成,单索力 $2\,960 \text{ kN}$,计算挂篮应力和变形。

工况 5:挂篮锚固于 $B10^\#$ 块,悬臂浇注完成(重 $5\,800 \text{ kN}$)但没有凝固,风向垂直向下(风速 25 m/s),计算挂篮应力和变形。

工况 6:挂篮锚固于 $Z26^\#$ 块,悬臂浇注 $1/2$,风向垂直向下(风速 25 m/s),一张完成,单索力 $1\,650 \text{ kN}$,计算挂篮应力和变形。

工况 7:挂篮锚固于 $Z26^\#$ 块,悬臂浇注完(重 $4\,700 \text{ kN}$)未凝固,风向垂直向下(风速 25 m/s),二次张拉单索力 $4\,200 \text{ kN}$,计算前支点挂篮应力和变形。

3.3.3 计算结果

采用 Midas Civil 有限元软件计算,由计算结果可知:最大应力出现在工况 5 时靠近主纵梁的次纵梁中部上翼缘板位置, $\sigma_{\max}=167.5 \text{ MPa} < [\sigma]=257 \text{ MPa}$ 。混凝土浇注完成后挂篮最大位移出现在工

况 5 时前横梁中部位位置, $\epsilon_{\max}=43.2 \text{ mm} < L/500=53.4 \text{ mm}$ 。挂篮强度和刚度均满足要求。挂篮各构件极限值见表 1。

表 1 挂篮各构件极限值

Table 1 Limit values of various components of hanging basket

构件	控制 工况	应力极值/ MPa	竖向变形 极值/mm	横向变形 极值/mm
主纵梁	7	167.5	5.0	—
前横梁	5	151.6	43.2	—
后横梁	5	63.6	6.0	—
联系梁	3	21.0	5.0	—
挂腿	3	78.2	—	8
次纵梁 I	5	111.0	7.0	—
次纵梁 II	5	161.7	8.0	—

采用 Midas Civil 有限元软件进行挂篮抗倾覆计算,挂篮总稳定力矩为 $41\,634 \text{ kN} \cdot \text{m}$,挂篮总倾覆力矩为 $18\,257 \text{ kN} \cdot \text{m}$,二者比值为 $2.28 > 2$,该挂篮整体抗倾覆性满足规范规定^[5-6]。

4 挂篮拼装支架设计

主墩位于峡谷地带,桥面距地面高 120 m ,经分析研究采用搭设钢管支架作拼装挂篮平台,同时该支架兼作 $0^\# \sim 1^\#$ 块现浇段支架,利用拼装成型的挂篮作 $0^\# \sim 1^\#$ 块底模支承系统。由于主梁与挂篮重量较大,支架承受荷载大,支架高度高,采用常规落地支架法施工材料用量大、高空焊接工程量大,施工时间长;采用传统悬挑支架法施工附墙埋件受力大、埋件锚筋数量多,焊接质量要求高。准格尔黄河特大桥设计钢管支架后压浆式牛腿结构作为挂篮拼装兼 $0^\# \sim 1^\#$ 块现浇支架^[7]。

钢管支架后压浆式牛腿结构支架由预埋件、牛腿、钢管支架、卸荷砂箱、拼装平台组成。预埋件采用钢板加工成方形盒状,每 3 个一组,外侧开口,尺寸为(高) $805 \text{ mm} \times$ (宽) 305 mm ,预埋深度 700 mm ,索塔施工时,预埋在下塔柱侧壁(图 6)。牛腿为 $\text{NH}800 \times 30 \text{ mm}$ 型钢,牛腿插入钢板盒后压浆填充密实,型钢顶焊 14 mm 钢板作牛腿面板。支架钢管采用 $\phi 820 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,平联、斜撑采用 $\phi 630 \text{ mm} \times$

8 mm 钢管,拼装平台采用型钢和钢板搭设(图7)。该设计支架工程量小,牛腿承载力大,不需要预埋大量锚筋及钢板,焊接工作量小,安全风险小。

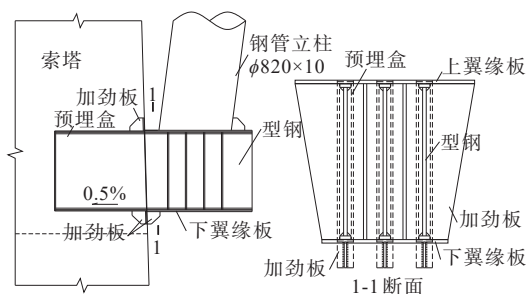


图6 支架牛腿布置(单位:mm)

Figure 6 Bracket layout(unit:mm)

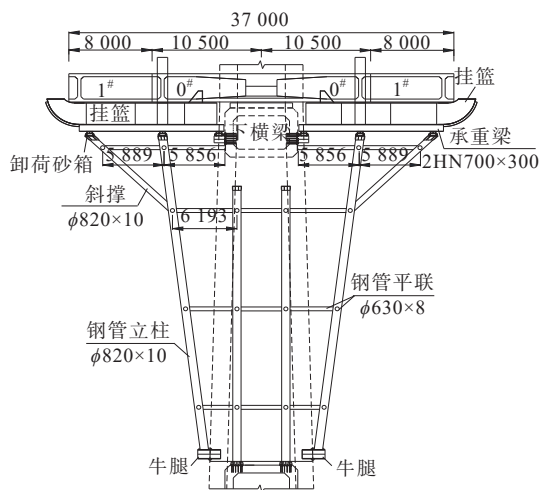


图7 挂篮拼装支架(单位:mm)

Figure 7 Hanging basket assembly support(unit:mm)

5 挂篮安装

5.1 挂篮拼装

主梁单节重量大,悬浇节段多,为确保挂篮加工质量和精度,选择有资质的厂家加工制作。由于受运输及起重设备限制,挂篮采取分段、分块制作,各段间采用高强螺栓连接^[8]。

挂篮安装时,部分构件受塔吊起重重量限制不能直接吊装到位,由塔吊单件吊运到挂篮拼装平台上,通过铺设轨道上小车横向和纵向平移,千斤顶配合微调就位,再用高强螺栓连接^[9-10]。挂篮安装顺序为:主纵梁(远端)→前横梁→次纵梁→后横梁→联系梁→主纵梁(近端)→挂腿。

5.2 挂篮二次接长

主梁0#~1#块悬挑浇筑长度为15 m,挂篮总长

19.85 m,搭设满足挂篮整体拼装支架投入成本太大,挂篮拼装采用二次接长安装技术^[11]。先搭设满足0#~1#块现浇支架(兼作挂篮拼装平台),挂篮拼装时将主纵梁最后一节段临时存放在拼装平台上,在支架上拼装满足行走功能的挂篮。待1#块浇筑完成主梁预应力及斜拉索张拉后,支架顶端卸荷砂箱卸荷,挂篮下降120 cm,向前行走5 m,解除挂篮后端联系梁与主纵梁连接,调整接长最后一节主纵梁,重新拼装联系梁,将临时安装的反滚轮至挂篮尾端焊接,完成挂篮二次接长安装。

6 结语

准格尔黄河特大桥在挂篮设计前对挂篮施工关键技术、参数、工艺及细部结构进行深入研究,将机械、电气、液压集一体的自动化、智能化控制技术应用用于挂篮设计中,增加了远程操作、监控系统,并对传统挂篮行走装置、升降机构、反滚轮翻转机构、索力转换装置进行改进和创新设计,优化了支架设计及挂篮安装方案。

挂篮设计充分考虑了各种工况下关键结构受力特点,采用Midas Civil软件对各施工阶段建立有限元模型计算,计算结果表明挂篮结构受力和变形均满足规范和使用要求。与传统前支点挂篮设计相比,该挂篮结构受力合理、细部结构设计精细、施工操作安全,实现了施工装备自动化、智能化。

参考文献:

References:

- [1] 中交二航局荣乌大桥项目部.准格尔黄河特大桥上部结构施工方案[R],2015.
Rongwu Bridge Project Department of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd.. Construction scheme for superstructure of Zhungeer Yellow River bridge[R],2015.
- [2] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司.准格尔黄河特大桥挂篮设计方案[R],2015.
CCCC Wuhan Earbor Engineering Design and Research Institute Co.,Ltd.. Design scheme for hanging basket of Zhungeer Yellow River bridge[R],2015.
- [3] 杨金龙,陈诚,胡伟邦.PC斜拉桥前支点挂篮安装及锚块定位关键技术[J].中外公路,2021,41(6):153-156.
YANG Jinlong, CHEN Cheng, HU Weibang. Key

- construction technology of cradle assembly with front support point and anchor block positioning for prestressed concrete cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(6):153-156.
- [4] 吴明威,刘冬冬,周雷,等.桥梁施工挂篮智能化控制系统研究[J].中国港湾建设,2018,38(1):66-70.
WU Mingwei,LIU Dongdong,ZHOU Lei,et al.Intelligent control system of hanging basket for bridge construction [J].China Harbour Engineering,2018,38(1):66-70.
- [5] 中交二航局乌江大桥项目部.乌江大桥上部结构施工方案[R],2016.
Wujiang Bridge Project Department of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Construction scheme for superstructure of Wujiang bridge[R],2016.
- [6] 周苏,李新生,刘陈韬,等.复合式牵索挂篮施工过程受力分析与监测[J].中外公路,2023,43(4):188-195.
ZHOU Su, LI Xinsheng, LIU-CHEN Tao, et al. Stress analysis and monitoring of composite cable hanging basket during construction[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(4):188-195.
- [7] 姜永生,陈诚,范超.高墩大跨径混凝土梁斜拉桥0号块支架设计[J].施工技术,2018,47(13):135-138,147.
JIANG Yongsheng, CHEN Cheng, FAN Chao. Design of No.0 block bracket of high pier long span concrete cable stayed bridge[J]. Construction Technology, 2018, 47(13): 135-138,147.
- [8] 靳会武,周春华,陈占明.镇山大桥44 m宽桥面挂篮施工技术[J].公路,2019,64(11):147-152.
JIN Huiwu, ZHOU Chunhua, CHEN Zhanming. Construction technology of hanging basket for 44 m wide deck of Zhenshan bridge[J]. Highway, 2019, 64(11): 147-152.
- [9] 刘增武,周建庭,马虎,等.夜郎湖特大桥挂篮悬浇施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(5):22-26.
LIU Zengwu,ZHOU Jianting,MA Hu,et al.Key techniques of cantilever casting construction for Yelang Lake bridge using form travellers[J].World Bridges,2019,47(5):22-26.
- [10] 刘晨,李美林,刘红波,等.柴埠大桥前支点挂篮施工技术[J].公路,2017,62(4):118-123.
LIU Chen, LI Meilin, LIU Hongbo, et al. Construction technology of hanging basket at the front fulcrum of Chaibu bridge[J].Highway,2017,62(4):118-123.
- [11] 吴明威,陈林,刘冬冬,等.PC斜拉桥大型前支点挂篮安装技术[J].中外公路,2017,37(1):102-105.
WU Mingwei,CHEN Lin,LIU Dongdong,et al.Installation technology of large front fulcrum hanging basket for PC cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017,37(1):102-105.

(上接第200页)

- [16] 王东旭.大跨度铁路钢管混凝土拱桥施工阶段受力特性分析[J].铁道建筑,2021,61(4):21-24.
WANG Dongxu. Analysis of mechanical characteristics in construction stage of long span railway concrete-filled steel tube arch bridge[J].Railway Engineering,2021,61(4): 21-24.
- [17] 王贵明,彭文平,周超.木蓬大桥高温合龙效应下拱圈内力调整研究[J].世界桥梁,2015,43(6):42-46.
WANG Guiming, PENG Wenping, ZHOU Chao. Study of internal force adjustment for arch ribs of mupeng bridge under high temperature closure effect[J]. World Bridges, 2015,43(6):42-46.
- [18] 孙智慧,滕乐,秦健淇.大跨度钢管混凝土桁拱桥拱脚外包段受力分析与优化设计[J].中外公路,2020,40(4):141-146.
SUN Zhihui, TENG Le, QIN Jianqi. Optimal design and mechanical analysis of arch foot in long-span concrete filled steel truss arch bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(4):141-146.
- [19] 李清,张基进,郭吉平.混凝土拱桥悬臂浇筑施工温度效应影响研究[J].中外公路,2020,40(3):196-199.
LI Qing, ZHANG Jijin, GUO Jiping. Study on construction temperature effect for concrete arch bridge during cantilever casting construction[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(3):196-199.
- [20] 廖万辉,岳亚超,颜东煌,等.空心钢管混凝土拱桥截面设计参数影响分析[J].中外公路,2022,42(4):92-95.
LIAO Wanhui, YUE Yachao, YAN Donghuang, et al. Influence analysis of section design parameters of hollow concrete-filled steel tube arch bridge[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):92-95.