

基于人工神经网络的激光立体成形件 成形表面质量预测

杨东辉 马 良 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 通过建立单道折线扫描数学模型, 推导出了折线扫描拐角处重叠区域数学描述, 从理论上对激光立体成形 (LSF) 表面质量的影响因素进行了分析, 并得出影响折线扫描路径试样表面质量的主要因素是折线角度和扫描速度的结论。建立了适用于激光立体成形件表面质量预测的人工神经网络 (ANN) 模型, 以激光立体成形过程中扫描速度和折线的角度为模型输入, 输出成形件表面质量评估参数。经过实验数据训练后的神经网络模型可以实现对不同扫描速度及不同扫描角度成形件表面质量的预测, 网络预测值和试验测得值之间的均方差 (MSE) 小于 0.01。

关键词 光学制造; 激光立体成形; 人工神经网络; 表面质量; 工艺参数

中图分类号 TP183; TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0803004

Component's Surface Quality Predictions by Laser Rapid Forming Based on Artificial Neural Networks

Yang Donghui Ma Liang Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract A single-channel polyline scanning mathematical model is established, and the mathematical description of surface quality is analyzed theoretically. It is drew the conclusion that the angle degree and the scanning speed are the main important process parameters for part surface quality. The artificial neural networks (ANN) model is established to predict part surface quality based on laser solid forming (LSF). The input of this model is the angle degree of corner joint and the scanning speed which is the most important factor in LSF process. The output of this model is the data of surface characterization which is the difference between corner joint height and layers' height. The ANN model could predict parts' surface quality data under different corner joint' angle degree conditions after trained by experimental data. The mean squared error (MSE) is less than 0.01 between prediction data and experimental data.

Key words optical fabrication; laser solid forming; artificial neural network; surface quality; process parameters

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 220.4610

1 引 言

激光立体成形 (LSF) 技术是一种新型高效的材料加工技术, 它采用分层叠加方式增材来制造零件, 具有材料利用率高、周期短、可以成形任意复杂零件

等优点, 目前已经成为材料现代加工领域的一个重要的研究方向^[1]。激光立体成形逐层叠加过程是激光束、粉末和基材相互作用的结果。目前该技术成形出来的零件存在的一个重要难题就是成形件的表

收稿日期: 2011-01-24; **收到修改稿日期:** 2011-03-14

基金项目: 国家 973 计划 (2011CB610402)、凝固技术国家重点实验室博士后基金 (03-BZ-2010) 和凝固技术国家重点实验室自主课题 (16-TZ-2007) 资助课题。

作者简介: 杨东辉 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工过程自动控制等方面的研究。

E-mail: ydh4254@163.com

导师简介: 黄卫东 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事凝固原理高能束流加工及成型等方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

面质量不稳定,常常出现表面凹凸不平,零件边角处塌陷或者过度凸起,以致成形件出现大的裂纹和孔洞^[2]。零件需要经过复杂的后续加工处理才可以使用,这就使激光立体成形技术的大范围推广应用增加了价格和时间成本,限制了其在工业中的广泛应用。神经网络(ANN),是由大量神经元互联而成的网络,进行分布式并行信息处理的算法数学模型,是对人脑的抽象、简化和模拟。它可以在未知过程原理的情况下,建立输入输出关系,具有较优良的自适应和容错能力。目前随着计算机技术和神经网络的发展,神经网络被越来越多地应用在解决多因素非线性耦合问题中,特别是在焊接的实时控制中^[3,4]。在激光立体成形过程中目前还没有涉及到人工智能,因此,在成形过程中加入人工智能对于成形过程的缺陷控制可以建立良好的基础。本文以人工智能中神经网络作为手段对激光立体成形过程进行研究,并最终得到固定工艺参数情况下的成形件表面质量预测模型。

2 成形件表面质量分析

2.1 激光立体成形中各种因素对成形件表面质量的影响

激光立体成形过程中成形件的表面质量受多种因素的影响:1)加工工艺参数,包括激光光斑直径、扫描速度、送粉速度和光斑直径等^[5];2)零件自身特性,零件不同位置的形状对于传热的改变以及逐层叠加时引起的温度、应力累积。

就激光立体成形过程中工艺参数对成形件质量的影响问题,清华大学的钟敏霖教授、西北工业大学的黄卫东教授以及比利时 Katholieke 大学的 J. P. Kruth 教授等都做过系统的研究^[3,6~8]。搭接率是影响成形件表面粗糙度最主要的因素,在搭接率固定的情况下扫描速度对成形件的表面粗糙度影响最为显著。在零件实际的加工过程中,激光的光斑直径、激光功率是固定的,送粉速率在成形过程中实时改变也同样具有一定的困难,因此在实际的成形过程中能够实时改变的工艺参数只有扫描速度和搭接率。其他相关研究表明,在激光立体成形过程中扫描速度是沉积层高度的主要影响因素^[9~11]。目前国际上对于成形件的沉积层高度主要是通过闭环控制来实现,但在实际加工过程中,由于受到成形温度、空间以及精度等要求限制,实现起来很难保证最终的成形质量。

单道多层成形件是复杂成形件的基础,是研究多道多层不同搭接率对表面质量影响的前提条件。因此,以单道多层成形件作为研究对象,并选择扫描速度作为研究对象来对成形件表面质量进行研究。

2.2 对单道多层试样表面质量分析

基于激光立体成形过程,建立了单道单层扫描模型,如图 1 所示。由图 1 可推导出在单道单层扫描路径折线拐角处重叠面积 S (图中阴影部分)和受影响区域最大长度 L 的公式。为了评估成形件表面质量,建立成形件表面质量衡量因子 γ 。 γ 值越大说明成形件表面质量越差,当 γ 值小于 0.1 时认为表面质量合格。 S, L, γ 可表示为

$$S = \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)r^2 + \frac{1}{2}(\theta - \pi)r^2, \quad (1)$$

$$L = \left[1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)}\right]r, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h}, \quad (3)$$

式中 θ 为两条扫描轨迹的夹角, r 为扫描过程激光光斑直径, Δh 为成形件最大高度与成形件层高的差值, h 为成形件的平均层高。

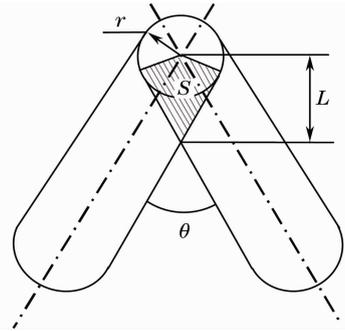


图 1 激光立体成形单道单层扫描示意图
Fig. 1 Sketch map of single layer by LSF

当 S 较大时会使折线扫描试样拐角处重叠面积变大,改变原有试样设计形貌,成形件表面出现较大起伏; L 较大时会使成形件两条扫描路径发生干涉,对表面质量造成极大的破坏,如图 2 所示。图 2(a), (b) 中两个试样的表面质量因子高达 0.56 和 0.59。

设实验中光斑直径为 2 mm,成形件的 S 和 L 与折线角度 θ 的关系如图 3, 4 所示。由图可知,当拐角角度在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间变化时,受影响区域的面积和最大长度变化较大,并呈现非线性下降关系。当角度增大到 100° 以后受影响区域的面积和最大长度变化趋于平缓。

不同角度的折线扫描路径在拐角处的表面平整

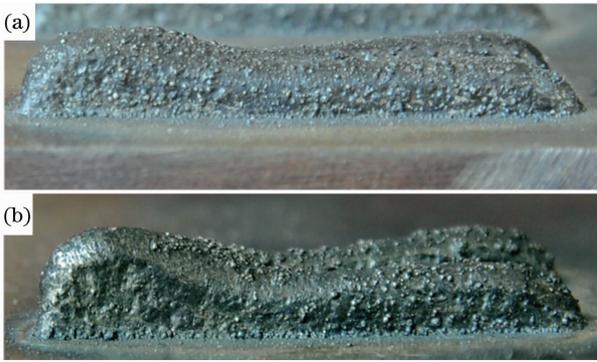


图 2 表面质量较差试样

Fig. 2 Specimens of poor surface quality

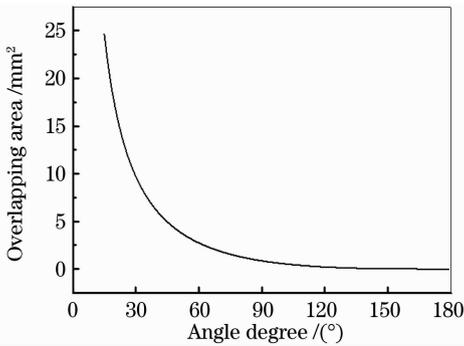


图 3 折线拐角处重叠面积随角度的变化关系

Fig. 3 Relationship between angle degree and overlapping area

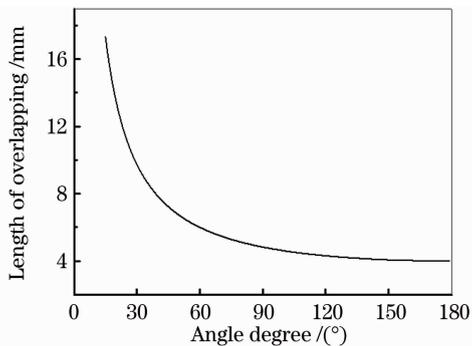


图 4 折线拐角处受影响最大长度随角度的变化关系

Fig. 4 Relationship between angle degree and the length of overlapping area

度变化较大,在零件加工过程中随着扫描路径逐层叠加就造成了成形件表面凹凸不平现象。成形件的应力和传热不断变化并且表面凹凸不平逐层叠加,这就造成了实际表面凹凸程度与理论数据出现较大的偏差。因此,折线扫描路径中折线角度对于成形件表面质量具有重要影响。为了研究扫描速度在不同曲率下对成形件表面质量的影响程度,确定了在不同扫描速度下,从 15° 开始以 15° 递增至 150° 止,共 10 个不同的角度数据进行实验研究。

3 实验条件及实验方案

实验在凝固技术国家重点实验室自主研发的激光立体成形系统上完成,该系统由功率为 2000 W 的 CO₂ 激光器、四轴联动数控机床、空气净化系统、高精度可调送粉器和同轴送粉喷嘴及相关配套设施组成。该系统具有激光离焦量可调、送粉精度高、可进行复杂零件成型等优点。

3.1 实验参数及过程

实验粉末材料采用 -120 目 (120 μm) 的 316 L 不锈钢粉末,基材为 6 mm 厚的 45# 钢板,实验参数如表 1 所示。实验前粉末在真空加热炉中 150 °C 保温 1 h,随炉冷却后取出。基材用砂纸打磨去除表面氧化层,打磨结束后用丙酮和无水乙醇清洗干净。

表 1 加工工艺参数

Table 1 Processing parameters

Laser power / W	Spot diameter / mm	Power feeding rate / (r/min)	Protection flow / (L/h)	Layer height / mm
1700	2	1	200	0.2

实验过程中采用氩气作为保护气,对熔池进行保护。实验过程采用单道多层的扫描方式,每个试样扫描层数为 6,扫描速度分别为 3,4,5 mm/s。实验结束后用游标卡尺对成形件试样的层高和拐角处的最大高度值进行了测量记录,计算出拐角处最大高度值与拐角处最大高度值和层高的差值。实验测量及计算后数据如表 2 所示。

3.2 实验结果及分析

在实验测定数据中可以观察到在角度小于 60° 时,折线扫描拐角处的高度变化较大,当角度大于 120° 时拐角沉积高度变化较为平缓。这是因为在单道沉积层的截面形状近似为宽高比为 3 的圆弧,在重熔过程中沉积层在扫描过程中其宽高比是动态变化的,激光只是重熔掉圆弧边缘区域,进而形成了沉积层的厚度增加。这是造成折线扫描拐点处明显凸起现象的主要原因。另外,数控机床在折线扫描路径过程中存在一个减速-加速过程,而在这个过程中激光束使沉积层厚度不断增加,熔池温度增加,会导致对激光的吸收率增大,并进一步使熔池扩大,从而使熔池可以捕获更多的金属粉末,使熔池变宽、变厚。因此就使折线扫描拐角局部增高现象变得更为明显。当角度大于 120° 时,折线扫描的两条边的搭接率降至 17%,这时折线的搭接主要存在于圆弧的边缘处,由于重熔过程存在,这就使得重叠区域的沉积高度变化不明显。

表 2 不同位置高度及差值表
Table 2 Detail data of the experimental results

Angle / (°)	Corner	Layer	Difference	Corner	Layer	Difference	Corner	Layer	Difference
	height /mm	height /mm	value /mm	height /mm	height /mm	value /mm	height /mm	height /mm	value /mm
	3 mm/s			4 mm/s			5 mm/s		
15	4.747	2.987	1.760	3.947	2.487	1.460	3.473	1.993	1.480
30	4.670	3.237	1.433	3.567	2.393	1.174	3.373	1.987	1.386
45	4.337	3.190	1.147	3.517	2.470	1.047	3.110	1.923	1.187
60	4.215	3.235	0.980	3.303	2.523	0.780	2.983	2.043	0.940
75	3.908	3.228	0.680	3.222	2.602	0.620	2.862	2.168	0.694
90	3.877	3.290	0.587	3.070	2.530	0.540	2.665	1.995	0.670
105	3.437	2.910	0.527	2.777	2.343	0.434	2.630	2.043	0.587
120	3.107	2.687	0.420	2.613	2.313	0.300	2.380	1.927	0.453
135	3.117	2.803	0.314	2.523	2.237	0.286	2.233	1.893	0.340
150	3.008	2.782	0.226	2.442	2.242	0.200	2.197	1.917	0.280

从表 2 的数据可以看出在相同的扫描速度下,不同角度的试样在拐点处高度值变化较大;在扫描角度相同,扫描速度变化时,试样在拐点处高度值变化较小。因此,折线扫描路径试样的表面质量最大的影响因素是折线角度,而对于试样的层高来说,扫描速度则是最大的影响因素。

3.3 神经网络结构及相关设置

人工神经网络具有自主学习及非线性映射能力,无需事先知道其确切的数学方程。只要能够提供足够多的样本对人工神经网络进行训练,它便能完成由 n 维空间到 m 维空间的非线性映射。人工神经网络主要由输入层、隐藏层和输出层组成。输入层接收外部数据与信号,输出层实现模型处理结果的输出,隐藏层在输入层和输出层之间,不能从系统外部直接观察。

成形件表面质量预测模型选择的是前向型神经网络中误差反向传播(BP)网络模型。BP 算法的基本思想是信号正向传播,误差反向传播。具有运算量小,逼近能力强,易于实现硬件计算等优点。其缺点可以通过改进算法得到弥补,因此该方法在实际的使用中最为广泛。根据激光立体成形工艺参数对于表面质量的影响,选取折线的拐角处角度和激光扫描速度作为网络的输入参数,输出数据选择成形件表面质量衡量因子关系最大的两个参数:拐角处最高点高度和拐角处最大高度与层高的差值。

对于所采用的 BP 网络,隐藏层中的神经元数目对于神经网络的适应性和容错能力有非常大的影响。通过对不同隐藏层神经元数目的网络输出误差的比较,网络选择的神经元数目为 12,即神经网络结构为 $2 \times 12 \times 2$ 。在确定网络的拓扑结构后,对神

经网络进行训练,训练函数为 Levenberg-Marquardt 函数,学习函数为梯度下降动量学习函数,隐含层和输出层的传递函数分别为 S 型正切函数和纯线性函数,目标误差设定为 0.0001。其网络结构如图 5 所示。

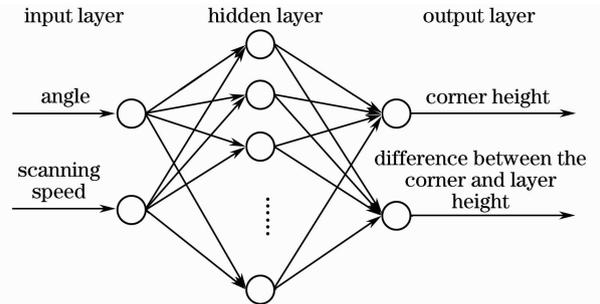


图 5 激光立体成形成形件表面质量预测的 BP 网络模型
Fig. 5 BP model of surface quality predictions by LSF

3.4 神经网络训练结果及误差分析

把采集好的样本数据进行归一化处理,归一化后数据的区间为 $[0.1, 0.9]$,公式为

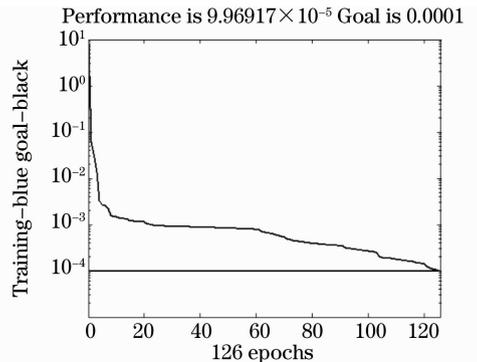


图 6 神经网络训练误差曲线图
Fig. 6 Error curve of the neural network during training

$$X_i = \left(\frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) \times 0.8 + 0.1, \quad (4)$$

式中 X_i 为样本的换算值, x_{\min} 代表数据变化范围最小值, x_{\max} 代表数据变化范围最大值。将处理好的数据加载到构建好的网络中进行训练, 通过网络的自主学习及记忆能力得到网络的权值和阈值。不断调整训练的结果, 最终如图 6 所示。

3.5 预测模型分析

为了检验人工神经网络对于激光立体成形单道

表 3 验证实验结果

Table 3 Data of checking experiment

	50°		100°		130°	
	3.5 mm/s	4.5 mm/s	3.5 mm/s	4.5 mm/s	3.5 mm/s	4.5 mm/s
Measured layer height /mm	2.810	2.205	—	2.595	2.794	—
Predicted layer height /mm	2.195	2.236	—	2.623	2.812	—
Measured corner height /mm	1.102	1.058	—	0.492	0.218	—
Predicted corner height /mm	1.907	1.024	—	0.528	0.178	—

利用验证实验数据对神经网络进行仿真测试, 实验的网络预测值与实验结果数据的均方差 (MSE) 小于 0.01, 这表明能够从整体上对激光立体成形件表面质量做出评估, 建立的人工神经网络模型可以有效地对激光立体成形件表面质量做出预测, 能够从数值上对这一过程进行整体描述。为进一步对激光立体成形过程表面质量仿真提供一种解决方案, 并为实现激光立体成形过程闭环控制奠定了部分基础。

4 结 论

建立人工神经网络模型的目的是为仿真提供一个有效的依据, 分析网络输入量与网络输出量之间的响应规律。

1) 人工神经网络能够有效地处理激光立体成形过程中多工艺参数问题, 为激光立体成形加工工艺的优化提供一个较为有效的工具。

2) 人工神经网络可以有效预测激光立体成形单道多层试样表面质量, 实验测得数据和模型预测数据的 MSE 小于 0.01, 具有较高的可靠性。

3) 折线扫描路径成型件影响表面质量最大的因素是拐角的角度, 其次是扫描速度。

验证实验表明, 人工神经网络模型对于激光立体成形件表面质量的预测结果真实可信, 为进一步提高成形件表面质量打下了良好的基础, 为实现激光立体成形闭环控制提供了一种较为有效的方法。

多层扫描试样表面质量预测的效果, 实验选取参数为 50°、100°、130°, 扫描速度为 3.5, 4.5 mm/s, 在其他工艺参数相同情况下做了验证实验, 实验结果如表 3 所示。从表中数据可知, 在扫描速度一定情况下, 预测结果数据符合随着折线扫描角度的增加拐点处沉积高度变小的规律; 在路径角度相同情况下, 随着速度的增大, 试样的层高及拐角处的层高呈逐渐下降的趋势。

参 考 文 献

- 1 J. Yu, X. Lin, L. Ma *et al.*. Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(3): 1094~1104
- 2 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 296~301
- 3 J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh *et al.*. Feedback control of selective laser melting[C]: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Virtual and Rapid Manufacturing Advanced Research Virtual and Rapid Prototyping, 2007, 29
- 4 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018
于君, 陈静, 谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 5 Chen Guangxia, Wang Zemin, Guan Kai *et al.*. Effects of parameters on surface roughness of samples by selective laser melting[J]. *Manufacturing Technology & Machina Tool*, 2009, (12): 86~89
陈光霞, 王泽敏, 关凯等. 工艺参数对 SLM 激光快速成形件表面粗糙度的影响[J]. *制造技术与机床*, 2009, (12): 86~89
- 6 Zhang Fengying, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Powder delivery behavior during laser solid forming from blended elemental powders[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1267~1272
张凤英, 陈静, 谭华等. 混合元系法激光立体成形过程粉末输送性研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1267~1272
- 7 H. Tan, J. Chen, F. Zhang *et al.*. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, **50**(1): 1~8
- 8 Stamp R., Fox P., O'Neill W. *et al.*. The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting[J]. *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2009, **20**(9): 1839~1848

- 9 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(10): 1839~1843
张霜银, 林 鑫, 陈 静 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(10): 1839~1843
- 10 Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin *et al.*. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 172~176
宁国庆, 钟敏霖, 杨 林 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2): 172~176
- 11 I. Yadroitsev, A. Gusarov, I. Yadroitsava *et al.*. Single track formation in selective laser melting of metal powders[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210** (12): 1624~1631