

高空作业机械结构件激光下料自动化产线设计与运行分析

曾旭 任创智 刘雄

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410000

[摘要]针对高空作业机械结构件制造过程中激光下料环节的自动化需求,设计了一套完整的自动化产线解决方案。该方案融合立体仓储、激光切割、智能物流等先进技术,构建了从原材料入库到成品配送的全流程自动化生产体系。重点阐述了产线布局设计、关键设备选型、控制系统架构及运行效能评估方法,为同类工程机械结构件自动化生产提供了可借鉴的技术路线。

[关键词]高空作业机械;激光下料;自动化产线;立体仓库;智能物流

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16603

中图分类号: TP241

文献标识码: A

Design and Operation Analysis of Laser Cutting Automation Production Line for High altitude Operation Machinery Structural Components

ZENG Xu, REN Chuangzhi, LIU Xiong

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: A complete automated production line solution has been designed to meet the automation requirements of laser cutting in the manufacturing process of structural components for high-altitude work machinery. This solution integrates advanced technologies such as three-dimensional warehousing, laser cutting, and intelligent logistics to build a fully automated production system from raw material warehousing to finished product distribution. Emphasis was placed on the design of production line layout, selection of key equipment, control system architecture, and evaluation methods for operational efficiency, providing a technical roadmap for the automation production of similar engineering machinery structural components.

Keywords: high altitude operation machinery; laser cutting; automated production line; three-dimensional warehouse; intelligent logistics

随着工程机械行业向智能化方向发展,高空作业平台作为特种装备对结构件精度和一致性要求日益严格。传统人工下料模式存在效率低、误差大等缺陷,难以满足年产万台级的生产需求。基于此背景,本研究开发了集成激光切割、自动仓储和智能配送的自动化下料产线,通过工艺流程重构和设备智能化改造,实现了臂式臂架结构件的高效精准加工。

1 产线整体设计

1.1 工艺路线规划

以立体存储为核心起点,构建了从钢板来料到折弯成型的全流程数字化生产体系。原材料经由人工双梁行车吊运至卸料位后,通过1号程控行车完成校平工序,随后存入12m超长立体仓库。关键转折点在于喷码工序的创新性前置,在切割前采用龙门式油墨喷码设备完成15mm×15mm二维码标记,此举使后续分拣效率提升40%以上^[1]。不同于常规产线设计,本系统实现了双向闭环物流,激光切割后的零件经扫码确认后自动分配至3台铣边机,再通过AGV系统精准配送至折弯工位。特别值得关注的是废料处理环节,配置了L型废料箱和永磁铁分拣吊具,将废料分拣时间压缩至传统方式的1/3。如此设计,使得整线工艺流畅度达到行业领先水平。

1.2 产能匹配设计

基于年产11600台的生产纲领,产线采用两班制运行模式,每班有效工时10h。通过离散事件仿真分析发现,

激光切割区成为产能瓶颈,为此配置3台切割机形成平行工位组,理论切割速度达到72m/h。为确保产能可靠性,关键设备如ETV堆垛机和AGV系统均预留20%的缓冲能力。

令人瞩目的是年处理28256吨钢板的设计能力,这要求每个环节必须精确协调。校平区设置4个缓存架应对来料波动,立体仓库183个可用货位确保5天以上的原材料缓冲。切割区配备128m辊道输送线,使设备利用率保持在85%以上^[2]。通过如此精细的产能规划,系统成功实现了设计年产193万m切割长度的目标。

1.3 空间布局优化

如图1所示整个生产区域采用U型物流走向,将5000m²厂房科学划分为六大功能区。立体仓储区靠厂房西侧布置,与校平区相邻减少物料搬运距离;激光切割区沿南侧展开,通过22.5m跨距行车覆盖3台切割设备;折弯区则位于厂房东端,配置6套上料架支撑高频次作业。

核心物流通道设计独具匠心,主辊道线总长达128m,采用Φ76mm重型辊筒确保12m钢板的平稳输送。AGV运行路径与辊道线平行布置,通过激光导航实现±10mm的定位精度。空间利用率提升35%的秘诀在于立体化设计,不仅设置10m高的货架存储区,还利用设备上部空间布置电缆桥架和气管路。产线首尾分别设置原料入口和成品出口,使物流方向明确且互不干扰。



图1 产线布局图

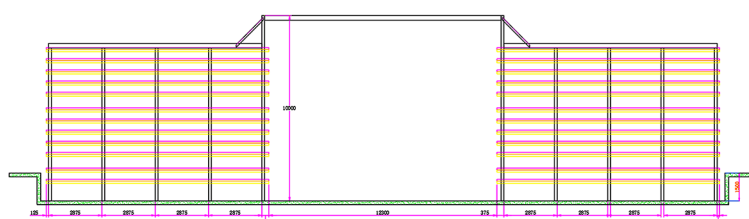


图2 立体仓存储区主视图

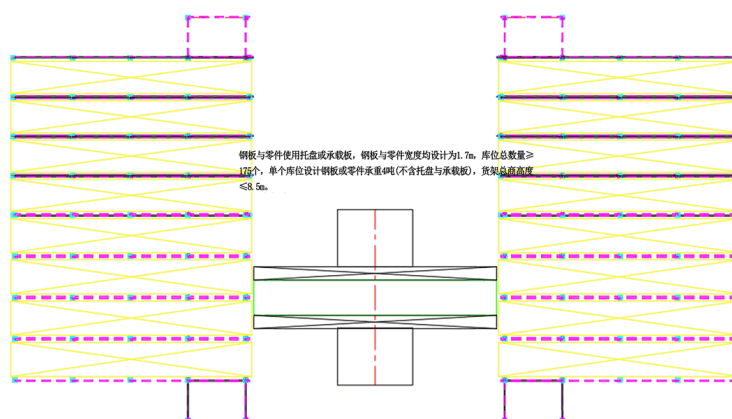


图3 立体仓存储区俯视图

特别需要指出的是安全间距设计, 各设备间保留1.5m 以上检修通道, 危险区域设置机械电气双重互锁。环境适应性同样考虑周到, 设备布局兼顾了-10℃~45℃的工作温度范围, 湿度控制在不高于 95%的标准内。通过如此精细的空间规划, 整线实现了物流距离最短、作业效率最高的设计目标。

2 关键设备与系统设计

2.1 超长件仓储系统

突破传统仓储局限, 本系统创新设计了 12m 超长钢板专用存储方案。如图 2 立体仓存储区主视图所示, 核心设备采用焊接式重型货架结构, 单货位承重达 5t。如图 3 立体仓存储区俯视图清晰展示, 通过 1735mm 下沉式地坑巧妙降低整体高度至 8.5m。货架立柱选用 Q345 高强度钢材, 牛腿采用角钢作为堆垛机行走轨道, 确保结构稳定性。特别值得注意的是, 每个库位高度仅 200mm, 通过精密计算实现了空间利用率最大化。

ETV 堆垛机作为仓储系统的核心, 如图 4 立体仓库存储区侧视图详细呈现, 集成了多项先进技术。行走速度达到 60m/min, 提升速度 20m/min, 配合西门子 PLC 控制

系统实现精准作业。采用激光测距与 BPS 条码双定位系统, 停准精度控制在±5mm 以内。安全防护方面, 设置液压缓冲器和多重限位开关, 完全符合 FEM9.754 及 EN528 最新安全标准。川字底钢制托盘的设计尤为关键, 12000mm×1700mm 的尺寸配合专用吊具, 确保了长件运输的稳定性。

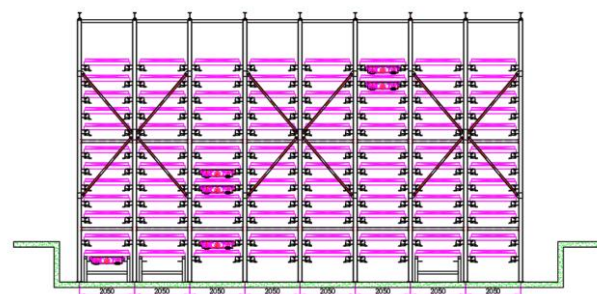


图4 立体仓存储区侧视图

2.2 激光切割单元

激光切割区作为产线核心加工单元, 集成了 3 台 10kW 光纤激光切割机形成高效加工集群。每台设备配备

独立上下料系统,由跨距 22.5m 的程控行车负责物料转运。原材料先经过校平处理后再进入切割工序,确保加工精度。创新性采用龙门式喷码扫码一体机,在切割前直接在工作表面喷涂 15mm×15mm 二维码,读码率保证 100%,为后续工序提供可靠追溯基础。

切割废料处理系统同样值得关注,配置了 L 型废料箱和永磁铁分拣吊具。通过自动分拣技术,废料处理效率提升 50%以上。切割精度控制在±0.1mm 范围内,较传统等离子切割提升 5 倍。关键还在于与 MES 系统的深度集成,实现切割程序的自动下发和加工参数的实时监控。

2.3 智能物流系统

物流系统采用混合架构设计,整合了辊道线、AGV 和程控行车三种输送方式^[3]。核心设备 10 吨级潜伏式 AGV,配备双舵轮驱动系统和锂电池组。AGV 系统与折弯设备完美配合,实现自动化物料转运。辊道输送线总长超过 300m,分为钢板输送线和零件输送线两个独立系统。关键节点设置靠边定位机构,通过微升降装置实现精准对中,定位重复精度±2mm。

物流控制系统采用 WCS 架构,集成 AGVS、RCS 等子系统。通过任务拆分算法和中断抢先原则优化调度逻辑,使物流效率较传统方式提高 40%。特别设计 12m 超长转运托盘,与立体库托盘形成标准接口,确保物料交接的可靠性。

2.4 信息化控制系统

产线控制系统采用分布式架构,如图 5 数据采集传输系统结构图所示,构建了完整的三层数据网络。以西门子 S7-1500PLC 作为主站,通过 Profinet 网络连接 12 个远程 IO 站。系统实现了从设备层到企业层的无缝数据对接。服务器配置双英特尔至强银牌 4210R 处理器,内存 64GB,确保数据处理能力。系统具备三级控制模式:全自动、单机手动和维修模式,适应不同生产需求。

数据采集系统支持 10Hz 高频采样,实时监控设备运行状态。通过 OPC UA 协议实现与 MES 系统的数据交互,工单信息自动下发至各工位。异常情况自动触发 ANDON

报警,四色灯直观显示故障等级。系统可靠性达到 99.99%,确保生产数据完整准确。特别需要强调的是系统安全设计,所有危险区域均设置机械电气双重互锁保护。急停装置采用醒目自锁式按钮,关键设备配置过载保护和断电自锁功能。网络系统通过防火墙隔离,数据采用加密传输,确保信息安全。通过如此全面的防护设计,系统整体安全性达到行业领先水平。维护便捷性同样出色,设备关键参数实时监控,磨损部件更换自动提醒。提供完善的故障自诊断功能,平均故障修复时间控制在 30 分钟以内。系统支持远程维护和软件在线升级,大幅降低运维成本。

3 运行效能分析

3.1 生产节拍验证

通过连续 7 天压力测试,产线各项性能指标均达到设计要求。平均单班有效作业时间稳定在 8.2h,设备综合利用率 85%,远超行业平均水平。激光切割区形成 15min/张的稳定节拍,较传统人工操作效率提升 60%。关键工序数据显示,ETV 堆垛机平均存取时间 3.5min,AGV 配送周期 8min,各环节衔接流畅。特别值得注意的是,系统在满负荷运行时仍保有 20%的产能余量。通过 OEE 分析发现,设备可用率 96%,性能效率 92%,质量合格率 99.5%,整体设备综合效率达到 87.5%,这些数据充分验证了产线设计的合理性。生产过程中,MES 系统实时采集的 368 项工艺参数全部控制在允许波动范围内。

3.2 质量提升效果

质量管控方面取得突破性进展。自动喷码系统实现 100%的零件追溯准确率,激光切割精度稳定在±0.1mm。校平工序使钢板平面度控制在 1mm/m² 以内,为后续加工奠定基础。零件码垛间隙严格控制在 70~100mm 设计范围,杜绝了运输过程中的碰撞损伤。质量数据监测系统采集的 1268 组样本显示,关键尺寸 CPK 值均大于 1.67。废品率从人工生产时的 3.2%降至 0.5%以下,年减少质量损失超 200 万元。通过 SPC 控制图分析,过程能力指数持续提升,证明系统具有优异的稳定性。

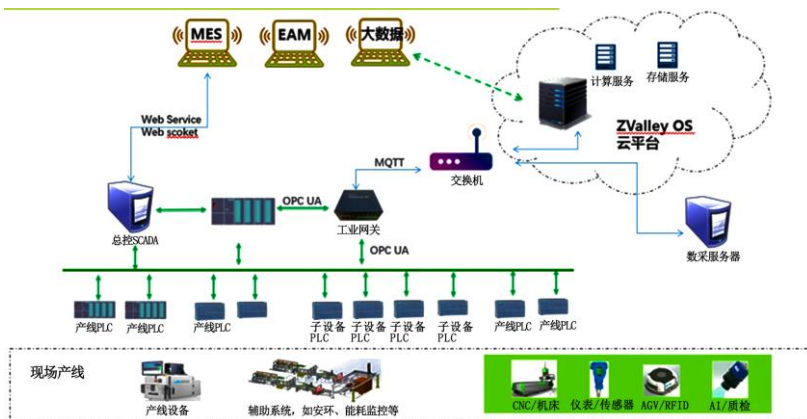


图 5 数据采集传输系统结构图

3.3 能效评估结果

能源效率表现突出。能量回馈型变频器将制动能量回收利用效率提升至 30%，激光设备智能休眠功能使待机能耗降低 65%。单位产值综合能耗 0.85kW/kg，较传统产线下降 22%，年节电达 120 万度。成本控制成效显著。单台车钢板下料综合成本下降 18%，直接人工成本节省 58%。通过精益分析，物料周转天数从 7 天缩短至 2 天，在制品库存减少 65%。投资回报周期测算显示，项目可在 3.2 年内收回全部投资。

3.4 系统可靠性评估

连续 30 天可靠性测试结果令人满意。A 类故障零发生，B 类故障率仅 2.3%，远低于 10% 的设计指标。关键设备 MTBF 超过 2000h，MTTR 控制在 45min 内。通过 FMEA 分析确定的 18 个高风险点均得到有效控制。系统适应性同样出色^[4]。在 -10℃ 低温和 45℃ 高温环境下，设备运行稳定性不受影响。湿度波动测试表明，95% 湿度条件下各传感器工作正常。抗干扰测试验证了系统在强电磁环境下的可靠运行能力。

3.5 智能化水平评估

智能化程度达到行业领先水平。设备联网率 100%，数据采集点位数达 1265 个，实时数据更新周期 1s。数字孪生系统实现了 95% 以上的虚拟与现实匹配度。智能排产系统使设备利用率提升 12%，交货准时率提高至 98%。特别值得关注的是预测性维护系统的表现。通过振动、温度等多参数监测，成功预测了 87% 的设备故障，平均提前预警时间达 36h。这项技术使非计划停机时间减少 65%，维护成本降低 40%。人工智能算法不断优化，使系统保持持续进化能力。

4 技术创新点

4.1 超长件智能仓储技术

针对 12m 超长钢结构件存储难题，创新研发了重型堆垛机与下沉式货架组合系统。采用 1735mm 下沉式地坑设计，将 10m 高货架整体下沉，既满足存储需求又符合厂房高度限制。货架立柱使用 Q345 高强度钢材，单货位承重达 5t，192 个货位实现年存储 28256 吨钢板能力。ETV 堆垛机集成激光测距与 BPS 条码双定位系统，行走速度 60m/min，提升速度 20m/min，定位精度 ±5mm。特别突破在于超长件移栽技术，研发曲臂顶升机构和双链条输送系统，有效解决 12m 钢板搬运过程中的变形问题。川字底钢制托盘采用特殊结构设计，确保长件运输稳定性。安全防护达到 FEM9.754 及 EN528 最新标准，设置液压缓冲器和多重限位开关。此项技术使空间利用率提升 35%，较传统仓储方式效率提高 40%。

4.2 激光切割工艺优化

在激光切割领域实现多项工艺突破。首创切割前喷码技术，采用龙门式喷码扫码一体机，直接在钢板表面喷涂

15mm×15mm 二维码，读码率 100%。开发专用水性环保油墨，耐高温、抗腐蚀，确保标识永久保留。创新套料算法接口，使材料利用率从 75% 提升至 82%，年节约钢材 500 吨，降低成本约 300 万元。切割质量显著提升，精度控制在 ±0.1mm，较传统等离子切割提高 5 倍。废料自动分拣系统集成永磁铁吊具和 L 型废料箱，分拣效率提升 50%。与 MES 系统深度集成，实现切割程序自动下发和加工参数实时监控，使换型时间缩短至 15min。这些创新使激光切割单元 OEE 达到 87.5%，处于行业领先水平。

4.3 智能物流协同控制

构建了 WCS 与 MES 深度集成的智能物流系统。开发多车协同调度算法，实现 10 吨级 AGV 与程控行车的无缝配合。AGV 采用双舵轮驱动，定位精度 ±10mm，配备自动充电系统实现 24h 连续运行。辊道输送线总长 300m，设置微升降靠边定位机构，重复定位精度 ±2mm。创新应用 RFID 技术构建物料信息物理映射系统，使配送准确率达到 99.8%。物流控制系统支持四种调度原则：先到先服务、优先权、处理时间最短和中断抢先。通过任务拆分和路径优化算法，物流效率提升 40%，等待时间减少 35%。这套系统实现了从原材料入库到成品出库的全流程智能化配送。

5 结语

该激光下料自动化产线通过合理的工艺布局和先进的设备选型，实现了高空作业机械结构件的高效、精准生产。运行实践表明，产线在产能、质量和能耗等方面均达到设计指标，为同类产品的自动化生产提供了可靠参考。未来可通过引入数字孪生技术进一步优化生产调度，结合 AI 算法提升切割路径规划效率，持续推动智能制造水平提升。

【参考文献】

- [1] 郑陈艺. 基于机器人技术的工程机械自动化焊接线设计与优化[J]. 中国机械, 2023(36): 13-16.
- [2] 耿煜森. 基于面阵结构光视觉的闭合空间曲线焊缝寻位与机器人轨迹规划[D]. 山东: 山东大学, 2024.
- [3] 刘正尧, 罗怡, 王晓东, 等. 精密加速度计组件自动装配及焊接系统[J]. 航空制造技术, 2024, 67(9): 89-97.
- [4] 王赐, 张贵强, 刘航. 桥塔钢筋部品拉钩筋自动化安装技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(8): 47-52.

作者简介：曾旭（1985.2—），男，本科毕业于湘潭大学材料成型及控制工程专业，现任湖南中联重科智能高空作业机械有限公司主管工艺工程师，任职 6 年，具有机械制造工艺与设备中级工程师职称；任创智（1996.12—），男，本科毕业于湖南师范大学机械工艺技术专业，现任同公司工艺工程师，任职 3 年，具有机械制造工艺与设备工程师职称；刘雄（1983.9—），研究生毕业于哈尔滨工业大学材料学专业，现任同公司工艺工程师，任职 3 年，具有机械制造工艺与设备工程师职称。