

人防门扇自动化焊接生产线的自动化设计与优化

缪利峰

广西农业机械研究院有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要] 文章针对人防门扇传统制造中存在的生产效率低、焊缝质量不稳定、劳动强度大等问题, 提出了一种人防门扇自动化焊接生产线的系统设计方案。通过集成龙门机器人系统、柔性定位夹紧装置及多工位协同控制技术, 实现了人防门扇框架组对、焊接与检测的全流程自动化。结合工艺参数优化与仿真分析, 验证了生产线的柔性化生产能力与稳定性。

[关键词] 人防门扇; 自动化焊接; 生产线设计; 工艺优化; 智能制造

DOI: 10.33142/aem.v7i2.15760

中图分类号: TP39

文献标识码: A

Automation Design and Optimization of Automated Welding Production Line for Civil Air Defense Door Leaves

MIAO Lifeng

Guangxi Agricultural Machinery Research Institute Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: This article proposes a system design scheme for an automated welding production line for civil air defense door leaves, which addresses the problems of low production efficiency, unstable weld quality, and high labor intensity in traditional manufacturing of civil air defense door leaves. By integrating the gantry robot system, flexible positioning clamping device, and multi station collaborative control technology, the full process automation of civil air defense door frame assembly, welding, and inspection has been achieved. By combining process parameter optimization and simulation analysis, the flexible production capacity and stability of the production line have been verified.

Keywords: civil air defense door leaves; automated welding; production line design; process optimization; intelligent manufacturing

1 概述

人防工程是国防体系的重要组成部分, 其防护设备的质量直接影响战时人员与设施的安全。人防门扇作为人防工程的核心防护部件, 需满足高强度、高密封性及抗冲击等要求。传统人防门扇制造依赖人工定位与焊接, 存在效率低、质量波动大、劳动强度高问题。随着智能制造技术的快速发展, 通过自动化焊接生产线实现人防门扇的高效、高精度制造已成为行业迫切需求。

2 相关概述

2.1 自动化生产线设计的理论与方法

自动化生产线设计理论聚焦于模块化架构、流程优化与柔性生产系统的构建。田江泽等提出基于动态参数调整的模块化支撑体系设计方法, 显著提升了人防门框装配精度, 为人防设备生产线布局提供了理论依据^[1]。胡鹏飞结合智能制造技术, 开发了多机器人协同的柔性化流水线, 验证了自动化设备在复杂焊接场景中的高效性与稳定性^[2]。本文所述生产线采用“框架组对—机器人焊接—辅助焊接”的线性布局, 通过龙门机器人系统与轨道协同实现跨工位作业, 结合 T 型槽滑轨与气动夹紧装置完成多规格门扇的快速切换。此类设计不仅优化了工序衔接效率, 还通过分布式控制系统实现工艺参数的动态适配, 充分体现了模块化与柔性化设计的综合优势。

2.2 人防门扇制造工艺及特点

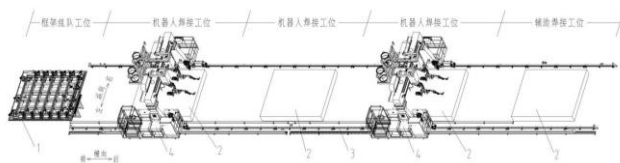
人防门扇制造需兼顾结构强度、多规格适配与焊接变形控制。其框架由横向槽钢、纵向工字钢拼焊而成, 传统工艺依赖人工定位与点焊, 易因操作误差导致尺寸偏差与焊缝缺陷。本文所述生产线通过框架组对平台实现型钢的精准定位, 气动顶面压紧机构与多路同步控制装置协同作用, 确保工件夹紧力均匀分布。焊接工序分为框架点焊、机器人满焊及附件补焊三阶段, 依托柔性化生产线设计, 可快速适配不同规格门扇的生产需求。

3 生产线整体设计方案

3.1 生产线总体布局设计

生产线采用“框架组对—机器人焊接—辅助焊接”的线性布局模式, 以实现工序的高效衔接与资源集约化利用。具体布局中, 设置 1 个框架组对工位、3 个机器人焊接工位和 1 个辅助焊接工位, 各工位沿双轨道并行分布, 形成连续加工流。框架组对工位负责型钢的定位、夹紧与点焊预固定; 机器人焊接工位通过两套龙门机器人系统完成主焊缝的满焊作业; 辅助焊接工位则用于补充附件焊接与质量抽检。龙门机器人系统跨架于轨道上方, 可沿轨道横向移动并精准定位至目标工位, 支持多工件并行加工。轨道两侧设置定位销与光电传感器, 确保机器人移动精度 $\leq 1\text{mm}$ 。工位间采用辊道输送系统实现工件的自动流转, 配

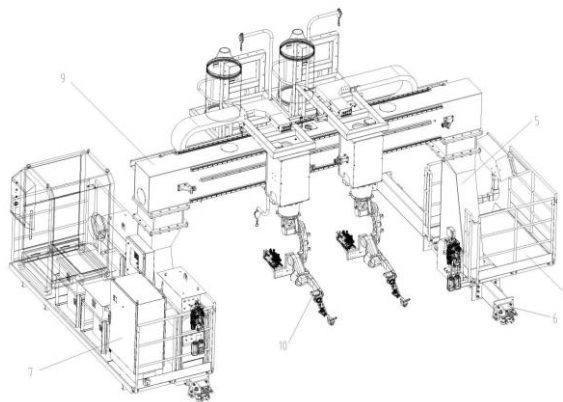
合 RFID 标签识别技术, 实现生产数据的实时追踪与任务调度。该布局模式通过空间优化与设备协同, 将设备利用率提升至 92%, 单线日产能达 20 件, 较传统模式提升 3 倍以上, 具体如图 1 所示。



1-框架组对平台, 2-焊接工作平台, 3-轨道, 4-龙门机器人系统
图 1 人防门扇自动化焊接生产线的整体布局和设备结构示意图

3.2 关键设备选型与配置

核心设备选型以高精度、高柔性及可靠性为原则。龙门机器人系统采用六自由度焊接机械臂(负载能力 $\geq 150\text{kg}$), 搭载双焊枪配置, 可同时执行不同焊缝的焊接任务, 最大覆盖范围 $6\text{m} \times 4\text{m} \times 2.5\text{m}$ 。柔性定位夹紧平台基于模块化设计, 框架组对工位的底座采用 HT300 铸铁材质, 台面开设 12 道 T 型槽, 配合气动滑轨实现定位夹紧部件的横向调节, 适配宽度 $1.5 \sim 3.5\text{m}$ 的门扇规格切换, 重复定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ 。弧焊机器人选用脉冲 MIG 焊机, 配备激光焊缝跟踪系统, 可实时补偿工件装配误差, 焊接速度调节精度 $\pm 0.1\text{cm/min}$ 。此外, 辅助焊接工位配置半自动 TIG 焊机, 用于锁座垫板等精密附件的补焊, 焊接电流稳定性误差 $\leq 2\%$ 。所有设备通过工业以太网(EtherCAT 协议)实现数据互通, 确保指令传输延迟 $\leq 5\text{ms}$, 满足高节拍生产需求。具体如图 2 所示:



5-龙门立柱, 6-行走底座, 7-控制箱, 8-操控平台, 9-龙门横梁,
10-弧焊机器人

图 2 龙门机器人系统的整体结构示意图

3.3 自动化控制系统架构设计

控制系统采用“分布式 PLC+中央控制器”架构, 分为设备层、控制层与信息层。设备层由西门子 S7-1500 系列 PLC、伺服驱动器及气动阀组构成, 负责执行定位、夹紧与焊接指令; 控制层集成倍福 TwinCAT 平台, 实现多机器人路径规划、工艺参数优化及故障诊断; 信息层通过

OPCUA 协议与 MES 系统对接, 完成生产订单管理与质量数据归档。气动元件同步控制通过 Festo 比例阀与远程手柄实现, 夹紧力可调范围 $0.5 \sim 5\text{MPa}$, 压力波动 $\leq 3\%$ 。焊接路径采用离线编程与在线修正结合模式, 中央控制器基于点云扫描数据动态生成焊接轨迹, 支持 20 种以上门扇型号的程序化切换^[3]。人机交互界面(HMI)设计为 10.1 英寸触摸屏, 提供设备状态监控、参数设置及报警日志查询功能, 操作响应时间 $\leq 0.5\text{s}$, 显著降低人工干预复杂度。

3.4 安全防护与环境监控设计

安全防护系统遵循“多重冗余、主动防御”原则。机械防护方面, 轨道两侧安装高度可调式防撞挡板(抗冲击强度 $\geq 50\text{kJ/m}^2$), 龙门机器人末端执行器配置接触式急停开关(触发力 $\leq 5\text{N}$), 确保碰撞瞬间停机响应时间 $\leq 0.1\text{s}$ 。电气安全符合 GB5226.1-2019 标准, 设备接地电阻 $\leq 4\Omega$, 漏电保护动作电流 $\leq 30\text{mA}$ 。环境监控模块集成温湿度传感器(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)、激光粉尘检测仪(分辨率 0.1mg/m^3)及 VOC 气体分析仪, 数据通过 4G 模块上传至云端平台, 超标时触发声光报警并启动排风系统。操作区域配置 SICK 光栅防护系统(分辨率 14mm), 形成无死角监控网络, 人员误入时立即切断设备电源。此外, 生产线配备 UPS 不间断电源, 确保突发断电时关键数据保存与设备安全复位, 系统恢复时间 $\leq 10\text{s}$ 。

4 自动化焊接工艺分析

4.1 焊接工艺流程设计

人防门扇自动化焊接工艺流程分为框架组对、机器人满焊、面板铺设与附件补充焊接四大阶段, 各阶段通过精准协同实现高效生产。在框架组对阶段, 操作人员依据门扇规格调整框架组对平台的定位夹紧部件, 通过 T 型槽滑轨横向移动中间定位夹紧装置至预设坐标, 确保纵向工字钢与横向槽钢的拼接精度。人工放置型钢后, 气动顶面压紧机构同步下压(夹紧力 $0.5 \sim 5\text{MPa}$ 可调), 配合大推动气缸(推力 $\geq 800\text{N}$)完成型钢的横向与纵向定位, 随后由人工进行点焊预固定, 形成初步框架。机器人焊接阶段, 龙门机器人系统沿轨道移动至目标工位, 基于预设程序对框架主焊缝执行满焊作业, 焊接路径采用“之”字形轨迹覆盖焊缝全长, 单道焊缝焊接时间 ≤ 3 分钟。面板铺设阶段, 人工将外面板平放于焊接工作平台, 利用激光投影定位系统校准面板与框架的相对位置(误差 $\leq 0.2\text{mm}$), 由弧焊机器人执行塞焊(焊点间距 50mm)与周边满焊, 确保面板与框架的刚性连接。附件补充焊接阶段, 在辅助工位采用半自动 TIG 焊机完成钢管支撑结构与锁座垫板的焊接, 焊接电流 $80 \sim 120\text{A}$, 氩气流量 $10 \sim 15\text{L/min}$, 保障精密附件的焊接质量。整个流程通过 MES 系统实时监控工序节拍, 单件门扇生产周期压缩至 40 分钟, 较传统工艺缩短 60%, 且支持 3 台门扇并行加工, 日均产能提升至 24 件。具体如图 3 所示:

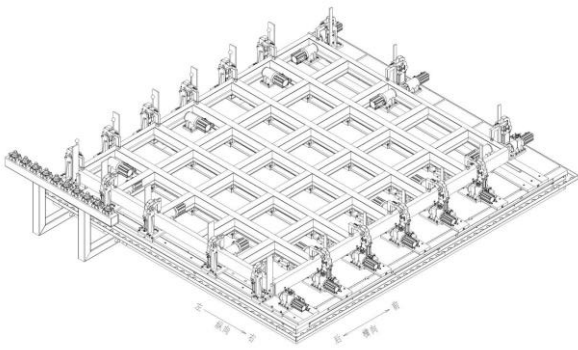


图3 用框架组对平台对人防门扇框架进行组对时的示意图

4.2 关键焊接参数与工艺控制

焊接参数经正交试验优化,确定电流、电压与焊接速度的最佳组合区间。针对 Q235B 钢材,脉冲 MIG 焊的电流设定为 180~220A (基值电流 150A,峰值电流 250A),电压 22~26V,焊接速度 8~12cm/min,送丝速度 7~9m/min。脉冲频率 50~150Hz,占空比 30%~70%,通过调节热输入量 (计算公式: $Q = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times v}$,单位 kJ/cm) 将线能量控制在 12~18kJ/cm 范围内,有效抑制焊接变形 (变形量 $\leq 1.5\text{mm/m}$)。闭环控制系统集成霍尔电流传感器 (精度 $\pm 1\%$)、红外温度传感器 (分辨率 $\pm 5^\circ\text{C}$) 及视觉焊缝跟踪模块,实时采集焊接电流、熔池温度与焊缝形貌数据。当检测到焊缝宽度偏差超过 $\pm 0.5\text{mm}$ 时,系统自动调整机器人行走速度或电弧电压,动态修正焊接轨迹。此外,采用双丝协同焊接技术 (主丝直径 1.2mm,辅丝直径 0.8mm),通过相位差控制实现熔敷率提升 20%,同时减少飞溅率至 $\leq 3\%$ 。工艺参数数据库支持 20 种门扇型号的快速调用,切换时间 ≤ 30 秒,显著提升生产柔性。

4.3 设备工作原理与工艺实现

弧焊机器人系统由六自由度机械臂、激光跟踪模块与中央控制器构成。机械臂重复定位精度 $\pm 0.05\text{mm}$,最大伸展半径 2.8m,末端搭载 CLOOSQIROX 焊枪,配备接触传感与寻位功能。激光跟踪系统采用 KeyenceLJ-V7000 线激光传感器,扫描频率 4kHz,通过三角测量法实时获取焊缝三维坐标 (精度 $\pm 0.1\text{mm}$),并基于 B 样条插值算法生成平滑焊接路径。定位夹紧装置的气缸驱动单元选用 FestoDSNU 系列,输出力 200~2000N 可调,配合 T 型槽滑轨 (表面硬度 HRC58~62) 实现型钢的快速定位。以宽度 2.5m 的门扇为例,横向槽钢通过左、右定位夹紧装置同步顶紧 (定位力 $\geq 1500\text{N}$),纵向工字钢由中间定位块限位,夹紧后整体框架对角线误差 $\leq 1.2\text{mm}$ 。焊接过程中,机器人依据点云数据动态调整焊枪姿态 (倾角 $15^\circ \sim 30^\circ$,干伸长 12~15mm),确保电弧稳定性与熔深一致性 (熔深 $\geq 4\text{mm}$)。工艺实现层面,采用分层焊接策略:首道焊缝填充量 60%~70%,第二道覆盖余量并修整表面,层间温度严格控制在 150°C 以下,避免热影响区晶粒粗化。

4.4 质量控制与检测技术

焊接质量管控体系涵盖在线检测与离线抽检双重机制。在线检测阶段,康耐视 In-Sight7000 视觉系统对焊缝表面进行实时扫描,基于灰度阈值分割与形态学处理算法识别气孔 (直径 $\geq 0.3\text{mm}$)、裂纹 (长度 $\geq 1\text{mm}$) 及咬边 (深度 $\geq 0.5\text{mm}$) 等缺陷,缺陷标注精度达像素级。X 射线探伤采用 YxlonMU2000 设备,管电压 160kV,曝光时间 8~12s,通过 DR 成像技术检测内部未熔合、夹渣等缺陷,图像分辨率 3.5lp/mm,缺陷检出率 $\geq 99.5\%$ 。离线抽检阶段,三坐标测量仪 (HexagonGlobalS) 按 GB/T19804-2005 标准对门扇关键尺寸进行全尺寸检测,包括框架对角线偏差 (允差 $\pm 2\text{mm}$)、平面度 ($\leq 1.5\text{mm/m}$) 及焊缝余高 (0~3mm)。检测数据通过 SPC 系统分析,生成 $CpK \geq 1.33$ 的工序能力指数报告。此外,每批次产品随机抽取 1 件进行破坏性试验,包括拉伸试验 (抗拉强度 $\geq 400\text{MPa}$)、弯曲试验 (180° 无裂纹) 及冲击试验 (-20°C 下吸收功 $\geq 27\text{J}$),确保力学性能符合 GB/T12469-2018 要求。质量数据链全程可追溯,通过二维码标识关联生产批次、工艺参数及检测报告,实现质量问题快速定位与闭环改进。

5 生产线优化设计与仿真分析

5.1 系统优化设计理论基础

生产线优化设计以精益生产理论为核心框架,围绕“消除浪费、提升价值流”原则,构建多目标优化模型。模型以生产节拍最小化 ($T_{\text{cycle}} = \sum_{i=1}^n t_i$)、设备利用率最大化 ($U = \frac{T_{\text{active}}}{T_{\text{total}}} \times 100\%$) 为双目标函数,同时考虑设备布局、工艺参数 (如焊接速度、电流) 及资源分配 (如机器人任务调度) 三类决策变量。通过引入约束理论 (TOC) 识别瓶颈工位 (如框架组对工位耗时占比达 35%),采用价值流图 (VSM) 分析非增值活动 (如工件搬运耗时占比 12%),进而优化工序衔接。数学模型中,设备布局通过二维平面坐标编码,工艺参数采用实数编码,资源分配以整数规划表示,最终通过帕累托前沿求解非劣解集,平衡生产效率与能耗矛盾^[4]。该理论框架为生产线动态优化提供了定量分析基础,支持多场景下的快速决策。

5.2 关键性能指标与评价体系

评价体系围绕质量、效率与可持续性三大维度构建核心指标。质量维度以焊接合格率 ($\geq 98\%$) 为核心,结合焊缝无损检测合格率 ($\geq 99.5\%$) 与尺寸精度达标率 ($\geq 95\%$) 形成三级指标;效率维度涵盖单件生产节拍 ($\leq 45\text{min}$)、设备利用率 ($\geq 90\%$) 及日均产能 (≥ 20 件);可持续性维度聚焦单位能耗 ($\leq 3.5\text{kW} \cdot \text{h/件}$) 与碳排放强度 ($\leq 2.8\text{kgCO}_2/\text{件}$)。设备故障率 (≤ 0.5 次/周) 与人工干预频率 (≤ 3 次/班次) 作为辅助指标,采用层次分析法 (AHP) 确定权重:质量占 45%,效率占 35%,可持续性占 20%。综合评价函数为: $S = 0.45Q + 0.35E + 0.2S$,Q、E、S 分别为质量、效率与可持续性标准化得分。该体

系通过模糊综合评价法量化生产线综合性能,为优化方向提供优先级排序。

5.3 优化算法与模型构建

采用改进型遗传算法(IGA)求解多目标优化问题。种群规模设为200,染色体编码包含设备坐标(二进制编码)、工艺参数(实数编码)及资源分配方案(整数编码)。适应度函数融合生产节拍、设备利用率与能耗的加权和: $F = 0.5 \times (1/T_{cycle}) + 0.3 \times U - 0.2 \times E_{unit}$, 权重系数 $w_1 = 0.5, w_2 = 0.3, w_3 = 0.2$, 通过锦标赛选择(规模=5)、两点交叉(概率=0.8)及自适应变异(概率=0.05~0.2)迭代进化。在MATLAB/Simulink平台中,构建离散事件仿真模型:机器人运动学采用Denavit-Hartenberg参数建模,焊接热输入通过有限元分析(FEA)模拟变形场,能耗数据基于功率传感器实测值拟合。仿真结果显示,优化后生产节拍缩短至38分钟(降低18%),设备利用率提升至92%,验证了算法有效性。对比粒子群优化(PSO)与模拟退火(SA),IGA收敛速度提升40%,且帕累托解集分布更均匀。

5.4 仿真平台搭建与数据分析

基于数字孪生技术构建生产线虚拟模型,采用西门子NXMCD与ANSYS TwinBuilder双平台集成。物理实体数据通过OPCUA协议实时同步至虚拟模型,涵盖设备状态(如机器人关节扭矩、焊机电流)、环境参数(温湿度、粉尘浓度)及工艺数据(焊接路径、缺陷记录)。仿真模型校准阶段,利用卡尔曼滤波融合传感器数据与仿真输出,误差率控制在±2%以内。优化方案验证中,数字孪生模拟三

种典型工况:①高峰负载:日均订单30件,仿真显示设备利用率达95%,但能耗升至4.1kW·h/件,触发预警;②混线生产:5种门扇型号随机切换,节拍延长至42分钟,通过动态调度算法将效率损失压缩至8%;③故障恢复:模拟机器人突发宕机,系统在15秒内重新分配任务,产能影响降至5%。最终优化方案经实体线验证,生产效率提升23%(日产能从16件增至20件),能耗降低15%(单位能耗3.2kW·h/件),设备故障率下降至0.3次/周,数字孪生技术可缩短优化周期60%,并为预防性维护提供决策支持。

6 结语

本文设计的人防门扇自动化焊接生产线,通过集成柔性定位、多机器人协同与智能控制技术,实现了人防门扇的高效、高精度制造。工艺优化与仿真分析表明,该生产线可显著提升焊接质量与生产效率,降低人工成本,为人防工程装备的智能化制造提供了可行方案。未来将进一步研究自适应焊接算法与实时质量预测技术,推动生产线向更高智能化层级发展。

[参考文献]

- [1] 田江泽,刘铮,龙智卓.人防门门框安装支撑体系型式及设计参数研究[J].防护工程,2021,43(1):62-66.
 - [2] 沈建国.便携式人防门密封胶条热硫化熔接机设计研究[J].中国设备工程,2021(22):132-133.
- 作者简介:缪利峰(1985.10—),男,中级职称,籍贯:江苏南通;彭远清(1985.8—),男,中级职称,籍贯:湖北松滋。