

微细电火花深小孔加工在线优化伺服算法研究

褚旭阳,张利,全学军

(厦门大学航空航天学院,福建厦门 361005)

摘要:为了提高微细电火花加工伺服控制系统的精度、实现对伺服间隙的智能控制,提出了以模糊控制算法为基础,通过自调节算法建立合适的目标值,以实现基于模糊控制的BP神经网络在线优化算法,从而提高伺服控制的准确性。同时,采用下位机实现核心控制算法,保证了伺服控制的稳定性和实时性。通过微细电火花深小孔加工实验证明,采用BP神经网络在线优化算法能提高加工精度和加工效率。

关键词:微细电火花加工;深小孔;伺服控制算法;在线优化

中图分类号:TG661 文献标识码:A 文章编号:1009-279X(2018)04-0020-05

Study on Online Optimization Servo Control Algorithm for Small Deep Hole Using Micro EDM

CHU Xuyang, ZHANG Li, QUAN Xuejun

(School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: An algorithm based on fuzzy logic, which can develop proper target values through self turning and realize online optimization using BP neural network was designed to raise the precision of the servo control system of the micro EDM. In addition, this algorithm was integrated to low computer, which can ensure the ability of stable and real time of the control serve system. As the micro holes drilling process in micro EDM experiment showed, the precision and efficiency of the machining had been improved.

Key words: micro EDM; deep hole; algorithm of servo control; online optimization

在微细电火花深小孔加工过程中,由于加工间隙小、排屑困难,导致微细电极损耗率高、加工效率低。精密、高效的微细电火花控制系统^[1-2]能根据加工状态对极小的加工间隙进行准确、稳定的伺服控制,从而达到提高微细电火花深小孔加工效率的目的。智能控制算法和算法的实现是确保该控制系统精密性和高效性的重要组成部分。

微细电火花加工常用的伺服算法主要有平均电压法、模糊控制算法、控制器与神经网络结合的智能算法。平均电压法是微细电火花加工最常见的算法,其逻辑简单、易于实现,但缺乏针对性,且加工效率不高。为了对微细电火花加工过程实现更精确的控制,各种智能算法被引入该领域。Boccardo等^[3]发现模糊控制能根据不同的加工状态进行相应

的伺服控制,且在加工经验的基础上能有效提高加工效率,但其伺服策略无法根据加工状态进行调整,导致控制精度较低。为了对控制器参数进行调整,任小涛^[4]采用二阶模糊控制器与BP神经网络相结合的方式对加工过程进行控制,该算法能实现对控制器的自主调整,但由于学习的目标值^[5]难以跟踪,直接影响了加工效率。这些控制器与神经网络结合的算法在一定程度上能优化伺服策略,但算法的复杂性使其运算过程十分耗时,难以保证参数优化的实时性。此外,复杂伺服算法的实现主要采用离线计算形式^[6-7],而离线优化在一定程度上具有滞后性,会影响加工效率,无法很好地提高微细电火花深小孔加工的效率。

综上所述,目前的伺服算法主要存在控制策略单一、不能准确控制及缺乏实时性等问题。特别对于深小孔加工而言,深度不同、间隙状态不一致,伺服策略就应当进行相应的调整。因此,本文采用模糊控制器作为加工状态与伺服速度之间的模型,使

收稿日期:2017-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505400);福建省自然科学基金资助项目(2018J01083)

第一作者简介:褚旭阳,男,1981年生,讲师。

伺服策略更加完整;同时,以自调节算法实时调节伺服速度,建立目标值,并采用神经网络模型进行在线优化学习,提高伺服控制的准确性;最后,将核心算法集成在下位机,减少数据传输导致的时间延迟,保证了伺服控制的实时性。

1 控制方法设计

基于以上分析,本文提出了以模糊控制器为基础的BP在线优化算法。该算法由模糊控制、神经网络优化和自调节模块三部分组成,算法的具体框架见图1。模糊模块建立间隙状态与伺服输出之间的关系,是智能控制的基础。该模块以加工间隙的短路率、火花率为输入,以主轴进给速度为输出,能根据加工状态对电极进行非线性控制。自调节模块是在线优化的前提,通过统计一定时间内主轴的进给率和回退率,并根据统计结果自动调整下一个周期主轴的进给速度、追踪最快进给速度,进而寻找到最优伺服速度,为优化提供了非常重要的参考值。BP神经网络是优化的核心,根据自调节提供的最优伺服速度对模糊控制的参数进行调整,可从根本上改善控制器精度。三个模块的结合,不仅改善了模糊控制器不能自主调节、智能控制的缺点,而且实现了智能算法在线优化的功能,可根据不同的间隙状态实时调节控制器参数,从而提高控制器参数的准确性。此外,三个模块的结合、联动可调节输出速度,进而对加工间隙状态进行快速调节。

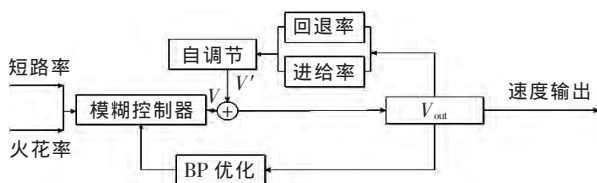


图1 基于模糊控制的BP在线优化算法逻辑框架图

该算法的模糊控制模块还解决了控制策略单一的问题。自调节模块和优化模块能根据不同的加工深度、加工状态及时地修正伺服策略,保证了伺服输出的准确性。神经网络模块的简易性减少了优化的时间、保证了伺服的实时性。三个模块联合使用,实现了对加工间隙进行又快又好的伺服控制。

1.1 模糊控制

模糊控制以平均电压法为间隙电压检测方法,以统计多次电压的短路率、火花率为模糊控制器的输入,以进给速度为输出,建立间隙状态和伺服控制的紧密关系。该模糊控制器的模糊规则^[8]见表1。

1.2 自调节模块

自调节模块是根据间隙状态对模糊控制器输

表1 模糊规则

		短路率		
		小(<i>s</i>)	中(<i>m</i>)	大(<i>l</i>)
火花率	小(<i>s</i>)	快进	普通回退	快退
	中(<i>m</i>)	普通进给	停止	快退
	大(<i>l</i>)	普通进给	停止	普通回退

出值进行修正的过程。在该算法中,首先对短路率、火花率按照固定范围划分区域,每个区域有对应的速度修正值 V' ,具体划分方式见表2。在实际加工中,根据固定时间内统计得到的短路率、火花率,在表2中寻找需要修正的 V' 。每连续输出20次 V_{out} ,就分别计算一次进给率、回退率、平均短路率,并判断是否触发自适应算法的规则。如触发规则,则按规则修改已确定需要修正的 V' 。

表2 短路率、火花率对应的速度修正值

		短路率				
		0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1
火花率	0~0.2	V_{11}'	V_{12}'	V_{13}'	V_{14}'	V_{15}'
	0.2~0.4	V_{21}'	V_{22}'	V_{23}'	V_{24}'	V_{25}'
	0.4~0.6	V_{31}'	V_{32}'	V_{33}'	V_{34}'	V_{35}'
	0.6~0.8	V_{41}'	V_{42}'	V_{43}'	V_{44}'	V_{45}'
	0.8~1	V_{51}'	V_{52}'	V_{53}'	V_{54}'	V_{55}'

自适应算法的规则是:①当进给率大、回退率小、短路率小时,适当提高加工速度;②当进给率大、回退率大时,减小加工速度、提高回退速度;③当进给率小、回退率大时,增加回退速度;④当短路率大于某一定值时,减小进给速度。

1.3 BP神经网络优化

该模块是基于对自调节模块的速度修正值 V' 进行固定次数的修正后,将此时模糊控制和自调节模块的输出作为优化的目标值,进行BP神经网络的在线优化,对模糊控制器的参数进行实时调整,对间隙状态进行更精准的控制。优化的目标值主要由模糊控制输出和自调节算法输出组成,具体数值见表3。其中, V_{mn} 表示第*m*行火花率、第*n*列短路率对应的模糊控制的输出; V_{mn}' 与表2所示一致。优化的对象为输出为 V_{mn} 的模糊控制器。

本文采用BP算法进行参数的优化。整个学习过程是为了调整隶属度函数的平均值和标准偏差,并用能量函数作为调整误差的基准,通过最速下降法修正连接各层网络之间的权值^[9]。为了描述模糊控制的在线学习,能量函数 E 可表述为:

表3 优化目标值

	短路率					
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	
火花率	0.1	$V_{11}+V_{11}'$	$V_{12}+V_{12}'$	$V_{13}+V_{13}'$	$V_{14}+V_{14}'$	$V_{15}+V_{15}'$
	0.3	$V_{21}+V_{21}'$	$V_{22}+V_{22}'$	$V_{23}+V_{23}'$	$V_{24}+V_{24}'$	$V_{25}+V_{25}'$
	0.5	$V_{31}+V_{31}'$	$V_{32}+V_{32}'$	$V_{33}+V_{33}'$	$V_{34}+V_{34}'$	$V_{35}+V_{35}'$
	0.7	$V_{41}+V_{41}'$	$V_{42}+V_{42}'$	$V_{43}+V_{43}'$	$V_{44}+V_{44}'$	$V_{45}+V_{45}'$
	0.9	$V_{51}+V_{51}'$	$V_{52}+V_{52}'$	$V_{53}+V_{53}'$	$V_{54}+V_{54}'$	$V_{55}+V_{55}'$

$$E = \frac{1}{2} \sum_l (T_l - A_l)^2 = \frac{1}{2} \sum e^2 \quad (1)$$

式中: T_l 为目标输出; A_l 为通过模糊控制计算得到的输出; e 为目标输出和实际输出之间的误差。

基于 BP 算法的学习过程如下:

输出层中, 来自 BP 神经网络的误差为:

$$\delta_o^{(5)} = -\frac{\partial E}{\partial net_o^{(5)}} = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial A_l} \frac{\partial A_l}{\partial y_o^{(5)}} \frac{\partial y_o^{(5)}}{\partial net_o^{(5)}} = e \quad (2)$$

式中: $net_o^{(5)}$ 为模糊控制器第五层输出层第 o 个神经元对应的输出; $y_o^{(5)}$ 为模糊控制器输出层的输出值。

模糊控制器的解模糊层的参数 p 的变化为:

$$Vp_n = -\eta \frac{\partial E}{\partial net_n^{(4)}} \frac{\partial net_n^{(4)}}{\partial p} = \eta g x_1 g \delta_n^{(4)} g y_k^{(3)} \quad (3)$$

式中: $net_n^{(4)}$ 为模糊控制器第四层解模糊层第 n 个神经元对应的输出; η 为误差下降因子; x_1 为模糊控制器第一个输入; $\delta_n^{(4)}$ 为模糊控制器第四层的误差; $y_k^{(3)}$ 为模糊控制器第三层规则层的输出值。解模糊层中的参数 q, r 的调节方式与 p 一致。

模糊控制器的隶属度函数的参数 m_{ij} 修正值为:

$$Vm_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial m_{ij}} = -\frac{\partial E}{\partial net_j^{(2)}} \frac{\partial net_j^{(2)}}{\partial m_{ij}} = 2\eta \delta_j^{(2)} \frac{x_i - m_{ij}}{\sigma_{ij}^2} \quad (4)$$

式中: $net_j^{(2)}$ 为模糊控制器第二层隶属度函数层第 j 个神经元对应的输出; $\delta_j^{(2)}$ 为模糊控制器第二层的误差; m_{ij}, σ_{ij} 为输入模糊控制器输入 x_i 对应的隶属度函数的平均值与方差。隶属度函数中的参数 σ_{ij} 的调节方式与 m_{ij} 一致。

1.4 伺服控制系统的设计

为了更加快速、稳定地实现 BP 算法在线优化功能, 将上述核心算法集成在下位机, 保证其实时性。从间隙状态采集到伺服速度的计算输出均在单片机中完成, 减少了数据传输的复杂性和不稳定

性, 实现了采样和控制的集成。采用具有高速计算能力的下位机, 使之能满足伺服算法的计算要求, 最终实现下位机的整体控制功能。

伺服控制系统的实现过程见图 2。在加工过程中, 由下位机的放电状态检测模块采集加工间隙电压值, 经下位机的核心算法处理后得到合适的伺服速度, 并将其以 PWM 和方向两种信号经隔离后传给运动控制平台 (PMAC), 通过 PMAC 对加工间隙进行伺服控制。

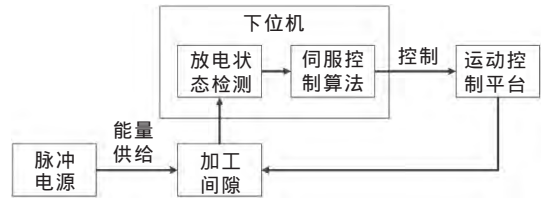


图2 伺服控制系统的实现

2 实验验证与结果分析

2.1 实验平台及条件

实验在三轴联动微细电火花加工机床上进行, 机床配有直线导轨和螺距为 4 mm 的无间隙滚珠丝杠, 由交流伺服电机驱动, 电源系统采用 RC 脉冲电源。电极的制作、微细孔的加工均在自行研制的数控系统下进行。

将平均电压法、模糊控制、BP 在线优化算法分别应用于深小孔加工, 实验条件如下: 电极选用直径为 0.25 mm 的钨电极, 工件为 1.1 mm 厚的钛合金, 加工介质为煤油, 主轴转速为 1500 r/min, 开路电压为 120 V, 电阻为 1 kΩ, 放电电容值为 220、82、47、22 nF, 分别对应 A、B、C、D 四种加工条件。

2.2 实验结果及分析

图 3 是通过超景深显微镜放大后观察到的在 D 条件下分别采用 BP 在线优化算法、模糊控制、平均电压法加工出的孔正面和背面照片。用超景深显微镜自带的测量软件对孔径进行多次测量取平均值, 可得到最终的孔径。

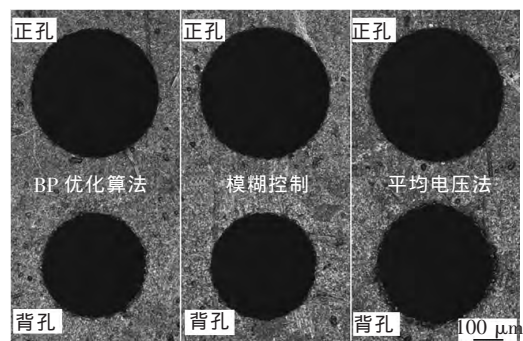
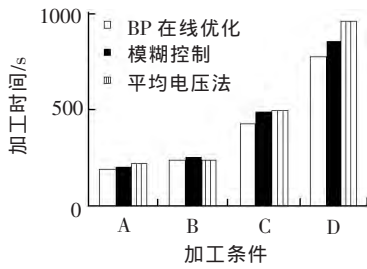
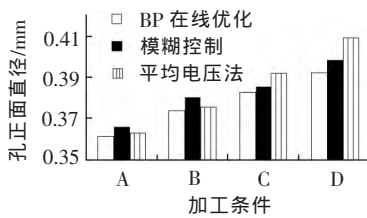


图3 D条件下三种算法加工出的正背孔图

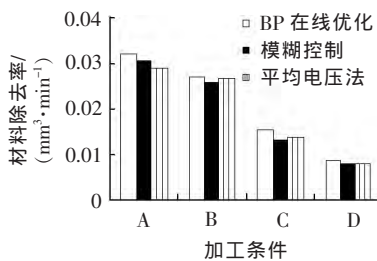
在 A、B、C、D 四种加工条件下，三种算法的加工时间、加工精度、材料去除率分别见图 4a~图 4c。



(a)加工时间



(b)加工精度



(c)材料去除率

图 4 四种加工条件下的实验结果对比图

由图 4a 可见，当加工条件为 A 和 B 时，BP 在线优化算法的加工时间略少于另外两种算法。分析原因：当加工电源能量较大时，算法的优点难以体现；随着加工能量降低，BP 神经网络在优化算法的加工效率明显提高，相较于平均电压法提高了 32%，比模糊控制法提高了 8%。

本实验中的加工精度以孔径大小来表征，孔径越小表明加工精度越高。如图 4b 所示，随着加工能量的降低，三种算法所加工的孔正面直径呈逐渐增大的趋势。分析原因：当能量降低时，加工的孔径随之减小，但由于加工状态会相应变差，短路率和回退率均会增加，导致二次放电，从而使加工的孔径变大。在此情况下，BP 在线优化算法仍能找到更适合加工的速度值，从而提高了加工精度。

由图 4c 可见，随着加工能量的降低，电极材料去除率逐渐减小。在四种加工条件下，BP 在线优化算法的材料去除率明显大于另外两种算法，且该算法的加工效率相较于其他两种算法也有明显提高。

在 C 条件下，三种算法对应的速度曲线、平均速度曲线分别见图 5~图 7。由图 5 可知，当加工顺畅时，三种算法的伺服速度都较大；当排屑越来越困难时，BP 在线优化算法能追踪到更合适的加工速度并改变模糊控制模型，从而适当降低伺服速度、提高加工效率。

由图 6 可知，在能量较低、加工环境较差的情况下，BP 在线优化算法的平均速度高于另外两种算

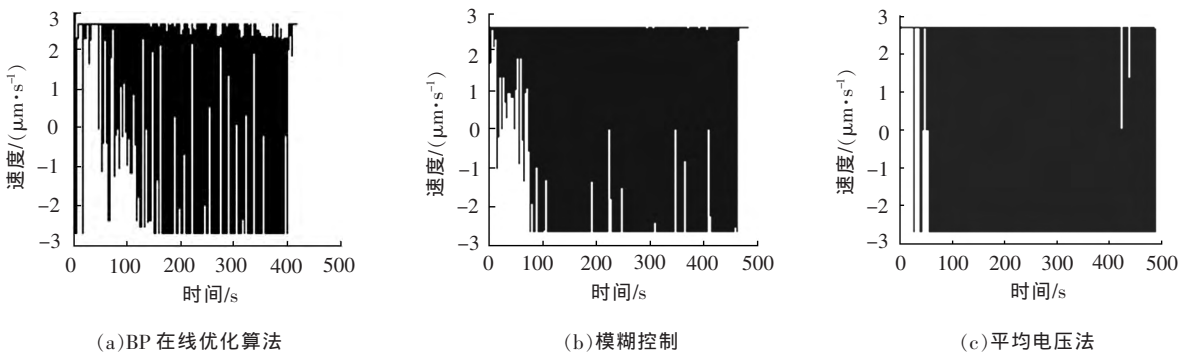


图 5 三种算法在 C 条件下的速度曲线图

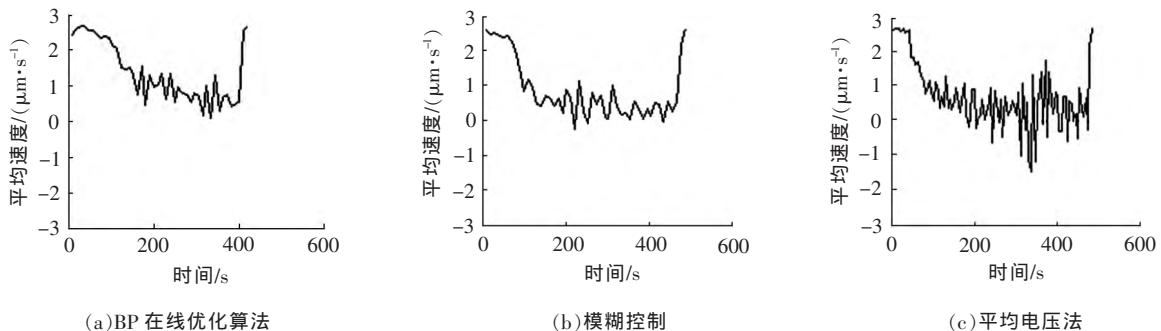


图 6 三种算法在 C 条件下的平均速度曲线图

法。分析原因:BP在线优化算法能根据不同的加工深度和加工状态及时修正伺服策略,比如:在排屑困难的情况下适当改进加工策略,减小进给速度、增大回退速度,有效避免了短路的发生,从而在一定程度上提高了加工效率和加工精度。

由图7可知,当加工深度较小时,加工较顺畅,三种算法的加工速度均较大;但随着加工深度的增加,排屑越来越困难,BP在线优化算法的加工速度较大,即在相同加工深度下所需加工时间更少。

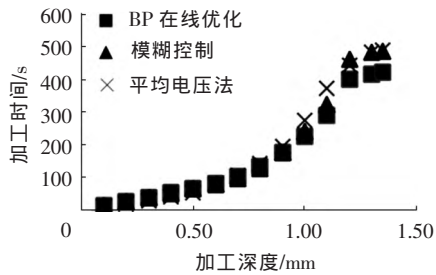


图7 三种算法在C条件下的时间与深度的关系曲线图

3 结束语

基于模糊控制的BP在线优化算法能针对加工状态进行最优的伺服控制,采用下位机实现核心控制算法,保证了伺服控制的稳定性和实时性。实验表明,该方法能提高加工效率和加工精度。

参考文献:

- [1] 赵亚军,白羽.微细电火花加工过程的模糊控制[J].机械制造,2014,52(601):51-53.
- [2] 张勇,赵航,张广玉,等.微细电火花加工系统及其工艺技术[J].中国机械工程,2008,19(5):526-530.
- [3] BOCCADORO M,DAUW D F. About the application of fuzzy controllers in high-performance die-sinking EDM machines [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1995,44(1):147-150.
- [4] 任小涛.微细电火花加工智能控制算法的研究与应用[D].大连:大连理工大学,2009.
- [5] 罗元丰,赵万生,狄士春.电火花加工放电状态的检测及神经模糊控制[J].高技术通讯,2000:72-74.
- [6] LIU Ying,ZENG Weiliang. Research on fuzzy control algorithm with double parameters detection of micro-EDM [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 65: 75-78.
- [7] KAO C C,SHIH A J. Design and tuning of a fuzzy logic controller for micro-hole electrical discharge machining [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2008, 10(2): 61-73.
- [8] WANG Y K,GENG X S,WANG Z L,et al. Experimental study of titanium alloy micro-holes by EDM fuzzy control system [J]. Advanced Materials Research, 2015, 188(2): 195-198.
- [9] WU Y X,WANG C Y. The optimization of EDM machining parameters of graphite electrode on BP neural network [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 331: 604-607.

(上接第19页)

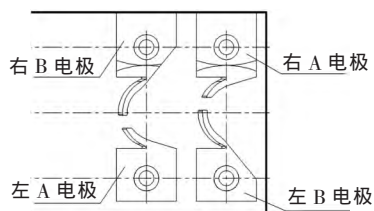


图10 左、右电极的线切割加工示意图

由于该电极圆弧带有锥度,采用电极杆装夹固定时难以用螺母从底面进行紧定,因此将电极杆附近的非放电锥度部分进行取平设计(图11)。优化后,毛坯厚度减少了4mm,且电极杆装夹部位为平面结构,便于采用螺母紧定电极。

3 结束语

通过对双级带叶冠涡轮盘电火花加工电极进行优化设计,将原先的单个电极拆分为A、B两个电极,增加了电极厚度,降低了电极损耗。将左、右单个组合电极合二为一,减少了安装找正定位时间。

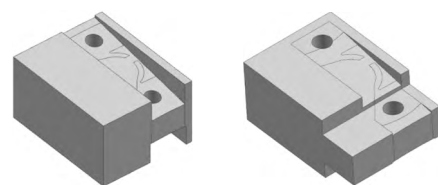


图11 优化前后线切割电极毛坯示意图

将左右电极线切割用毛坯合二为一,实现了一次装夹切割两个电极,提高了加工效率。

参考文献:

- [1] 陈济轮.数控电火花加工技术在航空航天领域的应用与展望[J].电加工与模具,2011(增刊):27-30.
- [2] 田继安.涡轮转子喷嘴叶栅环带冠叶片电火花加工[J].航天制造技术,2003(2):14-18.
- [3] 李刚,王振龙,赵万生,等.带冠整体涡轮盘电火花成形电极的设计与制造[J].航空精密制造技术,2006,42(6):36-39.