

文章编号: 1001-3806(2005)03-0244-04

## 人工神经网络技术在板料激光弯曲中的应用

王秀凤<sup>1,2</sup>, 吕晓东<sup>1</sup>, 陈光南<sup>2</sup>, 胡世光<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 基于人工神经网络基本理论, 建立在板料激光弯曲中预测材料表面最高温度、弯曲角度的 BP 网络模型。借助于 MATLAB 仿真软件中的神经网络工具箱作为开发平台, 将试验样本数据和经过试验验证的数值计算结果作为补充的样本数据用于 BP 网络的训练。利用训练好的 BP 网络对非线性的样本数据规律进行拟合, 实现激光加工工艺参数的优化, 为实际生产和加工提供有效的依据。

**关键词:** 人工神经网络; 板料激光弯曲; 表面最高温度; 弯曲角度

**中图分类号:** TG156.99 TN249 **文献标识码:** A

### Application of artificial neural network in laser sheet metal bending

WANG Xiufeng<sup>1,2</sup>, LYU Xiaodong<sup>1</sup>, CHEN Guangnan<sup>2</sup>, HU Shiguang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083 China; 2. Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

**Abstract** Based on the basic theory of artificial neural network, BP network model is founded to predict the highest surface temperature and bending angle in the process of laser sheet metal bending. Experimental result and numerical simulation result verified by experiment are used to train BP network by means of MATLAB software. Sample data regularity of non-linear is curve fitting through BP network so as to optimize technological parameters and provide effective foundation for actual production.

**Key words** artificial neural network; laser sheet metal bending; surface maximum temperature; bending angle

### 引 言

板料激光弯曲是利用激光作为热源使金属板料发生热塑性变形的一种新的柔性成形加工方法, 是激光非熔凝加工的新的应用领域。通过调整激光加工工艺参数可以控制热作用区域内的变形程度, 从而控制弯曲变形的大小和方向。由于不用模具, 不存在随之而来的模具制作费、制作周期、磨损、润滑等问题, 特别适合于形状简单的单件、小批量工件的弯曲成形, 还可以对一些形状特殊或尺度微小、难以采用其它加工方法加工的简单工件的弯曲成形, 因此, 它在航空航天、仪器仪表及各种机车车辆的样机生产中, 具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

在应用板料激光弯曲工艺时, 直接面临的困难是如何面对加工过程中影响因素多、耦合作用非常复杂的非线性热物理过程选取优化的激光加工工艺参数, 以便于在表面不熔化的条件下, 得到最大的弯曲角度,

从而进一步提高板料激光弯曲的成形效率。目前, 有学者将人工神经网络技术引入到板料激光弯曲工艺参数的优化中, 通过一定数量的试验数据及数值计算结果作为样本数据, 通过搭建的网络模型, 预测了板料激光弯曲角度<sup>[2]</sup>。但是为了减少试验量而采用的数值模拟计算结果作为补充的样本数据应该具有足够高的精度, 才能保证网络训练的精度。作者用镍铬-镍硅热电偶作为传感器来测量与激光扫描线相对应的板料下表面温度变化的规律, 并与用 MSC/MARC 非线性有限元软件进行模拟计算的结果进行比较, 然后分析判断, 通过计算的模型得到板料激光弯曲中材料表面最高温度和弯曲角度, 作为网络训练补充的样本数据, 将试验结果、数值模拟和人工神经网络技术有机地结合在一起, 开展板料激光弯曲中工艺参数的优化研究, 既大大节省了人力、物力和时间, 又符合目前学术发展的新趋势。研究目标的实现必将推动板料激光弯曲应用领域的实用进程。

### 1 人工神经网络模型的建立

人工神经网络是由若干神经元按照一定的规则连接成网络, 并让网络中各神经元的连接权按一定的规则变化。其实质是完成由输入空间到输出空间的映射。单个神经元的简单功能经过连接复合后, 整个网

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59836220); 航空基础科学基金资助项目 (98H51110)

作者简介: 王秀凤 (1963-), 女, 博士, 副教授, 主要从事塑性成型工艺、激光加工及其计算机应用方面的研究。

E-mail: wangxiufeng@2911.net

收稿日期: 2004-05-26 收到修改稿日期: 2004-08-10

络表现出极为复杂的特性,可以很好地模拟板料激光弯曲这种影响因素多、各因素间相互耦合的非线性过程。尽管神经网络模型类似于黑箱式的隐含模型,然而理论分析表明,用一个 3 层网络可按任意精度逼近某一非线性函数,即它能用于表达任意复杂的非线性模型,能够有效解决模型建立过程中的不确定性的模糊问题<sup>[3]</sup>。

本文中建模采用 3 层 BP 网络。根据所建模型的问题本身定义输入层节点数为 4 即输出功率、扫描速度、光斑直径、板料厚度;输出层节点数为 2 即材料表面的最高温度、弯曲角度。隐层节点承担着输入与输出之间的衔接任务,节点数的多少对预测精度有很大的影响。因为用神经网络预测材料表面的最高温度、弯曲角度,其实是从一个子空间到另一个子空间逼近的映射问题,必定存在一个最优的隐层节点数预测的精度最高,而在这一节点两侧预测的精度较低。通过选取不同的节点数进行训练比较,确定隐层节点数为 13 BP 网络的结构如图 1 所示。

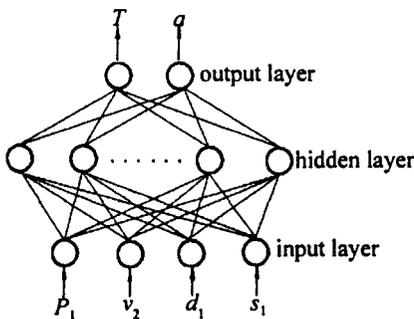


Fig 1 The general architecture of BP network predicting bending angle

借助于美国的 MathWorks 公司推出的 MATLAB 仿真软件中的神经网络工具箱作为开发平台,将试验样本数据和经过试验验证的数值计算结果作为补充的样本数据用于 BP 网络的训练,利用训练好的 BP 网络对非线性的样本数据规律进行拟合,实现激光加工工艺参数的优化,为实际生产和加工提供有效的依据。

BP 网络学习程序框图如图 2 所示。

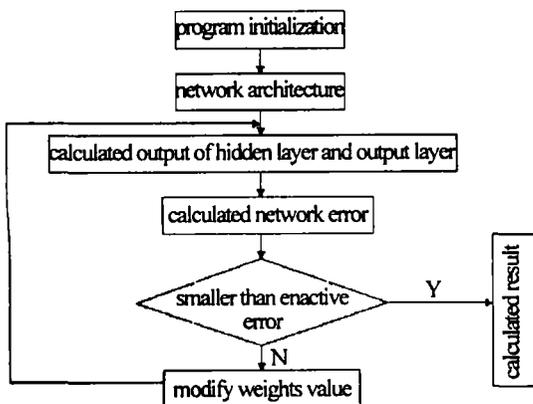


Fig 2 Learn program flow diagram of BP network

图 2 表明 BP 网络学习过程由正向和反向传播组成,在正向传播过程中,输入信息从输入层逐层处理,

并传向输出层,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果输出层不能得到期望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的连接通路返回,通过修改各层神经元的权值,使得误差信号最小。

学习过程中对隐层、输出层的输出计算及误差的判断都是通过调用神经网络工具箱中的函数来实现。其中隐层节点数的确定比较复杂,如果隐层节点数过少就不足以描述输入与输出之间的关系,而过多则会导致网络训练速度慢,所建模型泛化能力下降,一般按右式选取:

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

式中,  $h$  为隐层节点数;  $n$  为输入层节点数;  $m$  为输出层节点数;  $a$  为 0~10 之间的常数。

具体计算过程见下。

(1) 程序初始化

利用试验样本数据和经过试验验证的数值计算结果,作为补充的样本数据和作为网络的输入和输出数据,并将输入数据归一化处理,使之取值在 [0, 1, 0.9] 之间,以建立它们与 [0, 1] 间分布的网络实际输出的对应关系。为了加快收敛,采用变步长的方法。初始步长  $\eta = 0.6$  当网络训练过程出现动荡时,逐渐减小步长为  $0.9\eta$ ,最终步长取为 0.09。

(2) 创建前馈 BP 网络

隐层节点和输出层节点的传递函数分别为“tansig (反正切函数)”型和“purelin (线性函数)”型;采用 Levenberg-Marquardt 算法进行训练,与“trainbp”算法相比,训练速度快,但是占用内存多。

(3) 预定训练次数为 5000 次,希望的误差平方和指标为 0.0001,当训练步数达到预定值或误差达到期望值时都将停止训练。

(4) 对网络进行训练,绘制网络训练误差图,网络输出值与样本数据的比较图。

(5) 对网络进行检验,利用已训练好的网络得到网络输出值,绘制网络的预测值与检测样本数据值的比较图。

(6) 利用已训练好并检验后的网络,对新的工艺参数下的结果进行预测,得到优化的工艺参数。

## 2 用于训练人工神经网络的样本数据的获取

样本数据来自于试验结果和经过试验验证的数值计算结果。

### 2.1 试验

试验在中科院力学所材料工艺研究中心表面改性实验室进行。试验设备为 2kW 连续输出式 CO<sub>2</sub> 激光器。试验及测量装置如图 3 所示,试验选用材料 St14 试件尺寸:长 50mm,宽 20mm,厚度分别为 0.8mm, 1.0mm, 1.2mm, 1.5mm 的板料,板料一端被夹持在工

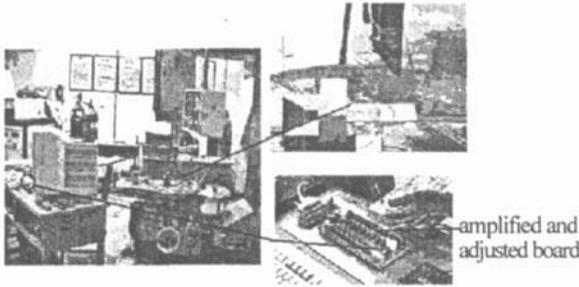


Fig 3 The experimental principle and measure scheme

作台上(夹持端为 10mm),激光束在中央沿板宽方向连续扫描。板料被照射表面涂氧化锆以提高材料对激光的吸收率。将镍铬-镍硅热电偶焊接在与激光扫描线相对应的板料下表面上,另一端与放大调理板连接,将热电偶反映出来的毫伏级电压信号放大成伏级电压信号,以使用柔性检测系统采集测量数据并显示温度随时间的变化曲线。

### 2.2 数值模拟

借助大型非线性有限元软件 MSC/MARC,对上述试验过程进行数值模拟。计算时所用的参数取自试验中所用的相关参数,具体过程可参见文献[1],这里不多阐述。

### 3 人工神经网络的训练与检验

网络在运行中,系统首先对试验数据和数值模拟的数据进行学习,训练样本数为 20。在经过 1441 次学习循环后,网络误差达到了规定的误差 0.0001。样本数据与网络输出的比较分别如图 4、图 5 所示。

图 4、图 5 表明,网络经学习后,网络输出的值与样本数据的值几乎一致,可以认为网络对每个样本数

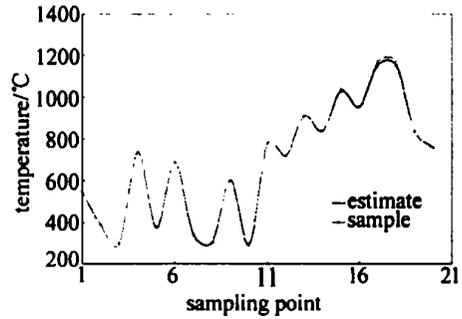


Fig 4 Compare sample data of surface maximum temperature with network output value

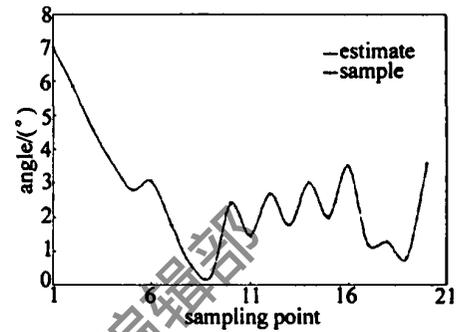


Fig 5 Compare sample data of bending angle with network output value

据有了基本的掌握,说明正确建立了网络的输入与输出关系,由此可见,该系统具有较好的稳定性。

网络的校验是很重要的,只有经过检验数据对网络的性能进行检查后,若结果满足要求,网络才能投入使用。网络检验数据的选择方式与训练数据的选择相同,包含了网络设计要求的全部模式,并且应不曾被作为网络学习的数据,这样,才能全面检查网络的性能。选取 2 组检测样本数据,用学习后的网络对其进行推断,网络预测值与检测样本数据值的比较如表 1 所示。

Table 1 Compare test sample data with network output value

	laser output power $P/W$	laser beam scan velocity $v/(mm \cdot s^{-1})$	laser beam diameter $d/mm$	sheet metal thickness $s/mm$	surface maximum temperature $T/^\circ C$	bending angle $\alpha/^\circ$
test sample data 1	500	33.33	3	1.5	618	1.09
network estimate value 1	500	33.33	3	1.5	615.2	0.947
test sample data 2	900	16.67	4	2.0	1075	2.37
network estimate value 2	900	16.67	4	2.0	1070	2.1367

表 1 中网络的预测值与检测样本数据值比较接近,可以认为预测值基本能够反映实际值的变化。表明用自学习学得的板料表面最高温度、弯曲角度与各个输入参量之间的关系可以作为预测新的样本上述指标的知识。网络利用这个知识进行推理,进而可以预测出该工艺条件下未经网络学习过的样本的上述指标,具有一定的实用价值。

### 4 模型的应用

训练好的网络就可以投入实际应用,用来预测激光弯曲后,板料表面最高温度和弯曲角度,为实际生产

和加工提供优化的激光工艺参数;同时可以通过网络预测方便地分析主要工艺参数对弯曲角度的影响,如

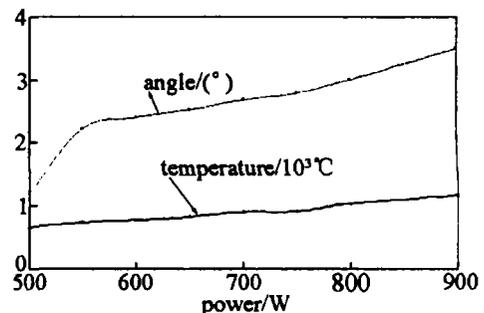


Fig 6 The influence of laser output power on the bending angle  $v = 16.67mm/s, d = 4mm, s = 1.5mm$

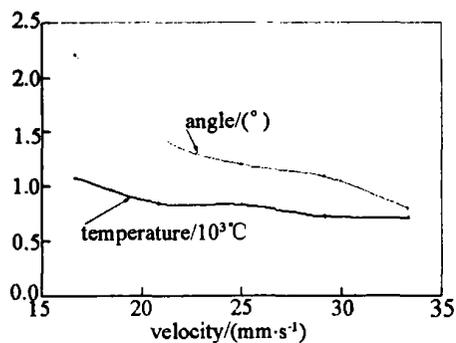


Fig 7 The influence of laser beam scan velocity on the bending angle  
 $P = 900\text{W}$ ,  $d = 4\text{mm}$ ,  $s = 2\text{mm}$

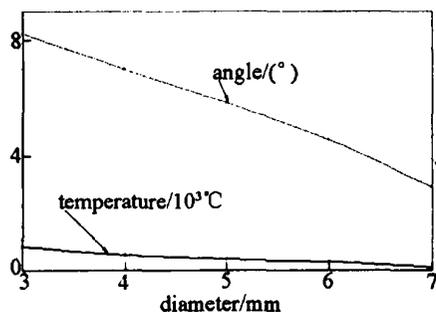


Fig 8 The influence of laser beam diameter on the bending angle  
 $v = 16.67\text{mm/s}$ ,  $P = 500\text{W}$ ,  $s = 0.8\text{mm}$

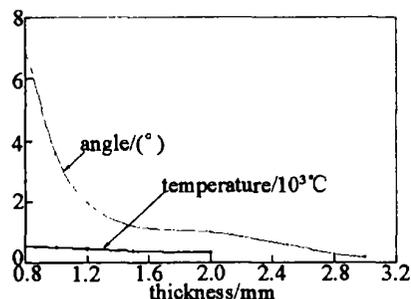


Fig 9 The influence of sheet metal thickness on the bending angle  
 $v = 16.67\text{mm/s}$ ,  $P = 500\text{W}$ ,  $d = 4\text{mm}$

图 6 ~ 图 9 所示。

图 6 ~ 图 8 表明, 当输出功率增加、扫描速度降低、光斑直径减小时, 由于板料表面吸收的能量增多,

使得板料表面达到的最高温度升高, 上、下表面之间温度梯度的增加导致弯曲角度的增大。图 9 表明, 当板料厚度减小时, 有限厚度边界的影响使得上表面温度升高, 由于截面惯性矩减少导致弯曲角度的增大; 当板料厚度增大到一定值时, 板料弯曲角度将减少到很小, 可以认为无法弯曲。

## 5 结 论

利用人工神经网络具有良好的记忆和预测能力, 对于复杂的非线性的数据处理能力强等特点。可以在较少的样本数据基础上建立激光工艺参数在弯曲中预测材料表面最高温度、弯曲角度的 BP 网络模型。计算结果表明, 所建立的 BP 网络模型, 不仅能自动获取学习样本中输入与输出的映射关系知识, 较准确地反映板料激光弯曲时工艺参数与弯曲角度的非线性关系, 而且对不完整信息能通过网络联想计算出合理的结果, 当添加或更新数据后, 还可以在原有的基础上继续学习, 这对于数据的继承和规律化的完善具有指导意义。利用这一模型, 还可以通过网络预测方便地分析主要工艺参数对弯曲角度的影响, 以便于在加工时根据要求, 选取适当的工艺参数。

需要说明的是, 在程序运行过程中, 对于样本数据, 尽管由于通过随机函数所赋初值而得到不同的连接权值, 但这不妨碍最后的交互运行结果, 说明人工神经网络具有较强的容错性。

## 参 考 文 献

- [1] 王秀凤. 激光非熔凝加工技术在板料成形中的应用 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003. 42~78, 118~127.
- [2] 季 忠. 板料激光弯曲成形及其数值模拟 [D]. 西安: 西北工业大学, 1997. 62~67.
- [3] 袁曾任. 人工神经网络及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 66~131.

· 简 讯 ·

## 投稿须知

1 全文要求不超过 4000 字 (总字符数不超过 6000); 图表不得重复; 公式的推导过程应尽量简炼, 尤其不要将他人的结论引用得过多。

2 参考文献的年限请控制在最近 10 年内; 务必引用一些在本刊发表的文章; 中文文献请提供英文对照, 并在结尾处加注 (in Chinese)。

3 一定不要一稿多投! 否则将取消当事人 3 年内在本刊发表学术论文的权利, 并通报同类刊物。