

连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用

姚红彬

(中铁隧道局集团有限公司六处工程分公司, 浙江 杭州 310030)

摘要 在连续梁工程项目建设中, 智能化挂篮姿态调控系统的应用能够提升挂篮姿态高精度, 进而提升连续梁工程施工质量与安全。本研究探讨了挂篮姿态控制的高精度要求, 同时解析智能化挂篮姿态调控系统构成, 并且就连续梁智能化挂篮姿态调控系统运用要点进行分析, 以期提升挂篮调控效率与精度、减少人工干预误差提供参考, 进而提高高难度连续梁桥智能化建造水平。

关键词 连续梁桥; 挂篮施工; 姿态调控; 智能监测; 线形控制

中图分类号: TP273; U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.007

0 引言

现代道路交通事业发展速度不断加快, 交通基础设施向大跨、高耸、复杂方向发展, 预应力混凝土连续梁在跨河、山区、城市立交中应用范围逐步拓展。预应力混凝土连续梁采用悬臂浇筑方法施工, 其挂篮是核心施工设备, 需要保证稳定性合格, 这关系到桥梁的拼接精度和成桥线形。以往挂篮施工中采用人工测量或手动调节方式无法满足毫米级控制要求, 这就需要研发集感知、分析、调控于一体的智能化挂篮姿态管理系统。本文主要分析连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用策略, 以期能够为提高桥梁工程建设质量水平提供参考, 进而促进智能制造技术在桥梁工程领域中的应用。

1 连续梁桥施工对挂篮姿态控制的高精度要求

1.1 高程控制精度要求

连续梁桥悬臂施工采用逐段浇筑方式, 每一节段高程偏差逐步累积导致最终合龙偏差过大, 或成桥线形不能达到技术标准。在连续梁桥设计方案中规定节段前端高程偏差在 ± 5 mm 内, 而挂篮浇筑、预应力张拉、温度变化影响下容易引发节段的变形与徐变。如果此时没有进行桥梁节段高程调控或精度不足, 极易造成桥梁线形偏离设计线形, 最终造成合龙困难或结构应力而影响连续梁桥运行的安全性。根据连续梁桥挂篮施工需求, 在前后节段高程采用毫米级监控和动态调整措施, 确保桥梁每一节段施工精度达到要求^[1]。

1.2 平面位置控制要求

连续梁桥在投入运营中受到风荷载、日照偏温、施工偏载的共同作用下, 引发桥梁横向位移或扭转,

这对桥梁的安全性造成不利影响。挂篮作为柔性支撑体系, 其在施工过程中的平面稳定性对于梁体轴线偏位有直接影响。按照相关标准规定, 桥梁梁体轴线偏位在 10 mm 以下。如果连续梁挂篮施工中行走、浇筑环节引发横向滑移或偏转, 极易造成桥梁节段错台、接缝不平顺而影响桥梁外观质量和整体性。而对于桥梁曲线段或斜交桥的平面控制复杂度更高, 需要保证挂篮中线、前后横梁偏角参数达到精度要求, 确保梁体空间位置精准。

1.3 姿态平衡与同步性要求

连续梁桥挂篮主要组成为主桁架、行走系统、模板系统、吊杆等, 各结构部件受力存在复杂性特性。挂篮两侧主桁架如果高差超出标准或位移不同步, 容易在施工中引发桥梁模板倾斜、混凝土厚度不均匀而造成结构失稳。同时, 桥梁施工环节两侧挂篮行走同步偏差在 2 mm 以内, 这样能够确保吊杆受力偏差不超过规定标准。

2 智能化挂篮姿态调控系统构成

2.1 高精度感知层

智能化挂篮姿态调控系统在安装过程中, 需要在主桁架、前后横梁、吊杆、模板关键节点内安装监控设备, 主要布置倾角传感器、位移计、索力计、温度补偿单元等, 能够及时获取挂篮运行中各项技术参数。上述各项传感器选择工业级防护等级, 其满足抗震、防潮、耐候功能, 且采样频率 1 次/s、定位精度 0.1 mm^[2]。

2.2 自动控制执行层

连续梁智能化挂篮姿态调控系统运行后获取各项感知数据信息, 并且利用后台控制系统自动化驱动液

作者简介: 姚红彬 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 连续梁机械化配套。

压千斤顶或电动推杆,对挂篮前后各支点高程、横向位置进行微调。执行机构在获取控制信号后利用闭环控制算法进行调控,其可以通过手动、半自动、全自动等模式调节,使行程精度控制在0.2 mm下。而该系统设置安全阈值,一旦系统监测发现偏差超出规定限值自动报警并锁定操作,以防出现误动作现象。

2.3 智能分析决策层

智能化挂篮姿态调控系统内部嵌入边缘计算单元及时获取传感器监测数据,并结合桥梁设计方案中预设线形模型和施工阶段参数。而后,自动计算当前节段理论位形和实测偏差,并形成调控指令。该系统能够精准识别温度变形、弹性挠度等干扰因素,并剔除虚假信号以提高调控准确性。此外,系统搭载机器学习算法模型,通过持续学习历史施工数据、环境参数与调控效果的关联规律,动态优化偏差修正系数。同时,内置施工规范知识库,自动校验调控指令是否符合安全标准与质量要求,若存在超阈值风险则即时预警并生成备选方案。决策过程同步可视化呈现于监控平台,清晰展示实测数据、理论模型、偏差数值及调控路径,支持管理人员人工介入调整,实现智能决策与人工干预的双向协同。

2.4 远程监控平台

智能化挂篮姿态调控系统运行中利用4G或5G网络传输信号,确保现场监测的挂篮姿态信息实时传输到监控平台。管理人员通过移动终端或电脑及时查看桥梁挂篮三维姿态、历史趋势、报警记录,并通过远程控制系统下达调控指令。该平台能满足多项目、多挂篮并行管理要求,能够对整个桥梁施工过程进行可视化以及可追溯管理。平台内置数据存储与分析模块,自动归档施工全过程的姿态参数、调控指令、环境数据等信息,支持按时间、项目、挂篮编号等多维度检索查询,生成标准化施工报告。同时具备智能预警功能,通过设定安全阈值,当监测数据超出允许范围时,立即以短信、平台弹窗等方式推送报警信息,并关联显示异常位置、偏差数值及应急处置建议^[3]。

3 连续梁智能化挂篮姿态调控系统施工应用

3.1 安装校准阶段

连续梁桥现场施工阶段在挂篮拼装作业结束后,智能化挂篮姿态调控系统即可进入初始校准程序。技术人员在现场使用高精度全站仪进行挂篮主桁架前端、后锚端、前后横梁中心等关键节点三维坐标测量,能够及时获取挂篮空间位置基准值。而后将全站仪测量

的数据信息和智能调控系统的内置传感器初始读数进行逐点对比,并按照测量结果调整传感器零点偏移量,从而使智能挂篮姿态调控系统的坐标系和工程坐标系空间对齐。在上述调整过程中,利用液压加载装置在挂篮前端施加分级模拟荷载,模拟实际浇筑工况,并获取各倾角仪、位移器、索力计等响应数据,从而保证传感器之间数据达到一致性与线性度要求。同时,控制系统驱动各液压千斤顶进行微量伸缩动作,检测执行机构的行程精度以及响应延迟。传感器、修正系数、执行机构控制增益、荷载—变形关系曲线等校准系数记录到数据库内,将其作为后续调控指令发布的基本语句。而在智能挂篮姿态调控系统校准结束后进行全链路自检,保证智能化系统内感知、传输、控制等各系统数据能够同步传输,使整个调控系统具备高精度、高稳定性的状态^[4]。

3.2 行走阶段

连续梁施工环节,挂篮进入启动程序,此时系统进行挂篮的实时监控。挂篮两侧主桁架底部位移传感器持续采集挂篮前行距离和高程变化参数,倾角仪同步监测横架纵向与横向姿态。而控制系统按照1次/s的频率对比挂篮两侧行走位移。如果监测挂篮两侧同步偏差超过预设的2 mm阈值,则系统立即发出指令暂停挂篮行走驱动装置,并且启动慢行侧液压千斤顶进行微量顶升或回缩,直到挂篮两侧位置达到对齐的效果。同时,挂篮行走轨道的沉降传感器和反扣轮压力传感器检测行走轨道平整度与反扣装置受力状态。如果检测发现存在轨道局部下沉或轮组异常受力,立即发出声光报警。挂篮行走到设计位置后系统自动触发复测程序,此时利用高程传感器和倾角仪检测挂篮整体姿态,并和目标标高参数进行对比。若经过对比发现存在偏差,则由控制系统操控驱动系统进行前支点、后锚千斤顶毫米级调整,确保挂篮主桁架精确就位到设计高程和平面位置。

3.3 浇筑阶段

连续梁挂篮混凝土浇筑施工开始后,需要进入高频率的监测状态,以掌握现场施工的具体情况。在桥梁施工中,混凝土逐层入模、荷载持续增加,桥梁主桁架出现弹性变形,此时高程传感器和倾角仪能够及时捕捉挂篮前端下挠量和整体倾斜变化情况。控制系统将现场测量数据信息输入理论挠度曲线进行动态对比,如果对比后发现偏差超出允许值则自动计算所需补偿量,并且同步给后锚吊杆液压系统或前支点调节千斤顶发送指令,其利用微调吊杆索力或支点高度方

式抵消部分挂篮弹性变形,确保桥梁模板底面高程达到稳定性要求。桥梁浇筑阶段系统同步监测挂篮两侧的荷载分布,如果挂篮一侧混凝土浇筑过快引发偏载现象,此时横向倾角传感器能够及时获取挂篮存在异常扭转现象,系统立即发出预警警示,并暂停单侧浇筑作业。上述传感器检测过程中以 10 s 间隔自动存档数据,主要记录时间戳、各点位移、倾角、温度、荷载等参数^[5]。

3.4 合龙前精调

连续梁桥进入主跨合龙的准备期,由智能姿态调控系统启动高精度精调模式。在该环节中需要连续 72 h 进行挂篮两侧悬臂端的监测,其监测频率为每 10 min 进行 1 次数据测量,主要掌握不同温度、日照条件下挂篮位移变化数据,并建设温度变形修整模型。而后智能调控系统以 1 mm 为补偿,需要对两侧挂篮前端高程和轴线位置进行多轮的监测、分析、微调、循环操作。在每次进行挂篮微调结束后需要保持 15 min 稳定,然后进行复测,确保挂篮两端高程偏差在 2 mm 以内、轴线偏差 20 mm 以下。挂篮微调时需要记录目前温度梯度、风速、预应力、张拉历史等因素,并预测未来 12 h 内悬臂端位移变化趋势,以此作为基础推算出最佳合龙时间窗口。连续梁桥合龙环节,混凝土浇筑过程中监测挂篮两端相对位移,如果存在异常收敛或分离及时采取应急处理措施。

4 工程应用效果分析

4.1 工程概况

某高速公路特大桥主桥采用预应力混凝土连续梁结构形式,其跨径尺寸为 80+120+80 m,梁高 6.8 m,单幅桥宽 12.6 m。该桥梁主跨跨越通航河道,现场施工环境复杂,对桥梁线形控制要求极高。该桥梁设计方案确定为 25 个悬浇节段,最大节段重量 2 200 t。为使该桥梁承桥线形和合龙精度达到要求,在施工环节引入智能化挂篮姿态调控系统,并对双幅共 4 套挂篮进行全面性智能监控。

4.2 连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用

本项目施工环节,在每套挂篮中安装 24 个传感器节点,确保挂篮主桁、横梁、吊杆、模板系统进行监控。该系统需要和 BIM 模型构建挂篮三维数字孪生体,其施工环节具备如下功能:一是挂篮行走阶段自动监测挂篮两侧同步性,确保挂篮行走偏差不得超过 1.5 mm;二是桥梁浇筑环节采取实时补偿弹性变形措施,确保桥梁模板高程波动不超过 3 mm;三是大风、日照条件

下自动识别环境干扰,并剔除虚假信号影响;四是桥梁合龙前 72 h 连续监测悬臂端位移,并根据温度变形精准确定最佳合龙时机。上述调控指令由工程师在移动终端监控确认,达到人机协同效果。本项目施工环节累计处理数据超 50 万条,调控响应时间在 10 s 以内,能够提高连续梁桥施工精度。此外,系统应用过程中同步生成施工数据台账,自动关联各节段姿态参数、调控记录及质量验收结果,实现施工全过程可追溯。通过对比分析实际施工数据与理论模型,持续优化挂篮调控算法,后续类似桥梁工程可直接复用成熟参数体系。

4.3 工程应用效果

根据本桥梁施工经验,通过智能化挂篮姿态调控系统应用后,使挂篮高程精度达 ± 2.8 mm、轴线偏差 6 mm 内;本桥梁合龙段高差为 1.2 mm,达到一次精准合龙的效果。该技术与传统人工调控技术对比,单节段姿态调整时间缩短 60%,比人工测量频次减少 80%,也能够避免高空作业风险。同时,本桥梁施工后成桥线形平顺,预应力张拉顺利,整个桥梁结构状态良好。

5 结束语

连续梁桥智能化挂篮姿态调控系统将感知控制与信息技术进行融合,对连续梁桥悬臂施工中挂篮姿态进行精准调控,达到现场作业顺畅、安全性的效果。本文通过实际工程案例发现,智能化挂篮姿态调控系统具备高程控制、平面定位、同步行走、合龙精调的优势,能够提高桥梁施工的精度和效率,为今后桥梁领域施工技术的研发和创新提供坚实的基础。

参考文献:

- [1] 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(01):66-70.
- [2] 曾宪柳.斜拉桥施工挂篮自动化与智能化控制技术应用[J].中外公路,2021,41(01):122-125.
- [3] 黄铁.超大跨度无砟轨道混凝土连续刚构铁路桥梁部施工及变形控制技术研究[J].工程建设与设计,2024(10):161-163.
- [4] 唐梓柯,刘凯,吴巨峰,等.智能桥梁挂篮监测系统关键技术研究与应用实践[J].土木工程信息,2025,17(01):129-134.
- [5] 朱正伟,程小娟.数字孪生驱动的预应力混凝土挂篮仿真分析与施工指导[J].建筑机械,2023(12):77-81.