

大跨度钢箱提篮拱桥在运河航道中的施工风险管控研究

詹力则 刘 栋 尹慧明

浙江数智交院科技股份有限公司 浙江 杭州 311112

【摘 要】：为了克服在运河航道上大跨度钢箱提篮拱桥施工环境复杂、工艺新颖、控制难度大等问题，以萧曹运河 258 米钢箱提篮拱桥为例，在平原软土地质、通航航道、台风气候等施工条件下，对工程施工重难点进行梳理，对施工过程中环境、技术、结构、通航及设备风险进行系统识别。依靠独创自平衡式斜拉扣挂施工工艺，用多种有限元软件完成结构验算，配上智慧监测系统创建全方位风险控制体系。总结出适应运河航道拱桥施工风险的防控措施，并改善吊装、锚固、张拉等重要施工流程。工程实践证明，一套完整的风险管理方案可以很好地避免软土变形、结构应力超限、航道通行受到干扰等危险的发生，从而保证桥梁施工的安全以及航道通行的稳定，可以给同类内河航道大跨度钢箱拱桥施工提供一定的技术参考。

【关键词】：钢箱提篮拱桥；运河航道；斜拉扣挂；施工工艺；风险管控

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.070

引言

内河运河航道是区域水运交通的主干道，航道内的桥梁建设要同时考虑结构施工的安全以及通航通行的条件。钢箱提篮拱桥具有受力好、结构美、跨越能力强等特点，在跨运河航道桥梁工程中得到了广泛地使用。本项目桥址处于浙东古运河绍兴段世界文化遗产核心保护区，生态与文物保护管控标准严苛，施工区域严禁搭设临时支撑结构，因此项目被迫采用施工难度更高的先拱后梁施工工艺，大幅提升了整体施工管控难度。这类桥梁跨度大、钢结构构件重、高空吊装作业频繁、桥梁主体为全钢结构，现场存在大量高空电焊作业，焊接施工风险突出，同时航道水文条件复杂、周边土地管控严格、软土地基承载能力差，施工风险具有多样性、耦合性。常规拱桥施工工艺不能满足平原软土区大跨度提篮拱桥的建设要求，斜拉扣挂施工工艺在该地质条件下的类似桥梁上没有成熟的经验。本文以萧曹运河拱桥为基础，根据项目自然条件、文保施工限制、全钢结构焊接施工及独创施工工艺特点，对施工过程中各种施工风险进行排查，并提出相应的控制措施，将智能化监测手段融入风险的防控当中去，从而保证施工的质量和安

1 工程概况

1.1 项目总体概况

104 国道绍兴东湖至蒿坝段改建工程（越城区段），西起会龙桥，东至大凌溪东侧上虞界，主线总长约 19.253 公里，含 1.21 公里完全利用段、18.043 公里新建段，主线按双向六车道一级公路标准建设。项目新建地面道路长 2.838 公里，同步配套建设人民东路连接线，线路全长 2.235 公里，西接现状人民东路与吼山路平交口。萧曹运河拱桥是本工程的控制性工程，为单跨下承式系杆提篮拱桥，计算跨径 250 米，标准跨径 258 米。拱轴线为二次抛物线，矢高 55.56 米，矢跨比为 4.5:1。桥梁上部结构为两个拱肋内侧向内倾斜 16 度的空心扭曲空间钢结构体系。



图 1 项目位置

1.2 核心施工工艺

该桥梁所用的施工工艺为独创的自平衡式无支架斜拉扣挂缆索吊装施工工艺，依靠主墩承台作为索塔的基础，拱肋、扣索、索塔、背索、盖梁锚固形成受力平衡体系。施工采用门式桁架索塔，塔身高 107.7 米，顺桥向宽度变化，单塔设三道横联保证结构稳定。为满足受力需要，承台横向内侧加宽 1.2 米，根据桩基、承台验算结果来确定结构的承载能力，满足施工荷载的要求。钢结构构件用水路运输，经过了三座船闸，总水运距离为 410 公里。构件运到现场后进行翻身、拼装，使用缆索吊机吊装拱肋、系梁等构件，利用临时系杆、限位结构完成体系转换，最后完成桥梁合龙及预应力张拉。

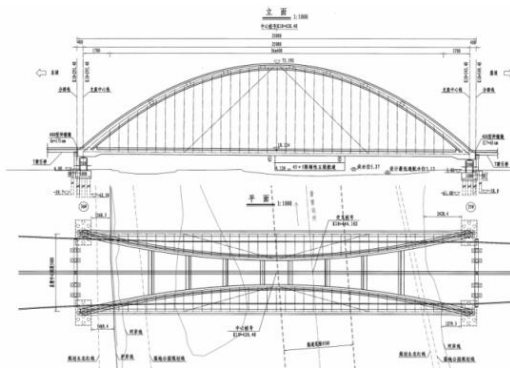


图 2 平衡式无支架斜拉扣挂缆索吊装平面图

2 工程施工主要风险识别

2.1 自然环境风险

区域台风汛期集中,强风天气会直接影响到高空索塔、拱肋吊装作业,容易造成构件偏移、索塔偏位。平原软土地基承载力低,施工荷载作用下容易造成承台不均匀沉降,引起锚固结构位移。运河水域水流复杂,汛期水位升降幅度大,给水上构件运输、驳船停靠造成安全风险。另外桥址附近是基本农田,施工场地小,构件堆放、临时设施布置空间小,施工管控难度大。

2.2 施工技术风险

本项目为平原软土地地区第一座斜拉扣挂施工系杆提篮拱桥,没有成熟的施工经验可以借鉴。自平衡式斜拉扣挂工艺计算量大,索力、位移、应力等参数较多,数值偏移会造成结构受力异常。拱肋为空间扭曲结构,内倾角度固定,吊装定位难度大,拼装精度要求高。端横梁、拱梁结合段等处的应力集中容易导致局部应力过大,给结构安全性带来一定的隐患。同时,全桥钢结构高空电焊作业量大,作业高度高、露天作业环境多,受风力、温湿度影响显著,焊接坡口对位偏差、焊接参数把控不当、焊缝冷却不均等问题,易引发焊缝夹渣、气孔、裂纹等质量缺陷,影响钢结构整体受力稳定性,且高空焊接作业操作空间狭小,施工技术把控难度极大。

2.3 航道通航风险

施工跨越五级通航航道,在施工期间要保证航道畅通无阻。缆索吊机横跨运河,在吊装作业过程中存在着构件坠落、绳索下垂侵占通航净空的危险。水上运输需要经过多个船闸,船舶的大小、吃水深度受船闸限制,通航调度比较麻烦。系梁、拱肋节段水上转运、吊装作业会压缩通航水域,容易造成船舶堵塞、通航碰撞。

2.4 设备及结构施工风险

施工现场布置有大型缆索吊机、卷扬机、龙门吊等特种设备,钢丝绳、滑轮、索塔等长期处在交变荷载之下,容易造成磨损、变形、疲劳破坏。最大设计吊重达到288吨,重大的钢结构构件被吊起的过程中容易发生失衡的晃动。临时锚固结构、背索桁架、钢牛腿限位装置属于临时受力构件,在施工过程中荷载变化频繁,控制不到位容易造成锚固失效、限位变形。同时扣背索张拉和拆除工序繁杂,张拉速率以及对称度控制不到位会造成拱肋变形发生偏离。

2.5 人员管理风险

高空吊装、水上作业、智能设备操作都属于高危作业,人员操作不规范、安全意识薄弱容易造成安全事故。多工序交叉作业现场人员、机械调配困难,控制失当会造成工序冲突。智能化监测系统操作人员专业素质良莠不齐,数据研判、设备调节出现失误都会降低风险预估水平。

2.6 文物保护风险

本项目上跨萧曹古运河及古纤道,地处浙东古运河绍兴段世界文化遗产核心保护区,区域生态敏感、文物保护标准与管控要求极为严格。因古运河遗产保护要求,施工区域禁止搭设临时支撑结构,项目不得不采用先拱后梁施工工艺,大幅提升了施工难度。施工易扰动运河河道、堤岸及沿线历史遗存,且遗产保护区施工限制严苛,方案调整、场地布置、工序推进均需严格遵守文保规范。虽可通过优化方案、精简临时设施、落实专项保护措施减少施工扰动,兼顾工程建设与文保生态需求,但项目全程文保管控压力大、风险防控难度突出。

3 关键施工风险管控技术措施

3.1 自然环境风险防控

建立气象水文动态监测体系,定时采集风力、湿度、水位、降雨量等气象水文数据,六级以上大风停止高空吊装作业,台风汛期加固索塔、缆风索等临时结构。根据软土地基的特性,对基础进行优化设计,采用桩基承台式锚碇,锚碇下面布置九根大直径钢筋混凝土桩基,提高基础抗滑移、抗沉降的能力。锚碇前方设土体固化段以提高地基的稳定性。合理安排施工场地,控制临时设施布置范围,避免占用基本农田,改善构件堆放场地,减少场地受限制造成的施工影响。

3.2 施工工艺风险管控

3.2.1 数值模拟精准验算

使用不同的有限元软件进行结构计算,依靠Midas civil建立整体有限元模型,进行桥梁主体结构受力分析。用专门的精细化分析软件对端横梁、锚垫板等局部结构做精细的验算,用理正岩土软件进行基坑及锚碇的受力计算。严格把控施工阶段桩基、承台受力指标,施工阶段桩基最小安全系数为1.89,承台加宽后角桩反力增幅不大于4.9%,保证基础结构受力安全。局部分元分析结果可知,端横梁各个板件都是弹性工作状态,并且满足规范要求的应力指标。

3.2.2 拱肋安装精度控制

采用三拼贝雷片桁架吊具吊装拱肋,配合使用可移动滑架和精轧螺纹钢限位,用手拉葫芦调节拱肋内倾角,得到16度的内倾角度。拱肋节段工厂预制拼装采用二加一拼装模式保证构件的整体性,运输到现场后用龙门吊完成卧式转立式翻身作业。严格按照对称吊装原则,分节拼装端横梁,先两侧后中间顺序吊装,减少拼装偏差。

3.2.3 索力张拉体系优化

无锚碇背索锚固结构利用纵向钢管、抱箍连接件、格构梁组成传力系统,配合钢绞线做竖向拉结来抵消水平作用力,防止拱肋单侧受力不平衡。拱肋合龙后分十二次进行分级张拉临时系杆,对称解除扣背索以保证两岸拱肋变形均衡。永久系杆

分两次张拉,初张拉控制力 5788 吨,桥面附属工程完工后终张拉,总控制力 7800 吨,同时调节吊杆索力,改善全桥受力情况。

3.3 航道通航安全管控

结合船闸的通航限制,选择适合的运输船舶,严格控制船舶吃水深度,保证多船闸通航运输。合理安排施工工期,避开航运高峰时段进行大体积构件的吊装,设置通航警示标志,划分施工管控水域,安排专人疏导通航船舶。优化水上运输方案,用双驳船拼接的方法运送系梁节段,缩减水上吊装作业时间,削减航道通行的干扰。施工期间保持标准通航净空,不得施工构件、绳索占用通航水域,保证五级航道通过能力。

3.4 高空电焊作业专项风险管控

对全钢结构大量高空电焊作业风险进行专项施工控制,从焊接质量、安全隐患两个方面全方位的规避。一是严格实行作业准入制度,所有电焊操作人员必须持证上岗,施工前对高空焊接进行专项技术、安全交底,针对高空狭小空间焊接、露天迎风焊接等特殊工况开展专项培训,严禁违章操作。二是改善焊接施工工况,避开大风、下雨、低温等恶劣天气的作业,现场搭设防风防雨的临时作业棚,控制焊接环境温湿度,保证焊接施工条件的稳定。三是规范焊接施工工艺,严格控制焊接电流、焊接电压、焊接速度等参数,对钢构件对接坡口进行精确处理,采用分层分段对称焊接工艺,有效地减小了钢结构焊接变形、应力集中等问题。四是加强焊接质量检测,每道焊缝完成之后立即进行外观检查和无损探伤检测,查找裂纹、气孔、夹渣等质量隐患,保证焊接节点质量符合要求。五是做好安全防护措施,高空焊接作业区域设置防火毯、配备灭火器材,严禁焊接火花坠落引发火灾,作业人员全程佩戴全套防护用具,规避焊接与吊装、张拉等工序交叉冲突,保证高空焊接作业安全可控。

4 智能化监测管控体系应用

4.1 智能监测系统总体架构

依靠项目智慧指挥中心建立智能缆索吊装监测系统,指挥中心由两部分组成,一部分做工艺展示,另一部分做智能控制。系统将十二个监测和控制模块进行整合,依靠传感采集、信号传输、中控分析、执行反馈的全链路完成桥梁施工全过程动态监测、风险预警、智能调节。整套系统适应高空、重载、水上

参考文献:

- [1] 施洲,冯鑫,姜家琛,等.大跨度钢箱提篮拱桥拱脚钢-混结合段受力特性分析[J].桥梁建设,2026,56(02):57-65.
- [2] 肖韩.大跨度宽幅钢箱提篮拱桥结构受力性能分析[J].西部交通科技,2025,(07):150-152.
- [3] 黄国清.大跨度下承式钢箱提篮拱桥总体设计[J].山西交通科技,2023,(04):67-70.
- [4] 赖钦亮.汕头市濠江区某下承式钢箱提篮拱桥顶推施工安全与控制分析[J].工程技术研究,2022,7(05):64-66.
- [5] 刘安兴.某大跨度下承式钢箱提篮拱桥力学性能分析[J].公路,2020,65(03):121-126.

交叉施工的工况,解决以往人工巡检覆盖不全、滞后大、误差大等管控难题。

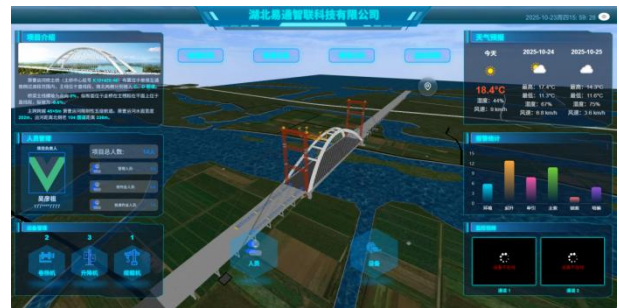


图3 智能缆索吊装监测系统

4.2 核心监测模块功能及应用

本系统的功能有结构监测、设备监测、环境监测和智能控制这四个部分。结构监测方面有视频监控、索力检测、位移监测和应力监测,全天候对索塔偏移、拱脚变形、锚碇沉降等进行监测并采集到各种钢索的应力数据,设置多个预警阈值,在出现异常工况时发出报警。设备监测上,对卷扬机工作状态加以监测、钢丝绳磨损情况开展观察并查看滑轮的损伤状况,从而提前预料到机械设备出现的故障动向,以保证起重设备正常运转。环境监测实时采集温度、湿度、风力风向,给高空吊装作业提供气象依据。智能控制层面加入集中操控、无线手柄、安全锁定、塔偏调节等项,可以对卷扬机进行同步操控、构件做精细微调,在存在超标情况的时候会自动切断电源并锁定设备,并且可以做出针对索塔偏移量的动态调整工作。

5 结论

本文以跨萧曹运河大跨度钢箱提篮拱桥为研究载体,对运河航道桥梁施工的五个方面风险进行梳理,结合软土地质、通航要求、独创施工工艺特点来创建一个综合性的风险管控体系。得出结论为:第一,平原软土通航河道桥梁施工要先加强基础锚固结构的设计,采用桩基固化、承台加宽来提高地基的稳定性,防止出现沉降变形的风险。自平衡式斜拉扣挂工艺适合大跨度钢箱提篮拱桥施工,配合分级张拉、对称卸载工艺,可以有效地改善结构受力,保证施工成型质量。三是智能缆索监测系统能对施工数据进行实时采集,能对施工过程的风险发出预警,并且可以适应高空、重载、复杂工况施工的控制要求。第四条通航航道施工要严格控制作业范围、优化运输方案、完善通航管理,处理好施工建设与航道通行的关系。