

文章编号:1006-0456(2021)02-0158-07

基于层次分析法的 MIG 焊焊缝几何形貌监测

马国红^{1a,1b},洪蕾^{1a,1b},李健^{1a,1b},余乐盛^{1a,1b},何银水^{1c},肖文波²

(1.南昌大学 a.机电工程学院,江西 南昌 330031;b.江西省轻质高强结构材料重点实验室,江西 南昌 330031;
c.资源环境与化工学院,江西 南昌 330031;2.南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,江西 南昌 330063)

摘要:焊缝的几何形貌直接决定了其残余应力分布,从而影响焊接构件的质量。为了利用焊接参数控制镀锌钢板 MIG 焊的焊缝成形,提出了一种结合反向传播神经网络和层次分析法的策略。通过图像处理技术提取了焊缝的特征点并计算出特征参数。通过大量焊接实验分析了焊接工艺参数和焊缝几何形貌参数之间的关系,并构造出反向传播神经网络预测模型。当模型的期望值与焊接实验值之间存在较大误差时,采用层次分析法来确定需要调整的焊接参数。结果表明,该决策方法可用于在线调整焊接参数以获得期望的焊缝,为实现焊接过程的数字化和智能化奠定了良好的基础。

关键词:MIG 焊;焊缝几何形貌;视觉传感;图像处理;层次分析法

中图分类号:TG409

文献标志码:A

Research on the weld geometry monitoring of MIG welding based on analytic hierarchy process

MA Guohong^{1a,1b}, HONG Lei^{1a,1b}, LI Jian^{1a,1b}, YU Lesheng^{1a,1b},
HE Yinshui^{1c}, XIAO Wenbo²

(1a.School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 1b.Key Laboratory of Lightweight and High Strength Structural Materials of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 1c.School of Resources, Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2.Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The geometry of the weld directly determines its residual stress distribution and thus affects the quality of welded components. In order to use welding parameters to control the weld formation of galvanized steel sheet MIG welding, a strategy of quality monitoring combined with back propagation neural network and analytic hierarchy process was proposed. The feature points of the weld were extracted through image processing technology and the feature parameters were calculated. The relationship between welding process parameters and weld geometry parameters was analyzed through a large number of welding experiments, and a back propagation neural network prediction model was constructed. When there was a large error between the expected value of the model and the actual value of the welding experiment, the analytic hierarchy process was applied to determine the welding parameters that need to be adjusted. The research results showed that the decision-making method could be used to adjust welding parameters online to obtain the desired weld seam, which laid a good foundation for the realization of digital and intelligent welding process.

Key Words: MIG welding; weld geometry; visual sensing; image processing; analytic hierarchy process

收稿日期:2020-12-08。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51665037);江西省轻质高强结构材料材料重点实验室资助项目(2017BCD40003);南昌航空大学无损检测教育部重点实验室资助项目(EW201980090)。

作者简介:马国红(1975—),男,教授,博士生导师,178516009@qq.com;通信作者:何银水(1979—),男,讲师,273229497@qq.com。

引文格式:马国红,洪蕾,李健,等.基于层次分析法的 MIG 焊焊缝几何形貌监测[J].南昌大学学报(工科版),2021,43(2):158-165.

随着工业的快速发展,人们对材料的耐腐蚀性提出了更高的要求。镀锌钢板因其良好的抗腐蚀性和成本效益在汽车、船舶、建筑等行业得到了广泛的应用^[1-2]。在焊接的过程中,焊接质量可以通过电弧声、弧光和电流等信号来判断^[3]。但是镀锌钢板在焊接时,表面锌蒸发会使焊接过程变得不稳定。干扰噪声会增加焊接信号采集和质量监测的难度^[4]。为了避免干扰信号的影响,结构简单、小体积的激光视觉传感器已经在工业中得到了成熟的应用^[5]。激光视觉传感技术利用激光三角测量原理测量焊缝尺寸,这比人工手动测量焊缝几何尺寸的精确率更高。激光器在使用时分为斜射型和直射型。当激光照射到母材和焊缝金属表面时,产生代表当下焊缝轮廓的激光条纹。CCD 捕获焊缝的激光条纹图像经过一系列的图像处理算法便可以计算焊缝的几何形貌参数^[6]。

众所周知,焊接质量受焊接过程中的众多因素影响,且缺少数学方程表达此高度非线性过程^[6]。为获得理想的焊缝形貌,焊工会根据经验调整电流、电压、电弧高度、保护气体等参数。这不仅劳动强度大,还受工人情绪的影响。受仿生学中大脑认知机制启发的人工神经网络(artificial neural network, ANN)可以克服这些问题^[8]。大量的研究表明 ANN 有很强的非线性函数逼近能力,可用于拟合多个输入和输出变量之间的关系。如今已研发出的模型多种多样,其中应用最多的包括 ART、Radial Basis Function、Hopfield 和 BPNN。研究表明 BPNN 已经成功应用在焊接领域的多方面,如焊缝性能预测、接头形状分类、焊接过程控制。Manikya Kanti 等^[9]提出了 BPNN 用于预测的焊缝熔深和凸度指数。该模型的输入参数为峰值电流、脉冲频率、送丝速率、送丝速率/焊接速度比和板的厚度。Kim 等^[10]比较了误差反向传播算法和 Levenberg-Marquardt 近似算法训练的 BPNN 模型的训练效果,并根据焊道数、焊接电流、焊接电压和焊接速度这些关键工艺参数预测了焊缝宽度。分析发现 BPNN 模型具有依靠大规模数据集快速完成精确预测的能力,适用于弧焊的焊缝特征预测。然而,受到不确定环境因素的影响,焊接实验的实际值可能与模型的预测结果存在一定偏差。为了在线调整焊接参数以实现理想的焊缝几何形貌,层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)值得一试。AHP 于上世纪 70 年代被美国学者提出,是一种结合定性和定量分析的决策工具。它将决策的问题及其相关影响因素分为多个层次,方法

简单,适用于选择最佳方案,资源分配,解决冲突和优化问题^[11]。Liu 等^[12]通过 AHP 分析了焊缝形貌对接头疲劳性能的影响。Ravisankar 等^[13]用它决定出熔化极气体保护焊是 AA7075 高强度铝合金对接焊的最好焊接工艺。李强等^[14]则用它来判断工业生产中影响焊缝质量的各因素的重要程度。验证结果都表明 AHP 决策效果可靠。

文献调查发现,大多数焊接质量的检测方法都只适用于离线,目前没有学者提出结合视觉传感技术与决策经验以实现焊接质量在线监测的方案。本文提出了结合 BPNN 预测和 AHP 决策的方法用于镀锌钢板 MIG 焊焊接质量在线监测。该方法主要由 3 个阶段组成:阶段一,通过视觉传感和图像处理技术在线提取焊缝的特征参数熔宽和余高;阶段二,利用提取的特征参数与相应的电流、电压和焊接速度构建一个 BPNN,该模型用于预测与当前参数设置相对应的几何形貌;阶段三,利用 AHP 结合经验知识在线决策需要改变的焊接工艺参数,以获得更理想的焊缝。

1 实验系统和参数设置

实验使用的焊接平台包括图像采集系统和 MIG 焊接系统,如图 1 所示。图像采集系统主要由工业计算机(IPC),CCD 相机(WAT-902H2),窄带通滤光片(中心波长为 650 nm,带宽为 50 nm),中性减光片(透光率 0.1%和 50%),激光传感器(FU655AL30-HGD1465)等硬件和一个 VS 配置 OpenCV 开发的软件组成。MIG 焊接系统包括弧焊电源(华远 NB-350IGBT)、送丝机构(SB-10)、气瓶、焊枪和步进电机。步进电机用来控制焊接方向和焊接速度。

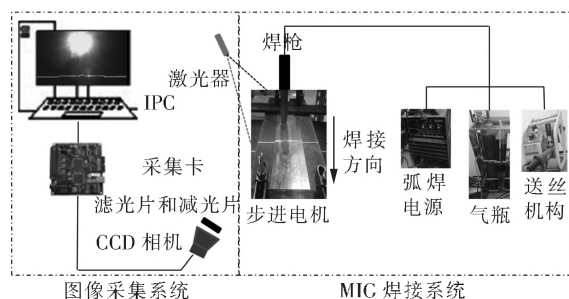


图 1 焊接平台

Fig.1 Welding platform

本实验使用的搭接材料是尺寸为 250 mm×50 mm×1 mm 的 Q235 热浸镀锌钢板。填充材料为直径 0.8 mm 的低碳钢焊丝。保护气体为质量分数大

于 99.9% 的高纯度氩气, 保护气流量为 $15\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。其他主要焊接参数如表 1 所示。

表 1 焊接参数
Tab.1 Welding parameters

焊接速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	电流/A	电压/V	喷嘴高度/ mm	激光器功率/ mW
5.0~7.0	70~120	22~28	18	500

2 激光条纹的预处理与特征点检测

图像处理操作通过 MATLAB 完成, 处理后的激光条纹被用于替代实际的焊缝形貌以进行后续的分析。因此, 图像处理算法的准确性、实时性和鲁棒性都非常关键。为了提取激光条纹特征参数, 本文提出了一套有效的图像处理算法, 如图 2 所示。具体图像处理算法流程包括激光条纹的提取和特征点的提取两部分。

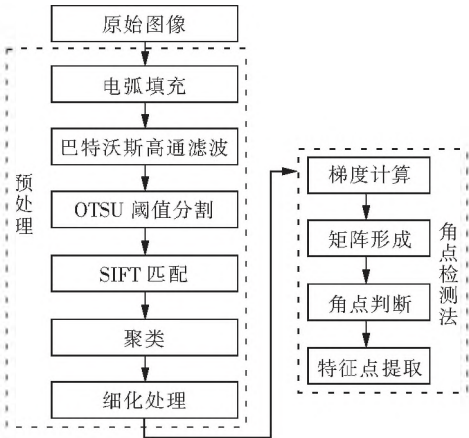


图 2 图像处理算法流程图

Fig.2 Flow of image processing algorithm

2.1 图像预处理

图 3 为用 CCD 相机采集的典型图像, 主要包括了弧光区和激光条纹区。激光条纹的轮廓需要经过一系列的图像预处理操作才能得到。图 4 是激光条纹提取的每个算法步骤的示例图。电弧与激光条纹

提取的目的无关, 因此需要被去除。roifill 函数可填充电弧区域且巴特沃斯高通滤波能有效消除填充边界。填充及滤波后的效果分别如图 4(a)、(b) 所示。为了完全分离激光条纹与背景, 需要对滤波后图像进行阈值处理。经过比较, 最终确定使用 OTSU 算法, 处理效果如图 4(c) 所示。镀锌钢板表面花纹导致材料对激光反射强度不一致, 因此激光条纹在阈值处理后轮廓线会不完整。形态学处理可以连接细小的缺口部分, 分析表明合适参数选择后的闭运算能取得最好的效果, 如图 4(d) 所示。为了进一步去除图像中的干扰点, 运用了尺度不变特征变换 (scale invariant feature transform, SIFT) 算法和聚类处理。SIFT 算法的作用是对干扰和焊后无明显干扰背景下采集并阈值化后图像进行匹配, 该算法的结果表现为一定数量的匹配点, 如图 4(e) 所示。随后, 这些匹配点可以作为图像聚类的依据, 如图 4(f) 所示。最终, 激光条纹被从激烈干涉的背景中准确提取, 如图 4(g) 所示。然而, 聚类后的激光条纹仍然相对较粗, 无法直接利用它提取所需的特征点。所以必须对激光条纹进行细化, 图 4(h) 是细化处理后的效果。

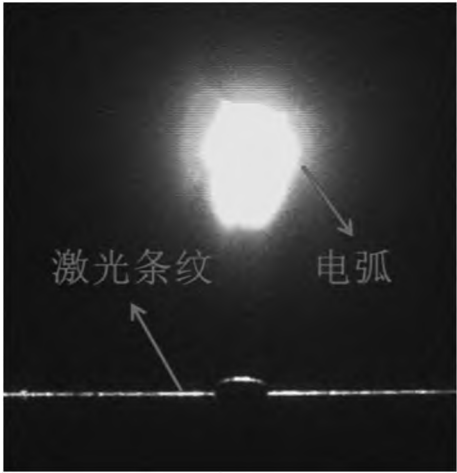
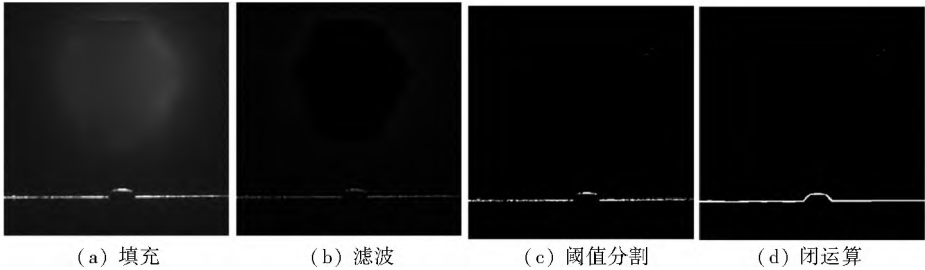


图 3 原始图像
Fig.3 Original image



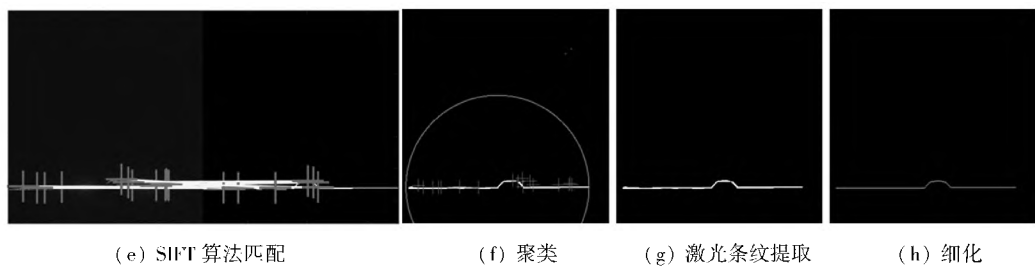


图 4 焊缝轮廓提取

Fig.4 Weld profile extraction

2.2 特征点检测与特征参数计算

Harris 角点检测法^[15-17]因算法简单,计算速度快,性能稳定而被广泛应用。它主要包括梯度计算、矩阵形成和角点判断 3 个步骤。在经过以上图像预处理阶段后,本研究先用 Harris 角点检测法从细化图像中提取到 5 个特征点,如图 5(a) 所示。然后,从左到右用 1、2、3、4、5 标记这些特征点,如图 5(b) 所示。焊缝的熔宽(W)和余高(H)可以表示为:

$$W=\sqrt{(x_4-x_2)^2+(y_4-y_2)^2} \tag{1}$$

$$H=\left|\frac{(y_4-y_2)(x_3-x_2)-(x_4-x_2)(y_3-y_2)}{\sqrt{(x_4-x_2)^2+(y_4-y_2)^2}}\right| \tag{2}$$

式中; $x_2、x_3、x_4$ 分别表示特征点 2、3、4 的横坐标; $y_2、y_3、y_4$ 则是特征点 2、3、4 的纵坐标。

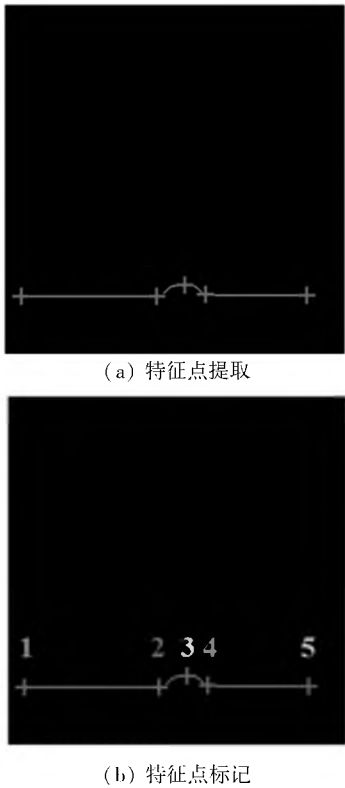


图 5 确定焊缝余高和熔宽的示例

Fig.5 Example of determining the weld reinforcement and weld width

3 预测与决策

3.1 余高熔宽与电流电压的关系

本研究通过控制变量法进行了 MIG 焊接实验,建立了焊缝形貌与重要工艺参数之间的定量关系。实验过程中保持其他焊接参数不变,仅改变焊接电流可获得获得电流变化与焊缝余高变化之间的关系,如图 6(a) 所示。同样仅改变焊接电压,可获得焊接电压变化与焊接熔宽变化之间的关系,如图 6(b) 所示。数据拟合的结果表明平均每单位电流的变化导致余高改变 0.12 个像素,而每单位电压的变化导致熔宽改变 4.29 个像素。

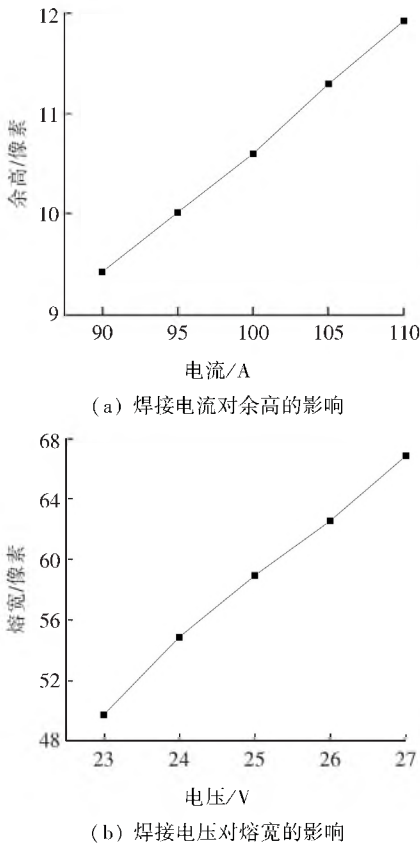


图 6 焊接参数的改变对焊缝几何形貌的影响

Fig.6 Effect of changes of welding process parameters on weld geometry

3.2 BPNN 模型预测

BPNN 是一种前馈神经网络,其结构如图 7 所示。当输出层无法在正向传播中达到预期效果时,则进行误差反向传播。3 层 BPNN 模型的输入参数为焊接电流、焊接电压和焊接速度,因此输入层节点数为 3。输出参数为余高和熔宽,因此输出层节点数为 2。根据经验公式(3) 计算得出该模型的隐藏层节点数在 3~12 之间。

$$h = \sqrt{m+n} + \alpha \tag{3}$$

式中: h 为隐藏层节点数; m 为输入层节点数; n 为输出层节点数; α 为 1~10 之间的常数。

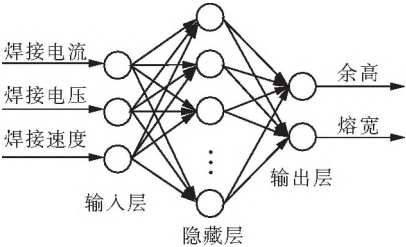


图 7 BPNN 的结构
Fig.7 Structure of BPNN

本研究基于 360 组实验样本数据完成了 BPNN 的构建,经过测试证明隐藏层节点数为 12 时取得最好的拟合精度,高达 95.83%。当实验焊缝与模型预测余高差在 ± 0.5 像素范围内且熔宽差在 ± 5 像素范围内就可以认为焊缝获得了预期的效果。为了验证模型的准确性,一组未用于训练模型的焊接参数电流 100 A,电压 25 V,焊接速度 $5.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 被选择进行了焊接测试。图 8 展示了焊接后获得的焊缝。每间隔 1 cm 取一个测量点,提取该处激光条纹并计算焊缝高度和焊缝宽度。将所选的 12 个测量点的平均高度代表整个焊缝的余高,平均宽度代表整个焊缝的熔宽。测量计算的焊缝实际余高和熔宽分别为 10.41 像素和 58.64 像素,BPNN 模型预测的焊缝余高和熔宽分别为 10.72 像素和 60.87 像素。模型预测和实验焊缝的余高差为 0.31 像素,熔宽差为 2.23 像素。很显然本组焊接参数获得的实验计算与模型预测值的差值在允许范围之内。



图 8 实验焊缝
Fig.8 Experimental weld

3.3 AHP 模型决策

由于焊接过程受环境等不确定因素影响,实验实际几何形貌值和模型预测值之间的差并不总能在误差范围内。因此,本文设计了基于焊接经验的 AHP 模型,如图 9 所示。最高层是决策需要解决的问题,可能是改变熔高也可能是改变熔宽。中间层是决策的准则,由板厚 B_1 、焊接位置 B_2 和焊丝直径 B_3 3 个因素组成。最底层是决策时备选方案包括调整电流 C_1 、电压 C_2 和焊接速度 C_3 。当实际值与预测值存在较大误差时,模型决定调整焊接参数,让决策目标的实际值和预测值之间的差值减小到允许范围内,以实现理想的焊接效果。

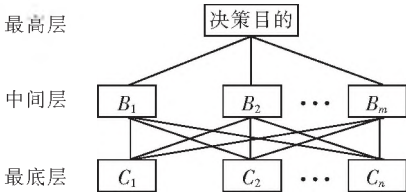


图 9 层次分析法决策模型
Fig.9 AHP decision model

当焊接电流为 76 A,焊接电压为 22 V,焊接速度为 $5.83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,获得的实验焊缝余高和熔宽分别为 8.65 像素和 45.91 像素,如图 10 中焊缝 A 所示。而模型预测的焊缝高度和宽度分别为 9.22 像素、47.34 像素。尽管焊缝熔宽的实验值与期望值的误差仅 1.43 像素,远小于 5 像素的误差允许范围,余高实验值与期望值误差超出了 0.5 像素的误差允许范围,为 0.57 像素。故判断焊缝 A 超出误差范围。AHP 最高层决定改变焊缝余高,从最高层向最底层进行决策,过程如下。

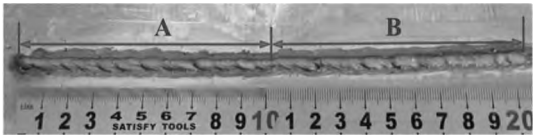


图 10 焊缝
Fig.10 Weld

1) 最高层的余高支配着中间层的所有因素,获得判断矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/4 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算得出一致性指标 Q 等于 0.042 9。三阶

矩阵的平均随机性指标 I 为 0.58。因此,一致性比率 R 等于 0.074 0。因为 R 小于 0.1,故判断矩阵 B 通过了一致性检验。然后权重 W_B 被求出等于 $[0.673\ 8, 0.100\ 7, 0.225\ 5]$ 。

2) 中间层所有因素都关联着最底层的所有因素,获得判断矩阵 C_1 、 C_2 和 C_3 :

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 4 \\ 1/3 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 2 \\ 5 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

同样,计算出的 R_1 、 R_2 和 R_3 分别为 0.003 1、0.015 7和 0.081 0,均小于 0.1。故判断矩阵 C_1 、 C_2 和 C_3 均通过一致性检验。最终计算的相应权重 W_1 、 W_2 和 W_3 分别为 $[0.648\ 3, 0.122\ 0, 0.229\ 7]$ 、 $[0.319\ 6, 0.558\ 4, 0.122\ 0]$ 和 $[0.186\ 5, 0.687\ 0, 0.126\ 5]$ 。总一致性比率被计算出来是 0.022 3,也小于 0.1,故总排序一致性检验通过,总权重为 $[0.511\ 1, 0.293\ 3, 0.195\ 6]$ 。各备选方案的权重 $C_1 > C_2 > C_3$,所以 AHP 模型最后做出调整焊接电流的决策。

在决策备选方案确定后,AHP 触动相应的参数调整过程,将焊接电流增加了 4 A。新产生的焊缝实际余高和熔宽分别为 9.11 像素和 46.27 像素,如图 10 中焊缝 B 所示。余高和熔宽的误差都进一步减小,分别变成了 0.11 像素和 1.07 像素。调整参数后的焊缝 B 较调整参数前的焊缝 A 实现了预期效果。图 11(a)和图 11(b)分别展示了焊缝 A、B 各测量点余高和熔宽的实验值。

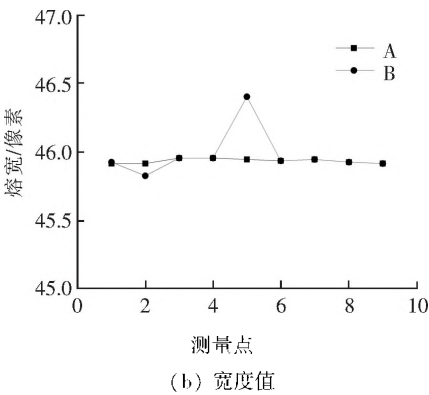
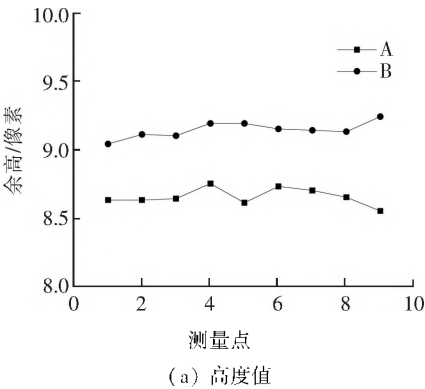


图 11 真实值
Fig.11 Experimental values

4 结论

根据大量的镀锌钢板 MIG 焊搭接实验数据,建立了焊缝几何形貌特征参数与焊接工艺参数之间的有效 BPNN 模型,并定量分析了余高与电流、熔宽与电压的关系。提出的 AIIP 模型,可以在 BPNN 预测值和实际几何形貌特征值的误差过大时,对焊接工艺参数进行决策。实验结果表明,所提出的方法可用于在线调整焊缝几何形貌,进而控制焊接质量。根据这项工作获得的结果,未来可以将其应用到其他焊接方法。另外,图像处理算法的进一步改进将确保更准确和可靠的预测结果。

参考文献:

[1] 林浩磊,沈洁,张延松,等.汽车用镀锌钢板电阻点焊可焊性的研究[J].汽车工程,2011,33(6):549-552.

[2] MONTEMOR M F,CABRAL A M,ZHELUDKEVICH M L,et al.The corrosion resistance of hot dip galvanized steel pretreated with Bis-functional silanes modified with micro-silica[J].Surface and Coatings Technology,2006,200(9):2875-2885.

[3] TAKATAMA Y,CHO H,MATSUO T.Detection of acoustic emission (AE) from zinc embrittlement cracking during welding using optical fiber AE monitoring system[J].Journal of Nondestructive Evaluation,2012,31(3):208-214.

[4] MUNIR N,PARK J,KIM H,et al.Performance enhancement of convolutional neural network for ultrasonic flaw classification by adopting autoencoder[J].NDT & E International,2020,111:102218.

[5] 孔萌,张杰,张纶昭,等.基于线结构光传感的 T 型角焊缝跟踪方法[J].电焊机,2018,48(10):101-104.

[6] HE Y S,CHEN H B,HUANG Y M,et al.Parameter self-optimizing clustering for autonomous extraction of the weld

- seam based on orientation saliency in robotic MAG welding[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, 83(2): 219-237.
- [7] 沈威, 陈俐, 胡伦骥, 等. 人工神经网络在焊缝形状预测中的应用现状与发展趋势[J]. *电焊机*, 2005, 35(4): 1-5.
- [8] 顾新盛, 姚润钢, 孔红雨, 等. 人工神经网络在焊接中的应用研究和发展[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(4): 72-76.
- [9] MANIKYA KANTI K, SRINIVASA RAO P. Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 200(1/2/3): 300-305.
- [10] KIM I, SON J, LEE S, et al. Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004, 20(1): 57-63.
- [11] VAIDYA O S, KUMAR S. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(1): 1-29.
- [12] LIU X, GONG S, LEI Y. Investigation on the effect of electron beam weld shape on fatigue performance of thickness titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011(S4): 125-129.
- [13] RAVISANKAR V, BALASUBRAMANIAN V, MURALIDHARAN C. Selection of welding process to fabricate butt joints of high strength aluminium alloys using analytic hierarchic process[J]. *Materials & Design*, 2006, 27(5): 373-380.
- [14] 李强, 张静, 肖瑞金, 等. 长输管道对接环焊缝质量问题追因分析: 基于层次分析法(AHP)[J]. *焊管*, 2007, 30(1): 65-69.
- [15] 赵悟, 段永璇, 段会川, 等. SIFT 与 Harris 提取图像特征点的分析研究[J]. *计算机技术与发展*, 2018, 28(12): 62-66.
- [16] 崔乐, 李春, 李英. Harris 算法和 Susan 算法的实现及分析[J]. *计算机与数字工程*, 2019, 47(10): 2396-2401.
- [17] 李冰, 吕进来, 郝晓丽. 基于模板边缘的自适应 Harris 角点检测算法[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(11): 40-44.
- (上接第 157 页)
- [15] SHAO X, NAGHDY F, Du H. Reliable fuzzy H_∞ control for active suspension of in-wheel motor driven electric vehicles with dynamic damping[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 87: 365-383.
- [16] CHEN C, CHENG Y, MENG F. Optimum design of a novel in-wheel suspension of the electric wheel[C]//IEEE 3rd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). Taiyuan, China, 2019: 106-110.
- [17] JIN L, YU Y, FU Y. Study on the ride comfort of vehicles driven by in-wheel motors[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, 8(3): 1-9.
- [18] WEI X, ZHU M, JIA L. A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(7): 982-1003.
- [19] OLIVEIRA K F, CÉSAR M B, GONÇALVES J. Fuzzy based control of a vehicle suspension system using a MR damper[C]//The 12th Portuguese Conference on Automatic Control. Guimaraes, Portugal, 2016: 571-581.
- [20] MARINAKIS Y, MIGDALAS A, SIFALERAS A. A hybrid particle swarm optimization-variable neighborhood search algorithm for constrained shortest path problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 261(3): 819-834.
- [21] AGARWALLA P, MUKHOPADHYAY S. Efficient player selection strategy based diversified particle swarm optimization algorithm for global optimization[J]. *Information Sciences*, 2017, 397: 69-90.