

基于极间分压检测的 VHF-EDM 放电状态检测系统设计^{*}

廖路 张勇斌 戴越

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900)

摘要:针对甚高频脉冲谐振频率随回路阻抗变化而迁移导致脉冲电压幅值变化及甚高频脉冲双极性特点导致传统检测方法无法适用的问题,提出了基于极间分压检测的甚高频 EDM 放电状态检测方式。利用分压、整流、滤波多模块共同作用实现对极间高频高压双极性脉冲到低压单极性直流信号的转换,同时通过检测直流信号则可以直接表征出当前开路电压大小及极间放电状态的变化。在仿真及实验验证检测方法可行性的基础上,设计出基于该检测方案的放电状态检测系统及相应检测算法,成功验证了甚高频微纳电加工所需的脉冲频率自动寻优技术及甚高频放电状态检测的有效性,有利于提升甚高频电火花加工过程中放电状态检测精度。

关键词:极间分压检测;甚高频脉冲;谐振频率;双极性;放电状态

中图分类号: TN98; TH16 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.25

Design of VHF-EDM discharge state detection system based on inter-electrode partial pressure detection

Liao Lu Zhang Yongbin Dai Yue

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In view of the problem that the amplitude of pulse voltage changes due to the migration of VHF pulse resonance frequency with the change of circuit impedance, and the bipolar characteristics of VHF pulse make the traditional detection method unsuitable, a VHF EDM discharge state detection method based on inter-electrode partial voltage detection was proposed. The conversion of high frequency and high voltage bipolar pulse to low voltage and single polarity DC signal is realized by the combined action of voltage division, rectifier and filter modules. Meanwhile, the current open-circuit voltage and the change of inter-electrode discharge state can be directly characterized by the detection of DC signal. In the simulation and experimental validation testing method on the basis of feasibility, design discharge condition detection system based on the test scheme and corresponding detection algorithms, successfully verified the micro-nano machining the pulse frequency, VHF automatic optimization technology and the effectiveness of the very high frequency discharge condition detection, is conducive to improve VHF discharge during the process of electrical discharge machining precision.

Keywords: electrode partial pressure detection; VHF pulse; resonant frequency; dual polarity; discharge status

0 引言

微细放电加工(micro-EDM)是一种非接触式制造技术,无宏观切削力^[1-2]。因此, Micro-EDM 特别适用于高硬度导电材料的制造。由于其加工精度高,成本低和可控性强,在微米级三维结构的加工领域具有很大的应用前景^[3]。然而,微细电火花加工目前仍难以同时满足更

好的加工表面完整性和更高的加工效率的双重要求^[4]。但是甚高频脉冲电源较传统高频电火花电源具有更高的脉冲频率以及更窄的脉宽,所以可以很大的提升电火花加工表面质量。甚高频脉冲电源不同于传统的独立晶体管式或 RC 充放电式电源^[5],属于一种新型的电火花加工电源,其放电频率可以达到甚高频(30~300 MHz)级别,波形为标准正弦波,脉冲宽度压缩至几纳秒,已经有研究证明,相对于传统电源,甚高频电源的加工表面质量

有显著提高,重铸层、热影响区以及微裂纹等表面缺陷有显著改善^[6-7]。

放电状态检测是电火花脉冲电源的关键技术之一,是实现高效、精密放电加工的保障^[8-9]。微细电火花最常用的状态检测方法为间隙平均电压检测法^[10-11],该方法通过设定阈值对微细电火花状态进行识别^[12],但该方法只能应用于传统的低频、单向放电加工,最高频率不超过10 MHz,无法应用于甚高频放电加工的状态检测,其主要原因是传统的间隙平均电压检测法不能用于交流双极性脉冲,双极性信号被该方法直接处理后变为零电平信号,无法用于状态判断,而基于高速信号采样的数字处理方法对采样系统的要求过高^[13-15],极大的增加了硬件及软件的开发难度与成本。

基于现有的检测方法多用于传统的电火花电源,且只对单极性脉冲具有检测能力^[16-17],为了准确地检测甚高频脉冲电源的电极间放电状态,可以实现稳定而连续的处理。提出一种基于极间分压低通滤波检测的甚高频微型 EDM 的放电状态检测新方法,通过建立电路仿真模型和进行放电加工实验,分析了该方法应用于甚高频脉冲电源的有效性,设计出对应的检测算法,并成功搭建基于极间分压检测的放电状态检测系统,成功实现甚高频电火花加工放电状态精准检测,保证了甚高频放电加工方法的工程化应用。

1 极间分压检测原理分析

1.1 甚高频电源放电波形分析

在电火花加工中,电脉冲宽度对加工质量有着很大的影响,脉冲脉宽越小,单脉冲能量越小,单次放电所产生的蚀除凹坑也会越小,最终叠加后被加工件表面加工质量越好。传统电火花通过不断优化晶体管的开关性能实现对脉冲宽度的压缩,但是由于现有晶体管的开关性能已经达到极限,传统形式的脉冲电源脉冲脉宽已经很难实现大范围的压缩^[18],而甚高频脉冲电源采用不同形式,通过震荡电路来获得高频(30~300 MHz)放电脉冲,不仅大大压缩了脉冲宽度,也保证了较高的开路电压,在保证高质量的同时也实现了较高的加工效率脉冲电源由脉冲谐振放大技术实现甚高频脉冲的产生。甚高频脉冲电源电路的示意图如图 1 所示^[19]。

传统脉冲电源不同,甚高频电源产生的输出脉冲为正弦波^[20]。要将其应用于微细电加工则需要一种稳定可靠的检测方法来控制加工过程,以确保脉冲间隙处于正常的放电状态。甚高频脉冲电源典型的放电状态波形如图 2 所示,脉冲为典型的双极性正弦波形,脉冲频率高。

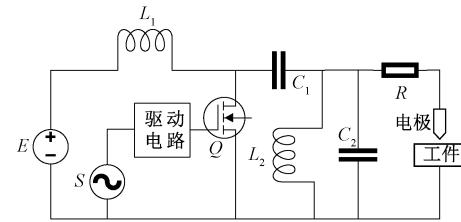
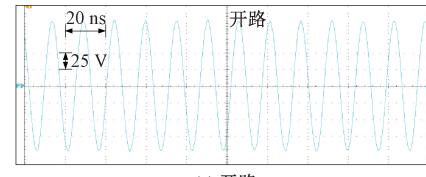
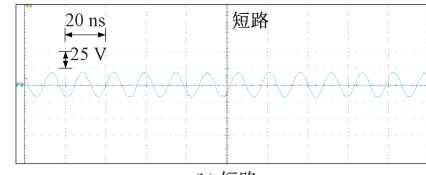


图 1 甚高频脉冲电源基本电路型

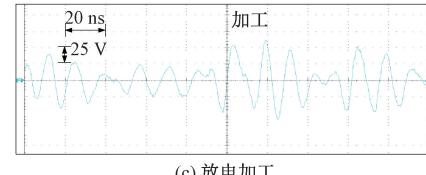
Fig. 1 Fundamental circuit of VHF micro-EDM pulse generator



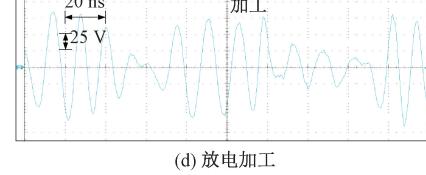
(a) 开路
(a) Open circuit



(b) 短路
(b) Short circuit



(c) 放电加工
(c) Discharge



(d) 放电加工
(d) Discharge

图 2 甚高频脉冲电源在不同放电状态下电压波形

Fig. 2 Typical voltage waveforms under different discharge states by VHF micro-EDM pulse generator

1.2 检测系统设计

甚高频脉冲电源会产生标准的无偏正弦波,波形具有双极性,通过间隙平均电压检测电路进行滤波后各种放电状态的检测波形几乎变成 0 V 的 DC 信号,这样就无法区分开路,放电和短路的放电状态。所以现有的间隙平均电压检测法无法适用于甚高频脉冲电源的放电状态检测,需要提出新的适用于甚高频脉冲的极间状态检测方法。

提出的基于极间分压检测的甚高频微型 EDM 的放电状态检测方法可以实现对甚高频信号的双极性处理,

并完成输入信号的整流滤波处理。该检测方法原理如图 3 所示, 总体主要包含分压整流模块与射频滤波模块两部分。由于甚高频脉冲可实现大功率、高电压幅值的输出, 所以首先通过分压模块可以实现对甚高频信号的分压处理, 将甚高频极间交流电压脉冲信号分压至合适范围, 得到降压正弦波, 防止后方检测电路元件过载。整流换向模块则完成将双极性脉冲整流为单向电压脉冲, 便于后方的滤波处理。射频滤波模块则由多个 LC 滤波电路组合而成, 用于将单向甚高频脉冲信号转换为平滑的直流信号, 便于信号的数据采集处理, 降低信号采集难度。在加工过程中, 电极与工件之间的电压幅度会随放电通道的形成和消失而变化, 这时信号检测端电压 U 会具有不同的振幅, 通过检测 U 的振幅变化可以检测到放电状态的变化。

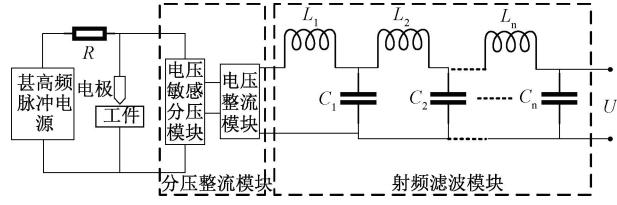


图 3 放电状态检测电路示意图

Fig. 3 Schematic circuit of the discharge state detection method

2 检测系统仿真分析

2.1 初步仿真验证

为初步验证极间分压检测方法的有效性, 先初步建立电路仿真模型, 分别对几个关键模块的输出波形进行监测, 仿真结果如图 4 所示。可知, 该极间分压检测电路可实现对双极性脉冲信号的分压整流滤波处理, 极间双极性电压信号通过分压整流模块后转换为单极性甚高频信号, 再经过滤波模块后, 高频信号转化为直流信号输出, 便于后续 AD 检测模块的采集处理。

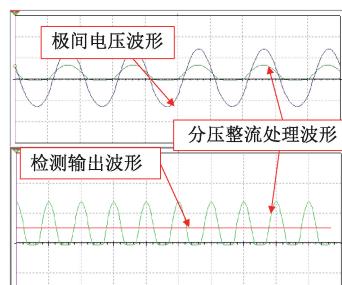


图 4 极间分压检测各级模块输出波形仿真

Fig. 4 Simulation of output waveform of modules at all levels of inter-electrode partial pressure detection

完成对极间分压检测的初步验证后, 建立电路仿真模型测试该检测方法的适用性, 仿真结果如图 5 所示。可以得出对于 65 MHz 的 VHF 脉冲发生器的典型放电波形, 该检测电路可以实现对双极性脉冲信号的整形滤波处理, 实现脉冲信号从双极性正弦信号到单极性直流稳压信号的处理, 且针对不同正弦电压幅值会有不同的直流信号幅值, 这样就可以针对不同放电状态给出不同的电压值。当极间放电状态为开路时, 极间脉冲电压峰峰值为 70 V, 经过检测模块的处理后输出电压 U 约为 8.6 V。当发生放电时, 极间脉冲电压峰峰值为 40 V, 处理后电压 U 保持在 4.8 V 附近振荡。发生短路时, 极间脉冲电压峰峰值为 25 V, 处理后 U 降至约 2.3 V 的最低电压。可以得出这种电压幅度的差异使得能够有效地判断放电状态, 说明提出的分压检测法在理论上是可以实现对极间放电状态的判断的。

2.2 针对多频率脉冲的检测效果

根据上文对搭建的极间分压仿真检测模型的初步验证测试结果可知, 该模块可以实现对 65 MHz 的双极性甚高频脉冲的分压整流滤波处理, 实现将甚高频双极性信号转化为 DC 直流信号的能力。改变脉冲幅值进行适用性实验, 验证测试该模块在多频率多脉冲幅值下的检测可行性。

分别在 50~75 MHz 频率范围内每间隔 5 MHz 选取多个脉冲频率进行仿真测试, 电源输出电压有效值保持 50 V_{rms} 不变, 对不同脉冲频率、不同放点状态下的极间电压及处理后电压进行监测采集, 验证该仿真模块可以实现对任意频率的双极性脉冲的转换处理, 得出 DC 直流信号用于后续检测。表 1 为脉冲频率在 50~75 MHz 范围内极间脉冲峰峰值大小, 表 2 为脉冲频率在 50~75 MHz 范围内极间分压整理模块 DC 信号输出值大小。

表 1 不同脉冲频率下极间脉冲峰峰值大小

Table 1 Peak-to-peak values of interelectrode pulses at different pulse frequencies (V)

极间状态	f/MHz					
	50	55	60	65	70	75
开路	90.90	86.78	82.58	78.66	75.10	71.52
加工	48.92	44.94	41.70	38.81	36.31	33.88
短路	12.25	12.32	12.19	12.60	12.58	12.55

表 2 不同脉冲频率下 DC 检测信号输出值大小

Table 2 Output value of DC detection signal at different pulse frequencies (V)

极间状态	f/MHz					
	50	55	60	65	70	75
开路	10.55	10.13	9.71	8.63	8.27	8.13
加工	6.22	5.75	5.15	4.81	4.49	3.61
短路	1.44	1.45	1.45	1.45	1.47	1.47

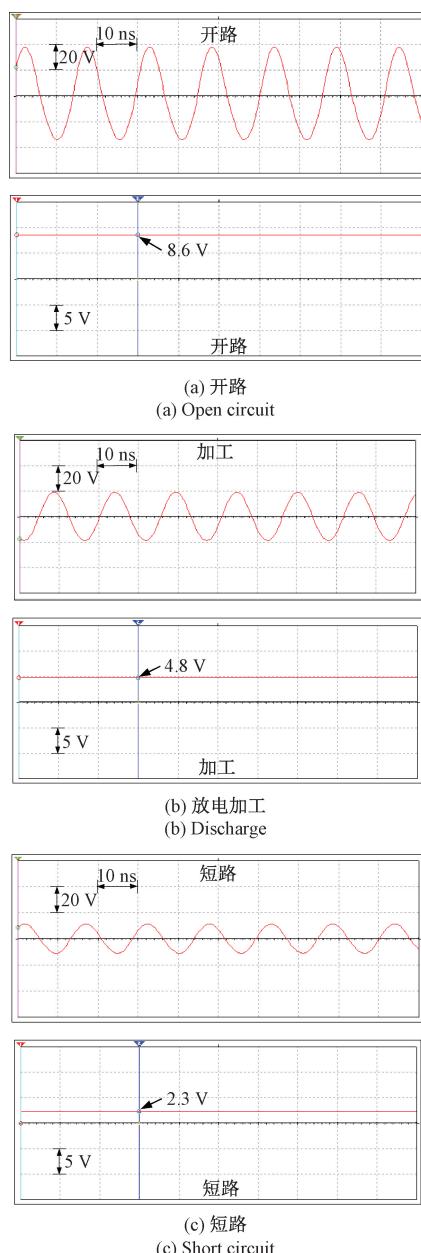


图 5 甚高频脉冲电源的放电波形及检测电路输出波形仿真

Fig. 5 Simulation voltage waveforms and simulation detection voltage waveforms under different discharge states

根据表 1、2 可得出电源输出稳定情况下极间脉冲峰峰值随脉冲频率变化趋势如图 6 所示,DC 信号输出值随脉冲频率变化趋势如图 7 所示。

根据图 6、7 可知,虽然电源输出稳定,但是随着脉冲频率的变化,极间电压及 DC 输出信号都产生变化,且 DC 输出信号的变化趋势与极间电压保持一致,可以准确的表示极间电压变化趋势。且当极间放电状态发生变化时,极间电压与 DC 输出信号也发生响应变化,始终保持开路电压>加工电压>短路电压。所以说明极间分压检

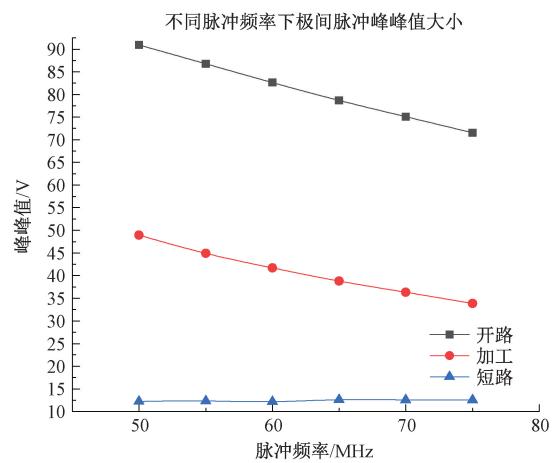


图 6 电源输出稳定情况下极间脉冲峰峰值随脉冲频率变化趋势

Fig. 6 Variation trend of peak-to-peak values of interpole pulses with pulse frequency under stable power output

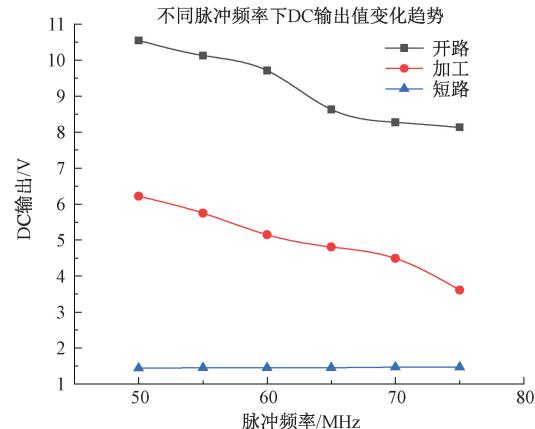


图 7 电源输出稳定情况下 DC 输出值随脉冲频率变化趋势

Fig. 7 Variation trend of DC output value with pulse frequency under stable power output

测模块也可以有效的实现对极间电压幅值的检测,并且可以准确的对极间放电状态进行判断。

2.3 针对多幅值脉冲的检测效果

针对 60 与 70 MHz 两个频率脉冲进行变幅值仿真检测,电源输出电压有效值(U_{rms})分别为 40、50、60、70 V,分别对两种不同脉冲频率下不同电源输出幅值下的极间脉冲及 DC 信号输出值进行检测记录详如表 3~6 所示。

表 3 60 MHz 脉冲不同电源输出下极间脉冲峰峰值大小

Table 3 The peak-to-peak value of 60 MHz pulse between poles under different power supply outputs (V)

极间状态	Urms/V			
	40	50	60	70
开路	66.28	82.58	99.49	115.58
短路	10.08	12.19	15.17	17.64

表 4 60 MHz 脉冲不同电源输出下 DC 输出值大小

Table 4 The DC output value of 60 MHz pulse between poles under different power supply outputs (V)

极间状态	Urms/V			
	40	50	60	70
开路	7.74	10.13	11.86	13.88
短路	1.20	1.45	1.96	2.33

表 5 70MHz 脉冲不同电源输出下极间脉冲峰峰值大小

Table 5 The peak-to-peak value of 70 MHz pulse between poles under different power supply outputs (V)

极间状态	Urms/V			
	40	50	60	70
开路	59.96	75.10	90.19	105.01
短路	10.06	12.58	15.09	17.58

表 6 70 MHz 脉冲不同电源输出下 DC 输出值大小

Table 6 The DC output value of 70 MHz pulse between poles under different power supply outputs (V)

极间状态	Urms/V			
	40	50	60	70
开路	6.56	8.27	10.66	12.48
短路	1.07	1.47	1.98	2.28

根据表 3~6 可得出 60 及 70 MHz 下随电源输出电压变化下极间脉冲峰峰值及 DC 信号输出值变化趋势如图 8~11 所示。

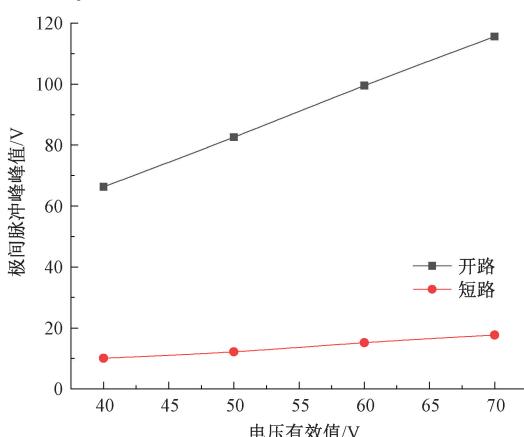


图 8 60 MHz 脉冲极间脉冲峰峰值随电源输出大小变化趋势

Fig. 8 The peak-to-peak values of 60 MHz pulse poles vary with the power supply output

根据图 8~11 可知, 在脉冲频率不发生变化的情况下, 极间电压及 DC 输出信号都会随电源输出的变化而产生变化, 且 DC 输出信号的变化趋势与极间电压保持一致, 可以准确的表示极间电压变化趋势。所以说明极间分压检测模块也可以有效的实现对极间电压幅值的检测。

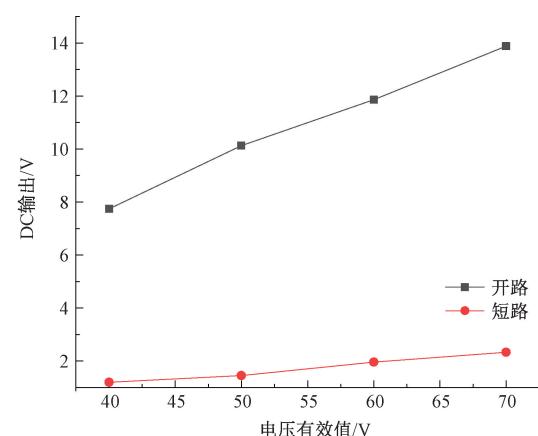


图 9 60 MHz 脉冲 DC 输出值随电源输出大小变化趋势

Fig. 9 The DC output values of 60 MHz pulse poles vary with the power supply output

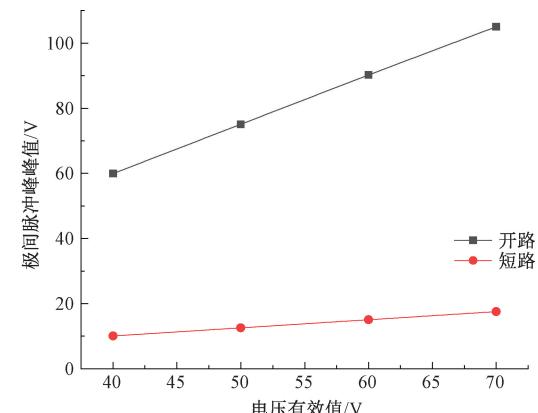


图 10 70 MHz 脉冲极间脉冲峰峰值随电源输出大小变化趋势

Fig. 10 The peak-to-peak values of 70 MHz pulse poles vary with the power supply output

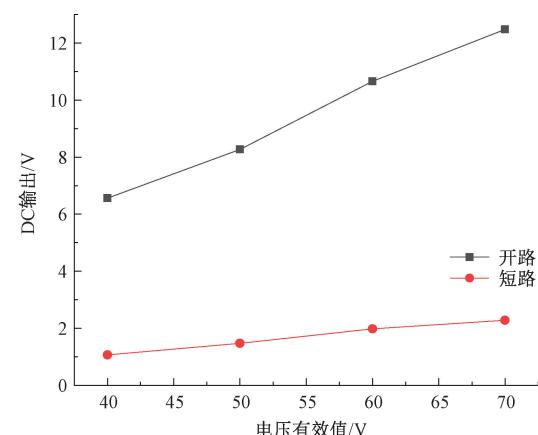


图 11 70 MHz 脉冲 DC 输出值随电源输出大小变化趋势

Fig. 11 The DC output values of 70 MHz pulse poles vary with the power supply output

本节分别针对多脉冲频率及多脉冲幅值进行基于 multisim 的电路仿真实验, 初步验证了极间分压电路的可行性, 可以实现对多频率多幅值脉冲的准确转换。在相同脉冲幅值下, 直流输出值随脉冲频率变化而出现变化趋势, 在脉冲频率稳定的情况下, 直流输出信号随脉冲幅值的增大而增大, 且当极间状态发生变化时, 极间电压与 DC 输出信号也发生响应变化, 且始终保持开路电压>加工电压>短路电压。通过电路仿真初步验证了极间分压检测模块的可行性。

3 检测模块实验验证

利用三轴运动平台进行甚高频微细电火花放电状态检测实验, 试验系统示意图以及试验系统平台分别如图 12 和 13 所示。将工具电极加持在 Z 轴上, 工件通过夹具工装固定于 X-Y 运动平台上, 保持油基电加工介质持续冲液状态。工具电极、工件及加工介质的如表所示。通过控制 Z 轴运动并加以显微成像设备的观察辅助来实现对工具电极与工件之间的接触与脱离控制进而改变放电状态。通过调节甚高频脉冲电源产生不同频率不同功率幅值的电脉冲输出。实验中甚高频脉冲电源的设定参数分别为: 频率 50~75 MHz, 信号源输出幅值 50~150 mV。检测系统中的射频传输线均采用 50Ω 阻抗, 保证放电功率在传输过程中不发生损耗。将检测模块直接接入极间, 分别对极间脉冲、经过分压整流模块处理后的脉冲信号及最终的射频滤波信号进行采集分析。

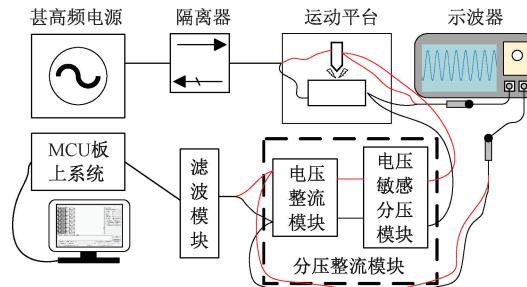


图 12 极间分压检测方法系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of inter-electrode partial pressure detection method system

完成系统搭建后, 首先对硬件系统进行可行性测试, 利用示波器分别对极间脉冲信号、分压整流信号及最终输出的 DC 信号进行采集, 初步验证该硬件系统可行性。

针对不同极间状态下的极间脉冲波形、分压整流波形及 DC 输出波形进行监测, 得出如图 14 与 15 所示不同极间状态下的电压波形。发现极间信号及分压整流信号会随开短路状态的变化发生变化, 且开路状态的电压峰峰值始终大于短路状态下的峰峰值。当极间电压波形发

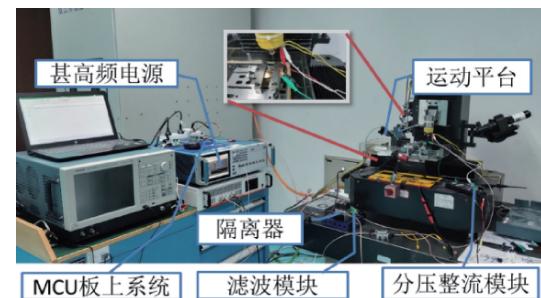


图 13 极间分压检测系统平台搭建

Fig. 13 The platform of inter-electrode partial pressure detection system was built

生变化时, 检测 DC 输出波形也发生相应的变化, 变化规律为极间电压波形峰峰值越大, 检测输出波形电压值越高, 且 DC 输出波形变化延迟小, 满足放点状态检测要求。

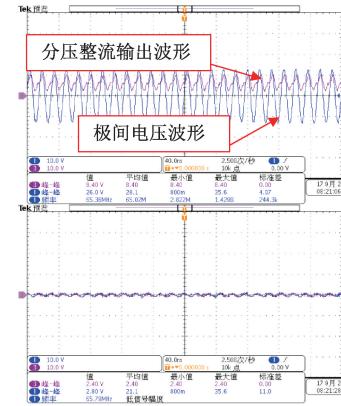


图 14 开短路状态下极间信号及分压整流信号变化

Fig. 14 Changes of inter-pole signal and partial voltage rectifier signal in open short circuit state

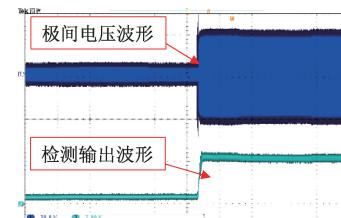


图 15 开短路状态下极间信号及 DC 信号变化

Fig. 15 Change of inter-pole signal and DC signal in open short circuit state

上文说明极间分压检测模块可对不同放点状态进行准确的判断区分。分别对信号源输出为 mV 下的脉冲频率 55 与 65 MHz 的甚高频脉冲进行 DC 输出值监测, 串口监测值如图 16 所示。该界面可以直观的显示开短路状态下 MCU 板上系统的采集值, 便于监测判断。

根据上图可知, 当脉冲频率为 55 MHz 时, 开路状态

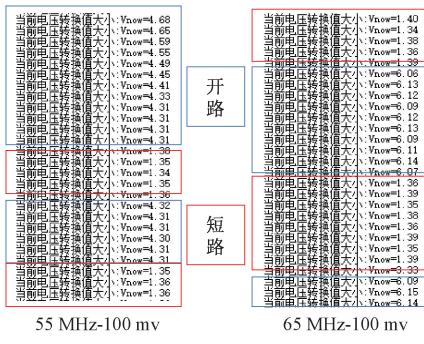


图 16 开短路状态下 MCU 板上系统采集值

Fig. 16 System acquisition value on MCU board in open and short circuit state

下电压采集值为 4.3 左右, 在短路状态下电压采集值为 1.3 左右。当脉冲频率为 65 MHz 时, 开路状态下电压采集值为 6.1 左右, 在短路状态下电压采集值为 1.3 左右。虽然脉冲频率不同, 但是开短路电压采集值均有较大变化, 可以有效的用于对极间放点状态的判断。后对多频率开短路检测值进行采集记录, 得到开短路状态下电压采集值比值随脉冲频率变化趋势如图 17 所示, 可发现不同脉冲频率下开短路电压采集值比例随有所不同, 但是比值大小均大于 150%, 可以有效的区分极间开短路状态。

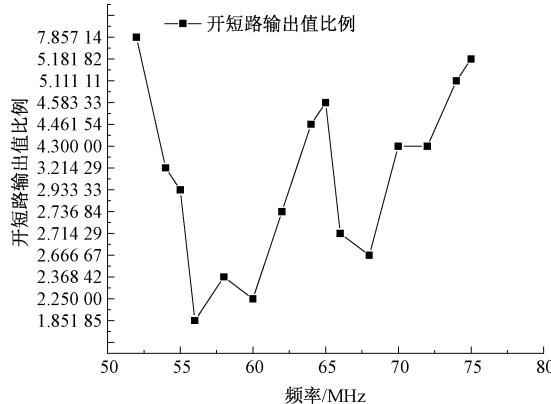


图 17 开短路状态下电压采集值比值随脉冲频率变化趋势

Fig. 17 Variation trend of voltage acquisition value ratio with pulse frequency in open and short circuit state

4 极间分压状态检测程序设计

完成系统搭建后需建立可靠的甚高频电火花极间分压检测方法, 所以基于上述的极间分压甚高频电火花加工放电状态检测装置提出了甚高频电火花加工放电状态检测方法。将设定周期内的极间电压经过数字滤波处理后作为阈值判断以及极间放电状态判断的初始数据, 在每次系统上电后使能加工前完成短路阈值在线设置, 每

次加工使能之初完成开路阈值在线设置, 根据开路阈值和短路阈值按照放电状态判断方法对开路、正常放电状态、短路状态进行判别, 同时对放电区间进行细分量化处理。

放电状态判断方法具体为:

根据在线设定阈值 a, b 对放电状态区间进行细分, 其中 a 为检测上限阈值 b 为检测下限阈值, 计算当前极间电压所处等效范围 z :

$$z = \frac{V_{p-w} - y}{x} \quad (1)$$

式中: V_{p-w} 字处理后的极间电压; $x = \frac{a - b}{2}$ 为正常放电

区间半数; $y = \frac{a + b}{2}$ 为正常放电区间的中位数。

根据 z 值大小判断出当前放电状态, 并且在正常放电状态内, 是接近于开路还是接近于短路, 以及接近程度的大小。

进一步的, 所述 z 值判断放电状态具体为:

当 $z \geq 1$, 判断放电状态处于完全开路状态; 当 $0 < z < 1$, 判断放电状态处于正常放电状态偏于开路; 当 $-1 < z < 0$, 判断放电状态处于正常放电状态偏于短路; 当 $z \leq -1$, 判断放电状态处于完全短路状态。具体判断流程如图 18 所示。

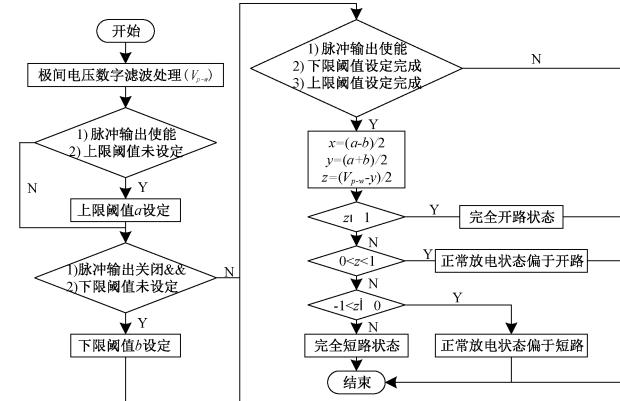


图 18 极间分压放电状态判断方法判断流程

Fig. 18 Method for judging the state of inter-electrode partial voltage discharge process

根据上文的判断方法编写程序, 搭建实验测试模块, 进行放电状态检测控制测试, 得到具体的控制信号随极间放电状态变化波形如图 19 所示。图中 1 号波形为极间放电脉冲信号波形, 为双极性脉冲。2 号波形为控制差分输出脉冲, 最大值为 +10 V, 最小值为 -10 V; 3 号波形为极间脉冲经过极间分压检测模块输出的 DC 检测信号。极间放电脉冲波形具有开路峰峰值大于短路峰峰值的特点, 可以有效准确的区分出当前极间放电状态。当

开路状态下,极间放电脉冲波形峰值大,DC 检测信号输出值大,差分输出为正;加工状态下,极间放电脉冲波形峰峰值变化抖动,所以差分输出值也在变化;当短路状态下,极间放电脉冲波形峰峰值小,DC 检测信号输出值相应变小,差分输出为-10 V,保证加工轴快速回退,尽快改变当前短路状态。

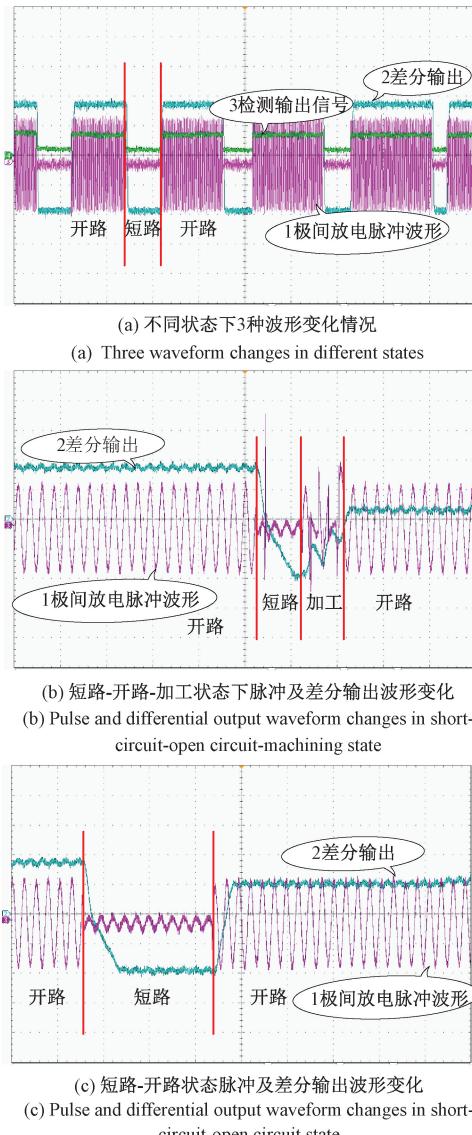


图 19 不同状态下极间分压检测输出波形

Fig. 19 The output waveform of inter-polar partial pressure detection under different states

5 结 论

极间分压检测法通过硬件电路实现对极间双极性脉冲信号的处理,依次通过分压、整流、滤波等电路将传统方法无法处理的高频双极性信号处理为直流信号,实现了放电状态信号的有效提取。

本文主要针对极间分压检测技术进行详细的分析论证,首先通过 multisim 仿真软件搭建电路仿真模型,对检测方法进行初步验证,得到该方法在仿真状态下可以有效的对极间电压大小及极间放电状态进行判别区分。完成仿真验证后搭建实验平台对该检测方法的适用性进行进一步的验证,主要通过示波器对脉冲波形进行检测采集,并利用 MCU 板上系统将采集电压值通过串口输出实现可视化,便于对采集数据的及时准确的判断,最终验证了该检测方法在仿真、实验两个方面的可行性。在完成实现验证后设计针对该检测方案的极间状态检测算法,并完成了极间状态检测控制的实验验证,说明该检测方法可以应用于甚高频电火花放电加工。

参考文献

- [1] HOURMAND M, SARHAN A A D, SAYUTI M. Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: A state-of-the-art review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91 (1-4) : 1023-1056.
- [2] HASAN M, ZHAO J, JIANG Z. A review of modern advancements in micro drilling techniques [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29 (9) : 343-375.
- [3] MEHDY H, AHMED A D S, MOHD S. Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: A state-of-the-art review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91 (1-4) : 1023-1056.
- [4] KLOCKE T, SCHNEIDER S, EHLE L, et al. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM [J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 580-585.
- [5] 刘广民, 张勇斌, 王峰, 等. 一种用于微细电火花加工的甚高频微能脉冲电源 [J]. 电加工与模具, 2020 (1) : 17-20.
- [6] LIU G M, ZHANG Y B, WANG F, et al. A very high frequency micro-energy pulse generator for micro-EDM [J]. Electromachining & Mould, 2020 (1) : 17-20.
- [7] 王峰, 张勇斌, 刘广民, 等. 甚高频共振式脉冲源放电蚀除 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (20) : 2439-2446.
- [8] WANG F, ZHANG Y B, LIU G M, et al. Discharge erosion of VHF micro EDM pulse generator [J]. China Mechanical Engineering. 2019, 30 (20) : 2439-2446.
- [9] JING Q, ZHANG Y, KONG L, et al. Theoretical and experimental investigation into machining characteristics Of VHF micro-EDM [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118 (9-10) : 2915-2931.
- [10] ZHANG M, LIU Z, PAN H, et al. Discharge state identification and servo control method of high-speed

- reciprocating microwire-EDM [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 112 (1-2): 193-202.
- [9] 王彤. 电火花间隙放电状态检测方法综述 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 6: 100-104.
- WANG T. A review on detection methods of EDM gap discharge status [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 6: 100-104.
- [10] 黄虎, 张亚旭, 黄玉美, 等. 电火花铣削过程中放电间隙状态检测及实验研究 [C]. 第 16 届全国特种加工学术会议论文集(上), 2015: 101-106.
- HUANG H, ZHANG Y X, HUANG Y M, et al. Detection and experimental research of discharge gap state in EDM [C]. Proceedings of the 16th National Conference on Special Machining (Part 1), 2015: 101-106.
- [11] 孙贺龙. 电火花小孔加工间隙状态检测及伺服控制系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- SUN H L. Research on gap state detection and servo control system of EDM small hole machining [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] ZHANG Z, MING W, ZHANG G, et al. A new method for on-line monitoring discharge pulse in WEDM-MS process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 1403-1418.
- [13] 兰起洪. SiCp/Al 电火花微小孔加工的放电状态检测及控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LAN Q H. Research on pulse detection and control for micro-hole electrical discharge machining of SiCp/Al [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] 沈娣丽, 刘冬敏, 都金光, 等. 应用深度网络学习的中走丝机床放电状态检测方法 [J]. 机械设计与制造, 2019(8): 146-149.
- SHEN D L, LIU D M, DU J G, et al. Machine tool discharge state detection method based on deep network learning [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(8): 146-149.
- [15] 李红超. 关于人工神经网络的应用研究 [J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(6): 1285-1286.
- LI H CH. Research on application of artificial neural network [J]. Computer Knowledge and Technology, 2014, 10(6): 1285-1286.
- [16] 周宏菊. 电火花加工放电间隙检测探究 [J]. 新技术新工艺, 2016(8): 73-74.
- ZHOU H J. Research on detection of discharge gap in EDM [J]. New Technology and New Process, 2016(8): 73-74.
- [17] 迟关心, 耿雪松, 朱波, 等. 钛合金电火花加工防拉弧脉冲电源的研究 [C]. 第 15 届全国特种加工学术会议, 2013: 96-102.
- CHI G X, GENG X S, ZHU B, et al. Research on pulse power supply for anti-draw-arc in titanium alloy EDM [C]. The 15th National Special Machining Academic Conference, 2013: 96-102.
- [18] MOHD ABBAS N, KUNIEDA M. Increasing discharge energy of micro-EDM with electrostatic induction feeding method through resonance in circuit [J]. Precision Engineering, 2016, 45: 118-125.
- [19] WANG F, ZHANG Y, LIU G M, et al. Improvement of processing quality based on VHF resonant micro-EDM pulse generator [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, DOI: 10.1007/s00170-019-03896-8.
- [20] 黄海清, 刘伟, 曾令燎, 等. 微细电火花加工可控式 RC 脉冲电源研究 [J]. 电加工与模具, 2013(2): 12-15.
- HUANG H Q, LIU W, ZENG L L, et al. Research on controllable RC pulse power supply of micro-EDM [J]. Electromachining & Mould, 2013(2): 12-15.

作者简介



廖路, 2016 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2019 年于中国工程物理研究院获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院博士研究生, 主要研究方向为特种加工与光学检测。

E-mail: liaolu21@gscap.ac.cn

Liao Lu received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2016, M. Sc. degree from China Academy of Engineering Physics in 2019. Now he is a Ph. D. candidate in China Academy of Engineering Physics. His main research interests include special processing and optical inspection.



张勇斌(通信作者), 1999 年于合肥工业大学获得学士学位, 2004 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所正高级工程师, 主要研究方向为微纳放电加工关键技术与装备、特种脉冲电源调控技术等。

E-mail: zcaep6@163.com

Zhang Yongbin (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1999, Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2004, respectively. Now he is a senior engineer in the Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research interests include key technologies and equipment of micro-nano discharge machining, special pulse power control technology, etc.