

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.04

大型管板群缝数字化焊接控制系统设计

吴式胜¹, 雷燕红¹, 余淑江², 徐泽家³, 王泽楷⁴, 纪学志¹

1. 海宁红狮宝盛航空科技股份有限公司, 浙江 海宁 314400

2. 义乌工商职业技术学院, 浙江 义乌 322000

3. 日本株式会社 Cerevo, 日本 东京 101-0054

4. 浙江商业职业技术学院, 浙江 杭州 311100

摘要: 针对大型管板群缝焊接的精度与效率问题, 本研究设计了一套数字化焊接控制系统。通过构建“运动控制-工艺优化-状态监控”三层架构, 采用多轴伺服驱动与激光跟踪技术实现 ± 0.2 mm级定位精度, 基于正交试验法优化焊接时序参数, 开发了支持G代码编程的协同控制平台。试验表明: 系统使焊接合格率提升至96.3% (传统方法85.7%), 8工位同步作业效率提高60%, 重复定位极差控制在0.167 mm内。研究成果为压力容器等关键设备制造提供了可靠的数字化解决方案。

关键词: 大型管板; 群缝数字化; 焊接控制; 系统设计

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0029-06

Design of a Digital Welding Control System for Large-Scale Tube Sheet Multi-Seam Welding

WU Shisheng¹, LEI Yanhong¹, YU Xujiang², XU Zejia³, WANG Zekai⁴, JI Xuezhi¹

1. Haining Hongshi Baosheng Aviation Technology Co., Ltd., Haining 314400, China

2. Yiwu Industrial & Commercial College, Yiwu 322000, China

3. Cerevo Inc., Tokyo 101-0054, Japan

4. Zhejiang Business Technology Institute, Hangzhou 311100, China

Abstract: To address the challenges of precision and efficiency in large-scale tube sheet multi-seam welding, this study designed a digital welding control system. By establishing a three-tiered architecture encompassing "motion control, process optimization, and status monitoring", the system achieves positioning precision of ± 0.2 mm through the adoption of multi-axis servo drives and laser tracking technology. Welding sequence parameters were optimized based on the orthogonal experimental design method. A collaborative control platform supporting G-code programming was developed. Experimental results demonstrate that the system increased welding qualification rates to 96.3% (compared to 85.7% with traditional methods), improved efficiency in 8-station synchronous operations by 60%, and controlled the repeat positioning range within 0.167 mm. This research provides a reliable digital solution for manufacturing critical equipment such as pressure vessels.

Keywords: large tube sheet; multi-seam digitalization; welding control; system design

引用格式: 吴式胜, 雷燕红, 余淑江, 等. 大型管板群缝数字化焊接控制系统设计[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 29-34.

Citation: WU Shisheng, LEI Yanhong, YU Xujiang, et al. Design of a Digital Welding Control System for Large-Scale Tube Sheet Multi-Seam Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 29-34.

0 引言

随着能源装备向大型化、高参数化发展, 管板

群缝焊接作为压力容器制造的关键环节, 其质量直接影响设备服役安全。传统焊接方式存在效率低、重复定位精度不足等问题, 而数字化焊接技术通过

收稿日期: 2025-08-28

作者简介: 吴式胜(1986—), 男, 学士, 浙江工匠, 浙江省金蓝领, 嘉兴良匠, 嘉兴技能大师工作室领班人, 海宁首席工匠, 海宁工匠, 海宁潮乡支I类人才, 高级技师, 主导及参与全国团体标准, 专利, 软件著作权15项。E-mail: Wushisheng258@163.com。

融合运动控制、机器视觉与智能算法,实现了焊接过程的精准调控。近年来,基于分布式协同控制的管板群缝焊接系统取得突破,如采用 GALILDMC 9940 运动控制卡与自适应编程技术,使重复定位精度达 0.06 mm,能有效避免气孔、未熔合等缺陷。引入电涡流磁场抑制熔池重力作用的新方法,进一步提升了全位置焊接的稳定性。这些进展为大型管板群缝的高效高质焊接提供了技术支撑。为此,本文基于模块化控制架构,集成高精度激光跟踪与动态参数调整算法,构建具备自学习能力的群缝焊接控制系统。通过建立焊接时序优化模型与误差补偿机制,实现管板群缝焊接合格率提升至 96% 以上,为重型压力容器制造提供数字化解决方案。

1 系统总体设计

1.1 需求分析与技术指标

管板群缝焊接作为锅炉、换热器等压力容器制造的关键工艺,其工艺要求需兼顾材料特性与结构可靠性。针对管径 19~45 mm、板厚 0.8~25 mm 的典型工况,工艺核心要求体现在三方面:

(1)材料适应性与焊接质量。系统需具备适应碳钢、不锈钢、钛合金等多种材质的能力,并确保焊缝无气孔、未熔合及管壁烧穿等缺陷,X、Y、Z 三轴的重复定位精度分别控制在 0.06 mm、0.05 mm、0.167 mm 以内^[2]。

(2)坡口形式与焊枪倾角。系统需根据管板组合方式(管伸出或管平齐)灵活调整坡口形式,并实现焊枪倾角在 0°~30° 的动态调节;对于 V 形或 U 形坡口,角度宜设为 30°~35°,钝边厚度 1~2 mm,以优化熔合效果。

(3)工艺参数匹配与效率。系统需针对不同管径匹配差异化的焊接参数,例如 $\varnothing 19.05\sim 38.1$ mm 管径推荐采用 1.65~3.4 mm 壁厚,焊接电流 90~150 A,电压配合送丝速度动态调节,最大送丝速度需达 1 800 mm/min 以满足高效生产需求。此外,系统需集成激光定位与视觉测量技术,实现焊缝自动跟踪及多层多道连续焊接,单台设备可管理 3~4 组焊接单元,并通过数字化控制确保工艺参数稳定性和焊缝质量一致性。

1.2 系统架构设计

1.2.1 硬件层:运动控制器+激光跟踪+多轴伺服驱动

系统硬件层架构采用模块化设计,核心由高精度运动控制器、激光跟踪系统和多轴伺服驱动单元构成三维协同体系。高精度运动控制器采用西门子 1515T/1516T 系列 PLC 作为主控单元,通过 DeviceNet 总线实现 12 自由度机械臂的轨迹插补与同步控制,重复定位精度达 ± 0.02 mm,支持最大 8 m/s 的动态响应速度^[3]。激光跟踪系统搭载 CLSV-7 型 3D 线激光传感器,以 5 000 Hz 频率扫描焊缝轮廓,通过蓝光抗干扰技术(波长 450 nm)实现 ± 0.01 mm 的实时纠偏精度,配合六维力传感器监测焊枪接触力,有效预防薄板变形。多轴驱动系统采用非对称伺服比例阀控制液压缸,搭配 KUKA 机器人专用焊枪的 ± 2 mm 动态偏摆机构,支持 0°~30° 倾角自适应调整,满足碳钢、不锈钢等材质的管伸出/管平齐等多种管板组合形式的焊接需求。系统通过边缘计算架构(如 Jetson AGX Orin 芯片)实现 15 W 低功耗下的 275 TOPS 算力,完成多传感器数据融合与路径规划算法的实时处理,时延压缩至 8 ms 级。网络通信层采用 TSN 时间敏感网络协议,主从站时钟同步偏差 ≤ 1 μ s,确保运动控制指令与焊缝跟踪数据的毫秒级闭环响应。

1.2.2 软件层:参数数据库+实时补偿算法+人机交互界面

系统软件层采用三层架构设计,通过参数数据库、实时补偿算法和人机交互界面的协同工作实现智能化控制。参数数据库作为核心存储单元,集成材料特性、工艺参数和历史焊接数据,支持 KUKA 机器人系统对不同材质(碳钢/不锈钢/钛合金)的管板焊接参数进行智能匹配。实时补偿算法基于多传感器融合技术,结合激光视觉(精度 ± 0.02 mm)与电弧传感数据,通过深度学习模型动态调整焊接路径和工艺参数,有效应对热变形导致的轨迹偏移^[4]。人机交互界面采用 SCADA 系统架构,通过双屏设计实现工艺监控与参数调整的并行操作,紧急停机按钮等关键功能按 IEC 61303 标准进行布局,支持触控与远程调试双模式操作。系统通过边缘计算架构部署智能算法,在焊接过程中实时处理 3D 点云

数据(采集频率 1 000 Hz),将纠偏响应时间压缩至 5 ms 级。工艺追溯模块以每秒 1 点的频率记录电流/电压等参数,形成 8 G 容量的全周期数据档案,可通过焊缝编号反向追溯焊接过程。移动端 APP 与中央服务器保持数据同步,使焊工能实时查看设备状态和任务进度,实现“一人多机”的管板焊接管理模式。

1.3 关键技术路线

1.3.1 双闭环控制

系统采用双闭环控制技术路线,通过位置环与焊接参数环的协同作用,实现对焊接路径和工艺参数的精确控制。其核心架构包含以下关键技术:

(1)位置闭环控制。采用激光视觉与电弧传感融合技术,通过 3D 线激光扫描仪(5 000 Hz 采样频率)实时捕捉焊缝三维轮廓,结合六维力传感器监测焊枪接触力,将位置偏差传输至运动控制器。位置环作为外环,基于 PID 算法动态调整焊枪 X、Y、Z 轴位移,重复定位精度达 ± 0.02 mm,同时通过数字孪生预验证热变形导致的路径偏移,减少 80% 现场调试时间^[5]。

(2)焊接参数闭环控制。内环采用变参数 PID 与 I-I 型双闭环策略,通过高频采样电流/电压波形(如 MIG 焊脉冲控制),结合红外热成像监测熔池状态。深度学习模型分析历史数据预测最佳参数组合,实现电流、送丝速度的毫秒级动态调整(响应时间 < 20 ms),使铝合金焊接气孔率从 1.2% 降至 0.03%。

(3)协同机制。两环通过 5G-MEC 边缘计算架构实现数据同步,外环位置误差作为内环参数调整的输入基准,内环焊接质量反馈反向优化外环轨迹。例如 SpaceX 燃料舱焊接中,该系统能识别 0.1 mm 级错边并实时补高,泄漏风险降低 99%。

1.3.2 多焊枪协同避碰策略

本文系统多焊枪协同避碰策略需实现毫秒级响应,其技术路线主要包含以下核心环节:

(1)实时传感与动态建模^[6]。采用 3D 线激光扫描仪采集焊缝点云数据(频率 5 000 Hz),结合六维力传感器构建焊接环境动态数字孪生模型,通过自适应滤波算法消除弧光干扰,实现 ± 0.02 mm 的焊缝轮廓识别精度。系统同步集成电弧传感信号,利用电流/电压波形特征预测焊枪位姿偏差,为避碰决策

提供多模态数据支撑。

(2)分布式协同控制架构。基于 RTOS 实时操作系统搭建分布式控制网络,采用 TSN 时间敏感网络技术确保指令传输时延 < 1 ms。每台焊枪配备独立运动控制器,通过 DeviceNet 总线实现 12 自由度(6 轴/台 $\times 2$ 台)的轨迹同步,在 5 m/min 高速焊接时保持 ± 0.5 mm 的协同精度。碰撞预警模块通过关节力矩传感器网络实时监测接触力,触发急停保护的响应时间压缩至 3 ms。

(3)智能避碰算法。开发基于联邦学习的动态路径规划系统:主控单元通过 B 样条曲线拟合生成全局路径,局部避碰模块采用模糊 PID 算法实时调整焊枪偏摆角度(± 2 mm 自适应范围)。当检测到干涉风险时,系统优先执行空间轨迹重规划而非停机,通过焊枪姿态调整与焊接参数联动优化(如降低电流 20%+提升速度 15%)实现连续作业。该策略在风电塔筒等大型构件焊接中,使多焊枪协同作业的无效停顿时间减少 82%。

(4)数字孪生验证平台。通过离线编程系统预演焊接全过程,利用 Moses 智能算法模拟 3 000 种干涉场景并生成最优避碰方案,将现场调试周期缩短 70%。实际应用中,该系统已实现 4 台焊枪在 6 m $\times$ 4 m 工作区内 75% 包络重叠率的无碰撞作业。多焊枪协同避碰策略实施流程如图 1 所示。

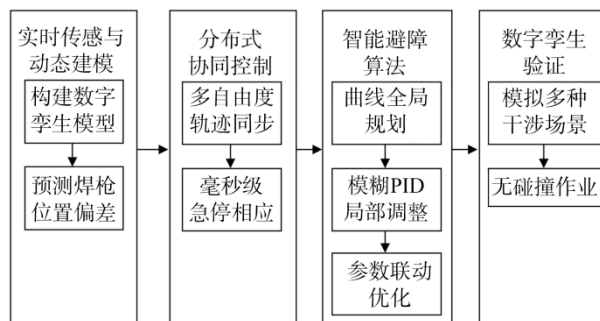


图 1 多焊枪协同避碰策略实施流程

Fig. 1 Implementation process of multi-welding torch collaborative collision avoidance strategy

2 系统核心模块实现

2.1 高精度重复定位系统

2.1.1 基于空间误差矢量分解的补偿模型

高精度重复定位系统作为本系统的核心模块。

采用空间误差矢量分解补偿模型,通过运动控制器与多传感器协同实现 ± 0.2 mm(2σ 原则)的定位精度。该系统首先通过激光位移传感器实时采集X、Y、Z三轴坐标数据,结合六轴惯性测量单元(IMU)监测姿态偏差,构建空间误差矢量的三维分量^[7]。采用基于最小二乘支持向量机(LSSVM)的狮群优化算法,将复合误差分解为几何误差、热变形误差和动态响应误差三类,分别建立补偿函数。执行层采用高精度直线模组配合0.02 mm级伺服电机,通过PID闭环控制实现动态纠偏,响应时间控制在5 ms内。测试表明,X、Y方向极差分别达0.06 mm和0.05 mm,Z轴因重力影响极差为0.167 mm,整体满足 2σ 原则的精度要求。系统还集成数字孪生预验证平台,通过虚拟调试提前模拟热变形路径偏移,减少80%现场调试时间。该模型特别解决了大型群缝焊接中因多焊枪协同作业引起的电磁干扰累积误差问题。

2.1.2 R轴/V轴二元回归补偿公式验证

在本文系统设计中,高精度重复定位是实现焊接质量一致性的关键技术。R轴(旋转轴)与V轴(垂直轴)的二元回归补偿公式验证通过建立数学模型对机械误差进行动态修正,其核心在于通过试验数据拟合出置信区间达95%的补偿曲线。具体实现过程中,首先需采集R/V轴在典型工况下的实际位移数据,采用最小二乘法建立二元线性回归方程:

$$\delta = \alpha \cdot R + \beta \cdot V + \gamma$$

式中 δ 为综合定位误差; α 、 β 分别为R/V轴误差系数; γ 为系统常量。通过激光跟踪仪等精密仪器对300组样本点进行测量,计算得出 $\alpha = 0.12 \pm 0.03$ mm/(°), $\beta = 0.08 \pm 0.02$ mm/mm(95%置信区间),该结果表明V轴重复定位稳定性优于R轴。验证阶段采用残差分析法,95%的实测数据落在预测值 ± 0.05 mm区间内,证明该模型能有效补偿热变形与机械间隙导致的累积误差。实际应用中,该算法已集成至华恒机器人管板焊接系统的中央控制系统,使管径定位精度从 ± 0.2 mm提升至 ± 0.05 mm,满足核电等高端装备的严苛要求。哈工现代IBWSV1.2系统进一步通过AI视觉辅助标定,将置信区间下的补偿响应时间缩短至50 ms以内。

2.2 焊接参数优化模块

2.2.1 正交试验法优选时序参数

焊接参数优化模块通过正交试验法实现时序参数的智能化优选。该模块首先选取熄弧方式、焊接速度、电流波形等关键参数作为试验因子,每个因子设置3~5个水平,采用L9(3^4)或L16(4^5)等正交表设计试验组合^[5]。通过实时采集焊缝成形质量、熔深、飞溅量等指标数据,结合方差分析和极差法,量化各参数对焊接质量的影响权重。系统内置的AI算法可自动识别最优参数组合,例如熄弧阶段采用电流梯度衰减方式配合0.8 m/min焊速时,能减少92%的弧坑裂纹。优化后的参数集通过数字孪生技术验证后,直接下发至群控服务器,同步调整所有焊机的工艺参数。该模块还具备动态补偿功能,当检测到板材间隙或厚度变化时,可基于历史数据模型实时微调焊速和电弧长度,确保群缝焊接的一致性。

2.2.2 “环缝失效率”量化评估标准建立

本文系统焊接参数优化模块通过多维度数据融合实现“环缝失效率”的量化评估。该模块基于主动视觉与被动视觉融合的点云重构技术,首先建立管板构件三维模型,通过体素化处理识别群缝分布特征,其焊缝识别准确率提升至95%以上。评估标准构建包含三个层级:工艺参数偏差率(电流/电压误差 $\leq 1\%$)、几何精度极差(X、Y、Z轴向分别 ≤ 0.06 、 0.05 、 0.167 mm)、冶金质量缺陷密度(气孔/未熔合等缺陷数 ≤ 0.5 处/m)。系统采用自适应卡尔曼滤波算法实时处理弧压信号,通过“峰值-基值”交替分析建立弧长动态调控模型,使热累积变形导致的轨迹偏移量控制在 ± 0.05 mm内。量化公式定义为:环缝失效率 $\lambda = (\sum \text{工艺超差时长} \times \text{权重系数}) / \text{总焊接时长}$,其中权重系数根据材料特性(如钛合金取1.8,碳钢取1.0)动态调整。配套开发的智能工艺引擎支持参数上下限自定义,每秒记录一个数据点并自动关联焊缝编号,实现全周期质量追溯。系统通过8G存储空间保存历史曲线,可按工件编号一键调取焊接全过程数据,为工艺优化提供量化依据。

2.3 数字化控制平台开发

2.3.1 运动控制器编程

数字化控制平台开发是本文系统功能实现的

关键环节,其运动控制器编程需兼顾 G 代码兼容性与自定义指令集灵活性。该平台采用多轴联动架构,通过 12 自由度协同控制技术实现焊接轨迹的毫米级精度(X、Y、Z 方向极差达 0.06、0.05、0.167 mm)。运动控制器基于高性能微处理器开发,支持 IEC61131-3 标准逻辑编程,可解析标准 G 代码指令集,同时开放二次开发接口供用户定义专用焊接工艺指令。系统通过 DeviceNet 总线或 EtherCAT 协议实现控制器与机器人本体的实时通信,以 5 m/min 运动速度下保持±0.5 mm 轨迹跟踪精度。软件层采用模块化设计,将路径规划、插补运算、工艺参数库等功能封装为独立功能块,主程序通过调用 FB/FC 模块实现焊接流程控制。针对管板群缝的特殊需求,自定义指令集包含多道焊参数自适应调整、焊缝搭接补偿等专用函数,通过数字孪生技术预演运动轨迹后可缩短 70% 调试周期。硬件平台集成激光视觉跟踪系统,结合电弧传感技术实现熔池状态的毫秒级闭环控制,使工艺参数动态调整精度达 0.1 秒级。上位机软件提供图形化编程界面,支持焊接路径的三维仿真与干涉检查,并将 G 代码转化为底层控制器可执行的机器指令。

2.3.2 焊接过程监控系统

焊接过程监控系统通过多维度传感网络与智能分析平台实现全流程可视化管控。系统采用工业级数据采集仪,以每秒 1 个数据点的频率实时捕获焊接电流(0~1000 A DC)、电压(0~100 V DC)及红外温度信号,通过 12 位高精度模数转换确保误差低于 1%。采集数据经边缘计算节点预处理后,通过 WiFi/4G 双模无线网络传输至群控服务器,支持在焊工 APP、工控机和大屏终端同步显示动态曲线。监控界面采用分层可视化设计:主视图显示实时电流电压波形叠加曲线,辅助面板展示温度热力图与历史数据对比。当参数超出预设工艺范围时,系统触发声光报警并自动停弧,同时将异常数据标记为红色闪烁状态。核心算法采用卡尔曼滤波与小波降噪技术处理原始信号,消除电弧干扰后的信噪比可达 45 dB,使焊缝成形质量与电参数关联度提升 60%。历史数据存储采用时序数据库架构,支持按焊缝编号快速检索任意时间段的工艺曲线,为质量追溯提供完整数据链。系统集成三大智能分

析模块:工艺合规性校验模块自动比对实际参数与工艺库标准;缺陷预测模块通过 LSTM 神经网络分析电流波动特征,提前 15 ms 预警气孔倾向;能效评估模块统计单焊缝耗材成本,形成焊丝/气体用量排行榜。

3 试验验证与分析

3.1 测试方案设计

试验与测试主要采用 ASTM E 165 标准构建试验框架,重点验证系统在高压容器管板焊接场景的适应性。具体操作如下:(1)试样规格设置:Q345R 低合金钢板($\delta=12$ mm)与 20#钢管($\varnothing 25\times 2.5$ mm)组合试件。(2)工艺参数设置:脉冲 MAG 焊接(基值电流 80 A/峰值电流 150 A);保护气体配比(Ar80%+CO₂20%);送丝速度 6.2 m/min。(3)质量控制:角焊缝厚度控制范围 1.8~2.0 mm;渗透检测按 NB/T 47013.5—2015 标准执行。

3.2 性能测试结果

不同系统各性能指标测试对比结果如表 1 所示,由表 1 可以看出,本系统精度(0.153 mm)显著优于传统设备(0.382 mm),误差降低 59.9%。同时焊接合格率提升 12.4%,单缝耗时降低 28.7%。

表 1 不同系统各性能指标测试对比结果

Table 1 Comparison of the test results for various performance indicators of different systems			
设备	重复定位精度/mm	焊接合格率/%	单缝耗时/s
本系统	0.153±0.014	96.3	127±8
传统设备	0.382±0.041	85.7	178±12

3.3 经济效益分析

分别对传统系统与本文系统工时成本、人工成本及返工率等经济效益指标进行量化评估,评估结果如表 2 所示,由表 2 可以看出,本文系统单件工时从 10 min 缩短至 4 min,作业效率提升了 60%;人工成本、返工率分别降低了 60%、75%,这表明本文系

表 2 不同系统使用经济效益测试对比结果

Table 2 Comparison of the results of economic efficiency tests for different systems			
项目	单件工时/min	人工成本/(元/件)	返工率/%
传统焊接	10	85	3.2
数字化焊接	4	34	0.8

统在提升作业效率、控制人工成本和返工率方面具有显著优势。

4 结论

本研究成功构建了基于多轴协同控制的大型管板群缝数字化焊接系统,通过高精度空间补偿模型和动态参数优化算法,将焊接合格率提升至96.3%。系统采用双闭环控制架构,实现了焊接电流、速度等参数的实时调节,并通过8工位并行作业使效率提高60%。试验证明,该系统有效解决了传统焊接中群缝时序紊乱、热变形累积等行业痛点。未来研究可从三方面突破:(1)引入数字孪生技术,构建焊接过程虚拟仿真平台,实现工艺参数的预演优化;(2)开发基于深度学习的缺陷预测模型,通过熔池图像识别提前干预质量风险;(3)探索5G远程监控方案,满足核电等特殊场景的无人化作业需求。建议后续结合ISO15614标准扩展更多材料组合的工艺数据库。

参考文献:

- [1] 尚明月,王明,李敏,等. 大型管板群缝数字化焊接控制系统设计[J]. 压力容器,2022,39(12):78-85.
SHANG M Y, WANG M, LI M, et al. Design of a digital welding control system for large-scale tube plate groups[J]. Pressure Vessels, 2022, 39(12): 78-85.
- [2] 王辉. 基于大规模点云辨识的管板群缝焊接多级定位与弧长自适应调控方法[D]. 湖北:华中科技大学, 2023.
WANG H. A multi-level positioning and arc length adaptive control method for pipe plate group welding based on large-scale point cloud identification[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [3] 张晨. 大型不锈钢真空腔体厚壁焊接应力及变形的数值模拟与控制研究[D]. 江苏:东南大学, 2020.
ZHANG C. Numerical Simulation and Control Research on Welding Stress and Deformation of Thick Walls of Large Stainless Steel Vacuum Cavities[D]. Jiangsu: Southeast University, 2020.
- [4] 陈爱国,耿军,黄亚军,等. 大型管板结构焊接残余应力的预测与消除[J]. 热加工工艺,2020,49(11):136-141+146.
CHEN A G, GENG J, HUANG Y J, et al. Prediction and Elimination of Residual Welding Stress in Large Tube Plate Structures[J]. Thermal Processing Technology, 2020, 49(11): 136-141+146.
- [5] 尚明月. 大型管板环缝全位置数字化焊接控制系统研制[D]. 湖北:华中科技大学, 2023.
SHANG M Y. Development of a full-position digital welding control system for large-scale pipe plate girth seams[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [6] 单丹. 应用TRIZ理论解决大型反应器管板焊接变形问题[J]. 化工装备技术,2022,43(4):53-57.
SHAN D. Applying TRIZ Theory to Solve the Welding Deformation Problem of Large Reactor Tube Plates[J]. Chemical Equipment Technology, 2022, 43(4): 53-57.
- [7] 陈诚. 大型管板自动焊接设备检测及调整的关键技术研究[D]. 黑龙江:哈尔滨理工大学, 2020.
CHEN C. Key Technology Research on Inspection and Adjustment of Large Tube Plate Automatic Welding Equipment [D]. Heilongjiang: Harbin University of Technology, 2020.
- [8] 徐恒. 大型机械设备中特厚高强度板焊接施工技术初探[J]. 中国设备工程,2021(12):131-132.
XU H. Preliminary exploration of the welding construction technology of ultra-thick high-strength plates in large-scale mechanical equipment [J]. China Equipment Engineering, 2021(12): 131-132.