

大跨钢箱梁悬拼数字化控制程序开发与应用

余 洋, 王洪新, 王梦杰, 张泽阳, 张志超

[上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海市 200065]

摘要: 为解决市区复杂周边环境下高架桥大跨钢箱梁施工中存在的协调难度大、悬臂拼装精度要求高等关键难题, 寻求提升施工管理效能和保障工程安全质量的解决方案。开发并应用了一种基于微信小程序的数字化管理系统。该系统通过标准化和数字化手段, 严格控制现场悬臂拼装流程各环节; 同时, 集成并实时可视化展示钢箱梁姿态、应力、变形等多源监测数据。该系统的实施显著提升了管理人员对复杂施工现场的全局把控能力和信息获取效率, 实现了施工过程的精细化管理。最终有效降低了施工风险, 保障了大跨钢箱梁悬臂拼装施工的质量与安全。

关键词: 高架桥施工; 钢箱梁; 悬臂拼装; 数字化管理; 实时监测; 施工安全

中图分类号: U445; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0271-05

Development and Application of Digital Control Program for Cantilevered Assembly of Long-span Steel Box Beams

YU Yang, WANG Hongxin, WANG Mengjie, ZHANG Zeyang, ZHANG Zhichao

[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China]

Abstract: To solve the critical problems of high coordination difficulty and stringent precision requirements for cantilevered assembly during the construction of long-span steel box beams of elevated bridges in complex urban environments, the solutions are sought to enhance the efficiency of construction management and ensure the safety and quality of projects. A mini-program-based digital management system is developed and applied. This system strictly controls each stage of the on-site cantilevered assembly process through the means of standardization and digitization. Simultaneously, the multi-source monitoring data of attitude, stress and deformation of the steel box beams can be integrated and visualized on real time. The implementation of this system significantly enhances the overall control ability of management personnel over complex construction sites and the efficiency of information acquisition to realize the refined management and control of the construction process. Finally, the construction risks are effectively reduced, and the quality and safety of the cantilevered assembly of long-span steel box beams are ensured.

Keywords: elevated bridge construction; steel box beam; cantilevered assembly; digital management; real-time monitoring; construction safety

0 引言

当前城市交通拥挤、用地紧张, 现有的高架桥改建工程通常位于交通要道, 且与地铁隧道、管线等共线, 十字路口下方有地铁车站, 导致桩基、立柱布置方式受限, 设计方案中常见大跨径、变宽度的钢箱梁。在吊装施工期间, 受到狭小施工区域、地铁保护压力、地铁运行振动和钢箱梁自身安置工艺复杂的多重考验。

当前国内已经有部分桥梁隧道工程项目应用数

字化手段, 整合了施工流程、监测数据、施工图表等多种功能, 对现场进行规范化科学管理^[1]。赵琳等^[2]针对长大隧洞施工工期长、施工环境恶劣、施工安全隐患大的特点, 综合运用工程管理、通讯、自动化、信息系统等专业技术, 研究能够全面提高工程施工安全生产管理水平的数字化辅助管理技术手段, 保障工程建设任务的安全、顺利实施。潘伟强等^[3]在深基坑项目中建立地下连续墙、钻孔灌注桩、基坑开挖等6个专业的标准化工序技术管理模块, 实现了施工数据标准化采集、施工图表自动生成、异常数据分类报警、施工风险智能分析, 从而确保了工程质量和安全, 达到工程项目科学管理的目的。刘建炜^[4]建立公路沥青路面施工质量数字化管理系统,

收稿日期: 2025-06-16

作者简介: 余洋(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁施工工作。

通过采用射频识别、远程通信和卫星定位等物联网相关技术,实现对原材料质量、拌合站生产、混合料运输、摊铺和压实前过程的数字化监控和管理,从而实现对沥青路面施工的过程控制。李海峰等^[5]针对大型桥梁桥塔施工现场环境复杂、多方协同管理指挥困难、自动化水平低等问题,对常泰长江大桥6号墩桥塔传统液压爬模系统进行数字化升级,形成大型桥塔模板施工数字化管理系统。王思等^[6]依托信息化技术,建设了一套管道焊接数字化管理平台,可提供以三维管道模型为载体的数据展示形式,可更直观地掌握工程进展,预测并解决潜在问题,更加快速地响应和调整项目施工情况,大大缩短了工程周期,提高了项目交付效率。毛伟琦等^[7]为解决山区峡谷地区重型钢桁梁架设装配对接难度大、主缆线形控制困难、架设施工时间长、安全隐患多等难题,研发了大跨山区铁路悬索桥钢桁梁智能吊装系统,通过物联网和云计算相关技术,将钢桁梁架设中关键要素和工艺信息数字化,通过传感器采集、数据分析、反馈控制等流程环节,将钢桁梁架设过程转换为精准受控的自动化作业,实现测控精度厘米级,反馈控制时间响应速度秒级,节约施工成本,保障施工安全,提高了施工效率。国内桥梁隧道工程已逐步应用数字化手段,如物联网、传感器、云计算和可视化技术,实现施工数据实时采集、流程监控和风险预警。例如,在隧道施工、钢桁梁吊装、路面施工等领域,数字化系统能整合监测数据、自动生成图表、支持协同决策。但针对大跨钢箱梁悬拼的数字化控制尚不成熟,现有系统多侧重于事后分析,缺乏实时性。传统监测依赖全站仪、应变仪等设备,数据采集工作量大、传输延迟,难以满足现场动态决策需求。同时钢箱梁体量大、变形敏感,需监控多类型数据(如位移、应力、振动),更新频率高,传统平台数据直观性差,不利于实时响应。现有数字化系统多针对通用场景,未针对钢箱梁悬拼定制,缺乏轻量级、用户友好的界面,现场人员使用不便。因此,有必要针对此施工场景开发一套专用的数字化管理系统,强化实时监控与预警,优化施工工艺数字化,提升系统轻量性与实用性,更符合现场使用需求的桥梁施工管理系统,实现钢箱梁悬拼施工的精准、安全与高效案例。

1 工程概况

金海路(杨高中路-华东路东侧)改建工程,西起

杨高中路,东至华东路东侧,全长7.0 km。本标段为金海路(杨高中路-华东路东侧)改建工程2标,西起金京路东侧,东至金穗路东侧,全长约1.722 km。地面主干路采用双向6车道,两侧设置非机动车道及人行道。

其中,跨金吉路地铁站连续钢箱梁全长603 m,最大跨径121 m,箱梁最宽处为54 m、最高为5.5 m,三联钢结构总重量高达12 281 t。钢箱梁吊装体量大、施工周期长、吊装任务重。连续钢箱梁下方有9号线地铁盾构、崇明线盾构、金吉路地铁站台及地铁站附属构筑物,要保证地铁盾构、地面站台及附属构筑物安全;钢结构施工需考虑临时钢支撑位置,确保临时钢支撑及基础位置不会对既有地下结构物产生影响,还需减小支撑的设置对现有交通的影响;钢箱梁采用龙门吊+液压提升装置进行安装,其使用的悬臂拼装施工工艺需各类大型机械配合使用交叉施工,施工工艺多、施工操作难度大、施工精度要求高、危险隐患多。

2 数字化控制程序开发

为实现钢箱梁大节段悬拼施工阶段智能监测、行为感知与状态评价,需要将监测数据和评估结果实时反馈到施工现场。由于现行使用的监测平台主要面向网页端开发设计,虽然实现了多源监测数据的实时更新、模型展示与预警提示,但三者为独立显示,数据关联性较差,没有形成一个整体,且展示方式仅有折线图,切换测点需要在编号下拉框选择,直观度较低,更适合事后总结分析使用。为使数据便于现场在手机上查看,开发了配套小程序以实现手机上同步展示监测数据和报警信息。

如图1所示,本文开发了一种近地铁大跨径钢箱梁现场施工管理系统,向现场施工人员提供实时度高、便于查看的钢箱梁状态信息。所述系统在整合静应变、温度、倾斜仪、双目相机等多源传感器数据的基础上,还接入了加速度和动应变计,实现了对下穿地铁运营期间的桥梁结构振动监测。传感器布置在施工现场,用于采集各种原始监测数据,使用采集箱内上位机通过物联网模块与服务端通讯;服务端架设在云端,用于采集、处理、存储监测数据,存储施工模型和进度信息,管理推送到客户端的内容,该系统可根据当前钢箱梁吊装施工步骤动态切换钢箱梁模型,并在模型上关联显示监测数据,同时提供历史数据查询功能,。

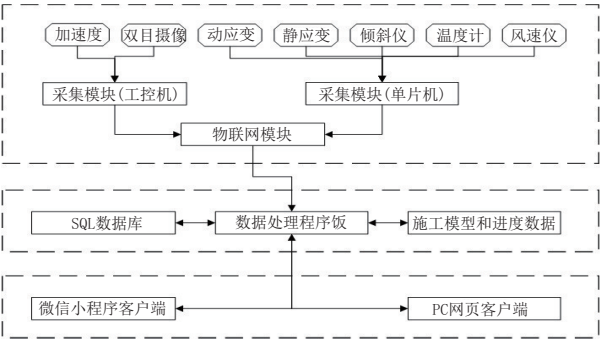


图1 大跨径钢箱梁现场施工管理系统

具体工作流程如下：

(1)有限元预模拟施工过程

首先在 Midas 软件中根据施工方案和图纸建立有限元模型,计算每个施工节段的桥梁线形和节点理论变形量,找出结构变形关系和受力的最不利位置,确定传感器的安装点。

通过迈达斯(MIDAS)软件建立钢结构分段拼装模型,对钢结构在施工过程中的行为进行模拟,见图2。根据计算结果,主梁应力测试断面的布置应按照如下原则进行:测试断面主要根据理论计算选择施工过程中最不利的位置,并且应确保在刚度突变处设置测试断面。

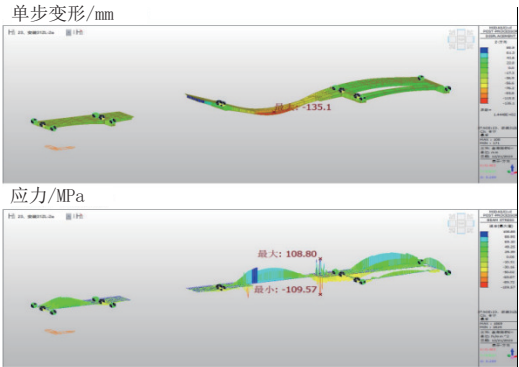


图2 MIDAS 模拟结果图

在本工程施工过程中,传感器安装方案为:如图3所示,立柱安装静应变计(两根立柱中部外侧)、倾斜仪(盖梁中部)、风速仪(立柱位置桥面);如图4所示,悬臂拼装点安装加速度计(中部箱梁下翼缘中部)、双目摄像机(地面针对悬拼断面)、动应变计(每个箱梁下翼缘中部)和温度计(两侧箱梁上下翼缘角点);如图5所示,主梁跨中安装加速度计(中部箱梁下翼缘中部)、动应变计(每个箱梁下翼缘中部)。

(2)安装调试传感器

钢梁运送到现场后,根据流程(1)中确定的点位安装对应的传感器,安装完成后连接到采集单元通电调试,并通过物联网模块连接到服务端的数据处

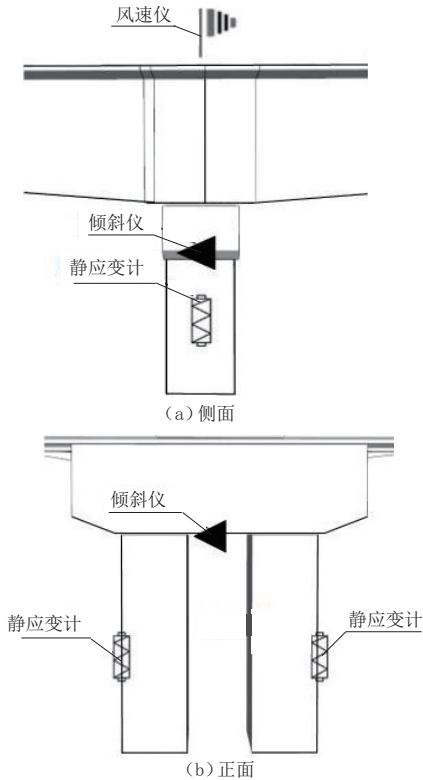


图3 立柱传感器安装示意图

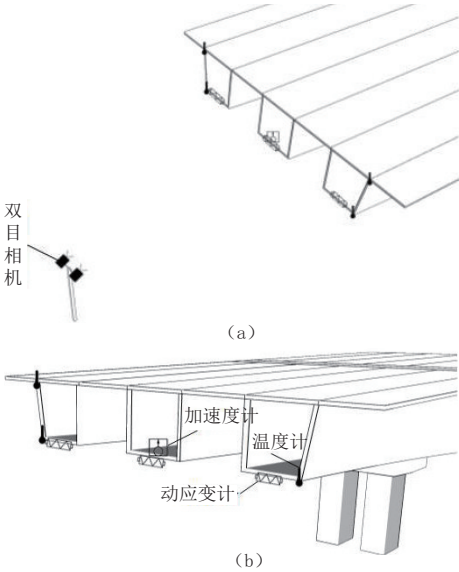


图4 箱梁截面传感器安装示意图

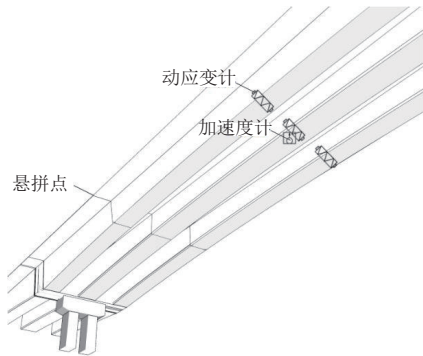


图5 箱梁底部传感器安装示意图

理程序中注册。

温度和应变传感器(见图6)。使用进口芯片封装的DS18B20数字温度传感器,测温范围 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。传感器已用金属外壳保护,并已包含足够长、足够强力的引线。引线具有耐高温、温度补偿功能。



图6 温度和应变传感器

现场智能采集器(见图7)由电平转换器、4G芯片、数码管等组成。设备采用使用太阳能电源与内置锂电池双供电方案,独特的低功耗和自动唤醒技术,能够保证温度和应变数据不间断采集。智能采集器中使用STEM32主控芯片,采用双隔离技术对温度传感器数据流进行高速匹配与解包,同时通过抗电磁数字识别技术,确保数据传输的安全性与准确性。现场智能采集器均单独工作,不受其他采集器影响。



图7 监测数据智能采集器

(3) 导入钢箱梁模型和施工计划

在服务端中写入施工模型和进度数据信息,其中每一条进度数据都需要对应一个模型,每个模型都需要绑定流程(2)中的传感器,不同进度和模型的组合都需要定义传感器数据的报警值。

(4) 现场上报施工进度,查看实时监测数据

在每一节钢箱梁开始吊装和安装结束时,现场

人员在小程序端界面实时点击启动或结束吊装流程。在吊装流程期间,可以快速跳转到该钢箱梁对用的监测数据展示界面查看实时数据和报警状态。

(5) 系统查询历史数据

本实施例提供历史数据折线图查询界面,便于现场人员查看钢箱梁吊装过程前后的变化趋势。查询界面按照节段-测点-传感器类型分层展示,便于用户快速定位数据。

3 数字化控制程序应用

针对大跨钢箱梁悬拼施工开发的微信小程序主要功能包括:用户登录验证;施工进度实时上报;监测数据可视化同步展示;监测数据历史查询。此外为达到小程序基本功能,还包括一个节段选择菜单以及一个服务端。

3.1 用户登录

本功能实现了基本的用户名密码登录与退出、微信一键登录与解除绑定功能。登录页面从上到下为(见图8):小程序图标、用户名密码输入框、绑定微信选框、登录按钮、微信一键登录按钮;用户信息页面从上到下为:用户名称、进入系统按钮(跳转到节段选择菜单)、退出登录按钮、解除微信绑定按钮。登录与用户信息页面共用,根据当前小程序的登录状态自动切换显示。

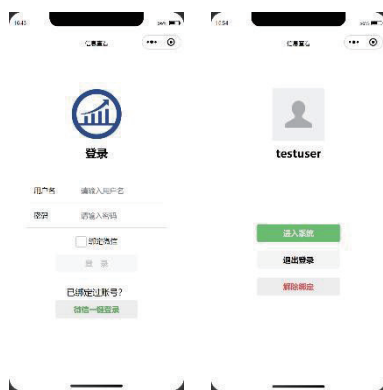


图8 用户登录界面设计图

使用用户名密码或绑定的微信登录成功后,服务端发放临时验证令牌,作为操作权限判定使用。进行任意页面切换都会进行一次验证,验证不通过会强制退出系统。

3.2 施工实时进度上报

如图9所示,此页面排列了设计的施工流程,每行左侧为施工步骤,右侧为完成状态,当前正在进行的施工步骤用高对比度显示,点击下方左侧“完成施工”按钮可切换到下一个施工步骤,点击下方右侧

“查看监测数据”按钮前往查看监测数据节段选择菜单界面。



图9 进度上报功能设计图

3.3 监测数据节段选择菜单

本功能实现了选择监测节段,不同类型的监测数据按照施工的节段进行分组,每行左侧为分组标题,右侧为包含的监测数据类型。登录成功后会自动进入节段选择菜单,有3种类型的节段:只有实时数据、只有历史数据和两者都有。如图10所示,选中节段之后点击下方按钮查看数据。每一行未选中状态为白底黑字,选中后为高对比度灰底白字。选中后点击下方“查看实时数据”或“查看历史数据”按钮后跳转到对应页面查看数据。左上角主页键点击后可以返回到上一页面。



图10 不同数据类型的节段选择菜单设计图

3.4 监测数据可视化同步展示

实现了实时监测数据数据横屏可视化展示的功能,基于三维模型或二维图纸,在模型上对应测点的位置弹出提示当前的实时数据,并通过三种颜色绿(正常)、红(警报)、黑(故障)表示当前状态,右上角为本组数据最后更新的时间。从节段选择菜单跳转到横屏实时数据页面,如图11所示,二维图纸的展示以P32横梁为例,三维模型的展示以30ZL-3A悬拼段为例。可以看到P32横梁的上方支架监测点在施工后由于现场施工原因故障离线了,其余数据均在

正常范围内。

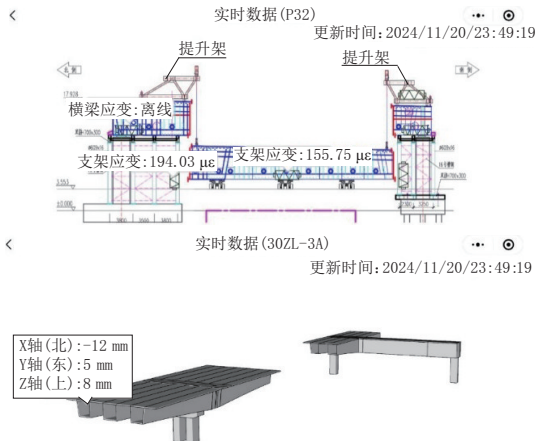


图11 监测数据同步展示设计图

4 结 语

本文基于上海金海路改建工程2标,研究设计了一套基于大跨径钢箱梁悬拼施工过程的数字化管理系统前端界面。在现有监测平台基础上,新增数字化管理系统版块,导入箱梁的图纸、模型与监测点位数据,实现监测数据在箱梁模型上的关联显示与实时更新;提供施工进度上报界面,基于各施工阶段模拟结果辅助现场决策。编写数字化管理系统后端功能。包括数据库搭建、施工流程处理、传感器信息融合、消息推送、数据导出等功能,满足前端的显示、交互需求。

该钢箱梁吊装现场施工管理小程序具有数据展示更直观简洁,便于现场施工人员快速了解结构状态和受力变化趋势的功能。通过保障现场的操作规范性和信息传递能力,提升了复杂环境和高安全要求下进行桥梁施工的管理水平。

参考文献:

[1] 代学晨,张文琳.基于工业项目的精益化施工管理体系与标准流程建设[J].中国建筑金属结构,2023,22(7):181-183.
[2] 赵琳,李晓晗.长大隧洞施工安全生产数字化管理系统技术研究[J].黑龙江水利科技,2013,41(6):56-58.
[3] 潘伟强,郭彦,等.基于数字化技术的深基坑工程施工管理控制系统[J].上海建设科技,2019(5):56-59.
[4] 刘建伟.公路路面施工质量数字化管理系统设计与应用研究[D].福州大学,2023.
[5] 李海峰,吴巨峰,等.大型桥塔模板施工数字化管理系统应用[J].世界桥梁,2023,51(1):71-77.
[6] 王思,倪琪昌,王保林,等.管道焊接数字化管理平台建设与应用[J].安装,2024(2):83-87.
[7] 毛伟琦,李小珍,王翔.大跨山区铁路悬索桥钢桁梁智能吊装系统研究[J].铁道工程学报,2024,41(3):52-58.