

三活叶技术資料三

总 号: 262

冷加工: 058

内部資料 注意保存

金屬电火花加工介紹

第一机械工业部新技术先进經驗
宣传推广联合办公室

1965.10

目 录

一、电火花加工机床.....	1
(一)脈冲发生器的线路介紹.....	2
(二)电火花机床的自动調节系統.....	10
(三)机械构造.....	15
二、冲模电火花加工工艺.....	23
(一)工具电极的設計.....	23
(二)电极制造.....	25
(三)电极与凹模的装夹和校正.....	28
(四)工作液过滤系統.....	29
三、电火花加工中常見的疵症及产生原因.....	32

金属电火花加工介绍

一、电火花加工机床

电火花加工发明以来，仅二十多年的历史，但由于它的出现，显示了特定的作用，因此目前工业先进的国家如苏联、捷克、瑞士、日本等国已出现了系列化的电火花加工机床。

电火花加工机床与一般金属切削机床有着根本性质方面的区别，其主要特点是：

1.一般金属切削加工是利用热能或电能转换为机械能来进行切削加工的，而电火花加工是直接利用电能（脉冲能源）进行加工，因此需具备足够的频率和能量的脉冲发生器。

2.电火花加工机床的主轴头必须具有灵敏的自动调节系统，在加工过程中，使工具电极和工件经常地维持一定的间隙值，以得到最高生产率，和所需的光洁度及加工精度。

3.一般金属切削加工时，刀具和工件都要承受切削力，因此要求刀具比工件的硬度更高，而电火花加工依靠电蚀作用，可以采用低强度的工具来加工高硬度的工件（例如，可用铜、铁等材料制成的工具电极来加工硬质合金或合金钢等）。

4.电火花加工一般是在液体介质（如煤油混合油）中进行，其目的是防止电蚀下来的金属粘在工具电极上，使金属微粒及时地从放电间隙中排出。因此需要一套工作液的强迫抽排与过滤系统以及相应的装置。

5.利用电火花加工法，可以加工任何物理、化学性能的导电材料和形状复杂的形腔和零件。

根据加工种类的不同，目前已出现的电火花加工机床大体可分为：

(1)电火花穿孔机床；

(2)电火花强化机床；

(3) 电火花切割机床;

(4) 电火花磨削机床。

一般电火花加工机床由下述部分组成:

1. 电气部分:

(1) 电源——脉冲发生器 (有非独立式的即弛张式脉冲发生器和独立式高频脉冲发生器等);

(2) 自动控制系统 (有直接取信号的和带放大装置的)。

2. 机械部分:

(1) 进给系统 (包括悬浮式的、刚性的和电液压等);

(2) 纵横移动及周轉系統 (有一般的纵横移动及带精密座标装置的);

(3) 强迫抽排与过滤系统;

(4) 其他 (床身、机床、电机夹具等)。

(一) 脉冲发生器的线路介绍

金属电火花加工过程的原理是利用具有一定停歇时间的重复性脉冲放电。根据不同的工艺过程要求, 而选择不同延續时间和能量的脉冲放电。放电的間歇時間可以在很大的范围内变化。

脉冲发生器的线路是各种各样的, 它們之間的区别在于脉冲产生的方法和电参数的不同。

在多数情况下脉冲产生的方法是利用电容器或电感线圈逐渐集聚电能, 而后在两极間迅速放出能量 (弛张式脉冲发生器 RC、RLC、RLCL 等)。在这种发生器中, 脉冲发生器部分与电极之間有着直接的电耦合, 因此电参数直接受到电极間隙物理状态的影响。此外, 还有独立式的脉冲发生器, 它們的主要电参数 (如脉冲频率、能量等、) 基本上不受电极間隙物理状态的影响。

几种脉冲发生器介绍:

1. 弛张式脉冲发生器:

为解决冷冲模的电火花加工, 对脉冲发生器提出了以下几点要求:

(1) 精加工后, 凸模的表面光洁度达到七级以上;

(2) 冲模精度要求在二级以上;

(3) 在不同規准条件下要具有一定的加工生产率，

(4) 装置要簡便、牢固、造价低廉、易于修理，便于推广。

因为 RC 线路的效率太低（一般不超过30~40%）而且加工效率較低。因而目前在国内外电火花机床上愈来愈多的采用RLC型线路，如图1所示。图中E是直流电源，R是限流电阻，L是扼流圈，C是电容器。因为RLC型脈冲发生器比RC路线有以下优点：

①在同样光洁度下，可以获得較高的生产率；如图2所示。②装置的功率可以小一些；③电能的有效利用較高。

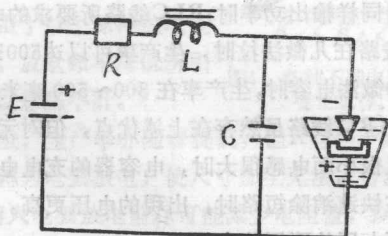


图1 RLC脈冲发生器。

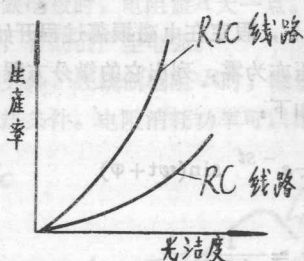


图2 二种不同线路下光洁度与生产率的关系。

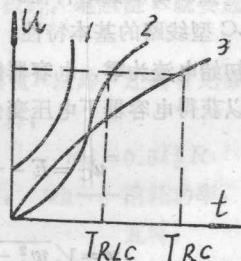


图3

1-重复引燃曲线；2-RLC线路；
3-RC线路。

RLC线路在初始充电阶段，电压增长速度比RC线路慢，这就提供了当放电終結时，在放电間隙中去游离的良好条件。而后一阶段，RLC电压增长速度要比RC电路快，这样可以使間隙的击穿来得迅速。因此在同样的单个脈冲能量条件下，RLC线路就具有提高放电频率的能量（见图3），亦即在保持一定光洁度的情况下提高了加工生产率。

根据数学推算，RC 型线路的充电电压为电源电压的72%时最好。在理想的情况下，即完全不发生短路和电容器充电电压最佳的情况下，RC 型脉冲发生器的效率不超过36%。而RLC线路的效率便高得多。因而在同样输出功率时，直流电源所需的功率就大大减少了，从而减小了设备的装置功率，缩小了设备的体积。由于RLC型线路是振荡的，所以它的电压幅值就可以超过直流电源的电压值。在实际生产中所用的二种发生器RLC的穿击电压值比RC型线路穿击电压高，因此单个脉冲能量在同样电容值时RLC线路可以超过RC线路的几倍。同时由于放电频率高，所以在获得同样输出功率时，RLC线路所要求的电容比RC线路小得多。如RLC型线路在几微法拉时，生产率可以达500毫米³/分，而RC线路利用300~500微法电容时，生产率在300~500毫米³/分。

RLC型线路比RC线路虽然存在上述优点，但对元件的质量要求提高了，当限流电阻很小而电感很大时，电容器的充电电压可为电源电压的两倍左右，而在快速消除短路时，出现的电压更高。因此要求电容器具有5~6倍电源电压的耐压能力。

RLC型线路装置的特性。

RLC型线路的基本特性：根据图1，假定在电磁振荡过程开始前，回路中初始电流为零，电容器剩余电压亦为零，列出它的微分方程并解之，可以获得电容器下电压变化规律如下：

$$u_C = E - \frac{E}{w\sqrt{LC}} e^{-st} \sin(\omega t + \varphi)$$

設： $w = \sqrt{w_0^2 - \delta^2} \quad w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad Cl = tg^{-1} \frac{w}{\delta}$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{4L}{R^2C}} > 1 \quad (\text{线路是振荡的})$$

式中：E——直流电源电压值；

L——电感器的电感量；

R ——限流电阻的电阻值；

C ——电容器的电容量。

改变限流电阻，固定电流，电感而仅改变电阻时可得如图 4 所示 u_c 振荡曲线。因此可以得出以下结论。随 R 值的增大，电压振荡幅值下降，使得击穿电压平均值相应降低，因而引起单个脉冲放电能量下降。而输出功率的减小，主要是由于单个脉冲放电能量下降所引起的。放电频率降低所引起的功率减小可以忽略不计。

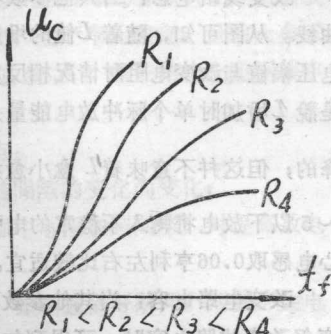


图4 各种不同电阻值时电容器上电压变化规律。

如果减小电阻，生产率亦随着提高，但 R 有一个最小值，在这个值以下火花放电将转为电弧放电，使尺寸加工无法进行。电阻值选用的原则是，在放电未转入电弧放电前尽可能减少电阻值，以获得最高生产率。根据有关资料的介绍，当工具电极用黄铜时，可选电阻值 R 小一点，而采用铸铁电极时，电阻值 R 大一点。用钢电极时，电阻值 R 就要选得更大一些，否则会产生电弧。

另外，在绕制电阻 R 时，除满足电阻值 R 以外，还需有足够的功率和散热条件。电阻消耗功率可以用下式计算：

$$w_R = 0.5 I_k^2 R$$

式中， w_R ——消耗功率，单位为瓦特；

I_k ——短路电流，单位为安培；

R ——限流电阻，单位为欧姆。

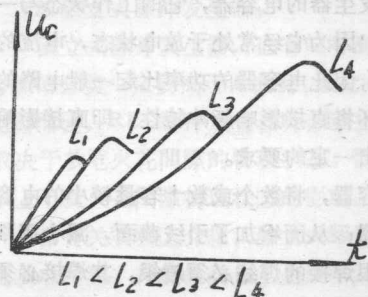


图5 各种不同电感值时电容器上电压变化规律。

散热面积可由每瓦特之平方公分来计算，若散热条件较差，则需另加强迫通风装置，以免因发热而影响其他电气元件。

改变线路电感：当其他参数不变而仅改变电感时，可以获得如图 5 曲线。从图可知，随着 L 值的增加其他电压增长速度有明显的降低，但电压幅值与改变电阻时情况相反，随着 L 值的增加，其值也增加；也就是说 L 增加时单个脉冲放电能量是增加的，而放电频率和输出功率是下降的；但这并不意味着 L 愈小愈好，因 L 小到一定程度 $\delta = \sqrt{\frac{4L}{R^2C}} < 4 \sim 5$ 以下放电将转入不稳定的电弧放电，根据有关资料介绍及实验，铁心电感取 0.06 亨利左右比较适宜。

改变电路电容：当其他参数不变仅改变线路电容时，可得到如图 6 的曲线，当电容值在实用范围附近变化时，可以看出，由于电容值的增大，其 u_c 最大幅值减少不多，可以忽略，而脉冲放电频率降低，单个脉冲放电能量增加，输出功率增加很少，因而在仅变化电容值时对输出功率的影响，但单个脉冲放电能量近似于线性（正比）关系变化。

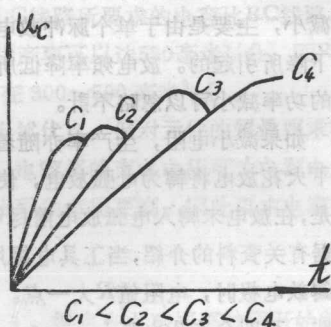


图 6 在不同电容值时，电容器电压变化规律。

另外，作为电火花加工用脉冲发生器的电容器，它的工作状态与一般电气线路中的电容器是不相同的，因为它经常处于放电状态，电流的冲动性强，并且有较高的充放电频率，因此电容器的功率比起一般电路的工作状态要大得多。它的质量的好坏将直接影响脉冲特性，即直接影响到加工工艺的指标，因而需对它提出一定的要求。

一般采用耐压 1000 伏的云母电容器，将数个或数十容量较小的电容器并联，以代替同容量的单个电容器；从而增加了引线截面，减小迴路电阻，增大了允许通过的电流。对银焊接的焊线必须镀银，其焊接必须牢固，否则将使电容值的大小有所变化，就会影响加工的正常进行。

用油浸纸电容器其功率太小，使用不久就会烧坏。同时，和同容量的云母电容器相比，其生产也比较差，不宜采用。

用苏州社会福利工厂的云母电容器,其电压1500伏,体积小,引出线粗,安装方便且和同容量的上述二种相比,生产率比较高。目前大多采用这种云母电容器。此电容器虽然有上述优点,但在结构上还不够牢固,这有待生产厂今后进一步改进。

上述弛张式脉冲发生器存在下列缺点:

- (1) 脉冲频率、能量和输出功率,随间隙的变化而变化;
- (2) 间隙与电源直接相连,充电过程中电压加到间隙,对提高放电频率不利;
- (3) 在短路的状况下,短路电流大,如不能很好断开,则易产生电弧;
- (4) 工艺指标也随间隙而变化。

为克服以上缺点,则采用独立式脉冲发生器。

目前在國內独立式脉冲发生器有:离子管式(闸流管)和电子管式的两种。

他們的优点:①脉冲能量、频率和输出功率及工艺指标基本上不受间隙物理状态的影响。

②脉冲过后使间隙很快恢复绝缘,不易起电弧,原因是脉冲过后间隙没有电压作用。

因受闸流管的消电离时间限制,目前可达30000赫。

2. 独立式脉冲发生器:

独立式脉冲发生器,也有的叫高频脉冲电源。所谓高频者按无线电方面的分类一定要高于6兆赫。独立式脉冲发生器,是相对前一种RLC发生器而言,RLC脉冲发生器叫非独立式脉冲发生器。其主要的电参数都取决于放电火花间隙的物理状态。而独立式脉冲发生器的主要电参数基本上不受火花间隙物理状态的影响。

据有关资料上介绍,独立式脉冲发生器可以提高加工精度,减小火花放电间隙,并能提高加工生产率。特别是在加工硬质合金模具方面,又有它显著的优点,可以避免被加工工件表面出现裂纹。

独立式脉冲发生器的工作原理:

图7是独立式脉冲发生器的工作原理示意图。在图中采用电容器C

作为儲能量,高压直流电源经过充电扼流圈 L 給电容器 C 充电,当电容器的电压上升到額定值时,放电迴路中的脉冲閘流管 TT 导通,于是电容器 C 通过脉冲变压器 TP_u 的初級繞組放电,能量通过脉冲变压器的次級繞組快速的輸向負載——火花間隙 u 。脉冲閘流管 TT 的导通是由可控脉冲发生器——触发器来控制的。由图7可以看出,脉冲发生器的主要参数如频率和单个脉冲能量等基本上不受火花間隙物理状态的影响。这就是独立式脉冲发生器与一般弛张式脉冲发生器的主要区别。

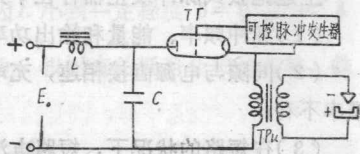


图7 独立式脉冲发生器工作原理图。

独立式脉冲发生器电火花机床的电路(见图8)主要由三部分組成:直流电源,自动控制和脉冲发生器。触发器是由間歇振荡器,脉冲放大器和阴极輸出器所組成。間歇振荡器的阴极电路中連接有变压器 TP_5 的初級繞組,利用这个繞組实现与栅极电路的反饋,在栅极电路中還連接有 R_2 、 R_3 和电容器 C_3 ,改变电阻 R_2 可以平稳地調节脉冲频率。間歇振荡器可以得到频率从5~35千赫的脉冲。

由間歇振荡器三极管 J_1 所激发的电压脉冲加在放大管 J_2 的栅极上,将电压适当放大以后加在第三級——阴极跟随器 J_3 的輸出极上。引燃脉冲从阴极跟随器经过电容器 C_5 加在閘流管 J_4 (ZQM1——130/10)的栅极上,为了使加在栅极上的电压畸变不大,則电容器的电容量应选得足够大,一般均由实验选定,大致在 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ 微法的范围内。閘流管的栅极经过数值3~5千欧的栅漏电阻 R_9 与阴极相連,栅漏电阻 R_9 和隔直流电容器 C_6 应该这样选择:使栅极电路的时间常数不超过脉冲重复周期的三分之一,即 $R_9 C_6 \leq \frac{1}{3f}$ 。

发生器由电源变压器 TP_1 和閘流管 TP_1 ——6/15(J_5 和 J_3)及双二极管5u3C(J_7)組成的两个整流供电。双二极管整流器供电給激励級,而充气整流器供电給閘流管ZQM1——130/10(J_4)的阴极电路。

为了保持最佳間隙的自动調整,在图8的右下方繪出了自动調整系統,系統中采用了功率为50瓦的CЛ-361型并激电动机作为执行机构。

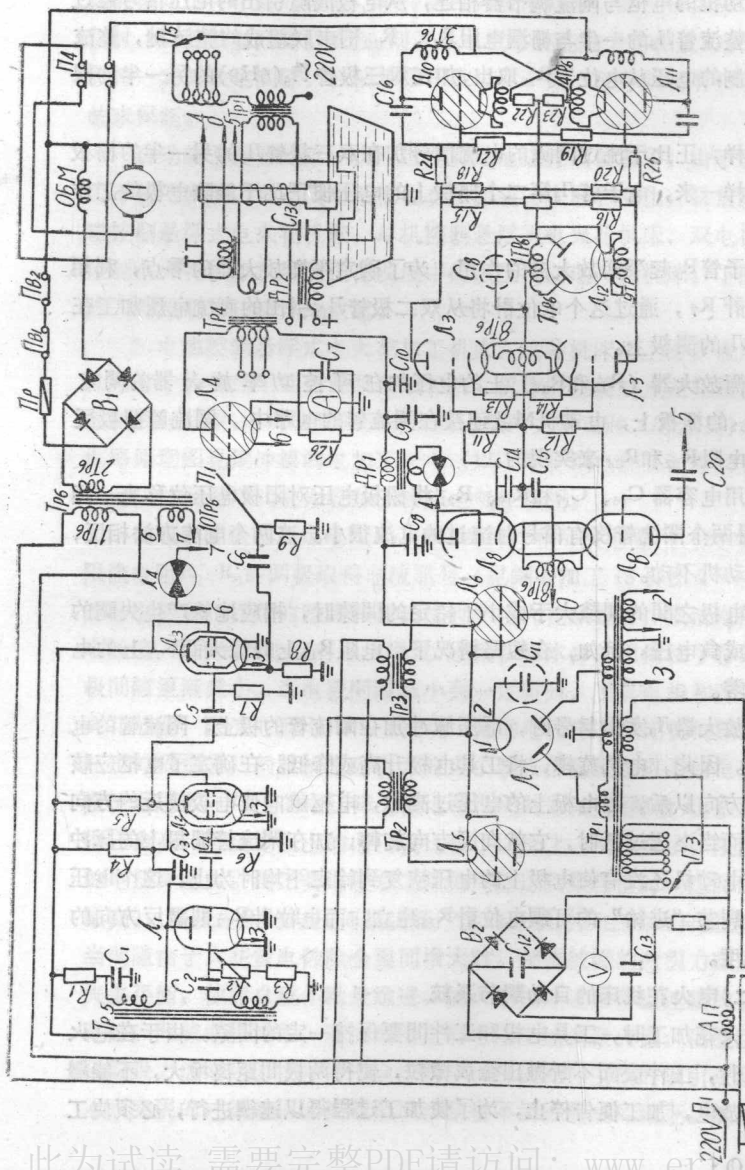


图 8 独立式脉冲发生器加工装置原理图。

这个电动机的电枢与閘流調節器相連，从电极間隙引出的电压信号经过一个由整流管 J_8 的一半与栅漏电阻 R_{13} 、 R_{12} 相串联組成的整流鏈，整流后已整制的电压从电位器 R_{12} 取出，加在双三极管 J_9 (6H9)的另一半的栅极上。

同样，正比于流过間隙的电流信号加在双三极管 J_9 的另一半的栅极上，这样一来，电子管 J_9 第二个栅极上的电压便正比于蚀除电极的工作电流。

电子管 R_9 起平衡放大器的作用，为了确定平衡放大器的零点，利用了电位計 R_7 ，通过这个电位計将从双二极管 J_{12} 引出的直流电压加工在电子管 J_9 的阴极上。

平衡放大器(R_{15} 和 R_{16})上的电压加在可控功率放大器的閘流管 J_{10} 、 J_{11} 的栅极上，电动机 M 就連接在閘流管的电路中，閘流管栅极反饋是由电阻 R_{22} 和 R_{23} 来实现的。

利用电容器 C_{16} 、 C_{17} 和 R_{19} 、 R_{21} 将栅极电压对阳极电压位移来一相位，使得两个閘流管沒有信号时流过的电流很小。这两个电流方法相反，因此电动机不动。

当电极之間隙大于或小于給定的間隙时，相应地就产生失調的正电压或負电压。例如，在短路情况下，电阻 R_{11} 上的最大面 R_{12} 上的电压等于零。

当放大器 J_9 发出信号时，电压脉冲加在閘流管的极上，閘流管的电流增加。因此，电机旋轉，将工具电极升高或降低。在确定了电枢应该旋轉的方向以后，当电极上的电压过高时，电枢就向使电极接近的方向旋轉；而当电压过低时，它就向反方向旋轉，加在閘流管栅极上的脉冲延續到电动机还没有使电极上的电压恢复到給定平均时为止。这个电压由作为調节“进給”的可調电位計 R_{11} 建立，而电位計 R_{12} 則調反方向的运动速度。

(二)电火花机床的自动調节系統

电火花加工时，工具电极和工件間要保持一定的間隙。由于在电火花加工时，工件表面不断抛出金属微粒，使得两极間距离增大，不能繼續保持放电，加工便告停止，为了使加工过程得以連續进行，必須使工

具电极向工件不断的进给，维持需要的放电间隙；而且一旦加工发生变化时，引起放电间隙的变化，则工具电极亦应能随之作相应的变化，从而保持一定的放电间隙，以便加工正常进行。这一任务就得有自动调节系统来保证。

自动调节装置的第一次问世要算是电磁控制装置了，由于电火花加工不断的发展，自动调节系统也有了相应的发展和变化，目前国内有电磁控制悬浮式电火花机床、单机控制悬浮式电火花机床、双电机继电器控制电火花机床及目前正在发展中的液压控制电火花机床。下面分别就这几种控制作一简单的叙述。

1. 电磁控制悬浮式电火花加工机床：这种机床是上海仪表厂为了解决精密冲模的加工而研究试制成功的。机床的主要特点是利用伺服线圈控制放电间隙，电机负责使装有工具电极的主轴定时（等距离）送进。其电路原理图见钢冲模的电加工一书（以下简称钢电加工）中15页图2—5 电磁控制悬浮式电火花加工机床电气原理图。

伺服线圈通过固定电阻 R_1 （200欧姆）和可变电阻 R_0 （250欧姆）从限流电阻 R_1-R_0 的两极取得电流讯号（见钢电加工 15 页图 2—5），当工具电极和工件间的距离较远而没有产生火花放电时，限流电阻上没有电压降，伺服线圈中没有电流通过，主轴依靠本身的重量往下移动，使电极间隙逐渐减小。当电极间隙减小到一定值时，工具电极和工件间开始火花放电，限流电阻 R_1-R_0 上出现一定的电压降，从而使伺服线圈产生一定的吸引力，伺服线圈吸引力的大小取决于限流电阻上的电压降，而限流电阻 R_1-R_0 上的电压降又受电极间隙的影响，间隙愈大，放电间隙的电压愈高，限流电阻上的电压就比较小。反之，间隙愈小，限流电阻上的电压降愈大。当工具电极和工件的间隙达到最佳值时（这时的生产率最高），限流电阻的电压伺服线圈产生的吸引力和主轴的自重达到平衡。当间隙由于火花放电蚀除金属而增大时，伺服线圈的吸引力减弱，主轴失去平衡，依靠自重作微量送进，使火花放电过程得以连续的进行。短路时，间隙电压为零，限流电阻上的电压降达到最大值，伺服线圈以最强的吸力迅速吸引主轴而消除短路。伺服线圈对主轴的吸引是通过衔铁4而实现的，衔铁用低碳钢制成安装在不锈钢制成的轴上。然后再和主

軸聯結，使主軸免于磁化。

主軸頭的進給主要依靠24瓦他激式微型電機。在主軸頭的主軸軸套上，安裝了一個最靈敏的微分開關5，正常加工時，主軸上的撞釘壓入微分開關的按鈕，使控制電機的靈敏繼電器保持在開啟狀態，電機的電樞沒有電流通過，電機靜止不動。隨着工件的不斷蝕除和工具電極的耗損，主軸在伺服線圈控制下，依靠自重作微量進給，當主軸進給到0.3~0.5毫米時，撞釘離開微分開關的按鈕，靈敏繼電器動作，而使電機的電路接通。電機通過變速箱和絲杠使主軸頭下降，在主軸頭下降過程中，由於放電間隙的減小而使限流電阻 R_1-R_2 上的電壓降增大，伺服線圈的吸引力跟着加強，把主軸吸引向上。當主軸上的撞釘重新壓入微分開關的按鈕時，電機的電路被切斷，主軸頭停止下降，依靠控制線圈控制下主軸的微量進給，使火花放電過程穩定的進行。

在這種自動調節系統中，最關鍵的條件是伺服線圈和微分開關。伺服線圈只允許在磁化曲線的直線部分工作，剩磁要求小，微分開關的按鈕動作距離要求尽可能的小（靈敏度高），當動作距離過大時，主軸在伺服線圈控制下依靠自重而下降的距離也隨之增大，使銜鐵和伺服線圈銜鐵芯間氣隙的變動範圍增加，因而影響伺服線圈對主軸的吸引力，使加工過程不能穩定的進行，負責進給和回升的電機，採用一般的微型電機即可，但是要求微分開關閉時，電機立即停止旋轉，採用電機慣性小的為佳。

被伺服線圈吸引的主軸部分（包括主軸、工具電極及夾具等）具有相當的重量，倘若完全依靠伺服線圈2的吸力來維持平衡，會使伺服線圈過於龐大而不靈敏。因此採用了主軸重量的平衡裝置，平衡裝置由安裝在主軸頭頂端側面的平衡塊7和電磁吸鐵6組成，主軸活動部分的重量主要由平衡塊來加以平衡。當更換不同大小工具電極而使主軸部分的重量改變時，調節平衡塊8在螺桿的位置即可。電磁吸鐵具有兩個線圈，線圈 BN_{2-1} （用32號漆包線繞制而成，共1000圈），供給固定電壓24伏，使其產生一恆定磁力，防止螺桿在主軸頭進給調節過程中出現的跳動現象。線圈 BN_{2-2} （用32號漆包線繞制而成，共3000匝）和伺服線圈1並接，其迴路串聯電阻 R_3 （25歐姆），以便增加主軸動作的靈敏度，在調節平

衡时，必須使主軸活动部分的重量略大于平衡块和电磁吸铁的作用力，依靠平衡后的剩余自重保持加工过程的微量送进，使火花放电过程得以正常而連續的进行。

2. 单电机控制悬浮式电火花加工机床：单电机控制悬浮式机床是一种簡易电火花加工机床，它的控制原理和机床結構都十分簡單。其线路原理图見图9。

当工具电极和工件开路时，限流电阻 R 上没有电压降，电机 M 静止不动。这时使主軸的重量略大于对重的拉力，主軸依靠剩余自重往下滑动，当工具电机和工件間的距离减小到一定值而开始火花放电时，限流电阻上出現一定的电压降，串激电机 M 也出現了一定的力矩，其作用方向使主軸往上提升。調节电阻 R ，可以得到所要求的間隙电压（即工作电压）。若电机 M 的力矩小于主軸的剩余重力矩，主軸往下送进。当間隙电压过低时，限流电阻上的电压降增加，电机 M 的力矩超过主軸的剩余主力矩，主軸被略为往上提升，間隙电压又回复到所要求的大小。当工具电极和工件間短路时，阻流电阻上出現最大的电压降，电机 M 的力矩大大超过主軸的剩余重力矩，迅速牵引主軸而使短路得以消除。因此，在整个加工过程中，主軸在串激电机 M 的作用下，在微小的距离內，以很高的速度上下振蕩，以便随时保持調整好的間隙电压，使加工过程得以稳定进行。

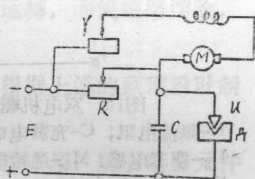


图9 单电机控制悬浮式机床的线路原理图：

E —直流电流； R —限流电阻； r —可調电阻； M —电动机； C —电容器； u —工具电极； A —工件。

3. 双电机繼电器控制电火花机床：双电机繼电器控制电火花加工机床的特点是用两个微型电机，分別控制主軸的进給和回升，而进給和回升电机的动作及轉速又由灵敏繼电器来加以調节，图10是该机的控制电气原理图。

机床的工作原理：当工具电极与工件之間距离过大，而不发生火花放电时，限流电阻 R 上没有电流过（見图10）繼电器 P 线圈两端沒有电压降，触头 K 与 K_1 处于常閉状态，此时送給电机 M 接通而运轉，使工具

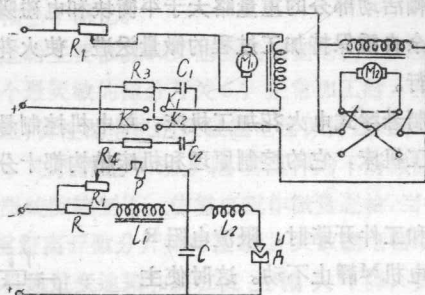


图10 双电机继电器控制电火花加工机床电气原理图:

R—限流电阻; C—充放电电容器; M_2 —回升电机; P—继电器; L_1 —铁芯电感;
 L_2 —空芯电感; M_1 —进给电机; R_1 , R_2 —可调电阻; C_1 , C_2 —减弧电容;
 R_3 , R_4 —减弧电阻。

电极向工件进给,当间隙小到一定程度时,火花间隙开始击穿,由于电流小,限流电阻上的电压降还不足以引起继电器P动作,此时主轴继续进给,间隙随着减小,而放电次数增加,当间隙达到最佳值时,放电利用率最好,而输入火花间隙的能量亦最大,此时电流一直上升,当间隙继续减小时,由于蚀除物排除困难,电极间容易形成暂时短路,随着电极间隙不断减小,这种暂时短路的次数不断增加,电流亦继续上升,但是放电的利用率和输出火花间隙的能量都减少,一直到电极间完全短路,电流达到最大值,而放电利用率为零,即停止放电。根据以上原理,自动调节器应该使间隙经常保持在最佳值附近,这样可以获得较高的生产率。根据试验结果,限流电阻上的电压降为电源电压的30~50%时,放电利用率最高。为此可以调整继电器弹簧拉力,触头距离以及串联在继电器绕组中的电位器 R_1 ,使限流电阻上的电压降 $U_R \leq 0.3E$ (E 为电源电压)时,触头 K_1 与 K ,进给接触电机全速进给,当 $0.3E < U_R < 0.5E$ 时,继电器开始动作,但不是脱离而是抖动,触头 K_1 与 K 是在不断接触和断开的过程中,进给电机 M_1 处在断续供电状态。同时 M_1 电机由全速进给而降低下来。 U_R 愈大,继电器的吸力愈大,两触头的拉开距离也愈大,振动次数因而减少,这是完全符合要求的。当 $0.5E < U_R < 0.8E$ 时,蚀除物在电极间形成暂时短路次数增多,放电利用率下降,这时间隙就不应继续减小,相

反應該略为增大一些，以便提高放电利用率，为此触头K 应该处于中間抖动状态（与触头 K_1 和 K_2 皆不接触），使电机 M_1 不再进給而蝕除过程繼續进行，以便扩大間隙。当 $U_R > 0.8E$ 时，工具电极与工件間的間隙大小而接近短路。繼电器的吸力增加到足以使触头K与 K_2 发生暫短的抖动接触，瞬时接通回升电机 M_2 的电路，使工具电极略为回升而恢复到最佳間隙值。当工具电极与工件完全短路时，限流电阻上出現最大的电压降，繼电器的触头K与 K_2 接通，回升电机 M_2 全速运轉，而使短路消除，这样就保证了加工过程正常而連續的进行。

双电机繼电器控制的电火花机床，基本上是根据上述的原理設計的，其电路图見鋼电加工中一书15頁图2~5。

北京有线电厂的双电机电火花加工机床的零件布局，所有电器元件全部安装在一只电器箱內，电器箱的下面支脚上固定了四个滾轮，因此整个电器箱可以很方便的移动到需要使用的地方。电器箱与机床之間通过A型插头座联接在一起，同时电器箱本身又成为几层，层間用15线插头座联接，这样就大大地便于更換元件和便于进行維修。另外在电器元件的安排上是按照原理图进行布局：最下层是电風扇；第二层是直流电源；第三层是电感和电源的控制部分；第四层是电阻和电容器；第五层是自动控制电路。

(三)机械构造

1. 电磁控制进給机床

鋼冲换的电加工一书中的图2-3和本文图9所示的都是悬浮式控制的电火花机床，只是前者是电磁控制的，精度較高，但目前这种机床使用于生产較少，此外，从主軸的結構（見鋼冲换电加工一书图2-4）看来，刚性較差，因此应用范围有一定局限性，例如，不宜采用工作液的强迫循环系統来改善加工条件。后者是单电机控制的，虽然結構简单，但也与前者有相同的弱点。

2. 双电机控制的电火花机床

这种机床在生产中使用較多，效果較好，制造也比較方便，易保证精度。缺点是灵敏度較差，生产率較低。

(1)传动系統