

# 大跨度钢箱提篮拱施工线形新型监控技术研究

冯贺杰\*

(中铁建城建交通发展有限公司,江苏苏州 215151)

**摘要:** 宗村大桥主桥为下承式钢箱提篮拱桥,横跨已拓宽为III级内河航道的芜申运河。对宗村大桥主桥采用的少支架大节段吊装施工技术进行分析,并针对该大跨度钢箱提篮拱桥的线形控制理论和方法进行研究。在施工关键阶段,利用有限元软件Midas Civil进行有限元建模分析,计算得到桥体的线形和预拱度设置。在施工现场进行监测,并对比监测值与设计值,以对施工线形进行控制并保证设计线形满足设计要求。所提出的现场施工线形新型监控技术将监控前置并纳入临时支架监控,创新选取“长寿命点位”并提出一种快速安装定位创新装置,可保证大跨桥梁成桥线形平顺,满足设计要求的同时可兼顾造型美观需求。

**关键词:** 桥梁工程;提篮拱;钢箱梁;施工监控;有限元分析;线形控制

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0103-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240401001

## Research on New Construction Alignment Monitoring Technology for Long-Span Steel-Box Basket Arch Bridges

FENG Hejie\*

(China Railway Construction Urban Construction Transportation Development Co., Ltd., Suzhou 215151, China)

\*Corresponding author: 49680017@qq.com

**Abstract:** Main bridge of Zongcun bridge is a through long-span steel-box basket arch bridge, crossing the Wushen Canal, which has been widened into a III inland waterway. Taking the construction of main bridge of Zongcun Bridge as an example, a large segment hoisting scheme with few supports is analysed. This paper studies the alignment control theory and method for the long-span steel-box basket arch bridge. For the key stages during construction, finite element software Midas Civil is used for modeling and analysis, and the alignment and pre-camber setting of the bridge are calculated. Based on the in-situ monitoring, the monitoring values are compared with design values to ensure the correct design alignment. The new in-situ construction alignment monitoring technology proposed in this paper pre-positions monitoring devices and includes temporary support monitoring. It innovatively selects long-life points, and proposes a fast installation and positioning innovative device. Thus, smooth bridge alignment is ensured, meeting design requirements and aesthetic appearance.

**Keywords:** bridge engineering; handle-basket arch; steel-box girder; construction monitoring; finite element analysis; alignment control

现代化桥梁建设离不开施工监控技术,特别是大跨度桥梁的施工过程,施工全过程受到各种确定性和不确定性因素的影响。施工监控的工作内容主要包括实时监测、调整(纠偏)和结构预测。

施工监控技术在评估桥梁结构不同部件时采用不同的评价标准。陈杰等<sup>[1]</sup>针对钢结构桥梁,分析了钢梁的安装施工,并验证了安装方案的安全性与可行性。唐永等<sup>[2]</sup>针对大跨度复杂桥梁工程中常用的高大施工支架进

收稿日期:2024-04-01

作者简介:

冯贺杰(1985—),男,学士,高级工程师,主要从事钢结构桥梁施工等方面的工作。E-mail: 49680017@qq.com。(通信作者)

行了整体稳定性能研究,并考虑了初始缺陷影响。对于分阶段成形的桥梁上部结构,外部环境因素对结构线形产生的影响尤为显著,难以轻松达成预期目标。因此大跨度复杂桥梁的施工监控至关重要。早期施工监控技术主要通过设置预拱度进行控制;现代施工监控技术主要是将理论分析、数值模拟与现场实测相结合来控制施工全过程。现代施工监控技术工作流程包括桥梁理想状态的确定、各施工阶段的量测、安全性评估、误差调整及理想状态的修正。通过施工监控技术的有效应用确保桥梁结构的安全性和质量。

因为芜申运河航道的相关管理部门限制宗村大桥建设期内施工设备占用航道的时长,且施工现场不具备超过610 t(钢结构总重量达1 600 t,无法将整个钢结构整体吊装)的大型浮吊整体吊装作业的条件,同时充分考虑钢结构制造、地质条件、吊装和交通等相关因素的限制<sup>[3]</sup>,所以与上跨运河主桥钢结构采用的通用的浮拉+顶推施工方案不同,该桥采用少支架大节段的吊装方案。因此,为了保证施工安全和线形精度,需对施工过程中的桥梁结构进行线形监控,以确保桥梁成桥线形平顺。

## 1 工程概况

宗村大桥桥跨的布置方案为10×25 m小箱梁+90 m钢箱提篮拱+9×25 m小箱梁,桥梁全长为570.96 m,桥面宽为28.5 m。该主桥为90 m跨径的下承式钢箱提篮拱桥,计算跨径为88 m,总重约为1 600 t,总体布置如图1所示。主桥铅直面内投影矢高为17.60 m(斜平面内投影矢高为17.87 m),矢跨比为1/5,拱轴线线形为二次抛物线。拱肋为提篮拱形式,拱肋向内倾斜10°。拱肋中心的横向距离在拱顶处为12.950 m,在拱脚处为19.156 m。

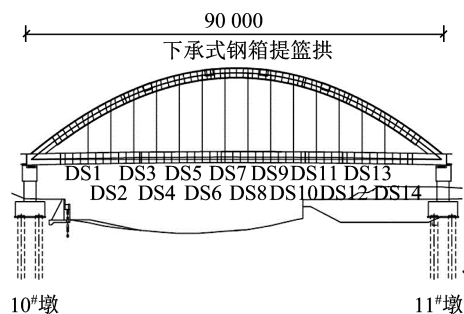


图1 宗村大桥总体布置(单位:mm)

Fig. 1 General layout of Zongcun bridge (unit:mm)

拱肋采用全焊钢箱结构,截面为高度1.800 m、宽度1.565 m的矩形,共设置两片拱肋。主桥系杆采用高2.250 m、宽1.565 m的全焊平行四边形截面。

主桥在每对吊杆处设置1道中横梁,全桥共16道,

中横梁沿纵桥向的布置间距为4.9 m。中横梁为钢-混凝土叠合梁,通过在横梁顶面设置剪力钉与钢筋混凝土桥面板结合;采用工字形钢梁,梁长为15.6 m,梁高为2.000~2.164 m,上翼缘在行车道范围内设坡度为2%的横坡,水平设置底板。工字梁上翼缘宽为600 mm、下翼缘宽为750 mm。工字梁每隔1.75 m设置1道竖向加劲肋,加劲肋的高度随梁高变化而变化。

主桥每侧拱肋各设置14根吊杆,全桥共28根。吊杆沿纵桥向的布置间距为4.9 m。吊杆均采用61根直径为7 mm的高强度镀锌平行钢丝束,标准强度为1 670 MPa。吊杆两端均采用吊耳销接在拱肋及系杆上。锚具采用冷铸锚,桥面处锚头为张拉端,拱肋处锚头为固定端。吊杆近张拉端设置调节套筒,量程为±100 mm。吊杆与拱肋平面在横桥向内倾斜10°。

## 2 施工技术

### 2.1 节段划分

在满足桥位自然条件、生产场地、运输条件及设备条件限制的前提下<sup>[4]</sup>,如图2所示,本工程将每片拱肋(不含拱脚)分成5个节段,分别编号为GL-JD1、GL-JD2、GL-JD3、GL-JD4、GL-JD5,节段长度最大为20.172 m(运输长度单件最大重量为47.5 t);桥面主系梁(不含拱梁结合段即拱脚段)划分为5个节段,分别编号为XL-JD1、XL-JD2、XL-JD3、XL-JD4、XL-JD5,节段长度最大为18 m(运输长度),单件最大重量为36.52 t,挑臂块体分段长度与主系梁的对应长度保持一致。

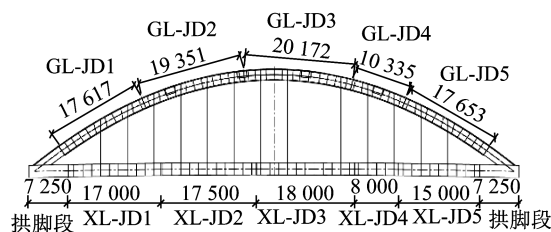


图2 节段划分(单位:mm)

Fig. 2 Segment division (unit:mm)

结合现场施工环境,其中拱肋节段GL-JD1、GL-JD2、GL-JD3与主桥节段XL-JD1、XL-JD2、XL-JD3将在河道北岸场地上各自拼装成一个整体,拼装而成的大节段示意如图3所示。

在综合考虑主桥大节段与拱肋大节段的自重、大节段吊装分析、吊装钢丝绳拉力计算、吊点位置设计、吊耳设置计算、吊车起重能力及各项作业参数等因素后,最终决定在临时封航期间,采用单台610 t浮吊将两组拼装大节段吊送至桥位并定位焊接组装,施工场地布置如图4所示。

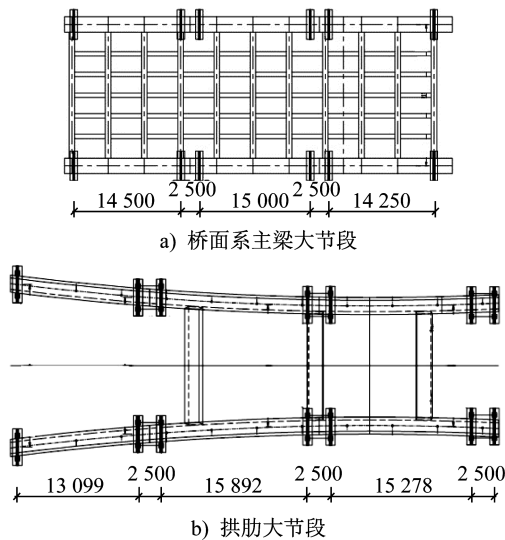


图3 大节段(单位:mm)

Fig. 3 Large segment (unit:mm)

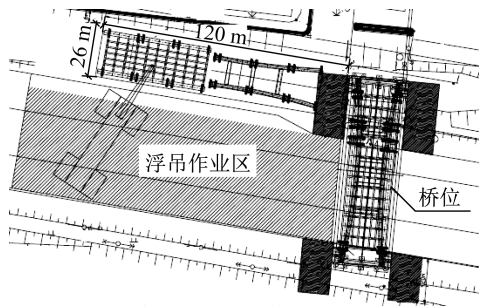


图4 施工场地布置

Fig. 4 Construction site layout

## 2.2 少支架大节段吊装施工

本工程采用少支架大节段的吊装施工方案,该方案主要分为两个阶段<sup>[5]</sup>:

第一阶段为拱脚段、桥面系主系梁及纵横梁体系的安装。该部分安装又分为2个安装区:陆地区域的构件节段直接采用汽车吊进行小节段安装,水中区域的桥面系主系梁先在拼装场地上拼装成一个整体,再采用单台浮吊进行整体吊装。

第二阶段为上部拱肋结构的安装。先在拼装场地上将其拼装成一个整体,再采用单台浮吊整体吊装。

## 3 施工线形控制分析

### 3.1 施工控制方法

施工控制方法旨在确保大跨度钢箱提篮拱桥施工过程的安全性,主要任务包括桥梁结构的线形与内力状态控制,以及施工过程中的安全控制<sup>[6-7]</sup>。因此施工控制中的结构计算方法不仅要能对整个施工过程进行模拟,还要能反映整个施工过程中结构的线形状态和受力行为,也能确定各个施工阶段的理想状态,为施工提供中间目

标状态<sup>[8-9]</sup>。基于该项目的施工情况,施工控制模拟方法选为正装分析法与倒装分析法<sup>[10]</sup>。

正装分析法不仅可以为成桥结构的受力提供较为精确的结果,而且可以为施工阶段理想状态的确定奠定基础<sup>[11-12]</sup>。但当按照正装分析法计算时,分析过程中结构的节点坐标发生偏移,造成最终成桥线形与设计要求存在差异,因此需要进行施工线形监控。而倒装分析法以满足成桥线形要求为出发点,将最终成桥状态视为初始状态<sup>[13]</sup>,适用于以悬臂施工法为主的大跨度连续刚构桥和斜拉桥等。

对于其他各种形式的大跨度桥梁,要想明确桥梁结构在各个阶段的位移和受力状态,都必须首先进行正装计算<sup>[14]</sup>。

### 3.2 模型分析

为确保施工过程中桥梁结构受力和线形符合设计要求,基于宗村大桥施工设计方案与施工顺序,在施工作业前采用有限元软件Midas Civil 2020,通过正装分析法对桥梁整个装配施工过程进行了仿真模拟。该施工模型由拱肋、横撑、桥面纵横梁和临时支架等组成,其中拱肋、横撑、桥面纵横梁体系等均采用梁单元来模拟。为验证所建模型的合理性及正确性,将该施工模型与设计模型进行对比。

永久荷载钢拱架及钢箱梁自重按容重为 $78.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 计算;施工临时荷载按 $1.0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 计算。根据相关规范要求,施工阶段考虑10年一遇风荷载以及作用于临时支架的最不利荷载。在不同的施工阶段,应根据现场的具体要求施加相应的临时约束边界条件。

基于该大跨度钢箱提篮拱施工项目,对施工全流程进行阶段划分如下:

(1) 在系梁、纵横梁体系、挑臂块体及拱脚安装完成时段,拱肋尚未开始施工,处于先梁后拱的第一阶段,需分析梁体单独受力情况,即CS1施工阶段。

(2) 在陆地区域拱肋吊装完成时段,拱肋未完全成型,此时的空间线形拱肋完全由临时支架支撑,需分析临时支架受力情况,即CS2施工阶段。

(3) 在水中区域拱肋吊装完成时段,完整拱肋形成整体,但此时吊索尚未安装,该提篮拱体系尚未形成,需分析此时的结构整体受力情况,即CS3施工阶段。

针对以上三个关键施工阶段,对桥梁整体及临时支架结构进行了仿真模拟计算,计算模型如图5所示。

### 3.3 施工线形及预拱度设置

由于桥面系主系梁及拱肋水中区域均采用大节段整体吊装方案,根据CS1施工阶段整体建模计算结果,水中

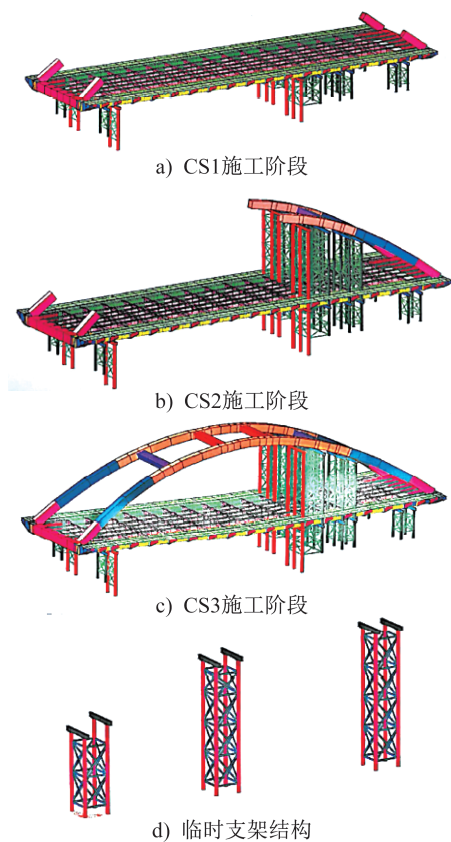


图5 计算模型

Fig. 5 Computation model

区域桥面主系梁大节段(XL-JD1、XL-JD2及XL-JD3节段)的最大挠度为43.21 mm,如图6所示。

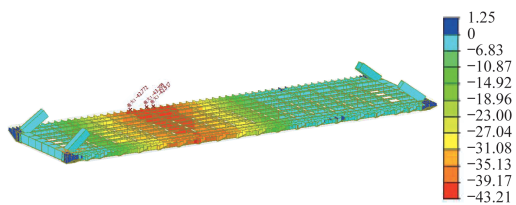


图6 主系梁大节段安装时变形(单位:mm)

Fig. 6 Deformation during installation of large girder segment (unit:mm)

因此桥面系主系梁水中区域节段制造线形在设计预拱度的基础上,再按照从两侧至大节段跨中二次抛物线对该区域桥面系进行线形预抛高。最终控制预拱度如图7所示。

根据CS3施工阶段整体建模计算结果,拱肋水中区域大节段(GL-JD1、GL-JD2及GL-JD3节段)最大挠度为14.93 mm,如图8所示。

拱肋水中区域节段制造线形在设计预拱度的基础上,再按照从两侧至大节段跨中按照二次抛物线对该区域拱肋进行线形预抛高,如图9所示。

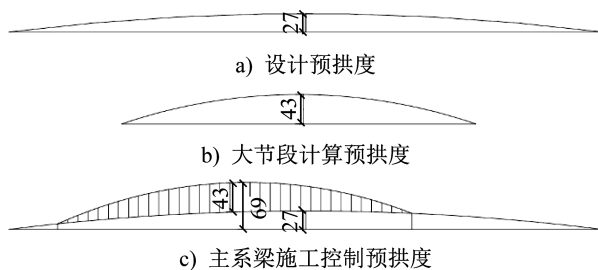


图7 主系梁施工控制预拱度(单位:mm)

Fig. 7 Control pre-camber during main girder construction (unit:mm)

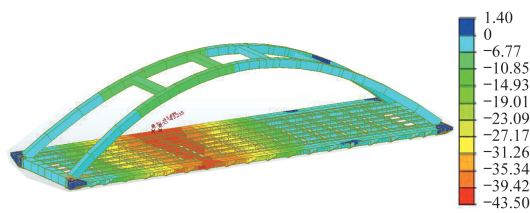


图8 拱肋大节段安装时变形(单位:mm)

Fig. 8 Deformation during installation of large arch rib segment (unit:mm)

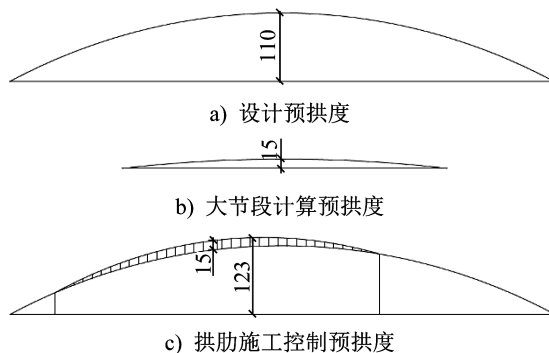


图9 拱肋施工控制预拱度(单位:mm)

Fig. 9 Control pre-camber during arch rib construction (unit:mm)

## 4 施工监控技术

在大跨度钢箱提篮拱施工项目中,对于主梁线形与拱肋线形的控制,是确保桥体最终成桥线形符合设计要求的重要措施,也是保证桥梁安装精度的关键步骤。

### 4.1 支架临时构件监控

安装支架的变形包括支架本身的弹性变形、非弹性变形以及支撑点的挠度。为确保支架结构的安全性和钢结构架设标高的误差控制符合规范要求,必须保证支架下部承载面的坚实性。在分节段架设过程中,使用全站仪对支架顶部的位移进行观测,观测点的布置如图10所示。

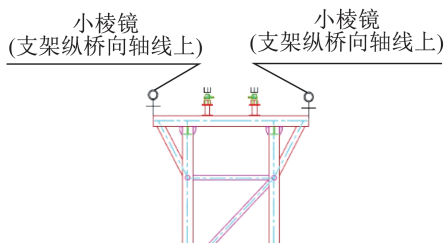


图10 安装支架顶变形观测点示意

Fig. 10 Deformation observation points

### 4.2 主系梁及拱肋结构线形监控

监测内容及方法包括主系梁和拱肋加工尺寸与线形复测、主系梁和拱肋安装轴线监测、主系梁和拱肋安装标高测量以及拼接处的高差测量等。

主系梁和拱肋轴线测量是指通过施工测量控制网将基点引入作为测点,将精密全站仪架设在基点上,反射棱镜置于钢构件的上缘线上。利用全站仪测量待测点的平面坐标,并与理论值进行对比,以确定各施工阶段的误差。鉴于本桥的施工特点,在各部位节段安装及吊杆张拉过程中均需进行轴线测量。

主系梁和拱肋标高与高差测量指的是节段拼装前,需对前一节段的标高进行测量,拼装完成后需测量当前节段的标高及前一节段的标高,同时需测量相邻两节段之间的高差,确保其满足设计文件的要求。

### 4.3 轴线偏位监控

利用全站仪对拱肋、主梁轴线偏位进行测量,测点选用拱肋、主梁标高的观测点。观测频率视安装阶段而定,即在支架施工完成后进行初始测量,每安装一个构件梁段就及时跟踪测量。若出现位移及沉降应跟踪观测,累计沉降量超过 20 mm 视为达到监测预警值。此时应暂缓所有加载施工,查明原因后方可恢复吊装作业。

### 4.4 拱肋节段线形监控

拱肋节段安装过程中,采用全站仪对桥面控制点及拱顶观测点进行全程跟踪测量<sup>[15]</sup>。在拱肋节段的安装过程中,轴线微调可通过2台5t手拉葫芦实现,拱肋节段自由端的高程调整采用支垫或切割钢垫块来控制。考虑到安装支架由钢管格构组成,存在一定的弹性及非弹性竖向变形,建议安装高程比控制高程高出约1cm。在构件安装到位后,应将吊钩的吊力降至约15%,但不脱钩,待构件与临时支架充分连接(焊接牢固)后,方可完全脱钩<sup>[16]</sup>。

在拱肋各节段(除拱肋合拢段以外)全部安装完成后,定期对各个构件进行测量,并做好详细记录,包括测量日期、测量时工况、温度等<sup>[17]</sup>。

### 4.5 拱肋合拢段线形监控

在拱肋合拢段安装前,对已经安装好的拱肋节段端口进行测量,每个端口测量4个点(上、下弦管的顶面及地面中心),测量时间段为每日的不同温度点<sup>[18]</sup>。在测量过程中,应详细记录当时的气温。该测量需重复进行3次,以便根据温度变化曲线及测量结果绘制出温度变化对结构影响的曲线。通过该曲线,可以预估合拢时的气温,并据此推算出拱肋合拢段所需的余量大小。

为最大程度缩短合拢段的安装时间,在进行合拢段安装作业前,需预先将余量切除。拱肋合拢时间应尽量选在一天当中温度较低的时段,一般为上午7点左右或者下午3点之后。在安装拱肋合拢段之前,需使用全站仪在拱肋临时支架上精确测放出拱肋轴线以及外边缘线,并在边线位置牢固焊接限位及导向装置,从而提前明确安装方位,确保安装过程精准、高效。

拱肋合拢段安装时,全站仪对其进行安装全过程跟踪测量。拱肋合拢段安装采用2台汽车吊进行抬吊安装,在接近安装位置时辅以人工手拉葫芦进行调整,待拱肋轴线符合控制要求时,吊钩慢慢卸力。在吊钩基本卸力后,全站仪再次对拱肋控制点进行观测,此时拱肋轴线应符合控制要求。

### 4.6 新型监控技术的技术路线及创新特点

该大跨度钢箱提篮拱施工线形新型监控技术的技术路线如图11所示。与传统监控技术相比,本新型监控技术将临时支架监控纳入传统监控技术中,并前置监控环节至预拼装及支架拼装阶段,可为后续监控提供前序基础数据。另外,本新型监控技术创新性地选取了长寿命点位,这些点位可供长期保留监测,为施工过程及后续维护阶段提供持续、稳定的数据支持;同时独创性地提出一种钢箱提篮拱钢拱肋节段快速安装定位装置。

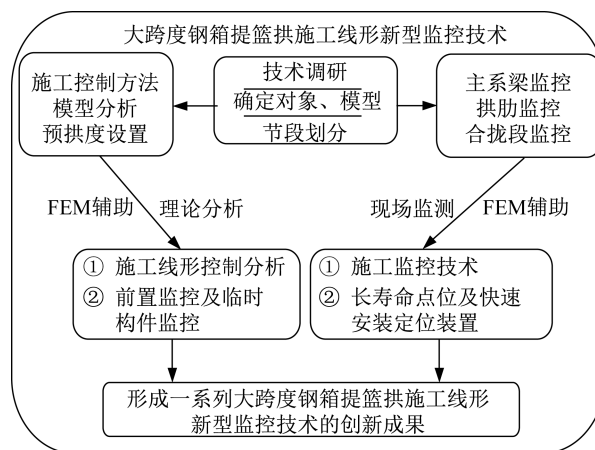


图11 技术路线

Fig. 11 Technology roadmap

基于以上施工监控技术,归纳出该新型监控技术的创新特点如下:

1. 由于本施工将部分桥面系主系梁及拱肋水中区域单独拼接成型,因此本新型监控技术将临时支架监控纳入传统的拱肋与主系梁线形监控中,确保临时支架变形在可控范围内。

2. 本新型监控技术创新选取长寿命点位,基于施工现场和施工放线要求布置,确保点位可供长期保留监测。

3. 本技术实现了线形监控环节前置,因为钢结构构件线形一旦形成,后期可调整的空间有限;因此在构件预拼装及支架拼装施工阶段,便开始对其线形和绝对标高进行监控,所采集的数据可用于后续校对。

4. 本技术创新地提出一种钢箱提篮拱钢拱肋节段快速安装定位装置,通过支垫或切割两个钢垫块、调节限位型钢位置和角度可以对拱肋的横向、高程、倾角进行精确的线形控制。

## 5 施工线形监控

### 5.1 监控内容

#### (1) 监控目的

大节段构件在拼装区域拼装完成后吊装至桥位处焊接固定前,应对其进行轴线定位复测与调整,并根据架设指令值复核预拼装线形与桥位处两端标高,确保轴线与标高无误后再进行焊接固定。

#### (2) 监控方法

在主系梁和拱肋架设过程中,采用电子水准仪对主系梁标高进行监控,采用全站仪对轴线及拱肋高程进行监控。

#### (3) 现场监控

依据施工监控技术要求,在现场进行施工线形监控,如图12所示。

### 5.2 高程监控

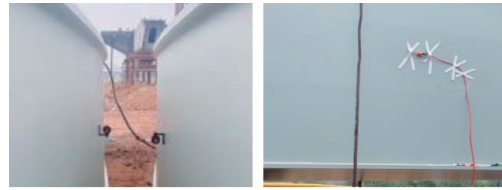
在该大跨度钢箱提篮拱桥主系梁拼装后,对高程进行监控及验收量测,结果如表1所示,吊索布置及位置如图1所示。由监测值与设计值的对比可知其高程满足要求。

### 5.3 轴线位置

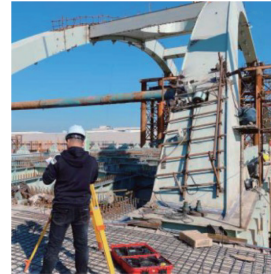
在该大跨度钢箱提篮拱桥吊装完成后,对轴线偏位进行测量,结果如表2所示,吊索布置及位置如图1所示。由监测值与设计值的对比可知,实测轴线偏位最大值为8 mm,小于规范限值10 mm,满足设计要求。

### 5.4 成桥线形

在该大跨度钢箱提篮拱桥桥面系施工完成后,对桥



a) 测点布置及传感器安装



b) 现场量测

图12 现场监控

Fig. 12 Onsite monitoring

表1 主系梁拼装高程量测结果

Table 1 Elevation measuring results of main girder

测点位置	高程设计值/m	高程监测值/m	
		左侧	右侧
距11#墩梁端0.12 m	13.115	13.126	13.118
拱脚焊口	13.261	13.270	13.271
吊索 DS14	13.364	13.382	13.383
吊索 DS13	13.436	13.454	13.455
吊索 DS12	13.496	13.524	13.526
吊索 DS11	13.544	13.574	13.568
吊索 DS10	13.580	13.611	13.591
吊索 DS9	13.604	13.634	13.614
吊索 DS8	13.616	13.644	13.612
吊索 DS7	13.616	13.643	13.601
吊索 DS6	13.604	13.623	13.590
吊索 DS5	13.580	13.607	13.577
吊索 DS4	13.544	13.573	13.547
吊索 DS3	13.496	13.525	13.508
吊索 DS2	13.436	13.464	13.457
吊索 DS1	13.364	13.388	13.391
拱脚焊口	13.261	13.287	13.269
距10#墩梁端0.12 m	13.115	13.130	13.119

面线形进行测量,结果如表3及图13所示,吊索布置及位置如图1所示。对比监测值与设计值可知,主桥成桥后,以相对高程为参照,桥面线形呈现出平顺状态,符合设计要求。

表2 轴线偏位测量结果

Table 2 Axis offset measuring results

m

位置及轴线桩号	设计值		监测值		轴线偏差
	x方向	y方向	x方向	y方向	
吊索 DS1 K0+966.150	9.578 0	13.150 0	9.570 1	13.153 1	-0.008
	-9.578 0	13.150 0	-9.570 7	13.152 4	0.007
吊索 DS7 K0+995.550	9.578 0	42.550 0	9.572 8	42.543 8	-0.005
	-9.578 0	42.550 0	-9.572 2	42.546 4	0.006

表3 成桥线形测量结果

Table 3 Bridge alignment measuring results

m

测点位置	标高 设计值	左侧标高 监测值	右侧标高 监测值
10#墩伸缩缝(基准点)	0.000	0.000	0.000
拱脚段	0.150	0.181	0.185
吊索 DS1	0.253	0.278	0.260
吊索 DS2	0.325	0.354	0.342
吊索 DS3	0.385	0.423	0.401
吊索 DS4	0.433	0.466	0.437
吊索 DS5	0.469	0.493	0.469
吊索 DS6	0.493	0.507	0.484
吊索 DS7	0.505	0.512	0.493
吊索 DS8	0.505	0.502	0.494
吊索 DS9	0.493	0.487	0.482
吊索 DS10	0.469	0.457	0.462
吊索 DS11	0.433	0.418	0.434
吊索 DS12	0.385	0.368	0.393
吊索 DS13	0.325	0.303	0.322
吊索 DS14	0.253	0.236	0.244
拱脚段	0.150	0.143	0.161
11#墩伸缩缝	0.000	0.018	0.024

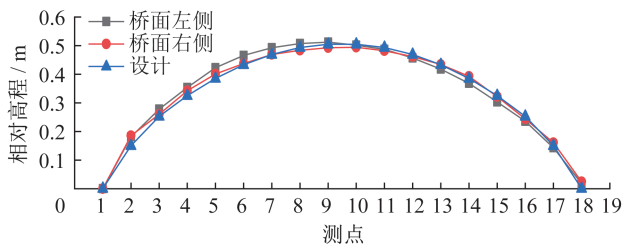


图13 成桥线形测量结果

Fig. 13 Bridge alignment measuring results

## 6 结语

通过对该大跨度钢箱提篮拱桥的施工线形新型监控技术进行研究,可得出以下结论:

该大跨度钢箱提篮拱桥采用少支架大节段的吊装施工技术进行施工。在施工过程中,对该桥的施工线形进行控制。利用有限元软件 Midas Civil 对施工的关键阶段进行有限元建模分析,计算得到桥体的线形和预拱度设置。通过现场监测对施工线形进行监控,并对比监测值与设计值,最终保证成桥线形平顺,满足设计要求的同时兼顾造型美观。本文提出的施工线形新型监控技术将监控环节前置并纳入临时支架监控,创新选取长寿命点位并提出一种快速安装定位创新装置,可供大跨度钢箱提篮拱桥及类似大跨度钢桥的施工参考。

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈杰,陈方尧,张欢,等. 阜阳颍柳路泉河桥主桥钢箱梁安装施工分析[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(5): 133-140. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.05.015.  
CHEN Jie, CHEN Fangyao, ZHANG Huan, et al. Analysis on the installation construction for the steel box girder of yingliu-road quan-river bridge in Fuyang[J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(5): 133-140. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.05.015. (in Chinese)
- [ 2 ] 唐永,么学春,赖旺盛,等. 考虑初始缺陷的桥梁高大施工支架整体稳定性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(1): 93-105. DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230820001.  
TANG Yong, YAO Xuechun, LAI Wangsheng, et al. Study on the overall stability performance of tall construction supports for bridges considering initial defects[J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(1): 93-105. DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230820001. (in Chinese)
- [ 3 ] 邓鑫. 大跨比钢箱提篮拱桥提升施工技术及稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.  
DENG Xin. Research on lifting construction technology and stability of steel box basket arch bridge with large rise-span ratio [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [ 4 ] 李明亮. 成雅快速通道跨线钢箱梁吊装施工技术研究[J]. 中国市政工程, 2020(4): 68-71, 104. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4655.2020.04.020.  
LI Mingliang. Study on hoisting construction technology of

- cross line steel box girder of chengya expressway [J]. China Municipal Engineering, 2020(4):68-71,104.DOI: 10.3969/j.issn.1004-4655.2020.04.020.(in Chinese)
- [ 5 ] 陈兴合.内河航道钢箱提篮拱桥大节段吊装施工关键技术研究[J].施工技术(中英文),2023,52(9):102-107.DOI: 10.7672/sgjs2023090102.  
CHEN Xinghe. Research on key construction technology of large segments hoisting for inland waterway steel-box X-style arch bridge[J]. Construction Technology, 2023, 52(9): 102-107.DOI: 10.7672/sgjs2023090102.(in Chinese)
- [ 6 ] 孙海波.连续刚构桥施工控制技术研究[D].西安:长安大学,2007.  
SUN Haibo. Research on construction control technology of continuous rigid frame bridge[D].Xi'an:Chang'an University, 2007.(in Chinese)
- [ 7 ] 高金港,周世军.大跨径高速铁路连续梁仿真分析与施工监控[J].甘肃科技,2010,26(20):154-157.DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2010.20.057.  
GAO Jingang, ZHOU Shijun. Simulation analysis and construction monitoring of continuous beams in large-span high-speed railways[J]. Gansu Science and Technology, 2010, 26(20): 154-157.DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2010.20.057.(in Chinese)
- [ 8 ] 刘晓燕.大跨径预应力混凝土连续梁桥施工阶段结构行为研究[J].城市建设理论研究(电子版),2012(15):1-4.  
LIU Xiaoyan. Research on structural behavior of long span prestressed concrete continuous beam bridge during construction stage [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2012(15): 1-4.(in Chinese)
- [ 9 ] 胡锐光,何敏.大跨度连续梁桥悬臂施工监控策略方法探讨[J].科技创新导报,2015,12(6):75.DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2015.06.047.  
HU Ruiguang, HE Min. Exploration of monitoring strategies and methods for cantilever construction of large-span continuous beam bridge[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(6): 75.DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2015.06.047.(in Chinese)
- [ 10 ] 马德云.大跨度连续刚构桥施工控制研究[D].成都:西南交通大学,2008.  
MA Deyun. Research on construction control of long span continuous rigid frame bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.(in Chinese)
- [ 11 ] 马明.苍溪嘉陵江特大桥施工监测过程及相关参数分析[D].成都:西南交通大学,2011.  
MA Ming. Construction monitoring and relative parameter analysis of Cangxi extra-large bridge[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.(in Chinese)
- [ 12 ] 徐君兰.大跨度桥梁施工控制[M].北京:人民交通出版社,2000:20-25.  
XU Junlan. Construction control of long-span bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2000: 20-25.(in Chinese)
- [ 13 ] 白光耀.大跨度连续刚构桥的施工监控与结构仿真分析[D].南宁:广西大学,2006.  
BAI Guangyao. Constructional monitoring and structural simulation analysis of large span continuous rigid frame bridge[D].Nanning:Guangxi University, 2006.(in Chinese)
- [ 14 ] 岳仁辉.大跨度刚构连续梁桥悬臂施工仿真分析与控制的研究[D].北京:北京交通大学,2008.  
YUE Renhui. The research and artificial analysis construction controlling of longspan rigid-frame continuous bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.(in Chinese)
- [ 15 ] 王志伟.钢结构桁架式梁拱组合桥梁定位控制措施[J].交通建设与管理,2014(24):141-143.DOI: 10.3969/j.issn.1673-8098.2014.12.052.  
WANG Zhiwei. Positioning control measures for steel structure truss beam arch composite bridge[J]. Transportation Construction & Management, 2014 (24) : 141-143. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8098.2014.12.052.(in Chinese)
- [ 16 ] 张经枚.钢管系杆拱桥混凝土施工监理要点[J].四川水泥,2023(1):229-231.  
ZHANG Jingmei. Key points of concrete construction supervision for steel pipe tied arch bridge[J]. Sichuan Cement, 2023(1): 229-231.(in Chinese)
- [ 17 ] 卢相.大跨度钢管混凝土提篮拱拱肋安装施工技术分析[J].居舍,2021(15):85-86.  
LU Xiang. Analysis of installation and construction technology for large span steel pipe concrete basket arch[J]. Ju She, 2021(15): 85-86.(in Chinese)
- [ 18 ] 朱金彪.高速铁路大跨连续刚构拱桥施工关键技术[J].中国水运,2023(7):139-142.DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.04.049.  
ZHU Jinbiao. Key construction technique for large-span continuous rigid frame arch bridge on high-speed railway[J]. China Water Transport, 2023(7): 139-142.DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u.2023.04.049.(in Chinese)