

基于相关性分析和 SSA-BP 神经网络的铝合金电阻点焊质量预测

董建伟, 胡建明, 罗震

(天津大学, 材料科学与工程学院, 天津, 300350)

摘要: 基于电阻点焊过程中工艺信号特征, 在不同间距、不同间隙和不同间距与间隙 3 种条件下, 引入相关性分析方法分析工艺信号与熔核直径之间的相关性, 并建立基于麻雀搜索算法-BP 神经网络 (sparrow search algorithm-back propagation neural network, SSA-BP) 的电阻点焊质量预测模型, 将功率、焊接电流、焊接电压和动态电阻作为预测模型输入特征。结果表明, 经麻雀搜索算法优化后的 BP 神经网络在测试集上的决定系数 R^2 、均方误差 (mean-square error, MSE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 分别为 0.95, 1.55, 1.24 和 0.90, 均优于 BP 模型。获得了功率、焊接电流、焊接电压和动态电阻与熔核直径的映射关系, 可为焊接的工艺参数设计提供依据。

创新点: (1) 利用相关性分析提取的工艺信号与熔核直径的映射关系。
(2) 基于改进 SSA-BP 神经网络的电阻点焊熔核直径的预测模型, 预测精度达到 95%。

关键词: 电阻点焊; 熔核直径; 麻雀搜索算法; BP 神经网络; 相关性分析

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230226001

0 序言

电阻点焊工艺具有过程简单、生产效率高和机械化及自动化程度高等特点, 是广泛应用于汽车车身和航空航天结构的焊接加工工艺。原理可概括为在工件上下表面与两个电极之间施加大电流, 结合面接触电阻产生焦耳热使工件融化形成焊点^[1-3]。电阻点焊的焊点形核与成长在封闭的状态下进行, 无法直接进行检测。工厂经常利用剥皮、锤打等破坏性方法检验熔核的质量, 工作效率低。因为电阻点焊过程是力、热、电、磁、流的共同作用, 所以其熔核的形成与焊接过程信号之间存在内在联系^[4-5]。

Zhao 等人^[6] 利用从功率信号中提取的特征建立神经网络模型, 并将其有效应用于点焊质量的评价过程。Wan 等人^[7] 利用电压信号的特征作为神经

网络模型的输入, 成功预测点焊焊缝强度和熔核几何尺寸, 利用动态电阻测量与神经网络模型的结合进行小尺度电阻点焊的质量监测。赵大伟等人^[8] 利用电压信号监控点焊质量, 利用数据采集系统获取电压曲线, 从电压曲线提取 4 个特征值作为人工神经网络的输入, 试验证明预测输出的熔核直径与实测误差为 0.13 mm。Pashazadeh 等人^[9] 结合神经网络和多目标遗传算法预测焊接时间、焊接压力和焊接电流的最佳值。同时利用基于神经网络模型适应度函数的遗传算法预测工件最大强度。

麻雀搜索算法 (SSA) 是新兴的群智能优化算法, 算法的提出借鉴了麻雀群体寻找食物和逃避被捕猎的行为, 将不同麻雀个体进行分类, 以麻雀种群中寻找食物能力较强的个体称为发现者, 其持续搜索食物, 确定麻雀种群寻找食物的范围和路径。除发现者之外, 其它的个体追随发现者觅食, 被称为追随者, 两者之间在一定条件下可以发生转化。从麻雀种群中抽取一定比例的个体承担侦察警戒的任务, 称其为预警者^[10-13]。目前, 麻雀搜索算法已

被众多学者用于解决智能制造问题,即使是非焊接领域的研究人员,也可将自适应优化算法与遗传算法和粒子群算法进行比较来解决焊接加工过程中存在的问题,结果表明该算法误差率较低。采用麻雀搜索算法改进 BP 神经网络,引入 Logistic-Tent 混沌映射优化标准麻雀搜索算法,提高 BP 算法的全局搜索能力,从而增强优化性能,为探索电阻点焊熔核直径提供新的预测模型。

1 试验方法

1.1 试验设备

电阻点焊焊接试验使用商科 MDN-1200 中频逆变直流电焊机。额定功率为 1200 kW, 逆变频率 1000 Hz, 最大施加 65 kN 的电极力。工艺信号监测系统使用罗式线圈检测焊接电流信号, 利用连接在上下电极间的导线直接测量, 由导线输出的电压信号通过数据采集卡获得。

1.2 焊接条件

所用材料分别为 2219 铝合金和 5A06 铝合金, 尺寸分别为 400 mm × 300 mm × 7 mm 和 300 mm × 50 mm × 2 mm。力学性能如表 1 所示, 化学成分如表 2 所示。为研究不同焊接条件下的接头质量, 设置不同工件间隙 G 和间距 S , 模拟实际焊接情况, 如图 1 所示。利用在工件之间不同厚度的硅胶条模拟不同间隙。在不同的间隙试验中, 间距固定为 50 mm, 如图 1(a) 所示; 不同间距试验中间隙固定在 0 mm, 如图 1(b) 所示; 考虑不同间隙和间距共同影响设置图 1(c) 所示试验。

固定间距与固定间隙不同装配条件下对应

表 1 2219/5A06 的力学性能
Table 1 Mechanical properties of 2219/5A06

材料	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A (%)	弹性模量 E /GPa
2219	455	350	10	73
5A06	315	255	20	71

表 2 2219/5A06 的化学成分(质量分数, %)
Table 2 Chemical composition of 2219/5A06

材料	Al	Si	Fe	Cu	Mn
2219	92.8	0.06	0.17	6.30	0.31
5A06	93.31	0.06	0.13	0.03	—
材料	V	Zr	Zn	Ti	Cr
2219	0.1	0.15	0.02	0.07	—
5A06	—	—	0.02	0.05	—

的试验如表 3 和表 4 所示。不同间距和间隙条件下焊点数量如表 5 所示, 表 3、表 4 和表 5 焊点数量总计 450 个。试验工艺参数如图 2 所示, 设置包括焊接电流施加阶段和回火电流施加阶段的电流。焊接电流是影响熔核直径的主要因素, 熔核在焊接过程中经历形核和成长期两个阶段。回火电流的重要作用是保证熔核不会产生凝固裂纹, 从而形成均匀的组织。在施加焊接电流的同时, 电极力逐渐增大并达到稳定值, 该设置有利于获取更可观的初始接触电阻和充足的热量熔化工件。最后, 电极力进入维持阶段, 保证焊接不会产生飞溅、气孔等缺陷。

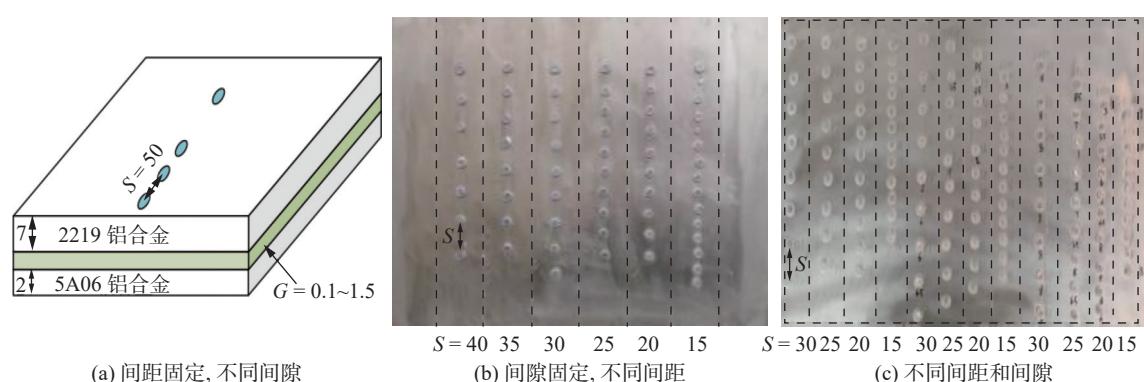


图 1 2219/5A06 工件焊接条件 (mm)

Fig. 1 Welding conditions of 2219/5A06 workpieces. (a) fixed spacing, different gaps; (b) fixed gap, different spacing; (c) different spacing and gap

表3 固定间距和不同间隙条件下焊点数量

Table 3 Fixed spacing and corresponding welding spots number under different gaps

装配条件	间隙G/mm	间距S/mm	焊点数量n(个)
1	0.1	50	15
2	0.2	50	15
3	0.3	50	15
4	0.4	50	15
5	0.5	50	15
6	0.6	50	15
7	0.8	50	15
8	1.0	50	15
9	1.5	50	15

表4 固定间隙和不同间距条件下焊点数量

Table 4 Fixed gap and corresponding welding spots number under different spacing

装配条件	间隙G/mm	间距S/mm	焊点数量n(个)
10	0	10	15
11	0	15	15
12	0	20	15
13	0	25	15
14	0	30	15
15	0	35	15
16	0	40	15
17	0	45	15
18	0	50	15

表5 不同间距和间隙条件下焊点数量

Table 5 The number of welding spots corresponding to different spacing and gaps

装配条件	间隙G/mm	间距S/mm	焊点数量n(个)
19	1	15	15
20	1	20	15
21	1	25	15
22	1	30	15
23	1.5	15	15
24	1.5	20	15
25	1.5	25	15
26	1.5	30	15
27	2	15	15
28	2	20	15
29	2	25	15
30	2	30	15

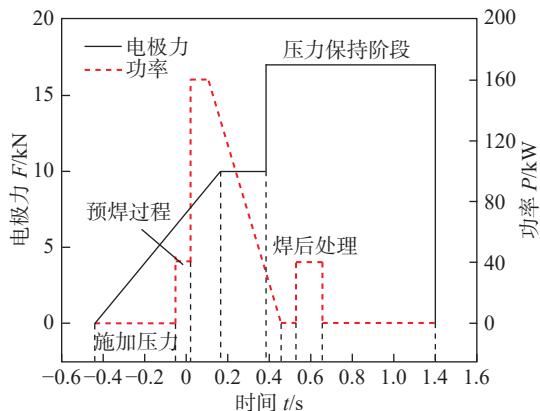


图2 铝合金点焊的工艺曲线

Fig. 2 Aluminum alloy spot welding process curves

2 结果与讨论

2.1 基于相关性分析的信号处理

试验总计450组,其中包含固定间距点焊135组、固定间隙点焊135组和不同间距和间距点焊180组。各组试验通过信号监测系统获取点焊工艺过程中的功率、焊接电流、焊接电压和动态电阻数据。试验所测熔核直径分布如图3所示,平均熔核直径为6.21 mm。

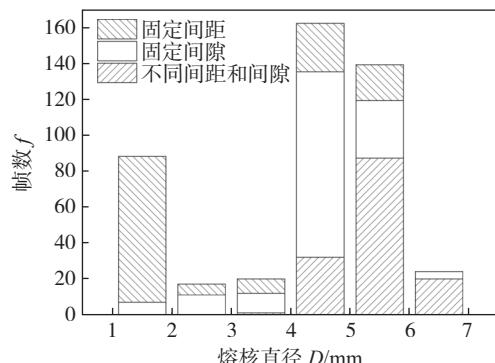


图3 不同焊接条件下熔核直径分布

Fig. 3 Nugget diameter distribution under different welding conditions

通过Logistic-Tent混沌映射对SSA进行优化改进,建立基于改进SSA-BP的电阻点焊熔核直径的预测模型,对比SSA-BP和BP模型的预测结果,改进的SSA-BP模型在熔核直径中准确率最高,可达95%。由此可知,改进的SSA-BP模型在电阻点焊过程中熔核直径预测准确度方面具有明显优势,可以为保障电阻点焊过程质量提供可靠的参考依据。在改进的SSA-BP模型用于熔核直径的预测研究中,选择了不同间距、不同间隙和不同间距与间

隙的样本数据作为训练样本,如果进一步丰富样本数据影响因素类型,那么预测效果将会更准确。**图 4** 所示为电阻点焊过程中经过小波滤波处理后的 297 个工艺信号曲线,可以直观的体现每个焊接工艺信号的变化过程。**表 6** 列出了提取工艺信号与熔核直径之间的相关系数,所有的相关系数数值均大于 0.5. 通过 450 组试验得出提取工艺信号与熔核直径之间的相关性,判定工艺信号与熔核直径存在一定映射关系。

2.2 改进的 SSA-BP 算法模型预测熔核直径

电阻点焊熔核直径与焊接过程中的功率、焊接电流、焊接电压和动态电阻之间存在相关关系,为研究熔核直径与工艺信号之间的映射关系,根据实时采集数据曲线的变化预测熔核直径,从而实现焊接质量监测的目的。BP 神经网络具有较强的非线性映射能力,被广泛应用于各种焊接参数的非线性预测中。从焊接工艺信号曲线中提取的 4 个特征量作为输入,点焊接头的熔核直径作为输出,建立的拓扑结构图如**图 5** 所示。

隐含层节点数根据经验公式^[14] 计算,经验公式为

$$h = \sqrt{n+m} + a \quad (1)$$

式中: h 为隐含层节点数; m 为输出层节点数; n 为输入层节点数; a 为常数,取值为 1~10。通过迭代循环确定为 7。

确定神经网络结构:输入层个数为 4,隐含层个数为 7,输出层个数为 1。在传统的 SSA 中,采用随机生成初始种群,生成的种群分布不均匀,会导致种群多样性减少,种群质量不高,从而影响算法的收敛速度^[15]。因此利用 Logistic-Tent 混沌映射模型对种群进行初始化,能够增强种群的多样性和分布均匀性。通过 Logistic-Tent 混沌映射模型对发现者、追随者和预警者位置进行更新,使其具有更强的全局寻优能力。Logistic-Tent 混沌映射原理^[16] 为

$$X_{n+1} = \begin{cases} \left[rx_n(1-x_n) + \frac{(4-r)}{2} x_n \right] \bmod 1, & x_n < 0.5 \\ \left[rx_n(1-x_n) + \frac{(4-r)(1-x_n)}{2} \right] \bmod 1, & x_n \geq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_{n+1} 为第 $n+1$ 次迭代结果; r 为相关控制因子; x_n 为第 n 次迭代结果。

当采用 BP 神经网络预测点焊熔核直径时,在训练集数量保持不变的条件下,影响预测精度的两项参数为 BP 神经网络初始化权重和阈值。利用改进的 SSA 对 BP 神经网络的权值和阈值进行优化,

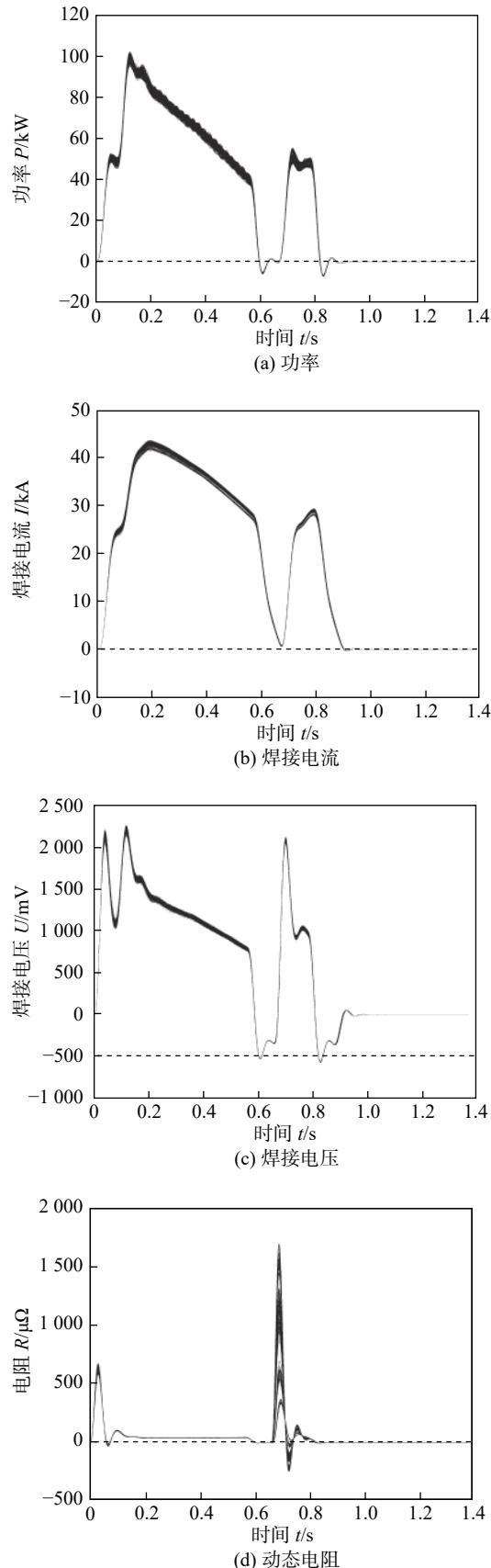


图 4 处理后的工艺信号曲线

Fig. 4 Processed signal curve. (a) power; (b) welding current; (c) welding voltage; (d) dynamic resistance

构建改进的 SSA-BP 优化模型。在改进模型中用种

表 6 工艺信号与熔核直径之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between process signal and nugget diameter

功率 P/kW	焊接电流 I/kA	焊接电压 U/mV	动态电阻 $R/\mu\Omega$
0.62	0.95	0.65	0.54

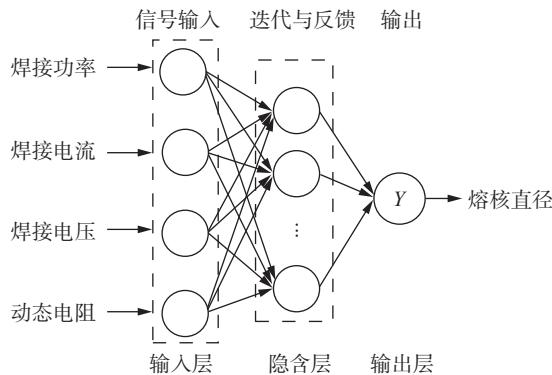


Fig. 5 Topological structure of BP neural network

群内每个麻雀个体反映 BP 神经网络的权值和阈值, 引入 Logistic-Tent 混沌映射算法, 增加麻雀种群的遍历性. 改进的 SSA-BP 模型预测流程如图 6 所示.

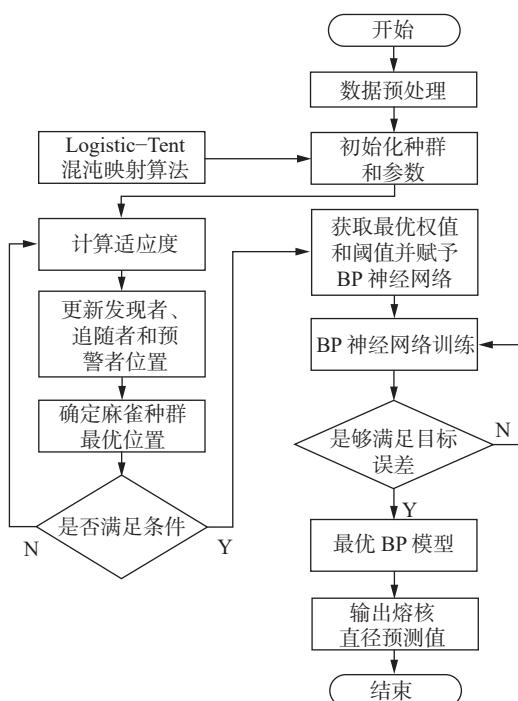


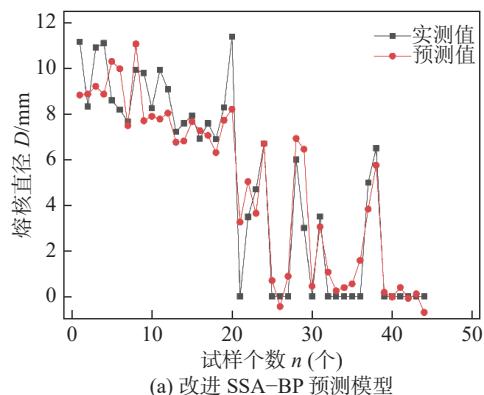
图 6 改进 SSA-BP 模型预测流程

Fig. 6 Improved SSA-BP model prediction process

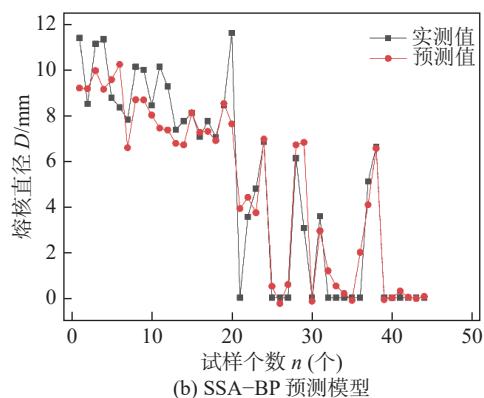
2.3 预测模型应用与分析

为验证改进 SSA-BP 预测模型的有效性和准确性, 将改进 SSA-BP 预测模型与 SSA-BP、BP 神

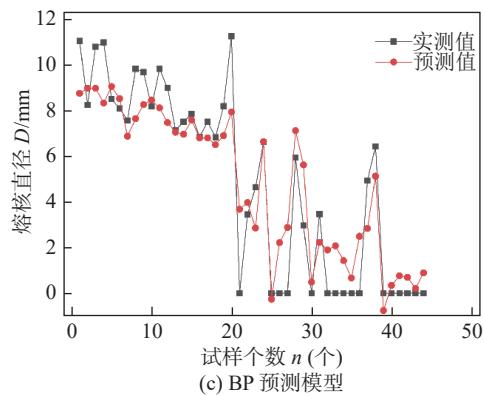
经网络模型利用十折交叉验证方式进行对比. 设置初始种群规模为 30, 最大迭代次数为 50 次, 种群预警者个数占种群数目的 20%, 预警值为 0.6. 训练样本预测值与实测值对比如图 7 所示. 选用 RMSE, MSE, MAE 和 R^2 作为预测模型的评价指标, 通过量化的数值对 3 个预测模型的准确性和稳定性进行评价. 预测结果与实测值对比如图 7 所示, 其中改进的 SSA-BP 预测模型预测结果与实测值的整体接近程度最高, SSA-BP 预测模型整体接近程度居中, BP 预测模型整体接近程度最低. 预测



(a) 改进 SSA-BP 预测模型



(b) SSA-BP 预测模型



(c) BP 预测模型

图 7 预测结果与实测值对比

Fig. 7 Comparison of predicted results and measured values. (a) improved SSA-BP prediction model; (b) SSA-BP prediction model; (c) BP prediction model

模型精度指标如表 7 所示, 对比 3 个预测模型可知, 改进的 SSA-BP 预测模型在决定系数、均方根误差、均方误差和平均绝对误差等 4 个评价指标上显著优于 BP 模型和 SSA-BP 预测模型。

表 7 预测模型精度指标
Table 7 Prediction model accuracy indicators

预测模型	评价指标			
	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	均方误差 MSE	平均绝对误差 MAE
改进 SSA-BP	0.95	1.24	1.55	0.90
BP	0.79	2.57	1.88	1.41
SSA-BP	0.85	1.58	2.52	1.27

改进的 SSA-BP 预测模型的决定系数 R^2 更接近于 1, 且比 BP 预测模型提高 0.16, 表明改进的 SSA-BP 预测模型预测结果拟合程度更高, 预测结果更准确。因此, 通过对比 3 个模型的预测性能指标, 该文提出的改进 SSA-BP 预测模型各项指标均为最优, 可满足电阻点焊熔核直径预测的需求。

3 结论

(1) 对比 SSA-BP 预测模型和 BP 预测模型的熔核直径预测结果, 改进的 SSA-BP 预测模型准确率最高, 达到 95%。改进的 SSA-BP 预测模型在电阻点焊过程中熔核直径预测准确度方面具有明显优势, 可以为电阻点焊过程质量提供可靠的分析。

(2) 在改进的 SSA-BP 预测模型用于熔核直径的预测, 选择不同间距、不同间隙和不同间距与不同间隙样本数据作为训练样本, 如果进一步丰富样本数据影响因素类型, 那么预测效果将更准确。

参考文献

- [1] 谢泽豪, 李建宇, 陈树海, 等. 钢/铝异种金属点焊研究进展综述 [J]. 航空学报, 2022, 43(2): 43–57.
Xie Zehao, Li Jianyu, Chen Shuhai, et al. Research progress in steel/Al-alloys dissimilar metals spot welding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 43–57.
- [2] 雷达, 王海林, 周彪, 等. 铝合金-低碳钢异种金属电阻点焊工艺研究 [J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 465–468.
Lei Da, Wang Hailin, Zhou Biao, et al. Research on resistance spot welding technology of aluminium alloy-low carbon steel dissimilar metal[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 465–468.
- [3] 夏裕俊, 李永兵, 楼铭, 等. 电阻点焊质量监控技术研究进展与分析 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 100–125.
Xia Yujun, Li Yongbin, Lou Ming, et al. Recent advances and analysis of quality monitoring and control technologies for RSW[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 100–125.
- [4] 徐靖, 万晓东, 王元勋, 等. 基于电极电压信号的微电阻点焊质量监测分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 51–54.
Xu Jing, Wan Xiaodong, Wang Yuanxun, et al. Electrode voltage based quality monitoring in small scale resistance spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(9): 51–54.
- [5] 宇慧平, 元月, 韩长录, 等. 不同工艺下超强钢点焊残余应力的试验分析 [J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 35–38.
Yu Huiping, Yuan Yue, Han Changlu, et al. Analysis of test about residual stress of super steel spot welding under different process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 35–38.
- [6] Zhao D W, Wang Y X, Liang D Z, et al. Performances of regression model and artificial neural network in monitoring welding quality based on power signal[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 9(2): 1231–1240.
- [7] Wan X, Wang Y, Zhao D. Quality evaluation in small-scale resistance spot welding by electrode voltage recognition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(5): 358–65.
- [8] 赵大伟, 王新阳, 王元勋. 钛合金微电阻点焊电极间电压质量检测技术 [J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 33–36.
Zhao Dawei, Wang Xinyang, Wang Yuanxun. Electrode voltage quality detection technology of titanium alloy micro resistance spot welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 33–36.
- [9] Pashazadeh H, Gheisari Y, Hamed M. Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(3): 549–559.
- [10] 欧阳城添, 朱东林, 邱亚娟. 融合聚类算法的改进麻雀搜索算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 392–397.
Ouyang Chengtian, Zhu Donglin, Qiu Yaxian. Improved sparrow search algorithm based on clustering algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 392–397.
- [11] 苏莹莹, 王升旭. 自适应混合策略麻雀搜索算法 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(9): 75–85.
Su Yingying, Wang Shengxu. Adaptive hybrid strategy sparrow search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(9): 75–85.
- [12] Xue J, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22–34.

- [15] 韩永全, 刘乐乐, 孙振邦, 等. 车用薄镀锌板 CMT 搭接工艺特性 [J]. 焊接学报, 2023, 44(2): 90 – 95.
Han Yongquan, Liu Lele, Sun Zhenbang, *et al.* Characteristics of CMT lap joint process for thin galvanized sheet for vehicles[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(2): 90 – 95.
- [16] Wang Y W, Chen J, Chen M A, *et al.* Process stability and forming accuracy on wire arc additive manufactured Al-Zn-Mg-Cu alloy with different electrode positive/electrode negative ratios of CMT advance process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(5): 352 – 361.
- [17] Zhang P L, Li G J, Yan H, *et al.* Effect of positive/negative electrode ratio on cold metal transfer welding of 6061 aluminum al-

loy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3-4): 1453 – 1464.

- [18] Pickin C G, Williams S W, Lunt M. Characterization of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 496 – 502.

[上接第 18 页]

- [13] Gharehchopogh F S, Namazi M, Ebrahimi L, *et al.* Advances in sparrow search algorithm: a comprehensive survey[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(1): 427 – 455.
- [14] 闫鹏程, 尚松行, 张超银, 等. 改进 BP 神经网络算法对煤矿水源的分类研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2288 – 2293.
Yan Pengcheng, Shang Songxing, Zhang Chaoyin, *et al.* Study on classification of coal mine water source by improved BP neural network algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2288 – 2293.
- [15] Tang X Y, Feng D F, Li K Q, *et al.* An improved BPNN predic-

tion method based on multi-strategy sparrow search algorithm[J]. Computers, Materials and Continua, 2023, 74(2): 2789 – 2802.

- [16] 彭业飞, 杨露菁, 黄璜. 基于 Logistic 和 Tent 双重映射的混沌粒子群算法 [J]. 数字技术与应用, 2015(12): 136 – 137.
Peng Yefei, Yang Lujing, Huang Huang. Logistic and tent chaotic particle swarm optimization[J]. Digital Technology & Application, 2015(12): 136 – 137.

第一作者: 倪允强, 学士, 高级工程师; 主要研究方向为复杂铸件快速铸造技术、金属增材制造技术; Email: niyq@weichai.com.

通信作者: 方学伟, 博士, 副教授, 硕士研究生导师; Email: xueweifang@xjtu.edu.cn.

(编辑: 汤明日)

(编辑: 汤明日)