

文章编号: 1673- 9620 (2007) 03- 0037- 03

# 基于人工神经网络的焊接熔池形状预测<sup>\*</sup>

苏少航

(江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

**摘要:** 了解熔池形状与焊接工艺参数的关系对确定自动焊接生产线控制系统的算法十分重要。利用 BP 神经网络对采用脉冲激光焊接工艺焊接铝时的熔池形状进行了预测, 预测结果表明网络的最大输出相对误差不超过 9%, 说明该网络具有较强的映射能力, 能满足预测要求。

**关键词:** 人工神经网络; 焊接熔池形状; 脉冲激光焊

中图分类号: TP 389. 1

文献标识码: A

## Predicting the Shape of Welding Pool Based on the Neutral Network

SU Shao- hang

(Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Understanding the relation of the shape of welding pool and welding parameters is very important for confirming the algorithm of control system of automatic welding line. Back Propagation neutral network is used to predict the shape of welding pool for the case of pulsed laser welding in an aluminum alloy. The predicted result indicate that maximum relative error is less than 9%, and the prediction requirement can be fulfilled.

**Key words:** neutral network; shape of welding pool; pulsed laser welding

近年来, 作为一种解决非线性回归问题和模式识别问题的有效方法, 人工神经网络在有关材料科学的研究中得到了应用。在焊接研究方面亦是如此。了解熔池形状与焊接工艺参数的关系对确定自动焊接生产线控制系统的算法十分重要。通常可通过数值模型和经验模型来确定。但对新的焊接工艺, 由于没有现成的模型, 确定算法十分困难。本文尝试使用 BP 神经网络来映射采用脉冲激光焊接工艺焊接工业纯铝时的熔池形状和焊接参数的关系<sup>[1,2]</sup>, 取得了令人满意的结果。

### 1 BP 神经网络原理

BP (Back Propagation) 网络亦称误差逆传播网络, 是最成熟和应用最广的人工神经网络。图 1 所示为典型的 3 层 BP 网络结构图, 它由输入层、隐含层和输出层组成, 层与层之间采用全互连方式连接, 同一层节点之间无连接。

当给定一输入模式  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  和希望输出模式  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  时, 网络的实际输出和输出误差可用下列公式求出:

隐含层输出:

$$z_j = f \left( \sum_{i=1}^m w_{ij} - \theta_j \right) \quad (j = 1, 2, \dots, h) \quad (1)$$

网络实际输出:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006- 11- 23

作者简介: 苏少航 (1964- ), 男, 江苏南通人, 副教授, 硕士, 主要从事高分子材料成型加工技术与设备及计算机模拟研究; 模具 CAD/ CAE/ CAM 技术研究。

$$y'_k = f\left(\sum_{j=1}^h v_{jk} z_j - \varphi_k\right) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

网络输出误差平方和:

$$E = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - y'_k)^2}{2} \quad (3)$$

式中:  $w_{ij}$ 、 $v_{ij}$  是输入层至隐含层和隐含层至输出层的连接权;  $m$ 、 $h$ 、 $n$  为输入层、隐含层、输出层的接点数;  $f$  为  $S$  型函数,  $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ ;  $\theta_j$ 、 $\varphi_k$  是隐含层接点、输出层的接点的阈值。

如果误差太大不满足要求, 则需要用下列公式修正各连接权和阈值:

$$\begin{cases} v_{jk}(t+1) = v_{jk}(t) + \alpha d_k z_j \\ \varphi_k(t+1) = \varphi_k(t) + \alpha d_k \\ d_k = y'_k(1 - y'_k)(y_k - y'_k) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \beta e_j x_j \\ \theta_j(t+1) = \theta_j(t) + \beta e_j \\ e_j = x_j(1 - x_j) \sum_{k=1}^n d_k v_{jk} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  为学习率;  $\alpha > 0$ ,  $\beta < 1$ 。

给网络提供一组特定的训练模式, 随机产生初始连接权和阈值, 不断重复上述计算过程, 直到网络全局误差小于给定的极小值为止。此时, 该 BP 网络通过学习具备了映射该特定问题的能力。

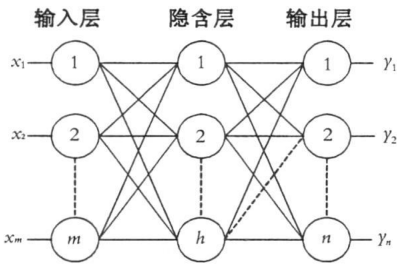


图 1 3 层 BP 网络结构图

Fig 1 Structure diagram of three layer BP neutral net

2 焊接实验

2.1 实验设备

本实验采用武汉楚天激光设备有限公司的 JHM-1-200B 型激光焊接机, 脉冲激光器发光体为 YAG 晶体, 波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 最大输出功率为 300 W, 最大工作电流 400 A, 棱镜焦距为 80 mm, 聚焦光斑直径 0.08 mm, 脉冲宽度 0.1 ~ 15 ms, 最大单脉冲能量 60 J, 激光束发散角小于 15 mrad, 能量不稳定性小于  $\pm 5\%$ , 激光头上的喷嘴允许流

量为 3 L/min 的纯氩气在焊接过程中沿轴向保护熔池不被氧化。该设备的特点是: 控制使用方便, 加工速度快, 热变形和热影响区小, 可以在真空中进行加工, 容易实现自动化。

2.2 实验材料和方法

焊接材料为牌号为 L2 的工业纯铝, 采用激光脉冲焊接工艺和对接焊头, 为提高焊缝质量, 待焊表面经 600# 砂纸精磨, 再进行超声清洗后进行焊接。试样形状如图 2 所示。焊接工艺参数见表 1, 脉冲持续时间均为 2 ms。熔池形状用其深度  $D$ 、宽度  $W$ 、面积  $A$  3 个参数来描述 (见图 3)。焊后采用慢走丝切割机获得要进行测量的焊缝 (熔池) 截面<sup>[3~5]</sup>。

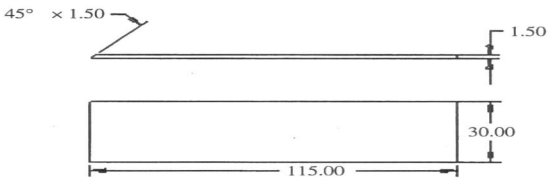


图 2 试样形状

Fig 2 Shape of sample

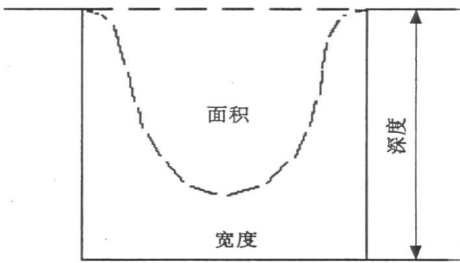


图 3 熔池轮廓参数

Fig 3 Outline parameters of melting pool

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

实验	焊接速度 /(mm/s)	脉冲能 量/J	平均功 率/W	实验	焊接速度 /(mm/s)	脉冲能 量/J	平均功 率/W
1	6.38	2.00	51	2	6.38	2.90	74
3	6.38	4.10	101	4	10.20	3.00	125
5	10.20	3.50	158	6	10.20	4.10	165
7	10.20	5.50	203	8	3.83	9.50	190
9	3.83	13.20	196	10	3.00	4.17	50
11	3.00	6.25	75	12	3.00	8.33	100
13	5.00	5.00	100	14	5.00	9.05	181
15	7.65	3.33	100	16	7.65	6.67	200
17	7.65	8.13	244	18	10.20	3.95	158
19	2.55	11.30	123	20	5.00	7.50	150
21	6.38	4.00	100	22	7.65	5.00	150
23	10.20	5.00	200				

2.3 实验结果

通过实验取得了 23 组数据 ( 见表 2 )。

表 2 熔池形状的实验数据

Table 2 Experiment shape data of melting pool							
实验	D	W	A	实验	D	W	A
1	0.10	0.61	0.06	2	0.20	0.87	0.13
3	0.41	0.98	0.23	4	0.17	0.89	0.12
5	0.16	0.94	0.13	6	0.24	1.03	0.17
7	0.36	1.22	0.28	8	0.43	1.15	0.32
9	0.97	1.57	0.76	10	0.81	1.00	0.40
11	1.31	1.06	0.88	12	1.51	1.03	1.03
13	0.65	0.92	0.34	14	1.43	1.14	1.03
15	0.28	0.85	0.18	16	0.81	1.26	0.51
17	1.32	1.16	0.88	18	0.31	0.88	0.21
19	0.66	1.35	0.50	20	1.14	1.25	0.71
21	0.46	0.90	0.25	22	0.55	1.06	0.33
23	0.45	1.00	0.28				

3 熔池形状的预测

3.1 网络模型的建立

BP 神经网络采用 3 层结构。以焊接速度、脉冲能量、平均功率、脉冲持续时间作为输入层的输入值  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ ；以熔池的深度  $D$ 、宽度  $W$ 、面积  $A$  作为输出层的输出值  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 。隐含层节点数取 7、8、9、10 4 种，根据训练结果取误差最小的<sup>[2,3]</sup>。

3.2 训练程序的参数设定

在训练时需要对原始输入、输出数据进行归一化，即原始输入数据的归一化要求： $(P_1, P_2)$ ， $0 < P_1 < P_2 < 1$ ，取  $P_1 = 0.03$ ， $P_2 = 0.97$ ；原始输出数据的归一化要求： $(Q, Q_2)$ ， $0 < Q_1 < Q_2 < 1$ ，取  $Q_1 = 0.1$ ， $P_2 = 0.9$ ；第一次训练指标  $I = 1$ ；初始权数  $W_a = 0.2$ ；松弛系数  $A =$  惯性系数， $B = 0.05$ ；训练最大步数和每大步的小步次数都设为 1 000；训练收敛要求的相对误差  $E_r = 0.05$ 。

3.3 训练结果

以前 18 组数据作为学习模式对网络进行训练，

结果见表 3，学习次数均为 10 000。由该表可见学习次数相同时，结构为 (4- 8- 3) 的网络学习收敛效果较好。

表 3 BP 网络训练结果

Table 3 Training result of BP net				
网络结构	4- 7- 3	4- 8- 3	4- 9- 3	4- 10- 3
误差平方和	0.004 3	0.003 1	0.003 9	0.004 8

3.4 预测结果

为了检验该网络的映射能力，用其余的 5 组数据组成测试集测试该网络，表 4 给出了测试结果。由该表可见网络的最大输出相对误差不超过 9%，说明该网络具有较强的映射能力，能满足预测要求。

表 4 结构为 (4- 8- 3) 的 BP 网络测试结果

Table 4 Testing result of BP net									
实 验	实验值			预测值			相对误差 / %		
	D	W	A	D	W	A	D	W	A
19	0.66	1.35	0.50	0.70	1.25	0.051	6.06	7.41	2.00
20	1.14	1.25	0.71	1.22	1.16	0.77	7.02	7.2	8.45
21	0.46	0.90	0.25	0.45	0.86	0.25	2.17	4.44	0
22	0.55	1.06	0.33	0.52	0.98	0.32	5.45	7.55	3.03
23	0.45	1.00	0.28	0.41	1.09	0.29	8.89	9.00	3.57

说明： $W$ ， $D$ ， $A$  的单位分别是 mm，mm，mm<sup>2</sup>。

参考文献:

[1] 袁曾任. 神经网络极及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[2] John Hertz, Anders Krogh, Richard G Palmer. Introduction to the theory of neural computation [M]. Washington D C: Addison Wesley Publishing Company, 1991.

[3] 葛景国, 高进强, 陈立功, 等. 焊接熔池正面几何参数和背面熔宽的数据提取方法 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38 (7): 1 113- 1 117.

[4] Li Laiping, Chen Shanben, Lin Tao. The modeling of welding pool surface reflectance of aluminum alloy pulse GTAW [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 394 (1- 2): 320- 326.

[5] Emad Saad, Huijun Wang, Radovan Kovacevic. Classification of molten pool modes in variable polarity plasma arc welding based on acoustic signature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174 (1- 3): 127- 136.