

建筑钢结构智能制造研究及进展

陈振明^{1,2}, 王朋^{1,2*}, 肖运通¹, 李毅^{2,3}, 左志勇¹

(1. 中建钢构股份有限公司, 广东 深圳 518118; 2. 天津市钢结构绿色智能制造重点实验室, 天津 300380; 3. 中建钢构天津有限公司, 天津 300380)

摘要: 加快钢结构制造智能化升级, 发展新型建造方式, 不仅是推动建筑业高质量发展的重点任务, 也是我国向制造强国目标迈进的主攻方向。建筑钢结构制造属于典型的离散制造生产方式, 具有标准化程度低、生产批量小和种类多样的特点, 目前多采用人工辅助的机械化生产, 制造生产方式仍然比较落后, 因此解决建筑钢结构制造的关键技术问题对实现建筑工业化和智能化具有重要意义。针对建筑钢结构智能制造存在的装备智能化程度低、制造工艺较传统及生产管控数字化不足等问题, 研究了建筑钢结构智能制造生产线规划设计、智能装备和先进制造工艺技术以及生产过程数字化管控等诸多内容, 并通过数字孪生模型和微型生产线联调联动测试实验对智能生产线的可行性进行了技术验证, 为钢结构智能生产线设计和既有生产线升级改造提供了很好的应用示例。

关键词: 建筑钢结构; 智能制造; 先进工艺; 智能装备; 数字化管控

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0015-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230815001

Research and Progress of Intelligent Manufacturing of Steel Building Structures

CHEN Zhenming^{1,2}, WANG Peng^{1,2*}, XIAO Yuntong¹, LI Yi^{2,3}, ZUO Zhiyong¹

(1. China Construction Steel Structure Co., Ltd., Shenzhen 518118, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Green Intelligent Manufacturing for Steel Structures, Tianjin 300380, China; 3. China Construction Steel Structure Tianjin Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

*Corresponding author: huogewang@163.com

Abstract: Accelerating the intelligent upgrading of steel structure manufacturing and developing new construction methods are the key tasks to promote the high-quality development of the construction industry, and are also the main direction of advancing towards a manufacturing power. The manufacturing of steel building structures is a typical discrete manufacturing production mode, which has the characteristics of low standardization, small batches and diversity. At present, manually-assisted mechanized production is mostly used, and the manufacturing production mode is still relatively outdated. The difficulties in realizing the intelligence of steel structure manufacturing are mainly reflected in several aspects such as the low degree of intelligence in manufacturing equipment, traditional manufacturing techniques, and insufficient digitalization of production control. It is of great significance to study the key technical

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFC3801905), 深圳市科技计划资助项目(JSGG20220831110002004)

作者简介:

陈振明(1975—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要从事钢结构建造和智能制造方面的工作。

E-mail: chenzm@cscec.com。

通信作者:

王朋(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事智能制造及智能优化算法方面的工作。E-mail: huogewang@163.com。

issues of steel building structure manufacturing to realize building industrialization and intelligence. This paper conducts relevant research on the planning and design of the intelligent manufacturing production line of steel building structures, intelligent equipment and advanced manufacturing technology, and digital control of the production process. Moreover, the feasibility of the intelligent production line is technically verified through the digital twin model and the joint debugging and linkage test experiment of the micro production line. This study plays a very good application demonstration role in the design of steel structure intelligent production lines and the upgrading and transformation of existing production lines.

Keywords: steel building structure; intelligent manufacturing; advanced technology; intelligent equipment; digital control

国家住房和城乡建设部等9个部门于2020年联合印发了《智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》，指导推进建筑工业化、数字化、智能化升级，加快建造方式转变，推动建筑业高质量发展。钢结构建筑建造体系是实现建筑工业化、智能化的重要途径，也是当前国家主推的建造体系。数字化和智能化与建筑业深度融合，既是行业降本增效的有效手段，也是建筑业发展的重要研究方向。

我国钢结构企业数量较多，以小规模企业为主，市场集中度较低，钢结构行业规模前五名的公司所占的市场份额仅为5%左右。近几年宏观经济、疫情等外部环境的变化导致钢材原材料价格波动较大，加速了部分中小型钢结构企业的出清，预计行业技术标准、规范的逐渐完善将进一步促进市场集中度的提高。随着钢结构行业的不断发展，为了提高自身的影响力和竞争力，钢结构企业的数字化、智能化升级已刻不容缓。具备智能化优势的钢结构企业将在承接大型工程的制造和安装中持续积累智能化实施经验，并提升企业市场份额和知名度，引领行业的发展。

钢结构建筑的建造主要包含设计、制造和安装等过程，其中钢结构制造是钢结构建造中承前启后的关键环节。建筑钢结构制造属于典型的离散制造生产方式，钢结构构件具有形式复杂、种类多样、生产批量小、加工和装配精度不高等特点，目前多采用人工辅助的机械化生产方式，制造生产方式比较落后。传统的半自动半人工作业已经无法满足目前高精度、高效率、高柔性的生产要求。因此，基于工业机器人、制造装备和物流装备、智能工艺设计、数字化管控等先进制造技术的建筑钢结构智能制造新模式成为建筑钢结构制造的主要发展方向。

在数字化设计和钢结构全生命管理方面，许多专家学者开展了大量研究。贺明玄等^[1]阐述了BIM技术的概念及其应用场景，并指出了BIM技术在当前钢结构制造应用中的不足，重点描述了钢结构制造BIM信息在后续企业管理、加工生产、产品检验中的应用情况。CHEN等^[2]为解决制造过程信息流不够流畅的问题，通过开发钢结构制造BIM平台实现了钢结构工厂制造进度的可视化，该平台有助于管理者决策、工人检查质量问题等，

从而提高制造厂的管理效率。山西潇河建筑产业有限公司^[3]对建筑钢结构制造的数字化应用进行了探索，研究了BIM技术在钢结构智能制造中的深度应用，通过构建以钢结构建筑制造全过程信息流为主线的BIM协同平台，实现了BIM信息在钢结构专业设计软件和信息化管理平台之间的高效解析、利用及可视化展示，实现了对钢结构加工工艺信息、实时位置、质量监控信息及构件安装进度的实时掌控。MOURTZIS等^[4]提出了一种基于物联网的生产监控方法，该方法采集并分析钢结构制造数据以计算产品组装的复杂性，且重用数据来检索以往类似的订单，最后通过一个实例验证了该方法的有效性。SKRIKO等^[5]提出数字化生产的概念以指导钢结构焊接机器人生产、在线缺陷检测等环节，可以满足未来钢结构制造在安全性与降本增效方面的需求。

智能装备在钢结构的应用方面，也取得了不少研究成果。李雪飞等^[6]分析了焊接机器人的技术基础，并结合实际案例阐述了机器人技术(包括参数选择、编程方法与焊接工艺等)在建筑钢结构制造中的应用内容与方法，研究结果表明，与传统人工焊接相比，机器人焊接的效率更高、质量更优。于增广等^[7]研究了焊接机器人在钢结构预埋件制造中的实际应用，为我国钢结构制造行业制造方式的转型升级提供了方向，具有一定的借鉴意义。刘春波等^[8]针对建筑钢结构构件的特点，提出编程速度快、焊接工艺数据库丰富、零件和装配偏差的适应性高等是焊接机器人有效应用的保证，并指出现有焊接机器人已经具备成熟的接触传感与电弧跟踪功能，含有离线编程软件，已经具备在建筑钢结构构件中实现自动焊接的技术基础。戴为志等^[9]根据我国近几年焊接机器人的研究成果，详细地阐述了焊接机器人的应用历程及现状，深刻地论述了其技术内涵并揭示了焊接机器人技术的难点和重点，为焊接机器人技术的研究提供了可参考的意见和建议。任文建等^[10]对钢结构制造过程中的焊接机器人应用进行了研究，结果表明钢结构机器人焊接工作站的成功应用极大地提升了钢结构焊接的自动化程度，并且凭借焊接机器人的灵活性以及焊接的稳定性，大大提高了钢结构的焊接质量和效率。程淑萍等^[11]简述了我国建筑钢结构的发展过程及技术标准演变，重点介绍了

焊接机器人、喷涂机器人等智能设备及信息化管理系统在钢结构生产中的应用。虽然机器人在钢结构生产中得到了一些应用,但是应用效果并不明显,尚需进一步研究。

在钢结构制造的数字化管控方面,专家学者也开展了一些探索。高欢等^[12]针对离散型车间生产过程中物料信息可追溯性和实时性较差的问题,基于精益生产管理理念和数据实时采集技术,分析了车间生产物料转移过程并提出了一种基于RFID技术的数据采集方案,构建了系统的网络支撑体系,开发了一个面向生产过程的物料实时跟踪与管理系统,最终实现了对车间生产过程中物料信息的有效管理。樊华飞^[13]分析了当前数据采集与管理系统的研究与实施现状,并结合离散制造的特点设计了数据采集系统的框架。许祖锋等^[14]介绍了钢结构的智能制造过程,互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合,采用生产执行系统(manufacturing execution system, MES)作为生产过程的控制大脑,通过先进的软件系统和自动化设备,实现智能下料、智能配送以及后续各工序的自动化生产,该技术的应用提高了生产和管理效率,降低了成本,并在大量新建钢结构制造基地得到了广泛的应用。邓璠等^[15]针对大型钢结构制造企业在车间制造过程中的现状和不足,研究了MES在此类企业运用中的关键技术,构建了MES在此类企业中的应用模型;最后将MES应用于一家企业,实现了MES在大型钢结构制造企业车间制造过程中的有效应用。

综上所述,众多学者对建筑钢结构制造的智能化进行了探索并取得了一些研究成果。但是这些研究尚有如下不足:(1)当前建筑钢结构各关键工序加工工艺依然十分落后,对制造工艺的研究较少,改进工艺对智能化场景应用的适应性更强;(2)工业机器人在建筑钢结构制

造的某些工序得到了应用,如焊接机器人,但是工业机器人的柔性化和智能化程度不高,与人工相比效率提升不够明显,所以当前的生产主要采用的方式为人工配合自动化装备;(3)当前的数字化技术主要应用在一些工位的状态监控和数据的数字化展示上,建筑钢结构全流程的数字化管理和智能决策能力不足;(4)相关研究大多是对建筑钢结构制造的单元级或者工序级的智能化研究和应用,鲜有对建筑钢结构制造生产线的整线智能化研究。

实现钢结构制造智能化的难点主要体现在制造工艺较为传统、制造装备智能化程度低、生产管控数字化和整线成线能力不足等几个方面。通过对以上关键问题的研究,实现了关键工序智能化,制造全流程数字化,建成了世界首条重型H钢智能制造生产线,不仅为建筑钢结构智能制造的实施提供了示例,而且形成了一系列创新成果。

1 制造工序关键智能装备

1.1 制造全工序系列新型智能加工设备

研究了基于临界多边形的二维排样数学模型(式(1)~(2))和离散灰狼算法,并开发了智能套料软件,结合电容识别定位和远程集成控制等技术,实现了钢板的智能套料、寻位、切割、标识等。

排样问题目标函数如下:

$$f = \max \left[\frac{\sum_{i=1}^N (S_i)}{WH^*} \right] \quad (1)$$

式中: N 为零件数; S_i 为零件 i 的面积; H^* 为 N 个零件排放完毕后零件排样图的最大使用高度; W 为板材宽度。

排样问题约束条件如式(2)所示。

$$\text{s.t.} \begin{cases} \alpha_{ij}^{ke} (x_j - x_i) + \beta_{ij}^{ke} (y_j - y_i) \leq q_{ij}^{ke} + M(1 - u_{ij}^k), \sum_{k=1}^{k_{ij}} u_{ij}^k = 1 (1 \leq i \leq j \leq N) \\ \alpha_{Ri}^{ke} x_i + \beta_{Ri}^{ke} y_i \leq q_{Ri}^{ke} + M(1 - u_{Ri}^k), \sum_{k=1}^{k_{Ri}} u_{Ri}^k = 1 (i = 1, \dots, m) \\ x_i \geq 0, y_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_{ij}^{ke} 为定义第 k 个凸区域 \overline{NFP}_{ij}^k 的某边表达式 x 项系数; β_{ij}^{ke} 为定义第 k 个凸区域 \overline{NFP}_{ij}^k 的某边表达式 y 项系数; x_i 为零件 i 的参考点在板材上的 x 坐标, x_j 类似; y_i 为零件 i 的参考点在板材上的 y 坐标, y_j 类似; k_{Ri} 为多边形 \overline{IFP}_{ij} 分解成的凸区域的数量; q_{ij}^{ke} 为定义第 k 个凸区域 \overline{NFP}_{ij}^k 的某边表达式的常数项; k_{ij} 为多边形 \overline{NFP}_{ij} 分解成的凸区域的数量; e 定义为第 k 个凸区域的边数;如果零件 j 的参考点落入区域 \overline{NFP}_{ij}^k 之中时 u_{ij}^k 为1,否则 u_{ij}^k 为0;如果零件 i 的参考点落入区域 \overline{IFP}_{Ri}^k 之中时 u_{Ri}^k 为1,否则

u_{Ri}^k 为0。其中: \overline{NFP}_{ij} 为零件 i 和零件 j 形成的临界多边形, i 是固定多边形, j 是滑动多边形; \overline{IFP}_{Ri} 为零件 i 和板材 R 形成的内部临界多边形; \overline{NFP}_{ij} 为临界多边形 \overline{NFP}_{ij} 以外的区域; \overline{IFP}_{Ri} 为内部临界多边形 \overline{IFP}_{Ri} 以内的区域; \overline{NFP}_{ij}^k 为 \overline{NFP}_{ij} 区域中的第 k 个凸区域; \overline{IFP}_{Ri}^k 为 \overline{IFP}_{Ri} 区域中的第 k 个凸区域,临界多边形如图1所示。

通过离散灰狼算法对该数学模型进行求解,可以在较短时间内获得近似最优解,即获得板材利用率最高的下料方案。研制了首套非标准工件智能坡口切割单元,如图2所示。

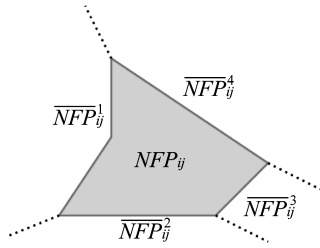


图1 临界多边形

Fig. 1 No-fit polygon



图2 智能坡口切割单元

Fig. 2 Intelligent bevel cutting unit

通过视觉传感器识别和定位工件,切割单元经插值处理和末端TCP姿态调整得到机器人切割轨迹,如图3所示,实现了机器人免编程高精度智能切割,切割效率提高了2倍。

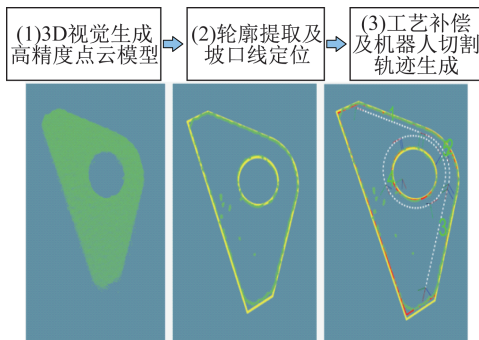


图3 切割轨迹生成

Fig. 3 Generation of cutting trajectory

基于电弧传感技术研制了焊缝识别系统,并结合自主开发的焊接工艺数据库,形成了根据坡口装配误差及焊接热变形自行调整焊接参数的机器人焊接自适应技术,在此基础上研制了适用于中厚钢板焊接的牛腿焊接机器人,如图4所示。

基于3D视觉定位和空间码垛算法,研制了柔性分拣搬运机器人,如图5所示。

基于路径规划算法、激光导航定位、仓储堆垛控制等技术,创新性地研制了以自动引导车和立体仓库为主的物流仓储装备,如图6所示。上述多种装备协同配合,实现了多品类、复杂场景下的“无人”分拣搬运和物流仓储作业,解决了人工劳动强度大、效率低、出错率高等问题。



图4 牛腿焊接机器人

Fig. 4 Bracket welding robot



图5 柔性分拣机器人

Fig. 5 Flexible sorting robot



图6 零件立体仓库

Fig. 6 Three-dimensional warehouse of parts

1.2 基于智能集成控制技术的下料、组焊矫及总装等的一体化工作站

基于多设备集成控制技术,研制了智能下料一体化工作站,如图7所示,并通过开发SCADA数据采集系统和集成管控平台,实现了信息高度集成、装备联动协作、全流程自动作业的一体化下料。



图7 智能下料工作站

Fig. 7 Intelligent blanking workstation

基于一体化输送、缓存和联动技术,实现了对组立、焊接、矫正3个孤立工序无生产间隙的最优化整合,并建成了卧式组焊矫一体化工作站,如图8所示。

基于C/S架构的参数化编程技术,根据工件参数自

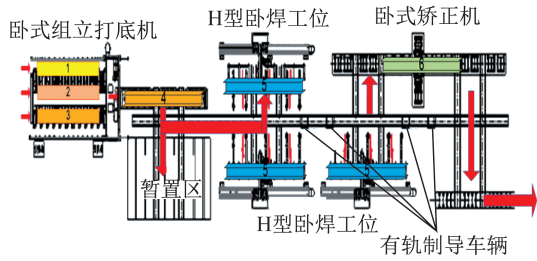


图8 卧式组焊矫工作站

Fig. 8 Horizontal assembly-welding-correction workstation

动生成机器人程序,建成了机器人总装焊接一体化工作站,极大地提高了车间焊接机器人的工作效率,如图9所示。



图9 总装焊接工作站

Fig. 9 Final assembly and welding workstation

1.3 建筑钢结构智能制造生产线

通过开展生产线模拟仿真实验,模拟工厂设施和物流布局,并采用最优化方法对生产线布局进行了优化,如图10所示。

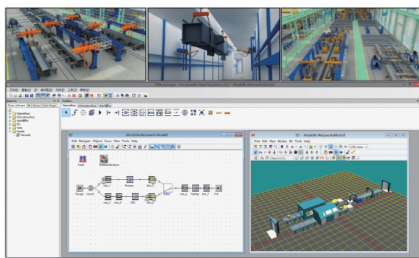


图10 生产线的数字孪生模型

Fig. 10 Digital twin model of production line

根据数字化、智能化的设计理念,设计了微型生产线,通过局部专项试验、制造场景模拟和联调联动测试,验证了产线设计的合理性,如图11所示。



图11 微型生产线可行性试验

Fig. 11 Feasibility test of micro production line

最终设计并装备了首条建筑钢结构智能制造生产线,如图12所示,解决了传统生产线工序衔接不紧密、工位无法满足自动化生产需求、智能化程度低的问题,实现了智能设备在85%的工序中联动运行,全面提升了钢结构制造效率和质量。



图12 智能制造生产线

Fig. 12 Intelligent manufacturing production line

2 先进制造工艺

2.1 钢结构集成下料工艺

对“无人”集成切割下料工艺进行研究,并开发了智能下料集成系统,如图13所示。将原有材料管理、起重吊装、工艺文件和作业任务管理、各类操作规程、零件记录与统计等环节进行集成,建设了集成系统中央控制室,人工作业量减少了87.5%,如图14所示。此外,对多头同步切割、快速喷墨标号等工艺进行了研究,建立了8~60 mm厚钢板专家切割数据库及零件喷墨分级标号方法,解决了钢板切割标识速度慢、人工标号出错率高等问题,对工人的需求量降低了60%,下料效率提高了20%。

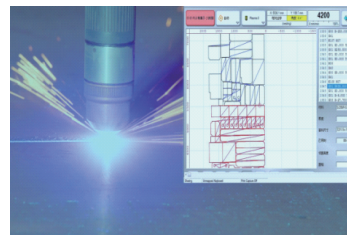


图13 智能切割下料系统

Fig. 13 Intelligent blanking system

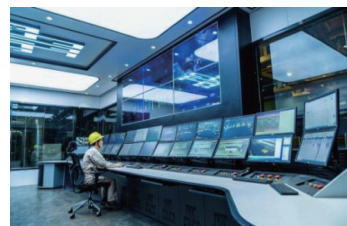


图14 集成系统中央控制室

Fig. 14 Central control room for integrated systems

2.2 钢结构卧式组焊矫一体化加工工艺

研发了H型钢构件卧式组立、焊接、矫正一体化加工

工艺,革新了传统立式工艺,形成了卧式方式下的组焊矫智能加工工艺。该工艺建立了6~35 mm厚腹板的卧式组焊矫工艺数据库,以及在不同规格钢板生产场景下翻转、顶升、对齐等装置的动力与钢板重量的匹配关系。同时开发了H型钢卧式生产管理系统,实现了设备互联与协同控制,与传统钢构件立式生产工效相比,人工操作步骤量减少了90%,效率提升了30%。

2.3 中厚板免清根全熔透机器人焊接工艺

开展了中厚板免清根全熔透机器人焊接工艺研究,如图15所示,对影响焊接质量的11种工艺参数进行了

焊接试验,探究了中厚板双侧坡口形状、角度、钝边、间隙等变量对机器人焊接根部熔透性的影响,建立了适用于8~40 mm板厚的机器人多层多道焊接参数专家数据库,实现了部品部件批量化的高效焊接。系统分析了工件类型、尺寸、附加节点形式(如过焊孔、加劲板等)、坡口参数、焊接间隙、焊接工艺参数6个变量对机器人轨迹、夹具动作、焊接姿态、起弧收弧位置的影响,开发了H型钢牛腿、H型钢总成、箱型打底、箱型总成4套参数化编程系统,实现了输入工件尺寸即可自动完成母程序、子程序、数据库的匹配组合与程序输出,显著提高了编程效率。

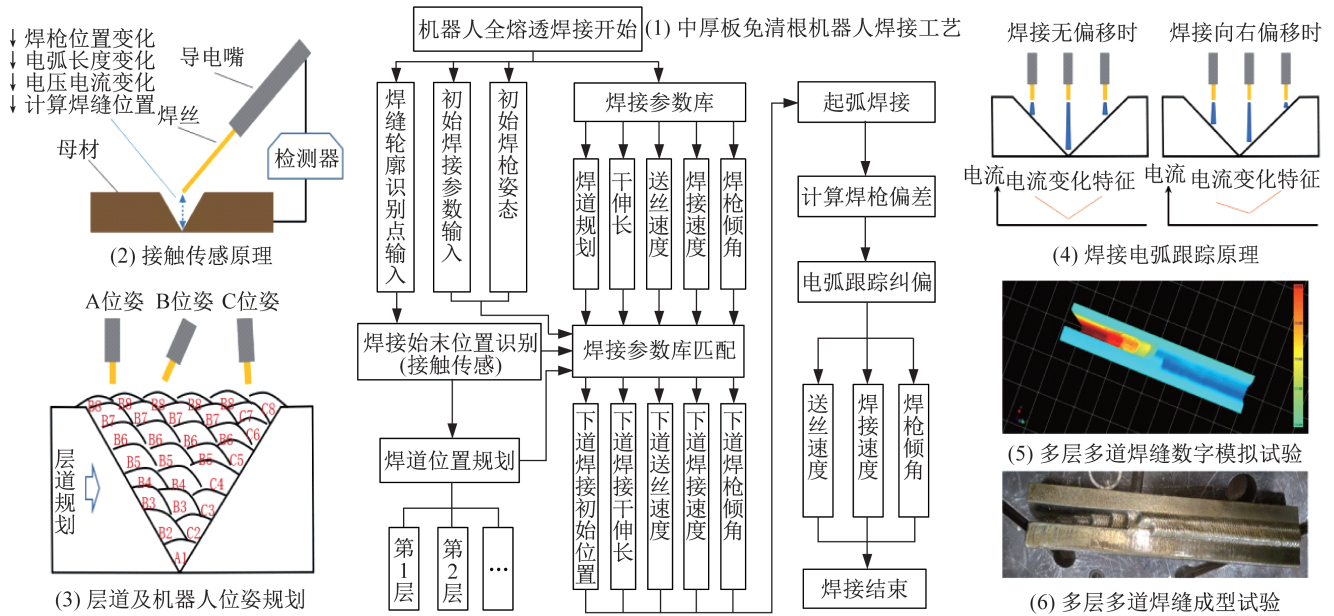


图15 免清根全熔透焊接工艺及原理

Fig. 15 Cleaning-free full-penetration robot welding process and principle

3 数字化管控技术

3.1 钢结构生产线信息集成技术

通过集成各种主流工业协议,实现了不同类型设备终端的高效数据采集和低延时传输,如图16所示。

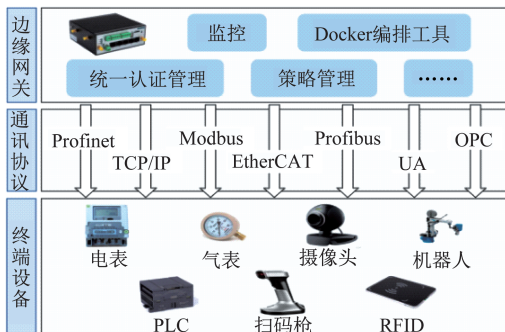


图16 多终端类型数据采集

Fig. 16 Multi-terminal data collection

设计了面向钢结构生产线承载网的工业PON系统,该系统包括汇聚设备OLT、无源分光器、PON系统接入设备ONU,采用单点到多点结构和无源光纤传输,适应各种智能设备信息传送,实现了生产基础数据传输的低延时和高可靠性,如图17所示。

3.2 钢结构精益管理制造执行系统

对制造执行系统及管控一体化关键技术进行了研究,具体包括数据实时采集和监控技术与生产过程管理技术,并在此基础上完成了管控一体化平台的构建,如图18所示。数据实时采集和监控技术通过在生产现场布置专用设备(PDA智能手机、LED生产看板、条码采集器、RFID系统等),对从原材料上线到成品入库的生产过程进行实时数据采集、控制和监控。生产过程管理技术通过过程管理、产品追踪、物料管理、设备管理、质量管理等

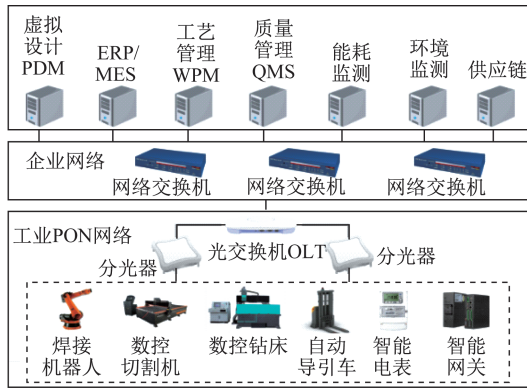


图 17 智能车间生产信息系统

Fig. 17 Production information network of intelligent workshop

功能模块,监控生产过程并实时将生产结果、人员响应情况、设备状态、库存和质量状况等反馈到 BIM 系统,实现可视化生产和对生产过程的监控,通过对比分析现场生产执行情况与生产计划,向管理者提供决策依据,提高了生产管理行为的颗粒度和时效性,实现了钢结构制造车间全过程的数字化管控。



图 18 精益制造管理系统平台

Fig. 18 Lean manufacturing management system platform

3.3 构建了面向钢结构制造的工业互联网大数据分析与应用平台

构建了工业互联网的数据体系,如图 19 所示,汇聚设备运行数据和业务系统(包括 BIM 系统、业财系统、能像系统、下料集成系统等)运营数据,通过数据建模、存储和处理为数据分析、应用开发以及可视化展示提供核心支撑。基于数字孪生技术建立了钢结构智能生产线设备数字孪生模型,如图 20 所示,实现了物理设备参数与数字设备孪生模型参数的实时交互映射。

开发了面向钢结构制造的首个工业互联网大数据分析与应用平台,如图 21 所示,形成基于状态感知、实时分析、科学决策、精准执行的信息物理系统闭环,以实时数据为基础,按照项目成本精细化管理、产线成本优化、设备工艺参数优化、设备易损件管理 4 个维度进行工业大

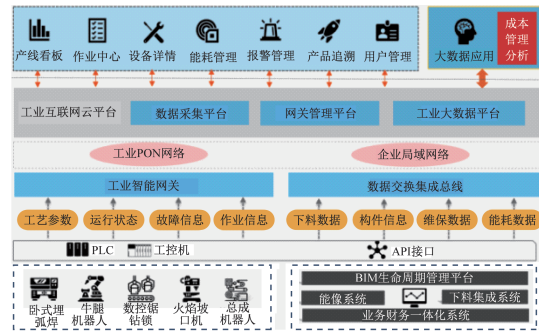


图 19 工业互联网数据功能架构

Fig. 19 Data architecture of industrial internet

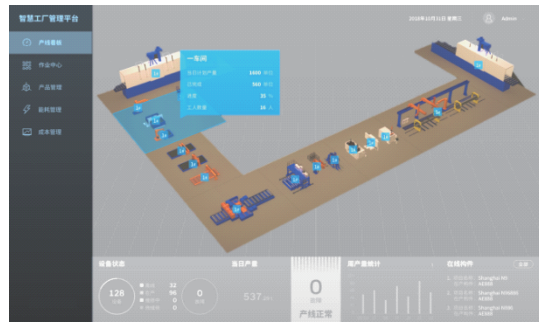


图 20 智慧工厂数字孪生模型

Fig. 20 Digital twin model of smart factory

数据的应用。通过数理统计、人工智能算法等方法,清晰地呈现不同维度的生产成本,并给出具体的优化管理策略,实现数据驱动下制造资源的高效精准配置,制造决策效率提升了 5 倍。



图 21 数字工厂工业互联网平台

Fig. 21 Industrial internet platform for digital factory

4 结语与展望

本文以解决工程实际问题为导向开展对关键技术的研究,形成了建筑钢结构智能制造关键装备、先进工艺及数字化技术 3 个方面的创新成果,有效解决了钢结构智能制造过程中遇到的诸多技术难题,研究成果成功应用于 100 多项国内外大型实际工程及多个钢结构制造企业生产线智能化升级改造项目中,取得了显著的社会经济效益。

虽然国家出台了大量政策支持建筑工业化、智能制造,但是由于建筑行业尤其是建筑钢结构制造行业的特殊性,其自动化、智能化程度一直远远落后于其他行业的自动化、智能化程度。为了提升建筑钢结构的智能制造水平,需要持续对以下3个方面进行研究:

(1) 制造工艺:需要对各工序和整线的制造工艺进行深入研究,使其更好地应用于智能装备和数字化技术,如采用激光切割、智能加工中心、智能焊接机器人等先进制造工艺。

(2) 智能装备:需要加强对各工序智能装备的应用研究,如切割机器人、搬运机器人、焊接机器人、喷涂机器人等,提高智能装备的智能化和柔性,进一步提高生产效率。

(3) 数字化技术:建筑钢结构的智能制造需要对数字孪生、建模与仿真技术、智能调度、工业互联网平台等技术进行深入研究,进一步提高全流程的数字化管控和智能决策能力。

为了进一步改进提升建筑钢结构行业的工业化水平,未来我国建筑钢结构发展还需关注以下两点:一是提高钢结构构件的标准化水平,减少加工环节和降低加工复杂度;二是加强专业化设计团队建设,建立多层次专业人才培养体系和满足市场需求的专业人才队伍,加强对专业设计人员的培养和再教育。

参考文献:

- [1] 贺明玄,沈峰.基于BIM的钢结构数字化制造[C]//2014中国钢结构行业大会论文集.南京:中国钢结构协会,2014.
HE Mingxuan, SHEN Feng. Digital manufacturing of steel structures based on BIM [C]// Proceedings of the 2014 China Steel Structure Industry Conference. Nanjing: China Steel Construction Society, 2014. (in Chinese)
- [2] CHEN S X, WU J, SHI J L. A BIM platform for the manufacture of prefabricated steel structure [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8038. DOI: 10.3390/app10228038.
- [3] 王浩宇. BIM信息化平台在钢结构智能制造中的应用[C]//2022年全国建筑钢结构科技创新大会论文集.北京:中国建筑金属结构协会, 2022.
WANG Haoyu. Application of BIM information platform in intelligent manufacturing of steel structures [C]// Proceedings of the 2022 National Building Steel Structure Science and Technology Innovation Conference. Beijing: China Construction Metal Structure Association, 2022. (in Chinese)
- [4] MOURTZIS D, MILAS N, VLACHOU K, et al. Digital transformation of structural steel manufacturing enabled by IoT-based monitoring and knowledge reuse [C]// Proceedings of 2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Thessaloniki: IEEE, 2018.
- [5] SKRIKO T, AHOLA A, BJÖRK T. Overview on the digitized production of welded steel structures [J]. Welding in the World, 2022, 66(4): 799-813. DOI: 10.1007/s40194-021-01224-x.
- [6] 李雪飞,郑娟.焊接机器人在建筑钢结构制造中的应用探究[J]. 科学技术创新, 2021(3): 127-128.
LI Xuefei, ZHENG Juan. Application of welding robot in building steel structure manufacturing [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(3): 127-128. (in Chinese)
- [7] 于增广,谢成利,周创佳,等.焊接机器人在钢结构预埋件制造中的应用性研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(9): 180-182. DOI: 10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2018.09.054.
YU Zengguang, XIE Chengli, ZHOU Chuangjia, et al. Research on application of welding robot in fabrication of steel structure embedded parts [J]. Welding Technology, 2018, 47(9): 180-182. DOI: 10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2018.09.054. (in Chinese)
- [8] 刘春波,贺明玄.焊接机器人在建筑钢结构制造中的应用[G]. 钢结构建筑工业化与新技术应用 专题资料汇编.北京:中国建筑工业出版社, 2016.
LIU Chunbo, HE Mingxuan. Application of Welding Robots in the Manufacturing of Building Steel Structures [G]. Compilation of Special Materials on the Industrialization of Steel Structure Buildings and the Application of New Technologies. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 戴为志,俞海涛,王继文.钢结构焊接机器人的现状及发展方向[J]. 金属加工(热加工), 2021(12): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-165X.2021.12.002.
DAI Weizhi, YU Haitao, WANG Jiwen. Current status and development direction of welding robots for steel structures [J]. MW Metal Forming, 2021(12): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-165X.2021.12.002. (in Chinese)
- [10] 任文建,李朋,李柱良.机器人焊接在钢结构生产制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2020(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1674-165X.2020.01.002.
REN Wenjian, LI Peng, LI Zhuliang. Robot welding applied in the manufacturing process of steel structure [J]. MW Metal Forming, 2020(1): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1674-165X.2020.01.002. (in Chinese)
- [11] 程淑萍,田瑞斌,姜殿忠,等.浅谈建筑钢结构制造技术的演变[J]. 建筑机械化, 2022, 43(6): 45-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1366.2022.06.012.
CHENG Shuping, TIAN Ruibin, JIANG Dianzhong, et al.

- Talking about the evolution of building steel structure manufacturing technology[J]. Construction Mechanization, 2022, 43(6): 45-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1366.2022.06.012. (in Chinese)
- [12] 高欢, 王少华, 张亮星. 离散型车间生产过程中的物料实时跟踪与管理[J]. 机械设计与制造, 2018(5): 269-272. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2018.05.079.
- GAO Huan, WANG Shaohua, ZHANG Liangxing. Real-time tracking and management of materials in manufacturing process of discrete workshop [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(5): 269-272. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2018.05.079. (in Chinese)
- [13] 樊华飞. 离散制造车间生产数据采集与管理系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- FAN Huafei. Design and implementation of production data acquisition and management system in discrete manufacturing workshop [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 许祖锋, 姜友荣, 汪勇东. 钢结构智能化生产设备及MES执行系统应用技术[J]. 四川建筑, 2021, 41(增刊1): 127-128, 132.
- XU Zufeng, JIANG Yourong, WANG Yongdong. Intelligent production equipment of steel structure and application technology of MES execution system [J]. Sichuan Architecture, 2021, 41(Suppl.1): 127-128, 132. (in Chinese)
- [15] 邓璿, 樊欣星, 曲永冬, 等. MES在大型钢结构制造过程中的应用[J]. 科技传播, 2016, 8(18): 218-219. DOI: 10.16607/j.cnki.1674-6708.2016.18.139.
- DENG Jin, FAN Xinxing, QU Yongdong, et al. Application of MES in manufacturing process of large steel structure [J]. Public Communication of Science & Technology, 2016, 8(18): 218-219. DOI: 10.16607/j.cnki.1674-6708.2016.18.139. (in Chinese)