

山区峡谷超大跨径钢桁拱桥桁片姿态调整施工技术

谢维平

甘肃铁科建设工程咨询有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 随着我国山区交通基础设施建设的持续推进,大跨度钢桁拱桥在跨越深切峡谷中具有显著优势。然而,受限于峡谷地形狭窄、无通航条件及吊装设备能力不足,超大跨径钢桁拱桥桁片常无法以成桥姿态直接运输与吊装,必须通过现场拼装后进行姿态转换,以适应安装需求。本文以武两高速公路凤来大溪河特大桥(主跨580m上承式钢桁拱桥)为工程背景,针对山区峡谷环境下超大跨径钢桁拱桥桁片的姿态调整与转运技术展开系统研究。重点突破了超重桁片临时减重与加固技术、狭小场地内桁片翻身工艺以及多工况姿态协同控制方法,形成了一套适用于山区峡谷条件的钢桁拱桥桁片姿态调整与转运施工技术体系。为类似山区峡谷大跨度钢桁拱桥的桁片安装提供了可靠的技术支撑与实践参考,为同类山区峡谷大跨度钢梁安装工程提供了技术参考和实践借鉴。

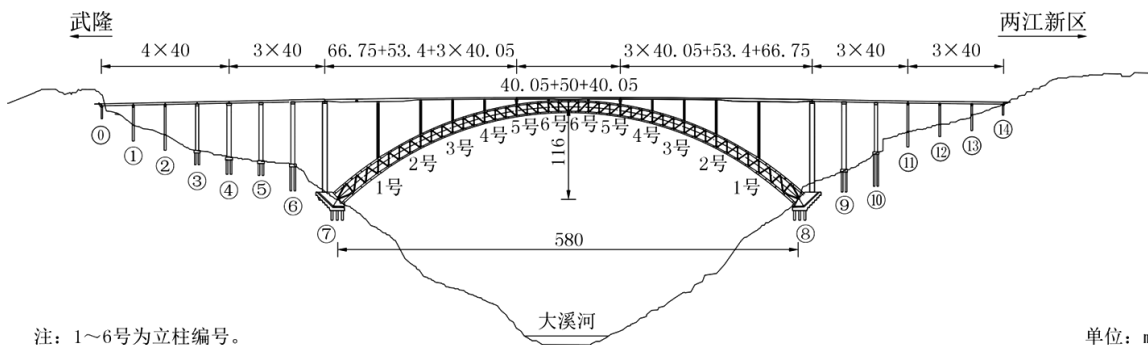
关键词: 山区峡谷; 超大跨径钢桁拱桥; 桁片姿态调整; 翻身技术; 临时减重; 转运施工

引言: 我国山区地域广阔,交通基础设施建设不断向纵深推进,超大跨径钢桁拱桥因跨越能力强、适应性好,成为穿越深切峡谷、克服地形障碍的核心桥型。但山区峡谷地形狭窄、无通航条件,且吊装设备作业空间受限,加之山区峡谷普遍存在地形高差悬殊、地质条件复杂的问题,岩土稳定性不足进一步制约施工操作,同时传统桁片姿态调整方法存在适配性不足、施工效率低下、安全风险较高等弊端,难以适配超大跨径、超重桁片的施工需求,易出现应力超标、姿态偏差等问题,严重制约工程施工进度与结构耐久性^[1]。本文以武两高速公路凤来大溪河特大桥(主跨580m上承式钢桁拱桥)为工程依托,针对超重桁片转运、狭小场地翻身及多工况姿

态控制等核心问题展开研究,研发适配山区峡谷环境的施工技术体系,有效破解施工技术瓶颈,为同类工程施工提供可靠的技术参考与实践借鉴。

1 工程概况

凤来大溪河特大桥全长1136.7m,主桥采用跨径580m的上承式钢桁拱桥,拱肋27个节段,单节段重量215~423t;钢立柱20根,最大高度69.213m;钢混组合梁26片,最大重量281.7t。主桥平面位于直线上,纵断面位于R=17500m的竖曲线上,以主桥跨中为中心,纵向设置2%人字坡。拱上立柱采用钢结构双柱刚架,拱上梁采用钢板-混凝土结合连续梁,桥面宽25.5m,双向4车道,设计行车速度100km/h。



注: 1~6号为立柱编号。

单位: m

图1 凤来大溪河特大桥立面布置

2 总体施工方案

由于地处山区峡谷无通航条件,拱肋仅能通过桥位处陆上拼装平台进行拼装再吊运,拼装场地地形受限,长度245m,宽度53m,设拼装区、存梁区、杆件半成品存放区和配件库房等,经过经济测算场内配置280t龙门吊及80t龙门吊进行桁片拼装、转运,配合专用的翻身装置进

行姿态调整。

大跨度钢梁安装整体遵循“场地准备→工厂杆件制造→现场桁片总拼→280t龙门吊水平吊装至翻身区(并通过龙门吊吊钩水平转向90°)→龙门吊吊翻身90°姿态调整及临时固定→换钩→悬索吊吊装”的核心逻辑,各环节无缝衔接。



图2 凤来大溪河特大桥地貌

3 关键施工技术

3.1 技术特点

通过“临时拆拼-加固补偿”实现超重桁片减重运输，拆除非主受力腹杆及拼接板（减重12%~15%），同步采用临时撑杆形成三角稳定体系，确保水平吊装工况下结构应力 $\leq 19.9\text{MPa}$ ，变形量 $\leq 5.9\text{mm}$ ，兼顾运输限重与结构稳定性。

通过向地下拓展作业空间，设置下沉式翻身基坑，有

效克服了山区桥位作业平面狭窄与竖向净空不足的双重限制，为桁片翻身创造了安全、可控的立体作业条件。充分利用280t龙门吊与L型翻身胎具的“提升-导向”协同机制：水平转运时通过4点分布式吊耳（Q355B材质，熔透焊缝连接）与 $\phi 70$ 钢丝绳（破断力6040kN）实现平稳起吊；翻身阶段依托胎具圆角过渡（ $R \geq 500\text{mm}$ ），配合龙门吊纵向走行与吊钩提升动作，使桁片沿弧面完成0-90°翻转，避免刚性冲击。通过引入龙门吊提升于行走红外动态控制装置，实时监测吊绳倾角，测算吊具及吊绳的竖直状态，同步控制龙门吊的提升和行走速率，使龙门吊吊具及吊绳始终处于相对竖直状态，防止因吊具产生斜向拉力，造成龙门吊失稳倾覆^[2]。

3.2 超重桁片减重技术

3.3.1 减重方案设计

场内配置龙门吊额定吊重280t，由于SS2、SS3、SS6、NS13桁片重量超过280t，SS7桁片重275t，转运时需拆除部分腹杆及拼接板，待翻身完成后进行安装。桁片重量参数见表1。

表1 桁片重量参数表

序号	节段编号	原重量/t	全桥数量	减重后钢梁/t	加固撑杆/t	转运总重/t
1	SS2	303.1	4	259.2	7.2	266.4
2	SS3	294.5	4	258.8	7.2	266.0
3	SS4	204.0	4			
4	SS5	212.4	4			
5	SS6	310.6	4	267.7	7.2	274.9
6	SS7	275.0	4	260.8	0.0	260.8
7	SS8	258.4	4			
8	SS9	242.1	4			
9	SS10	243.4	4			
10	SS11	248.5	4			
11	SS12	242.5	2			
12	SS13	196.3	2			
13	NS13	296.1	2	270.3	0.0	270.3

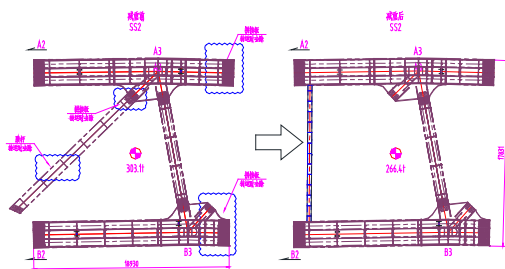


图3 SS2桁片转运减重代表图

3.3.2 超重桁片减重与翻身数值模拟

采用midas软件建立桁片有限元模型，模拟拆除非关键腹杆后的应力分布：水平吊装工况下结构最大应力 19.2MPa （ $\leq 19.9\text{MPa}$ ），最大变形 5.3mm （ $\leq 5.9\text{mm}$ ）；临时撑杆最大内力 37.5t ，应力 67.3MPa ，满足Q235B材质强度要求（屈服强度 235MPa ）；模拟不同减重比例（10%~18%）发现，减重12%~15%时，结构安全性与设备适配性达到最佳平衡。

模拟L型胎具+基坑组合翻身过程，分析不同翻身速率、胎具圆角半径对结构的影响：圆角半径 $R = 500\text{mm}$

时,刚性冲击最小,结构局部应力峰值降低30%;提升速率0.5m/min、走行速率1m/min时,结构变形最小,避免共振产生的附加应力;翻身至45°时为应力临界状态,需控制吊绳竖直偏差 $\leq 2^\circ$,通过红外装置实时调整^[3]。

基于桁片施工情况,分别对单节间和双节间进行不同姿态下的模拟研究,主要针对水平吊装转运工况,翻身45°工况,成桥吊装工况分别进行计算研究。保证桁片杆件整体稳定,临时杆件强度、刚度及稳定性满足规范要求。

按照钢梁实际尺寸进行建模,最重单节间桁片为SS2,拆除部分腹杆及拼接板后重量为266.4t;最重双节间桁片为SS6,拆除部分腹杆及拼接板后重量为274.9t;根据现场实际情况在桁片上设置吊点,模拟施工过程中桁片杆件应力及变形情况。

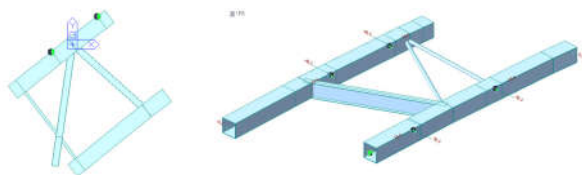


图4 模型图 (t)

3.3 桁片翻身

3.3.1 翻身基坑及胎架设置

依据最大待翻身桁片的长度、宽度及翻身过程中的姿态包络线,考虑建设期间拼装场内扣背索的影响,结合门式起重机作业半径与桥下净空限制,综合确定基坑的平面尺寸与开挖深度。基坑开挖完成后检测其基底承载力,按照1%的双向横坡进行基础混凝土浇筑,保证排水,同时在基坑四周设置排水沟及集水井,配置安装浮球控制阀的自动排水泵,避免基坑积水。最后根据翻身工艺计算确定的L型胎架支点轨迹,精确放样并施工两条专用的混凝土翻身滚槽。

基坑内的桁片翻身胎架采用L型箱形截面钢结构设计,且在转角处设置圆弧过渡区,该圆弧段既作为桁片翻转时的理论铰轴,又充当滚动导向面。为保障胎架安全可靠,需建立胎架与桁片的整体力学模型,对胎架主体结构结构的强度、刚度及稳定性开展全面验算,同时针对圆弧过渡区的局部承压性能与抗疲劳特性进行专项复核,确保结构各项性能指标达标,并预留充足的安全储备。

将翻身胎架定位在基坑内固定位置,采用可调垫板对胎架底座进行严格调平,确保左右两个翻身胎架顶面的安装标高与水平度误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。桁片翻身起始方向的一侧铺设废旧汽车轮胎或专用橡胶缓冲垫,使其与基坑侧壁或底面形成柔性接触,以有效吸收初始翻

转时的微量冲击与振动,避免刚性碰撞。



图5 翻身基坑及胎架

3.3.2 桁片组拼

拱肋桁片的组拼施工采用“转换母梁”式卧拼工艺开展连续匹配作业。施工过程中需先精准固定母梁的线形及标高、保障其位置稳定性,再将新节段杆件与母梁对应接口进行试拼,通过冲钉实现临时锁固,并借助全站仪实施实时动态监测与调整,确保接口达成无应力吻合状态,且线形衔接平顺。待新节段的整体线形与接口质量经检验全部合格后,方可开展节点高强度螺栓终拧及环口焊接施工。该工艺可实现节段间几何尺寸与线形的精准传递及累积误差控制,为长拱肋整体线形精度提供了可靠保障。

单个节段的组拼需在专用胎架上遵循标准化流程推进,将上弦杆吊装至胎架,通过精准测量调整其线形至符合设计要求后,采用冲钉完成临时锁固;然后依照节点拼装顺序逐一安装各腹杆,保证腹杆与上弦杆的接口实现精准对位;最后吊装下弦杆,在全程测量监控的前提下把控其空间线形,逐步实现下弦杆与已安装腹杆下端接口的精准匹配,再以冲钉锁固,构建成稳定的框架结构;卧拼完成后由测量人员开展全面复测,将实测数据与已安装拱肋的线形数据相结合,依托三维扫描技术构建的数字孪生模型开展拟合分析与趋势预测,据此指导当前节段线形的精细化调整,实现对成桥线形的前置精准管控;待线形调整至验收标准后,严格按照工艺规范完成节点高强度螺栓的终拧作业,并实施环口熔透焊接,焊接质量经检验合格后转入后续施工工序。

3.3.3 桁片转运翻身

桁片在拼装场内总拼完成后,通过280t龙门吊脱胎并吊装至翻身区。桁片水平吊装共设置4个吊耳,吊耳均布置在桁片弦杆隔板位置处,吊耳采用Q355B材质钢板制作而成。在吊装过程中桁片需要进行平面旋转,通过采用280t门式起重机吊钩处的滚动轴承及倒链牵引的方式进行。



图6 桁片空中转向

平转完成后,龙门吊将桁片整体吊运至翻身基坑正上方区域,作业人员通过三维坐标定位完成精准对位后,缓慢下放桁片,将其靠近基坑支点的一端平稳落置于已完成调平作业的L型翻身胎架预设支垫位置,另一端则搁置在基坑内预埋的临时辅助垫座上。就位过程中严格控制桁片纵向向中心线与基坑、胎架中心线的对齐精度及轴线位置。

将平移吊耳拆除吊点转换至翻身吊耳,对所有连接

节点进行全面核查,确认连接牢固无松动,同时调整龙门吊吊钩位置,保证其受力方向呈垂直状态,避免因偏载产生附加弯矩。准备完成后龙门吊缓慢将桁片置于翻身胎架的一端吊离临时辅助垫座;龙门吊大车同步向远离胎架支点的方向缓慢、匀速行进。操作人员需全程紧盯红外动态控制系统显示屏,依据实时反馈的吊绳倾角数据,动态协调吊钩起升速度与大车行走速度,确保两者联动同步。

翻身过程需保持连续平稳,严禁突发启停,同时需在 30° 、 45° 、 60° 等关键姿态角度处短暂停顿。停顿期间检查桁片结构变形情况、胎架基础沉降状态及缆风绳受力分布。通过持续精准控制龙门吊“起升-行走”的协同动作,桁片沿L型胎架圆弧导向面平稳翻转,直至完全脱离胎架接触,呈竖直悬挂状态,标志着翻身作业完成。



步骤一:通过龙门吊将翻身桁片吊装至翻身座上,另一端放置垫座上。将龙门吊卸扣及钢丝绳配备到位,龙门吊连接上部吊耳,准备进行翻身。



步骤二:龙门吊起升将桁片一段吊离垫座,同时龙门吊向左侧行走,使桁片翻转 45° 。



步骤三:重复步骤二,继续将桁片翻转呈竖直状态,完成翻身。



步骤四:桁片翻身完成后,通过龙门吊将桁片吊装回右侧临时固定区。

图7 翻身流程图

3.3.5 桁片固定

桁片底部通过翻身L座进行抄平,顶部通过系缆风绳的方式与地面地锚吊耳进行连接固定。在吊耳耳板上开设 $\phi 40$ 圆孔,缆风绳顶部通过卸扣与耳板孔进行连接。经计算,缆风绳选用 $6 \times 19(a) + FC - 1770$,直径 $\phi 20$ 钢丝绳。卸扣选用S6级弓形8.5t卸扣,型号为S-BW8.5-1。

由于部分桁片超重原因,翻身前拆除了腹杆。需在翻身吊装至固定区后,拆除临时撑杆,然后使用100t汽车吊进行腹杆安装。

4 结论

针对山区超大跨度钢桁拱桥桁片姿态调整这一重大技术挑战,开展系统性研究与实践。鉴于桥位狭窄陡峭,传统工艺难以满足安全、效率及经济性要求,创新提出“向地下要空间、以智能控安全、以协同提效能”思路,研发

应用了以下沉式翻身基坑、L型导向胎架与龙门吊协同系统、红外动态智能控制技术为核心的成套施工技术。破解了场地与净空约束,实现工装与设备高效协同及翻身过程可控,经武两高速凤来大溪河特大桥应用验证,安全可靠、质量优良,经济效益与环保成效显著,为复杂环境下超大构件安装提供了可推广方案,为山区大跨度拱桥空间姿态调整施工提供可靠参考。

参考文献

- [1]薛婷婷,赵谦,王燕,等.超大跨径缆索承重桥梁建设标准体系构建[J].运输经理世界,2024,(36):116-118.
- [2]侯康,魏乐永,颜智法,等.超大跨径斜拉-悬索协作体系桥力学性能研究[J].世界桥梁,2025,53(06):54-59.
- [3]李友清,苏金堂,张华武,等.超大跨径中承式钢箱拱绿色快速化施工研究[J].公路,2025,70(11):158-165.