

DOI: 10.7672/sgjs2026080105

公路箱梁智能化预制梁场关键技术与应用*

梁超,毛江明,赖世广,丁仕洪,付立宏
(中铁四局集团有限公司,安徽 合肥 230000)

[摘要] 针对传统梁场布局不合理、工艺依赖人工、数据管理滞后等问题,提出以数字驱动、工艺优化、绿色集约为核心的智能化发展路径。通过构建“四线三区”空间布局,集成钢筋骨架自动化生产线,全自动液压模板系统,智能浇筑、养护、张拉压浆等核心装备,并结合智能制造执行系统实现全过程数字化管控。实践表明,智能化梁场显著提升了生产效率与产品质量,其中梁场综合人工减少51%,单片梁生产周期缩短33%,养护能耗降低约50%。

[关键词] 公路工程;桥梁;箱梁;预制梁场;养护;智能建造;自动化

[中图分类号] U448.21

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0105-07

Key Technologies and Application of Intelligent Precast Girder Yard for Highway Box Girders

LIANG Chao, MAO Jiangming, LAI Shiguang, DING Shihong, FU Lihong
(China Railway Fourth Engineering Group Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: Addressing issues such as the unreasonable layout of traditional girder yards, process dependence on manual labor, and lagging data management, an intelligent development path centered on digital drive, process optimization, and green intensification is proposed. By constructing a “four-line and three-zone” spatial layout, the core equipment such as automated steel skeleton production lines, fully automatic hydraulic formwork system, intelligent pouring, curing, tensioning, and grouting are integrated, and combining with intelligent manufacturing execution system to achieve digital control throughout the entire process. Practice shows that the intelligent girder yard significantly improves production efficiency and product quality, with a 51% reduction in overall labor in the girder yard, a 33% reduction in the production cycle of a single beam, and a reduction of about 50% in energy consumption for curing.

Keywords: road construction; bridges; box girders; fabrication yard; maintenance; intelligent construction; automation

0 引言

我国公路建设持续快速发展,年均新增里程超过11万km,推动了桥梁工程的发展,特别是预制装配式桥梁的广泛应用^[1]。箱梁作为公路桥梁的核心承重构件,其预制环节的质量与效率直接影响整个项目的成本、工期与安全^[2]。随着工业4.0时代的到来,大数据、物联网、人工智能等前沿技术正深刻改变着传统土木工程行业的面貌,智能建造已成为推动行业转型升级的关键路径^[3]。预制梁场作

为桥梁工程的前端制造基地,实施智能化转型不仅是企业提升生产效率与产品质量的内在需求,也是响应国家号召、服务建筑业现代化的必然选择。

1 公路预制梁场

1.1 发展需求

预制梁场作为公路桥梁建设的核心生产基地,依托成熟施工技术与科学管理保障梁体质量,通过标准化生产提升建设效率,体现公路建设“专业化、机械化、工厂化、信息化”的先进建设理念,为工程标准化建造提供重要示范。但随着技术发展,传统公路预制梁场高度依赖人工的生产模式制约了生产效率和产品质量,以及生产管理的数字化转型。主要存在的问题为:①传统预制梁场生产布局存在

* 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2023-重大-01)

[作者简介] 梁超,总工程师,教授级高级工程师, E-mail: zgsliangchao@qq.com

[收稿日期] 2026-03-26

缺陷,物料供应链长,梁场建设资源浪费较多;②传统钢筋骨架加工、模板安拆、混凝土浇筑及养护、预应力张拉等环节的工艺有待优化,机械化、智能化水平有待提升;③数据管理标准化缺失,数据分散存储、追溯困难,亟需依托 BIM 技术构建数字化管理平台。

1.2 发展路线

公路箱梁智能化预制梁场以“数字驱动、工艺优化、绿色集约”为原则^[4],在浇筑、张拉、压浆信息化核心设备基础上,构建“规划设计-装备研发-生产执行-全过程管控”的系统性集成新模式^[5];在研发智能化设备、提升生产效率与产品质量的同时,开发集智慧化生产调度、全过程质量溯源、精细化过程管控于一体的智能制造执行系统,实现从“制造”到“智造”的深刻变革,打造出生产效率卓越、产品质量精良、资源消耗集约、安全管理可控的行业新标杆,全面提升公路箱梁制造工厂化、信息化水平。

2 智能化预制梁场建设

2.1 预制梁场规划

为解决传统预制梁场布局不合理、物流效率低、空间利用不足等问题,提出以“数字驱动、工艺优化、绿色集约”为核心的智能化规划原则,并创新采用“四线三区”空间布局模式,如图 1 所示。

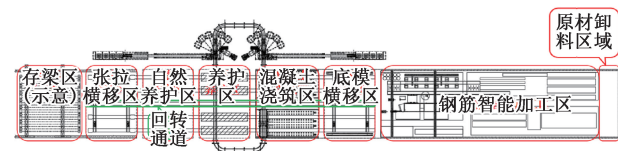


图 1 智能化预制梁场布局

Fig. 1 Layout of smart precast girder yard

“四线”为 4 条并行预制生产线,依次设置底模横移、混凝土浇筑、蒸汽养护、自然养护及张拉横移五大功能工位,实现工序专业化与流水化。“三区”包括钢筋智能加工区、箱梁预制区和存梁区。其中,钢筋加工区、底模横移区和混凝土浇筑区采用全封闭厂房结构,依托智能手动单梁起重机实现无缝衔接作业;张拉横移区与存梁区则采用门式起重机完成物料转运,实现功能分区与物流优化。

工艺上采用工位固定、流水作业的环形生产模式,以自行式移动底模为核心载体,实现箱梁的并行流水化生产^[6]。4 条生产线共用 1 条中央回转通道,形成“4+1”布局,有效缩减场地宽度,提高空间利用率。每条线配置 1 套外模与 4 套底模,通过科学节拍设计,确保各工序并行开展,提升整体效能。

4 条预制生产线共用 3 套液压内模,提高设备

利用率;智能排产系统优化调度多线程工序,降低设备峰值需求与运营能耗。钢筋车间设独立卸料区,避免重车进入生产区域,保障安全并减少地基处理,体现绿色集约理念。

2.2 核心装备

基于沿黄高速公路、广绵扩容、南中高速公路、宁盐高速公路、广东狮子洋通道五工程的 5 座智慧梁场应用,我国公路智能化预制梁场已初见成效。集成 1 套钢筋骨架自动化生产线、5 套智能化装备和 2 台创新机械化装备的基础硬件,以及围绕生产管理、数字孪生、设备管理的智能制造执行系统。

2.2.1 钢筋骨架自动化生产线

为解决传统钢筋加工依赖人工、效率低、精度差的问题,构建了以全流程数字化、设备集群协同、质量闭环管控为核心的钢筋骨架自动化加工生产线。该生产线通过工艺创新、自动化设备研发与信息技术的深度融合,实现了从原材料到成品骨架的自动化生产,包含底腹板与顶板钢筋骨架自动化生产线各 1 条,如图 2 所示。

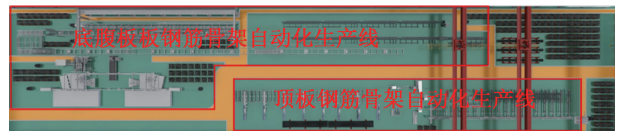


图 2 钢筋骨架自动化生产线布置

Fig. 2 Layout of reinforcement cage automated production line

2.2.1.1 底腹板钢筋骨架自动化生产线

底腹板钢筋骨架自动化生产线由底腹板 U 筋及定位网自动加工机构、U 筋自动摆放转运机构、底腹板纵筋布料焊接机构等核心机构构成(见图 3)。底腹板 U 筋及定位网自动加工机构整合了 U 筋一体成型工作站与定位网加工工作站;前者通过自动下料、连续折弯、规整点焊,实现底腹板箍筋的一体成型;后者通过自动上料、托盘调距与自动焊接,实现定位钢筋网的自动化加工;随后,在 U 筋-定位网拼焊台上,系统自动完成定位网片与 U 筋的精准就位和拼焊,实现二者的一体化成型。U 筋自动摆放转运机构通过自动传送、对位抓取、精确摆放与整体环形转运,将加工成型的 U 筋自动定位并整体转运至骨架成型工位。底腹板纵筋布料焊接机构通过纵筋自动下料、辊筒输送、胎架布料,并利用激光扫描识别钢筋交叉点,最终通过机器人自动定位焊接,完成底腹板钢筋骨架的整体成型焊接。

2.2.1.2 顶板钢筋骨架自动化生产线

顶板钢筋骨架自动化生产线以箍筋成型及焊

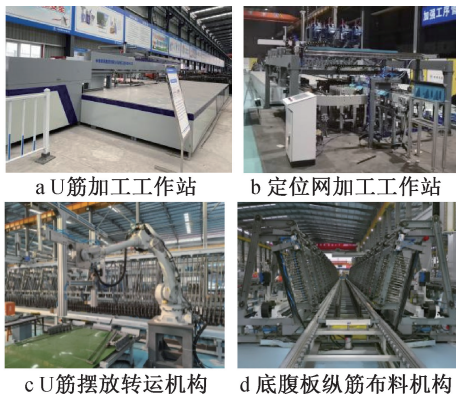


图3 底腹板钢筋骨架自动化生产线设备

Fig. 3 Equipment of bottom-web reinforcement cage automated production line

接机构为核心,前端集成顶板纵筋下料布筋机构,侧向对接箍筋及补强筋下料送料机构,后端连接进出料机构,实现顶板钢筋骨架的自动化加工。

2.2.1.3 自动化作业

通过输入预制箱梁基本参数,BIM建模插件自动生成模型,并提取加工参数形成数据包,将数据包上传至电子沙盘平台,梁场的智能执行系统(MES系统)从电子沙盘平台获取数据包,通过网络协议下发至设备中控系统,中控系统将数据包分发至各设备单元执行作业实现钢筋骨架加工的全流程数据驱动,实现不同梁型、梁长及斜交角度的钢筋骨架自动化加工,自动化成型占比>80%,作业人员从33人减少至10人。

钢筋自动化生产线采用多工序平行流水的自动化生产模式,其生产工效取决于关键工序的作业时间,以及物料运输等组织间歇。该钢筋骨架自动化生产线连续生产时间 T 为:

$$T = \max(T_1, T_2) \quad (1)$$

$$T_1 = [nT_{11} + \max(T_{12}, T_{13}, T_{14}) \cdot 10L]/60 + G \quad (2)$$

$$T_2 = \max \{ T_{21} [46 + 5(L - 6)]/2/60, \\ \{ T_{22} [46 + 5(L - 6)] + T_{23} L/6 \} /60 + Z \} + G \quad (3)$$

式中: T_1, T_2 分别为顶板、底腹板自动化生产线连续生产时间(min); $T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}$ 分别为纵筋插筋时间、箍筋弯折时间、骨架焊接时间、补强筋安装时间(s); T_{21}, T_{22}, T_{23} 分别为U筋弯折时间、骨架单个焊点焊接时间、胎具转运时间(s),分别取45,5,40s; Z, G 分别为技术间歇、组织间歇(min),分别取30,10min; L 为顶板钢筋骨架纵筋数量(根),取30根; n 为预制箱梁长度(m)。其他参数取值如表1所示。

表1 钢筋骨架自动化产线工效

Table 1 Productivity for reinforcement cage automated production line

项目	n/m	T_{11}/s	T_{12}/s	T_{13}/s	T_{14}/s	T_1/\min	T_2/\min
中梁	27	30	15	10	0	99	126
边梁	31	30	15	10	17	101	126

由表1可知,生产单片标准30m预制箱梁钢筋骨架,自动化生产线连续生产时间为126min,单日可完成4片小箱梁钢筋骨架的自动化加工。

2.2.2 全自动液压模板系统

针对传统模板系统调整繁琐、通用性差、自动化程度低的核心痛点,开发了高精度定位、全流程自动化、多梁型自适应的全自动液压模板系统。通过机械结构创新与控制技术的深度融合,实现了外模高效开合、内模整体退模、底模精准定位与端模自适应调整。

1) 液压外模。采用自动液压钢模板(见图4),实现整体自动液压开、合模,减少传统模板的拆卸、吊装、组装过程。在模板端头增设2组纵向油缸,通过端部首节段模板的纵向自移动设计,实现模板在 $\pm 2m$ 范围长度无级调整,以满足同种梁型不同长度箱梁的预制需求。集成位移传感器,实时感知模板姿态,实现快速开合与精确调位。

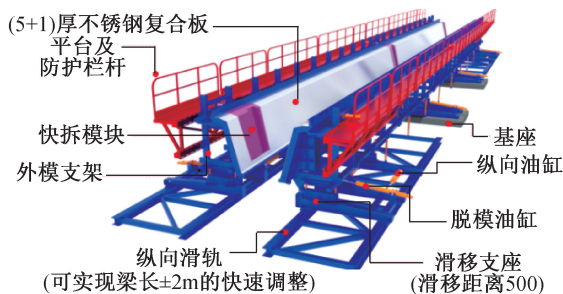


图4 液压外模结构

Fig. 4 Structure of hydraulic outer formwork

2) 整体式液压内模。将L形顶模与侧模通过铰接节点连接,再通过连杆装置与刚性纵梁底模构成整体。由同步液压油缸驱动,实现内模“一键式”收缩与支立,如图5所示。配合起顶装置与内模托架,通过顶升内模并由托架牵引,实现内模整体自动退模;单次脱模时间缩短至15min内,解决了人工进入狭小箱梁内腔进行手动拆模时安全风险高、工效低的问题。

3) 自行式移动底模。为实现预制梁环形流水线生产,引入自行式移动底模和横移摆渡车,移动底模采取模块化设计。通过组合不同标准模块,实现组拼成适用于不同梁型的底模(见图6),大幅度提高底模周转率与通用性。在环形生产线的首尾

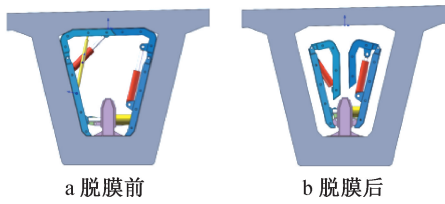


图 5 整体式液压内模脱模

Fig. 5 Demoulding for integral hydraulic inner formwork

横移区设置横移摆渡车,通过其液压顶升装置托举移动底模进行横向转移,使自行式移动底模进行环形运转。

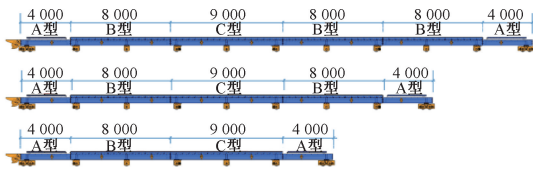


图 6 自行式移动底模模块节段

Fig. 6 Self-propelled traveling bottom formwork segment

4) 可变端模。可变端模由腹板、顶板及底板端模组成,如图 7 所示。左、右腹板端模通过双丝杠电动机驱动,沿梁长方向前后移动,顶板及底板端模通过铰接节点旋转,并由连接板固定,实现端模在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围自由调整,满足了不同类型斜交梁的生产需求,突破了传统端模固定化、单一化的技术瓶颈,显著减少了专用端模数量,提高了生产线的换型效率。

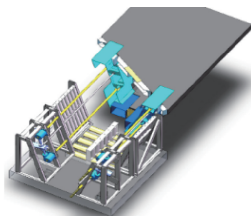


图 7 可变端模结构

Fig. 7 Structure of variable end formwork

2.2.3 混凝土浇筑系统

混凝土浇筑系统由鱼雷罐环形运输系统与桁架布料机浇筑系统构成^[7],如图 8 所示。鱼雷罐环形运输系统采用环形轨道+智能调度的技术路径^[8]。环形轨道为桁架悬挂式结构;鱼雷罐采用封闭罐体结构,内置行星式搅拌叶片,保证混凝土在运输过程中的均质性。桁架布料机浇筑系统采用门型主框架+智能布料斗的模块化架构。布料斗通过 4 个高精度压力传感器支承于布料小车,实现浇筑量的动态称量与闭环控制。布料斗内部设有给料器,出料口设置开合控制器,可根据布料需求精确调整出料口数量及开口大小,实现精准布料。通

过运输精准调度-布料智能响应-数据闭环控制的深度融合,实现混凝土浇筑的全流程智能化作业。



图 8 混凝土浇筑系统

Fig. 8 Concrete pouring system

智能制造执行系统根据生产信息确定生产节拍,调度多个鱼雷罐协同作业,并根据预制箱梁的 BIM 尺寸信息协调规划布料路径自动布料,实现混凝土自动浇筑。

2.2.4 预制梁智能化养护系统

智能化养护系统采用蒸汽养护+喷淋自然养护的技术路线,由智能蒸养模块、智能温湿度监测网络、自然养护调控模块组成,如图 9 所示。



图 9 智能化养护系统

Fig. 9 Smart curing system

智能温湿度监测网络通过分布式传感器实时采集各养护工位的环境数据,上传至智能制造执行系统。系统结合预设的混凝土强度增长曲线、配合比及环境参数,动态调控蒸汽养护的升温、恒温、降温速率及持续时间^[9],并同时决策自然养护启动时机。根据试验结果,养护 48h 后强度、弹性模量均可达到张拉要求。通过采用智能化养护体系,蒸汽养护室的周转率提升 30%,综合养护能耗降低约 50%。

2.2.5 预应力智能张拉系统

预应力智能张拉系统以物联网技术为核心,构建了传感器-控制器-执行机构的闭环控制体系。自行式智能张拉机器人集成了行走系统、千斤顶定位系统、张拉系统、测量系统及控制系统等^[10],如图 10 所示。机器人接收到智能制造执行系统的指令后自动移动至梁端,采用超声波定位精调机器人位置,通过激光测距定位、安装千斤顶,然后进行预应力筋的自动化张拉作业。高精度传感器实时获取千斤顶油压、伸缩位移信息等数据并同步上传至系统进行分析处理,并生成质量报表,便于质量管理、追溯。



图 10 自行式智能张拉机器人

Fig. 10 Self-propelled smart tensing robot

2.2.6 预应力智能压浆系统

智能压浆系统由制浆系统、压浆系统、真空系统及智能控制系统组成,具备故障自动诊断与报警功能,有效提升施工可靠性。采用大循环回路设计,有效排除空气,确保压浆密实度。智能控制系统对管道压力进行闭环调节,确保压浆质量。全过程数据自动记录与存储,为质量追溯提供了完整依据。配置吸尘集尘装置,有效减少粉尘排放,改善工人作业环境^[11]。

2.2.7 模板自动清理喷涂一体机

模板自动清理喷涂一体机集行走系统、清理模块、吸尘模块、智能喷涂模块于一体,实现了模板清理、残渣收集、脱模剂喷涂的全流程无人化作业,具备地面行驶及自动上下模板能力,如图 11 所示。采用弹性伸缩连接打磨辊以适应模板表面微小不平状况。设备边缘设有检测传感器,可记忆不同部位的打磨姿态。采用线性喷嘴设计,脱模剂喷涂厚度误差可控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 。完成单片预制箱梁模板的清理与喷涂仅需 30min,模板磨损率降低 40%,粉尘收集率 $\geq 95\%$ 。

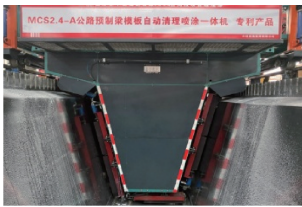


图 11 模板自动清理喷涂一体机

Fig. 11 Formwork automatic cleaning and coating machine

2.2.8 顶板振捣拉毛一体机

顶板振捣拉毛一体机集振捣、整平、拉毛功能于一体,如图 12 所示。通过功能集成、智能调控、工艺闭环实现顶板混凝土工序的连续自动化作业,其内置的智能控制系统可根据预设的工艺参数,自动完成振捣深度控制、表面整平及拉毛处理。

2.3 智能制造执行系统

智能梁场智能制造执行系统采用 MES(制造执行系统)与 ERP(企业资源计划)融合的架构,依托



图 12 顶板振捣拉毛一体机

Fig. 12 Integrated top slab vibrating and texturing machine

全覆盖的物联网感知网络,集成传统智慧工地与智能生产线管控功能,形成以生产管理为主线,集质量管理、物资管理、可视化管理、设备监控、智能设备远程控制于一体的综合管理体系,实现智能化生产调度、全过程质量溯源、精细化过程管控^[12-13],如图 13 所示。



图 13 智能制造执行系统管理结构

Fig. 13 Management structure of the smart manufacturing execution system

1) 生产管理。结合设备实时状态,以项目安装计划为导向,融合工业排程逻辑,动态生成预制生产计划,系统自动关联生成物资消耗清单与采购计划。通过移动端启动计划后,自动分发任务至各工位,并采集进度影像,自动生成施工台账与进度报表,自动校验预制与安装进度偏差,动态预警并推荐处理方案。

2) 质量管理。系统通过 AI 图像识别技术自动识别关键工序影像并归档,实现全流程质量溯源;结合构件生产进度,按规范自动推送试验任务,并依据试验结果决策工序流转;对接蒸养、张拉等智能设备,实时反馈生产数据,实现全过程质量精细化管控。

3) 物资管理。系统依据生产计划推送采购计划;物资到货后通过二维码进行入库登记与质量检验流程关联,形成批号-试验报告关联的追溯台账;在生产领料环节通过扫码实现精准出入库管理,形成物资数量与质量的双重闭环控制。

4) 数字孪生。基于 GIS+BIM 建立与物理梁场一致的数字孪生模型,如图 14 所示。通过物联网手段采集的生产数据驱动 BIM 模型的实时运动;同时,集成现场视频监控系统,实现虚拟与现实的双

向映射,通过系统直观了解现场实际生产进度,实现了基于 BIM 的精细化、可视化管理。



图 14 钢筋骨架自动化生产线数字孪生

Fig. 14 Digital twin of reinforcement cage automated production line

5) 工序 AI 识别。利用计算机视觉自动识别,采集钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等关键工序的施工影像,提升数据采集的实时性与准确性,降低人工录入误差,为质量追溯提供可信数据源,并实时映射至数字孪生体。

6) 设备健康监测。实时监测设备运行状态,对比额定运行参数,对异常情况进行故障预警,建立故障数据库,变事后维修为预测性维护,结合维保周期智能推送任务,全面记录设备状态及维修保养详情,形成设备全生命周期管理闭环。

7) 智能设备远程控制。平台通过对混凝土振捣系统、混凝土智能养护系统、智能张拉机器人等智能化设备进行远程控制,实现设备实时响应、智能作业;实现无人化操作、安全化生产,提高施工生产效率。

3 应用成效分析

3.1 混凝土智能养护

混凝土智能养护分为静停、升温、恒温、降温、自然养护阶段,蒸汽养护各阶段时间设置如下:升温 4h、恒温 8h、降温 3h。

为验证智能养护在狮子洋通道项目的成效,梁场取 5 片试验梁进行智能养护,测量蒸汽养护第 2, 4, 6, 8 小时及自然养护阶段抗压强度,并同步测定自然养护结束后弹性模量,试验结果如表 2 所示。由表 2 可知,养护时间至 48h,强度最低为 51.2MPa,弹性

模量最低为 35 600MPa,均满足设计要求。

3.2 智能化预制梁场实施成效

通过在狮子洋通道项目梁场应用实践,对其减人化、工序工效提升和节约化进行收集整理并与传统梁场模式进行对比,如表 3 所示。智能化梁场通过采用钢筋骨架自动化生产线加工,单片箱梁钢筋骨架加工需 2.1h,较传统作业方式工效提升 40%;采用整体式液压内模,模板拆除仅需 1h,较传统模板工效提升 66%。通过采用智能养护方案,蒸汽养护时间从传统 36h 降低至 15h,生产单片梁节省用电约 1 512kW·h,节省率达 58%;单条生产线加工单片预制箱梁需 24h,较传统作业方式工效提升 33%;作业人员较传统梁场减少 37 人,人员减少率约 51%。

表 3 梁场各工序作业工效对比

Table 3 Comparison of work efficiency for each process in girder yard

编号	工序名称	作业工位	作业时间/h		工效提升/%
			智能化梁场模式	传统梁场模式	
1	钢筋骨架加工	钢筋加工区	2.1	3.5	40
2	外模及底模整修		1.0	2.0	
3	钢筋骨架安装、检查	混凝土浇筑区	5.0	5.0	14
4	混凝土浇筑及静置等强		11.5	11.5	
5	模板拆除		1.0	3.0	
6	蒸汽养护	蒸汽养护区	15.0	36.0	33
7	自然养护		9.0		
8	自然养护	自然养护区	24.0	—	—
9	静置等龄期	张拉横移区	14.0	24.0	41
10	张拉		1.5	2.5	
11	压浆	存梁区	0.8	0.8	0
12	完成单片预制箱梁	—	24.0	36.0	33

4 结语

本文系统阐述了公路箱梁智能化预制梁场的建设理念、核心装备与系统集成方法,并通过实际工程应用验证了其显著成效。研究表明,通过集成

表 2 梁场智能养护试验结果

Table 2 Intelligent maintenance test results of girder yard

梁号	蒸汽养护抗压强度					自然养护抗压强度			养护结束弹性模量
	恒温 2h	恒温 4h	恒温 6h	恒温 8h	降温	6h	12h	24h	
16-3	41.1	41.6	43.6	45.6	47.9	49.2	50.7	54.1	37 100
15-4	39.3	42.2	44.8	45.2	48.3	50.4	51.5	54.5	36 300
13-3	34.0	38.5	42.0	44.9	46.1	47.9	48.6	53.4	35 600
16-4	37.0	37.4	39.8	43.3	44.8	45.0	46.2	51.2	35 800
16-4	37.1	38.1	43.4	45.2	45.7	46.8	48.2	54.3	36 600

钢筋骨架自动化生产线、全自动液压模板、智能浇筑、养护、张拉压浆等核心装备,结合智能制造执行系统实现全过程数字化管控,可大幅度提升梁场生产效率、产品质量与资源利用效率。实践数据表明,智能化梁场可实现综合人工减少 51%,单片梁生产周期缩短 33%,养护能耗降低约 50%。

参考文献:

- [1] 秦顺全,苑仁安,郑清刚,等. 超大跨度公铁两用斜拉桥结构体系研究[J]. 桥梁建设,2020,50(4):1-8.
QIN S Q, YUAN R A, ZHENG Q G, et al. Research on structural systems for very long-span rail-cum-road cable-stayed bridge[J]. Bridge construction, 2020, 50(4):1-8.
- [2] 张鸿,张喜刚,丁峰,等. 短线匹配法节段预制拼装桥梁新技术研究[J]. 公路,2011,56(2):76-82.
ZHANG H, ZHANG X G, DING F, et al. Research on new technology of segmented precast and assembled bridges by short-line matching method[J]. Highway, 2011, 56(2):76-82.
- [3] 聂建国,周惠蒙,樊健生. 装配式混凝土结构简化构造关键技术研究与应用[J]. 土木工程学报,2023,56(8):1-15.
NIE J G, ZHOU H M, FAN J S. Research and application of key simplified detailing techniques for prefabricated concrete structures [J]. China civil engineering journal, 2023, 56(8): 1-15.
- [4] 郑健龙,陈梦洁,刘超超. 公路基础设施智能建造发展与展望综述[J]. 中外公路,2025,45(2):1-20.
ZHENG J L, CHEN M J, LIU C C. Review of intelligent construction development of highway infrastructures and its prospects[J]. Journal of China & foreign highway, 2025, 45(2): 1-20.
- [5] XU X Z, LIU Y M, OU G L. Evaluating high-speed railway intelligent construction business levels via ERT-TOPSIS and SSA-optimized BP with rigorous synthetic-data validation[J]. Results in engineering, 2025, 28:107591.
- [6] 李金龙,杨彪,张福群,等. 预制箱梁环形生产线施工技术[J]. 建筑机械,2025(2):21-25.
LI J L, YANG B, ZHANG F Q, et al. Construction technology of circular production line for prefabricated box girders [J]. Construction machinery, 2025(2):21-25.
- [7] 曾锋,周东东,孙一方. 高速公路混凝土预制梁智能制造技术研究[J]. 公路与汽运,2023,39(2):122-126.
ZENG F, ZHOU D D, SUN Y F. Research on intelligent manufacturing technology of expressway concrete precast beam[J]. Highways & automotive applications, 2023, 39(2): 122-126.
- [8] 江伟,徐金良,周明科. 大型梁场智能化混凝土浇筑系统研究与应用[J]. 桥梁建设,2023,53(2):88-94.
JIANG W, XU J L, ZHOU M K. Research and application of intelligent concrete pouring system for large girder yards [J]. Bridge construction, 2023, 53(2): 88-94.
- [9] 黄立浦,徐有为,陈康军. 水泥混凝土智能蒸汽养护系统的设计与应用研究[J]. 公路工程,2016,41(4):242-245,289.
HUANG L P, XU Y W, CHEN K J. The design and application research of concrete intelligent steam curing system[J]. Highway engineering, 2016, 41(4):242-245,289.
- [10] 廖嵘,李建强,谢运灵,等. 智能张拉机器人的研发与应用[J]. 建筑施工,2023,45(6):1263-1267.
LIAO R, LI J Q, XIE Y L, et al. R & D and application of intelligent tensioning robot [J]. Building construction, 2023, 45(6):1263-1267.
- [11] 赵连东,马林. 铁路桥梁预应力管道自动压浆关键设备研究[J]. 铁道建筑,2018,58(5):39-43.
ZHAO L D, MA L. Study on key equipments for automatic grouting into prestressed pipe of railway bridge [J]. Railway engineering, 2018, 58(5):39-43.
- [12] 王成城,王凯,刘鹏. 面向智能制造的生产过程质量数据采集与追溯关键技术及应用[J]. 中国科技成果,2024(2):22-25.
WANG C C, WANG K, LIU P. Key technologies and applications of quality data collection and traceability in production process for intelligent manufacturing [J]. China science and technology achievements, 2024(2):22-25.
- [13] 刘炜,夏玉洁,贾骏,等. 基于主从链和边缘计算的 MES 生产调度模型[J]. 郑州大学学报(理学版),2023,55(3):14-21.
LIU W, XIA Y J, JIA J, et al. MES production scheduling model based on master-slave chain and edge computing[J]. Journal of Zhengzhou University (natural science edition), 2023, 55(3): 14-21.
- [14] 孙涛,付凯歌,朱小金,等. 虎门二桥小半径平曲线钢箱梁落梁施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2022,51(6):24-26,40.
SUN T, FU K G, ZHU X J, et al. Key technology of beam dropping construction of the steel box girder with small radius and flat curve for Humen Second Bridge[J]. Construction technology, 2022, 51(6):24-26,40.
- [15] 计春华,肖冰,戴志成. 小半径曲线钢箱梁桥线形精确控制研究[J]. 建筑机械,2024(8):239-243.
JI C H, XIAO B, DAI Z C. Research on accurate linear control of small radius curved steel box beam bridges [J]. Construction machinery, 2024(8):239-243.
- (上接第 104 页)
- [12] 老国健,刘方刚,李新平,等. 悬臂施工的连续箱梁桥框架墩横梁监控技术的研究[J]. 公路工程,2024,49(4):35-41.
LAO G J, LIU F G, LI X P, et al. Study on monitoring technology for frame pier crossbeam of continuous box beam bridge during cantilever construction[J]. Highway engineering, 2024, 49(4): 35-41.
- [13] 楚玺,周志祥,段鑫,等. 桥梁结构连续线形监测方法[J]. 公路交通科技,2023,40(11):157-163,171.
CHU X, ZHOU Z X, DUAN X, et al. A monitoring method for continuous line-shape of bridge structure[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40(11):157-163,171.