

电火花加工过程的自适应控制

王蔚岷

吴广玉 刘晋春

(成都科技大学机械系)

(哈尔滨工业大学航天学院)

摘 要

本文提出用自校正控制算法来解决电火花成型加工中对放电参数的控制,以避免电弧放电的出现而烧伤工件.首先研制出了“电火花加工放电参数检测仪”作为检测环节,相继研制出“电火花成型加工微机自适应控制系统”,建立起加工过程的线性化数学模型,实现了对加工过程的自校正控制,取得了满意的加工效果.本系统不仅可避免加工过程中的电弧危害,而且加工效率比人工控制有所提高.

一、引 言

在电火花成型加工中,特别是深型腔的加工中,普遍存在因稳定电弧放电的出现而烧伤工具、工件的危害,对造价昂贵的各种精密模具的加工质量是一极大威胁.因此,为了解决这一难题并实现加工过程的自动化,对加工过程中各种放电参数的测量和加工过程的最优化控制等方面的理论和实验研究,被国内外电加工专业人员视为当今电加工界的重要课题.

虽然近年来在各国科技人员的努力下,此研究取得了很大进展^[1],但要实现加工过程的高可靠性自动化还存在着一定距离,本文作者针对以上问题研制出了能测量多种放电时间参数的“电火花加工放电参数检测仪”^[2]和“电火花成型加工微机自适应控制系统”^[3],首次将自校正控制算法^[4,5,6]用于电火花加工过程控制这一领域,实验证明,该控制方案比传统的寻优算法具有更好的快速性和加工稳定性.

二、放电参数检测简介

加工中各种放电状态的特征(见图1)是:空载时,间隙电压很高;短路时间间隙电压很低,接近0V;当间隙放电时,间隙电压在25V左右.放电时若间隔状态良好,间隙中是火花放电,放电电压上存在高频分量;间隙状态变坏时将产生过渡电弧,此高频分量的强度减弱;电弧放电时,此信号消失.本文介绍的检测器,通过对间隙电压和电流以及加工中高频信号的检测,可判别出上述五种基本状态.而国内外的其他类似装置只能鉴别出四种状态,不能鉴别“过渡电弧”.而本文的检测器鉴别出的“过渡电弧”是“稳定电弧”的前兆,以此来预测“稳定电弧”具有重要意义.

本检测仪可精确测量出以上五种间隙状态在脉宽期间或脉冲周期中各占平均时间百分比

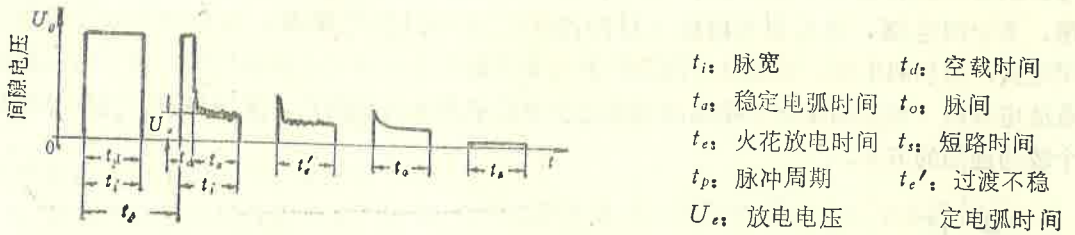


图 1 电火花加工中五种基本间隙状态的波形

参数。在脉宽期间的平均时间参数为：空载： $\varphi_a = t_d/t_i$ ，火花： $\varphi_e = t_e/t_i$ ，过渡电弧： $\varphi_{e'} = t_{e'}/t_i$ ，稳定电弧： $\varphi_a = t_a/t_i$ ，短路： $\varphi_s = t_s/t_i$ ，在脉冲周期中的时间参数为：火花： $\Phi_e = t_e/t_p$ ，过渡电弧： $\Phi_{e'} = t_{e'}/t_p$ ，稳定电弧： $\Phi_a = t_a/t_p$ 。

三、电火花成型加工的自适应控制方案

本文介绍的微机控制系统总体布局见图2，总控制框图见图3。控制量为伺服参考电压 U_s 。

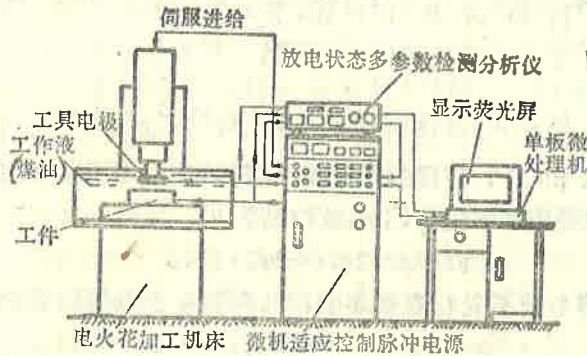


图 2 微机自适应控制电火花加工机床总体布局图

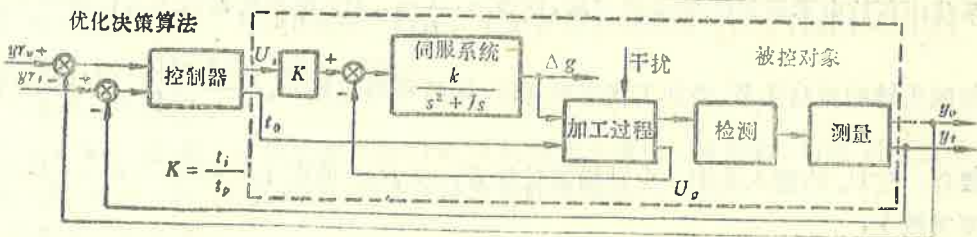
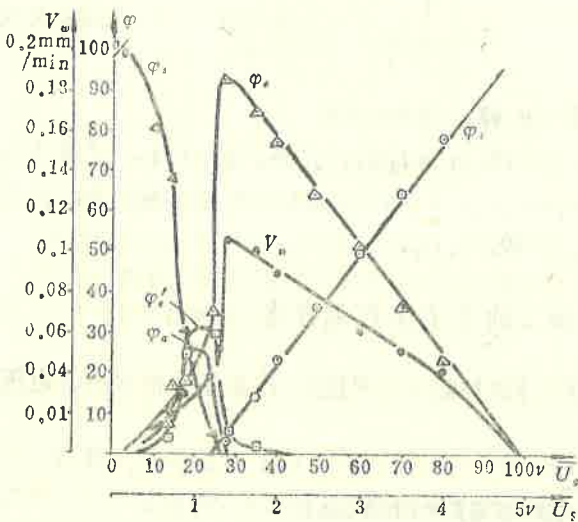


图 3 微机自适应控制电火花加工过程框图

和脉冲间隔 t_o ，在加工中根据检测出的各放电参数调节 U_s 和 t_o 使加工状态处于最佳值。

U_s 又是间隙平均电压 \bar{U}_g 的控制量，而 \bar{U}_g 与加工间隙大小又成正比率关系。在加工中 U_s

与各放电参数的相关关系见图4。当 U_s 过大，间隙偏开路，生产率低；当 U_s 过小间隙偏短路，易引起电弧。当 t_o 过大时加工脉冲占空比减小，生产率低；当 t_o 过小间隙不能及时消电离，易引起电弧。根据这一间隙特性可建立起线性化的动态控制模型。由于输出量（即各放电参数）与控制量之间是动态时变的并存在强烈的过程噪声，采用自校正控制算法是一个较为理想的方案。



测试条件:

- $t_i: 500\mu s$ $t_o: 10\mu s$
- $I_p: 20A$ $V_p: 100V$
- 工具电极直径: 25mm
- 小孔直径: 6mm
- 冲油: 弱
- 工具/工件: $C_u(t)/S$
- V_w —— 加工速度

图 4 U_s 与各间隙状态参数和加速度 V_w 相关性测试结果

由于控制量是 (U_s 和 t_o)，应建立两个相互解耦的控制模型，系统的输出函数也应为两个，组成一个双输入双输出的系统。 U_s 的被控量为 y_v

$$y_v = \varphi_e + 2\varphi_e' + 2\varphi_o + 2\varphi_s.$$

由于 φ_e 、 φ_e' 、 φ_o 和 φ_s 等参数不受 t_o 直接影响，可解除 t_o 控制量的耦合。 t_o 的被控量为 y_i ，

$$y_i = \Phi_e + 2\Phi_e' + 2\Phi_o.$$

当 U_s 过大时 $y_v = 0$ ，当 U_s 过小时 $y_v = 2$ ，当 U_s 合适时 $U_s = 1$ ，当 t_o 过大时 y_i 接近 0，当 t_o 过小时 $y_i = 2$ ，当 t_o 合适时 $y_i = 0.9$ 。

因系统中各放电参数对 U_s 响应最灵敏，而 $\Phi_e = \frac{t_i}{t_p} \varphi_e$ ，对 y_v 模型的控制为主控制环节，对 y_i 模型的控制为辅助控制环节。当加工状态理想时，间隙平均电压 $\bar{U}_g = \frac{t_i}{t_p} U_e$ 。为解除控制

量 t_o 的耦合，在 U_s 的输入端加一自动增益控制 $K_1 = t_i/t_p$ ，使得 $\varphi_e = 100\%$ 时 $K\bar{U}_s = U_e$ (K 为一个不变常数)。

针对两个被控量 y_v 和 y_i 分别建立两个差分预报模型，其形式为

$$y(k+d+1) + \alpha_1 y(k) \dots + \alpha_p y(k-p+1) = \beta_0 u(k) \dots + \beta_l u(k-l) + \beta_c + E(k),$$

式中， β_0 由实验定出， $E_v(k)$ 为零均值过程噪声。由于对象的静态输入输出曲线不过原点，并存在非线性，因此在此模型中引入一常数项 β_c ，它可被看作为对过程噪声均值的估计值。

目标函数为

$$J(k) = E[y(k) - y_r(k)]^2,$$

控制算法为

$$u(k) = -\frac{1}{\beta_0} [y_r(k) + \alpha_0 y(k) \cdots + \alpha_p y(k-p+1) - \beta_1 u(k-1) \cdots - \beta_l u(k-l) - \beta_c],$$

参数估计采用遗忘因子的最小二乘递推估计。

u_v 和 y_t 模型的外控制量分别为 y_{rv} 和 y_{rt} , 分别由两个优化决策算法得出, 其基本思想是: 当间隙状态良好时 (过渡电弧率 φ'_c 小于一限定值而电弧率 $\varphi_a = 0$ 时), y_{rv} 和 y_{rt} 分别逼近 0.95 和 0.9, 当 φ_a 或 Φ_a 不为 0 时 (出现稳定电弧时), y_{rv} 和 y_{rt} 分别减小直至 φ_a 和 Φ_a 为 0 为止。

四、自校正控制算法的实验研究

本系统分时交替对两个模型进行计算和控制, 以下着重讨论主控制模型 y_v 模型参数的确定。

1. 预报模型阶的选取

本系统采用主频为 2Hz 的 Z80 单板机, 其运算速度较慢, 实验证明, 电火花加工过程是一个动态变化很快的过程, 若将系统的阶选得高计算机处理速度跟不上过程的动态变化, 在强烈的过程噪声干扰作用下, 系统易发散。通过大量实验, 在目前系统的条件下, 采用标准的最小二乘辨识算法系统计算量较大, 只有将 y_v 模型定为零阶, 或为如下形式的一阶

$$u_v(k+d_v+1) = \beta_{00} u_v(k) + \beta_{01} u_v(k-1) + \beta_{0c} + \varepsilon_v(k),$$

($u_v(k)$ —— 第 k 步 U_s 的控制值)

时系统才能很好收敛。若为标准一阶时^[9], 当加工状态良好时系统仍可收敛, 预报模型的高阶项为小于 1 很多的数, 当加工状态变坏, 系统噪声增强时系统不稳定。

y_t 模型纯属电参数调节, 系统响应速度快, 因此 y_t 模型也为零阶, 即

$$y_t(k+d_t+1) = \beta_{10} u_t(k) + \beta_{1c} + \varepsilon_t(k), \quad (u_t(k) \text{ —— 第 } k \text{ 步 } t_0 \text{ 的控制值})$$

系统只是实时估计 β_{00} , β_{0c} 和 β_{1c} 三个值。

2. 预报提前步数的选取

该参数是影响系统收敛性的重要因素。当采样周期 T 为 50 毫秒时, d_v 选为 1 系统才稳定, 当 T 为 100 毫秒时, d_v 选为 0 系统才稳定。由此可见系统的延迟时间接近 100 毫秒。

因 y_t 模型为电参数控制, 故 d_t 选为 0。

3. 参数 β_{00} 的选定

由于 u_v (即 U_s) 的最大有效值所对应的 D/A 转换数字量为 1.6 左右, 与 y_v 最大值数字量接近, 所以 β_{00} 选为 -1。实验证明, 选取该值系统收敛较快。

4. 参数 β_{10} 的选定

当加工状态良好时 (没有过渡电弧和稳定电弧出现), y_t 模型可近似为

$$\frac{t_i}{t_i + u_t(k)} = \beta_{10} u_t(k) + \beta_{1c} + \varepsilon_t(k).$$

由于一般 u_i (即 t_0) 的值小于 t_i 很多, 因此 β_{10} 选为

$$\beta_{10} = -\frac{1}{t_i}$$

当 u_i 较大时, 系统的非线性误差较大, 但实验说明对控制效果影响不大。

5. 遗忘因子 λ 的确定

该参数关系到系统模型对对象过程不平稳时的跟踪特性和系统的方差, 经实验 λ 确定为 0.97。

6. 实际加工中模型参数变化的实测结果

图5为在加工过程中各参数变化的实时记录。图5a 是在加工排屑良好时系统启动初期阶段的过渡过程, 这时系统具有理想的收敛性, 经几步控制, y_0 和 y_i 分别收敛至优化决策值 y_{01} 和 y_{i1} ; β_{01} 、 β_{0c} 和 β_{1c} 分别收敛至各自的真值而系统的辨识误差收敛到接近 0。

图5b为无冲油加工深型腔时, 由于加工排屑条件恶劣, 系统过程噪声强烈使 y_0 的方差增大, 尽管如此, 系统的输出 y_0 仍保持在外控量 y_{0c} 附近, 不会引起稳定电弧放电, 即使瞬时出现电弧, 系统也能快速调回至给定值附近。

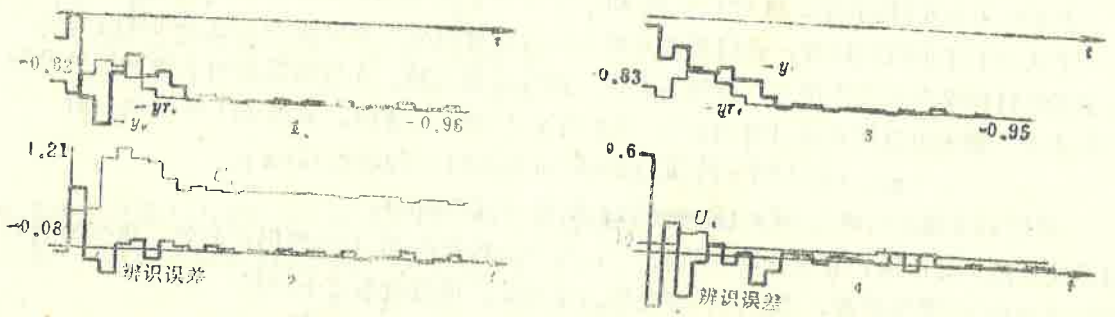


图 5a 冲油良好 (预孔直径 = $\phi 6\text{mm}$)

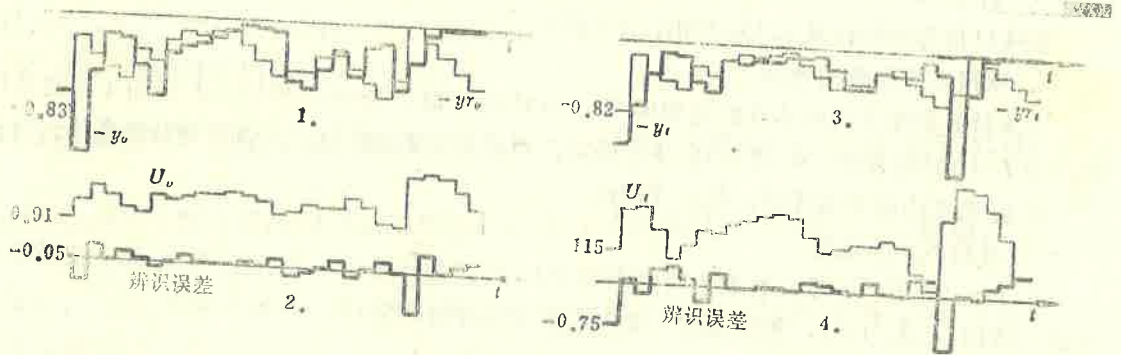


图 5b 没有冲油 (无预孔)

五、结 论

1. 电火花常规机床加工深型腔时, 操作人员必须具有丰富的经验, 精心操作, 但仍难

防止电弧危害。采用本文介绍的系统和控制算法,计算机可代替人工操作,在铜加工钢深型腔粗加工时,完全能消除电弧烧伤,加工效率比普通熟练工人提高约20%。

2. 由于检测仪解决了对“过渡电弧”参数的测量,对于预防“稳定电弧”的出现起了重要作用。

3. 电火花加工工艺过程是一个复杂的过程,动态变化极快,本文介绍的只是探索性研究工作的结果,要研究出适合各种加工状态的算法,还须作进一步深入理论和实验研究,目前笔者正在进行这方面的工作。

参 考 文 献

- [1] Sneoys, R., Dauw, D., Kruth, J. P., Improved Adaptive Control System for EDM Processes, *Annals of the CIRP*, 29:1, (1981), 97—101.
- [2] 王蔚岷、刘晋春,电火花加工放电状态分析仪,电加工,2,(1984),12—16.
- [3] 刘晋春、王蔚岷,微机自适应控制电火花加工脉冲电源及系统研制中的一些问题,哈尔滨工业大学学报,4,(1985),68—75.
- [4] 吴广玉,系统辨识与自适应控制,哈尔滨工业大学教材, (1981),上、下册.
- [5] Harris, C. J., Billings, S. A., Self-Tuning and Adaptive Control, Theory and Application, Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, UK, and New York, (1981), Chapter 2.
- [6] 韩曾晋,自适应控制系统,机械工业出版社,北京,(1983),第三章.

Adaptive Control for Electro-discharge Machining Process

Wang Weimin

(Chengdu University of Science & Technology)

Wu Guangyu, Liu Jinchun

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

This paper introduces the application of self-tuning control algorithm in EDM process to avoid the thermodamage caused by the occurrence of stable arc and to improve the machining efficiency and stability. An EDM control system based on micro-computer and an EDM discharge parameters monitor being used as the detecting unit in this system have been designed and built. A linearized mathematic model describing the machining process is established and the self-tuning control method is utilized in this system. This control algorithm has got satisfactory success and the machining reliability and productivity have been improved and increased.