

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0355-04

提高激光打孔质量的理论分析与工艺优化的研究

卞飞, 萧泽新

(桂林电子工业学院机电与交通工程系, 广西 桂林 541004)

摘要 使用天津大学生产的JG-2016数控YAG激光加工机在Q235-A钢上进行大量实验,发现在激光打孔工艺参量中,激光器工作电压、激光脉冲频率、激光脉宽大小及辅助气体气压对圆度有着较大的影响。运用灰色系统理论中灰色关联分析方法,对上述加工参量进行灰关联度和灰联序分析,找出了与激光打孔相关的工艺参量对孔圆度、锥度影响大小的排序规律;提出运用灰色系统GM(1,N)模型和神经网络模型进行混合建模,建立各项激光打孔工艺参量与激光打孔表面圆度、锥度之间非线性、多耦合的数学模型。由此对激光打孔的加工工艺进行优化,从而提高了激光打孔质量,减小孔圆度误差及轴向锥度。

关键词 激光技术; 激光打孔; 灰色系统理论; 人工神经网络; 工艺优化

中图分类号 TG665

文献标识码 A

Theoretical Analysis on Improving the Quality of Laser Drilling and Technique Optimization

BIAN Fei, XIAO Ze-xin

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The experiments for Q235-A steel using the Tianjin JG-2016 numerical control YAG laser processing machine showed that the laser working voltage, laser pulse frequency, laser pulse width and assistant gas pressure influence the round degree mostly among all the laser drilling parameters. Based on the mode of Grey relevant analysis in grey system theory, the rule relation among the laser drilling parameters which effected the round degree and conical degree was found, and a building up mixed mathematical models using grey system GM (1,N) model and neural network model was also proposed which can reflect the nonlinear and multi-coupling relationship of the laser drilling surface round degree, conical degree and laser drilling parameter. Thus the processing technology of the laser drilling can be optimized, so as to improve the qualities and reduce the round degree and axial conical degree error as well.

Key words laser drilling; grey system theory; artificial neural network; processing optimization

1 引言

激光打孔是最早达到实用化的激光加工技术,也是激光加工的重要应用领域之一。通过使用天津大学生产的JG-2016数控YAG激光加工机在A3钢板上对激光打孔的圆度进行了大量的实验,发现激光加工参量(激光器工作电压、激光脉冲频率、激光脉宽大小及辅助气体气压等)对激光打孔圆度、锥度有着很大的影响。

2 灰色关联分析

灰色关联分析是对系统变化发展态势的定量描述和比较的方法,确定参考序列和若干比较序列之

间的关联系数和关联度,其目的是寻求系统中各因素间的主要关系,找出影响目标值的重要因素,从而掌握事物的主要特征,促进和引导系统迅速而有效地发展。

设有两个序列 X_i 和 X_j ,两者的关联度系数记为 $\xi_{ij}(k)$, k 表示 X_i 与 X_j 比较关联度的采样点,记

$$a_{ij} [k=X_j(k)-X_i(k)], k \in \{1,2,\dots,n\}$$

$$a_{\min}=\min_j \min_k a_{ij}(k), a_{\max}=\max_j \max_k a_{ij}(k)$$

定义 $\xi_{ij}(k)$ 为

$$\xi_{ij}(k)=\frac{a_{\min}+a_{\max} \cdot m}{a_{ij}(k)+a_{\max} \cdot m}, k \in \{1,2,\dots,n\}$$

其中 m 为常量, $m \in \{0,1\}$,则序列 X_i 和 X_j 的关联

作者简介: 卞飞(1977-),男,桂林电子工业学院硕士研究生,主要从事激光加工、光机电一体化研究。

E-mail: bianfly@sina.com

度为

$$r_{ij} = \frac{1}{N-1} \cdot \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^N \xi_{ij}(k) + \sum_{k=2}^{N-1} \xi_{ij}(k) \right]$$

r_{ij} 的大小反映了 X_i 和 X_j 的关联序列。

在此,由试验样本(如表 1)得到激光打孔上下

表面圆度、孔锥度与激光器工作电压、激光脉冲频率、激光脉宽大小及辅助气体气压的关联度矩阵如表 2。可以看出工作电压对激光打孔上、下表面圆度及孔锥度影响最大;且上表面圆度最受激光打孔工艺参量变化的影响。

表 1 激光打孔试验样本

Table 1 Laser drilling test samples

Working Voltage /V	Pulse frequency /Hz	Pulse width /ms	Gas pressure /Mpa	Up-surface round degree /mm	Up-surface round degree /mm	Conical degree
650	35	2.0	0.15	0.4738	0.2050	0.2688
580	40	2.0	0.30	0.4763	0.2125	0.2638
625	40	1.5	0.30	0.4550	0.2250	0.2300
602	40	2.0	0.30	0.4600	0.2325	0.2275
604	50	1.5	0.30	0.5488	0.2350	0.3138

表 2 关联度矩阵

Table 2 Grey relevant analysis

	Up-surface round degree	Down-surface round degree	Conical degree
Working voltage	0.8868	0.7874	0.8426
Pulse frequency	0.7226	0.6860	0.6198
Pulse width	0.8418	0.7682	0.8154
Gas pressure	0.4788	0.4799	0.4557

3 灰色神经网络混合建模

3.1 灰色神经网络基本思想

所谓灰色神经网络就是将灰色系统方法与神经网络方法有机地结合起来,对复杂的不确定性问题进行求解所建立的模型。灰色系统(Grey System)是指信息不完全、不确定的系统,灰色问题是指结构、特征、参量等信息不完备的问题^[1]。而神经网络具有并行计算,分布式信息存储,容错能力强,自适应学习功能等优点,在处理复杂的人工智能问题上显示出极优越的地位^[2]。通过对灰色系统和神经网络的研究发现两者各有所长,若将两者结合起来,建立一种兼具两者优点的模型,在求解灰色问题时,与神经网络模型相比:计算量小,在少样本情况下也可达到较高精度;与灰色系统 GM 模型相比,计算精度高,且误差可控。

3.2 灰色系统建模

3.2.1 建模机理

灰色理论将随机量当作一定范围内变化的灰色量,将无规律的原始数列经生成后,使其变为较有规

律的生成数列,建立微分方程模型^[1]。通过灰数的不同生成方式,数据的不同取舍,不同级别的残差 GM 模型,来调整、修正、提高精度。在考虑残差 GM 模型的补充和修正后,得到的模型变成了差微分模型。

3.2.2 GM(1,N)模型

激光打孔上、下表面圆度值为 X_1, X_2 ; 工作电压、脉冲频率、脉宽大小及辅助气体气压分别为 X_3, \dots, X_6 。设

$$X_1^{(0)} = [x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)]$$

$$X_2^{(0)} = [x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(n)]$$

为系统特征数列序列。

$$X_3^{(0)} = [x_3^{(0)}(1), x_3^{(0)}(2), \dots, x_3^{(0)}(n)]$$

.....

$$X_6^{(0)} = [x_6^{(0)}(1), x_6^{(0)}(2), \dots, x_6^{(0)}(n)]$$

为相关因素序列。

建立 GM(1,N)灰色模型,算法如下

1) $X_i^{(1)}$ 为 $X_i^{(0)}$ 的 1-AGO 序列:

$$X_i^{(1)} = [x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(n)], \quad i=1,2,\dots,6$$

其中 $x_i^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x_i^{(0)}(m), \quad k=1,2,\dots,n$

2) $Z_i^{(1)}$ 为 $X_i^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列:

$$Z_i^{(1)} = [z_i^{(1)}(2), z_i^{(1)}(3), \dots, z_i^{(1)}(n)]$$

其中 $z_i^{(1)}(k) = 0.5x_i^{(1)}(k) + 0.5x_i^{(1)}(k-1)$

3) 建立 GM(1,N)的灰色微分方程:

$$x_1^{(1)}(k) + ax_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^6 b_i z_i^{(1)}(k)$$

上述方程参量列为: $a = [\hat{a}, b_2, b_3, \dots, b_6]^T$ 。

按最小二乘法估计满足:

$$\hat{a}=(B^T B)^{-1} B^T Y$$

其中

$$B=\begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_6^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_6^{(1)}(3) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \cdots & x_6^{(1)}(n) \end{bmatrix}, Y=\begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \cdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

则近似时间相应式为

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1)=\left[x_1^{(0)}(0)-\frac{1}{a}\sum_{i=2}^6 b_i x_i^{(1)}(k+1)\right]\exp(-ak)+\frac{1}{a}\sum_{i=2}^6 b_i x_i^{(1)}(k+1)$$

累减还原为

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1)=\hat{x}_1^{(1)}(k+1)-\hat{x}_1^{(1)}(k)$$

得到模型的计算值。而通常经过第一次计算并不能得到理想的结果。为此引入残差模型进行修正。如果一次残差分析还不理想,可以继续作残差计算,不断提高模型的精度,直到满意为止。

3.3 神经网络建模

人工神经网络具有自适应、自学习、自组织和强容错性等特征^[2]。在人工神经网络中应用最广泛的是 BP 网络,它是以输入、隐层、输出 3 单元组成的前向连接模型,同层各神经元之间互不相连,相邻层的神经元通过连接权重全互连,并且由于隐含节点的引入,使得 1 个 3 层的具有 Sigmoid 神经元的非线性网络可以任意精度逼近任何连接函数,因而在很多领域中都得到了广泛的应用。

在建立激光打孔的 BP 神经网络模型时将隐含层选为一层,建立以工作电压、激光脉冲频率、激光脉宽大小及辅助气体气压为输入层,以激光打孔上下表面圆度为输出层的三层 BP 神经网络。确定的隐元数目为 13,隐含层取 Sigmoid 函数,输出层取 Purelin 函数。

3.4 混合建模

综合人工神经网络(ANN)和灰色系统 GM(1,N)预报模式的优点,可建立一种新型的综合预报模型:对相同的数据序列,分别建立 ANN 和 GM(1,N)预报模型,则综合预报模型 ANN-GM(1,N)的预报序列可由下式求出:

$$X_{\text{ANN-GM}}(i+1)=\alpha_i X_{\text{ANN}}(i+1)+\beta_i X_{\text{GN}}(i+1)$$

式中, α_i, β_i 为视不同加工工况而定的调整系数,可根据下述方法确定:

设 P_{1i} 为 ANN 模型对其学习样本组输出序列的平均预报误差;同理, P_{2i} 为 GM(1,N)模型的平均预报误差,则

$$\alpha_i=P_{2i}/(P_{1i}+P_{2i}), \beta_i=P_{1i}/(P_{1i}+P_{2i})$$

3.5 实践验证

通过激光打孔试验验证所建灰色神经元混合模型的正确性。给定三组激光打孔的加工参量,通过模型确定激光打孔的上、下表面圆度及锥度的计算值。并以此加工参量进行激光打孔试验,得到实际的激光打孔上、下表面圆度及锥度值。比较结果如表 3。由

表 3 激光打孔实际值与预测值比较

Table 3 Compare actual value of laser drilling with the predicting value of ANN-GM(1,N) model

Working voltage /V	Pulse frequency /Hz	Pulse width /ms	Gas pressure /Mpa	Up-surface round /mm			Down-surface round /mm			Conical degree		
				Actual value	Predicting value	Relative error /%	Actual value	Predicting value	Relative error /%	Actual value	Predicting value	Relative error /%
650	35	2.0	0.15	0.4738	0.4365	7.87	0.2050	0.1952	4.78	0.2688	0.2398	10.78
613	40	1.5	0.30	0.4638	0.4832	-4.18	0.2451	0.2564	-4.60	0.2187	0.2268	-3.70
576	40	1.5	0.30	0.4350	0.4664	-7.22	0.2105	0.2299	-9.23	0.2245	0.2365	-5.35

发现两者符合良好,激光打孔的上、下表面圆度及锥度的平均误差分别为-1.18%,3.02%,0.58%,表明该模型能够较好地反映激光打孔工艺参量与激光打孔的上、下表面圆度及锥度值之间的相互关系。

4 工艺参量的优化

为了寻找适宜的激光打孔加工参量,使激光打孔轴向锥度值最小,采用遗传算法进行工艺参量优

化。

利用灰色神经网络模型为目标函数,以获得最小的激光打孔锥度值为优化目标,确定种群个体数为 20;激光打孔工作电压、频率、脉宽及辅助气体气压等 4 个工艺参量采用二进制编码,经过 600 次迭代后得到两个最优样本。

上述工艺参量经试验检验,预测值与试验值吻合较好,表明优化结果(表 4)是可信的。

表 4 激光打孔工艺优化结果

Table 4 Result of laser drilling processing optimization

Working voltage /V	Pulse frequency /Hz	Pulse width /ms	Gas pressure /Mpa	Conical degree	
				Optimization value	Actual value
604	35	2.0	0.20	0.2100	0.2143
604	40	1.5	0.20	0.2097	0.2141

5 结 论

1) 采用灰色关联分析方法定量分析激光打孔参量与激光打孔上、下表面、锥度的相关程度。实践表明这是一个简单易行的方法。

2) 灰色-神经网络模型能较好地反映激光打孔加工参量与圆度、锥度之间的相互关系。

3) 灰色-神经网络模型与遗传算法相结合作为一种新颖的拟合和优化手段,为激光打孔工艺参

量优化、性能预测提供了一条崭新的途径,对实践有较高的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Deng Julong. Grey Control System[M]. Wuhan: HUST Press,1989
邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中理工大学出版社,1989
- 2 Jiao Licheng. The System theory of Neural Networks[M]. Xi'an: Xidian University Press,1996
焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,1996