

# 工件超声振动电火花复合加工技术的研究

王璟, 祝锡晶, 庞昊斐

(中北大学 机械与动力工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**采用正交试验和信噪比两种分析方法,并基于BP神经网络,研究了工件超声振动电火花复合加工技术的两个重要方面:工艺参数优化和工艺预测模型。研究了间隙电压、峰值电流、脉冲宽度和脉冲间隔对表面粗糙度及加工时间的影响,得到了基于试验数据的预测模型。结果表明,对表面粗糙度影响最大的电参数是峰值电流,然后依次为间隙电压、脉冲间隔、脉冲宽度,最优参数组为间隙电压 65 V,峰值电流 2 A,脉冲宽度 5  $\mu$ s,脉冲间隔 70  $\mu$ s;对加工速度影响最大的电参数是峰值电流,然后依次为脉冲宽度、间隙电压、脉冲间隔,最优参数组为间隙电压 65 V,峰值电流 8 A,脉冲宽度 50  $\mu$ s,脉冲间隔 10  $\mu$ s。通过信噪比分析得到的结果与正交试验分析得到的结果基本相同,但信噪比分析的结果比正交试验分析的结果稳定性得到提高。

**关键词:**超声振动电火花复合加工; 正交试验; 信噪比; BP神经网络

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.16.034

中图分类号: TG663

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)16-0133-04

## Study on Technology of Ultrasonic EDM

WANG Jing, ZHU Xijing, PANG Haoifei

(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Adopting two analysis methods of orthogonal test and signal-to-noise ratio, based on BP neural network, the two important aspects of ultrasonic EDM were studied, such as process parameters optimization and process prediction model. The influences of gap voltage, peak current, pulse width and pulse interval on the surface roughness and processing time were studied. The prediction model based on experiment data could be obtained. The results show that the biggest influence on the surface roughness is the peak current, and then the gap voltage, pulse interval and pulse width are in turn. The optimal parameter group is the gap voltage 65V, the peak current 2A, the pulse width 5  $\mu$ s and the pulse interval 70  $\mu$ s. The biggest impact on the processing speed is the peak current, and then followed by the pulse width, gap voltage, pulse interval, the optimal parameter group is the gap voltage 65V, the peak current 8A, the pulse width 50  $\mu$ s, the pulse interval 10  $\mu$ s. The results obtained by signal-to-noise ratio are basically the same as the results obtained by orthogonal test, but the stability of the results obtained by signal-to-noise ratio is better than that obtained by orthogonal test.

**Key words:** ultrasonic EDM; orthogonal test; signal-to-noise ratio; BP neural network

工件超声振动电火花复合加工是把超声振动加载在工件上的复合放电加工方法<sup>[1]</sup>。这种加工方法把超声波加工与电火花加工的优缺点进行互补,使得工件加工效率和表面质量都优于单一的电火花加工或者超声波加工。在普通电火花加工中加入超声振动以后,放电通道更易形成,而且大大减少了拉弧放电的发生。超声产生的空化作用,有助于材料的去

除,涡流和泵吸作用对于工作液冷却、工作液循环、消电离过程都有显著的影响<sup>[2]</sup>。由于工件超声振动电火花复合加工的上述特点,在工业界和学术界得到了广泛关注<sup>[3-5]</sup>。

工艺参数优化和工艺预测模型是工件超声振动电火花复合加工技术的两个重要方面,对实现难加工材料和复杂零件型面高质量、高效率加工有重要影响,因此有必要对工艺参数优化方法和工艺预测模型进行研究。

本文首先建立正交试验,采用极差分析对正交试验数据进行处理,研究了工艺参数(间隙电压、峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔)对工艺效果(表面粗糙度、加工时间)的影响。为提高工艺性能的稳定性,用

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51275490);国家自然科学基金项目(50975265);山西省自然科学基金项目(201601D011061)

作者简介:王璟(1990-),男,山西朔州人,硕士研究生;主要研究方向为精密与特种加工;电话:18434360156;

E-mail:wj249569000@163.com

信噪比的方法对正交试验结果进行分析。最后基于BP神经网络,结合试验数据,对工件超声振动电火花复合加工工艺过程进行仿真,建立了工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型,并对所建立的预测模型进行验证。研究结果为工件超声振动电火花高效率高精度加工提供了重要参考。

## 1 试验条件和内容

工件超声振动电火花复合加工的试验条件与加工参数如表1所示。在整个试验过程中,超声频率和超声振幅(通过超声波发生器输出电压进行调整)保持不变。本试验研究了工艺参数(间隙电压、峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔)对工艺效果(加工时间、表面粗糙度)的影响,只考虑了间隙电压、峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔4个电参数。

表1 试验条件与加工参数

Tab.1 Experimental conditions and processing parameters

峰值电流 /A	2、4、6、8
间隙电压 /V	35、45、55、65
脉冲宽度 / $\mu$ s	5、20、35、50
脉冲间隔 / $\mu$ s	10、40、70、100
电火花成型机床	EDM450/60NC
加工类型	US-EDM
加工深度 /mm	0.2
加工极性	负极性
超声装置	H66MC 超声波发生器
超声频率 /kHz	19
超声波发生器输出电压 /V	130
工作液	电火花加工专用工作液
电极材料 /mm	$\phi 6$ 的柱体紫铜
7075 铝合金工件材料 /mm	50 mm $\times$ 11 mm $\times$ 11 mm
粗糙度测量仪	JB-5C
环境温度	室温

通过参阅正交试验设计手册,每个电参数各选取四个水平<sup>[6]</sup>,设计出的正交试验因素-水平表如表2所示。试验结果如表3所示。加工时间和表面粗糙度通过多次测量取平均值获得。

表2 正交试验因素-水平表

Tab.2 Table of factors and levels of orthogonal text

水平	间隙电压 A/V	峰值电流 B/A	脉冲宽度 C/ $\mu$ s	脉冲间隔 D/ $\mu$ s
1	35	2	5	10
2	45	4	20	40
3	55	6	35	70
4	65	8	50	100

## 2 试验结果与分析

### 2.1 正交试验下的极差分析

表3 正交试验数据表

Tab.3 Table of orthogonal test data

号数	因素				表面粗糙度 / $\mu$ m	加工时间 /min
	间隙电压 A/V	峰值电流 B/A	脉冲宽度 C/ $\mu$ s	脉冲间隔 D/ $\mu$ s		
1	1(35)	1(2)	2(20)	3(70)	2.635	14.46
2	1(35)	2(4)	1(5)	1(10)	3.813	6.33
3	1(35)	3(6)	3(35)	2(40)	5.240	2.53
4	1(35)	4(8)	4(50)	4(100)	5.444	3.11
5	2(45)	1(2)	1(5)	2(40)	2.935	23.35
6	2(45)	2(4)	3(35)	3(70)	4.107	9.63
7	2(45)	3(6)	2(20)	1(10)	6.362	1.12
8	2(45)	4(8)	4(50)	4(100)	6.500	3.14
9	3(55)	1(2)	3(35)	1(10)	3.207	10.59
10	3(55)	2(4)	2(20)	2(40)	3.447	8.62
11	3(55)	3(6)	1(5)	3(70)	2.938	24.47
12	3(55)	4(8)	4(50)	4(100)	4.021	13.21
13	4(65)	1(2)	3(35)	4(100)	2.102	13.45
14	4(65)	4(8)	2(20)	1(10)	3.088	6.01
15	4(65)	2(4)	1(5)	2(40)	4.301	2.15
16	4(65)	3(6)	4(50)	3(70)	3.010	2.94

表4为极差分析表。可看出,各电参数对7075铝合金工件水平超声振动电火花复合加工效果的影响顺序与最优参数组分别为:①表面粗糙度:峰值电流>间隙电压>脉冲间隔>脉冲宽度,最优参数组为间隙电压65V,峰值电流2A,脉冲宽度5 $\mu$ s,脉冲间隔70 $\mu$ s。②加工时间:峰值电流>脉冲宽度>间隙电压>脉冲间隔,最优参数组为间隙电压65V,峰值电流8A,脉冲宽度50 $\mu$ s,脉冲间隔10 $\mu$ s。

表4 极差分析表

Tab.4 Table of range analysis

		因素			
		间隙电压 A	峰值电流 B	脉冲宽度 C	脉冲间隔 D
表面粗糙度	$k_1$	4.283	2.720	3.497	4.118
	$k_2$	4.976	3.917	3.883	3.981
	$k_3$	3.403	4.388	3.664	3.173
	$k_4$	3.125	4.763	4.744	4.517
	极差	1.851	2.043	1.247	1.344
加工时间	$k_1$	6.61	15.46	14.08	6.01
	$k_2$	9.31	6.68	7.55	9.16
	$k_3$	14.22	7.77	9.05	12.88
	$k_4$	6.14	6.34	5.60	8.23
	极差	8.08	9.12	8.48	6.87

### 2.2 信噪比分析

为了得到准确的试验结果,常常需要进行重复性试验,如果采用正交试验的分析方法,随机干扰因素就不能被反映出来,因此需要采用信噪比的分析方法<sup>[7]</sup>。

本试验的试验结果(表面粗糙度、加工时间)希望越小越好,即采用信噪比(S/N)的望小特性进行分

析。即：

$$S/N = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

式中： $n$  为重复试验次数； $y_i$  为第  $i$  次重复试验的工艺效果目标值。

通过将试验数据代入式(1)求得表面粗糙度和加工时间的信噪比,见表 5。表面粗糙度和加工时间的信噪比极差分析分别如表 6、7 所示。

表 5 表面粗糙度和加工时间的信噪比  
Tab.5 The signal-to-noise ratio of surface roughness and machining time

工艺号	数值	数值	数值	信噪	工艺号	数值	数值	数值	信噪比	
效果数	1/ $\mu\text{m}$	2/ $\mu\text{m}$	3/ $\mu\text{m}$	比/dB	效果数	1/min	2/min	3/min	/dB	
表面粗糙度	1	2.521	2.767	2.617	-8.442	1	14.59	14.41	14.38	-23.20
	2	3.944	3.744	3.751	-11.628	2	5.09	6.33	7.57	-16.14
	3	5.100	5.240	5.380	-14.389	3	2.53	2.66	2.40	-8.07
	4	5.142	5.444	5.746	-14.727	4	3.11	3.33	3.00	-9.97
	5	2.987	2.764	3.054	-9.360	5	23.30	27.40	19.35	-27.45
	6	3.988	4.123	4.210	-12.273	6	10.23	9.09	9.57	-19.68
	7	6.011	6.587	6.488	-16.079	7	1.33	1.01	1.02	-1.06
	8	6.231	6.666	6.603	-16.262	8	3.02	3.12	3.16	-9.83
	9	3.001	3.224	3.396	-10.133	9	10.45	11.01	10.31	-20.50
	10	3.248	3.547	3.546	-10.756	10	8.55	8.65	8.66	-18.71
	11	2.988	2.917	2.909	-9.362	11	26.33	24.01	23.07	-27.79
	12	4.021	4.323	3.719	-12.103	12	13.22	13.24	13.20	-22.42
	13	2.122	2.001	2.183	-6.458	13	13.45	13.01	13.89	-22.58
	14	3.019	3.025	3.220	-9.798	14	5.98	6.10	5.95	-15.58
	15	4.310	4.301	4.292	-12.671	15	1.02	3.36	2.07	-7.43
	16	3.005	3.010	3.015	-9.571	16	3.08	2.94	2.80	-9.37

表 6 表面粗糙度信噪比极差分析  
Tab.6 Range analysis of signal-to-noise ratio of surface roughness

序号		均值 /dB			
		间隙电压 A	峰值电流 B	脉冲宽度 C	脉冲间隔 D
1	$k_1$	-12.297	-8.598	-10.755	-11.910
2	$k_2$	-13.494	-11.832	-11.269	-11.794
3	$k_3$	-10.589	-12.350	-10.813	-9.912
4	$k_4$	-9.6245	-13.223	-13.166	-12.388
极差		3.8695	4.625	2.441	2.476

表 7 加工时间信噪比极差分析  
Tab.7 Range analysis of signal-to-noise ratio of machining time

序号		均值 /dB			
		间隙电压 A	峰值电流 B	脉冲宽度 C	脉冲间隔 D
1	$k_1$	-23.43	-14.64	-19.70	-13.32
2	$k_2$	-15.49	-19.70	-14.64	-15.42
3	$k_3$	-11.57	-17.71	-17.71	-20.01
4	$k_4$	-14.45	-12.90	-12.90	-16.20
极差		8.62	11.86	6.80	6.69

对于表面粗糙度：信噪比分析出来的各因素影响顺序和最优参数组与正交试验分析出来的相同，分别为：影响顺序：峰值电流>间隙电压>脉冲间隔>脉冲宽度，最优参数组为间隙电压 65V，峰值电流 2A，脉冲宽度 5 $\mu\text{s}$ ，脉冲间隔 70 $\mu\text{s}$ 。按这个工艺组合进行 3 次试验，得到表面粗糙度分别为 2.044、2.128、1.960 $\mu\text{m}$ ，信噪比值为-6.214 dB，比正交试验得出的所有结果要好些，即表明通过信噪比得到的结果稳定性得到提高。

对于加工时间：信噪比分析出来的各因素影响顺序与正交试验分析出来的不相同，为峰值电流>间隙电压>脉冲宽度>脉冲间隔。可能由于：一方面试验的过程中存在加工误差，使得加工时间测量的有偏差；另一方面可能是分析计算本身不够准确。信噪比分析出来的最优参数组，间隙电压由 65V 变为 55V，而峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔保持不变。按照间隙电压 55V，峰值电流 8A，脉冲宽度 50 $\mu\text{s}$ ，脉冲间隔 10 $\mu\text{s}$  进行 3 次试验，得到加工时间分别为：1.09、1.20、1.08 min，均值为 1.13 min，比正交试验所有试验结果的最小值 1.12 min 略大。信噪比值为-1.02 dB，为所有试验结果的最大、最优值。即表明通过信噪比得到的试验结果虽然较正交试验得到的试验结果略有增加，但是稳定性得到了提高。

### 3 仿真模型的建立

在工件超声电火花加工过程中，既有电参数，又有非电参数和超声参数，参数之间还存在着复杂的关系，工艺规律很难用一个准确的数学模型来描述<sup>[8]</sup>。而 BP 神经网络具有非常强大的非线性映射能力，因此，基于 BP 神经网络建立的工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型可有效解决上述问题。

#### 3.1 BP 神经网络模型结构的确立

综合正交试验数据和 BP 神经网络理论，建立三层 BP 神经网络。间隙电压、峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔 4 个工艺参数作为工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型的输入层，加工时间和表面粗糙度作为输出层。由于 BP 神经网络通常采用 3 层 BP 神经网络<sup>[9]</sup>，因此隐含层采用一层。隐含层节点数的选取一般在满足精度的情况下尽可能少，根据：

$$x \leq n < y - 1 \quad (2)$$

式中： $x$  为输入层个数； $y$  为学习样本个数； $n$  为节点数，取 4~14。通过反复试验训练，当隐含层节点数为

6 时, 达到预定的最大目标误差  $E=1 \times 10^{-5}$  时迭代次数最少, 如图 1 所示。最终网络模型结构为 4-6-2。

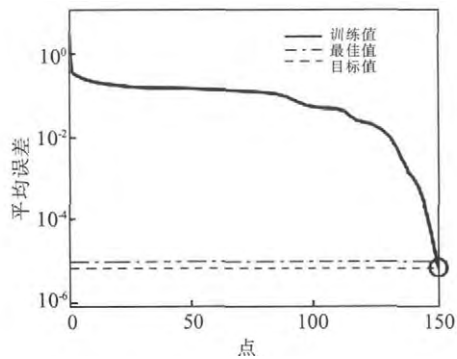


图1 网络训练误差曲线

Fig.1 Network training error curve

### 3.2 BP神经网络训练参数的选择与训练结果分析

BP神经网络训练参数的选择为输入层到隐含层传递函数:tansing, 隐含层到输出层传递函数: purelin, 训练样本归一化处理函数:premnmx, 预测样本归一化处理函数:tramnmx, 反向传播算法:批处理训练模式, 训练函数:trainbr, 学习率:0.05, 训练次数:5000, 最大目标误差:0.00001。网络模型的预测值与试验测得的实际值比较如图2所示。可看出, 通过工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型得到的预测值与正交试验所得实际值之间的误差非常

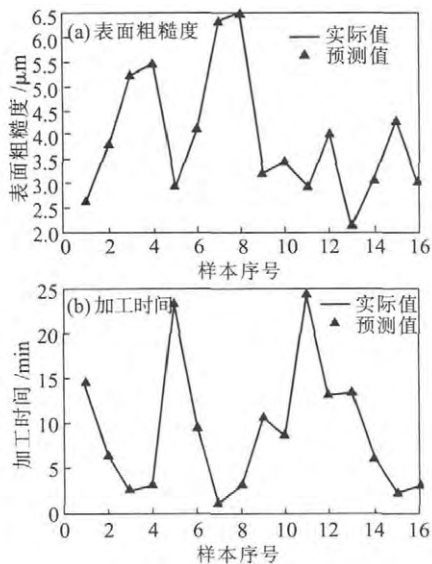


图2 预测值与实际值比较图

Fig.2 Comparison of predictive value and actual value

小, 在可接受范围之内, 即仿真值与试验值基本相同。证明所建立的工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型的预测精度高, 可运用在实际工件超声振动电火花复合加工中。

## 4 结论

(1) 通过极差分析法对正交试验结果进行分析可得各加工参数对工艺效果的影响规律。对于表面粗糙度: 峰值电流>间隙电压>脉冲间隔>脉冲宽度, 最优参数组为间隙电压 65V, 峰值电流 2A, 脉冲宽度 5 μs, 脉冲间隔 70 μs; 对于加工速度: 峰值电流>脉冲宽度>间隙电压>脉冲间隔, 最优参数组为间隙电压 65V, 峰值电流 8A, 脉冲宽度 50 μs, 脉冲间隔 10 μs。

(2) 通过信噪比分析得到的结果比正交试验分析得到的结果稳定性得到提高。

(3) 通过工件超声振动电火花复合加工工艺预测模型得到的预测值与正交试验所得实际值之间的误差非常小, 可运用于实际加工中。

## 参考文献:

- [1] 车江涛. 水平超声振动电火花复合加工装置及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [2] 袁根福, 祝锡晶. 精密与特种加工技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [3] 缪东辉. 超硬材料的超声电火花复合加工的试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [4] 张树彩. 超声电火花线切割复合加工的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [5] 徐明刚. 超声振动-气体介质电火花复合加工技术及机理研究 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [6] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 顾丰. 电火花微小孔加工工艺参数优化及建模的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [8] 彭泽军, 王宝瑞, 陈辉. 基于神经网络的电火花加工工艺选择模型研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(4):394-397.
- [9] 邓宗庆. 混粉电火花加工工艺及神经网络仿真研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005. 