

文章编号 1004-924X(017)09-2524-08

大功率盘形激光焊焊缝背面宽度预测

陈子琴, 高向东*, 王琳

(广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:提出了通过视觉传感获取焊接过程中的焊接特征信息并利用神经网络模型预测焊缝背面宽度的方法。利用大功率盘形激光器焊接了低碳钢 SS400 焊件, 在焊接过程中改变焊接功率、焊接速度和焊接路径, 并利用两台高速摄像机同步获取焊件正面和侧面出现的焊接特征信息。对获取的图像进行色彩空间转换、分层、滤波去噪和空域图像处理, 提取飞溅、熔池和金属蒸气等焊接特征信息, 观察焊接路径对各个特征的影响。最后, 建立了一个三层的 LMBP (Levenberg-Marquardt Back Propagation) 神经网络模型, 将提取的特征信息作为输入量, 预测焊缝的背面宽度。结果显示: 当熔透不稳定或出现未熔透状态时, LMBP 神经网络拟合度大于 0.83, 最大训练误差均值为 0.002 8 mm, 最大实际误差均值为 0.225 6 mm。试验结果表明所建立的预测模型具有良好的准确性和稳定性。

关键词:激光焊接; 焊缝宽度预测; 图像处理; 模式识别; 神经网络

中图分类号: TG441.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2524

Weld width prediction of weldment bottom surface in high-power disk laser welding

CHEN Zi-qin, GAO Xiang-dong*, WANG Lin

(School of Electromechanical Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: gaoxd666@126.com

Abstract: A method was proposed to obtain characteristic information in a welding process by visual sensing and to predict the weld width of weldment bottom surface by using a neural network model. A workpiece made from mild steel SS400 was welded by a high power disk laser. In welding processing, the weld conditions were changed, including laser welding power, welding speed and welding route and two high speed cameras were used to capture images containing characteristic information on both top surface and side surface of weldment simultaneously. In order to get a better characteristics extraction, the colour space of a RGB image was changed into NTSC (National Television Standards Committee) colour space, then both RGB image and YIQ image were separated into their colour components, filtered to denoising and processed in space domain. The weld characteristic information was extracted, including spatter, weld pool and metal vapour and the effect of weld route on characteristic information was researched. Finally, a LMBP (Levenberg-Marquardt Back Propagation)

收稿日期: 2017-03-06; 修订日期: 2017-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675104); 广东省科技计划基金资助项目 (No. 2016A010102015); 广州市科技计划基金资助项目 (No. 201510010089)

neural network model including three layers and one hidden layer was established. The obtained characteristic information was taken as input, and the weld width of weldment bottom surface was predicted. The results show that when the welding penetration is unstable or lack of penetration, the fitting degree of LMBP neural network is greater than 0.83, the maximum training error mean is 0.002 8 mm, and maximum actual error mean is 0.225 6 mm. It concludes that the prediction model has good accuracy and stability.

Key words: laser welding; weld width prediction; image processing; pattern recognition; neural network

1 引言

焊接过程中焊缝熔透的状态对焊件成型质量的直接影响,是衡量焊接质量的重要指标^[1-2]。然而对熔透的状态进行直接检测的成本太高,并且在深熔焊接过程中存在的大量噪声干扰会使得检测变得不准确。由于在深熔焊接过程中出现的各种焊接特征与焊接熔透的状态与匙孔的形态均有直接的关系^[3-5],所以目前主要是通过各种传感器采集焊接过程中出现的光、热和声音等信息特征,对熔透的状态进行间接的检测和判断^[6-8]。

近年来,在对熔透状态的研究中,人们发现:在焊接过程中,当形成稳定的匙孔熔透模式时,焊接过程稳定且可以得到良好的焊接成型质量,焊件的反面会形成均匀的焊缝;如果出现未熔透或者过熔透的状态,焊接过程不稳定且会出现各种焊接缺陷,焊件的反面则不能形成均匀的焊缝^[9-10]。因此,焊件反面的焊缝可以反应出熔透的状态、焊接过程的稳定性以及焊件质量的好坏。

本文用两台高速摄像机作为图像信号传感器以获取焊接过程中出现的各种焊接特征,运用图像处理和模式识别算法对特征信息进行提取,建立 LMBP (Levenberg-Marquardt Back Propagation)神经网络,将得到的特征信息作为神经网络的输入,对焊件反面的焊缝宽度进行预测,通过预测结果与实际焊缝宽度进行对比来验证所建立神经网络的准确性。

2 大功率盘形激光焊接试验

2.1 试验平台

大功率盘形激光焊接试验平台如图1所示。大功率盘形激光焊接机(Trumpf TurDisk 16002)的最大激光功率为16 kW,激光波长为1 030 nm。

在焊接过程中,用两台高速摄像机作为获取图像信息的传感器,分别同步获取焊件正面和侧面的焊接特征信息。其中,单色高速摄像机配置红外-可见滤光片,获取焊接过程中焊件正面熔池、金属蒸气和飞溅的信息特征;彩色高速摄像机配置可见光滤光片,获取焊接过程中焊件侧面熔池、飞溅和匙孔的特征信息。

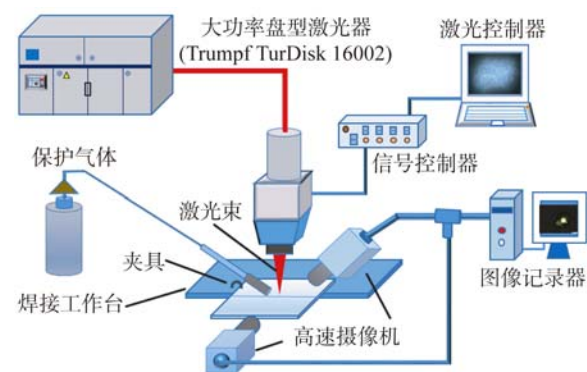
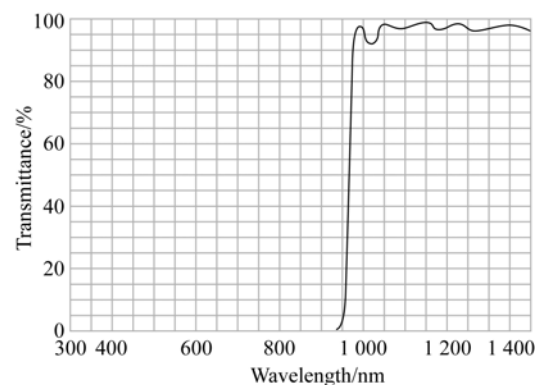


图1 装置示意图

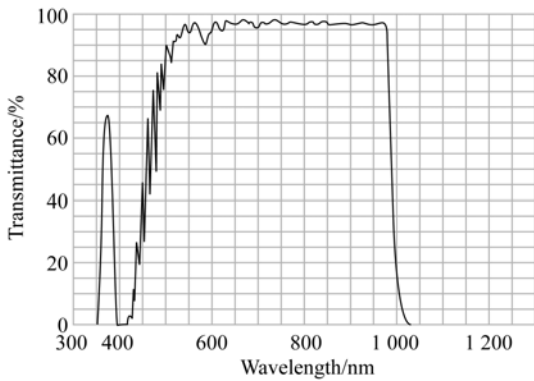
Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

滤光片透光率如图2所示。单色高速摄像机获取红外-可见光图像,安置红外滤光片和可见光滤光片1;彩色高速摄像机获取可见光彩色图像,安置可见光滤光片2。

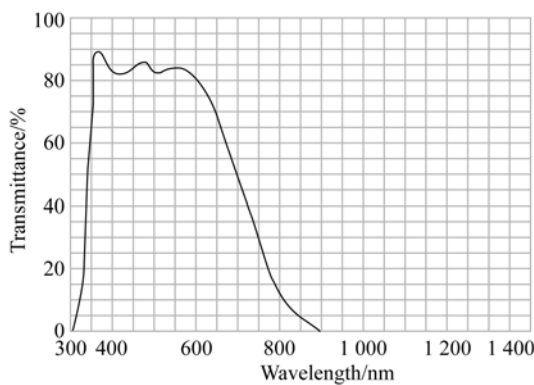


(a) 红外滤光片

(a) Infrared filter



(b)可见光滤光片 1
(b)Visible light filter 1



(c)可见光滤光片 2
(c)Visible light filter 2

图 2 滤光片透光率

Fig. 2 Light transmittance curves of filters

2.2 试验条件

设定两条焊接路径,第一条焊接路径横跨焊缝,并且焊接的起始位置和终止位置分别在焊缝的两侧,距离焊缝 2 mm;第二条焊接路径对中焊缝,如图 3 所示。

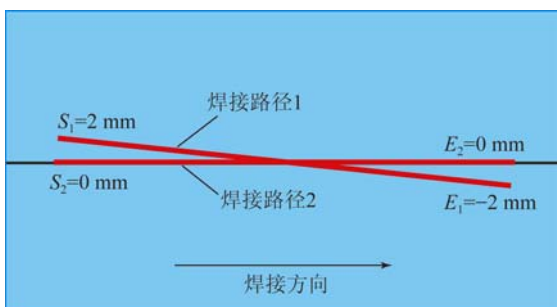


图 3 焊接路径

Fig. 3 Laser welding routes

试验材料为低碳钢 SS400,焊件的尺寸为

150 mm×60 mm×6 mm(长×宽×厚),其化学组成成分如表 1 所示。

表 1 SS400 的化学组成成分

Tab. 1 Constituents of SS400 (%)

成分	C	P	S	Mn
含量	—	≤0.05	≤0.05	—

氩气作为保护气体,设置气体流量为 30 L/min,喷嘴和水平面成 45°的夹角。设置总焊接长度为 120 mm,激光焦距为距焊件表面 -2 mm,焊缝间隙为 0.05 mm,焊接激光功率为 3、4 和 5 kW,焊接速度为 0.6、1.0 和 1.5 m/min,共 10 组试验,试验条件如表 2 所示。

表 2 焊接试验条件

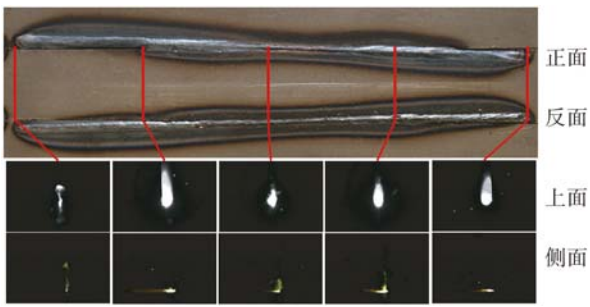
Tab. 2 Welding test conditions

序号	焊接功率/kW	焊接速度/(m·min ⁻¹)	焊接路径
1		0.6	1
2	3	1	1
3		1	2
4		0.6	1
5		1	1
6	4	1.5	1
7		1	2
8		1	1
9	5	1.5	1
10		1	2

3 获取焊接特征信息

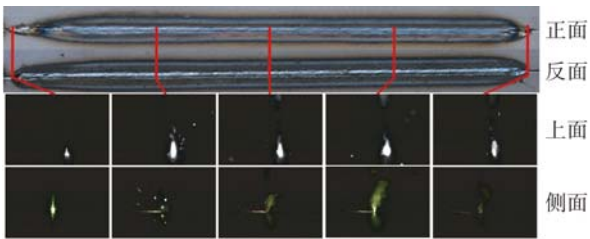
3.1 获取焊接图像

以焊件 5 和 7 为例,试验条件为焊接功率 4 kW,焊接速度 1 m/min,不同的焊接路径,在焊接过程中获取的焊件正面红外-可见光图像与侧面彩色图像,以及焊件实物,如图 4 所示。



(a)焊件 5

(a)Weldment 5



(b)焊件 7

(b)Weldment 7

图 4 焊件正反面实物图及高速摄像机获取的焊接图像
Fig. 4 Images on front and back of weldment and captured by high-speed cameras

3.2 提取焊接特征

由于获取的侧面焊接特征图像是彩色图像,包含很多特征信息以及噪声干扰,为了更准确地提取各个特征信息,将图像由 RGB 色彩空间转换到美国国家电视标准委员会(National Television Standards Committee, NTSC)色彩空间,它的主要优势是灰度信息和彩色数据是分离开的。在 NTSC 格式中,图像数据由三部分组成:亮度(Y)、色调(I)和饱和度(Q),其中亮度分量描述灰度信息,其他两个分量携带电视信号的彩色信息。YIQ 分量是通过线性变换从一幅图像的 RGB 分量得到的^[11],如公式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.229 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对采集到的原图像进行剪裁,然后从 RGB 色彩空间转换到 NTSC 色彩空间,转换后的图像如图 5 所示。

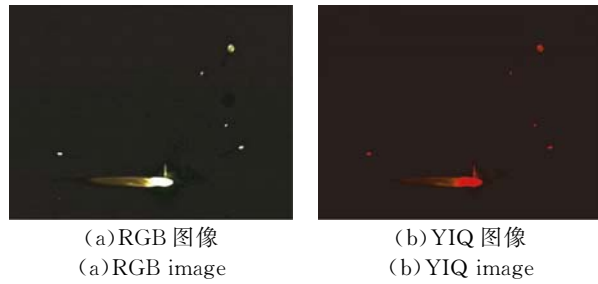


图 5 RGB 图像转换为 YIQ 图像

Fig. 5 YIQ image transformed from RGB image

为了准确快速地提取各个特征信息,将 RGB 图像和 YIQ 图像进行分解,分解后如图 6 所示。

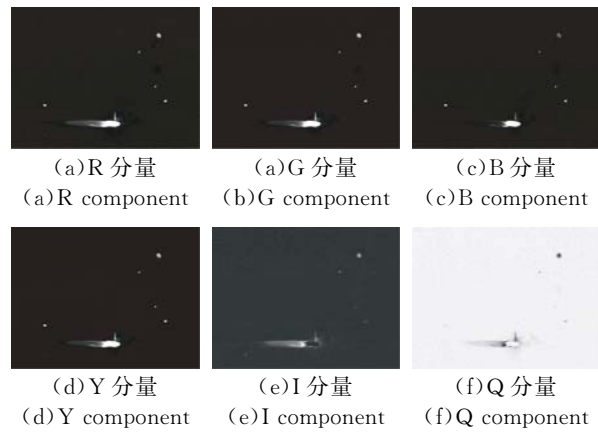


图 6 RGB 图像和 YIQ 图像的分量

Fig. 6 Components of RGB image and YIQ image

通过对比上述 6 个分量,选取 Y 分量提取飞溅特征信息,选取 I 分量提取金属蒸气特征信息,选取 B 分量提取熔池特征信息。针对各个特征选取包含特征信息的部分,通过选取合适的阈值将图像转换成二值图像,之后进行滤波去噪,用空域图像处理方法来获取各个特征信息,如图 7 所示。

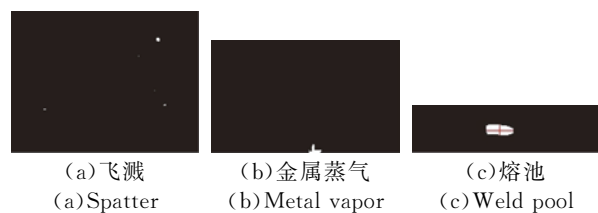


图 7 焊件侧面特征信息提取

Fig. 7 Characteristic extraction of weldment side face

以上提取的特征信息有飞溅个数 SN、飞溅面积 SA、金属蒸气面积 VA、熔池面积 PA、熔池短径 L_1 (熔池横向最大直径)和熔池长径 L_2 (熔池纵向最大直径)。

焊接过程中由单色摄像机获取的焊件上表面的图像是红外-可见光图像,截取包含有特征信息的部分作为研究对象转换为灰度图像。选取合适的阈值将灰度图像转换成二值图像,用维纳滤波算法和中值滤波算法对图像进行滤波去噪,之后对图像进行空域图像处理,得到上表面包含的信息特征。具体过程如图 8 所示,提取的特征信息有熔池面积 GPA、熔池周长 GP 和飞溅个数 GSN。

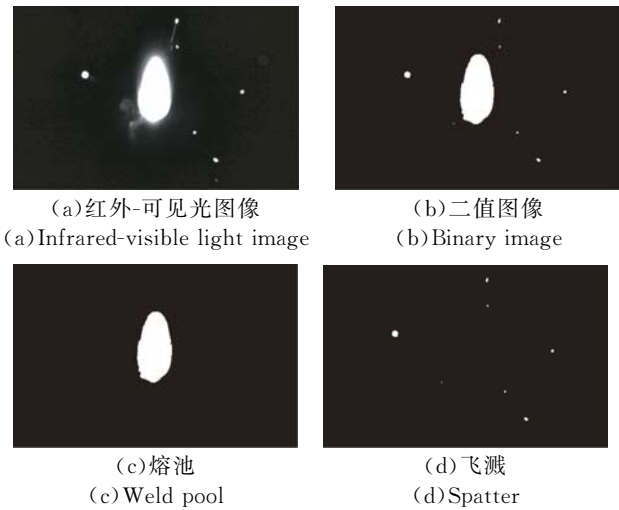
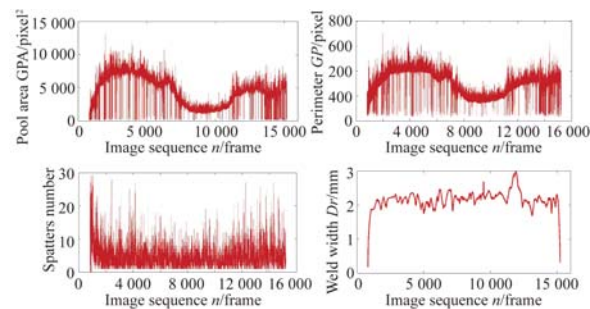


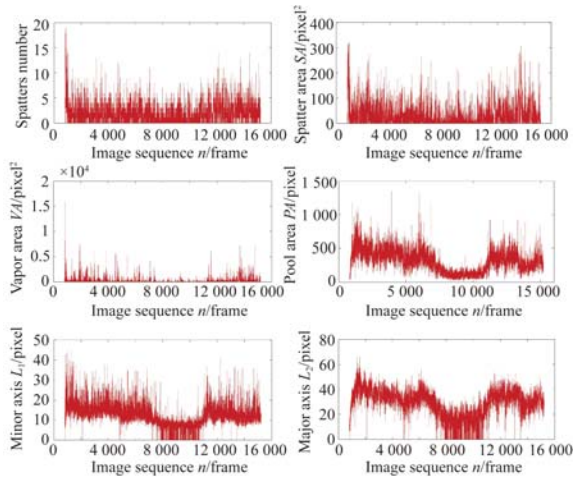
图 8 焊件上表面特征信息提取

Fig. 8 Characteristic extraction of weldment top face

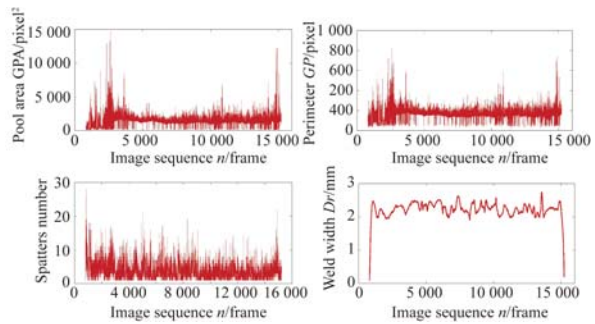
焊件反面熔池宽度由焊件实物图提取得到。第 5 组试验和第 7 组试验提取的特征序列图如图 9 所示,其中,飞溅面积、熔池面积和熔池周长的单位为像素,实际焊缝宽度单位为毫米。



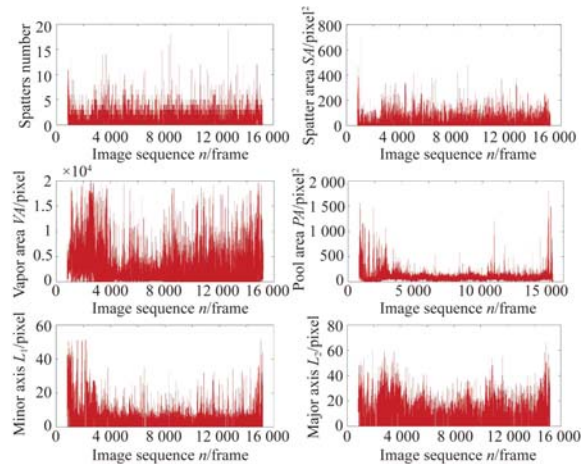
(a)焊件 5 上表面特征信息及实际焊缝背面宽度提取
(a)Characteristics of weldment 5 top surface and real weld width



(b)焊件 5 侧面特征信息
(b)Characteristics of weldment 5 side face



(c)焊件 7 上表面特征信息及实际焊缝背面宽度提取
(c)Characteristics of weldment 7 top surface and real weld width



(d)焊件 7 侧面特征信息
(d)Characteristics of weldment 7 side face

图 9 焊件特征信息序列

Fig. 9 Characteristics sequence of weldment

4 神经网络预测模型

4.1 建立神经网络

L-M 算法是梯度下降法与高斯-牛顿法的结

合,既有高斯-牛顿法的局部收敛性,又具有梯度法的全局特性,在一定程度上克服了 BP(Back Propagation)网络收敛速度慢和易陷入局部最小点等问题。这里用 LMBP 神经网络算法对焊接特征进行预测。

建立一个 9 输入 1 输出的 LMBP 神经网络,其结构如图 10 所示。设置输入神经元为 10 个, S 型正切函数作为输入传递函数,输出神经元为 1 个, S 型对数函数作为输出传递函数。用提取的 9 组特征作为输入,分别是焊件上表面提取到的熔池面积、熔池周长和飞溅个数,以及焊件侧面提取到的飞溅个数、飞溅面积、金属蒸气面积、熔池面积、熔池短径和熔池长径,对焊件反面焊缝宽度进行预测。

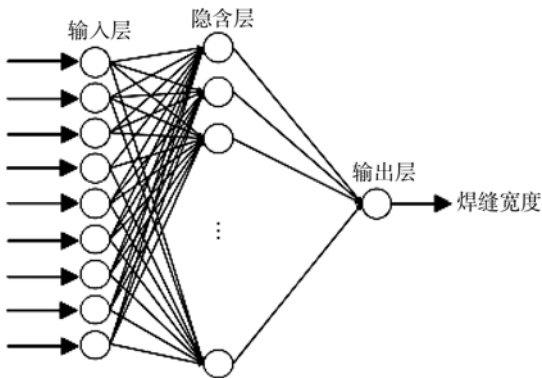
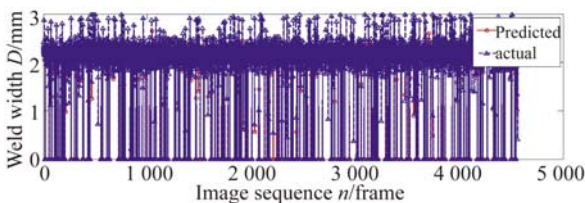


图 10 LMBP 神经网络结构图

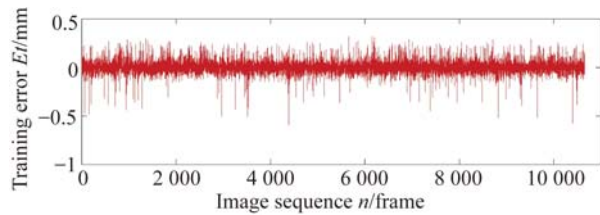
Fig. 10 Structure of LMBP neural network

焊接速度为 0.6 m/min 和 1 m/min 时,高速摄像机拍摄速率为 2 000 frame/s,焊接速度为 1.5 m/min 时,高速摄像机的拍摄速率为 3 000 frame/s。以第 5 组试验为例,共有 15 317 帧图像,随机选取 70%作为训练样本,用其余的 30%作为测试样本,设置迭代次数为 300。测试结果如图 11 所示,拟合度为 0.935 4,训练误差均值为 7.22e-05 mm,实际误差均值为 0.131 2 mm。



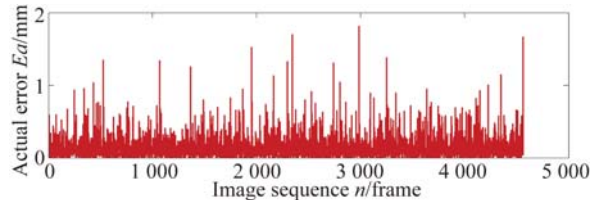
(a)焊缝宽度的预测值和实际值

(a)Predicted value and actual value of weld width



(b)焊缝宽度的训练误差值

(b)Training error value of weld width



(c)焊缝宽度的实际误差值

(c)Actual error value of weld width

图 11 第 5 组试验焊缝宽度预测结果

Fig. 11 Prediction results of test group 5

对 10 组试验进行焊件反面焊缝宽度进行预测,预测结果如表 3 所示。由预测结果可以看出,第 2 组和第 3 组的拟合度相对较低,方差波动明显,这是由于焊件 2 和焊件 3 出现未熔透的现象。其中,焊件 2 在激光束未进入前焊缝和离开焊缝后均是未熔透状态;焊件 3 在焊接过程中出现两段未熔透的现象。焊件 2 和焊件 3 的实物如图 13 所示。虽然对于出现未熔透现象的焊缝其预测拟合度较低,但是实际误差均值并没有很大的波动,说明所建立的 LMBP 神经网络预测性能稳定。

表 3 LMBP 神经网络焊缝宽度预测结果

Tab. 3 Prediction results of weld width through LMBP neural network

序号	拟合度	训练误差均值/mm	训练方差	实际误差均值/mm	实际方差
1	0.936 49	9.66e-07	0.005 3	0.159 7	0.025 5
2	0.833 75	0.002 8	0.044 5	0.178 2	0.092 5
3	0.841 46	1.29e-05	0.007 7	0.142 1	0.027 2
4	0.968 16	1.02e-05	0.003 1	0.136 0	0.022 5
5	0.935 40	7.22e-05	0.004 2	0.131 2	0.022 0
6	0.962 42	5.883e-05	0.003 2	0.082 5	0.007 4
7	0.964 69	4.53e-04	0.004 1	0.125 1	0.022 1
8	0.952 65	2.71e-04	0.003 8	0.148 5	0.025 5
9	0.956 67	1.70e-04	0.004 3	0.137 9	0.017 6
10	0.908 24	3.53e-04	0.008 1	0.225 6	0.058 4

图 12 给出了 10 组试验的焊件背面焊缝宽度预测结果。

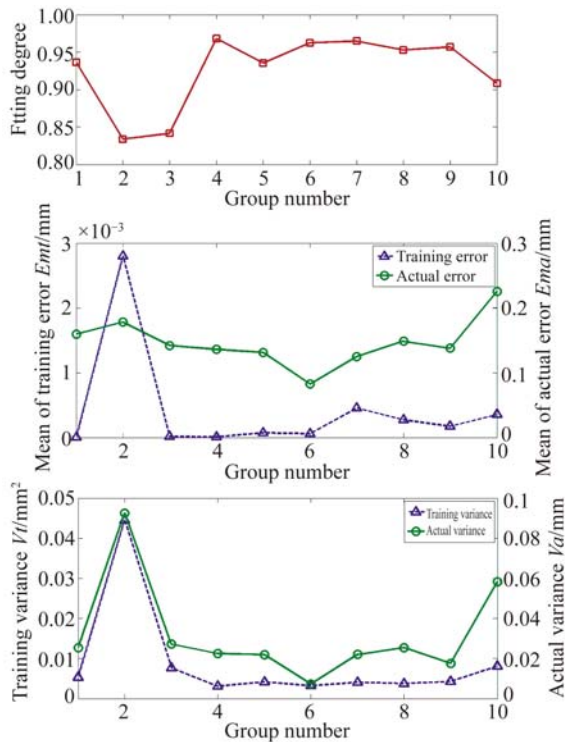


图 12 焊缝背面宽度预测结果

Fig. 12 Prediction results of weld width of weldment bottom surface

(a) 焊件 2 正反面实物图
(a) Image on front and back of weldment 2(b) 焊件 3 正反面实物图
(b) Image on front and back of weldment 3

图 13 焊件正反面实物图

Fig. 13 Images on front and back of weldment

5 结 论

本文设计了一个视觉传感系统用以获取大功率盘形激光焊接中焊件上表面和侧面的焊接特征,通过模式识别方法对各个特征信息进行提取,建立 LMBP 神经网络对焊件背面的焊缝进行有效预测,为激光焊接匙孔熔透状态的在线预测提供了试验和理论依据。

用色彩空间变换并且进行分层的方法处理彩色图像,通过滤波去噪和空域图像处理等算法对图像进行处理,准确地提取到了焊接过程中出现的各种焊接特征。通过对焊接特征信息的提取和对比,发现焊接功率、焊接速度以及焊接路径对焊接质量有很大的影响。其中各个特征信息随焊接路径的不同会有明显的变化,当激光束进入和离开焊缝的时候,各焊接特征都出现了明显的突变。通过对不同焊接试验条件下焊件背面焊缝宽度的对比,发现对匙孔熔透状态的影响从大到小的顺序依次是:焊接路径,焊接功率和焊接速度。LMBP 神经网络对焊件反面的焊缝宽度预测较准确,拟合度高,实际误差均值较小,方差小,预测性能稳定。

6 致 谢

感谢日本大阪大学接合科学研究所片山实验室对焊接试验提供的帮助。

参考文献:

- [1] KATAYAMA S, KAWAHITO Y, MIZUTANI M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5:9-17.
- [2] YOU D Y, GAO X D, KATAYAMA S. Multiple-optics sensing of high-brightness disk laser welding process [J]. *NDT & E International*, 2013, 60: 32-39.
- [3] 高向东, 李竹曼, 游德勇, 等. 激光焊匙孔特征的近红外与 X 射线传感分析[J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(10):2400-2407.
GAO X D, LI ZH M, YOU D Y, *et al.*. Analysis of laser welding keyhole characteristics based on near-infrared high speed camera and X-ray sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2400-2407. (in Chinese)
- [4] KIM J, KI H. Scaling law for penetration depth in laser welding [J]. *Journal of Materials Processing*

- Technology*, 2014, 214(12):2908-2914.
- [5] ZOU J L, WU S K, YANG W X, *et al.*. A novel method for observing the micro-morphology of key-hole wall during high-power fiber laser welding [J]. *Materials & Design*, 2016, 89:785-790.
- [6] LI S C, CHEN G Y, ZHOU C. Effects of welding parameters on weld geometry during high-power laser welding of thick plate [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1-4):177-182.
- [7] LI S C, CHEN G Y, KATAYAMA S, *et al.*. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 303:481-488.
- [8] ZHANG Y X, GAO X D. Analysis of characteristics of molten pool using cast shadow during high-power disk laser welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9-12):1979-1988.
- [9] MIRAPEIX J, COBO A, CONDE O M, *et al.*. Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis [J]. *NDT & E International*, 2006, 39(5):356-360.
- [10] HAO K D, LI G, GAO M, *et al.*. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225:77-83.
- [11] MUNGLE T, TEWARY S, ARUN I, *et al.*. Automated characterization and counting of Ki-67 protein for breast cancer prognosis: A quantitative immunohistochemistry approach [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2017, 139:149-161.

作者简介:



陈子琴(1989—),女,甘肃兰州人,博士研究生,2007年于兰州理工大学获得学士学位,主要从事焊接自动控制和图像处理技术等方面的研究。E-mail: chenzq_gdut@163.com

导师简介:



高向东(1963—),男,河南郑州人,教授,博士研究生导师,1985年于郑州大学获得学士学位,1988年于中南大学获得硕士学位,1998年于华南理工大学获得博士学位,主要从事焊接自动控制的研究。E-mail: gaofd666@126.com