

高熔点难加工材料的电火花 深孔加工*

周 明¹, 荆红雁¹, 王振东²

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 北京 100044;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

[摘要] 电火花加工具有非接触性加工和可以加工导电材料的优点。然而,电火花加工放电频率高、加工间隙小、电磁干扰强,加工过程的稳定性较差。电火花加工深盲孔时,随着加工的深入和排屑能力的降低,间隙中累积的加工屑会越来越多,再结合其加工过程稳定性差的缺点,非常容易出现不可逆拉弧烧伤工件表面,因此,限制了电火花加工深孔的能力。针对熔点高、难切削材料,比如钼钛锆合金,研究了超前两步控制策略的双变量自适应控制系统,根据拉弧率自适应实时调整其中一个变量抬刀周期,根据放电率自适应实时调整间隙伺服电压。验证试验表明:由双变量自适应控制的电火花加工模具钢 Cr₁₂MoV 的加工深度较传统电火花加工的加工深度提高了 3.7 倍以上;加工熔点 2640℃ 的核工业特制钼钛锆合金可以稳定加工到设定的 93mm,此时加工速度没有发生改变,而传统电火花加工几乎不能加工。由此可以看出双变量自适应控制电火花加工的强大加工能力。

关键词: 电火花; 深盲孔; 自适应控制系统; 超前两步控制策略; 钼钛锆合金

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.016



周 明

副教授,研究方向为特种加工过程控制和智能制造,发表论文 50 余篇,SCI 一区论文 5 篇,发明专利 5 项。

* 基金项目:北京市属高校基本科研业务费专项资金资助;北京市教育委员会科技计划面上项目(051101904);北京建筑大学研究生创新项目。

深孔加工技术是机械加工中一项极其重要的技术,据统计,在我国的 29 个制造行业中,50% 以上对深孔加工技术和装备有着直接需求^[1]。目前,主流深孔加工技术还是深孔钻削技术,主要由枪钻、BTA 系统、吸喷钻系统及 DF 系统组成^[2]。深孔加工的特殊性也形成了其加工过程中的经典难题:排屑难、冷却及润滑难、工具系统刚度低等,这些问题长期困扰着深孔加工行业,极大地限制了深孔加工的工艺范围和加工效率^[3]。刀具系统结构优化与高性能刀具不断出现以及深孔钻削状态监测系统的不断开发,推动了深孔钻削加工技术的发展^[4]。由于深孔钻削技术属于接触式加工,加工工具颤动以及震动、加工表面接触应力以及加工薄壁零件容易变形等问题极大地影响加工精

度。其次,深孔钻削技术还不能很好地加工难切削材料,例如钛合金、718 镍铬铁耐热合金和特小特深孔等的加工。随着加工技术以及加工设备的不断开发,特种加工技术在深孔加工领域中占比越来越高。

电火花加工技术(Electrical Discharge Machining, EDM)是在工具电极和工件之间施加高频脉冲击穿电介质后产生瞬时高温蚀除工件材料的一种非传统加工工艺。电火花加工技术相比传统加工技术拥有两个突出优点:非接触式加工和加工导电性材料^[5]。非接触式加工可以消除接触应力、颤动以及震动对加工精度的影响;加工导电性材料可以无视材料的硬度。因此,电火花加工被广泛地应用在加工模具、复杂曲面零件、薄壁件等。然而,电火花加工

本身存在加工稳定性差的特点,特别是加工深孔时,尤其是熔点高的材料时,稳定性差的特点更加突出。

电火花加工过程是非线性和弱稳态的过程^[6],具有间隙小和放电频率高等特性^[5,7],导致加工过程极易进入不稳定阶段。此外,当加工深孔时,随着加工深入难排屑致使极间累积的加工屑不断增多,电介质绝缘强度不断下降,拉弧脉冲出现的几率逐渐加大,随之而来的有害脉冲逐渐占据加工间隙,最终工件表面被烧伤。尤其在深孔加工导热性差的材料时,如钛合金、镍基合金等,残留热量会使得加工区域温度快速升高,使该区域的电介质在脉冲放电后消电离不够充分,造成后续放电脉冲成为拉弧脉冲而烧伤工件。因此,电火花加工过程稳定性差这一性质,严重制约了电火花深孔加工的能力和效率。为了突破这一制约,首要解决的问题就是提高电火花加工的稳定性。

优化电火花加工参数是提升电火花加工过程稳定性的首要前提,在这一方面目前已有大量研究^[8-10]。然而以上研究优化的加工参数是特定条件下的参数,而电火花加工过程是一个非稳态过程,优化的参数作用极为有限。因此提高电火花加工稳定性还需开展进一步地研究。众所周知,如果电火花加工参数可以根据加工状态实时调整,那么电火花加工稳定性将会得到改善。这就需要适合的控制系统的来完成这一项工作。由于电火花加工过程复杂且缺少量化分析,这使得很多学者在模糊控制、神经网络以及人工智能中寻求帮助^[11-15]。由于加工过程状态和环境的不断变化,简单化的数学模型使这些控制系统不能起到应有的作用。而自适应控制系统不但可以根据加工状态和加工环境实时调整一个或者多个控制变量来稳定加工过程,而且易于实现自动化。因此自适应控

制系统可以用来进一步提高电火花加工的稳定性。

针对不同物理特性的材料,本文提出建立抬刀周期和间隙伺服电压双变量自适应控制系统来提高电火花加工的稳定性。在双变量自适应控制过程中,根据拉弧率自适应实时调整抬刀周期,控制放电时间的长短以影响输入的加工能量;根据放电率自适应实时调整伺服间隙电压,控制间隙距离的大小以影响放电率和排屑能力。该系统通过同时调整抬刀周期和伺服间隙电压来控制产屑量和排屑量,使极间加工屑处于一种动态平衡的状态,以此获得稳定的动态加工过程。通过试验验证,此系统不仅可以深孔加工模具钢,并能加工熔点 2640℃ 用于核反应堆特制钨钽合金,展示了双变量自适应控制电火花加工的强大加工能力。

双变量自适应控制系统

1 控制指标和控制变量

电火花加工间隙存在 5 种脉冲,分别是开路脉冲、火花脉冲、瞬态拉弧脉冲、稳态拉弧脉冲和短路脉冲。本文通过电压-电流阈值法来辨识上述 5 种脉冲^[16]。其中,开路脉冲属于不放电脉冲,火花脉冲和瞬态拉弧脉冲称为有效放电脉冲,稳态拉弧脉冲和短路脉冲称为有害放电脉冲。

定义 1:有效放电率。有效放电率是单位时间内有效放电脉冲数量占总脉冲数量的比例。

有效放电率的大小直接影响加工速度,有效放电率高,加工速度快,反之则加工速度慢。

定义 2:拉弧率。拉弧率亦称为有害脉冲率是一定时间内有害放电

脉冲数量占总脉冲数量的比例,用 $y_1(t)$ 表示。

拉弧率的大小代表加工过程的稳定性,拉弧率高,加工稳定性差,反之则加工稳定性好。这样,加工过程的稳定性可以用拉弧率这一量化指标来量化。

定义 3:放电率。放电率是有效放电率与拉弧率之和,用 $y_2(t)$ 表示。

放电率代表加工间隙易于击穿的程度,放电率高表示间隙易于击穿,反之则表示间隙不易于击穿。换句话说,间隙的大小直接影响放电率,间隙越大,放电率越低,而间隙越小,放电率越高。在正常加工过程中, $y_2(t) \gg y_1(t)$ 。而间隙的大小,由间隙伺服电压决定,二者之间是线性比例关系,伺服电压大则间隙大,伺服电压小则间隙小。

电火花加工过程中,放电能量可根据公式(1)计算得到,

$$W=U \cdot I \cdot T \cdot (y_2(t)-y_1(t)) \quad (1)$$

式中, U 、 I 和 T 分别代表脉冲放电电压、峰值电流和抬刀周期中的放电时间。通常脉冲放电电压一般维持在 20V 左右,峰值电流主要根据加工精度要求进行选取。因此,放电电压和峰值电流不适合作为控制变量。在公式(1)中,抬刀周期的放电时间长,直接影响放电能量多少,输入能量高,拉弧率也会升高,输入能量低,拉弧率则降低,因此抬刀周期可以控制拉弧率。间隙伺服电压越大,放电间隙越大,放电率越小,反之亦然。因此间隙伺服电压可控制放电率。双变量控制系统中,抬刀周期与间隙伺服电压为该控制系统中的两个控制变量。

2 双变量自适应控制系统

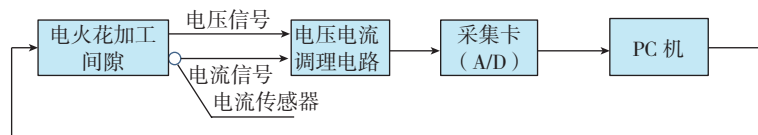


图1 电火花闭环控制原理图

Fig.1 Schematic diagram of EDM closed-loop control system

为实现自适应控制电火花加工,需要建立如图1所示的闭环控制系统。首先,采集极间电压与电流信号,并将信号输入到工控机中,根据文献[16-17]中辨识准则和流程图辨识加工中的各种放电脉冲,并计算出拉弧率和放电率。其次,基于辨识出的拉弧率和放电率,根据自适应控制策略计算出抬刀周期和伺服间隙电压。最后,将自适应优化后的控制变量值输入到电火花加工机床,改变下一时刻的抬刀周期和伺服电压参数。

图2所示是电火花双变量自适应控制系统原理图,此控制系统由两个并联的闭环自适应控制系统组成,其中一个环根据拉弧率实时计算抬刀周期,另一个环根据放电率实时计算间隙电压。此外,拉弧率和放电率分别反馈回来计算抬刀周期和伺服间隙电压。

3 电火花加工模型

电火花加工过程,拉弧率和放电率受内部因素和外部因素影响。其中,内部因素包括电参数和伺服参数,外部因素包括工件和电极材质、加工深度、加工屑浓度以及声、光、电、磁等带来的干扰。不考虑外部因素,内部因素理论上是有规律地影响着拉弧率和放电率。内部因素是确定性因素,将作为电火花加工模型中的确定性部分。实际中,即使内部因素不发生改变,外部因素仍然能使拉弧率和放电率发生变化,例如,随着加工深度的逐渐加深以及相应的排屑能力逐渐下降,拉弧率也会逐渐加大。作为不确定因素的外部因素,是电火花加工模型的干扰部分。因此,电火花加工过程模型由确定性部分和干扰部分组成。此外,因为电火花加工过程属于非线性过程,所以使用线性时变模型来拟合和处理非线性过程是合理的。由于双变量自适应控制系统中根据拉弧率实时调整抬刀周期,同时又根据放电率实时调整

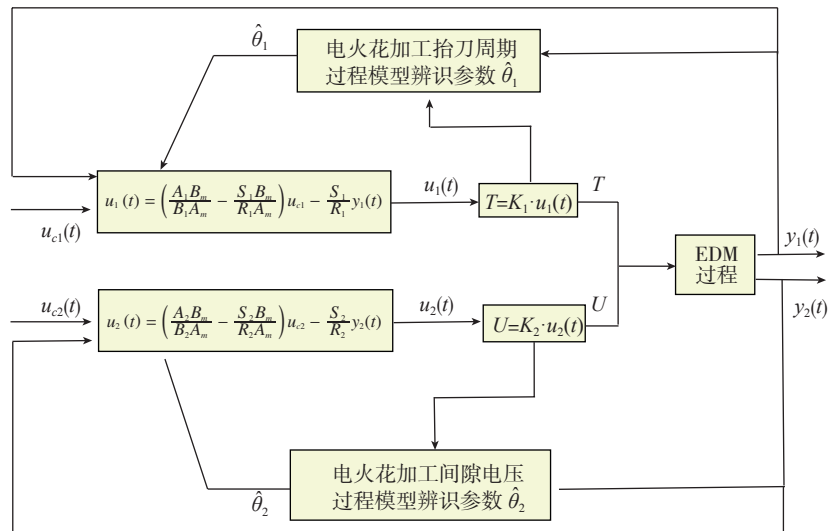


图2 电火花双变量自适应控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of double control variable adaptive control system for EDM

伺服间隙电压,这种自适应控制系统需要两个线性时变模型来拟合和处理非线性过程:

$$A_i(q)y_i(t)=B_i(q)u_i(t)+C_i(q)e(t), i=1,2 \quad (2)$$

式中, $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别代表拉弧率和放电率; $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别表示抬刀周期和伺服间隙电压; $e(t)$ 代表均值为0、方差 σ^2 的白噪声。

q^{-1} 是后向移位算子,有:

$$A_i(q)=1+a_{i1}q^{-1}+\dots+a_{in}q^{-n}$$

$$B_i(q)=1+b_{i1}q^{-1}+\dots+b_{im}q^{-m}$$

$$C_i(q)=1+c_{i1}q^{-1}+\dots+c_{in}q^{-n}$$

电火花加工模型时变过程参数由最小方差二乘法递归估计,为:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \hat{\theta}(t-1) + L(t)(y(t) - \varphi^T \theta(t-1)) \\ L(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda(t) + \varphi^T P(t-1)\varphi(t)} \\ P(t) = \frac{1}{\lambda(t)} (P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T P(t-1)}{\lambda(t) + \varphi^T P(t-1)\varphi(t)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\lambda(t)$ 是遗忘因子, $\varphi(t)$ 是包含过去输入、输出信息的状态向量。

4 自适应控制策略

电火花加工过程是确定性非线性过程。这种情况下,为了稳定加工过程并提高加工效率,合理设计控制器显得尤为重要。用来计算控制变量的线性控制器通常可以设计成为:

$$R_i u_i(t) = T_i u_{ci}(t) - S_i y_i(t) \quad i=1,2 \quad (4)$$

式中, R_i , S_i 和 T_i 是关于 q 的多项式, q 为前向移位算子, $u_{c1}(t)$ 和 $u_{c2}(t)$ 分别是拉弧率期望值和放电率期望值^[18]。

将式(2)代入式(4)并约去 $u_i(t)$ 得:

$$y_i(t) = \frac{B_i T_i}{A_i R_i + B_i S_i} u_{ci}(t) + \frac{B_i R_i}{A_i R_i + B_i S_i} e(t), \quad i=1,2 \quad (5)$$

由此得到闭环控制系统特征方程:

$$A_i R_i + B_i S_i = A_{ci}, \quad i=1,2 \quad (6)$$

式中, A_{ci} 被称为闭环特征多项式。

本文采用超前两步控制策略计算控制变量,则闭环特征多项式为:

$$A_{ci} = q B_i + C_i, \quad i=1,2 \quad (7)$$

式中, B_i^+ 是首一多项式,并且其零点稳定。多项式 R_i 和 S_i 由式(6)计算得到。

为提高电火花加工过程稳定性,使用极点配置法控制系统的动态特性,理想参考模型为:

$$y_m(t) = \frac{B_m(q)}{A_m(q)} u_{ci}(t), \quad i=1,2 \quad (8)$$

式中, $y_m(t)$ 是理想参考模型的输出, $\frac{B_m(q)}{A_m(q)}$ 是理想参考模型的传递函数,并且其极点全部稳定。

联立式(2)和式(8):

$$\frac{B_i T_i}{A_i R_i + B_i S_i} u_{ci}(t) = \frac{B_i T_i}{A_{ci}} u_{ci}(t) = \frac{B_m(q)}{A_m(q)} u_{ci}(t), \quad i=1,2 \quad (9)$$

那么,可以通过带入多项式 R_i 和 S_i 计算 T_i ,

$$T_i = \frac{B_m(A_i R_i + B_i S_i)}{B_i A_m}, i=1, 2 \quad (10)$$

将 R_i 、 S_i 和 T_i 带入式(4)推导出控制变量 $u_i(t)$:

$$u_i(t) = \left(\frac{A_i B_m}{B_i A_m} - \frac{S_i B_m}{R_i A_m} \right) u_{ci}(t) - \frac{S_i}{R_i} y_i(t), i=1, 2 \quad (11)$$

计算出控制变量 $u_i(t)$ 后,将其映射到电火花机床相应的机床参数值。

试验验证

文中所有试验都是在北京凝华科技有限公司生产的 NH7125ZNC 电火花机床上执行。电极选用直径为 16mm 的紫铜电极,深孔加工模具钢 $Cr_{12}MoV$ 设定深度 125mm,钨钼合金钢设定深度 93mm。

1 深孔加工模具钢 $Cr_{12}MoV$

表 1 是传统电火花加工模具钢的主要加工参数,加工过程如图 3 所示。加工过程由拉弧率时间序列表示,拉弧率低表示加工过程稳定,拉弧率高则不稳定。传统电火花加工时,加工参数设定后,不会根据加工环境的变化而变化。因此,当加工深度较小时,排屑能力大于产屑能力,拉弧率低,加工过程稳定;当加工深度越来越深时,排屑能力逐渐低于产屑能力,间隙中积累的加工屑不断增多,火花液的绝缘强度越来越低,有害脉冲所占比重会越来越大,拉弧率越来越大,表明加工过程不断恶化,当加工到 34mm 时,不可逆拉弧出现,加工被迫停止。

双变量自适应控制系统使用表 1 中除拾刀周期和伺服电压以外的加工参数加工模具钢,拾刀周期和伺服电压作为控制系统的控制变量,根据加工环境的变化而自适应相应调整。本文选取初始加工阶段、正常加工阶段和达到设定加工深度时的加工阶段来详细分析自适应加工过程。在图 4~6 中,纵坐标从上到下分别

表示拉弧率、拾刀周期、放电率和伺服间隙电压,横坐标表示电极拾刀次数。其中拉弧率和放电率均在 0~1 内变化,拾刀周期在 1~37 之间按整数变化,值越大放电时间越长;间隙伺服电压在 2~37 之间按整数变化,值越大,间隙越大。

如图 4 所示,加工刚开始阶段,加工屑很容易被排出,拉弧率很低,

加工过程非常稳定。此时,拾刀周期会自适应以较大数值输入加工能量,同时,间隙伺服电压也会自适应以较小数值缩短间隙,以获得较大的放电率,实现快速加工。当加工到一定深度,拉弧率突然升高,高于拉弧率期望值时,代表间隙中已累积一定的加工屑,加工状态开始变坏,此时,拾刀周期快速下降,减少输入能量,恢复

表1 电火花加工模具钢的主要加工参数

| 开路电压 / V | 峰值电流 / A | 脉宽 / μs | 脉间 / μs | 拾刀周期 (机床参数) | 伺服电压 (机床参数) | 拾刀高度 (机床参数) |
|----------|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 230 | 30 | 800 | 300 | 10 | 11 | 12 |

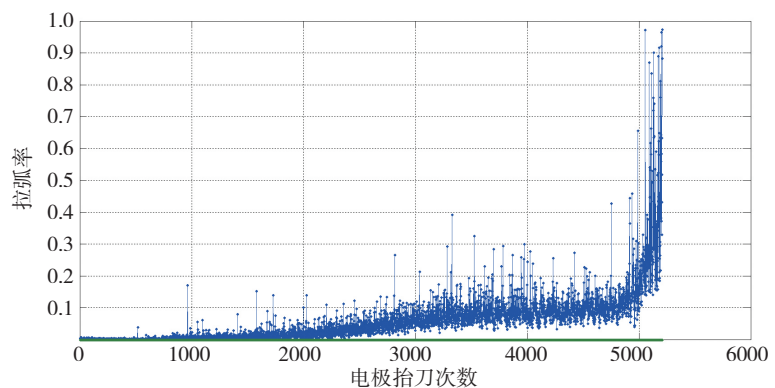


图3 传统电火花加工模具钢过程图

Fig.3 Process of conventional electrical discharge machining $Cr_{12}MoV$

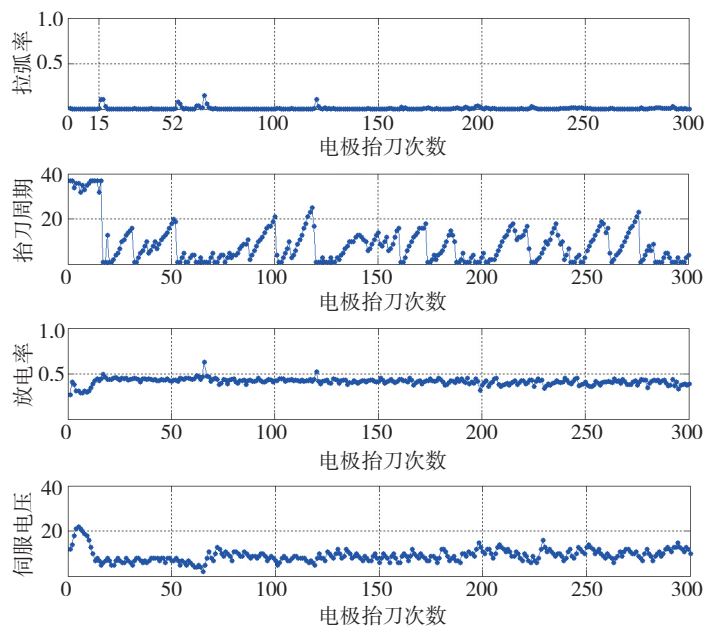


图4 电火花双变量自适应控制加工模具钢初始加工阶段

Fig.4 Initial machining stage of electrical discharge machining $Cr_{12}MoV$ by adaptive double variable control system

稳定的加工。当拉弧率低于拉弧率期望值时,拾刀周期会加大,增加输入能量,以加快加工速度。间隙伺服电压根据放电率的自适应调整,与拾刀周期的自适应调整相同。

随着加工深入,加工屑排出难度加大,如图5所示,正常加工阶段拉弧率的幅度和密集度大于初始加工阶段,相应的,拾刀周期自适应下降,同时间隙伺服电压自适应增大。通过缩减输入的加工能量来降低产屑能力,并通过扩大间隙距离来增加排屑能力,以此来共同维持极间加工屑输入输出的动态平衡,亦即在维持加工过程稳定的基础上,获得最大的加工能力。

图6所示为达到设定加工深度时的加工阶段,拾刀周期和伺服电压调整过程和正常加工阶段基本一致,表明双变量自适应控制系统可以顺利加工到设定深度125mm。从最后拾刀周期和间隙伺服电压的调整情况来看,尚未达到调整的极限值,说明还可以加工到更深的深度。加工模具钢实物对比图如图7所示。

2 深孔加工钨钛锆合金

传统电火花加工在加工熔点2640℃钨钛锆合金(TZM)时,刚刚加工2mm左右,就开始拉弧烧伤工件而加工不下去,这是由于极间加工状态变化较快,传统电火花加工参数固定,不能随之变化所致。具有双变量自适应控制系统的电火花加工,除了可以稳定加工较大深径比的模具钢盲孔外,还可以稳定加工熔点2640℃钨钛锆合金,并以2mm/h的速度加工长为96mm钨钛锆合金盲孔到设定的93mm。

由于钨钛锆合金熔点高,因此需要足够加工能量融化及汽化钨钛锆合金表面。电火花双变量自适应控制系统加工钨钛锆合金调整过程如图8所示,拾刀周期在较大值自适应调整,同时间隙伺服电压在较小值调整以保证在输入足够的加工能

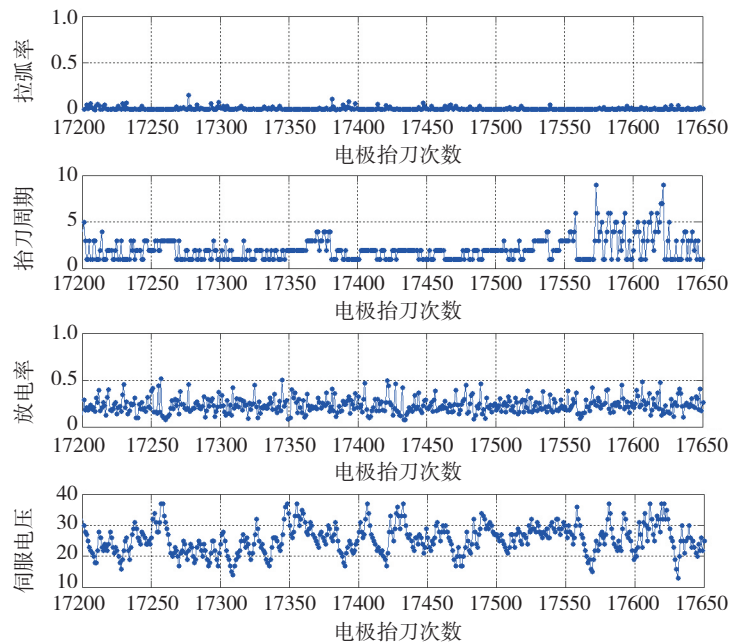


图5 电火花双变量自适应控制加工模具钢正常加工阶段

Fig.5 Normal machining stage of electrical discharge machining $Cr_{12}MoV$ by adaptive double variable control system

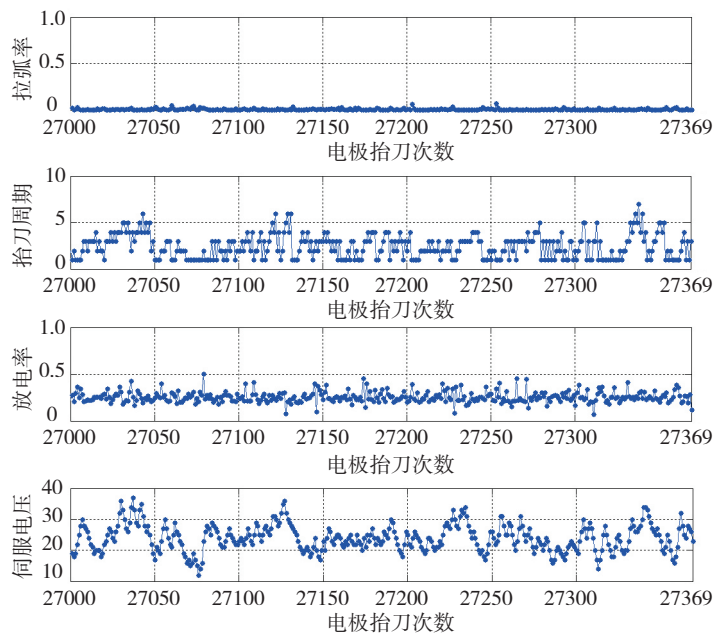


图6 电火花双变量自适应控制加工模具钢最终加工阶段

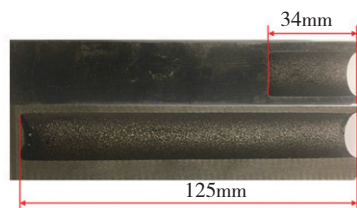
Fig.6 Final machining stage of electrical discharge machining $Cr_{12}MoV$ by adaptive double variable control system

量并以较大的放电率熔化和汽化该合金材料。为保持加工过程的稳定性,又要有足够的能量输入保证该材料的可加工性,加工中拉弧率经常快速上升,然后又快速回到稳定区域,根据多变的加工状态,两个变量快速调整,解决了钨钛锆合金难

加工这一难题。图9所示为加工前钨钛锆合金。由于线切割很难切开钨钛锆合金,只能给出加工测量值,如图10所示。

结论

电火花加工固有的稳定性差的



注: 上为传统电火花加工, 下为电火花双变量自适应控制加工。

图7 模具钢加工深度对比图

Fig.7 Cr₁₂MoV machined depths by conventional EDM and adaptive double variable EDM

特点,极大地限制了电火花加工能力的发挥,深盲孔的加工能力和效率低下,特别是针对高熔点难加工材料如钨钛钼合金时,几乎难以加工。本文研究的双变量自适应控制系统,能够同时根据拉弧率和放电率自适应调整拾刀周期和间隙伺服电压,寻求并维持加工间隙中产生与排出金属屑的动态平衡,在稳定电火花加工的同时获得最快的加工速率。本文主要结论如下:

(1) 以拉弧率时间序列量化电火花加工过程,并以拉弧率作为衡量加工过程稳定性的指标;

(2) 建立了以拾刀周期和间隙伺服电压为控制变量,拉弧率和放电率为调控指标的电火花加工双变量自适应控制系统。该系统能够很好地发挥其自适应调整作用,平衡间隙中产生和排出的金属屑量,从而协调好电火花加工过程的稳定性与快速性;

(3) 电火花双变量自适应控制系统能够进行深孔加工难切削、高熔点,如用于核工业的钨钛钼合金材料,极大地拓展了电火花加工能力;

(4) 该控制系统在常规材料如模具钢的加工中也体现出了极强的加工能力。

参考文献

[1] 蒋超猛,张弓,王映品,等. 深孔加工技术的研究综述及发展趋势[J]. 机床与液压, 2015, 43(11): 173-177.

JIANG Chaomeng, ZHANG Gong, WANG Yingpin, et al. Research review and development

trend of deep-hole machining technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(11): 173-177.

[2] 张晓东,韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(15): 50-57.

ZHANG Xiaodong, HAN Ce. Research review of deep hole technology for complex shell part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(15): 50-57.

[3] 杨微,周威,杨力,等. 深孔加工技术研究进展[J]. 硬质合金, 2016, 33(2): 141-

146.

YANG Wei, ZHOU Wei, YANG Li, et al. Development of deep hole processing[J]. Cemented Carbide, 2016, 33(2): 141-146.

[4] 付建军,徐建媛. 航天产品深孔加工技术综述[J]. 北华航天工业学院学报, 2013, 23(6): 1-2.

FU Jianjun, XU Jianyuan. Overview of deep hole machining technology of aerospace products[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2013, 23(6): 1-2.

[5] KUNIEDA M, LAUWERS B,

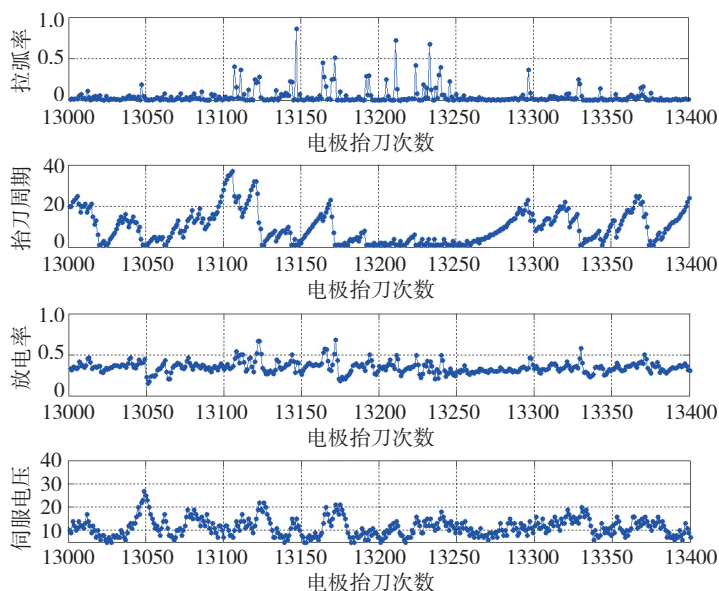


图8 电火花双变量自适应控制系统加工钨钛钼合金调整图

Fig.8 Process of adaptive double control variable EDM titanium zirconium molybdenum alloy (TZM)

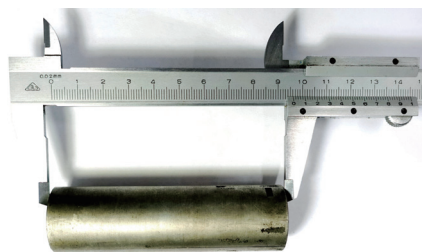


图9 加工前的钨钛钼合金

Fig.9 Titanium zirconium molybdenum alloy (TZM) before machining

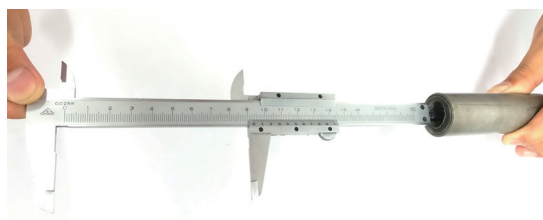


图10 电火花双变量自适应控制系统加工钨钛钼合金盲孔

Fig.10 Titanium-zirconium-molybdenum (TZM) blind hole machined by adaptive double control variable EDM

- RAJURKAR K P, et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 64–87.
- [6] ZHOU M, HAN F, WANG Y, et al. Assessment of the dynamical properties in EDM process—detecting deterministic nonlinearity of EDM process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(1–2): 91–99.
- [7] HO K H, NEWMAN S T. State of the art electrical discharge machining(EDM) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(13): 1287–1300.
- [8] RAHMAN M M, KHAN M A R, KADIRGAMA K, et al. Optimization of machining parameters on tool wear rate of Ti–6Al–4V through EDM using copper tungsten electrode: a statistical approach[J]. Advanced Materials Research, 2011, 152–153: 1595–1602.
- [9] KAO J Y, TSAO C C, WANG S S, et al. Optimization of the EDM parameters on machining Ti–6Al–4V with multiple quality characteristics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(1–4): 395–402.
- [10] RAHMAN M M, KHAN M A R, NOOR M M, et al. Optimization of machining parameters on surface roughness in EDM of Ti–6Al–4V using response surface method[J]. Advanced Materials Research, 2011, 213: 402–408.
- [11] TARNG Y S, TSENG C M, CHUNG L K. A fuzzy pulse discriminating system for electrical discharge machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(4): 511–522.
- [12] BOCCADORO M, DAUW D F. About the application of fuzzy controllers in high-performance diesinking EDM machines[J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 147–150.
- [13] KANEKO T, ONODERA T. Improvement in machining performance of die-sinking EDM by using selfadjusting fuzzy control[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1): 204–211.
- [14] WANG H, YU B. A fuzzy neural control system for EDM[J]. Advanced Science and Technology Letters, 2013, 31: 83–86.
- [15] KHAN M A R, RAHMAN M M, KADIRGAMA K. Neural network modeling and analysis for surface characteristics in electrical discharge machining[J]. Procedia Engineering, 2014, 90: 631–636.
- [16] ZHOU M, HAN F, SOICHIRO I. A time-varied predictive model for EDM process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(15): 1668–1677.
- [17] ZHOU M, MENG X, QIN J, et al. Building an EDM process model by an instrumental variable approach based on two interactive Kalman filters[J]. Procedia CIRP, 2013, 37(1): 146–158.
- [18] ASTROM K J, WITTENMARK B. Adaptive control[M]. Boston: Addison–Wesley, 1995.

通讯作者: 周明, E-mail: zhouting@bucea.edu.cn。

Electrical Discharge Machining (EDM) Deep and Blind Holes

ZHOU Ming¹, JING Hongyan¹, WANG Zhendong²

(1. School of Mechanical-Electronic and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

[ABSTRACT] The advantages of electrical discharge machining (EDM) over traditional machining have earned its wide applications in industrial world. However, the low machining stability caused by the inherent characteristics of EDM, high discharge frequency, small discharge gap, and strong disturbances, has hindered its further development, especially in deep, blind hole making because of difficulty in removing debris out of the gap in deep holes, causing the occurrences of arcing pulses and damaging work-piece surface. In order to improve process stability of machining deep and blind holes and solve the issue of machining such kind of high-melting-point, difficult-to-cut materials as titanium-zirconium-molybdenum alloy (TZM), this paper has developed an adaptive double variable control system. In this control system electrode-discharge-cycle and gap-servo-voltage were taken as control variables adaptively tuned, by two-step-ahead control strategy, with respect to variations of arcing ratios and discharging ratios respectively. One confirmation test demonstrated that this control system had improved machined depth of a hole more than 3.7 times from that by conventional EDM in machining Cr₁₂MoV material. The other test confirmed that this control system helped to machine a blind hole, with a copper electrode of diameter 16mm, in the hard-to-cut TZM of nearly 2640°C melting point up to a depth of 93mm at an almost steady machining rate. The conventional EDM could hardly machine this kind of material. All these facts revealed that the developed adaptive double variable control system had endowed EDM with much stronger power to extend its applications in the newly developed materials.

Keywords: EDM; Deep and blind hole; Adaptive control system; Two-step-ahead control strategy; TZM alloy

(责编 海山)