

多维度约束下异型斜拉桥吊装方案优化研究

何 勇

(简阳市公路工程质量监督站, 四川 成都 641400)

摘 要: 为解决异型斜拉桥索塔吊装工程中安全风险高、质量控制难、造价与进度平衡难度大的问题,以某非对称曲线形独塔扭索面斜拉桥工程为研究对象,聚焦“安全为前提、质量合格为基础、造价更低为导向、进度达标为约束”核心目标,构建涵盖安全、质量、造价、进度的多维度评价体系。通过案例分析与定量计算,对2种吊装方案进行系统对比,明确各方案在多维度约束下的优劣差异。结合工程实际需求优化后,形成了“质量、安全、造价、进度相平衡”的复合方案,可实现多维度目标平衡。研究成果可为同类异型桥梁吊装方案选择提供理论支撑与实践借鉴。

关键词: 桥梁吊装;多维度约束;方案优化;异型斜拉桥;安全质量管控

中图分类号: U445.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0359-05

Research on Optimization of Hoisting Schemes for Special-shaped Cable-stayed Bridges under Multi-Dimensional Constraints

HE Yong

(Jianyang Highway Engineering Quality Supervision Station, Chengdu 641400, China)

Abstract: To address the problems of high safety risks, difficult quality control and great challenges in balancing cost and schedule in the pylon hoisting project of special-shaped cable-stayed bridges, taking an asymmetric curved single-pylon twisted-plane cable-stayed bridge project as the research object, and focusing on the core objectives of "safety as the premise, qualified quality as the foundation, lower cost as the guidance, and schedule compliance as the constraint", a multi-dimensional evaluation system covering safety, quality, cost and schedule is established. Through case analysis and quantitative calculation, two hoisting schemes are systematically compared, clarifying the advantages and disadvantages of each scheme under the multi-dimensional constraints. Combined with the actual engineering needs, an optimized composite scheme that "balances quality, safety, cost and schedule" is formed to achieve the balance of multi-dimensional objectives. The research results can provide theoretical support and practical reference for the selection of hoisting schemes for similar special-shaped bridges.

Keywords: bridge hoisting; multi-dimensional constraints; scheme optimization; special-shaped cable-stayed bridge; safety and quality control

0 引 言

随着公路桥梁的不断发展,公路桥梁建设出现大跨度、异型化的情况越来越多,吊装工程作为桥梁建设的关键一环,其方案选择直接决定着工程安全、质量、造价与进度目标的实现。

当前,桥梁施工领域对吊装方案的选择多侧重于单一维度优化,特别是偏重造价控制的选择,导致缺乏多维度协同约束下的系统分析,而出现安全事故等问题。异型斜拉桥索塔虽设计与施工难度较

高,但受土地政策、地形条件等因素影响,在大跨度峡谷和河流区域的应用日益广泛。基于此,本文以该异型斜拉桥为案例,构建多维度评价体系,对比分析2种初始吊装方案的优劣,优化形成适配工程需求的吊装方案,为同类工程提供参考。

1 案例工程概况

案例工程为一座主、引桥结合的景观桥梁,全长963 m。其中,主桥采用独塔双索面斜拉桥结构,跨径布置为45 m+185 m+238 m+45 m,总长513 m;主桥索塔为空间曲线六边形断面钢斜塔(见图1),总高约173 m,桥面以上高度约140 m,桥面以下高度约33 m。引桥部分均采用预制简支预应力小箱梁结构,东侧

收稿日期: 2025-12-30

作者简介: 何勇(1989—),男,学士,工程师,从事公路项目质量安全政府监督工作。

引桥共3联,桥跨布置为3×(4×30 m);西侧引桥共1联,桥跨布置为3×30 m。

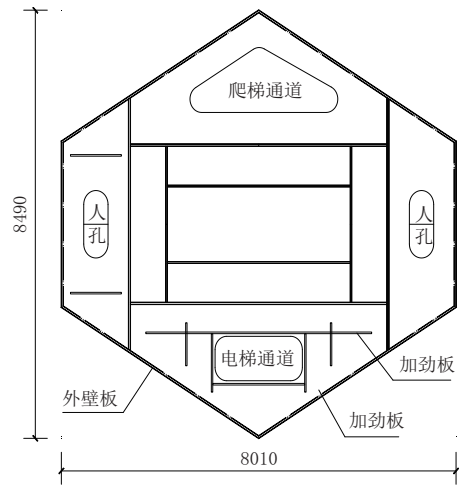


图1 主桥索塔六边形断面图(单位:mm)

该工程有以下4方面核心难点:

- (1)质量控制难度大。索塔为异型扭转斜塔,各构件安装精度要求高,线形控制难,且全焊接结构中厚板焊接质量与收缩控制难度大^[1]。
- (2)安全风险高。塔柱最大高度173 m,导致高空作业风险突出。索塔节段吊装涉及超大超重构件,吊装机械的大臂受高空风荷载影响显著,且临时结构与大型设备众多易产生交叉作业^[2]。
- (3)进度推进慢。每1勾吊装都需在保障安全质量前提下完成索塔高精度安装^[3]且只能按工艺推进。
- (4)造价管控难。大型吊装设备投入与高精度施工要求对成本控制提出挑战^[4]。

主桥立面布置图见图2。

2 初始吊装方案概况

2.1 设备选型对比分析

为明确所选设备的最优性,对方案核心设备及同类备选设备进行多维度对比。吊装设备选型对比分析表见表1。

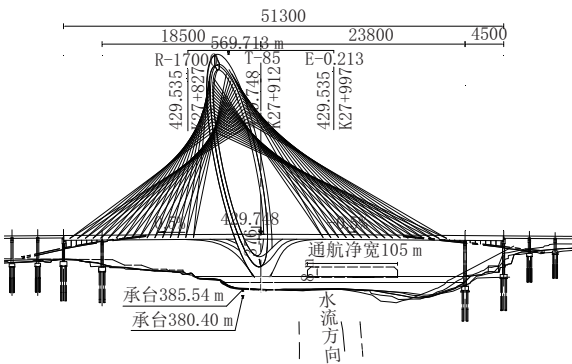


图2 主桥立面布置图(单位:cm)

综合起吊能力、租赁成本、适应工况等指标,3 600 t·m 塔吊适配常规区小吨位构件吊装,1 350 t 履带吊适配核心区大吨位异型构件吊装,所选设备在对应作业区域具有最优性价比。

2.2 方案一(3 600 t·m 塔吊吊装方案)

该方案中,对于距桥面63 m以上的索塔节段采用3 600 t·m 塔吊作为核心吊装设备;同时针对设备吊重限额划分吊装节段,整体吊装作业量为100勾。施工流程主要包括:索塔起始段支架搭设、63 m高度内索塔安装(履带吊辅助)、3 600 t·m 塔吊安装、63 m以上索塔安装(塔吊为主)、塔吊附墙安装、线形调整及合龙段施工等关键环节。方案预计总造价800万元,预计总工期249 d。

2.3 方案二(2台1 350 t履带吊吊装方案)

该方案采用2台1 350 t(XLC18 000 t·m)履带吊作为核心吊装设备,将索塔3节段在地面焊接为1勾并编制专项施工方案,整体吊装作业量缩减至35勾。通过2台大型履带吊协同作业,实现索塔节段精准吊装,利用履带吊起重能力强、作业灵活性较高的特点适配异型索塔安装需求^[5]。方案预计总造价1 200万元,预计总工期180 d,较方案一缩短69 d。

3 多维度评价体系构建

基于“以安全为前提、质量合格为基础、造价更低为导向、进度达标为约束”的核心目标,构建包含4

表1 吊装设备选型对比分析表

设备类型	型号规格	额定起吊能力	每月租赁成本/万元	适应工况	核心优势	核心劣势
塔吊	3 600 t·m	最大吊重80 t	45	中低空、小吨位构件吊装	成本低、作业范围固定	吊重有限、高空稳定性一般、安装调试周期长
履带吊	1 350 t (XLC18 000 t·m)	最大吊重1 350 t	100	高空、大吨位、异型构件吊装	吊重能力强、稳定性好、灵活性高	成本高、对作业场地要求高
履带吊	800 t	最大吊重800 t	80	中吨位、复杂工况吊装	成本适中	吊重能力不适配核心节段吊装
塔吊	5 000 t·m	最大吊重120 t	60	中高空、中吨位构件吊装	吊重较3 600 t·m塔吊提升	成本高于3 600 t·m塔吊,性价比不足

个一级指标、11 个二级指标的多维度评价体系。4 个一级指标分别对应不同管控维度:安全维度聚焦作业过程风险防控;质量维度侧重施工成果精度与可靠性;造价维度关注成本投入;进度维度聚焦施工效率与工期保障。二级指标无信息重叠,经因子分析,其 KMO 值接近 1,表明各二级指标间相关性强、信息重叠度低,指标体系结构合理,适合构建多维度评价体系^[6]。采用层次分析法确定各指标权重,结合专家打分与定量计算实现方案综合评价^[1]。

3.1 指标体系与权重确定

通过查询文献并聘请专家论证,形成意见由建设单位确认后报行政主管部门核准,明确各维度指标及权重分配。其中安全维度作为前置性指标权重设为 0.35,下设高空作业防护、超重构件吊装控制、风荷载应对、交叉作业规避 4 个二级指标;质量维度作为基础性指标权重设为 0.30,下设线形控制精度、焊接质量保障、安装精度控制 3 个二级指标^[7];造价维度作为导向性指标权重设为 0.20,下设设备投入成本、人工成本 2 个二级指标^[8];进度维度作为约束性指标权重设为 0.15,下设作业效率、工期保障 2 个二级指标^[9]。各指标权重及评分标准见表 2。

表 2 评价指标体系及权重

一级指标 (权重)	二级指标	评分标准(10 分制)	指标 权重
安全 (权重 0.35)	高空作业	措施完善(8~10 分);局部漏洞(1~7 分);措施不足(0 分)	0.09
	超重构件 吊装	协同精准(8~10 分);单机稳定(1~7 分);精度不足(0 分)	0.09
	风荷载	实时监测预警(8~10 分);定期监测(1~7 分);无措施(0 分)	0.08
	交叉作业	智能调度(8~10 分);人工调度(1~7 分);调度混乱(0 分)	0.09
质量 (权重 0.30)	线形精度	误差≤2 mm(8~10 分);2~5 mm(1~7 分);>5 mm(0 分)	0.10
	焊接质量	合格率 100%(8~10 分);95%~99%(1~7 分);<95%(0 分)	0.10
	安装精度	毫米级(8~10 分);厘米级(1~7 分);分米级(0 分)	0.10
造价 (权重 0.20)	设备投入	≤800 万(8~10 分);800~1 000 万(4~7 分);>1 000 万(1~3 分)	0.12
	人工成本	≤150 万(8~10 分);150~200 万(4~7 分);>200 万(1~3 分)	0.08
进度 (权重 0.15)	作业效率	>0.5 勾/d(8~10 分);0.3~0.5 勾/d(4~7 分);<0.3 勾/d(1~3 分)	0.08
	工期保障	≤180 d(8~10 分);180~220 d(4~7 分);>220 d(1~3 分)	0.07

注:设备租赁成本参考近 5 年同类异型斜拉桥吊装设备市场价格及工程概算标准,经 3 名行业资深专家论证确认;作业效率基于同类工程实际施工数据统计。

3.2 评价方法

采用定量计算与定性评价结合的方式进行方案评分。对于安全防护、质量控制等定性指标,组建由建设单位、施工单位、监理单位及行业专家组成的 5 人评价小组,采用加权平均法确定得分;对于造价、工期、作业效率等可量化指标,根据实际数据对照评分标准直接赋分。最终综合得分=Σ(一级指标权重×二级指标得分×二级指标权重)^[10]。

采用变异系数法检验打分结果可信度,计算各定性指标打分结果的变异系数,所有指标变异系数均不大于 0.2,表明专家打分一致性良好,结果可信。

4 多维度方案对比分析

4.1 各维度评分结果

通过指标数据收集与专家评价,2 种方案各维度得分及综合得分如表 3 所示。

表 3 2 种方案评分结果

一级指标	二级指标	方案一 得分	方案二 得分	方案一 加权分	方案二 加权分
安全 (权重 0.35)	高空作业	7.0	9.0	0.63	0.81
	超重构件吊装	6.5	9.0	0.59	0.81
	风荷载	7.5	8.5	0.60	0.68
	交叉作业	6.0	8.0	0.54	0.72
质量 (权重 0.30)	线型精度	7.0	9.5	0.70	0.95
	焊接质量	7.5	9.0	0.75	0.90
	安装精度	6.5	9.0	0.65	0.90
造价 (权重 0.20)	设备投入	10.0	3.0	1.20	0.36
	人工	8.0	5.0	0.64	0.40
进度 (权重 0.15)	作业效率	4.0	9.0	0.32	0.72
	工期保障	4.5	10.0	0.32	0.70
综合得分				6.94	7.95

4.2 各维度对比分析

4.2.1 安全维度

方案一安全综合加权分为 0.63+0.59+0.60+0.54=2.36,方案二此项分为 0.81+0.81+0.68+0.72=3.02。

显然,方案二在安全保障上具有明显优势。具体表现为:方案一采用塔吊吊装时,高空作业平台施工时间长,局部措施存在漏洞;塔吊吊重能力有限,将产生更多高空焊接作业,且控制精度有限;100 勾作业量导致设备调度频繁,立体交叉作业多。方案二通过 2 台 1 350 t 履带吊协同作业,3 个节段拼装为 1 勾,吊装与高空焊接次数均更少;35 勾精简作业量减少设备调度冲突,且履带吊对风荷载的适应性更强,配合实时监测系统可有效降低风荷载影响^[11]。

4.2.2 质量维度

方案一质量综合加权分为 $0.70+0.75+0.65=2.10$,方案二此项分为 $0.95+0.90+0.90=2.75$ 。

显然,方案二在质量控制上优势突出。具体表现为:方案二履带吊的吊重能力大幅提高,可将方案一中3个节段拼装为1勾(焊接任务在地面进行),进而减少吊装过程中的构件变形^[12]和高空焊接作业;履带吊更稳定,可实现毫米级精准定位,有效解决异型扭转斜塔的线形控制难题^[13];精简高空作业量使焊接作业更具保障性。方案一塔吊作业限制较多,部分节段吊装需多次调整,易产生安装误差累积,运输作业与吊装交叉频繁,质量安全管控难度增加^[7]。

4.2.3 造价维度

方案一造价综合加权分为 $1.20+0.64=1.84$,方案二此项分为 $0.36+0.40=0.76$ 。

显然,方案一在成本控制上具有优势。具体表现为:方案一造价成本较方案二节省400万元,一是塔吊设备租赁费用远低于2台大型履带吊;二是100勾作业量虽多于方案二,但塔吊作业人工技术要求低,人工成本较方案二低约30万元(主要是工资差异)^[14]。

4.2.4 进度维度

方案一进度综合加权分为 $0.32+0.32=0.64$,方案二此项分为 $0.72+0.70=1.42$ 。

显然,方案二在进度保障上优势显著。具体表现为:方案二总工期180 d,较方案一缩短69 d;将3节段拼接为1勾,由方案一的100勾吊装精简至35勾,使吊装作业时间大幅缩短;履带吊设备进场安装调试周期短,可快速形成作业能力。方案一因塔吊安装调试周期长(55 d),且与下部索塔安装存在交叉作业,进度协调难度大。

4.2.5 综合优劣总结

综合来看,2种方案有取长补短的可能:方案一的核心优势是造价低,契合成本控制需求,但存在安全保障不足、质量控制精度有限、进度效率偏低的短板,难以满足异型斜拉桥索塔的高标准施工要求;方案二的核心优势是安全保障可靠、质量控制精准、进度效率突出,能有效破解工程核心难点,但高设备投入导致造价偏高,不符合经济性导向。因此,需通过方案优化来实现“安全质量达标、造价可控、进度满足合同”的多目标平衡。

5 吊装方案优化设计

5.1 优化思路

多维度对比结果来看,单一吊装方式难以同时满足“安全前提、质量基础、造价导向、进度约束”的核心目标。优化思路为:保留方案二在安全、质量、进度上的优势,加强成本控制推算,采用“常规节段塔吊+核心节段履带吊”的复合吊装方案,实现多维度目标平衡。具体为:对常规低段采用3 600 t·m塔吊吊装;对索塔异型度高、重量大的核心节段(如扭转段、合拢段)采用2台1 350 t履带吊协同吊装,以保障安全质量,控制设备投入成本;通过作业流程优化减少交叉作业,兼顾进度效率。

5.2 优化后方案核心内容

5.2.1 吊装分区与设备配置

将索塔分为常规区(高程33~80 m,以桥面以上低段为主)和核心区(高程80~173 m,含主要扭转段与合拢焊接段)。常规区采用3 600 t·m塔吊吊装,作业量40勾,规避方案二“全段履带吊吊装成本过高”的缺陷;核心区采用2台1 350 t履带吊协同吊装,作业量20勾,针对性解决方案一“超重构件吊装精度不足、异型段质量控制难”的问题。

5.2.2 施工流程优化

采用“平行作业+流水施工”结合的流程:塔吊安装与索塔常规区基础施工平行进行,缩短前期准备时间,破解方案一“塔吊安装与下部施工交叉延误”的问题;核心区与常规区吊装流水作业,常规区吊装为核心区提供作业平台,核心区吊装不影响常规区进度;将线形调整与焊接作业穿插进行,避免工序脱节。优化后总工期控制在190 d,较方案二延长10 d,但较方案一缩短59 d,既满足合同进度要求,又为质量管控预留充足时间。

5.2.3 成本优化措施

履带吊核心区作业租期变短,造价下降;塔吊采用短租快转模式,减少闲置成本,针对性控制方案二“设备投入高”的短板。采用“核心区产业工人+常规区普通班组”的配置模式,核心区配备资深吊装与焊接人员(均使用产业工人)来保障质量安全,常规区配置熟练工人来控制成本,人工成本较方案二降低约30%。优化后总造价控制在1 000万元,较方案二节省200万元,较方案一增加200万元,但安全质量与进度保障能力显著提升,综合效益更优。

5.3 优化方案效果验证

优化方案后,综合计算结果显示,其安全维度得分 2.9(接近方案二)、质量维度得分 2.6(接近方案二)、造价维度得分 1.32(介于两方案之间)、进度维度得分 1.30(接近方案二);综合得分 8.12,较方案一提升 1.18 分,较方案二提升 0.17 分,实现了多维度目标的均衡优化。

优化方案的核心价值并非单一维度的大幅提升,而是实现“无短板、高均衡”的多目标协同。从工程全生命周期视角看,优化方案有效降低了安全事故风险(避免了方案一可能的返工、整改成本)和质量隐患(减少了后期维护成本),进度满足合同要求,造价控制在合理区间,形成了“安全可靠、质量合格、造价可控、进度达标”的良性平衡,其综合价值远高于单一维度最优的初始方案。

方案二虽在安全、质量、进度维度表现突出,但造价维度得分仅 0.76,存在明显短板;优化方案造价维度得分 1.32,较方案二提升 0.56 分,且安全、质量、进度维度得分接近方案二,无单项指标低于 6 分,避免了单一方案的极端短板;从全生命周期看,优化方案减少了方案一的返工风险和方案二的过高成本,综合效益更优,因此最终选择该方案。

现场试吊装数据表明:节段安装精度误差不大于 2 mm,焊接无损检测合格率达 100%;吊装效率满足进度要求;设备与人工成本较方案二降低约 20%,实现了“安全可靠、质量合格、造价可控、进度达标”的预期目标。

6 保障措施

6.1 安全保障措施

建立三级安全管控体系:一级管控聚焦吊装前准备,明确检查项(见表 4);二级管控聚焦作业安全,关注高空作业;三级管控聚焦应急保障,配备应急救援物资,每月开展应急演练,确保突发情况快速响应^[15]。

6.2 质量保障措施

推行全建设周期质量智能管控:设计阶段采用 BIM 技术模拟吊装过程,优化节段划分与吊装顺序;施工阶段实行“三检制+监理旁站”,核心区节段安装聘请专业监控单位校核,焊接作业采用二保焊或埋弧焊,24 h 后进行超声波无损检测;验收阶段建立“节段验收+整体验收”两级验收制度,节段安装后 48 h 内复核高程与平面位置,整体安装完成后进行

表 4 起重前安全检查表

检查项目	核心检查内容及标准
起重机械	验收合格;具备有效超高限位器、力矩限位器,吊钩有保险装置;作业前应试吊;站位满足方案要求
吊具(吊带、卸扣)	规格型号符合要求;无磨损、永久变形、裂纹等缺陷;吊带防护布完好,卸扣螺纹连接扎实
吊点与吊耳	符合设计规定;索具、钢丝绳规格达标;吊耳板材质、焊缝质量满足要求
作业环境	作业点基础承载力达标;起重机支腿伸展到位;与架空线路安全距离符合标准
人员资质	起重司机、信号司索工持有效特种作业证书,人证合一;经安全教育及技术交底;设专人指挥、监护
吊装作业	明确吊重,不超载;高处作业系安全带、设专用爬梯;作业平台坚实,临边防护到位;严格执行“十不吊”;划定警戒区并专人看护

线形复测,确保质量符合设计要求。

6.3 造价与进度保障措施

造价管控方面,建立周成本核算体系,每周核算设备使用、人工效能等,设置阈值,如:超支 5% 时触发预警;同时,通过优化作业流程、提高作业效率等方式控制成本。进度管控方面,制定周进度计划,严格控制吊装、线形调整等关键工序,每日召开进度协调会;降低天气影响,搭建临时防雨棚,小雨天气可继续作业。

7 结 语

(1)单一吊装方案难以满足多维度约束要求,方案一(塔吊为主)造价低但安全质量与进度保障不足,方案二(履带吊为主)安全质量与进度优势显著但造价偏高;优化后的复合方案通过“常规区塔吊+核心区履带吊”的设备配置与流程优化,实现了多维度目标平衡,综合得分较初始方案一提升 1.18 分,较方案二提升 0.17 分,总造价控制在 1 000 万元,总工期 190 d,核心区安装精度误差不大于 2 mm,焊接合格率 100%。

(2)未来研究可引入 AI 技术+信息化管理,实现吊装方案的智能化;结合 BIM 技术构建吊装过程虚拟仿真系统,模拟拼装和吊装,提前预判作业冲突与质量风险;针对不同桥型(如连续梁桥、拱桥)开展多维度方案优化研究,形成更具普适性的方案选择方法;深入研究恶劣天气下的吊装施工应对策略,完善特殊工况下的安全管控体系。

参考文献:

[1] 赵磊.异型斜拉桥索塔吊装施工技术 with 质量控制[J].交通世界, 2023(12):136-138.

(下转第 383 页)