 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i1.8969

Design and manufacturing of automated production lines for lightweight steel components of prefabricated steel structure residences

Shu Liu Chuangjia Zhou Yuanan Huang Junsheng Li

China Construction Steel Structure Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

this paper designs and develops an automated production line for lightweight steel components (H-shaped steel and rectangular tubes) used in prefabricated steel structure residential buildings.It integrates core equipment including a heavy-duty laser tube cutting machine, a final assembly robotic welding workstation, a collaborative robotic welding cluster, automated storage racks, and RGV/AGV transportation systems, the production line achieves device coordination and data integration through an industrial internet platform,achieving full-process automation from raw material feeding to finished component output. resulting in 100% automation rate for key processes. This has led to a 50% reduction in manual labor while increasing production efficiency by 40% and reducing costs by 30%.

Keywords

Prefabricated Steel Structure; Automated Production Line; Robotic Welding; Production Line Balancing; Industrial Internet

装配式钢结构住宅轻型钢构件自动化生产线的设计和制造

刘曙 周创佳 黄远安 李俊声

中建钢构股份有限公司，中国·广东 深圳 518000

摘 要

本文设计并研发了一条用于装配式钢结构住宅轻型钢构件（H型钢与矩形管）的自动化生产线，集成了重载激光切管机、总成焊接机器人工作站、协作焊接机器人集群、自动化立库及RGV/AGV运输系统等核心设备，通过工业互联网平台实现设备协同与数据贯通，实现了从原材料上料到构件成品出库的全流程自动化。使关键工序自动化率达到100%，在减少人工50%的同时，生产效率提升40%，成本降低30%。

关键词

装配式钢结构；自动化生产线；机器人焊接；生产线平衡；工业互联网

1 引言

2022 年 1 月 25 日，住建部印发《“十四五”建筑业发展规划》明确提出发展智能建造、推广装配式建筑的重要任务。随着国家及各地政府积极促进装配式建筑发展，推进装配式建筑项目落地，我国新增装配式建筑规模不断扩大。据住建部统计，全国每年新开工装配式建筑面积已由 2018 年的 2.9 亿平方米增加至 2022 年的 8.1 亿平方米。2022 年 6 月，住建部会同国家发改委印发《城乡建设领域碳达峰实施方案》，提出“大力发展装配式建筑，推广钢结构住宅，到 2030 年装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到 40% 以上”。

随着国内钢结构制作人工成本大幅增加，国内外钢结构企业相继对钢结构制作生产线进行自动化研究，如奥地利维克多集团的钢结构制作厂实现 BIM 模型数据直接转换为设备可读的加工代码，驱动数控机床和机器人；日本竹中工务店的钢结构制作厂实现多台焊接机器人通过中央系统协同，完成超大型复杂节点的焊接；中建钢构股份有限公司的钢结构制作厂为国家工信部智能制造示范项目，广泛应用焊接机器人集群，建立了工厂级的数字孪生系统，实现生产全过程透明化管理。

2 自动化生产线

装配式钢结构住宅轻型钢构件和节点自动化生产线方案设计原则采用物流简化原则、工艺布置原则、可持续原则、

【基金项目】中建科工集团有限公司科技研发项目（项目编号：ZJKG-2025-KT-01）。

【作者简介】刘曙（1976-），男，中国湖南耒阳人，博士，正高级工程师，从事结构工程研究。

柔性重构原则、经济型原则和生产安全原则。生产线长 261 米，宽 24 米，包括原材料堆场、AGV 上料区、余料对接工作站、原材料立库、RGV 子母车、激光型材切割机、移钢机、半成品立库、变位机、总成焊接机器人工作站、协作焊接机器人集群、三维激光扫描仪、打砂房。适用于成品矩形钢管、H 型钢制作。自动化生产线产线布局方案见图 1。

3 自动化生产线工艺流程

自动化生产线主要设备包括：1 台激光切管机、6 台协作焊接机器人、1 个原材料立库、6 台 RGV 子母车、1 个移钢机、2 台翻转机、6 个自动焊接工作站，、1 台 8 吨行车、2 台 5 吨行车和 2 台激光扫描仪。

自动化生产线工作流程：平板车将 H 型和矩形型材钢构件运进厂房，用 5 吨吊车将 H 型和矩形型材钢构件吊到原材料堆场，需要加工的 H 型和矩形型材钢构件吊装到原材料立库，RGV 子母车将需要加工的 H 型和矩形型材钢构件运至激光型材切割机进行切割，RGV 子母车将切割好的 H 型和矩形型材钢构件半成品运至半成品立库，RGV 子母车将不需要二次加工的 H 型和矩形型材钢构件运至移钢机，由移钢机运至输出辊道，由输出辊道运至打磨和报验区，RGV 子母车将激光型材切割机切割的 H 型和矩形型材钢构件余料运至余料胎架，由 5 吨吊车将 H 型和矩形型材钢构件余料运至余料对接工作站进行对接。平板车将筋板和钢牛腿运至 AGV 上料区，由 AGV 运输筋板和钢牛腿。RGV 子母车从半成品立库提取 H 型和矩形型材钢构件半成品运至总成焊接机器人工作站，AGV 从 AGV 上料区运输筋板至总成焊接机器人工作站，进行 H 型和矩形型材钢构件筋板的组装和焊接。RGV 子母车从总成焊接机器人工作站提取 H 型和矩形型材钢构件半成品运至协作焊接机器人工作站，AGV 从 AGV 上料区运输钢牛腿至协作焊接机器人工作站，进行 H 型和矩形型材钢构件钢牛腿的组装和焊接。吊车将焊接完成的 H 型和矩形型材钢构件运至打磨和报验区进行打磨和验收，吊车将验收合格的 H 型和矩形型材钢构件运至打砂房进行打砂，吊车将打砂完成的 H 型和矩形型材钢构件运至成品缓存区，后运至喷涂车间进行 H 型和矩形型材钢构件喷涂。

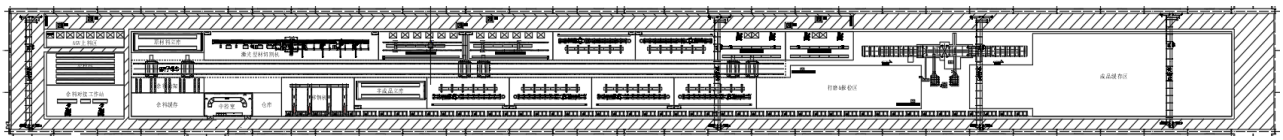


图 1 自动化生产线产线布局图

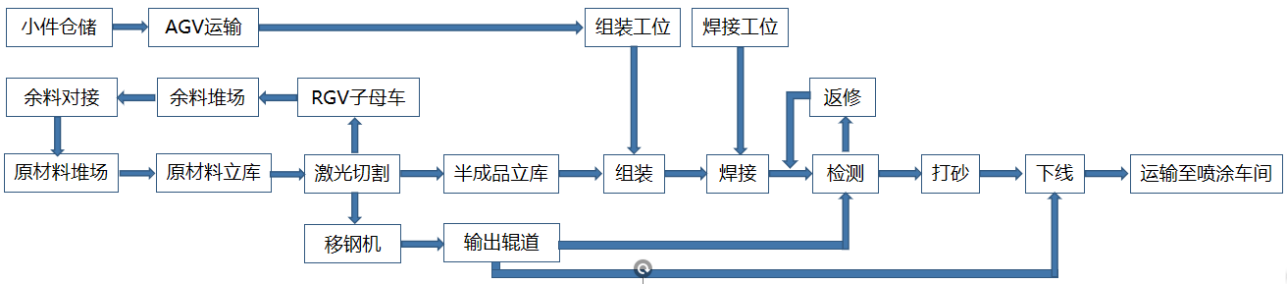


图 2 自动化生产线工艺流程图

4 自动化生产线主要设备的技术特性

4.1 重载型光纤激光切管机

重载型光纤激光切管机采用 P5 型号，激光功率为 20000W，为三卡盘结构。设备参数见表 1。

4.2 总成机器人焊接工作站

4.2.1 系统构成

总成机器人焊接工作站系统构成见表 2.

表 1 重载型光纤激光切管机设备参数表

名称	切割范围及参数	
管材加工范围	正方管：□ 40mm- □ 500mm 矩形管：边长≥ 40mmY，对角线≤ 520mm 工字钢 X8#-40#	国标管材
单根管材最大重量	2000kg	每米≤ 166Kg
标准最大加工长度	≤ 12500mm	
标准最大下料长度	≤ 12000mm	
尾料长度	0mm	在工艺排版合理的情况下实现
精度		

续表 1

名称	切割范围及参数	
X、Y 轴定位精度	±0.05mm/m	
X、Y 轴重复定位精度	±0.03mm	
速度		
最大空转速度	30r/min	随着管材重量增加空行
最大空运行进给速度	40m/min	程运动参数须相应降低
电源参数		
相数	3	
电源额定电压	380V	
频率	50Hz	

表 2 总成机器人焊接工作站系统构成表

名 称	规 格	数 量
焊接机器人	ARCMAN-MP	2
焊接电源	SENSARC-AB500	2
送丝装置	推拉丝型	2
单丝焊枪	RTW502-LL-S300	2
清枪、剪丝装置	BRG-2-ES-DAE	2
冷却水循环器	YX-09KGC1HGV	2
移动装置	THHV-252800150ESH	2
一轴变位机	R1-20000E-9S	2
夹具	非标自动夹紧	2
移动升降小车	非标	4
降压变压器	TRANS-30	3
护栏	1.8m 高防弧光	1

4.2.2 设备加工件参数

1、加工件名称：H 型和箱型工件总成焊接

2、工件规格

H 主梁 / 柱尺寸范围（高宽）：300×200mm-1250×600mm；

H 主梁 / 柱长度：4000mm-12000mm

H 主梁 / 柱截面：H 型

焊接牛腿长度：≤ 1000mm

工件回转直径：≤ 2800mm

焊接工件重量：≤ 10T；

箱型尺寸范围（高宽）：300×300mm-1200×1200mm；

箱型长度：4000mm-12000mm

箱型截面：矩形

焊接牛腿长度：≤ 1000mm

工件回转直径：≤ 2800mm

工件回转中心距地面：1000mm

焊接工件重量：≤ 20T

3、组对情况：

点焊点位置基本固定，焊点焊角高小于 3mm。如大于 3mm，将会影响焊缝外观成型。组对间隙应小于 2mm，当间隙大于 2mm 时应该手工补焊，补焊焊缝均匀，两端过渡平滑。

4、焊接部位：主要为牛腿与柱身的连接焊缝，牛腿焊缝以及加劲板焊缝；

5、焊缝形式：角焊缝，单 V 垫板全熔透，K 型全熔透；

坡口加工面进行必要打磨，一致性好；坡口加工后无钝边，组对间隙满足全熔透焊接要求；单边 V 型坡口角度 45 度；K 型坡口三分之一板厚 50 度，三分之二板厚 40 度。

6、焊缝条件

焊接条件：熔化极气体保护焊 (80%Ar+20%CO2)

焊接姿态：横焊、船型焊、水平焊

焊丝直径：1.2mm

4.3 协作焊接机器人工作站

4.3.1 设备构成

1、总体结构及其工作原理、工作特性

设备占地：960*650*1200mm。

系统构成由机器人控制系统、软件控制系统、焊接控制系统构成。

硬件构成由焊枪、机器人、送丝机、手推车、手持操作平板、控制柜、焊机等部分组成。

2、主要部件作用及其工作原理

机器人控制系统：主要负责示教点位保存、运功路径计算、碰撞检测、IO 交互等。

软件控制系统：负责记录示教点位、选择焊接工艺、监控焊接过程、点动移动机器人等。

焊接控制系统：负责电流电压设置、收弧延时、焊接控制方法设置等。

4.3.2 设备参数

协作焊接机器人工作站设备参数见表 3。

表 3 协作焊接机器人工作站设备参数表

项目	电压	功率
总功率	3 相 380V	18KW
整机重量	约 260kg	
外形尺寸（L×W×H）	1100mm*780mm*1460mm	

5 自动化生产线生产节拍分析

5.1 典型构件基本信息

选取装配式钢结构住宅项目三种构件，1 号构件截面：BH350*150*8*16，长 6 米、重 0.4 吨，2 号构件截

面：RHS160*500*12，长 2 米、重 0.58 吨，3 号构件截面 RHS160*500*20，长 9 米、重 1.9 吨。构件截面信息见表 3.2。

5.2 单位工程节拍计算

单位工程节拍计算见表 5。

5.3 工序节拍计算

工序节拍计算见表 6。

6 自动化生产线产能计算

6.1 工序产能计算

自动化生产线工序产能计算见表 7。

6.2 年产能计算

自动化生产线年产能计算见表 8。

综合 3 种钢构件，从自动化生产线产能数据分析，装配式钢结构自动化生产线平均产能约 1.75 万吨。

表 4 构件信息表

构件编号	构件重量（kg）	切割厚度 1（mm）	切割 1 长度（mm）	切割厚度 2（mm）	切割 2 长度（mm）	切割厚度 3（mm）	切割 3 长度（mm）	切割孔径（mm）	孔数量（个）	待装配小件数量（个）	平角焊缝总长度（共 4 个方向之和）（mm)	立角焊缝总长度（共 4 个方向之和）（mm）
1	400	8	150	16	350	8	150	4Φ22	4	10	3500	1500
2	580	12	1320	/	/	/	/	/	/	10	2500	/
3	1900	20	1320	/	/	/	/	/	/	32	8000	/

表 5 单位工程节拍（min）计算表

构件编号	原材料立库	激光切割	半成品仓储	自动组装	自动焊接	协作焊接	打砂
1	2	8	2	21	37	19	25
2	2	8	2	21	20	29	25
3	2	8	2	56	34	38	25

表 6 工序节拍（min）计算表

构件编号	原材料立库	激光切割	半成品仓储	自动组装（2 个工位）	自动焊接（6 个工位）	协作焊接（2 个工位）	打砂
1	2	8	2	11	6	9	25
2	2	8	2	11	3	14	25
3	2	8	2	28	6	19	25

表 7 工序年产能（吨）计算表

构件编号	构件重量（kg）	激光切割	自动组装	自动焊接	协作焊接	打砂
1	400	17181	13417	22937	15206	11405
2	580	24935	19455	63333	14506	16537
3	1900	79744	24347	118916	35215	27086

表 8 自动化生产线年产能（吨）计算表

构件编号	1	2	3
产能（吨）	11405	14506	24347
占比	30%	30%	40%
综合产能（吨）	17512		

7 自动化生产线生产平衡分析

自动化生产线平衡主要通过平衡率（P）、平衡损失率（D）和平滑性指数（SI）三个指标来进行衡量。生产线平衡率反映的是生产线工作负载的均衡程度。生产线平衡损失率反映的是生产线中因工位工作时间不平衡而导致的效率损失程度。生产线平滑指数反映的是生产线中各工作站之间工作时间的偏离程度。 自动化生产线 1 号、2 号和 3 号构件平衡分析见表 9。

表 9 自动化生产线平衡分析计算表

构件编号	1	2	3
平衡率（P）	86.7%	84%	80.3%
平衡损失率（D）	13%	16%	19.7%
平滑性指数（SI）	5.89	4.76	8.27

通过以上计算结果，可以得出自动化生产线平衡的结论如下：

1、该自动化生产线 1 号、2 号和 3 号构件的生产线平

衡率为 86.7%、84% 和 80.3%，生产线平衡率较好，表明其在作业分配上较为均衡。

2、该自动化生产线 1 号、2 号和 3 号构件的平衡损失率为 13%、16% 和 19.7%，根据表 2.1 生产线平衡损失率评价表得知该生产线平衡损失率为较为均衡，说明该生产线的时间损失较为均衡。

3、该自动化生产线 1 号、2 号和 3 号构件的生产线平滑指数为 5.89、4.76 和 8.27，可以得出生产线平滑指数较小，表明该自动化生产线各工作站时间分布相对均匀，工位的作业负载分配较为均衡。

8 工业互联网平台

基于海量 OT 数据资源，通过 OT 与 IT 数据融合，构建 1+1+N 的工业互联网平台应用服务体系，即：1 个连接通道（工业数据采集、协议标准化、数据聚合）+1 个智能基座（工业互联网平台，数据 + 算力 + 模型 + 应用组件）+N 个智慧应用。

工业互联网平台主要功能架构包括设备建模、数据融合、数据计算、报警中心、数据订阅、消息提醒等。

设备建模能力是将物理空间的实体进行数字化，通过接入设备的运行状态、能耗、振动温度等数据，构建物模型和设备实例（包括实体的属性、指令和报警等信息），实现设备在工业互联网平台上的数据对应。

数据融合是通过数据接入完成 OT 数据采集，通过数据集成服务实现 IT 业务系统及其他数据采集，深度挖掘数据价值。

工业互联网平台提供流批一体计算低代码可视化开发工具，可以快速构建融合实时数据和业务数据的计算任务。具备分钟级指标计算、流批一体、基于 SQL 语句低代码、计算任务部署流程简单、对接灵活的特点。

报警中心是基于模型，实现对工业设备进行报 警规则设置的功能，可以对业务及设备数据的异常情况进行报警及预警，以便运维人员尽快响应。

9 结论

（1）研发了装配式钢结构住宅轻型钢构件和节点自动化生产线，实现激光切割设备、自动组装设备，机器人焊接工作站，自动检测、AGV、RGV 等设备的协同控制，形成装配式钢结构住宅轻型钢构件和节点自动化生产线解决方案，实现全工序自动化设备的协同控制，在切割、焊接等关键工序自动化率达 100%，减少人工 50%，提升生产效率 40%，降低成本 30%，为装配式轻型钢构件自动化生产线提供可实施方案。

（2）通过装配式钢结构自动化生产线平衡计算，自动化生产线平衡率较好，表明其在作业分配上较为均衡；自动化生产线平衡损失率为较为均衡，说明该生产线的时间损失较为均衡；自动化生产线 平滑指数较小，表明该自动化生产线各工作站时间分布相对均匀，工位的作业负载分配较为均衡。

（3）装配式钢结构自动化生产线通过工业互联网平台进行统一运营，实现 BIM 数据直达机械设备。

参考文献

[1] 罗文辉，朱雄伟，史树波。中轻型焊接H型钢自动生产线的设计和制造。焊接技术，2001，30（5）：30-33。

[2] 潘玉琴。YH公司A产品生产线平衡优化研究[D]。山东：山东理工大学，2024。

[3] 梁全，王大勇，李怀蒋，王红丽。焊接H型钢自动化生产线技术及应用。控制系统，2006,22（1-1）：70-72。

[4] 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。建筑工业化，2021,41:127-132。