

低代码可视化 AI 技术加速船舶焊接工艺智能化

孙 斌¹, 吴艳明², 叶 军¹, 易 武¹, 朱红艳¹, 樊闪闪¹, 陈嘉良¹

(1. 蕴硕物联(上海)技术有限公司, 上海 200000; 2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要:在焊接质量分析及检测的智能化应用研究创新过程中,需要利用工业机理模型和分析方法进行可视化、低代码化和智能化构建。焊接工艺低代码可视化分析提供了一种基于机理模型的信号分析方法,可以帮助船舶制造行业解决焊接过程中的质量问题。该软件包括 $U-I$ 相图、特征分析和短路专属分析等分析功能,以船舶发动机焊接为案例进行实证分析,结合 $U-I$ 相图等由用户自主构建焊缝质量评分体系,将其封装为 AI 模型实现实时质量评分,验证了该软件对焊接质量分析和评估的有效性,提高了焊接质量评价效率和准确性。

关键词:焊接质量分析;实时质量评分; $U-I$ 相图;特征分析

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

Low-code Visualization AI Technology Accelerating the Intelligentization of Ship Welding Process

SUN Bin¹, WU Yanming², YE Jun¹, YI Wu¹, ZHU Hongyan¹,
FAN Shanshan¹, CHEN Jialiang¹

(1. Yunshuo IoT (Shanghai) Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The intelligent application research and innovation in welding quality analysis and evaluation requires industrial mechanism models and analytical methods for visualization, low-code development, and intelligent construction. The low-code visualization analysis of the welding process provides a signal analysis method based on mechanism models, which can help the shipbuilding industry solve quality problems during the welding process. This software includes analysis functions such as $U-I$ phase diagrams, feature analysis, and short-circuit-specific analysis. Using ship engine welding as a case study, users can independently build a welding quality rating model according to the $U-I$ phase diagrams and other functions, and achieve real-time output of on-line welding quality rating. This verifies the effectiveness of the software in welding quality analysis and evaluation, which can improve the efficiency and accuracy of the welding quality evaluation.

Keywords: welding quality analysis; real-time weld quality score; $U-I$ phase diagram; feature analysis

质量是制造业的生命线,焊接作为船舶制造的基础工艺,焊接质量检验十分重要^[1]。焊接是一个多物理场耦合的非线性金属加工过程,目前

技术条件下基本采用焊后检测,很难直接观测焊接质量。通过利用过程信号对焊接情况进行间接判定,实现焊接质量在线评价和实时控制是焊

收稿日期:2023-05-30

作者简介:孙斌,男,1979 年生,蕴硕物联(上海)技术有限公司技术总监,在焊接领域有多年的数字化推进经验,拥有多篇焊接领域的发明专利。

引用格式:孙斌,吴艳明,叶军,等. 低代码可视化 AI 技术加速船舶焊接工艺智能化[J]. 材料开发与应 用,2023, 38(5): 58-69.

SUN B, WU Y M, YE J, et al. Low-code visualization AI technology accelerating the intelligentization of ship welding process[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(5): 58-69.

接工艺智能化的颠覆性技术。焊接电弧作为焊接过程能量传输的载体,包含过程稳定性及质量信息,其工作状态对于质量有重要影响^[2]。相应机理模型和分析方法是焊接过程质量评价的要素,有诸多学科的原理,结合实际生产经验,形成了普适的理论支撑。将机理和方法进行提炼和封装^[3],将为行业创新发展带来质的变化。

将焊接分析过程中使用的机理模型及方法进行可视化、低代码化和智能化构建,使其成为工艺人员分析焊接过程的工具,获取不同场景及工况的质量评价特征及参数阈值,可以为后续建立智能评价及诊断提供应用。

某船舶发动机焊接车间的机架单片焊接,质检方式为焊后超声,单片检测周期数小时,返修需碳弧气刨后重新焊接。鉴于此,利用焊接工艺低代码可视化分析可构建质量评价体系。本研究将介绍基于算法支撑的 $U-I$ 相图、特征分析和短路过渡分析的建模理论和案例,并衍生实时评分的 AI 应用,验证其有效性。

1 焊接工艺低代码可视化分析功能介绍

本节将从功能和业务两个维度对分析工具进行说明。表 1 是分析工具功能清单及说明,其

中包括:数据导入、焊缝截取、参数配置、不同模块分析等功能。

表 1 工艺低代码可视化分析功能清单

Table 1 Functions of welding analysis software

序号	功能模块	功能描述
1	$U-I$ 相图	$U-I$ 相图,电压与电流的轨迹变化图,不同焊缝之间的对比
2	概率密度曲线	各参数数据的概率分布查看,不同焊缝之间的对比
3	特征计算	各参数数据时域、频域、时频域图及相关特征,如均值、方差、偏度等,不同焊缝之间的对比
4	短路专属分析	短路过渡焊接形式下,电压信号的短路特定特征值及分布的查看,不同焊缝之间的对比
5	包迹线回溯	通过配置参数权重,结合 SPC 控制逻辑计算上下限,可以实现包迹曲线查看,不同焊缝之间的对比
6	分析报告	提供分析报告输出功能,可单选或多选所需输出内容,不同焊缝之间的对比

图 1 是焊接质量低代码可视化工具的使用流程,依次通过创建工程、数据加载、参数配置、结果计算等操作实现任务计算,并得到分析结果。

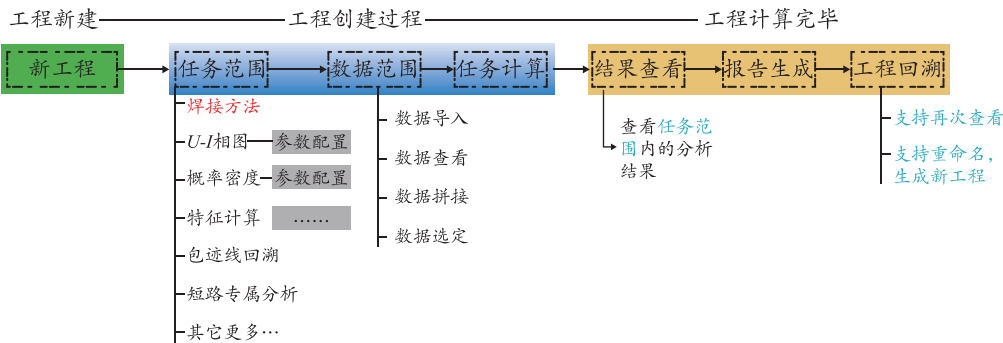


图 1 工艺低代码可视化工具使用流程

Fig. 1 Process of welding analysis software

1.1 $U-I$ 相图分析功能

将 $U-I$ 动态工作点的轨迹的集中性用构成的 $U-I$ 相图的边界轮廓的标准化面积来表征。一般来说,焊接时电弧散点连成的轨迹越集中,焊接过程就越稳定,这些点围成的边界轮廓的标

准化面积就越小^[4]。在实际应用中,这些动态工作点形成的轨迹是不规则的,对于边界不规则的面积计算,由于三次样条函数具有收敛性、连续性以及良好的计算精度,因此采用三次样条拟合轮廓边界进行计算。

1.1.1 三次样条插值数学原理

给定一系列离散坐标点 $[x_0, x_1, x_2, \dots, x_n]$, $[y_0, y_1, y_2, \dots, y_n]$, 其中自变量 x 满足 $x_0 < x_1 < \dots < x_n$, 这些点构成的插值函数 $f(x)$ 满足:

(1) 在每个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内 $f(x)$ 的表达式是 x 的三次多项式:

$$f(x) = A_i + B_i x + C_i x^2 + D_i x^3 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 在整个区间 $[x_0, x_n]$ 上存在二阶连续导数;

(3) 满足连续性条件: $f(x_i-0) = f(x_i+0)$;

$$f'(x_i-0) = f'(x_i+0); f''(x_i-0) = f''(x_i+0)$$

由上述条件组成的线性方程组可确定 $f(x)$ 。

构建 $U-I$ 相图的边界轮廓计算面积过程为:

(1) 对其进行边缘优化, 具体步骤为: 将原始 $U-I$ 相图的电流、电压维度归一化至 $0 \sim 1$ 区间范围内, 沿着电流维度划分为 m 个柱子, 对每个柱子内的样本集合利用密度聚类算法舍弃掉偏离

中心点半径之外的点, 即边缘点。

(2) 将舍弃掉边缘点后的集中区域均匀分割为 n 个柱子, 分别计算每个柱子中散点的二维概率密度分布的上下临界值, 以此来确定每个分割块的边界轮廓点 x 。

(3) 利用三次样条插值法对边界轮廓点进行函数 $f(x)$ 拟合, 对拟合后的函数 $f(x)$ 在 $0 \sim 1$ 区间内求积分, 该积分值可近似等于 n 个梯形面积之和, 具体公式:

$$S = \int_0^1 f(x) dx \approx \sum_{i=0}^n \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{2n} \quad (2)$$

式中, S 表示所求 $U-I$ 相图的面积, n 表示划分的梯形个数。

图 2 所示为不同焊接质量下的 $U-I$ 相图以及边界曲线, 从标准化面积来看, 图 2(a) 所展示的面积明显小于图 2(b) 的, 可以初步判断图 2(a) 情况下的焊接质量是优于图 2(b) 的。

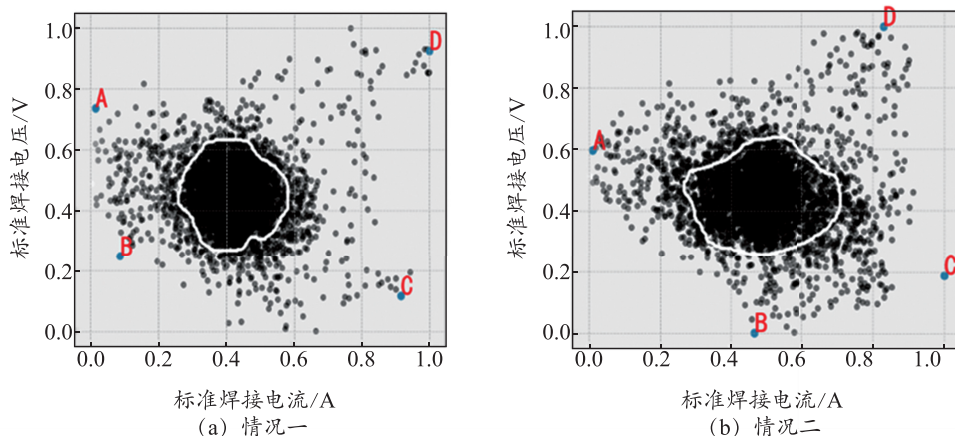


图 2 不同焊接质量下 $U-I$ 相图及边界曲线图

Fig. 2 $U-I$ phase and boundary curve diagrams under different welding condition

1.1.2 轨迹重复率

利用直流焊机采集不同过渡模式下的电流电压数据绘制其 $U-I$ 相图可发现有四个变化阶段。不同的过渡模式下四个阶段构成的形状不同, 最明显的是短路过渡, 其四个阶段变化构成四边形, 如图 3 所示。四个顶点 (A、B、C、D) 分别代表不同燃弧阶段电流和电压的集聚值, 四条线段分别对应焊接过程中的四个阶段: AB 段对应燃弧向短路过渡阶段; BC 段对应熔滴短路阶段; CD 段对应短路向燃弧过渡阶段; DA 段对应燃弧阶段。鉴于四个阶段呈周期性反复波动, 对短路过渡来说, 焊接质量越好, 构成的四边形的形状越规范。因此, 在同种过渡模式下可以利用

$U-I$ 相图四个阶段的轨迹重复率来衡量焊接的好坏, 若焊接质量越好, 则轨迹周期性越强, 每个周期内的四个阶段的轨迹重复率也越高^[5]。

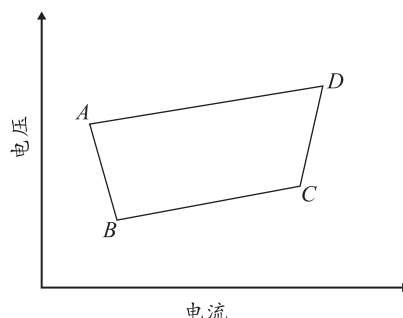


图 3 短路过渡四阶段变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of changes in the four stages of short-circuit transition

轨迹重复率计算流程如下:

(1) 将 $U-I$ 相图二维平面划分为 $n \times n$ 的网格覆盖整个电流和电压的变化区间,将样本数据点投影到该 $U-I$ 相图二维平面上,统计每个网格中数据点所占比例即二维空间概率密度。

(2) 将每个样本的概率密度 x 均分为 m 段得到 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 对于每个切分后的 x_i , 统计网格中概率密度大于该 x_i 的网格数量 y_i , 即轨迹重复率高的网格数量, 以每个样本的概率密度 x 为横坐标, $y = \sum_{i=1}^m y_i$ 为纵坐标, 绘制 x, y 的一一

对应的折线图, 计算折线与 x 轴之间的区域面积 s 。图 4 展示了不同焊接质量下折线图围成的区域面积大小, 可看出焊接质量好的 (图 4(a)) 折线图的面积 s 更小。

(3) 该 $U-I$ 相图的轨迹重复率指标可定义为式 (3):

$$repeat_{ratio} = 1 - \frac{s}{x_{max} \cdot y_{max}} \quad (3)$$

该指标理论上最大值为 1, 最小值为 0, 越大代表该轨迹重复率越高, 焊接质量越稳定。

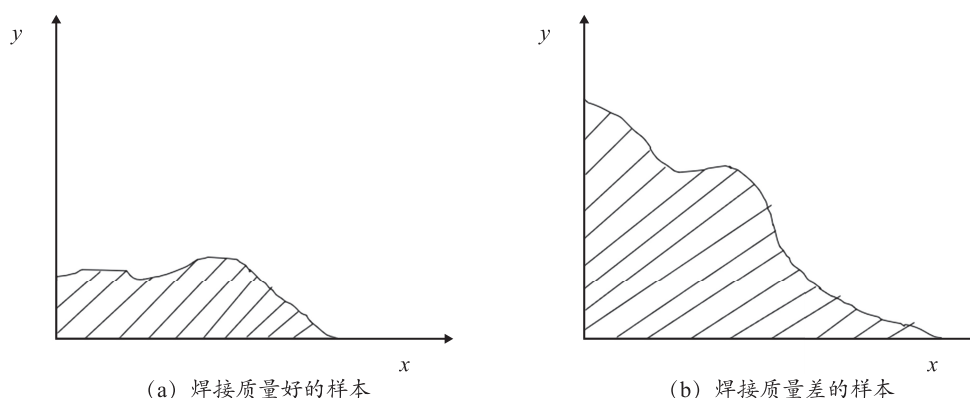


图 4 不同焊接质量下网格概率密度与网格数量变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of changes in grid probability density and grid quantity under different welding qualities

1.2 特征分析功能

在弧焊焊接过程中, 电流、电压等高频时序数据的特征提取是指从原始数据中提取出对所研究问题有意义的特征, 包含时域、频域和时频域等维度。

另外在行业研究过程中也沉淀了部分机理性特征, 如能量集中度、主频稳定性等, 也一并集成到软件中, 其与焊缝质量的关系均有理论支持^[6]。焊缝特征清单见表 2。

其中, 能量集中度是信号中主频能量 (幅值) 占该主频邻域所有成分能量总和的比例, 计算公式如下:

$$Rate = \frac{Z_m}{\sum_{Z_m-5}^{Z_m+5} Z_k} \quad (4)$$

式中, Z_k 表示电流信号中通过傅里叶变换计算出的频域信号的各个分量, Z_m 是频率域信号中的最大值所对应的频率。

离散傅里叶变换计算公式如式 (5):

$$Z_k = \sum_{n=0}^{N-1} Z_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn} \quad (5)$$

其中, Z_n 是一个长度为 N 的序列, 是 Z_k 的 DFT 系数。该公式表示将一个长度为 N 的序列从时间域转换到频率域。

表 2 分析工具中特征清单

Table 2 List of features in analysis software

序号	特征名称	序号	特征名称
1	均值	11	偏度
2	有效值 (rms)	12	裕度
3	中位数	13	波形因子
4	最大值	14	峰值因子
5	最小值	15	脉冲因子
6	峰峰值 (极差)	16	主频
7	方差	17	幅值
8	标准差	18	谱密度
9	变异系数	19	能量集中度
10	峰度	20	主频稳定性

一条完整焊缝中可能同时存在正常段和异

常段,为了比较不同段指定参数特征的差异性,可利用特征分段比较功能,将整条焊缝切分为不

同长度的焊缝段,对每段提取上述特征集,对特征差异明显段进行颜色区分,如图5所示。

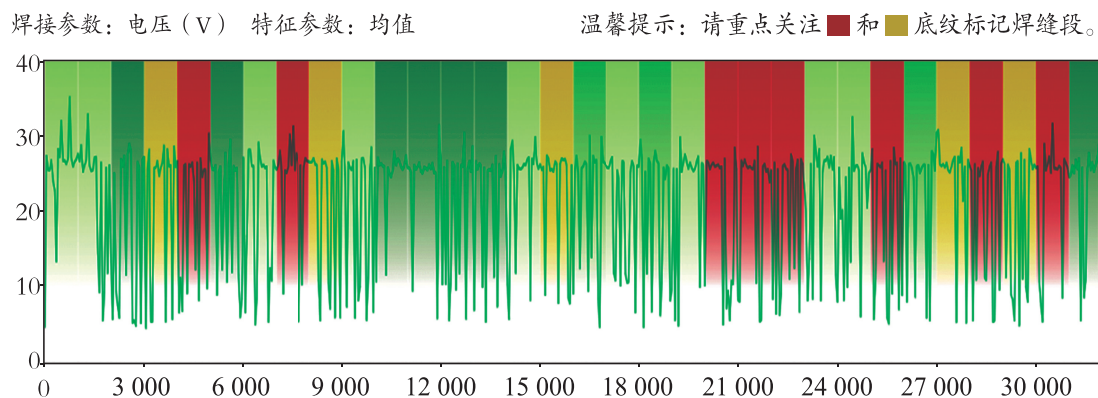


图5 特征分段对比功能示意图

Fig. 5 Schematic diagram of feature segmentation comparison function

1.3 短路专属分析功能

焊接短路过渡研究为优化焊接参数、提高焊接质量提供重要的参考依据。通过监测和分析电流和电压信号波形特征可以判断短路过渡形式,并识别短路和燃弧阶段。短路过渡形式通过计算短路过渡比率确定,当该比率大于经验阈值,则认为该过渡形式为短路过渡^[7]。短路-燃

弧阶段可通过波形特征来确定,电流 I 在燃弧期逐渐减小,短路期迅速增大;而电压 V 在燃弧期缓慢下降,短路期迅速下降至 0 后又迅速上升至均值以上,即焊接中发生短路过渡时,电压会瞬间降低,而短路过程结束进入燃弧阶段时,电压会瞬间升高,如图6所示。

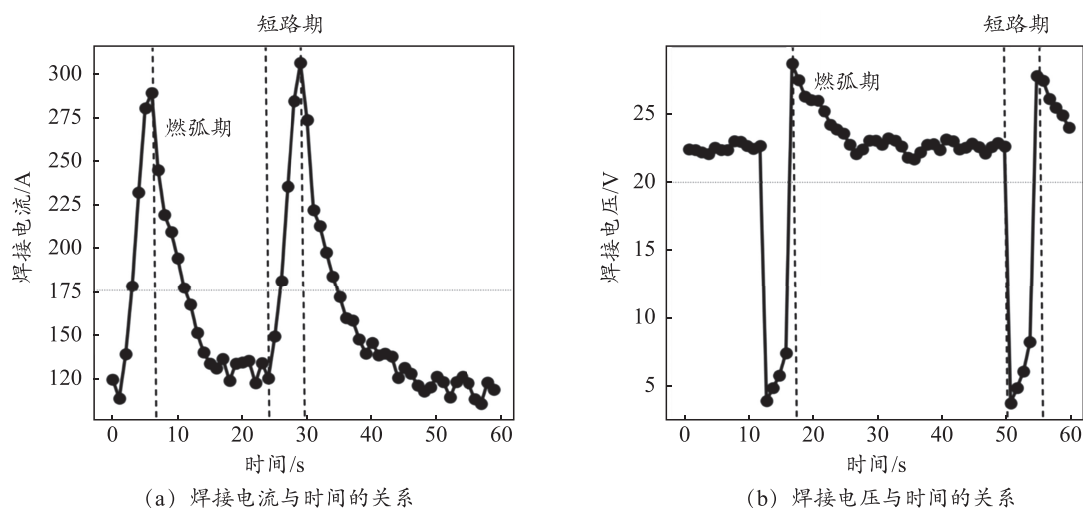


图6 短路过渡过程焊接电流电压变化规律

Fig. 6 The law of changes in welding current and voltage during short-circuit transition process

图7为短路和燃弧阶段持续时间示意图,其中 T_a 表示燃弧持续时间, T_s 表示短路持续时间; V_s 表示短路电压值, V_a 表示燃弧电压值。

基于以上短路过渡特点,分别从时间、电压两个维度计算焊接过程稳定性特征,对短路和燃

弧过程进行分析,具体见表3。

区段划分完成后,可查看各短路过渡参数特征值,通过对比不同焊缝的特征值对焊接过程的稳定性做定量评估^[8]。

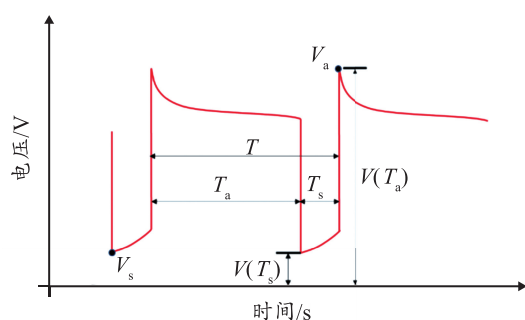


图 7 短路过渡区持续时间示意图

Fig. 7 Schematic diagram of short-circuit transition section division

表 3 短路专属分析相关特征

Table 3 Characteristics related to short-circuit exclusive analysis

特征	含义
有效短路比例	短路时间大于短路时间阈值的区段数占总短路区段数的比例
无效短路比例	短路时间小于短路时间阈值的区段数占总短路区段数的比例
变异系数	标准差与均值的比值,数值越大,电信号波动越大
循环时间标准差	短路循环时间(T)的标准差
燃弧时间标准差	燃弧持续时间(T_a)的标准差
短路时间标准差	短路持续时间(T_s)的标准差
电压标准差	总体电压 V 的标准差
燃弧电压标准差	燃弧区间电压 $V(T_a)$ 的标准差
短路电压标准差	短路区间电压 $V(T_s)$ 的标准差

(1)从时间维度来看,循环时间与熔滴过渡频率呈反比,循环时间越短,熔滴过渡频率越高,焊缝成型越均匀。短路时间均值一般小于燃弧时间均值。短路时间标准差越小,短路过程越一致,焊接过程越稳定。

(2)从电压维度来看,短路电压标准差越小,每个循环输入能量越一致,所形成的熔滴大小越一致,焊接过程越稳定。

1.4 焊接质量评分

本研究 1.2 节中阐述了从焊接过程中的电弧信号中提取多项与质量相关的特征,为了进一步对焊缝质量进行综合评价,从中筛选一部分显著的特征集,利用统计学中的因子分析方法将其

降维成少数维潜因子,如:能量稳定性、波形相似性、周期稳定性、电弧稳定性、轨迹重复性,从不同角度对焊接质量评价,并形成最终的评分。

1.4.1 指标选取

根据电信号不同特征对焊缝质量的影响程度,本研究选取以下特征构建焊缝质量评分体系。

(1)正向指标:能量集中度(X_1)、轨迹重复率(X_2)、相关系数(X_3);

(2)负向指标:标准差(X_4)、变异系数(X_5)、LMD 分解后前 3 个 PF 分量能量熵值(X_6 – X_8)、U–I 面积(X_9)、短路过度稳定性特征(X_{10} – X_{13})。

考虑到原始数据的量纲不同,在构建焊缝质量评分体系之前,本研究采用改进后的功效系数法将原始数据进行标准化处理,将各指标数据化为无量纲数据^[9]。

具体计算公式见式 (6) 和 式 (7):

$$X_i^* = 40 + 60 \times \frac{X_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (6)$$

$$X_i^* = 40 + 60 \times \frac{X_{i\max} - X_i}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (7)$$

其中,式 (6) 表示正向指标的标准化计算公式,式 (7) 表示负向指标的标准化计算公式;公式中 i 表示第 i 条焊缝, X_i^* 表示标准化处理后的数据, X_i 表示标准化处理前的数据。 $X_{i\max}$ 表示第 i 个指标各项数据中的最大值, $X_{i\min}$ 表示第 i 个指标中的最小值。

1.4.2 构建焊缝质量评分体系

本研究将基于因子分析构建焊缝质量评分体系,具体步骤如下:

(1)确定因子数量:使用 Kaiser 准则来确定合适的因子数量,以及每个因子所代表的方差比例;

(2)使用主成分分析(PCA)、提取潜在因子,使其能较好地解释原始数据中的变异性;

(3)使用最大方差法(VARIMAX)进行因子旋转;

(4)根据因子载荷和方差贡献率等指标,推断每个因子代表的潜在变量以及其与原始变量之间的关系,如式 (8) 所示,其中 L 表示因子矩阵, F 表示因子得分系数矩阵, X 表示特征变量。

$$L=FX \quad (8)$$

式中:

$$L=[l_1, l_2, \cdots, l_a]^T, X=[X_1, X_2, \cdots, X_{13}]^T,$$

$$F=\begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,a} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{13,1} & \cdots & f_{13,a} \end{bmatrix}_{13 \times a}, a < 13。$$

(5) 根据各个因子方差贡献率 α_i 得到焊缝质量评分体系,据此可计算焊缝质量综合得分 l , $l \in [40, 100]$, 计算公式见式(9)。

$$l=\alpha_1 l_1+\alpha_2 l_2+\cdots+\alpha_a l_a \quad (9)$$

式中,

$$\alpha_i=\frac{Var(l_i)}{\sum_{i=1}^a Var(l_i)}$$

根据焊缝质量评分体系计算得到的结果可以作为焊接质量评估的有效依据,便于工艺人员快速发现焊缝问题段。

2 实证分析

为验证焊接质量低代码可视化工具在船舶焊接实际场景中质量数据分析和评估的有效性,

围绕船舶发动机机架单片设置对照组进行数据采集,包括电弧时序和质量标签数据,并利用分析工具中的 $U-I$ 相图、特征分析及质量评分等模块进行对比分析,验证相关功能模块对于焊缝质量好坏识别的有效性。

2.1 数据样本采集

本研究所用数据来源对应的焊接业务场景,具体焊接基础信息包括:焊接母材为 Q235 钢;试板尺寸(长×宽×厚)为 200 mm×125 mm×3 mm;焊接接头形式为对接、无坡口;焊材采用直径为 1.2 mm 实芯焊丝;焊接方法为 MAG 机器人焊接;保护气体成分及比例为 80% Ar + 20% CO;焊接工艺参数见表 4,检测方式为分析平台+射线检测。从现场采集的数据中选取 3 条焊缝样本,图 8 显示了其实际焊接状况。

从图 8 可看出,焊缝样本 1(图 8(a))和焊缝样本 3(图 8(c))的焊接质量较好,无明显缺陷,焊缝样本 2(图 8(b))末尾处可明显看出表面凹凸不平,余高不足,存在塌陷质量缺陷。

按照工艺低代码可视化工具使用流程,将采集到的 csv 数据导入软件中,合理配置参数,对数据进行初步描述性分析或截断处理(起收弧的处理)后点击运行,后台完成计算后得到不同分析模块的结果。

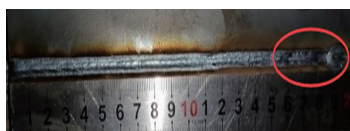
表 4 焊接工艺参数

Table 4 Welding process parameters

焊接电压/ V	送丝速度/ (cm/min)	气体流量/ (L/min)	焊接速度/ (m/min)	干伸长度/ mm	电源
18	180	17~18	0.48	8	直流反接



(a) 焊缝样本1



(b) 焊缝样本2



(c) 焊缝样本3

图 8 现场真实焊缝图片

Fig. 8 Physical map of weld seam

2.2 $U-I$ 相图实证分析

为了验证所开发的 $U-I$ 相图模块的有效性,对上述采集的 3 条焊缝的电流-电压数据利用 $U-I$ 模块功能进行分析,结果见图 9 和表 5。

从图 9 中可以发现 3 条焊缝围成的轨迹轮廓均为以 A、B、C、D 点为端点的四边形,因此熔滴过渡形式主要是以短路过渡为主。焊缝 1 和焊缝 3 的 $U-I$ 相图各阶段线簇分布相对集中,表

明整个焊接过程较稳定,而焊缝 2 的相图 A 点区域比较离散且有一定的拖尾(红色标记),主要原因是燃弧过程中焊枪与熔池间的距离发生变化,引起线能量不稳定,相较而言,焊缝 1 和焊缝 3 焊接过程更稳定,质量更好。

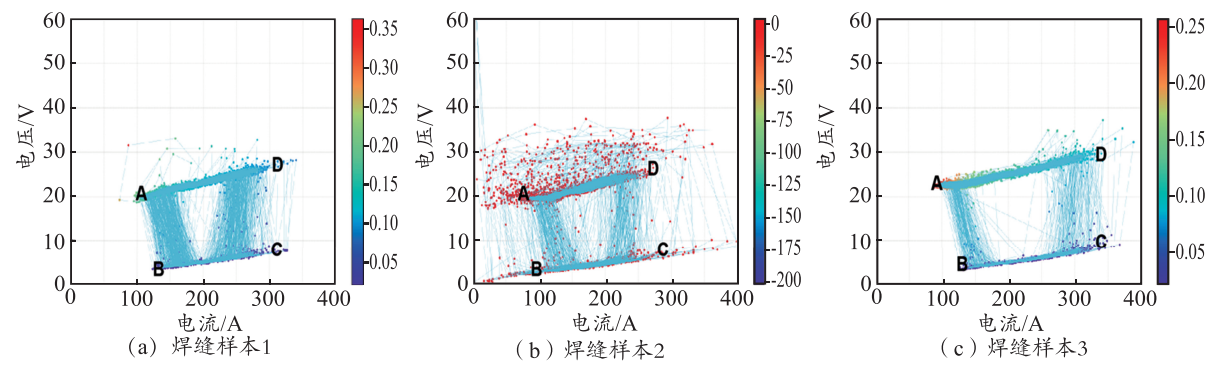


图 9 不同焊缝样本下 $U-I$ 相图

Fig. 9 $U-I$ phase diagram under different weld seam samples

表 5 $U-I$ 相图特征表

Table 5 $U-I$ phase diagram features			
指标	焊缝样本 1	焊缝样本 2	焊缝样本 3
A 点坐标	(100.97,20.81)	(88.47,20.07)	(100.09,21.62)
B 点坐标	(128.47,5.07)	(98.62,2.93)	(134.38, 3.05)
C 点坐标	(268.27,7.12)	(239.84,3.45)	(286.36, 8.79)
D 点坐标	(276.88,26.51)	(248.78,22.36)	(310.19, 28.20)
电流均值/A	174.69	174.11	175.18
电压均值/V	22.29	21.76	22.54
电流有效值/A	223.87	180.51	224.26
电压有效值/V	23.31	22.40	23.55
电流标准差/A	140.02	47.68	140.02
电压标准差/V	6.83	5.32	6.83
电流极差/A	663.69	343.10	663.14
电压极差/V	39.32	33.60	39.34
标准 $U-I$ 面积	0.43	0.57	0.33
轨迹重复率	97.92%	89.37%	97.85%

如表 5 所示,从 $U-I$ 相图模块计算出的特征表中可看出,焊缝样本 2 的标准 $U-I$ 面积指标为 0.57,相较于焊缝样本 1 和焊缝样本 3 的更大。焊缝样本 2 的轨迹重复率指标为 89.37%,低于焊缝样本 1 和焊缝样本 3 的,而焊缝样本 1 和焊缝样本 3 在此指标上相差不大。从这两个指标上可定量判定焊缝样本 2 的焊接质量较焊缝样

本 1 和 3 的焊接质量更差,焊缝样本 1 和 3 的焊接质量较稳定。

2.3 特征分析对比

表 6 是根据特征分析的结果。焊缝 2 在 $U-I$ 面积、轨迹重复率、变异系数和能量集中度等维度与焊缝 1 和焊缝 3 存在显著差异。这些特征对于评估焊缝质量的好坏具有较强的区分性。

图 10 是三条焊缝样本的频谱图,可发现焊缝 1 和焊缝 3 的主频较为明显,在 116 Hz 左右,而焊缝 2 的存在宽带噪声,即在整个频带内都有能量分布,主频不明显。通过 2.2 节中能量集中度计算公式,发现焊缝 2 的计算结果为 0.24,明显低于焊缝 1 和焊缝 3 的 0.53,表明焊缝 2 质量和其它两条焊缝不同。

对第 2 条焊缝的电压参数进行分段特征提取比较分析,结果如图 11 所示,从图中可发现对于焊缝末尾处的能量集中度相较于其他段明显有差异,说明当焊缝质量问题发生时,焊接过程中主频的稳定性将发生改变。

2.4 短路专属实证分析

为进一步验证短路专属分析模块的功能,本研究基于 2.1 章节中 3 条短路过渡的焊缝样本进行分析,表 7、表 8、图 12 为分析工具中输出的结果,结果显示:(1)3 条焊缝有效短路过渡比例结果为 100%,根据实际焊接工艺和现场焊接情况,此 3 条焊缝是短路过渡的形式进行焊接,证明软件识别短路过渡的有效性;(2)焊缝样本 2 的电压变异系数为 0.81,是另外两条焊缝的 2 倍(见表 7);(3)焊缝样本 2,循环、短路和燃弧持续时间的标准差分别为 85.78、80.93、34.57(见表 8),是样本 1 和 3 相应值的 10 倍;(4)从电压维度看,焊缝样本 2 的电压标准差最大(见表 8)。以上结果表明焊缝样本 2 在焊接过程电弧弧长波动较大,存在焊缝对接间隙不一致或焊接抖动现

象,会引起焊缝余高不足或飞溅等质量缺陷。该结果与实际焊缝质量检测结果一致。

表 6 3 条焊缝样本特征表

Table 6 Features of 3 weld seam samples			
特征项	焊缝 样本 1	焊缝 样本 2	焊缝 样本 3
最大值	41.32	37.54	41.50
最小值	2.00	3.94	2.16
峰峰值	39.32	33.60	39.34
标准差	6.83	5.32	6.83
变异系数	0.31	0.24	0.30
峰度	-0.38	-0.34	-0.38
偏度	0.51	0.49	0.51
裕度	1.81	1.58	1.79
波形因子	1.05	1.03	1.04
峰值因子	1.69	1.50	1.67
脉冲因子	1.76	1.54	1.75
主频/Hz	116.56	115.51	116.56
幅值	2.30	0.32	2.30
谱密度	2.72	0.27	2.72
能量集中度	0.53	0.24	0.53
主频稳定性	0.39	0.21	0.39

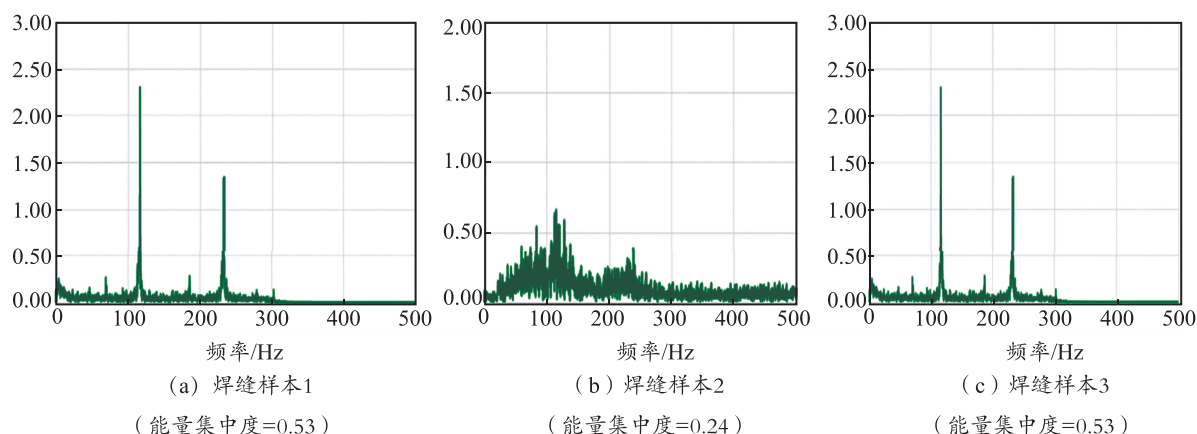


图 10 三条焊缝样本的频谱图

Fig. 10 Spectral plots of 3 weld seam samples

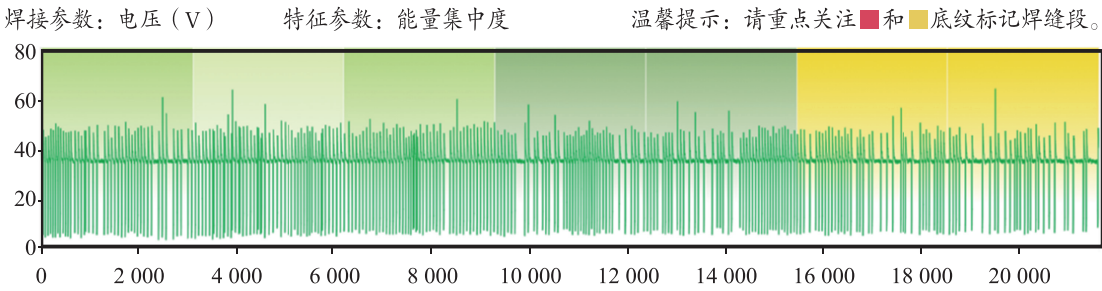


图 11 焊缝样本 2 的分段特征比较
Fig. 11 Comparison of slicing features of NO. 2 weld seam

表 7 短路过渡比例结果

Table 7 Short-circuit transition ratio result			
焊缝	有效短路比例	无效短路比例	变异系数
焊缝 1	100%	0%	0.49
焊缝 2	100%	0%	0.81
焊缝 3	100%	0%	0.43

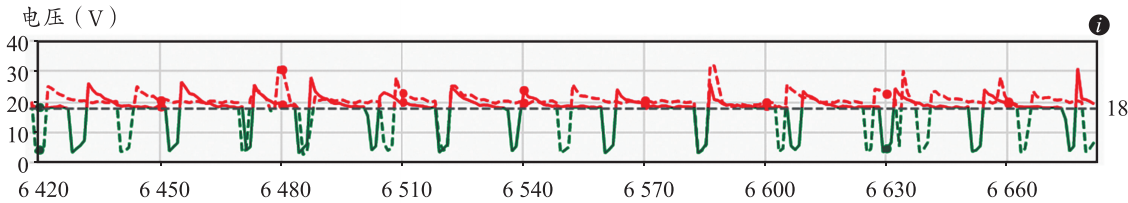


图 12 短路过渡两阶段划分结果
Fig. 12 Short-circuit transition two-stage division result

表 8 稳定性特征计算结果

信号特征	焊缝样本 1		焊缝样本 2		焊缝样本 3	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
循环时间/ms	16.50	9.45	59.47	85.78	13.88	9.03
燃弧时间/ms	11.30	9.72	39.52	80.93	8.83	9.09
短路时间/ms	5.19	3.12	19.95	34.57	5.05	3.33
电压/V	16.68	7.16	22.22	18.09	17.26	5.61
燃弧电压/V	20.84	1.31	21.84	5.03	19.18	1.24
短路电压/V	7.08	4.24	9.36	4.88	13.14	5.59

3 AI 模型封装及现场实时焊缝质量评分应用输出

基于本研究 1.4.2 章节中的焊缝质量评分体

系构建方法,并结合前述 $U-I$ 相图、特征比较、短路专属分析结果来选取特征,并通过因子分析将特征集降为 5 维。对 3 条焊缝样本计算以下五个评价维度:能量稳定性(l_1)、周期稳定性(l_2)、轨迹重复率(l_3)、电弧稳定性(l_4)、波形相似性(l_5),并基于式(8)计算出各维度的权重值(α_i),

按式(9)计算综合得分 l ,表达式如下:

$$l = 0.380 \times l_1 + 0.248 \times l_2 + 0.161 \times l_3 + 0.110 \times l_4 + 0.100 \times l_5 \quad (10)$$

基于式(9)可以计算出3条焊缝样本各自的综合得分和五个维度上的得分情况,如图13所示。

从焊缝样本得分情况来看,焊缝样本2的得分最低,尤其在电弧和周期稳定性维度上得分较

低,说明该焊缝在焊接过程中熔滴过渡的频率不一致,可能导致焊缝填充的金属体积不够,可能产生塌陷、气孔等缺陷,通过焊缝成型照片(图8)和射线检测照片(图14)也印证了焊缝2末端存在的质量问题,从实物图可明显发现焊缝末端存在塌陷的缺陷,而从射线检测图片可发现其存在气孔的缺陷。

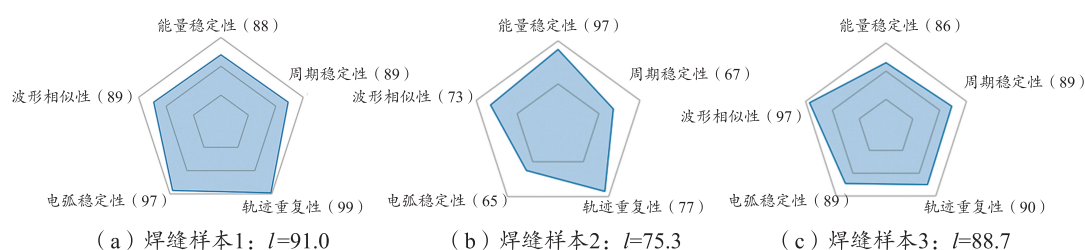


图 13 3 条焊缝样本质量评分雷达图

Fig. 13 Radar chart for quality score of 3 weld samples

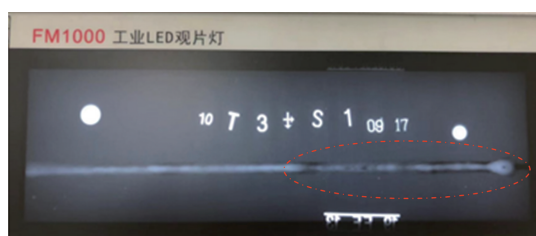


图 14 焊缝 2 的 X 射线检测照片

Fig. 14 X-ray inspection photo of weld seam 2

图 15 展示了质量评分算法模型在实时应用系统中的应用场景。工艺人员可以通过此界面实时跟踪焊缝段的质量评分情况,并且可以自行设置报警阈值。一旦评分低于设定的阈值,便可推送报警信息。工艺人员能够根据现场情况及时调整工艺参数,保证焊缝的良率。同时,通过这种方式,原有的焊后检测方式被转换成实时评估方式,大大提升了检测的效率。

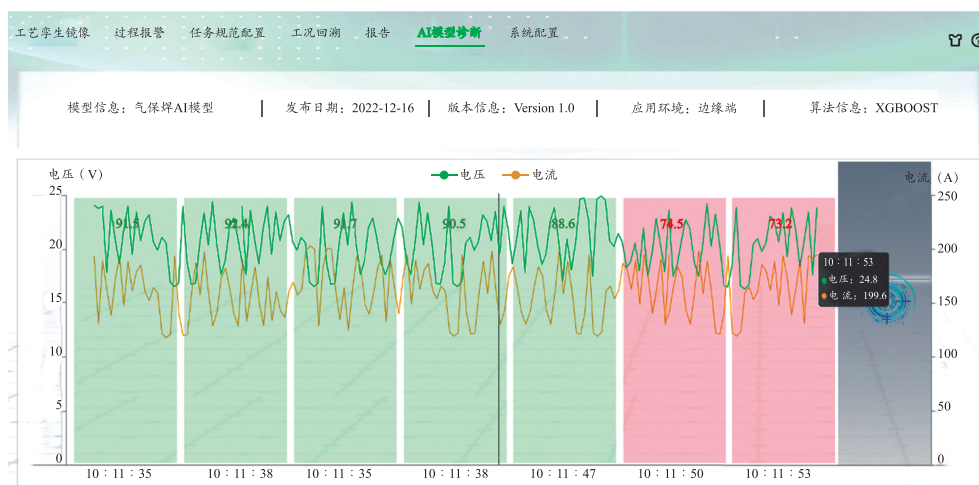


图 15 质量评分现场应用图

Fig. 15 Quality evaluation online application diagram

4 结论

本研究旨在探索船舶焊接过程中的质量控制难点和挑战,并提出了利用 AI 技术进行焊接质量分析和评估的方法。为此,我们提供了一整套围绕电弧高频数据的 $U-I$ 相图、特征和短路专属分析的可视化、低代码化和智能化构建方法,以帮助工艺人员更好地进行质量控制。

为验证所提方法的有效性,在船舶发动机焊接车间实际采集数据并进行实证分析。结果表明, $U-I$ 面积越大、轨迹重复率越高、能量集中度越高的焊缝质量越好。基于以上显著特征,我们建立了适用于不同工况下的质量评价系统,进一步提高了焊接生产效率和产品质量。

因此,本研究论证了利用工艺低代码可视化工具在质量评估方面的有效性,并提供了一种新的方法来解决船舶焊接过程中的质量控制难题,从而对相关行业的生产与发展具有积极促进作用。

参考文献:

[1] 邓欣,吴松林. 船舶焊接工艺评定专家系统的研究

(上接第 50 页)

4 结论

(1) App 中为焊接冷却时间的计算提供了两种方法:一是利用经验公式得到焊接冷却时间;二是通过导入温度场数据,计算热循环曲线得到焊接冷却时间。

(2) App 中包含 40 多种低合金钢的焊接 CCT 图数据,为用户提供了丰富的焊材选择。App 可以通过插值函数得到任意焊接冷却时间的组织比例、金相图、硬度。

(3) 以 15MnVR 钢为例,随着焊接冷却时间的增长,低合金钢热影响区各组织比例也会发生相应的改变,先后出现马氏体、贝氏体、铁素体、珠光体,硬度整体呈现下降趋势。

参考文献:

[1] 祁文军,方建疆,周建平. 基于焊接 CCT 图的焊接

与开发[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(2): 80-83.

[2] 徐文华,张育平. 基于航电系统架构模型的安全性分析工具的设计与实现[J]. 计算机科学, 2016, 43(S2): 536-541.

[3] 张如星,王倬,马利娅,等. 基于电流变异系数的 CO_2 焊短路过渡稳定性分析[J]. 焊接技术, 2019, 48(5): 12-16.

[4] 胡昱,薛家祥,金礼,等. 双脉冲 MIG 工艺参数对异种不锈钢焊缝质量影响分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 115-120.

[5] 李剑雄,李恒,韦辉亮,等. 基于 $U-I$ 图的铝/钢双脉冲 MIG 熔-钎焊稳定性评价及其 MATLAB 实现[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 87-91.

[6] 吉霖,刘纪周,郭彦兵,等. 基于后级斩波可控短路过渡 GMAW 电源设计[J/OL]. 热加工工艺, 2023(19): 106-110 [2023-11-02]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212238>.

[7] 毛中根,孙豪. 中国省域经济增长模式评价: 基于消费主导型指标体系的分析[J]. 统计研究, 2015, 32(9): 68-75.

[8] 华文. 船舶船体建造中焊接质量控制的研究[D]. 大连: 大连理工大学.

[9] 吴纯,王文波. 基于 Synchrosqueezing 小波变换的谐波和间谐波检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4): 630-635.

接头组织和性能预测[J]. 焊接技术, 2003, 32(5): 12-13.

[2] KHURANA S P. Prediction of microstructure in HAZ of welds [C]//AIP Conference Proceedings. Columbus: AIP, 2004: 7-14.

[3] 余明敏. 基于元胞自动机法的 TC4-DT 钛合金电子束焊接头晶粒组织模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

[4] 胡龙,王义峰,李索,等. 基于 SH-CCT 图的 Q345 钢焊接接头组织与硬度预测方法研究[J]. 金属学报, 2021, 57(8): 1073-1086.

[5] SMOKVINA HANZA S, MAROHN T, ILJKI D, et al. Artificial neural networks - based prediction of hardness of low-alloy steels using specific jominy distance[J]. Metals, 2021, 11(5): 714.

[6] 邹广华. 焊接冷却时间 $t_{8/5}$ 的计算与分析[J]. 石油化工设备, 1997, 26(4): 18-22.

[7] 机械电子工业部哈尔滨焊接研究所. 国产低合金钢焊接 CCT 图册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.