

DOI: 10.7672/sgjs2026130030

数字化建造技术在钢筋工程中的应用*

陈晓明^{1,2},王 琥^{2,3},金 晶^{2,3},李冀清^{2,3}

(1. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080; 2. 上海面向典型建筑应用机器人工程技术研究中心, 上海 200072;
3. 上海市机械施工集团有限公司, 上海 200072)

[摘要] 以钢筋工程中常见的地下连续墙钢筋笼为研究对象,通过分析地下连续墙钢筋笼的结构特点,结合数字化建造技术的优势,提出了以模块组合、数字化建造和智能质检为特点的新型建造工艺。首先将钢筋笼进行模块化分解,然后使用数字化建造技术进行模块化生产,使用基于人工智能的质检系统进行实时质检,最后通过模块组装实现钢筋笼的生产。在上述新型工艺的基础上,进行了地下连续墙钢筋笼智能建造中心的搭建和应用。实践表明,数字化钢筋笼建造工艺不仅制作质量好、效率高,同时还能在工地现场实现工厂化生产,社会效益和经济效益良好。

[关键词] 数字化建造;地下连续墙;钢筋笼;模块组合;机器人;智能质检

[中图分类号] TU741

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0030-06

Application of Digital Construction Technology in Reinforcement Engineering

CHEN Xiaoming^{1,2}, WANG Xiao^{2,3}, JIN Jing^{2,3}, LI Jiqing^{2,3}

(1. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Oriented in Typical Building Application Robot Shanghai 200072, China;

3. Shanghai Mechanized Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: Taking the reinforcing cages commonly used in diaphragm walls as the subject, and by analyzing their structural characteristics and leveraging the advantages of digital construction technology, this paper proposes a novel construction process characterized by modular assembly, digital construction, and intelligent quality inspection. Firstly, the reinforcement cages were broken down into modules. These modules were then produced using digital construction technology, with real-time quality inspection conducted via an AI-based quality control system. Finally, the reinforcement cages were assembled from these modules to complete production. Building upon this novel process, an intelligent construction center for diaphragm wall reinforcement cages was established and put into operation. Practice has demonstrated that the digital reinforcement cage construction process not only ensures high-quality production and efficiency but also enables factory-style production on-site, yielding significant social and economic benefits.

Keywords: digital construction; diaphragm walls; reinforcement cages; module combination; robots; intelligent quality inspection

1 研究背景

地下连续墙钢筋笼作为钢筋工程中的重要部件,具有整体性强、刚度大、抗渗性好等特点,在地

下工程中得到了广泛应用^[1-2]。在地下连续墙钢筋笼加工制作过程中,目前仍以传统的人工制作进行生产,该种方式不仅人工成本高、工作强度大,施工环境差,影响施工安全,而且存在施工效率低、质量无保证、钢筋笼整体结构不稳定等问题,已影响整个深基础工程施工的发展^[3-4],因此研究地下连续墙钢筋笼自动化建造技术,实现地下连续墙钢筋笼

* 上海市国有资产监督管理委员会基金项目:钢筋工程数字化柔性生产线关键装备技术及智能质检平台研发(2021005)

[作者简介] 陈晓明,总工程师,教授级高级工程师, E-mail: xiaocxm@sina.com

[收稿日期] 2026-03-20

的机械化、自动化和工厂化生产已迫在眉睫^[5-7]。

2 地下连续墙钢筋笼模块组合技术

地下连续墙钢筋笼断面如图 1 所示^[2],可分为主筋、箍筋、钢筋笼骨架和其他附件等。箍筋在最外层形成封闭环结构,主筋焊接于箍筋内侧,钢筋笼桁架为钢筋笼运输吊装时的受力结构。

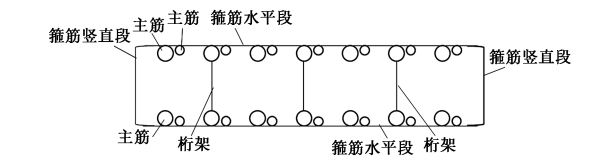


图 1 地下连续墙钢筋笼断面

Fig. 1 Section of reinforcement cage of diaphragm wall

地下连续墙钢筋笼可分为结构有规律的若干简单模块和结构规律不显著的附件模块的组合。地下连续墙钢筋笼箍筋的水平段和邻近主筋表现为钢筋垂直交叉排列的网片状结构,可视为网片模块;其箍筋竖直段为上、下 2 个网片模块的封口结构,可视为封口模块;钢筋笼内部的钢筋笼骨架可由钢筋桁架单独制作后安装,可视为桁架模块;钢筋笼的其他部分,如吊耳、接驳筋、特殊位置钢筋和声测管等组件数量少,而且规律不明显,因此全部归为附件模块。基于上述考虑,地下连续墙钢筋笼主要由网片模块、桁架模块和封口模块组成,如图 2 所示。

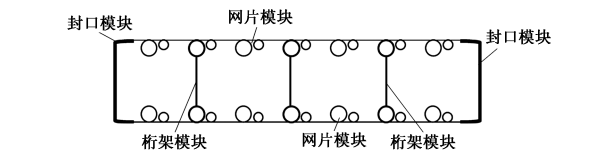


图 2 地下连续墙钢筋笼模块化组合

Fig. 2 Modular combination of diaphragm wall reinforcement cage

网片模块、桁架模块和封口模块不仅占比超过 85%,而且组成结构简单、规律性强,适合采用专用的机器人制作。钢筋工程数字化建造技术采用专用机器人加工网片模块、桁架模块和封口模块,最后将上述模块进行组装形成成品钢筋笼,完成地下连续墙钢筋笼的工厂化制作。

3 钢筋工程数字化建造及机器人技术

3.1 钢筋工程数字化建造技术

钢筋工程数字化建造技术路线如图 3 所示,主要方法为:首先按照设计图纸创建钢筋的 BIM 模型,然后在此基础上使用智能算法进行钢筋翻样,形成数字化生产料单。在排产系统控制下,各种数字化建造机器人根据生产料单生产出所需的钢筋

工程成品,从而实现钢筋工程的数字化建造。

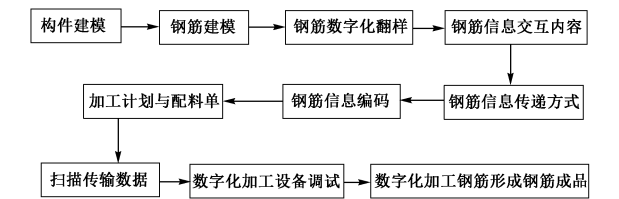


图 3 钢筋工程数字化加工工艺

Fig. 3 Digital processing technology of reinforcement engineering

3.2 钢筋工程焊接机器人

钢筋工程焊接机器人采用先进的传感器和控制系统,能够实现高精度作业^[8-10];机器人可以持续稳定地进行作业,不受人工疲劳和情绪波动的影响,大大提高了工作效率;减少了人工在高危环境中的作业风险,提高了施工安全性;结合人工智能算法和物联网技术,机器人能够实现自主学习和优化作业流程,提高作业效率和质量^[9-11]。

3.2.1 龙门式网片焊接机器人

新研发的龙门式焊接机器人采用龙门式结构,两侧纵向轨道间距 8m、整机宽度 10m、高 2m、长 2.5m,能焊接宽度不超过 6m 的地下连续墙钢筋笼钢筋网片,如图 4 所示。

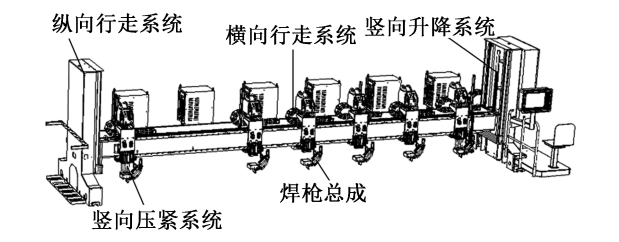


图 4 钢筋网片焊接机器人总体结构

Fig. 4 The overall structure of steel mesh welding robot

在图 4 中,龙门架两侧通过可行走的支腿支撑于纵向轨道上方,在龙门架上布置了 6 台可沿着龙门架横梁进行横向移动的焊枪。当需要对焊点进行焊接时,多台焊枪在焊枪就位系统的定位下,分别对多个焊点进行同时焊接。网片模块的焊接工艺如图 5 所示。

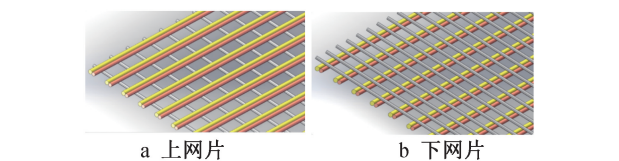


图 5 网片模块

Fig. 5 Mesh module

在图 5a 中,横筋在纵筋下方,焊点位于纵筋两

侧,焊枪总成的方向与横筋平行。焊接时,首先通过横筋、纵筋和压紧装置分别确定出待焊焊点的 y 向、 x 向和 z 向坐标,然后焊枪总成对网片焊点进行焊接。在图 5b 中,横筋在纵筋上方,焊点位于纵筋的前侧或后侧,焊枪总成的方向与横筋垂直。焊接时,首先通过横筋、纵筋和压紧装置分别确定出待焊焊点的 y 向、 x 向和 z 向坐标,然后焊枪总成对焊点进行焊接。

3.2.2 直线型桁架焊接机器人

直线型桁架焊接机器人能够对钢筋桁架进行固定、焊接和传送,如图 6 所示。焊接机器人包括操作主机、底座平台、焊枪总成、夹紧传送总成、传送电机、焊机、动轨平台和主筋限位板。通过操作主机可进行焊接机器人的各项参数设置、监控焊接进度、控制夹紧传送总成与焊接机器人间的联动。



图 6 新型桁架焊接机器人

Fig. 6 New truss welding robot

每个桁架焊接机器人负责单个桁架单元的焊接,包括轨道、焊枪、夹紧装置和水平运输装置。夹紧装置负责将待焊接的钢筋定位后进行压紧,然后焊枪在焊缝定位系统的作用下依次对多组焊缝进行焊接。钢筋原材料从右向左移动,在水平运输系统作用下依次通过 3 台桁架焊接机器人,进行 3 个对应位置的焊缝焊接,成品集中堆放在最左侧的成品桁架区。

3.3 基于 BIM 技术的数字化钢筋模块翻样

基于 BIM 技术的地下连续墙钢筋笼翻样系统,融合 BIM 的三维可视化优势,直观且生动地展现钢筋的构造细节,优化钢筋搭建逻辑、精确确定绑扎位置及吊点布局等^[12],运用信息化手段预先整合各类钢筋笼翻样计算规则于系统之中,其核心目标在于促进前端深化设计信息与生产工艺数据的无缝对接,并依托信息化技术,全面实现施工流程中的数据累积与管理,实现钢筋加工数字化,并为钢筋加工实现智能化生产提供了可能。通过数学表达式记录并积累现场实际操作中的经验数据,形成可复用的知识库。这些经验数据不仅可用于当前项目的优化,还可为未来类似项目提供参考。通过系统化地积累和分析数据,能够不断改进翻样流程,

提升翻样工作的质量和效率。

4 钢筋笼焊接智能检测

4.1 钢筋笼焊点检测

图像识别和人工智能(AI)技术结合,利用算法和数据分析,能够自动处理和理解视觉信息^[13]。图像识别应用于焊点质量检测时,首先采集一定数量的焊点图像,对其特征进行分类并标注,将这些包含特征标注的焊点图像导入深度神经网络模型进行训练,从而构建焊点特征检测模型。然后,运用工业互联网技术与焊接机器人建立通信,实时采集焊接机器人的工作状态,以此作为触发条件来控制相机采集图像,并将采集的图像传入特征检测模型,以获取特征检测结果。最后,将特征检测结果作为输入,通过模糊逻辑模型进行推理,从而获得焊点质量的评价和量化指标。

焊点智能检测系统主要分为两个部分:离线训练平台与在线检测平台。其中离线训练平台包括图像数据集、数据预处理模块、目标检测算法、已训练模型。在线检测平台包括相机模块、通信模块、检测与评价模块、数据存储模块。

4.2 钢筋笼焊缝检测

桁架筋焊缝自动检测系统通过开发并引入 3D 深度相机为核心,实现桁架筋焊缝的快速质检,提高桁架焊接机器人智能化程度。钢筋焊缝自动检测系统由单台数据接收显示服务器、多台数据处理主控单元及 3D 深度相机组成。数据处理主控单元及 3D 深度相机的数量根据焊接工位的数量以 1:1 的比例进行配置,并通过无线物联网与数据接收显示服务器进行组网通信。数据接收显示服务器可放置于焊接现场,也可放置于控制管理中心。

基于点云和彩色图像融合的焊缝定位及尺寸计算方法,使用三维激光扫描仪同时采集焊接后焊缝区域图像和点云数据,采用分段处理方式提取分段图像焊缝区域及对应点云数据。其中图像处理部分包括焊缝图像分段、灰度化、二值化、膨胀、轮廓提取、焊缝定位等步骤,如图 7 所示,点云处理部分包括点云降采样、滤波、主成分分析等。

5 地下连续墙钢筋笼智能建造中心

5.1 项目概况

浦东机场南区地下交通枢纽及配套工程位于上海市浦东新区,浦东机场捷运区以东、飞翱路以西、浦东机场卫星厅以南和围场河路以北,总占地面积约 162.8 万 m^2 、基坑面积约 51 万 m^2 。建筑主要为地上 4 层,地下 3 层,地下空间主要为综合交通枢纽。

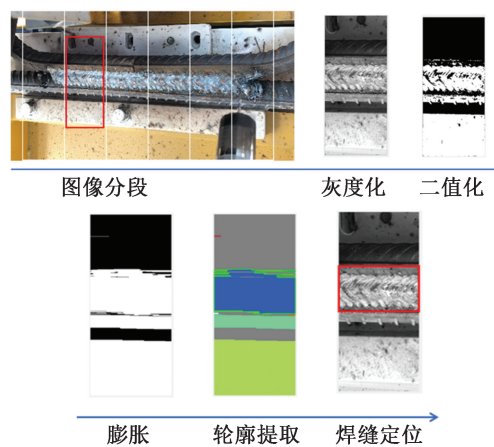


图 7 焊缝图像分段定位算法步骤

Fig. 7 Steps of segmentation positioning algorithm for weld image

在该项目中,以创新研发的钢筋工程数字化建造技术为基础,搭建了地下连续墙钢筋笼智能建造中心,该建造中心采用工厂化运营模式,在其内部设置了钢筋数字化加工区、钢筋笼数字化加工区和物流运输系统。

5.2 地下连续墙钢筋笼生产工艺

钢筋原材料入场后首先进入成品加工区,在排产系统控制下,按数字化料单要求加工成钢筋笼需要的钢筋成品。上述钢筋成品被送入桁架生产线与网片生产线进行生产。网片生产线不仅是钢筋网片的加工平台,也是钢筋笼各个模块的组装平台。钢筋模块在焊接完成后,通过门式起重机运送至钢筋笼组装平台,由人工在钢筋笼组装平台进行组装。完成的钢筋笼以双机抬吊的方式从钢筋笼组装平台运送至水平运输小车上,然后由水平运输小车运出厂房至钢筋笼起吊区,至此完成全部工序,总体工艺流程如图 8 所示。

5.3 总体场布

数字化钢筋笼建造中心包括 3 大区域,北侧是钢筋加工区,用以存放钢筋原材料和加工钢筋成品;南侧的钢筋笼建造中心为全封闭的轻钢结构厂房,用于生产成品钢筋笼;西侧是成品钢筋笼的厂外起吊区,露天设置。总体场布如图 9 所示。

5.4 基于 BIM 技术的钢筋笼翻样系统

基于 BIM 的地下连续墙钢筋笼翻样系统,通过信息化手段将计算规则提前嵌入系统,实现前端深化设计数据和生产工艺数据的融合,基于信息化技术实现施工全过程数据积累。该系统融合了 BIM 三维可视化技术,将设计院提供的结构图纸以三维模型的形式进行直观展示(见图 10),结合智能算法

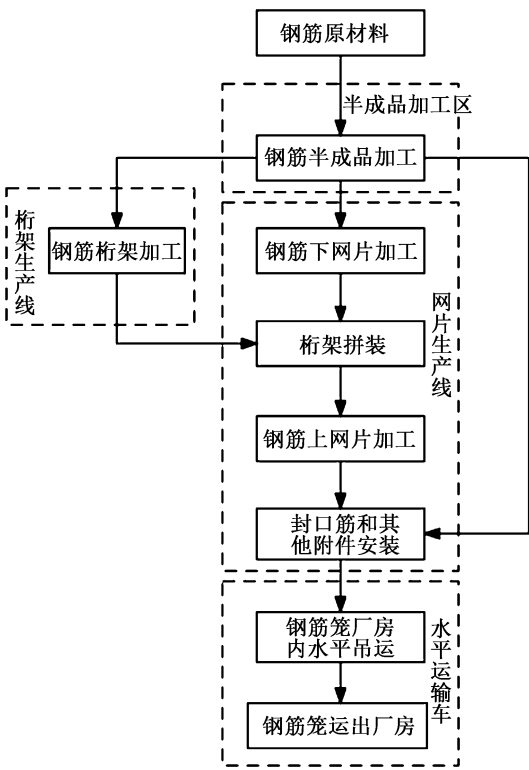


图 8 总体工艺流程

Fig. 8 Overall process flow

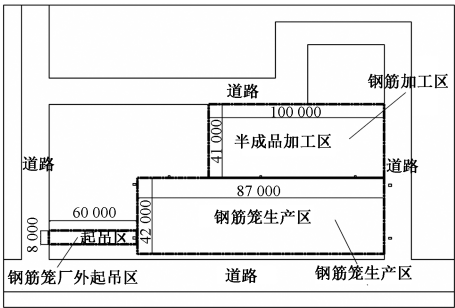


图 9 总体场布

Fig. 9 General field arrangement

优化钢筋搭建关系、绑扎位置及吊点位置等,最终直接生成钢筋加工料单,显著提升钢筋笼翻样的效率与精确度。

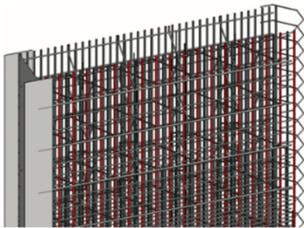


图 10 钢筋笼模型

Fig. 10 Reinforcement cage model

5.5 钢筋半成品加工区

钢筋加工区负责存放钢筋原料、加工钢筋半成

品和加工废料。区域内共包括原材钢筋区、成品钢筋区、钢筋废料区和钢筋自动加工区,采用数字化钢筋加工一体机实现钢筋自动上料、锯切、套丝和弯曲等作业,如图 11 所示。

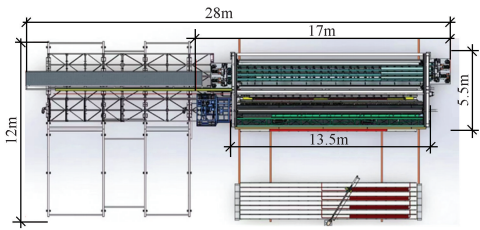


图 11 钢筋半成品加工区

Fig. 11 Semi-finished production processing area of reinforcement

5.6 钢筋笼生产车间

钢筋笼生产车间为全封闭轻钢厂房结构,负责钢筋笼各模块的原料存储、生产、拼装和水平运输出厂,共包括:1 条钢筋半成品运输通道、1 个桁架焊接生产线、2 个网片焊接生产线、2 台 50t 门式起重机、1 条钢筋笼水平运输通道和 1 个智能控制中心,如图 12 所示。

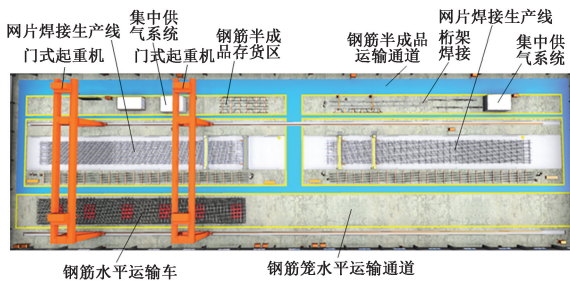


图 12 钢筋笼生产区

Fig. 12 Reinforcement cage production area

5.6.1 钢筋成品储存区

在钢筋成品区内根据各种钢筋成品的规格型号,设置了多组储存平台,并采用了基于称重计数和 AI 图像识别计数的材料管理系统。上述管理系统能够根据各种材料的质量和图像,自动计算钢筋成品的数量,为计算机管理工厂的存货提供了技术基础。

5.6.2 网片模块生产线

在钢筋笼生产厂房的中部共有 2 个网片生产线,可独立进行钢筋网片生产。每个网片焊接生产线尺寸为 13m×60m,包括 2 台网片焊接机器人和 1 套钢筋定位平台。

5.6.3 桁架模块生产线

在厂房东北位置设置了 1 个桁架焊接生产线,桁架生产线共包括 3 台桁架焊接机器人,1 个成品

桁架区,1 个原料区。桁架加工生产线全长 40m、宽 2.5m,是由 3 个上述直线型焊接机器人依次纵向排列而成的生产线,可满足 X 形和 W 形桁架的上料、定位、焊接和成品堆放。

5.6.4 钢筋笼模块组装平台

钢筋笼在网片生产线上进行各个部件的组装,网片焊接平台同时作为钢筋笼组装平台。模块组装完成后,最后人工焊接安装钢筋笼两侧的封口钢筋和钢筋笼的吊点构件,完成整个钢筋的组装制作。

5.6.5 成品钢筋笼运输系统

成品钢筋笼制作完成后,首先通过 2 台 50t 门式起重机从网片生产线运输至钢筋笼水平运输车上,最后由水平运输车向西侧运出厂房,到达起吊区。此外,整个生产线配备专用的数字化系统,不仅可以进行数字化建模和翻样,还可以采用智能化技术对生产排产和加工质量进行检测,如图 13,14 所示。



图 13 生产管理系统

Fig. 13 Production management system

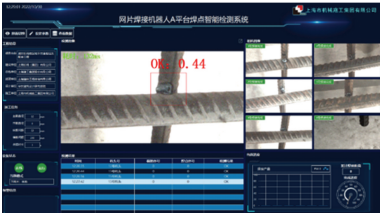


图 14 基于人工智能的实时质检系统

Fig. 14 Real-time quality inspection system based on artificial intelligence

该项目共完成 11 幅钢筋笼的生产,在加工过程中,自动化加工设备的工作量占比超过 80%,人工组装的工作量占比不超过 15%,焊点合格率 95%,焊缝合格率超过 98%,钢筋笼一次检验合格率达到 100%,焊工数量减少 50%,焊接速度提升 20%,初步实现了地下连续墙钢筋笼加工的机械化、自动化和信息化,为钢筋工程的数字化加工探索了一条具有广阔前景的道路。

6 应用前景分析

新型钢筋笼建造技术在以下方面进行了创新。

1) 钢筋笼模块组合技术。通过使用模块组合

技术,将地下连续墙钢筋笼主体分解为网片模块、桁架模块和封口模块,对上述模块采用自动化设备进行生产,最后使用模块组装形成成品地下连续墙钢筋笼。

2)数字化钢筋笼建造工艺。基于上述钢筋笼模块分解技术,使用数字化翻样技术和自动化加工设备进行地下连续墙钢筋笼生产,首次进行地下连续墙钢筋笼的生产应用。

3)使用基于人工智能的图像识别技术对焊接质量进行实时质检。不仅识别效率高,识别准确度高,还能实现无人化生产。

4)地下连续墙钢筋笼智能建造中心首次实现现场生产。以新型钢筋笼建造工艺为基础,搭建了地下连续墙钢筋笼建造中心并进行了生产应用。

本文提出的新型钢筋笼建造工艺,适用于大型地下连续墙钢筋笼的自动化生产,该工艺既能够保证生产质量,还能大幅减少现场专业焊工,现场无污染,符合绿色建造的可持续发展理念,社会、经济和环保效益显著,对大型地下连续墙钢筋笼的机械化和自动化生产具有推进作用,具有广阔的市场应用前景。

7 结语

通过分析地下连续墙钢筋笼的结构特点,提出了以模块组合、数字化建造和智能质检为特点的新型数字化建造工艺。首先将地下连续墙钢筋笼进行模块化组合,然后使用数字化翻样和数字化加工设备进行模块化生产,最后通过模块组装实现钢筋笼生产。在上述工艺的基础上,进行了地下连续墙钢筋笼建造中心的搭建和应用。实践表明,新型数字化钢筋笼建造工艺不仅质量好、效率高,同时还能在工地现场实现工厂化生产,社会效益和经济效益良好,为大型地下连续墙钢筋笼的自动化生产进行了有益探索。

参考文献:

[1] 赵明时. T型超深地连墙钢筋笼制作控制要点分析[J]. 港口航道与近海工程,2024,61(5):101-104,121.
ZHAO M S. Analysis for key control points of reinforcement cage fabrication of T-shaped ultra-deep diaphragm wall [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2024, 61(5):101-104,121.

[2] 丁德申,陈晓明. 超深地下连续墙钢筋笼的制作工艺优化[J]. 建筑施工,2023,45(12):2413-2415.
DING D S, CHEN X M. Optimization of manufacturing technology of reinforcement cage for ultra-deep diaphragm wall[J]. Building construction, 2023, 45(12):2413-2415.

[3] 李兴光. 铁路施工企业钢筋集中加工厂设置现状及管理要求[J]. 北方建筑,2024,9(3):57-60.
LI X G. Current situation and management requirements of steel

bar centralized processing plant in railway construction enterprises [J]. Northern architecture, 2024, 9(3):57-60.

[4] 许兴旺,范文杰,雷刚,等. 西延高铁建造数字化平台研究[J]. 铁路技术创新,2024(1):169-175.
XU X W, FAN W J, LEI G, et al. Digital platform for construction of Xiyan HSR [J]. Railway technical innovation, 2024 (1): 169-175.

[5] 郭旗. 大跨度环形钢结构数字化建造关键技术与应用研究[D]. 济南:山东建筑大学,2024.
GUO Q. Research on key technology and application of digital construction of large-span annular steel structure [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.

[6] 高磊,余沛. 高速铁路智慧梁场项目管理平台研究与应用[J]. 建筑经济,2024,45(S1):170-174.
GAO L, YU P. Research and application of high-speed railway intelligent beam farm project management platform [J]. Construction economy, 2024, 45(S1):170-174.

[7] 来猛刚,姚晓飞. 交通基础设施智能建造工厂[J]. 公路,2024,69(8):253-259.
LAI M G, YAO X F. Intelligent construction factory for transportation infrastructure [J]. Highway, 2024, 69 (8): 253-259.

[8] 陈涛. 钢筋骨架自动焊接技术在大直径管片中的应用[J]. 上海建设科技,2024(2):51-54.
CHEN T. Application of automatic welding technology for steel reinforcement skeleton in large diameter pipe segments [J]. Shanghai construction science & technology, 2024(2):51-54.

[9] 刘斌,胡功学,程茂林,等. 跨江大桥智能钢筋加工厂设备的应用研究[J]. 起重运输机械,2024(11):83-88.
LIU B, HU G X, CHENG M L, et al. Research on the application of equipment in intelligent steel bar processing plant of river-crossing bridge [J]. Hoisting and conveying machinery, 2024 (11):83-88.

[10] 吴勇刚. 面向交通工程钢筋笼焊接的机器人集成系统研究[J]. 青海交通科技,2024,36(3):48-56.
WU Y G. Study on robot integrated system for steel cage welding in transportation engineering [J]. Qinghai transportation and technology, 2024, 36(3):48-56.

[11] 江清泉. 钢筋检测中潜在的关联问题及优化策略[J]. 冶金与材料,2022,14(4):179-181.
JIANG Q Q. Potential correlation problems and optimization strategies in steel bar detection [J]. Metallurgy and materials, 2022, 14(4):179-181.

[12] 赵旭,王云田,梁策,等. 基于 BIM 的梁场钢筋加工管理系统设计与应用[J]. 铁路计算机应用,2024,33(9):22-26.
ZHAO X, WANG Y T, LIANG C, et al. BIM based reinforcement processing management system for beam yard [J]. Railway computer application, 2024, 33(9):22-26.

[13] 强博博. 基于机器视觉技术的隧道衬砌裂缝自动检测系统研究[J]. 施工技术(中英文),2026,55(1):29-35.
QIANG B B. Research on automatic detection system for tunnel lining cracks based on machine vision technology [J]. Construction technology, 2026, 55(1):29-35.