

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0102-04

激光熔覆成形薄壁金属制件精度的预测模型

徐大鹏, 周建忠, 郭华锋, 季霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了控制激光熔覆成形薄壁金属制件的精度, 分析了激光熔覆成形金属薄壁的工艺理论和影响因素。采用 BP 神经网络建立了激光功率、光斑直径、扫描速度和送粉率与金属零件壁厚的非线性关系模型和激光熔覆成形薄壁制件的精度控制系统。通过优化神经网络的权值和阈值, 并引入动量因子和学习速率的自适应调整, 克服了 BP 算法容易陷入局部最小值的问题。用实验参数作为训练样本对模型进行训练, 并进行了误差分析。实验和仿真结果表明, 训练样本和检验样本的最大相对误差分别为 1.93% 和 1.19%, 预测精度高。该网络模型可用于优化激光熔覆成形工艺参数和成形金属制件精度的在线实时控制。

关键词 激光技术; 激光熔覆成形; 薄壁件; 精度预测; 神经网络

中图分类号 TG156.9; TP183 **文献标识码** A

Predictive Model of Thin-Wall Metal Parts Precision in Laser Cladding Forming

XU Da-peng, ZHOU Jian-zhong, GUO Hua-feng, Ji Xia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhen jiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to control forming accuracy of laser cladding thin-wall metal parts, on the basis of analyzing technology theory and affecting factors of metal parts wall thickness in laser cladding, a nonlinear mapping between wall thickness of metal parts and laser power, spot diameter, scanning speed, powder feed rate is established by using BP artificial neural network. By using momentum coefficient, adaptive learn rates and optimized weights and bias, the problem of BP that easily falls into local minimum point is overcome. Experimental parameters are chosen as training samples, and BP neural network is trained. Experimental and simulated results show that the maximum relative error of training and testing samples are 1.93% and 1.19% respectively. The optimized BP neural network model can be used to process parameter optimization and predict forming accuracy of laser cladding metal thin-walled component for on-line control system.

Key words laser technique; laser cladding forming; thin-wall component; precision prediction; neural network

1 引 言

激光直接金属成形是一个多参数影响过程, 涉及激光功率、扫描速度、送粉量、熔池温度、喷嘴位置角度以及辅助气体的流速等, 而且这些参数二者还存在交互作用, 这些因素给建立成形精度的数学模型带来了很大难度。Ollier 等^[1]曾假设激光熔覆自由表面为简单的圆弧, 建立了激光熔覆的二维模型, 确定了熔覆层高度和稀释率的主要影响因素; Frenk 等^[2]则依靠经验与理论分析建立了熔覆层厚度及熔池形状的分析模型, 而没有涉及热平衡计算;

应丽霞等^[3]建立了移动激光高斯热源作用下三维熔覆温度场的计算机数值分析模型, 对激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场进行了分析计算, 预测了熔池的轮廓、热影响区的形状、交接面的结合情况, 刘继常等^[4,5]实验研究了低功率激光熔覆成形金属薄壁结构及其影响因素, 发现激光单道熔覆的壁厚与工艺参数有关, 并建立了成形件壁厚和工艺参数关系的数学模型。

以上模型对熔覆层表面形状及厚度的计算都依赖经验, 或者简化处理, 没有考虑激光与粉末的相互

作者简介: 徐大鹏(1979—), 男, 河南项城人, 硕士研究生, 主要从事基于激光熔覆的金属零件快速制造技术研究。

E-mail: hccoh@163.com

导师简介: 周建忠(1964—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事先进制造技术、激光加工机理及其应用等方面的研究。E-mail: zhoujz@ujz.edu.cn

作用、激光功率、送粉系统以及数控系统等因素对激光熔覆成形制件的精度造成的影响。目前,只能采用大量的实验来建立工艺参数库,这将耗费大量的成本,不利于该技术的应用和推广。本文系统分析了激光熔覆金属薄壁制件的工艺理论及其成形精度的影响因素,量取的矩形试样最小厚度作为激光熔覆成形精度的评价指标,建立基于 BP 神经网络激光熔覆成形薄壁金属制件的精度预测模型,通过优化神经网络的权值和罚值,并引入动量因子和学习速率的自适应调整,克服了 BP 算法容易陷入局部最小值的问题。

2 激光熔覆金属薄壁制件工艺理论

2.1 基本假设

薄壁零件通常由激光单道熔覆成形,其薄厚 d 等于熔覆过程中所形成的熔池的宽度。激光与粉末、基材三者的相互作用是一个非常复杂的过程,由于流场的复杂性,要精确地计算熔池形状非常困难,为了简化求解,在计算模型中做如下基本假设:

1) 坐标原点位于光源中心,激光束模式为 TEM_{00} 基模高斯光斑。

2) 激光能量不随时间变化,建立在激光的坐标上,激光熔池是准温态。

3) 粉末颗粒为球形。

4) 液态金属为不可压缩 Newton 流体,熔池中流体为层流。

5) 熔池表面平整,无波纹产生。

6) 工件初始温度定为室温 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (300 K)。

7) 只有进入熔池的粉末才有可能成为熔覆层,不计粉末损耗。

2.2 温度场求解

激光熔覆成形是热作用过程,包括热传导、热对流和热辐射。激光熔覆成形中的热传导方程为

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{Q} = \rho\left(\dot{T} + v\frac{\partial T}{\partial x}\right), \quad (1)$$

式中 k 为导热系数, v 为扫描速度,只需加上初始条件即可求解任意时刻的温度场^[6],初始条件为

$$T(x, y, z, 0) = T_0,$$

式中 T_0 为环境温度。基本的边界条件为

$$T(x, y, H_1) = T_0, \quad (x, y) \in S_1, \quad t > 0,$$

式中 S_1 为基体的底平面, H_1 代表基体的高度。

能量守恒方程

$$k\frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) + \varepsilon(T^4 - T_0^4) = Q, \quad (2)$$

式中 h 为对流换热系数, s 为玻尔兹曼常量, ε 为材料表面辐射系数, Q 为材料吸收的激光能量。

那么任意 t_1 时刻的温度场为

$$T(z, t_i) = (T_m - T_0)\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt_i}}\right) + T_0, \quad (3)$$

其中 T_m 为金属熔点。

2.3 熔池厚度的计算

忽略由于辐射和热传导带来的能量损失,熔化金属所释放的潜 Q_C 热应等于固体材料所吸收的热量 Q_L 。则有: $Q_C = Q_L$ 。又因为 $Q_L = AP$,

$$Q_C = \rho_p \int [T(x, y, z, t_i) - T_0] dv, \quad (4)$$

式中 A 为熔覆材料的吸收系数, P 为激光功率, ρ 为熔覆材料的密度, c_p 为熔覆材料的比热。由(3)式和(4)式可得熔池横截面积为^[6]

$$S = \frac{AP\sqrt{d}}{2\pi\alpha_p(T_m - T_0)\sqrt{kv}}, \quad (5)$$

则熔池的厚度为

$$\delta = \frac{AP\sqrt{d}}{2\pi\alpha_p(T_m - T_0)\sqrt{kv}l}, \quad (6)$$

式中 l 为单道熔覆层长度。

3 学习率可变的动量 BP 神经网络

BP 神经网络是误差反向传播神经网络(error back propagation network), BP 网络主要有: 网络输入层, 隐层和输出层。第一阶段正向传播, 输入层经隐层传递到输出层, 每一层只影响下一层的输出。若得不到期望输出, 则沿反向传播, 将误差沿神经元连接原路返回, 并逐层修正网络的权值和阈值, 使误差函数值

$$E = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [T(t) - y(t)]^2, \quad (7)$$

不断减小, 不断重复上述过程, 直到满足精度要求为止。

传统的 BP 算法有两大缺点, 其一是一很容易陷入局部最小值, 而且收敛速度慢; 其二是一般情况下学习率是一个常数, 学习算法的性能对于学习率的选择非常敏感, 学习率过大, 算法可能振荡不稳定; 学习率过小, 则收敛速度慢, 训练时间长。因此, 引入学习率可变的动量 BP 算法。在训练过程中, 力图使算法稳定, 而同时又使学习的步长尽量的大, 学习率则是根据局部误差曲面作出相应的调整, 过程为^[7]

$$\alpha(k+1) = \begin{cases} k_{inc}\alpha(k), & E(k+1) < E(k) \\ k_{dec}\alpha(k), & E(k+1) > E(k) \end{cases} \quad (8)$$

由激光熔覆薄壁制件工艺理论分析可知,成形的薄壁制件厚度 δ 与激光功率 P ,光斑直径 d 和扫描速度 v 有关。再考虑激光能量传递过程中辐射作用以及送粉条件,为了使预测模型更加真实,又引入了喷嘴距工作平面的距离 h 和送粉速率 M_p 。网络结构为 $5 \times 11 \times 1$ 。输入量分别为激光功率 P ,扫描速度 v ,光斑直径 D ,喷嘴距工作平面的距离 h 和送粉速率 M_p 。输出量为成形的薄壁制件厚度。其 BP 模型结构如图 1 所示。

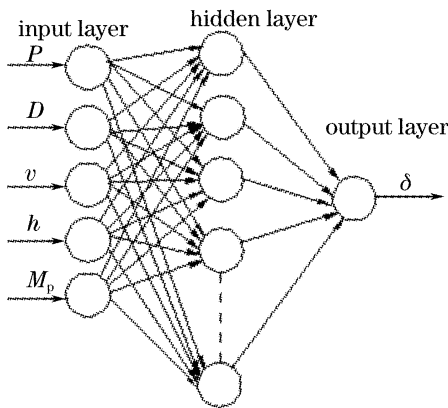


图 1 BP 神经网络结构
Fig. 1 BP neural network structure

4 薄壁制件精度控制系统

成形金属薄壁制件控制系统主要有控制系统、传感器检测、神经网络以及学习模块组成。控制系统是整个精度调节系统的关键环节,主要是根据预测值和实际检测值来控制 and 调节送粉量,使整个熔覆成形过程趋于稳定,当发现实际测量值和预测值存在偏差时,就启动控制系统,增加或减小送粉量,以使熔覆制件的厚度和目标值一致。传感器检测系统来检测成形薄壁制件轮廓状态信息,得到的信息同时传送给神经网络和控制系统。神经网络具有逼近任何非线性系统的能力及泛化预测能力,因此可以用来预测薄壁制件的厚度。在熔覆加工的过程中,将加工信息存储下来,并进行优选、提取,然后作为神经网络的训练样本,经过反复训练,当达到所要求的精度时,预测结果可以认为是真实值。学习模块实际就是一个只是获取模块,学习的过程就是知识获取的过程。通过学习,将样本数据中的知识获取出来记忆在神经网络的权值和阈值中。学习模块的好坏是一个神经网络“智力”高低的表现,它体现模型获取知识的能力。其过程控制结构如图 2 所示。

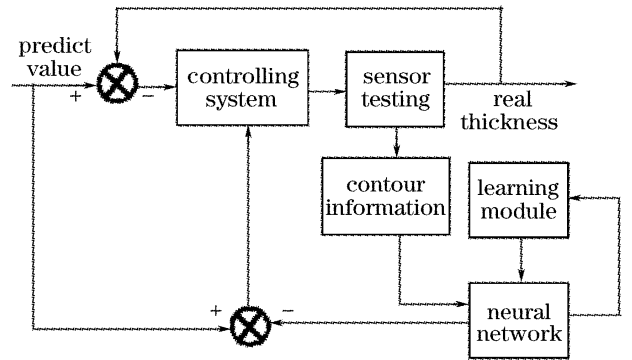


图 2 基于 BP 神经网络的金属薄壁制件精度控制系统
Fig. 2 Accuracy control system of metal thin-wall parts basing on BP neural network

5 薄壁制件厚度仿真结果及误差分析

5.1 熔覆实验

实验采用 500 W 连续 CO₂ 激光器,粉末供给系统为螺旋式同轴送粉,保护气体为氮气,熔覆材料(质量分数)为 0.24% C+99.76% Fe,基体材料为 20 钢,送粉气体 0.5 m³/h,保护气体流量 500 L/h。实验方法采用单道扫描,每走完一道喷嘴上升一个高度,上升的高度等于单道熔覆的高度,成形矩形试样。

5.2 神经网络的训练及数据的检验

考虑到训练样本较多且取值范围相差较大,为了提高输出目标的精度,需要对训练样本进行数据的预处理,预处理公式为:

$$P' = P/P_{max}, \quad (9)$$

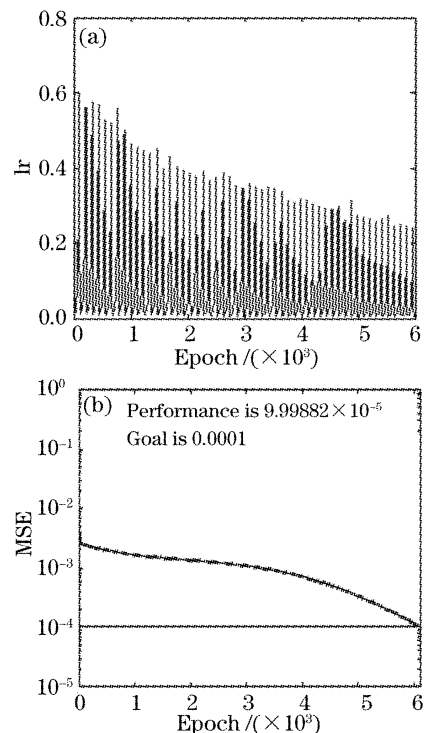


图 3 BP 神经网络训练结果
Fig. 3 BP neural network training results

根据文献[2]的实验结果,在实验数据中选取7组数据作为神经网络训练样本,构造输入输出模式,在区间 $[-0.5, 0.5]$ 内,随机产生均匀分布的初始权重值矢量和阈值矢量,训练精度为 10^{-4} ,冲量系数为0.9,网络训练6000次后,达到目标。图3为神经网络训练性能。网络训练结束后对比预测结果与实验值如表1所示。表中 δ 为真实值, δ' 为实验值, ϵ

为预测绝对误差, Δ 为预测相对误差。由表1实验结果可知,进化神经网络的预测结果是非常精确的,相对误差在1.93%之内。

表2为训练样本之外的一组实验数据,用来检验神经网络的可靠性,从表2中可以看出,预测结果的相对误差为1.19%,神经网络可靠。从表中可以看出神经网络能够准确预测出成形制件的壁厚。

表1 厚度模拟和实验结果

Table1 Thickness simulating and experimental results

k	P/W	$v/(mm/min)$	D/mm	h/mm	$M_p/(g/min)$	δ	δ'	ϵ	$\Delta/\%$
1	240	150	0.4	5.0	1.4	0.81	0.8202	-0.0126	-1.26
2	300	150	0.5	5.5	1.4	1.05	1.0297	0.0193	1.93
3	300	150	0.4	5.0	1.4	0.85	0.8629	-0.0152	-1.52
4	250	150	0.5	5.5	1.2	0.94	0.9446	-0.0049	-0.49
5	220	150	0.2	5.0	1.4	0.80	0.6953	0.0067	0.67
6	220	180	0.2	5.0	1.4	0.70	0.7941	0.0073	0.73
7	300	189	0.2	7.5	1.4	0.86	0.8632	-0.0037	-0.37

表2 BP神经网络验证

Table 2 BP neural network testing

k	P/W	$v/(mm/min)$	D/mm	h/mm	$M_p/(g/min)$	δ	δ'	ϵ	$\Delta/\%$
8	300	189	0.2	7.5	1.6	0.85	0.8601	0.0101	1.19

6 结 论

1) 针对熔覆成形薄壁制件的复杂性,建立了激光功率、扫描速度、光斑直径、喷嘴离工作台高度和送粉速率与熔覆成形制件薄厚非线性关系的数学模型,该模型能够真实地反映激光熔覆加工规律,准确预测成形薄壁零件壁厚。

2) 引入了冲量系数和自适应学习速率,经过反复实验网络的初始权重选取 $[-0.5, 0.5]$ 内均匀分布的随机数,取得了良好的效果。

3) 建立了基于神经网络的薄壁制件精度控制系统,通过建立工艺参数数据库和离线训练不断调整网络权重和阈值,当训练结果达到要求时,将训练结果存储到学习模块,可用于激光熔覆薄壁制件成形精度的在线预测,为后续的精度在线控制研究打下基础。

参 考 文 献

1 B. Ollier, N. Pirch, E. W. Kreutz. A numerical model of the one-step laser cladding process [J]. *Laser Photons*, 1996, 1(1): 3~13

2 Frenk A, Vandyoussefi M, Wagniere J D *et al.*. Analysis of the laser-cladding process for stellite on steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, 28(3): 501~508

3 Ying Lixia, Wang Lixin, Chen Guanci *et al.*. Simulation and calculation of 3D laser cladding temperature field of ceramic-metal composite coatings by finite element method [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(7): 24~28

应丽霞,王黎钦,陈观慈等. 3D激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场的有限元仿真与计算 [J]. *金属热处理*, 2004, 29(7): 24~28

4 Liu Jichang, Li Lijun. Experimental study of fabrication of thin-wall metallic features by laser cladding [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2004, 40(10): 185~188

刘继常,李力钧. 激光熔覆成形薄壁结构的实验研究 [J]. *机械工程学报*, 2004, 40(10): 185~188

5 Liu Jichang. Model of wall thickness of the part formed by single-pass laser cladding [J]. *Materials Science & Technology*, 2005, 13(1): 99~102

刘继常. 激光单道熔覆成形的金属零件薄厚模型的研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2005, 13(1): 99~102

6 Lu Jiangang. Study on fabricated processing and micro-structure of thin-wall parts based on laser cladding [D]. Master Dissertation of Hunan University, 2004. 31~35

卢建刚. 激光熔覆成形薄壁试件的工艺和显微组织研究 [D]. 湖南大学硕士学位论文, 2004. 31~35

7 Zhou Kaili, Kang Yaohong. Neural network model and MATLAB program design [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005

周开利,康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计 [C]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 70~75