

一种微小孔电火花加工模糊控制策略研究

梅阳寒

(东莞职业技术学院 机电工程系, 广东 东莞 523808)

摘要: 针对微小孔电火花加工(EDM)放电环境恶劣、放电间隙状态复杂多变,以及采用传统的PID控制策略难于达到预期效果等问题,提出了一种基于多层压电陶瓷叠加驱动下的控制策略,并对其进行了控制算法研究,设计了一种微小孔电加工微进给模糊PID自适应控制系统,并进行了仿真试验来验证其控制效果。研究表明,采用模糊自适应控制策略能加快微进给系统的响应速度,具有稳定性好、精度高等优点,并得到了良好的控制效果,为微小孔电加工机床的实际应用打下了良好的理论基础。

关键词: 微小孔;电火花加工;放电检测;模糊控制策略;微进给

中图分类号: TG661; TH39; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1061-04

Fuzzy control strategy research of a micro-hole EDM

MEI Yang-han

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor discharge environment, the complex and changing discharge state of micro-hole electrical discharge machining (EDM), and traditional PID control strategy is difficult to achieve the expected effect, a controller was established in accordance with driven model of piezoelectric ceramic, and control algorithm was researched. Not only the control system of the micro-hole EDM was designed based on fuzzy adaptive PID, but also simulation experiment was carried out. The results indicate that the fuzzy adaptive PID control can speed up the response speed of micro-feed system, and it has good stability and high precision. So it gets good control effect. Solid theoretical foundation is layed for the practical application of micro-hole EDM machining in future.

Key words: mico-hole; electrical discharge machining (EDM); discharge detection; fuzzy control strategy; micro-feeding

0 引言

在微小电火花加工中,微进给系统是极其关键的部分,为了满足电加工自动进给系统的要求,微进给系统的研究具有非常重要的意义。在国外,日本的古谷克司和毛利尚武等人利用磁致伸缩器件研制出了蠕动式、冲击式和椭圆驱动式3种微进给系统,应用于微小型电火花加工装置中;在国内,南京航空航天大学研制了步进电机和电致伸缩驱动器相结合的电极伺服进给系统,另外还开发了电磁冲击式小型电火花加工装置;哈尔滨工业大学研制出了基于微小电极线放电磨削法的微细电火花加工装置和多种结构的蠕动式小型电火花加工装置等^[1]。

本研究对微小孔电火花加工微进给控制策略进

行研究,针对采用传统PID控制策略和独立检测电流和电压的缺陷,设计模糊自适应PID控制器和一种基于信息融合技术的放电状态检测系统。

1 微小孔电加工微进给系统设计要求

在微小孔电加工中,微进给系统的性能指标是系统品质好坏的一个关键指标,也是加工持续进行的重要保证。微进给控制系统应具有较高的间隙控制灵敏度,以保证放电状态持续稳定。本研究采用控制压电陶瓷的伸缩,从而间接实现对工件放电间隙的调整。本研究所设计的伺服系统应满足如下的要求:

(1) 低速平稳性要求。粗加工大约进给量只有毫米级每小时,而精加工进给量在1 mm以下,甚至更小。

(2) 稳定性要求。电火花加工伺服微进给是不连

续和非低阶线性的,放电工具电极在工作中始终处于往复进给状态中,机床主轴因此可能发生不稳定的状态,甚至产生振荡现象,这将影响机床稳定工作。

(3) 快速和灵敏性要求。电火花加工工具电极和工件之间的间隙状态环境复杂多变,微进给控制系统必须要有足够的快速性和灵敏性来调节间隙状态。该设计采用的压电陶瓷微进给控制系统具有结构简单紧凑、过渡环节少等特点,可较好地满足设计要求。

本研究采用检测电流和电压信号量,利用一种基于传感器信息融合技术^[2]抽取电压和电流的信息,并利用特征层信息融合技术把两者的信息综合后来判定,采用特征信息层融合的算法很多,根据微小电加工的特点,虽然电流和电压的波形发生畸变,但其各种加工状态^[3]时的峰值电压和峰值电流与常规电加工相近,只是信号值的变化范围较常规加工有所不同。

放电电压和电流的信号量的检测环节是微小电火花加工微进给系统控制的反馈环节,也是间隙状态伺服控制调节至关重要的环节。压电陶瓷驱动环节主要完成间隙伺服控制,微小电加工可调节的放电状态间隙有限,属微米级^[4]。因此,伺服进给控制系统性能指标直接影响加工工艺效果,本研究采用的控制系统框图如图 1 所示,其作用是实现工具电极和工件之间微间隙调整,完成工具电极的微进给控制。

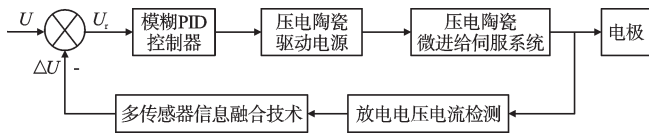


图 1 微进给控制框图

2 微进给伺服系统的模型建立

在微进给系统控制过程中,本研究采用压电陶瓷驱动装置使工具电极夹持器产生微量移动,从而带动工具电极产生微小位移量,因此必须首先对压电陶瓷驱动装置构建驱动模型。

由于压电陶瓷在电荷的作用下是一种容性负载,本研究设计的压电陶瓷微进给装置可等效为一个电容,等效的电容值一般比较大,可达数个微法。另外,由于单个压电陶瓷的位移量比较小,本研究采用的是层叠式的压电陶瓷组合^[5],其可实现多个微量移动叠加。本研究在使用压电陶瓷时发现,在其上施加阶跃电压信号量时,要达到稳态值需要一定的延时过程,且只有在某一固定的区域内位移量与所给电压接近线性关系,因此,压电陶瓷微进给驱动响应是一个类似于电容充放电的动态过程,即:它与所设计的等效电阻形成 RC 电路,构成一阶惯性系统环节。

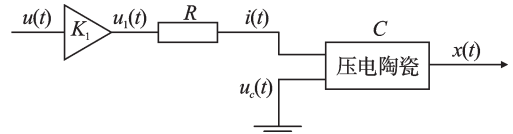


图 2 压电陶瓷驱动装置简化模型

$u_1(t)$ —驱动装置电源电压放大量; $u_c(t)$ —驱动装置中施加给压电陶瓷的电压量; $x(t)$ —压电陶瓷驱动输出量; $u(t)$ —驱动装置电源电压输入量; K_1 —驱动模块电压放大比例系数

为了简化模型,压电陶瓷驱动装置系统在电学上可以简化为如图 2 所示的物理模型,其中压电陶瓷可等效成为电容量 C ,本研究采用压电陶瓷 WTYD0808055 型,电容值设计为 $6 \mu\text{F}$,即 $C=6 \mu\text{F}$;驱动装置的等效电阻用 R_c 表示,其值为 $R_c=200 \Omega$ 。

(1) 该设计使用 DWY4-3 型电源作为驱动,输入控制信号 $u(t)$ 经过放大比例环节放大一定的倍数后,获得驱动电压放大信号 $u_1(t)$,该比例放大环节用系数 K_1 表示,即有 $K_1=40$,该驱动环节的传递函数表达式为:

$$G_1(s) = \frac{U_1(s)}{U(s)} = K_1 \quad (1)$$

(2) 综合图 2 所示简化模型,依据欧姆定律,压电陶瓷驱动装置简化模型可用数学公式表示为:

$$u_1(t) = R_c i(t) + u_c(t) \quad (2)$$

式中: $i(t)$ —驱动简化等效电路电流。

且:

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (3)$$

将其代入式(2),可得:

$$u_1(t) = R_c C \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) \quad (4)$$

将式(4)进行 Laplace 变换,可变换为压电陶瓷驱动电压与驱动装置电源比例放大电压间的传递函数,即:

$$G_2(s) = \frac{U_c(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{R_c C s + 1} \quad (5)$$

(3) 由于压电陶瓷比驱动电源部分频率响应高很多,压电陶瓷伸缩量即位移输出量 $x(t)$ 与其两端的施加电压 $u_c(t)$ 可用一比例系数 K_2 环节表示,其传递函数如下所示:

$$G_3(s) = \frac{X(s)}{U_c(s)} = K_2 \quad (6)$$

式中: K_2 —压电陶瓷驱动输出伸缩量与输入电压的比例值。

在本研究中所采用的 WTYD0808055 型压电陶瓷,当给其所施加的电压为 10 V 时,输出微量位移值为 $3 \mu\text{m}$,即可得到 $K_2=0.3 \mu\text{m/V}$ 。

综上分析,得到压电陶瓷驱动夹持装置系统的传递函数表达式为:

$$G_A(s) = G_1(s) G_2(s) G_3(s) = \frac{U_1(s)}{U(s)} \frac{U_c(s)}{U_1(s)} \frac{X(s)}{U_c(s)} = K_1 \times \frac{1}{R_c C_s + 1} \times K_2 = 40 \times 0.3 \times 10^6 \times \frac{1}{200 \times 6 \times 10^6 \times s + 1} = \frac{12}{1200s + 10^6} = \frac{3}{300s + 250000} = \frac{X(s)}{U(s)} \quad (7)$$

本研究采用压电陶瓷微进给系统驱动的微小电加工工具电极夹持装置部分可简化为质量-弹簧-2阶阻尼系统,其模型如图3所示。

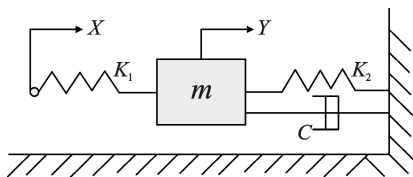


图3 工具电极夹持器装置系统模型

另外,在压电陶瓷微进给驱动装置系统中,其对阶跃信号输入的响应为2阶振荡环节。其传递函数为:

$$G_B(s) = \frac{k_s w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (8)$$

在本研究中,取 $k_s = 0.06$, $w_n = 1375$, $\zeta = 0.4$,代入传递函数中,可以得出:

$$G_B(s) = \frac{0.06 \times 1375^2}{s^2 + 2 \times 0.4 \times 1375s + 1375^2} = \frac{113437.5}{s^2 + 1100s + 113437.5} \quad (9)$$

所以压电陶瓷微进给控制模型系统的总体传递函数为:

$$G(s) = G_A(s) \cdot G_B(s) = \frac{3}{300s + 250000} \times \frac{113437.5}{s^2 + 1100s + 113437.5} \quad (10)$$

3 微进给系统模糊PID控制系统设计

自从工业自动化控制逐步兴起以来,PID控制技术始终保持着主导地位,是一种屹立不衰的控制方法^[6],在工业控制领域里,有统计表明90%以上的控制器都是基于PID控制原理,因其结构简单明了,其控制参数具有明确的现实意义,且参数调节简便,以至于这种PID控制器在工程技术中应用很普遍^[7]。

本研究在结合压电陶瓷微进给系统模型理论分析的基础上,依据智能控制知识设计模糊控制规则,采用一种具有自整定适应控制功能的模糊PID参数控制器^[8],具体过程主要是:依据反馈的电流和电压信号量的信息融合后得到比较量;然后在线整定域值区间,从而使模糊控制精度得到更好的提高,控制超调量显著降低,实现优于常规PID与普通单纯模糊控制

的性能。

另外,本研究运用新的方法设计演绎推理PID参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,在线整定模糊PID控制器各个参数的阈值范围,其模糊PID控制器设计原理框图如图4所示。具体设计步骤如下:

- (1) 常规的PID控制器推理算法方案设计及原始参数取值确定;
- (2) 模糊演绎推理算法设计及输入和输出接口参数的给定;
- (3) 开始模型演绎、分析计算,并进行归纳检验;
- (4) 在步骤(3)的基础上,明确模糊PID控制器参数控制规则;
- (5) 在(3)、(4)的总结归纳基础上,设计调节参数值,完成各个参数基本阈值的调整。

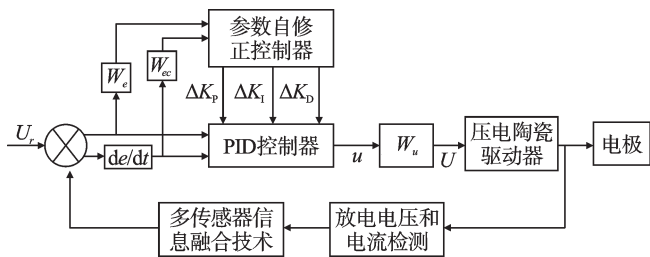


图4 参数自调整模糊控制器原理框图

4 压电陶瓷微进给系统模糊PID控制仿真

本研究依据上述的模糊PID控制设计方案,在Matlab软件的Simulink环境下构建自适应可整定的模糊PID控制器仿真模型,该模型如图5所示。

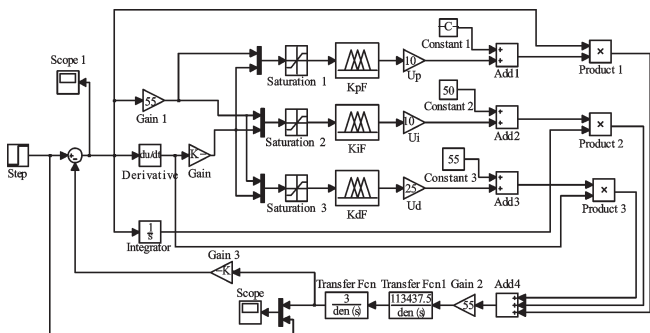


图5 压电陶瓷微进给模糊PID控制器仿真模型

本研究将给出在加入模糊逻辑规则控制后,压电陶瓷微位移控制系统各种动态性能的仿真结果,其中包括:阶跃响应和对任意输入信号的跟踪^[9]。本研究在采用所设计的模糊PID控制器模型情况下,通过加入阶跃信号和正弦信号进行输入跟踪仿真验证:

- (1) 在加入阶跃信号时,本研究考虑到设计须符合实际和验证的简便可行性,给定目标单位的单步位移量为0.1,压电陶瓷微位移进给控制器系统的阶跃响

应曲线图如图 6 所示,从图 6 的曲线可知,阶跃响应的目标值是 0.1,而实际响应是稳定在 0.1 附近,误差非常小,并且达到稳定值的时间比较短,使用模糊自整定 PID 控制的仿真效果比较理想。

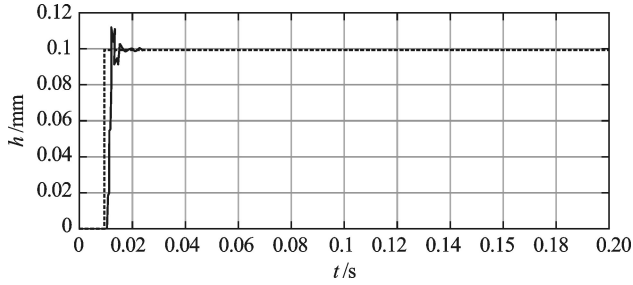


图 6 控制器阶跃响应曲线图

(2) 加入正弦信号的跟踪,在实际的应用当中,压电陶瓷微进给系统对信号的跟踪响应速度快慢是所设计的微进给系统的关键指标,因此,引入输入信号的跟踪响应能显著地反映微进给 PID 模糊控制系统的性能。考虑到为了使实现和验证简单,本研究设正弦输入信号量值域为 0.1。微进给模糊控制器对正弦输入信号的跟踪响应信号曲线图如图 7 所示,图中放大曲线 1 是指被跟踪曲线,曲线 2 是在模糊 PID 控制器调整作用下的跟踪曲线,从图 7 中可以看出其跟踪的偏差较小,曲线 2 与曲线 1 几乎重合,说明在系统要求的允许范围内,其跟踪效果良好。从图 7 中可以显著看出跟踪响应偏差值很小,两曲线几乎重叠。因此,本研究所设计的控制器效果是比较合理实用的。

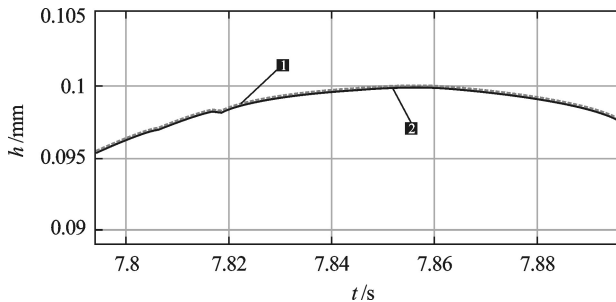


图 7 正弦输入跟踪局部放大图

5 仿真实验

本研究应用设计开发的微小电火花加工微进给 PID 模糊控制器,以毫米级小孔为实验验证加工对象,通过实验验证本研究所设计控制器方法的实用有效性。

考虑到实际中的应用,本研究将所使用的 PID 模糊控制系统仿真验证实验,与浙江大学张云博士设计开发的周期抬刀控制系统方案进行比较。加工的孔为 $\phi 2$ mm 和 $\phi 1$ mm 的孔,实验中使用的加工条件如表 1 所示^[10],主要验证比较的对象为单位时间加工深

度和电极单位时间相对损耗量。加工实验的主要数据如表 2 所示。

表 1 加工孔实验条件

频率	电源波形	占空比	电压	电流	工件材料	电极材料	介质	加工极性
1 500 Hz	方波	可调	80 V	3 A	45#钢	紫铜	煤油	负

表 2 微小孔加工对比实验主要数据

控制方法	周期抬刀控制实验		模糊自调整 PID 控制仿真实验	
	$\phi 2$	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 1$
电极规格/mm	每 3 min 电极加工深度绝对数值/mm			
时间/min				
3	1.501	0.876	1.401	0.564
6	1.455	0.851	1.101	0.774
9	0.962	0.766	1.135	0.801
12	0.857	0.637	1.101	0.799
15	0.696	0.597	0.902	0.765
18	0.701	0.652	0.850	0.760
21	0.710	0.636	0.795	0.701
24	0.627	0.700	0.801	0.719
27	0.644	0.579	0.792	0.821
30	0.621	0.604	0.787	0.695
33	0.635	0.629	0.780	0.681
36	0.600	0.661	0.720	0.684
39	0.621	0.663	0.684	0.693
42	0.597	0.570	0.675	0.680
45	0.586	0.572	0.679	0.601
48	0.590	0.499	0.654	0.612
51	0.576	0.511	0.643	0.590
54	0.499	0.482	0.621	0.657
57	0.463	0.436	0.602	0.546
60	0.468	0.417	0.570	0.558
60 min 总加工深度/mm	14.409	12.538	16.293	13.701
电极相对损耗/(%)	16.337	32.121	16.027	25.328

通过上述实验数据表的比较可以看出,采用自适应参数调整 PID 模糊控制器加工小孔的深度与使用张云博士的抬刀控制系统方案相比在同样加工条件下有所增加,从数据表分析也可得出,其主要是由于采用抬刀加工控制方法,在对放电间隙状态检测方面不是很可靠,由此容易造成加工过程误抬刀的情况出现,导致一定的加工时间浪费,但在使用具有自适应调整能力的模糊 PID 控制器时,其对放电状态的响应准确快速,跟踪性能也较好,这使其控制抬刀灵敏度和放电状态信号检测跟踪重复性提升,因此误抬刀率明显下降,能更精准地检测和加工出所需要的孔深,这也证明了实验结果能够比较好地验证仿真数据的可靠性和所设计 PID 控制器的可行性。

(下转第 1094 页)

关频率及其倍数的谐波,而进行数学建模时并没有考虑 LC 滤波电路所带来的影响。

5 结束语

本研究在分析逆变器死区对输出电压基波幅值和谐波含量的基础上,给出了数学模型,仿真与实验结果表明,所构建的模型是有效的,可以用于系统的设计。

综上所述,在进行逆变器的参数设计时,需要综合考虑死区时间、调制系数、功率因数角和开关频率的影响。另外,死区效应给输出电压带来了低次谐波,使其发生畸变。如果采用滤波器给予滤除,则将造成相应的滤波器体积大、造价高等缺陷。因此,对死区效应进行一定的补偿是非常必要的。

参考文献(References):

- [1] 王明渝,王 磊,安树怀,等. SPWM 逆变器死区问题研究[J]. 电力技术应用,2011,37(5):70-74.
- [2] 刘陵顺,尚安利,顾文锦. SPWM 逆变器死区效应的研究[J]. 电机与控制学报,2001,5(4):237-241.
- [3] ITKONEN T, LUUKKO J, SANKALA A, et al. Modeling and analysis of the dead-time effect in parallel PWM two-level three-phase voltage-source inverter[J]. *IEEE Trans-*

actions on Power Electronics, 2009, 24(11):2446-2455.

- [4] 程 曙,徐国卿,许哲雄. SPWM 逆变器死区效应分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(2):39-42.
- [5] CHEN L, PENG F Z. Dead-time elimination for voltage source inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(2):574-580.
- [6] HWANG S H, KIM J M. Dead time compensation method for voltage-fed PWM inverter[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(1):1-10.
- [7] ZHANG X J, ZHANG H X, WANG J H. A novel control method of reducing dead-time effects for Half-Bridge inverter [C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010:3189- 3191.
- [8] WANG Y, GAO Q, CAI X. Mixed PMW for dead time elimination and compensation in a Grid-Tied inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4797-4803.
- [9] 孔雪娟. 全数字化三相大功率逆变器及并联运行[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2002:30-31.
- [10] 张 宇. 三相逆变器动态特性及其并联系统环流抑制的研究[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院, 2005:20-21.

[编辑:李 辉]

(上接第 1064 页)

6 结束语

针对微小孔电火花加工放电间隙极其微小且放电状态复杂的特点,本研究设计了一种基于压电陶瓷驱动下的微进给控制器和采用信息融合技术的放电状态检测系统,并研究构建了基于自适用模糊 PID 的压电陶瓷微进给系统控制器,为了验证所设计控制器的可行性,本研究进行了基于 Simulink 平台的仿真实验、微小孔验证实验和加工比较。

仿真和实验结果表明,采用模糊自适应 PID 算法具有更好的响应速度、更小的超调量和更好的跟踪性能,能更有效、快速地实现微进给系统的精确进给和回退,减少了微进给系统的误抬刀率,也提高了加工效率。

致 谢

在本论文工作期间,感谢导师杨洋副教授在实验方案设计方面的细心指导,承蒙东莞职业技术学院特种加工实验室各老师的帮助,在此表示深深的感谢。同时感谢孟鑫沛老师、左大力老师等在加工实验中的协助。

参考文献(References):

- [1] 王振龙,赵万生,狄士春,等. 微细电火花加工技术的研究进展[J]. 中国机械工程,2002,13(10):894-898.
- [2] 邱 静,温熙森,唐丙阳. 制造系统的状态监测与多传感器信息融合[J]. 中国机械工程, 1996,7(1):18-21.
- [3] 李盛强,周亚军,张 毅. 自适应模糊控制器在电加工间隙控制中的应用[J]. 机电工程,2008,25(1):96-98.
- [4] 李 论. 基于实时 Linux 的六轴联动电火花加工数控系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程系,2004.
- [5] 申宇飞. 压电陶瓷功率驱动电源的研究[D]. 南京:南京理工大学机械学院,2006.
- [6] 黄 友. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [7] 林 浩. 模糊 PID 控制器仿真研究[D]. 贵阳:贵州大学机械工程学院,2005.
- [8] 盛 强. 基于模糊自适应 PID 的钢管定长切割控制系统[J]. 机电工程,2011,28(1):1354-1357.
- [9] 王正林,王胜开,陈国顺. Matlab/SIMULINK 与控制系统仿真[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [10] 张 云. 电火花加工过程智能控制策略研究[D]. 杭州:浙江工业大学,1999.

[编辑:张 翔]