

中文摘要

随着硬脆材料特别是高温陶瓷材料的广泛应用,各种超精密加工方法得到了迅速发展。ELID 磨削是实用性较强的方法之一,该技术将砂轮修整与磨削过程结合在一起,利用金属基砂轮的微量磨削作用进行磨削加工的同时,使用非线性电解作用对砂轮进行修整,从而避免砂轮的钝化和堵塞现象,实现对硬脆材料的精密磨削。对磨削的效果和效率有着重要影响的砂轮表面形状要求在磨削前对砂轮进行精密整形。在金属结合剂金刚石砂轮由于其自身的特点使得传统的整形方式效果不佳的情况下,电火花精密整形成为整形金属基砂轮的重要技术。由于众多因素的影响,普通电火花整形砂轮系统容易出现砂轮圆度误差恶化及整形效率较低等问题。本文建立了基于模糊控制理论的电火花整形计算机闭环控制系统,提高了整形砂轮的效率和整形精度。

本文首先利用 Labview 语言和数据采集卡建立了能够采集实时信号特征的数据采集系统,同时构建了能够实现电压控制的数据输出系统。通过对采集到的整形过程中放电电流、放电电压信号的分析,使用四种不同的分析原理对单个脉冲的放电状态进行了分类和鉴别。通过实验,利用鉴别程序提取能够表征整形过程加工状态的参数:连续放电系数和不正常放电率,建立加工状态表征参数和电极间隙调整量之间的关系,将其作为控制规则。实验中先对放电过程的放电电流进行鉴别以提取加工状态表征参数,而后使用模糊控制理论,利用控制规则进行模糊推理,计算电极间隙调整量,通过计算机输出控制电压驱动执行装置调节电极间隙,从而建立了电火花整形闭环控制系统。实验结果证明,与普通电火花整形系统相比,本文研制的基于模糊控制的电火花整形系统保证了砂轮整形过程中的稳定性,提高了砂轮整形的效率,并且改善了砂轮表面的形状精度。

关键词: ELID 磨削; 铸铁基金刚石砂轮; 电火花整形; 数据采集系统; 数据输出系统; 模糊控制系统

ABSTRACT

With the extensive application of hard and brittle materials, especially the ceramic material, kinds of ultra-precision machining methods get developed rapidly. ELID grinding is one of the methods which have practical application grinding technology. The technique combines the dressing of grinding wheels with the grinding process. In the process of grinding with the minute cutting with grinding wheels, the wheels are also being dressed by the nonlinear electrolysis. Thus, the phenomena of passivation and obstruction are avoided and the precision grinding of hard and brittle materials is achieved. The grinding wheel surface figure which has important influence to the grinding effect and efficiency demands precision truing. Because it is difficult to improve metal-bonded wheels figure using conventional truing methods, so ED truing technique has been developed. It is usual for the common ED truing system to have the problem like bad figure and low efficiency because of many defects. Based on the fuzzy-control theory, one computer-control ED truing system has been set up. The experiments prove that this system can improve the truing efficiency and precision obviously.

First, one data-acquisition system has been set up to get the process parameters and signals based on Labview software and DAQ card. One data-output system is built to carry out voltage-control. Then the discharge voltage and current in the ED truing process has been analyzed and the discharge status has been classified and distinguished using four different methods. In the experiment, two parameters which could stand for the discharge status, continue discharge coefficient and deviant discharge rate, has been found using the distinguishing program. The relationship between the token parameters and adjustive quantity between the electrode gap has been set up. It is used as control rules. One fuzzy-control ED truing system is built based on fuzzy consequence using control rules to control the electrode gap with computer output voltage. The experiment shows that, compared to the common system, the fuzzy-control ED truing system guarantees the stability of the process and improves the truing efficiency and precision.

KEY WORDS: ELID Grinding; cast iron bonded diamond grinding wheel; ED Truing; Data-acquisition System; Data-output System; Fuzzy-control System

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：王志强 签字日期：2007 年 2 月 5 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：王志强

导师签名：Lucy

签字日期：2007 年 2 月 5 日

签字日期：2007 年 2 月 6 日

第一章 绪论

1.1 ELID 磨削技术

在线电解修整 (Electrolytic In-process Dressing, 简称ELID) 磨削技术是由日本物理化学研究所大森整教授和东京大学中川威雄教授于 1987 年研制成功的, 是一种对金属结合剂超硬磨料砂轮在线电解修整的复合磨削技术。使用金属结合剂超硬磨料微粉砂轮进行磨削时, 砂轮极易出现砂轮表面堵塞问题^[1]。采用 ELID 技术, 可以保证砂轮在磨削过程中始终保持锐利状态, 不会产生切屑堵塞砂轮现象, 因而使得用微细、超细超硬磨料制作性能优异的砂轮成为可能^[2]。金属基超硬磨料砂轮 ELID 磨削技术可以很好地解决树脂基超硬磨料砂轮在超精密磨削过程中存在的问题, 如磨粒把持能力差、砂轮磨耗快、保形精度低、砂轮修锐困难且修锐频繁、加工效率低等。ELID 磨削技术可以充分发挥超硬微细磨料微量切削作用, 对高温结构陶瓷进行高效率镜面磨削, 其表面粗糙度 R_a 可降到 10nm 以下的水平^[3]。

1.1.1 ELID 磨削机理

在 ELID 磨削过程中, 金属结合剂超硬磨料砂轮与电源正极连接作为阳极, 金属电极做阴极, 在砂轮和电极的间隙中通过电解磨削液, 利用电解过程中的阳极溶解效应, 对砂轮表层的金属基体进行电解去除, 从而逐渐露出崭新锋利的磨粒, 形成对砂轮的修整作用; 同时形成一层钝化膜附着于砂轮表面, 抑制砂轮过渡电解, 从而使砂轮始终以最佳磨削状态连续进行磨削加工。ELID 磨削将砂轮修整与磨削过程结合在一起, 使用金属基砂轮进行磨削加工的同时利用电解方法对砂轮进行修整, 从而实现对硬脆材料的连续的超精密镜面磨削^{[4][5]}。

ELID 磨削去除材料的机理与其他镜面加工有所不同。通常的镜面加工是通过磨削、研磨和抛光来获得的。研磨和抛光是以柔性的研具把磨料压在材料表面并产生相对运动, 磨料借助研具的压力以滚动方式使材料破碎, 以滑动和滚动方式去除破碎后的材料。而在 ELID 磨削中, 一方面由于磨粒固着在结合剂中, 对于单颗粒的固着磨粒而言, 其有效磨削尺寸只有磨粒尺寸的 $1/3$, 磨粒主要以微切削的方式去除材料, 所以造成的破碎区要小得多; 另一方面, 砂轮表面形成具有一定厚度和弹性且容纳有脱落磨料的钝化膜, 成为一种具有良好柔性的研磨

膜。精磨时，由于进给量很小，钝化膜的厚度远大于磨料的出刃高度，使砂轮基体表层磨料在磨削中不可能直接与工件接触，砂轮上覆盖的这层钝化膜将代替金属基砂轮参与真正的磨削过程。当电解作用完全抑制时，钝化膜对工件进行光磨。所以ELID超精密磨削实际上是一种集磨、研、抛合为一体的复合式超精密镜面加工技术，其中磨粒主要是以滑动方式去除工件材料的^{[6][7][8][9][10]}。

1.1.2 ELID 磨削的特点及现状

ELID磨削技术是对金属结合剂超硬磨料砂轮在线修整、修锐的复合磨削技术，它有别于电解磨削、电火花磨削，在精密加工领域独树一帜，具有自身的一些显著特点：

- (1) 磨削过程具有良好的稳定性和可控性，易于实现磨削过程的最优化；
- (2) 加工精度高，表面裂纹少，表面质量好；
- (3) 适应性广泛，磨削效率高；
- (4) 装置简单，成本低，推广性强等。

ELID磨削技术自二十世纪八十年代出现起，就以其显著的特点在众多行业的精密与超精密加工领域中受到了重视与应用^{[1][12][13][14][15][16][17]}。加工材料包括各种黑色金属材料和非金属硬脆材料，应用行业涉及机械、电子、仪表、光学、宇航等诸多领域。在日本，成立了ELID磨削研究会并出版相应的学术期刊《ELID研削研究会报》，出现了一些生产ELID专用装置如专用磨具、专用电源、专用磨床的企业，并有数十家大公司将其用于实际生产。例如，日本富士公司将经过ELID超精密镜面磨削的镜头镀膜后直接用在望远镜、幻灯机等产品上，真正实现了光学镜头加工的以磨代研、代抛的工业革命。除日本外，德国、美国、英国和韩国、新加坡等国家也早就开始了ELID磨削技术的研究，并取得了一些成果。现在每年都会有新的ELID产品、新装置、新应用及新的研究报告和论文推出，使ELID磨削技术应用的范围越来越广泛。

ELID磨削技术在我国尚处于研究阶段，主要集中在高校，如哈尔滨工业大学、大连理工大学、西安交通大学、天津大学、西北工业大学等。哈尔滨工业大学经过几年的努力，研制成功了ELID磨削专用的脉冲电源、磨削液和砂轮，在国产机床上开发出平面、外圆和内圆ELID磨削装置，并对多种硬脆材料进行了ELID镜面磨削的实验研究。目前正积极推广普及该技术，实现产品化。国内已有十几家单位应用该技术，如230厂用于加工动压马达零件，23所用于相阵雷达互易移相单元陶瓷、微晶玻璃、铁氧体等航天材料零件加工，8358厂用于光学玻璃非球曲面加工，205所用于光学玻璃加工，华侨大学用于加工大理石，福建南安宏伟陶瓷厂用于加工陶瓷等^[15]。

1.1.3 ELID 磨削用砂轮

ELID磨削独特的加工方式和加工环境，对砂轮提出如下要求：

(1) 金属结合剂对超硬磨料的把持强度要大，防止在磨削受力过程中磨料从结合剂上脱落；

(2) 为了提高磨削效率，要求烧结砂轮时，结合剂中各种成分的配比合理，保证在ELID磨削过程中，电解均匀，参加磨削的磨粒数量多而稳定；

(3) 为了保证磨削质量，ELID磨削中对砂轮表面电解钝化膜的形成速度、成膜质量有较高要求，电解膜的厚度要厚，质地要坚实不易脱落。

根据上述要求，铁或铸铁作为ELID磨削用砂轮结合剂是最合理的^[18]。ELID磨削技术发展初期，ELID磨削所采用的金属结合剂砂轮主要有铸铁纤维结合剂（CIFB）、铸铁结合剂（CIB）、铁结合剂（IB）、钴基结合剂（CB）、镍基（NB）及青铜结合剂（BB）等。结合剂的种类不同，在ELID磨削中的适应性、氧化膜的性质、磨削效率、磨削比及磨削表面的加工质量也不同。试验结果表明，CIFB/CIB金刚石、CBN(立方氮化硼)砂轮对ELID超精密镜面磨削的效果及稳定性较BB、CB、NB要好得多，而且砂轮的强度、硬度、稳定性、耐磨性、润滑性都要好，磨料的利用率、砂轮的使用寿命也提高了。

ELID磨削技术使得铸铁基金刚石、CBN超微细砂轮可以直接用于镜面磨削。铸铁基金刚石砂轮是一种适应目前发展需要的新型砂轮，主要有以下特点^[15]：

(1) 采用了高浓度的金刚石磨料；

(2) 采用了硬料填充，结合剂不易磨损，对磨粒的把持能力强，能充分发挥金刚石磨料的磨削能力，而且有利于散热；

(3) 在从低速到高速的较宽磨削速度范围下工作，不限制磨削用量的选择；

(4) 可以选择的磨粒范围比较广，能适应于各种磨削。

1.2 金刚石砂轮的整形技术

目前，超精密磨削大多使用金刚石或CBN微粉砂轮。铸铁结合剂超硬砂轮由于其硬度高、强度好、保形能力强、耐磨等优点适合难加工材料的高速磨削及高精度磨削。但是金属基金刚石砂轮的自锐性差、容易堵塞、在磨削加工中易产生由砂轮偏心引起的激振力，因而影响磨削过程的稳定性和磨削表面质量，从而限制了其在高性能硬脆材料的精密加工中的正常使用。因此必须经常进行修整，然而金属基金刚石砂轮存在修整时间长、修整难度大、修整效率低等特点^[19]。

精密修整技术是影响砂轮磨削性能的重要因素。超硬磨料砂轮的修整通常分

为两个阶段：整形和修锐。整形的目的是去除砂轮的形状误差和表面缺陷，使砂轮具有准确的几何形状精度。整形时一般同时去除砂轮多余部分的磨料和结合剂。修锐的目的是在砂轮表面形成出刃高度适当的、容屑空间足够的切削微刃，并使单位面积上的有效磨粒数尽可能多。理想的修锐过程只去除结合剂，而不造成磨粒的破坏^{[20][21]}。

由于ELID超精密镜面磨削用的砂轮粒度多为 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下，磨削深度小于 $1\ \mu\text{m}$ ，这样就对砂轮本身的几何精度提出了相当高的要求，为了得到纳米级粗糙度，对于砂轮要求其同轴度或径向跳动量应控制在砂轮磨料粒度的 $1/3\sim 1/2$ 或者最小磨削深度的 $1/2$ 以内^[22]。这对铸铁金刚石砂轮的整形方法提出了极高的精度要求。

砂轮的整形是指使砂轮的磨削表面与其回转轴线满足一定的几何关系，既要满足在砂轮轴向垂直截面上形状的圆度要求，又要满足在砂轮圆柱面上圆柱度要求。砂轮整形的方法较多，常用的有车削整形法、滚压整形法、磨削整形法等机械整形方法，近年来又出现了激光整形法，电加工整形法^[23]。

1.2.1 机械整形法

机械整形法是利用修整工具和金属结合剂砂轮之间硬度、强度和耐磨性的差异，通过两者之间的挤压、切削与磨削作用来去除砂轮表面的材料。其中车削整形法是指采用单点金刚石、多点金刚石、聚晶金刚石修整工具对砂轮的车削运动来达到整形要求的^[24]。磨削整形法一般通过两种方法去除砂轮结合剂：一是表层磨料对结合剂的切削作用，一是进入接触区的脱落的或破裂的磨粒对结合剂的研蚀作用^[25]。以砂带作为修整工具修整金刚石砂轮称作软弹性修整法^[26]。软弹性整形是利用砂轮高速旋转而使砂带弹性变形不能完全恢复来实现蚀除砂轮高点的目的，因此要求修整时砂轮转速比较高。超声振动整形法是由超声波发生器发出的超声频电信号传给换能器，转换成超声频的机械振动，由变幅杆放大后带动修整器以高频小振幅振动。在超声频纵向振动的驱动下，迫使位于接触区域的混油磨料直接撞击砂轮表面。超声波具有的能量激波特性，可以在波面处造成极大的压强梯度，大大增加了磨粒对结合剂的切削和研蚀作用^{[27][28]}。

机械方法对金属结合剂砂轮进行整形或对其磨钝表层进行去除修整，方法简单、使用方便，但用于金属基超硬磨料微粉砂轮时修整效率很低，并且会产生较大的修整接触力。对于大粒度砂轮来说，磨料会破碎也会有脱落而形成坑穴。对于小粒度磨粒，出刃高的磨粒脱落后会被砂轮表层塑性流动的金属覆盖，出刃低的磨粒受力后易被压入金属表层。因此，机械修整法主要适用于陶瓷、树脂结合剂砂轮，不适用于金属结合剂超硬磨料砂轮，尤其不适合微粉砂轮的精密修整。

1.2.2 激光整形法

利用光学系统把激光束聚焦成极小的光斑作用于砂轮表面,可在极短的时间内使砂轮局部表面的材料熔化或气化。修整超硬磨料砂轮时,如果激光功率密度足够高,可同时去除砂轮表面的磨粒和结合剂,使砂轮获得精确的几何形状,达到整形的目的。另一方面,由于超硬磨料与结合剂材料的物理性能相差较大,在相同的激光作用时间内,超硬磨料达到熔点所需的激光功率密度比结合剂材料高1~3个数量级。因此,通过控制激光加工参数可选择性地去除结合剂材料而不损伤超硬磨粒,这样可以在砂轮表面形成容屑空间而达到修锐的目的^[29]。

激光整形过程中热影响区很大^[30],热影响区材料的力学性能将对金刚石砂轮修整后的力学性能产生何种影响需要证明。由于结合剂材料和金刚石的光学性能和热物理性能相差很大,在激光功率达到去除金刚石砂轮的金刚石材料的时候,需要引一强气流在激光照射的区域。否则,在金刚石周围的结合剂材料早已去除时,金刚石颗粒还在,而且金刚石颗粒会被熔融的结合剂材料覆盖,这样砂轮的表面形貌很差。

1.2.3 电加工整形法

电加工整形法目前有电解修整法和电火花修整法以及同其他方法的复合使用方法等。电解修整法只能用于金属结合剂的金刚石砂轮,且无法进行砂轮的整形,对磨削液要求高,而且磨削液对机床有腐蚀作用,并会降低砂轮的使用寿命。电火花修整法只能用于金属结合剂砂轮,对金刚石微粉砂轮的修锐效果不好^[31]。

电加工修整技术非常适合于金属结合剂砂轮的精密修整,尤其是微细粒度金属基超硬磨料砂轮的精细修整^[32]。但存在修整工艺复杂,影响因素较多,需要专门的修整装置等问题。特别是修整不当容易在砂轮磨粒周围形成沟槽,减少了磨料与结合剂的粘结面积,降低结合剂对磨料的把持力,降低了磨料的使用寿命。

1.2.4 电火花整形金属基砂轮机理

由于铸铁结合剂的硬度较高,若沿用以往应用于树脂砂轮的碳化硅、刚玉磨条或砂轮磨削的方法,则整形效率低,精度差,一般不易达到超精密镜面磨削对砂轮形状精度的要求。电火花加工不受被加工材料硬度的影响,没有机械力的作用,非常适合于高硬度材料的加工去除^[33]。

铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形的原理是基于砂轮和工具电极之间的脉冲性电火花放电时电腐蚀现象蚀除凸出的铸铁结合剂材料,以达到砂轮的尺寸、形状和表面质量的加工要求^[34]。电火花放电之所以能够蚀除金属材料,主要是因

为电火花放电时,火花通道中瞬时产生大量的热,达到很高的温度,足以使铸铁结合剂局部熔化、气化而被蚀除掉,形成放电凹坑。从微观角度讲,电火花加工大致可分为几个连续阶段:极间介质的电离、击穿,形成放电通道;介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀;电极材料的抛出;间隙介质的消电离^[35]。为了使电火花放电能对金属材料进行尺寸加工,必须满足下列条件^[36]:

(1)必须使工具电极和砂轮被加工表面之间经常保持一定的放电间隙,这一间隙随加工条件而定,通常为几微米至几百微米。如果间隙过大,极间电压不能击穿极间介质,因而不会产生火花放电。间隙过小,很容易形成短路接触,同样也不会产生火花放电。因此在电火花加工过程中必须具有工具电极的自动进给和调节装置。

(2)火花放电必须是瞬时的脉冲性放电,放电延续一段时间后,需停歇一段时间。放电延续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ s,这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分,把每一次的放电点分别局限在很小的范围内;否则,像连续电弧放电那样,使表面烧伤而无法用作尺寸加工。因此铸铁结合剂金刚石砂轮的电火花整形必须采用脉冲电源。

(3)电火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行,以有利于产生脉冲性的电火花放电。同时,液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属微屑、碳黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排出,并且对电极和砂轮表面有较好的冷却作用。

1.3 电火花加工的伺服控制技术

1.3.1 极间间隙与加工效果关系

电火花加工中,极间间隙的大小是影响加工生产率和精度的重要因素。合理的放电间隙可有效防止电弧放电的发生,避免烧伤工件,保证较高的表面质量和加工速度。因此电火花加工机床都有一个灵敏的自动进给调节系统即伺服系统在加工过程中随时调整极间间隙的大小^[37]。理论上可以用间隙蚀除特性曲线和进给调节特性曲线来解释^[35]。放电间隙的大小和加工工艺指标有密切的联系。图1-1为放电间隙 S 与加工速度 V_w 、表面粗糙度 R_a 之间的关系曲线。由图可知,将放电间隙 S 控制在最佳放电间隙 S_j 附近,加工速度最高,但要同时得到较好的表面粗糙度,应使放电间隙 S 控制在最佳间隙 S_j 和短路间隙 S_d 之间。因间隙中有被蚀除的直径为 d 的金属微粒,所以短路间隙并不等于零。通常进行电火花加工时,放电间隙 S 的范围为: $S_d < S < S_j$,在此范围内,脉冲利用率高,加工稳

定性比偏空载时 ($S > S_j$) 时好。

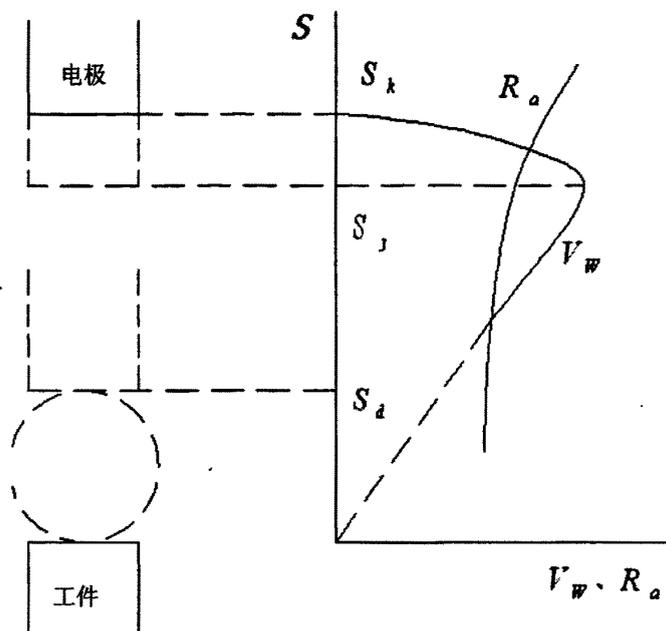


图1-1 放电间隙与加工速度和表面粗糙度之间的关系

因此电火花加工伺服控制系统应该具备如下功能：

(1) 有较宽的进给量调节范围。在电火花加工中加工规准、加工面积等因素的变化都会影响电极直线进给量，自动进给调节系统必须要有较宽的速度调节。

(2) 有足够的灵敏度和快速性。放电加工的频率很高，放电间隙的状态瞬息万变，要求进给调节系统根据间隙状态的微弱信号能快速调节。

(3) 有较高的稳定性和抗干扰能力。在电火花加工中不可避免地会遇到各种干扰，为了保证加工质量，自动进给调节系统必须具有较高的稳定性和抗干扰能力。

1.3.2 伺服控制系统的控制方法

自电火花加工技术问世半个多世纪以来，其发展极为迅速。现已被广泛应用于机械、模具等制造业中。为提高电火花加工的效率 and 工艺性能，电火花加工控制技术也随之发展起来，尤其是近年来计算机技术的迅猛发展，为电火花加工控制技术的不断更新提供了良好的技术基础^[38]。

(1) 自适应控制

由于电火花加工机理非常复杂,建立严格的数学模型十分困难,虽然很多学者从各自的角度提出了许多模型,但大多与实际相差甚远,故应用传统的经典控制方法(如PID控制)不可能达到良好的控制效果。因此,现代控制理论中的自适应控制技术必然被电火花加工控制技术所吸收。各种自适应控制方法的不同之处在于控制参数及评价标准的选择。监控参数大致有:伺服参考电压、脉冲电源参数、抬刀周期、高频信号、脉冲上升沿、击穿延时、脉冲下降沿的时间占有率等。电火花加工过程自适应控制的目标是在满足表面粗糙度、电极损耗及加工稳定性要求的前提下优化蚀除速度,使生产率尽量提高。然而,电火花加工过程中需要优化的参数很多,而且各种参数之间是相互耦合的。而上述各种自适应控制方法,基本上都是控制单一变量,或者是相互分离地控制几个变量,至于变量之间的耦合问题还未涉及到,致使自适应控制方法难以实现真正意义上的最优控制。

(2) 专家系统控制

专家系统是指在某个领域内能够起到人类专家的作用,具有大量的知识和经验的智能程序系统。它通过某种知识获取手段,把人类专家的领域知识和经验技巧移植到计算机中,并且模拟人类专家的推理、决策过程,表现出求解复杂问题的人工智能。由于专家系统是一种基于知识的系统,面临的主要是各种非结构化问题,尤其能处理定性的、启发式或不确定的知识信息,经过各种推理过程达到系统的任务目标,而不需要精确的模型,这为解决现代控制理论的局限性提供了重要启示。另外,知识库保存了领域专家的知识 and 能力,使得人类的技术知识得到了保存,具有继承性;而且,专家系统往往汇集众多专家的经验 and 解决问题的能力,因而在实际的操作中可以超过单个专家的能力。专家系统的强大功能使它非常适合应用 in 电火花加工的控制系统中,国外许多研究机构及厂家在这方面做了深入的研究。相对来说,这方面的工作国内做得较少。文献[39]结合电火花加工的工艺规律和专家系统的特点,对专家系统在电火花加工中的应用进行了深入分析,并对电火花加工自动编程专家系统的开发方法与策略进行了研究。

(3) 遗传算法

遗传算法GA(Genetic Algorithm)是一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机的搜索算法,由J. H. Holland教授于1975年提出,现已广泛应用于计算机科学、人工智能、信息技术及工程实践。该算法借助于计算机编程,一般是将待求问题表示成串(或染色体),即为二进制码或数码串,从而构成一群串,并将它们置于问题的求解环境中,根据适者生存的原则,从中选择出适应环境的串进行复制,且通过交换、变异两种基因操作产生新一代更适应环境的串群,经这样一代代地不断变化,最后收敛到一个最适应环境的串上而求得问题的最优

解。该算法采用的是群体搜索策略,而不依赖梯度信息,所以特别适用于传统搜索算法难以解决的、复杂的非线性问题;而且具有并行运算的特点,优化速度很高,适用于实时系统参数的优化。文献[40]根据电火花加工工艺规律,以加工速度和表面粗糙度为目标,运用遗传算法实现了电火花加工参数的优化。

(4) 模糊控制

模糊控制技术是应用模糊集合理论、模糊语言变量及模糊逻辑推理进行综合考虑的一种计算机控制方法,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,其研究对象常存在严重的不确定性、非线性。目前,模糊控制技术已在电火花加工过程中得到了运用使操作变得更加容易,加工时,只需要输入少量数据,模糊控制系统就可以自动选取最优控制。文献[41]以电火花加工过程的开路率、短路率作为输入量,设计了一种放电间隙控制器,实验结果表明,与以放电延迟时间为输入量的控制器相比,该控制器在粗精加工时均具有较高的工件蚀除率和较低的工具损耗率。文献[42]采用模糊推理技术,设计了多输入、多输出的多级递阶智能控制系统,经对比实验验证,采用该控制系统可提高微细电火花加工效率60%—100%,随着加工深度的增加,这种效率的提高越发明显。

(5) 神经网络控制

人工神经网络是一种新兴技术,用计算机对人类大脑的功能进行某种抽象简化和模拟,构成一个具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,适合解决复杂的非线性问题。而电火花加工正是这种具有高度非线性的系统,难以用具体的数学表达式来描述加工的工艺规律。文献[43]采用3层前馈BP神经网络,构成MIMO系统,实现从加工参数空间到加工效果空间的非线性映射,通过建立可调整的目标函数,利用模拟退火算法,寻找全局最优切割参数,实验表明,该系统的切削性能可获得较大的提高。文献[44]提出了基于神经网络的电火花加工工艺选择模型,该模型能模拟熟练操作者的决策过程,测试结果表明,模型值和实测值相差较小,能实现在给定加工要求下电加工参数的自动选择。

(6) 灰色控制系统

灰色控制系统理论是华中科技大学邓聚龙教授于1982年提出的一种新型控制理论。它运用的是控制论与运筹学相结合的数学方法,主要针对贫信息系统的模糊状况进行系统的关联分析、信息处理(生成)、建模、预测、决策、控制等,能够较好地处理贫信息系统的模糊问题。该理论建立的灰色控制系统模型为连续的微分模型,可对系统的发展变化进行全面的分析观察,并做出长期预测。而传统的或其他建模方法,只能建立离散的递推模型,不便对系统作全面的分析,更不能作长期预测。文献[45]把灰色理论应用到电火花加工过程中,对主轴伺服应用双环控制:其内环为间隙电压反馈控制,外环是由计算机根据间隙中各类放电脉冲

率适时地调整给内环的电压反馈增益参考值。

(7) 混合智能控制

上述各种控制技术在电火花加工过程中的应用并不是相互独立的。由于各自都存在着无法自我克服的缺陷,采用单一控制方式对于电火花加工过程很难获得满意的控制效果。因此,它们之间需要取长补短,在充分发挥自身优势的同时,通过相互结合取得联合增值效应。如对神经网络来说,知识抽取和知识表达比较困难,而模糊信息处理方法对此却很有效;另一方面,模糊推理很难从样本中直接学习规则,且在模糊推理过程中会增加模糊性,但神经网络却能进行有效的学习,并因采用联想记忆而降低模糊熵。文献[46]从提高系统的加工效率和加工质量角度出发,提出了在电火花加工过程中,使用模糊神经网络控制技术,利用模糊控制器的特点,结合人工神经元网络的优点,切实校正了某些不完善规则的不利影响,可靠地提高了控制系统的快速响应能力。

1.4 本文的研究背景及研究内容

综上所述,ELID 磨削以其显著的特点在众多行业的精密与超精密加工领域中受到了重视与应用,其关键技术就是超硬砂轮的在线修整技术,而砂轮的整形效果影响着 ELID 磨削的效果。电火花整形技术非常适合于金属结合剂砂轮的精密整形,尤其是适合微细粒度金属基超硬磨料砂轮的精密整形。普通电火花整形系统在整形过程中存在整形效率低、加工过程不稳定等缺点,需要对整形过程加以控制,保证加工过程的稳定性,提高加工效率。

本文追踪了 ELID 超精密镜面磨削技术,研究了脆硬材料的超精密镜面磨削机理。为了更好的给 ELID 超精密磨削提供技术保证,本课题主要研究铸铁结合剂金刚石微粉砂轮的电火花整形技术,通过分析电火花整形特点,建立电火花整形伺服控制系统,提高金属基金刚石砂轮的整形效率和整形效果,保证砂轮符合 ELID 超精密磨削的要求。本文解决的主要问题有:

1. 建立数据采集分析及数据输出控制系统

1) 建立计算机数据采集程序及数据输出控制程序

(1)利用 DAQ2010 数据采集卡,基于 Labview 语言编写数据采集、数据保存、数据打开、数据分析等应用程序,完成对采集数据的显示、保存及分析等操作;

(2)利用 DAQ2010 数据采集卡,基于 Labview 语言编写数据输出控制应用程序,通过计算机输出控制数据,驱动执行装置工作;

(3)基于 Labview 语言,将数据采集分析及数据输出控制融合到单一应用程

序中运行,实现系统的数据输入与数据输出的同步操作,达到计算机对加工过程的实时闭环控制。

2) 建立计算机闭环控制硬件系统。

(1) 建立计算机控制系统框图,分析系统结构及单元,明确各单元功能及其组成;

(2) 建立数据采集系统,将放电过程参数转化为计算机可采集的电压,并进行必要的处理;

(3) 建立输出的驱动放大电路,将计算机输出的控制电压转化为执行装置可利用的控制参数,完成计算机对微进给工作台的控制。

2. 分析电火花整形特点,选择输入输出参数及确定控制规律

1) 根据获取的放电电压、放电电流及其他数据,依据放电状态的分类,编写 Labview 鉴别程序,判断单个脉冲的放电状态,获取砂轮单周的放电情况;

2) 提取表征砂轮放电特征的参数。由于砂轮的转动,砂轮与电极间隙处于不断变化的过程,依据砂轮一周的放电状态,编写参数辨别程序,获取表征电火花放电激烈程度的参数;并依据实验数据和专家经验,建立加工状态表征参数与电极间隙调整量之间的对应关系;

3) 确定控制规律及推理算法。根据电火花整形过程的非线性特征,利用控制规则,基于模糊控制理论进行模糊推理,基于 Labview 语言编写控制程序,通过计算机输出控制砂轮与电极间隙,实现对电火花整形过程的伺服控制。

3. 实验和结果分析

使用电火花整形模糊控制系统进行整形砂轮的实验,通过观察电极间隙调节曲线,分析砂轮和电极之间的放电蚀除造成的间隙增大速度和间隙伺服进给速度的匹配情况,分析实验结果,验证模糊控制规则和模糊推理算法的准确性并提出改进方法。

第二章 基于 Labview 的数据采集及数据输出系统

“数据采集”是指将温度、压力、流量、位移等模拟量采集转化成数字量后，再由计算机进行储存、处理、显示或打印的过程。在加工过程中，应用数据采集系统可对加工现场的工艺参数进行采集、监视和记录，为提高产品质量、降低生产成本提供信息和手段，并且获得大量的动态信息，是研究瞬间物理过程的有力工具。通过对采集到的数据进行变换加工（如求均值或作傅立叶变换），或在有关联的数据之间进行某些运算（如计算相关函数），分析得到的二次数据，可以得到该数据的内在特征。例如，采集到一个振动过程的振动波形，可以用傅立叶变换得到振动波形的频谱，从频谱说明振动波形对机械结构产生的影响^[47]。为了对加工动态过程进行及时响应，对采集数据处理完毕后需要将处理结果输出，以实现加工参数的调节，这要求计算机能够完成对数据输出的控制。

数据采集及输出控制系统主要由硬件和软件两部分组成^[48]。计算机通过数据采集卡获取原始数据，利用编写好的应用程序对这些数据进行呈现或者管理，软件通过程序命令采集卡何时采集和使用哪个通道来控制采集系统。DAQ软件包括驱动程序和应用软件，驱动程序包括采集卡能够接受的一些命令，应用软件用来发送驱动命令，应用程序还可以用来显示和分析所采集到的数据。本文使用微型计算机和DAQ2010 数据采集卡建立微型计算机数据采集系统，以Labview编程语言编写程序实现对数据的采集和输出。

2.1 Labview 概述

虚拟仪器（Virtual Instrument）是基于计算机的仪器，主要是指将仪器装入计算机，以通用的计算机硬件及操作系统为依托，实现各种仪器功能，实际上是一个按照仪器需求组织的数据采集系统^[49]。目前在这一领域内，使用较为广泛的计算机语言是美国NI公司的Labview。

Labview（Laboratory Virtual instrument Engineering Workbench）是一种图形化的编程语言，它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受，视为一个标准的数据采集和仪器控制软件。Labview 集成了与满足 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485 协议的硬件及数据采集卡通讯的全部功能。它还内置了便于应用 TCP/IP、ActiveX 等软件标准的库函数。这是一个功能强大且灵活的软件。利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器，其图形化的界面使得编程及使用过程都生动有趣。

图形化的程序语言，又称为“G”语言。使用这种语言编程时，基本上不写程序代码，取而代之的是流程图。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念，因此，Labview 是一个面向最终用户的工具。它可以增强用户构建自己的科学和工程系统的能力，提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径。使用它进行原理研究、设计、测试并实现仪器系统时，可以显著提高工作效率。

Labview 应用程序，即虚拟仪器 (VI)，包括前面板 (front panel)、流程图 (block diagram) 以及图标/连接器(icon/connector)三部分。前面板是图形用户界面，也就是 VI 的虚拟仪器面板，这一界面上有用户输入和显示输出两类对象，具体表现有开关、旋钮、图形以及其他控制 (control) 和显示对象 (indicator)。流程图提供 VI 的图形化源程序，在流程图中对 VI 编程，以控制和操纵定义在前面板上的输入和输出功能。流程图中包括前面板上的控件的连线端子，还有一些前面板上没有但编程必须有的东西，例如函数、结构和连线等。VI 具有层次化和结构化的特征，一个 VI 可以作为子程序，这里称为子 VI (subVI)，被其他 VI 调用，图标和连接器在这里相当于图形化的参数。如果将 VI 与标准仪器相比较，那么前面板上的东西就是仪器面板上的东西，而流程图上的东西相当于仪器箱内的东西。在许多情况下，使用 VI 可以仿真标准仪器，不仅在屏幕上出现一个惟妙惟肖的标准仪器面板，而且其功能也与标准仪器相差无几。

2.2 DAQ 卡主要性能和数据指标

DAQ2010 是基于 32 位数据结构的先进数据采集卡，高品质的设计和巧妙的技术运用使该卡在医药、过程控制及其他领域的数据采集和信号分析方面达到比较理想的使用状态。它主要应用在汽车测试、电缆测试、瞬时的信号测量、自动实验装备、实验室自动化、生物科技测量等领域。

DAQ2010 具有以下优异性能：32 位总线，即插即用；可编程的单极/双极模拟输入；可编程的增益（1 倍，2 倍，4 倍，8 倍）；通用触发源为软件触发、外部数字触发、模拟触发、系统同步界面触发；数据传递方式为程序 I/O 和具有集散功能的总线控制 DMA；系统同步界面 (SSI)；A/D、DA 自动校准；

在模拟输入(AI)方面的主要数据指标：4 个差分通道；最大采样率为 2MHz；14 位精度；8K 采样数的先进先出寄存器；可选择的输入范围为：双极为 $\pm 10V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 2.5V$ 、 $\pm 1.25V$ ，单极为 0-10V、0-5V、0-2.5V、0-1.25V；时钟源为内部 40MHz 和外部时钟输入（最大 40MHz，最小 1MHz）；触发模式分为后触发、延迟触发、预触发、中间触发；偏移误差为校正前最大 $\pm 60mV$ ，校正后最大 $\pm 1mV$ ；

增益误差为校正前最大为输出的 $\pm 0.6\%$ ，校正后最大为输出的 $\pm 0.1\%$ 。

在模拟输出（AO）方面数据指标：2个通道电压输出；最大刷新率为1MHz；12位精度；先入先出寄存器2个通道同时使用时每个通道1K采样点，单个通道使用时为2K采样点；输出范围为双极为 $\pm 10V$ ，单极为0-10V；保护方式为接地；输出阻抗为 0.3Ω ；相对精度为0.5LSB，最大1LSB；偏移误差为校正前最大 $\pm 80mV$ ，校正后最大 $\pm 1mV$ ；增益误差为校正前最大为输出的 $\pm 0.8\%$ ，校正后最大为输出的 $\pm 0.02\%$ 。

2.3 基于 Labview 的数据采集程序

开始采集后，得到的电压模拟信号通过A/D转换后变成数字信号，进入先入先出寄存器，通过总线或者直接（DMA方式）传递到缓冲区（Buffer）。缓冲区指的是计算机内存的一个区域，它用来临时存放数据，如果每秒采集几千或者更多数据，并且需要在一秒内显示或图形化所有数据是困难的，可以将采集卡的数据先送到Buffer，将它们快速存储起来，稍后重新读入它们进行显示或分析。缓冲区与DAQ操作的速度及容量有关，如果数据采集卡具有直接内存存取（DMA）功能，模拟输入操作就有一个通向计算机内存的高速硬件通道，即意味着所采集的数据可以直接送到计算机的内存。通过Labview编写程序，首先利用驱动程序的函数读出存放在内存的缓冲区中的数据，然后编写数据处理程序对读出的数据进行各种操作，例如显示数据、保存数据、对数据进行滤波分析等。数据采集结构如图2-1所示。

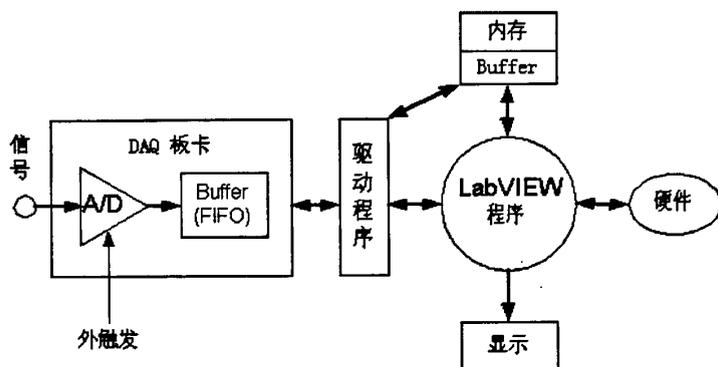


图2-1 采集信号处理过程

驱动程序中与模拟输入有关的函数主要有以下四个：

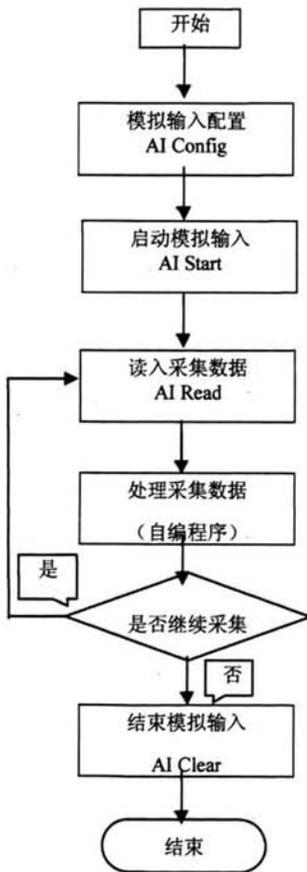
AI Config: 设置指定通道的模拟输入操作，包括硬件、计算机内buffer的分配。

AI Start: 启动带缓冲区的模拟输入操作，它控制数据采集速率，采集点的数目，及使用硬件触发类型的选择。

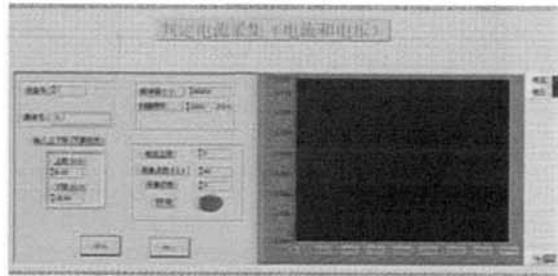
AI Read: 从被 AI Config 分配的缓冲区中读取数据。它能够控制由缓冲区读取的点数，读取数据在缓冲区中的位置，以及是否返回二进制数或电压数。它的输出是一个 2 维数组，其中每一列数据对应于通道列表中的一个通道。

AI Clear: 清除模拟输入操作、计算机中分配的缓冲区、释放所有DAQ卡的资源。

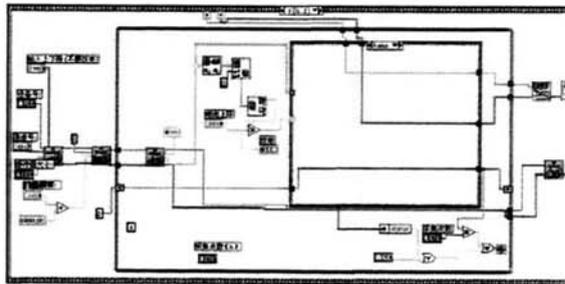
图2-2中a)、b)、c)图分别为利用驱动程序中的模拟输入函数编写的数据采集程序框图、前面板、流程图。



a) 采集程序框图



b) 采集程序前面板



c) 采集程序流程图

图 2-2 采集程序框图、前面板和流程图

2.4 基于 Labview 的数据输出程序

采集数据后,需要对获得的数据进行处理,根据分析结果判断加工过程的状态和决定下一步的操作。在Labview中,可以通过Labview自带函数和用户自编的数据处理程序对采集到的数据进行分析。其中Labview中带有两个数据分析子模块,分别是Analyze子模板和Mathematics子模板。Analyze子模块可以对数字信号进行时域分析、频域分析、频谱及泄漏能量测量、数字滤波、数字加窗等操作;Mathematics子模块可以对数字信号进行数值估算、微积分运算、概率和统计、曲线拟合、线性代数、数组运算、优化等操作。也可以根据自己要求自行编写数据处理程序。数据处理完毕后,将结果显示或者直接传递给输出程序以实现执行设备的操作。

启动输出程序,将编写好的数字数据写入内存中的输出缓冲区,通过总线传递或直接传递到板卡上先入先出的寄存器,将这些数字数据进行DA转换变为模拟量输出即电压,用输出的电压可以对执行装置或者其他运动装置进行控制。

驱动程序和模拟输出操作有关的函数主要有以下四个:

AO Config: 对指定的通道进行模拟输出操作的设置,包括硬件、计算机内buffer的分配。

AO Write: 以电压数据的方式写数据到模拟输出缓冲区。它是一个2维数组,其中每一列数据对应于通道列表中的一个通道。

AO Start: 启动带缓冲区的模拟输出操作。Update rate(scan/sec)是每秒发生的更新数的个数。如果将0写入Number of buffer iterations端子,则卡将数据连续输出给缓冲区,直到运行AO Clear功能。

AO Clear: 清除模拟输出操作、计算机中分配的缓冲、释放所有DAQ卡的资源,例如计数器等。

图2-3中a)、b)、c)图为利用驱动程序中的模拟输出函数编写的输出程序框图、前面板、流程图。

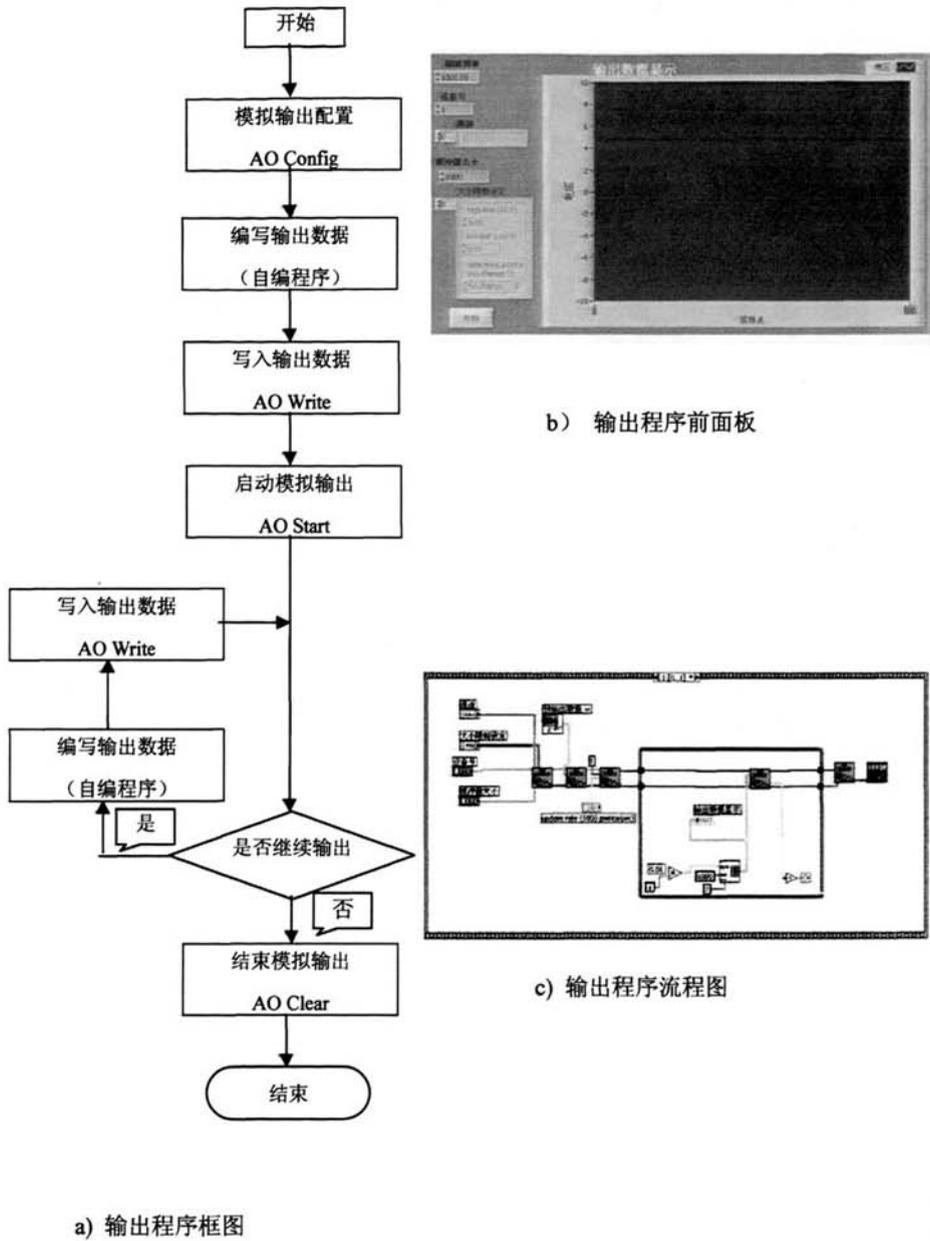


图2-3 输出程序框图、前面板、流程图

2.5 基于 Labview 的采集与输出控制程序

在控制系统中,除了需要通过传感器获取所需数据外,同时还需要将处理数据传递给执行装置,特别是闭环反馈控制系统,需要采集数据和输出控制数据能够在很短的时间内完成。既要求监控程序能够实时显示控制对象的状态,又要求控制程序能够根据控制对象的状态进行分析和处理,并把处理结果及时输出以驱动执行装置对控制对象进行调节。反映在程序语言的编写上就是需要把采集数据程序和数据输出程序能够集成在一个采集及输出程序中运行,既要保证对加工过程中的加工信号的实时采集,又要快速响应加工状态的变化,将针对性的调节转化为能够驱动执行装置的电压输出。

在采集数据程序中,当设置一个模拟输入操作时,首先使用的VI总是AI Config。AI Config会产生一个taskID(任务标识)和Error cluster(出错信息簇)。所有别的模拟输入VI接受这个taskID和Error cluster以识别操作的设备和通道,并且在操作完成后输出一个taskID和Error cluster。因为taskID和Error cluster是一个输入并向另一个模拟输入VI输出,所以这两个参数形成了DAQ 模拟输入操作VI之间的一组关联数据。

在数据输出程序中,当设置一个模拟输出操作时,首先使用的VI总是AO Config。AO Config会产生一个taskID(任务标识)和Error cluster(出错信息簇)。所有别的模拟输出VI接受这个taskID和Error cluster以识别操作的设备和通道,并且在操作完成后输出一个taskID和Error cluster。因为taskID和Error cluster是一个输入并向另一个模拟输出VI输出,所以这两个参数形成了DAQ VI模拟输出操作之间的一组关联数据。

在Labview程序中,模拟输入操作与模拟输出操作是两种不同的操作任务,所以模拟输入操作和模拟输出操作产生的taskID是不同的。而Error cluster在Labview中是通用的出错表示方法,模拟输入操作VI和模拟输出操作VI产生的Error cluster是同一类型的,因此可以相互使用。本文利用Error cluster这个出错信息簇将模拟输入操作VI和模拟输出操作VI顺序连接起来,编写采集与控制操作同时运行的采集与输出控制程序。

采集与控制程序的框图如图2-4所示。其中左边为通过模拟输入taskID串联起来的模拟输入VI,右边为通过模拟输出taskID串联起来的模拟输出VI。所有函数由AO Config函数产生的Error cluster串联起来顺序运行。

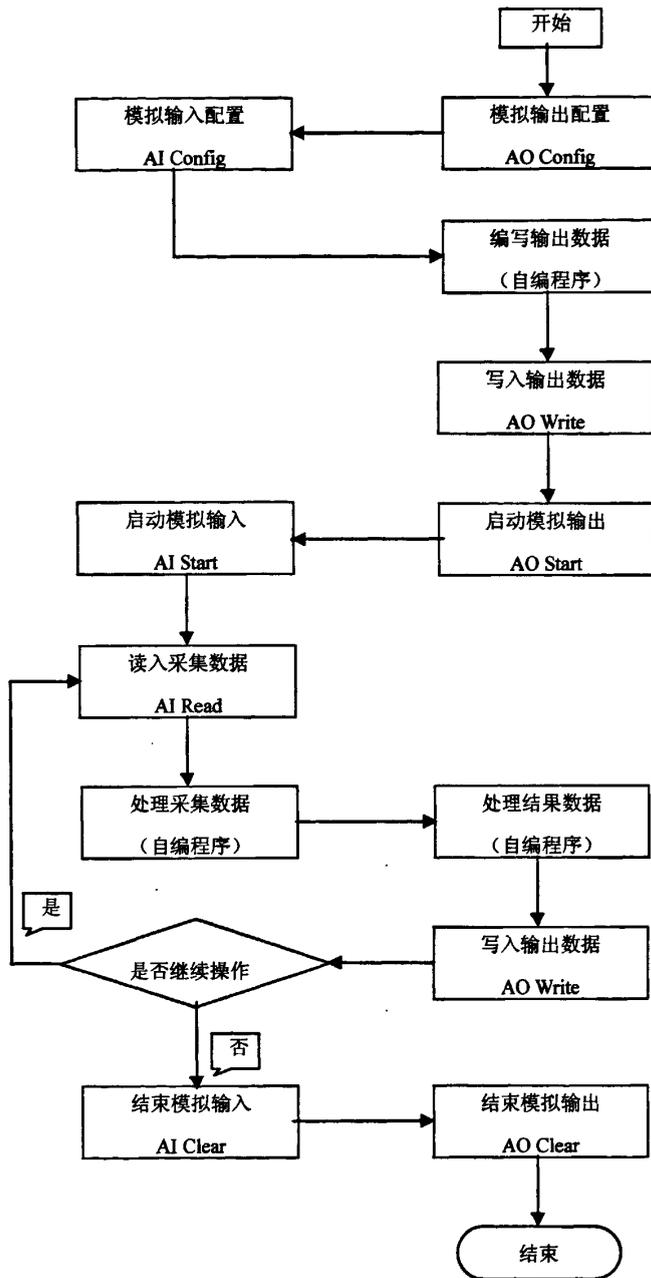


图2-4 采集与输出程序框图

采集与输出程序的前面板及流程图的一部分分别如图2-5、图2-6所示。



图2-5 采集与输出程序前面板

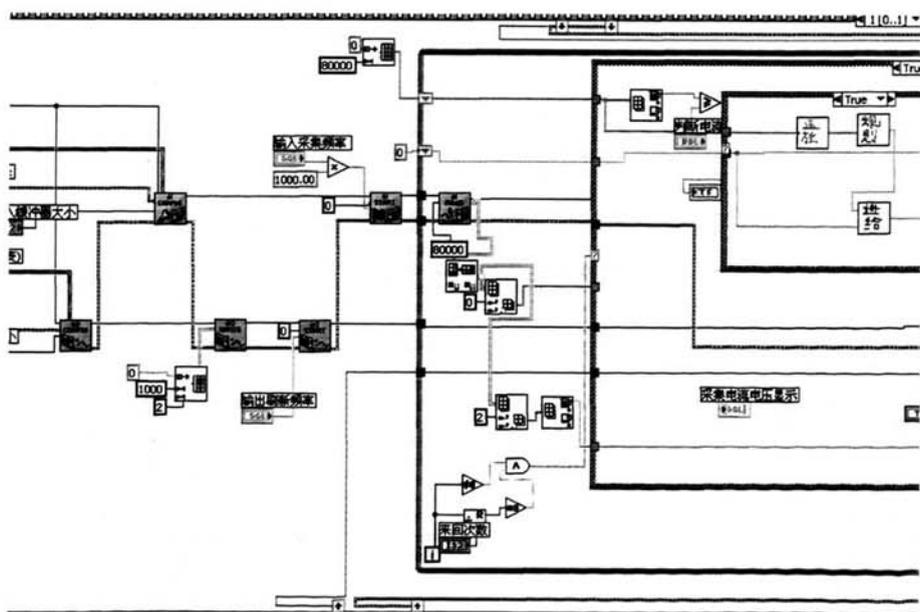


图2-6 采集与输出程序的一部分流程图

2.6 本章小结

本章简要介绍了虚拟仪器及Labview语言，叙述了数据采集卡的主要参数，及如何使用数据采集卡和Labview语言编写应用程序。利用驱动程序中的函数编写了数据采集和数据输出程序。利用Labview语言编写应用程序实现了对采集信号的实时显示、保存、打开、分析和对控制数据的输出，为后续章节电火花整形实验、ELID磨削实验研究及控制系统的建立打下了基础。

第三章 铸铁基金刚石砂轮的电火花整形技术

3.1 电火花放电状态的鉴别

在电火花加工过程中,保持工具电极与工件之间有效的放电间隙,对加工的稳定性和高效率是至关重要的。有效的放电间隙既可使脉冲能量不断击穿介质,产生火花放电,又可在火花通道熄灭后进行消电离,避免电弧的产生。随着加工的进行,伺服系统必须随着材料的去除对间隙进行不断的调节。但加工过程中加工介质的温度以及加工介质中的碎屑浓度不断变化,导致加工介质的性能不稳定,使得监测电极之间的间隙意义不大。在当前监测电极之间的间隙比较困难并且意义不大的情况下,对间隙的调整控制主要依靠对放电状态的检测^[50]。现有的放电状态的检测方法大部分都是构建硬件电路进行检测和统计^{[50][51][52]}。本文以电火花加工中脉冲的分类为基础,利用Labview编程语言编写了对采集到的放电电压和电流进行分析的程序,通过对基于四种分析原理编写的程序的实验验证,可以实现对放电状态比较准确的检测。

3.1.1 脉冲放电状态的分类

单个脉冲的放电状态按其特征可分为5类^[36]:

(1)空载脉冲:电极之间间隙较大,不能实现击穿放电,电压为脉冲电源电压,电流为零。

(2)正常放电脉冲:极间距离进入有效放电间隙,击穿形成火花放电。电压由击穿电压降到维持电压,电压波形上有高频杂波出现,放电有明显的击穿延时,电流从放电开始升高为放电电流直至该脉冲结束。

(3)过渡电弧脉冲:电极间隙较小或者蚀除产物集中时,形成过渡电弧脉冲,维持电压比正常放电维持电压较小,击穿延时很短或者没有,为正常放电与稳定电弧的中间状态。当间隙改善时恢复为正常放电,间隙恶化时转化为稳定电弧。

(4)稳定电弧脉冲:电极间隙过小时,不能实现及时消电离,出现稳定电弧,稳定电弧维持电压与过渡电弧差不多,击穿延时几乎没有。它会造成工件烧伤,所以应该尽量避免。

(5)短路脉冲:间隙很小或者为零时,电极与工件短路,电压为零,电流最大。短路时,不但没有去除能力,而且短路处附近容易造成稳定电弧的产生。

3.1.2 脉冲放电状态识别原理

根据放电效果不同,可将脉冲分为空载脉冲、正常放电脉冲与非正常放电脉冲^[36]。其中非正常放电脉冲包括过渡电弧、稳定电弧以及短路脉冲,通过对非正常放电脉冲所占总脉冲数比率的限制,可以有效避免稳定电弧及短路的产生。

本文分析数据是在电规准为脉冲电压 90v、占空比 40: 40 μ s,介质为去离子水,采样频率为 2MHz 条件下,对铸铁砂轮进行电火花整形时获取的。图 3-1 为通过霍尔传感器分别转变为相应的表征电压的放电电压和电流数据中的一段。单个脉冲所占的采样点为 160 个,该段数据共包括 8 个脉冲,其中第 1、4、7 脉冲为空载状态,第 2、3、5、8 脉冲为正常放电状态,第 6 脉冲为非正常放电。

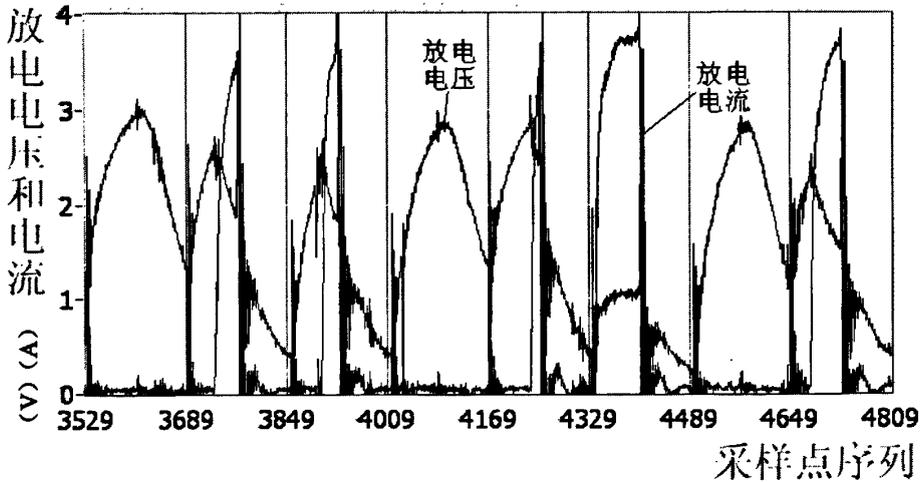


图 3-1 电火花加工过程的电压和电流

(1) 基于击穿延时的状态识别

图 3-2 为图 3-1 采样点对应的电流值,对于空载脉冲,电流为零,采集到的该脉冲的电流数据均为零;对于正常放电脉冲,有明显的击穿延时,在所采集的电流数据中,击穿延时段电流为零,其他脉宽时间内均为远大于零的值;对于非正常放电脉冲,击穿延时很小或者没有,采集的脉冲电流远大于零的点数接近于脉宽点数。设置两个点数门限值,如果电流远大于零的采样点数小于下门限值,则该脉冲状态为空载,如果电流远大于零的采样点数大于上门限值,则该脉冲状态为非正常放电,其它脉冲状态为正常放电。

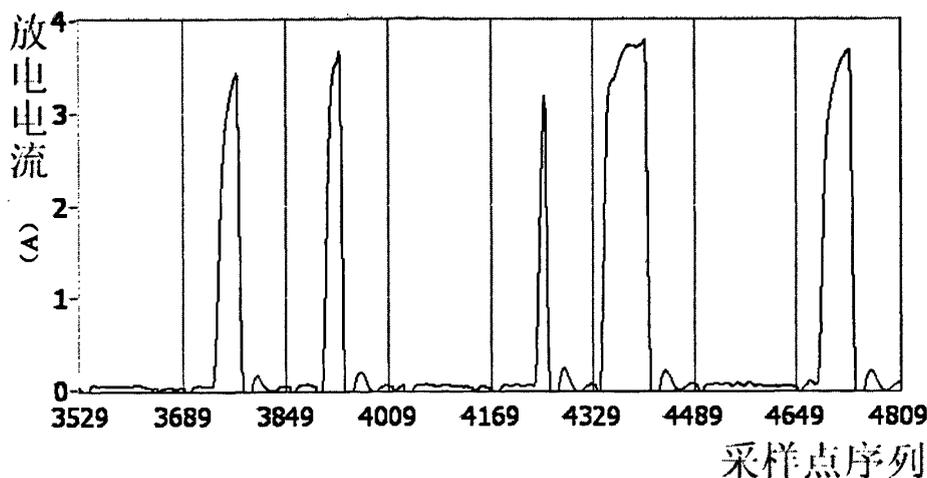


图 3-2 电火花加工过程的放电电流

(2) 基于脉冲平均电压的状态识别

将单个脉冲所有采样点的电压值相加，再除以单个脉冲的采样点数，得到的数据为单个脉冲的平均电压。图 3-3 为图 3-1 采样点对应的脉冲平均电压表示。对于空载脉冲，电压为空载电压，脉冲平均电压最高；对于正常放电脉冲，因为存在击穿延时，延时部分脉宽电压为空载电压，剩余脉宽部分为维持电压，因此脉冲平均电压相对空载脉冲较低；对于非正常放电脉冲，击穿延时很短或者没有，脉宽存在空载电压的时间较短或者没有，其余脉宽电压为维持电压或者为零，因此脉冲平均电压较正常放电时低。可以设定两个电压门限值，脉冲平均电压大于

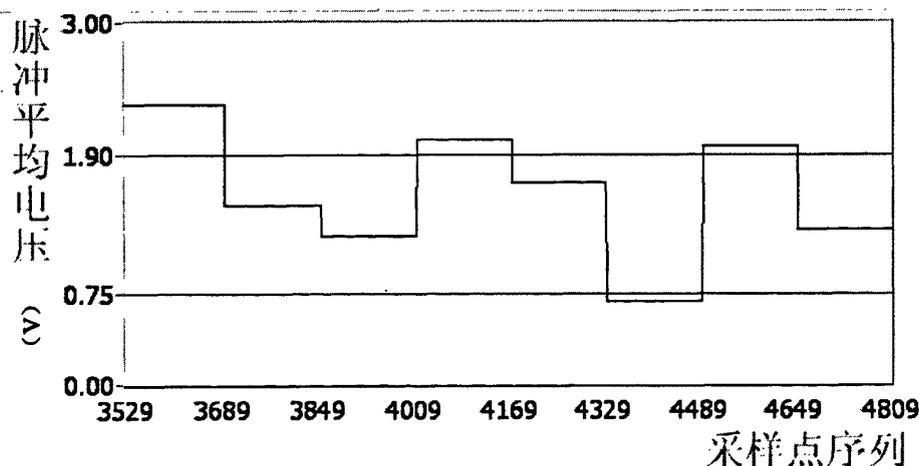


图 3-3 电火花加工过程的脉冲平均电压

上门限值的脉冲为空载状态，小于下门限值的脉冲为非正常放电状态，其它脉冲为正常放电状态。

(3) 基于放电平均电压的状态识别

同步采集电压和电流数据，对单个脉冲各采样点的电压和电流值相乘，得到各采样点的功率值，然后将单个脉冲所有点的功率值相加，视为该脉冲的功率在时间上的积分即能量。再将该脉冲的所有采样点的电流值相加，视为该脉冲电流值在时间上的积分。用能量值除以电流积分值，得到值可作为脉宽放电时间内的放电平均电压。图 3-4 为图 3-1 采样点对应的放电平均电压表示。对于空载脉冲，放电平均电压几乎是空载电压的平均值，最高；对于正常放电脉冲，电流有效积分值大部分都集中放电时间内，放电电压较大，放电平均电压值较高；对于非正常放电脉冲，电压为电弧时的维持电压或零，放电平均电压较小。设定两个电压门限值，放电平均电压大于上门限值的脉冲为空载状态，小于下门限值的脉冲为非正常放电状态，其余为正常放电状态。

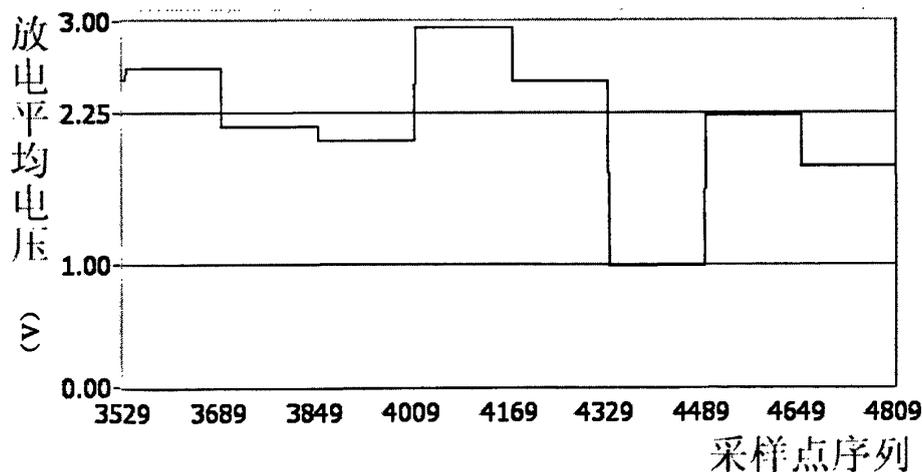


图 3-4 电火花加工过程的放电平均电压

(4) 基于击穿电压的状态识别

由于本文实验用电路中存在电容，脉冲电压的上升和下降均有一个过程。图 3-5 为图 3-1 采样点对应的电压值。比较空载脉冲、正常放电脉冲、非正常放电脉冲的脉冲电压最大值发现，空载脉冲电压的最大值最大，其次为正常放电脉冲的电压最大值，而非正常放电脉冲的电压最大值最小。设定两个电压门限值，最大电压大于上门限值的脉冲为空载状态，小于下门限值的脉冲为非正常放电状

态，其它为正常放电脉冲。

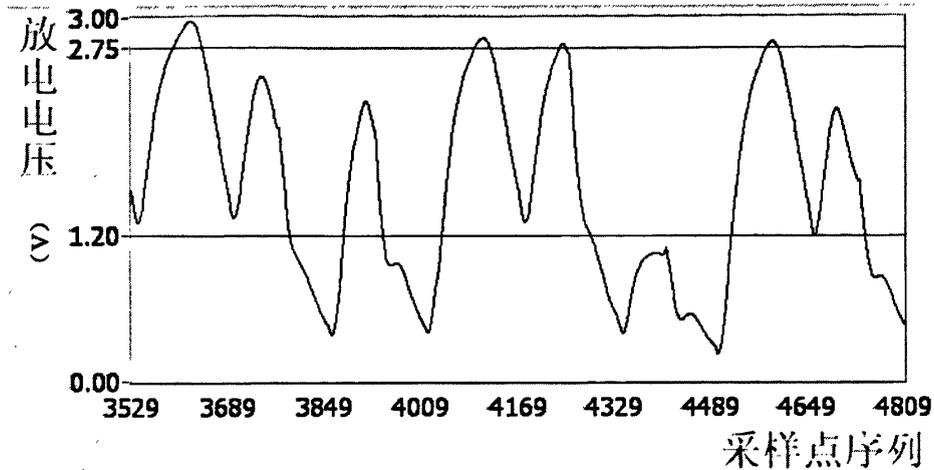


图 3-5 电火花加工过程的放电电压

本文基于 Labview 语言运用上述四种分析原理编写统计程序,对采集到的六个砂轮旋转单周的电压和电流数据文件进行分析。统计结果如表 3-1 所示。

实验中砂轮转速为 1500r/min,砂轮旋转每周可采集 8 万数据点,对应 500 个脉冲周期,其中完整脉冲 499 个。为了减小干扰因素的影响,所采集的电压电流数据都进行了滤波。基于击穿延时分析原理编写的程序的上下门限值设定为 70 和 3 个数,基于脉冲平均电压分析原理编写的程序的上下门限值设定为 1.9 和 0.75v,基于放电平均电压分析原理编写的程序的上下门限值设定为 2.25 和 1v,基于击穿电压分析原理编写的程序的上下门限值设定为 2.75 和 1.2 v。

脉冲放电是一个强干扰过程,放电波形中偶尔会出现不符合分类依据的情况,但由于检测的过程实际上也是一个统计的过程,不规则放电脉冲较少,通过统计后,对检测结果的影响是很小的,由表 3-1 可以看出统计结果能够较准确地反映实际情况。同时可以看出,利用击穿延时程序能够比较准确地统计出空载脉冲数,利用脉冲平均电压程序则可以比较准确地统计出非正常放电数,因此两个程序可以组合使用,由击穿延时来判断空载脉冲,由脉冲平均电压来判断非正常放电脉冲,从而得到比较准确的放电状态统计。

表 3-2 为对另外六个单周电压电流数据文件进行组合分析的统计结果。空载脉冲击穿延时门限值为 3 个点,非正常放电脉冲平均电压门限值为 0.75v,从程序统计结果与实际统计结果比较可以看出,该组合程序基本上能够正确统计出不同放电状态脉冲的个数,偏差不大。

表 3-1 基于四类方法的程序统计结果

文件 序号	脉冲状态	实际脉冲 统计	击穿延时 程序统计	脉冲平均电 压程序统计	放电平均电 压程序统计	击穿电压 程序统计
1	空载	485	486	485	488	486
	正常放电	9	10	9	8	10
	非正常放电	5	3	5	3	3
2	空载	447	442	445	454	453
	正常放电	42	51	43	39	40
	非正常放电	10	6	11	6	6
3	空载	462	462	459	460	459
	正常放电	30	30	33	31	33
	非正常放电	7	7	7	8	7
4	空载	462	463	459	459	485
	正常放电	34	29	37	36	11
	非正常放电	3	7	3	4	3
5	空载	282	299	300	312	317
	正常放电	178	149	161	151	145
	非正常放电	39	51	38	36	37
6	空载	475	472	481	482	488
	正常放电	23	23	17	14	10
	非正常放电	1	4	1	3	1

表 3-2 组合程序统计结果

文件序号	实际统计			组合程序统计			
	脉冲状态	空载	正常放电	非正常放电	空载	正常放电	非正常放电
7		467	26	6	466	28	5
8		456	35	8	452	37	10
9		422	54	23	414	57	28
10		453	42	4	452	45	2
11		459	37	3	459	36	4
12		462	33	4	462	33	4

通过脉冲状态鉴别程序对砂轮旋转一周的所有脉冲的放电状态进行实时分析,可以判断出电火花整形的加工状态,从而可以对砂轮与电极之间的间隙进行调节,为电火花加工的间隙自动调节提供了可靠的支持。

3.2 电火花整形实验过程及分析

3.2.1 整形装置

如图 3-6 所示,为电火花整形砂轮的示意图。金属基金刚石砂轮通过电刷连接脉冲电源的正极,平板电极连接脉冲电源的负极,工作液为去离子水。其中主运动为砂轮的旋转,进给运动为微进给工作台的垂直进给运动和机床工作台的纵向及横向进给运动。随着砂轮的高速旋转,平板电极和砂轮的间隙最小处将优先放电,即把平板电极和砂轮的凸出点同时蚀除。随着对凸出点蚀除的不断进行,平板电极的平面度、砂轮的圆度和圆柱度逐渐提高。表 3-3 为电火花整形实验所使用的设备和仪器。

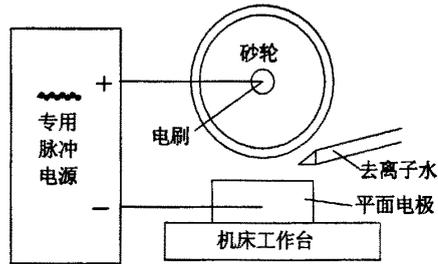


图 3-6 平面电极电火花整形砂轮装置

表 3-3 实验设备和仪器

机床	精密卧轴矩台平面磨床 MM7120A
砂轮	铸铁结合剂金刚石砂轮(W3.5)
微进给工作台	驱动电压: 0V~250V 最大位移: 12.9 μ m 尺寸: Φ 25 \times 45
工具电极	紫铜 (15 \times 15)
工作液	去离子水 (精密整形)
电源	高频脉冲电源 HDMD-IV改进型
测量仪器	霍尔电压传感器, 霍尔电流传感器, 数据采集卡, 计算机, 非接触式测微测振仪

3.2.2 电参数及进给量的选择

在电火花整形过程中，电参数是影响电火花整形精度和效率的主导因素^[53]。金刚石砂轮与工具电极发生脉冲性电火花放电，在砂轮表面形成放电凹坑，形状如图 3-7 所示。重复放电的过程中每个脉冲放电的凹坑相互重叠，如图 3-8 所示。



图 3-7 电火花放电凹坑截面形状

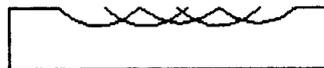


图 3-8 重叠脉冲放电凹坑

研究表明，无论正极或负极都存在脉冲蚀除，单个脉冲的蚀除量 q 与单个脉冲能量 W_M 在一定范围内成正比的关系。在某一段时间内的蚀除总量 Q 等于这段时间内单个有效脉冲蚀除量的总和。故正、负极的蚀除速度，与单个有效脉冲蚀除量成正比。用公式表示为：

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= K_a W_M f \phi t \\ Q_c &= K_c W_M f \phi t \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_a &= \frac{Q_a}{t} = K_a W_M f \phi \\ v_c &= \frac{Q_c}{t} = K_c W_M f \phi \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中 Q_a, Q_c ——正极、负极的总蚀除量；(角标 a 表示正极， c 表示负极)；

v_a, v_c ——正极、负极的蚀除速度，亦即工件生产率或工件的损耗速度；

W_M ——单个脉冲能量；

f ——脉冲频率；

t ——加工时间；

K_a, K_c ——与正负电极材料、脉冲参数及工作液有关的工艺参数；

ϕ ——有效脉冲利用率；

脉冲放电能量越大，蚀除的凹坑就越大，加工效率就越高，但是加工精度就会因凹坑的尺寸增大而降低。加工效率和加工精度存在着一定的对立关系。在粗整形时采取较大的放电能量，以整形效率为主；随着整形使得砂轮圆度逐渐改善，需要采取较小的放电能量进行以提高整形精度为主的半精整形和精密整形。

单个脉冲放电所释放的能量取决于电极间的放电电压、放电电流和放电持续时间，所以单个脉冲放电能量为

$$W_M = \int_0^{t_e} u(t)i(t)dt \quad (3-3)$$

式中 t_e —— 单个脉冲实际放电时间；

$u(t)$ —— 放电间隙随时间而变化的电压 (V)；

$i(t)$ —— 放电间隙中随时间变化的电流 (A)；

W_M —— 单个脉冲放电能量 (J)；

由于电火花放电间隙的电阻的非线性特性，击穿后间隙上的火花维持电压与电极材料及工作液种类有关。火花维持电压与脉冲电压幅值、极间距离及放电电流大小等的关系不大，因而可以说，正负极的电蚀量正比于平均放电电流的大小和电流脉宽；对于矩形波脉冲电流，实际正比于放电电流的幅值。例如在通常的晶体管脉冲电源中，脉冲电流近似地为一矩形波，电火花加工钢时的单个脉冲能量为

$$W_M = (20 \sim 25)i_e t_e \quad (3-4)$$

式中 i_e —— 脉冲电流幅值 (A)

因此，单个脉冲的放电能量实际上跟其放电电流和放电时间有关。随着电源脉冲电压的增大，放电电流就会越大，击穿延时就会越短，放电时间越长，放电能量越大；在脉冲频率较大的情况下，单个脉冲的脉宽越大，放电时间越长，因而放电能量也就越大。为了兼顾整形效率和整形精度，脉冲电压和脉冲脉宽在随着粗加工向精加工的转变应逐渐减小。

随着工具电极和砂轮不断放电蚀除，工具电极和砂轮之间的间隙增大，需要不断进给以维持整形过程的进行^[54]。在粗整形阶段，砂轮圆度误差比较大，即砂轮外圆表面存在凸出较高的高点，这些点所占砂轮外表面比例较少，体积较小，在脉冲能量较大的粗整形过程中比较容易蚀除。因此粗整形时随着放电蚀除砂轮与电极之间的间隙改变较大，应采用较大的进给量。随着加工的进行，砂轮的圆度不断改善，砂轮表面的圆度误差逐渐减小，即高点的凸出量逐渐减小，在砂轮外表面所占的比例逐渐增加，在脉冲能量较小的精整形过程中对高点蚀除量较小，因此间隙改变较小，这时为了防止砂轮的低点进入放电有效间隙范围内，半精整形和精密整形时需采用较小的进给量。

3.2.3 电火花整形砂轮的实验

电火花砂轮整形过程分为粗整形、半精整形和精密整形三个阶段，不同的整形阶段使用的参数如表 3-4 所示，使用砂轮转速为 1500rpm。

表 3-4 实验参数

整形阶段	参数
粗整形	电参数: 120V、80 μ s: 20 μ s 垂直进给速度: 2 μ m / 1 个横向行程
半精整形	电参数: 90V、40 μ s: 40 μ s 垂直进给速度: 1 μ m 、0.5 μ m/2 个横向行程
精密整形	电参数: 60V、20 μ s: 40 μ s 垂直进给速度: 0.2 μ m、0.1 μ m/2 个横向行程

在进给量一定的情况下, 每组电参数都应有其极限精度。极限精度可以这样解释, 即每组电参数都有一个加工区间, 当经过较长一段时间, 砂轮高点刚好处于加工区间下边界, 而砂轮低点恰处在加工区间上边界时, 砂轮的高点和低点会一同被加工蚀除。此时电火花放电只是使砂轮的半径逐渐减小, 砂轮的圆度误差改善不大。这时应该采用更小的电参数进行加工, 进而获得更小的砂轮圆度误差。某组电参数未达到其极限整形精度之前, 随着砂轮的圆度逐渐改善, 砂轮旋转一周与电极之间处于有效放电间隙的点逐渐增多, 即砂轮旋转一周的正常放电脉冲增多。如果达到其极限整形精度, 随着加工的进行, 砂轮的单周放电状态改变不大。因此我们可以采用上节介绍的放电状态检测方法, 利用程序鉴别砂轮每周的放电状态, 通过实时显示各类脉冲比率来判断某组电参数是否达到它的极限精度而需要调整参数。

实验中检测到砂轮初始圆度误差为 58 μ m, 经过 56 分钟粗整形后达到极限精度, 砂轮圆度误差为 9.8 μ m; 41 分钟半精整形后圆度误差为 3.61 μ m; 经过 50 分钟的精密整形后单周放电状态平稳, 整形结束, 圆度误差为 1.2 μ m。粗整形、半精整形、精密整形的砂轮圆度误差如图 3-9 的 a)、b) 和 c) 图所示。

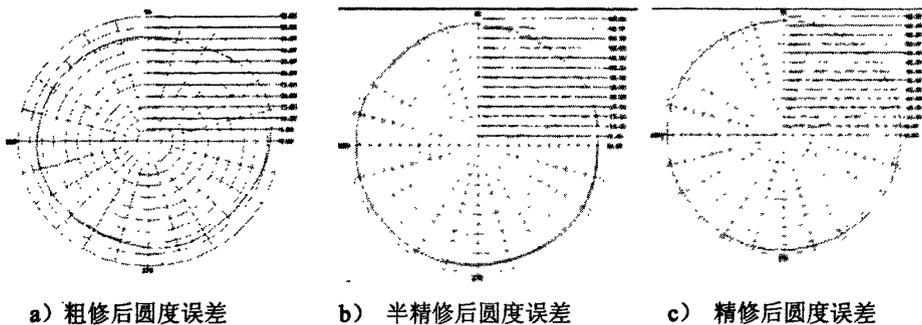


图 3-9 砂轮整形各阶段的圆度误差

3.3 电火花整形过程中的问题

在上节的普通电火花整形砂轮实验中,操作人员需要连续监视整形过程中砂轮与平板电极之间的加工状态,并凭借个人经验决定是否进给以及进给量的大小。整形过程中容易出现以下问题:

(1) 由于操作人员经验的限制,容易造成调节量过大或者过小。如果实际进给量超出实际需要进给量特别大时,容易造成砂轮与电极之间出现稳定电弧或者造成短路而引起稳定电弧,对砂轮和电极表面造成很大的危害性。可能将电极和工件烧蚀出深坑,产生严重的热影响区,还可能产生积碳,并且积碳厚度随加工进行而不断增长,导致电极上抬,容易造成砂轮圆度误差的增大。如果实际进给量小于实际需要进给量时,容易造成实际放电脉冲较少,脉冲利用率不够,使得整形时间加长。这两种情况都严重的影响了整形效率的提高。

(2) 在整形过程中由于缺乏统一的判断标准,使得调节时大时小,容易造成加工状态的波动,使得整形过程不稳定,对砂轮的整形精度不利。特别是在精密整形过程中,由于电参数较小,加工状态对电极间隙变化比较敏感,误差较大的调节引起加工状态频繁的变动,砂轮圆度误差也处于不稳定的状态,因此砂轮整形精度难以提高。

(3) 由于操作人员的经验不同,使得加工状态的判断水平和因此造成的调节与否、调节量大小不同,使得加工过程可能处于一个不连续的状态,也不能保证电火花加工的稳定性、加工效率和整形精度,因此会增大砂轮与电极的损耗。

(4) 加工状态波动较大的整形过程使得加工时间较长,操作人员需要连续监视加工状态并且不断对间隙量进行调节,劳动强度较大。

3.4 本章小结

对电火花放电状态进行了分析,利用 Labview 软件对砂轮单周的所有脉冲的放电状态进行了统计,为电火花整形的阶段划分提供了判据,也为电火花加工的自动控制系统的实验提供了有效的手段。

分析了电参数中的脉冲电压和脉冲的脉宽对加工效率及加工精度的影响,确定了各个加工阶段的电参数以及电极间隙调整量。通过实验证明,电火花整形能够达到比较理想的加工精度,但是也存在着操作人员连续监视加工状态、凭借个人经验进行电极间隙调节而造成的加工状态波动、整形效率较低的问题,因此需要建立反馈控制系统以提高对砂轮的电火花整形的整形精度和整形效率。

第四章 基于模糊控制的电火花整形砂轮技术

4.1 模糊控制系统概述

4.1.1 模糊集合及模糊关系

19世纪末德国数学家康托创立的集合论已经成为现代数学的基础。在康托创立的经典集合论中，一个事物要么属于某集合，要么不属于某集合，两者必居其一，没有模棱两可的情况。而在人们的思维中，有许多模糊概念，表现在语言上有许多模糊概念的词，如以人的身高为论域，那么“高个子”“中等身材”“矮个子”没有明确的外延。模糊概念不能用经典集合加以描述，这是因为不能绝对区别“属于”和“不属于”，就是说论域上的元素符合集合概念的程度不是绝对的0或者1，而是介于0和1之间的一个实数，通常用于描述此类特性的是模糊集合。

论域 U 上的模糊集合 F 是指，对于 U 中的任意元素 u ，都指定了 $[0,1]$ 中的某个数 $\mu_F(u)$ 与之对应，称为 u 对 F 的隶属度。这意味着定义了一个映射：

$$\mu_F: U \rightarrow [0,1]; \quad u \rightarrow \mu_F(u) \quad (4-1)$$

这个映射称为模糊集合 F 的隶属度函数， $\mu_F(u)$ 的值越接近 1，表示 u 从属于 F 的程度越高， $\mu_F(u)$ 的值接近于 0，表明 u 从属于 F 的程度越低。可见，模糊集合完全由隶属度函数所描述^[55]。

除了“A 等于 B”等清晰概念上的普通逻辑关系外，还会遇到一些表达模糊概念的关系语句，例如“A 和 B 很像”。普通关系只是表示事物之间是否存在关联，而模糊关系是描述事物之间对于某一模糊概念上的关联程度。

两个非空集合 U 与 V 之间的直积： $U \times V = \{(u, v) | u \in U, v \in V\}$ 中的模糊集合 R 被称为 U 到 V 的模糊关系，其特性可以由下面的隶属度函数来描述：

$$\mu_R: U \times V \rightarrow [0,1] \quad (4-2)$$

其中隶属度函数 $\mu_R(u, v)$ 表示序偶 (u, v) 具有关系 R 的隶属程度。

在日常生活中，两个单纯关系的组合，构成一种新的合成关系。普通关系可以合成，模糊关系和普通关系一样，两种模糊关系可以组成一种合成关系。设有三个论域 U, V, W ， Q 是 U 到 V 的一个模糊关系， R 是 V 到 W 的一个模糊关系， Q 对 R 的合成 $Q \circ R$ 指的是 U 到 W 的一个模糊关系，它具有隶属度函数：

$$\mu_{Q \circ R}(u, w) = \bigvee_{v \in V} (\mu_Q(u, v) \wedge \mu_R(v, w)) \quad (4-3)$$

4.1.2 语言变量及模糊蕴含关系

语言变量是自然语言中的词或句，它的取值是用模糊语言表示的模糊集合。扎德为语言变量做出了如下的定义：语言变量是一个 5 元组 $(x, T(x), U, G, M)$ 来表征。其中 x 是变量的名称； U 是 x 的论域； $T(x)$ 是语言变量值的集合，每个语言变量值是定义在论域 U 上的一个模糊集合； G 是语言规则，用于产生语言变量 x 值的名称； M 是语义规则，用以产生模糊集合的隶属度函数。

在模糊控制中，模糊控制规则实质上就是模糊蕴含关系。在模糊逻辑中有很多定义模糊蕴含的方法，在模糊推理中有两类主要模糊蕴含推理方式：一类是广义前向推理方式，另一类是广义反向推理方式，如表 4-1 所示。

表 4-1 模糊蕴含推理方式

推理方式	广义前向	广义反向
前提一	如果 x 是 A , 则 y 是 B	如果 x 是 A , 则 y 是 B
前提二	x 是 A'	y 是 B'
结论	y 是 B'	x 是 A'

在上述的两类模糊蕴含推理方法中，模糊前提一：“如果 x 是 A , 则 y 是 B ”表示了 A 与 B 之间的模糊蕴含关系，记为 $A \rightarrow B$ 。在普遍的形式逻辑中 $A \rightarrow B$ 有严格的定义，但在模糊逻辑中 $A \rightarrow B$ 不是普通逻辑的简单推广。在模糊逻辑控制中，最常用到的有如下两种模糊蕴含关系的运算方法。

(1) 模糊蕴含最小运算 (Mamdani)

$$R_C = A \rightarrow B = A \times B = \int_{x \times y} \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \quad (4-4)$$

(2) 模糊蕴含积运算 (Larsen)

$$R_p = A \rightarrow B = A \times B = \int_{x \times y} \mu_A(x) \mu_B(y) / (x, y) \quad (4-5)$$

4.1.3 基于规则库的模糊推理

模糊控制中的规则通常来源于专家的知识，一个 MIMO 规则库可以看作由多个 MISO 子规则库组成，只需考虑其中一个 MISO 子规则库的近似处理问题。

考虑如下的两个输入一个输出的模糊系统：

输入： x 是 A' , y 是 B'

规则： R_1 :如果 x 是 A_1 and y 是 B_1 则 z 是 C_1
 Also R_2 :如果 x 是 A_2 and y 是 B_2 则 z 是 C_2
 ⋮
 Also R_n :如果 x 是 A_n and y 是 B_n 则 z 是 C_n

输出： z 是 C'

其中 x 、 y 、 z 是代表系统状态和控制量的语言变量， A_i 、 B_i 、 C_i 分别为 x 、 y 、 z 的语言值， x 、 y 、 z 的论域分别为 X 、 Y 、 Z 。

模糊控制规则“如果 x 是 A_i and y 是 B_i 则 z 是 C_i ”的蕴含关系 R_i 定义为：

$R_i = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i$ ，即

$$\mu_{R_i} = \mu_{(A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i}(x, y, z) = [\mu_{A_i}(x) \text{ and } \mu_{B_i}(y)] \rightarrow \mu_{C_i}(z) \quad (4-6)$$

其中“ $A_i \text{ and } B_i$ ”是定义在 $X \times Y$ 上的模糊集合 $A_i \times B_i$ ， $R_i = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i$ 是定义在 $X \times Y \times Z$ 的模糊蕴含关系。考虑到 n 条模糊控制规则的总的模糊蕴含关系为 $R = \bigcup_{i=1}^n R_i$ ，最后求得推理的结论为

$$C' = (A' \text{ and } B') \circ R \quad (4-7)$$

其中 $\mu_{(A' \text{ and } B')}(x, y) = \mu_{A'}(x) \wedge \mu_{B'}(y)$ 或者 $\mu_{(A' \text{ and } B')}(x, y) = \mu_{A'}(x) \mu_{B'}(y)$ ，“ \circ ”是合成运算符，通常采用最大最小法。

4.1.4 模糊控制系统简介

模糊控制系统是以模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑的规则推理为理论基础，采用计算机控制技术构成的一种具有反馈通道的闭环结构的数字自动控制系统。模糊控制系统的组成具有常规计算机控制系统的结构形式，通常由模糊控制器、输入/输出接口、执行机构、被控对象和测量装置五部分组成，它的组成核心是具有智能性的模糊控制器^[56]，图 4-1 模糊控制系统框图。

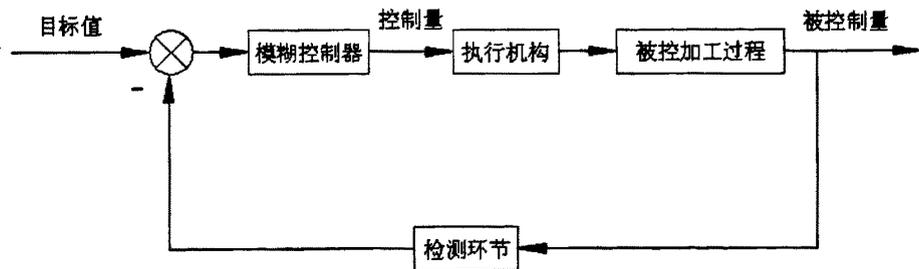


图 4-1 模糊控制系统

4.2 电火花模糊控制整形系统

对于电火花加工过程控制,虽然传统的经典控制理论和现代控制理论至今都无法胜任,但是经验丰富的熟练操作工人却能将这一过程控制得较好。模糊控制器的输入要求及推理过程与人脑十分相似,都是通过对模糊信息的识别、判断和推理来实现控制功能的。因此在理论上模糊控制系统能够在电火花加工过程控制中实现与熟练操作者相同的控制效果^[36]。

图4-2为电火花整形砂轮模糊控制系统框图。ELID加工专用电源柜产生的直流脉冲加在砂轮和电极之间形成放电蚀除对砂轮进行整形,霍尔传感器将放电电压和放电电流转换为可以采集的电压信号,利用数据采集卡采集到计算机中。利用Labview语言编写参数鉴别程序,分析采集到的电压和电流信号,确定表征加工状态的输入参数。与给定目标值相比较,把它们的差值当作模糊控制器的输入。经过模糊控制器的推理运算,得出电极间隙调整量,换算为电压调整量,利用数据采集卡的DA输出,通过低通滤波器滤波及驱动电源放大,调节微进给工作台的进给方向和进给量,对砂轮和平板电极之间间隙进行调节。

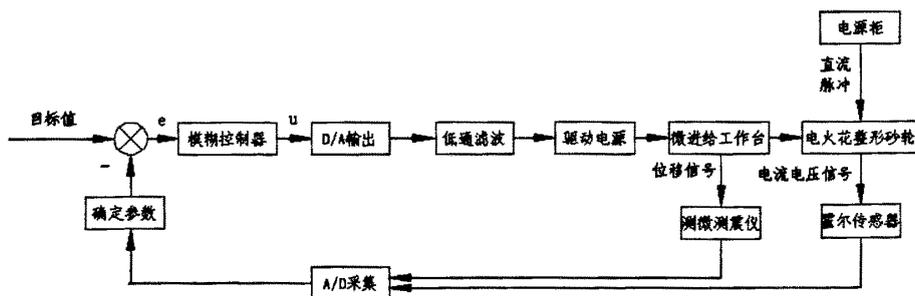


图4-2 电火花整形砂轮模糊控制系统

4.2.1 低通滤波电路

由于连接到驱动电源的信号线较长及实验室用电设备的干扰等原因,DA输出的电压模拟信号的波动量和波动频率较大。而驱动电源能够承受的最大频率为100Hz,因此需要对驱动电源输入端信号进行滤波以减小干扰。本文利用电阻 $R=5000\Omega$,电容 $C=1\mu\text{F}$ 搭建了二阶无源滤波电路,它的截至频率由式4-8计算为11.7Hz,可以有效减小电压波动。

$$f_p = 0.37 / 2\pi RC \quad (4-8)$$

4.2.2 驱动电源

如图4-3是电致伸缩（压电）陶瓷微位移器的驱动电源。其主要参数为：

电源电压：220VAC±5%

外部输入电压：0~5V

输出电压：0~300VDC

输出电压纹波：<50mV

分辨率：0.1V

输出内阻：200Ω

外型尺寸：250×190×80mm



图4-3 驱动电源

驱动电源有两种调节方式，当选择“内”时，为手动调节方式，通过前面板上的旋钮调节输出电压，电压值由数码管显示，调节范围为0~300V；当选择“外”时，为外加输入电压控制输出电压，输出电压受外加电压控制：

$$V_o = 60 \times V_i \quad (4-9)$$

其中 V_i ——输入电压（0~5V）

V_o ——输出电压（0~300V）

4.2.3 微进给工作台

压电陶瓷（PZT）是具有压电效应的陶瓷材料，也就是说在经过极化处理的陶瓷体上沿其极化方向施加一个机械力（或释放压力）时，陶瓷体就会产生充（放）电现象，这就是正压电效应。反之，若在陶瓷体上施加一个与极化方向相同（或相反）的电场，则会引起陶瓷片产生伸长（或缩短）的形变，这被称为逆压电效应。利用逆压电效应，对压电陶瓷施加外部电压，压电陶瓷微位移作动器推动弹性铰链产生弹性形变从而使动平台产生微量位移驱动微进给工作台进给。

图4-4为同时采集微进给工作台的外部输入电压和位移输出的关系图，图中两条曲线分别表示当输入电压从0V升到250V（右下曲线）及从250V降到0V（右上曲线）时微进给工作台的进给状态。从图中可以看出微进给工作台的上升与下降存在差异，但微进给工作台上升和下降的距离相同，即最大进给量约为 $65.5 - 52.6 = 12.9 \mu\text{m}$ 。输入电压升高初始阶段，微进给工作台的单位电压驱动量较小，随着输入电压的增大，微进给工作台的单位电压驱动量逐步增大，从曲线末端呈线性关系看出，微进给工作台的单位电压驱动量逐渐稳定。表4-2为微进给工作台的位移变化量与输入电压在不同阶段之间的关系。

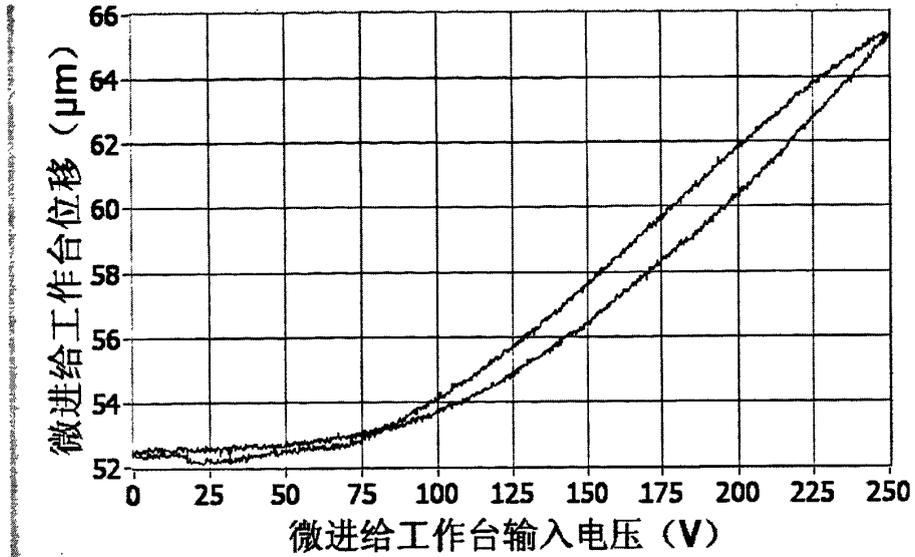


图4-4 微进给工作台输入电压和输出位移关系

表4-2 不同电压范围内微进给工作台单位电压进给量及电压调整量线性化倍数

电压输入范围 (V)	微进给工作台相应进给量 (μm)	单位电压进给量 ($\mu\text{m}/\text{V}$)	电压调整量线性化 倍数
0-90	0.87876	0.009764	3
90-120	1.2087	0.04029	2.5
120-150	1.88964	0.062988	1.588
150-180	2.32902	0.077634	1.288
180-210	2.57076	0.085692	1.167
210-250	4.02102	0.1005255	1

为了能够使得模糊控制器输出的等量的电压调解量能够起到相同的间隙调节效果，需要针对不同的驱动电源原输入电压对其电压调整量进行线性化处理。在输入电压210-250V的范围内，微进给工作台的输出位移与输入电压为线性关系，因此以它为标准对模糊控制器的电压调解量乘上相应的倍数进行线性化处理。由于微进给工作台的内部间隙、刚度等因素使得输入电压在0-90V范围内微进给工作台调整量较小，线性化倍数为10，而较小的电压调解量就会变成相当大的电压增量，过大的电压增量会损害驱动电源，所以本文采用较小倍数对0-90V进行线性化。表4-2第四列为不同输入电压范围内的电压调整量线性化倍数。

4.3 输入参数及控制规则的确定

4.3.1 输入参数的选择

为了有效地对电火花加工过程进行控制,输入参数必须能够准确的表征电火花加工过程中的放电状态,即能准确区别脉冲的空载状态、正常放电状态和非正常放电状态。文献[36]认为,随着工件与电极间隙的逐渐减小,电极与工件之间的间隙电压也是处于逐渐减小的趋势,而脉冲空载率下降,非正常放电率上升,正常放电率先上升后呈现下降趋势,图4-5为各种放电状态脉冲随间隙变化占有所有脉冲的比率示意图。

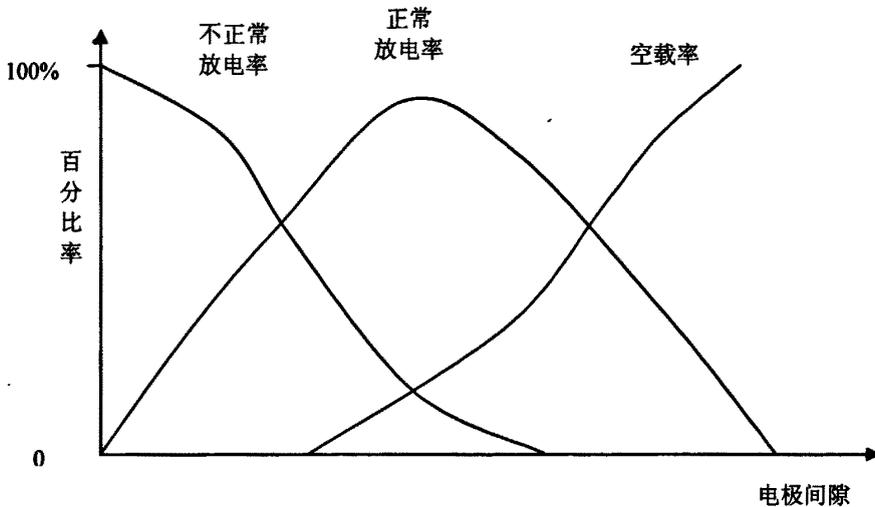


图 4-5 加工状态和电极间隙关系

文献[57]利用分析周期内出现异常放电状态时间的比例及开路状态所占时间的比例,来判别电火花成形加工的间隙放电状态及其变化趋势的方法,使用模糊控制策略实现了对电火花成形加工过程中放电状态的控制,取得了令人满意的效果。文献[37]通过对电火花加工过程中间隙电压和放电状态的分析,提出了采用间隙电压作为微观驱动控制,同时利用表征放电状态的参数,即火花放电率、电弧及短路率等进行宏观调节的一种综合控制策略。其中微观模糊控制器调节进给频率,宏观模糊控制器调节进给步距。文献[36]通过电火花加工放电状态检测卡得出空载率、正常放电率和非正常放电率等值,并以空载率和非正常放电率作为模糊控制系统的两个基本输入量,并以相邻两次输入信号的差值作为输入量的

变化,建立四输入单输出的模糊控制器,给出相应的伺服参考电压,通过与得到的间隙电压比较,给出伺服控制信号,驱动伺服驱动模块来控制伺服电机的进给方向和速度。文献[42]包含三个输入参数:当前放电状态、前一次放电状态、前一次所采取的措施以及加工进行的时间,其中当前放电状态、前一次放电状态是模糊量,加工进行时间是对时间进行模糊化的结果。该智能系统应用于Micro EDM中,实验结果表明,在保证加工精度的前提下,该系统能自动寻取最优加工控制策略,并显著缩短加工时间。

在电火花整形砂轮的加工过程中,由于砂轮处于高速的旋转过程中,砂轮的圆度误差使得砂轮与电极之间的间隙不断变化,造成砂轮在旋转一周的过程中加工状态变化较大,因此不可能对砂轮一周的所有点的放电状态进行控制。砂轮旋转一周中必有一处在该周放电程度最大,若此处放电程度较强,则是最容易出现稳定电弧对砂轮和电极造成危害的地方,若此处放电程度较弱,则反映了砂轮一周放电程度较弱,因此控制砂轮一周的放电状态只需对放电最剧烈处进行控制。

砂轮旋转一周凸出量最大处和平板电极距离最小,因此凸出量最大处的放电最为剧烈。如果砂轮的某个位置比较凸出,与其他位置相比,该位置与电极之间间隙较小,使得脉冲的不正常放电率(R)较高,同时也会造成该位置与电极保持有效放电间隙的时间较长,造成连续放电的脉冲较多。因此可以利用连续放电脉冲个数和不正常放电率来表征砂轮凸出处的放电状态。

在放电脉冲中,有的脉冲放电持续时间较长,有的脉冲放电持续时间较短,即放电能量不同,为了区别这两类脉冲,利用脉冲放电时间与脉宽的比作为该脉冲的有效放电系数,将所有连续脉冲的有效放电系数相加,称为连续放电系数(N),以代替连续放电脉冲个数用来表征脉冲连续放电的强弱程度。

4.3.2 控制规则的建立

实验中,电参数采取电压90V,占空比40:40 μ s,介质为去离子水,将砂轮与电极之间的加工状态分为很小、较小、正常、较大、很大五种。一边由具有丰富经验的操作人员判断机床往复一个周期的加工状态,一边通过上章编写的放电状态鉴别程序记录该周期的连续放电系数和不正常放电率两个参数,共获取71个样本点。通过分析,建立连续放电系数、不正常放电率两个参数与加工状态之间的关系,如表4-3所示。不同的加工状态需要对微进给工作台施加不同电压调节量得到对应的电极间隙调节量,基于操作人员的经验和专家知识,建立加工状态和电极间隙调节量之间的关系,如表4-4所示,其中0表示不调节,-表示微进给工作台后退,其余表示微进给工作台进给。由表4-3和表4-4可以得到连续放电系数、不正常放电率两个参数与电极间隙调节量之间的关系,如表4-5所示。

表4-3 输入参数同放电状态之间的关系

砂轮与电极间		不正常放电率 (%)				
加工状态		0-10	10-20	20-40	40-60	60以上
连续放电 系数×10	0-20	很小	很小	较小	较小	正常
	20-40	很小	较小	较小	正常	较大
	40-60	较小	较小	正常	较大	较大
	60-200	较小	正常	较大	较大	很大
	200以上	正常	较大	较大	很大	很大

表4-4 加工状态和电极间隙调节量之间的关系

加工状态	很小	较小	正常	较大	很大
间隙调节量	0.9 μm	0.3 μm	0	-0.3 μm	-0.9 μm

表4-5 输入参数和电极间隙调节量之间的关系

电极间隙调节量		不正常放电率 (%)				
(μm)		0-10	10-20	20-40	40-60	60以上
连续放电 系数×10	0-20	0.9	0.9	0.3	0.3	0
	20-40	0.9	0.3	0.3	0	-0.3
	40-60	0.3	0.3	0	-0.3	-0.3
	60-200	0.3	0	-0.3	-0.3	-0.9
	200以上	0	-0.3	-0.3	-0.9	-0.9

得到连续放电系数(N)、不正常放电率(R)两个参数与电极间隙调节量之间的关系后,以此为规则建立电火花整形砂轮的专家控制系统,实验中微进给工作台进给情况如图4-6所示。可以看出,专家控制系统的进给基本能够满足砂轮与电极之间放电蚀除间隙调节的要求,但是进给方向经常改变,进给量也时大时小,这就说明了砂轮与电极之间的加工状态时大时小,波动较大。因此伺服系统进给速度和因放电蚀除造成的间隙增大速度未达到较好的匹配状态。究其原因可能有两个方面,一是控制规则比较简单,每个加工状态对应的输入参数的范围较大,因而在放电状态变动使得输入参数变化较大时,加工状态没有发生变化,使得进给量也未能进行相应调整;二是由于界限的划分,使得放电状态和输入参数的微小变化导致出现不同的加工状态,进给量发生了较大的变化,致使加工状态波动较大。因此需将控制规则进一步细化,即输入参数与电极间隙调节量之间需有更为详细的对应关系,本文利用基于规则库的模糊推理对其进行细化。

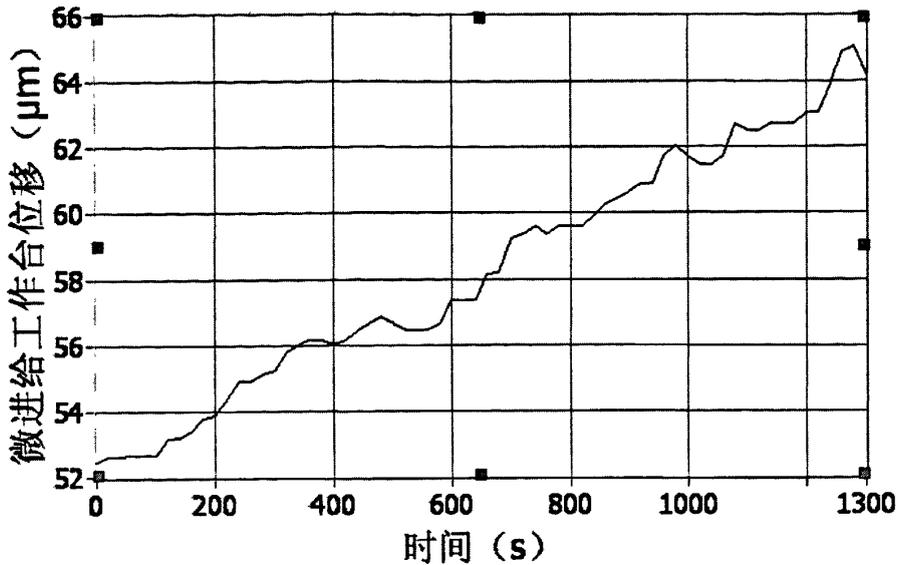


图4-6 电火花整形砂轮专家控制系统的微进给工作台进给过程

4.4 基于规则库的模糊推理在电火花整形中的应用

4.4.1 参数的量化与模糊化

在控制系统中，模糊控制器的输入参数连续放电系数(N)、不正常放电率(R)同目标值的差值的实际变化范围称为N、R语言变量的基本论域，分别记为 $[-e_N, e_N]$ 及 $[-e_R, e_R]$ 。以连续放电系数的基本论域 $[-e_N, e_N]$ 为例，其所对应的模糊论域一般取为 $X = \{-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n\}$ ， n 为将在 $0 \sim e_N$ 范围内连续变化的差值离散化后分成的量化等级，它构成论域 X 的元素，本文取 $n=6$ 。模糊控制器一般采用量化因子进行线性化量化，由于电火花加工中输入参数的变化较大，所以对输入参数分段后分别进行线性化量化，将控制间隙变化的电压调整量作为输出参数进行线性化量化，输出参数的量化因子为 K_U ， K_U 在不同的整形阶段取不同的值。表4-6为N、R的目标值分别为 $N=5.8$ 、 $R=40\%$ 时，它们的基本论域到模糊论域的量化关系。

在定义了量化因子的基础上，再把 $[-6, 6]$ 之间变化的连续量根据需要分成若干个等级，每个等级用一个模糊语言变量来表示，每个语言变量对应一个模糊集合，用模糊隶属度表示，习惯上用如表4-7所示的语言变量表示。

模糊隶属度函数定义为三角形式，每个语言变量的隶属度如图4-7所示。

表4-6 输入参数基本论域到模糊论域的量化过程

模糊论域	Nx10基本论域	N对应量化因子	R (%)基本论域	R对应量化因子
-6	[6]		[0,10]	
(-6,-5]	(6, 14]	1/8	(10,15]	1/5
(-5,-4]	(14, 22]	1/8	(15,20]	1/5
(-4,-3]	(22, 30]	1/8	(20,25]	1/5
(-3,-2]	(30, 38]	1/8	(25,30]	1/5
(-2,-1]	(38, 48]	1/10	(30,35]	1/5
(-1,0]	(48, 58]	1/10	(35,40]	1/5
(0,1]	(58, 70]	1/12	(40,45]	1/5
(1,2]	(70, 85]	1/15	(45,50]	1/5
(2,3]	(85, 105]	1/20	(50,55]	1/5
(3,4]	(105, 130]	1/25	(55,60]	1/5
(4,5]	(130, 160]	1/30	(60,65]	1/5
(5,6]	(160, 200]	1/40	(65,70]	1/5
6	(200, 499]		(70,100]	

表4-7 模糊集合及其语法规则

模糊集合	语法规则	模糊集合	语法规则
正大 (PL)	取在+6附近	负零 (NZ)	比零稍小一点
正中 (PM)	取在+4附近	负小 (NS)	取在-2附近
正小 (PS)	取在+2附近	负中 (NM)	取在-4附近
正零 (PZ)	比零稍大一点	负大 (NL)	取在-6附近

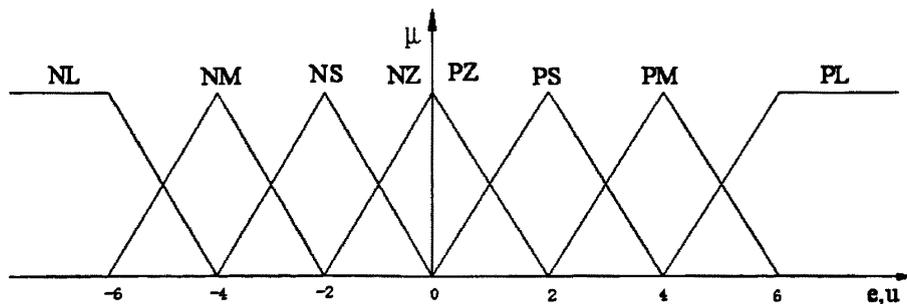


图4-7 输入参数模糊集合的隶属度函数

4.4.2 模糊规则和模糊推理

根据电火花整形砂轮过程中连续放电系数(N)、不正常放电率(R)两个输入参数与设定目标值的偏差和微进给工作台的间隙调整量之间建立的关系(表4-5),建立输入参数和输出参数的模糊控制规则,如表4-8所示。

表4-8 电火花整形砂轮模糊控制系统的模糊规则

U	EN						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ER	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
	PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
	PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL

控制规则形式为: R_i : if EN is A, and ER is B, then U is C。由于一个控制系统的规则库是由若干条规则所组成的,对于整个系统总的控制规则所对应的模糊关系R可对N个模糊关系取“并集”得到

$$R = R_1 \vee R_2 \vee \dots \vee R_N = \bigvee_{i=1}^N R_i \quad (4-10)$$

本文采用Mamdani控制器的推理形式,输出控制量的集合为

$$U = (EN \times ER) \circ R \quad (4-11)$$

其中 $(EN \times ER)$ 即EN与ER的模糊关系采用“ \wedge ”取小运算,每条规则的模糊蕴含关系R采用“ \wedge ”取小运算,而合成运算算子“ \circ ”采用“ $\vee - \wedge$ ”(最大-最小)推理方法。

例如当 $N=3.5$, $R=0.32$ 时,由表4-6可知N、R对应在模糊论域的值分别是 $e_N = -2.375$, $e_R = -1.6$ 。因此 e_N 隶属于NM、NS两个模糊集合,隶属度分别为 $\mu_{NM}^N = 0.8125$, $\mu_{NS}^N = 1 - 0.8125 = 0.1875$; e_R 隶属于NS、ZE两个模糊集合,隶属度分别为 $\mu_{NS}^R = 0.8$, $\mu_{ZE}^R = 1 - 0.8 = 0.2$ 。他们的适用规则为:

If EN is NM, and ER is NS, then U is NL; If EN is NM, and ER is ZE, then U is NM;
If EN is NS, and ER is NS, then U is NM; If EN is NS, and ER is ZE, then U is NS;

通过分解运算,得到下式

$$\mu^U = [(\mu_{NM}^N \wedge \mu_{NS}^R) \wedge \mu_{NL}^U] \vee [(\mu_{NM}^N \wedge \mu_{ZE}^R) \wedge \mu_{NM}^U] \vee [(\mu_{NS}^N \wedge \mu_{NS}^R) \wedge \mu_{NM}^U] \vee [(\mu_{NS}^N \wedge \mu_{ZE}^R) \wedge \mu_{NS}^U]$$

代入数值计算可得:

$$\mu^U = \left[0.8 \wedge \left\{ \frac{1}{-6}, \frac{0.5}{-5} \right\} \right] \vee \left[0.2 \wedge \left\{ \frac{0.5}{-5}, \frac{1}{-4}, \frac{0.5}{-3} \right\} \right] \vee \left[0.1875 \wedge \left\{ \frac{0.5}{-5}, \frac{1}{-4}, \frac{0.5}{-3} \right\} \right] \vee \left[0.1875 \wedge \left\{ \frac{0.5}{-3}, \frac{1}{-2}, \frac{0.5}{-1} \right\} \right]$$

$$\mu^U = \left\{ \frac{0.8}{-6}, \frac{0.5}{-5} \right\} \vee \left\{ \frac{0.2}{-5}, \frac{0.2}{-4}, \frac{0.2}{-3} \right\} \vee \left\{ \frac{0.1875}{-5}, \frac{0.1875}{-4}, \frac{0.0875}{-3} \right\} \vee \left\{ \frac{0.1875}{-3}, \frac{0.1875}{-2}, \frac{0.1875}{-1} \right\}$$

$$\mu^U = \left\{ \frac{0.8}{-6}, \frac{0.5}{-5}, \frac{0.1875}{-4}, \frac{0.1875}{-3}, \frac{0.1875}{-2}, \frac{0.1875}{-1} \right\}$$

4.4.3 模糊判决

如上所述, 经过模糊推理得到的控制输出仍是一个模糊集合, 它反映了控制语言的模糊性, 然而对一个实际控制的被控对象, 在某一个时刻有一个确定的控制量, 必须从模糊输出的隶属度函数中找出一个最能代表这个模糊集合及模糊控制作用可能性分布的精确量, 这就是模糊判决, 即反模糊化。本文采用重心法进行反模糊化, 重心法把模糊量的重心元素作为反模糊化之后得到的精确值 z_0 , 重心元素的求取公式如下:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i) \times z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_C(z_i)} \quad (4-12)$$

在上节得到的 $\mu^U = \left\{ \frac{0.8}{-6}, \frac{0.5}{-5}, \frac{0.1875}{-4}, \frac{0.1875}{-3}, \frac{0.1875}{-2}, \frac{0.1875}{-1} \right\}$ 进行模糊判决

和清晰化的过程如下:

$$u_0 = -\frac{0.8 \times 6 + 0.5 \times 5 + 0.1875 \times (4 + 3 + 2 + 1)}{0.8 + 0.5 + 4 \times 0.1875} = -4.4756$$

除以 K_U 得到需要输出的电压调整量（粗整形和半精整形）为 0.22378(V)，转化为砂轮与电极之间的间隙调整量为 0.67134 μm ，即微进给工作台此时需要上升 0.67134 μm 。

4.4.4 模糊控制系统的基本步骤

综上所述，模糊控制系统的基本算法可概括为四个步骤：

(1) 根据本次采样得到的电火花整形砂轮过程中的放电电压和放电电流，计算放电状态的表征参数连续放电系数、不正常放电率。

(2) 与目标值进行比较，将其差值的精确值模糊化变为模糊量。

(3) 根据输入参数（模糊量）及模糊控制规则，按照模糊推理合成规则计算控制量（模糊量）。

(4) 由上述得到的控制量（模糊量）反模糊化为精确的电压调整量调节间隙。

4.5 基于模糊控制的电火花整形砂轮实验及结果分析

4.5.1 实验步骤

基于模糊控制的电火花整形砂轮的实验可分为 9 步进行，基本步骤见图 4-8：

(1) 将机床及实验仪器调试好之后，测出机床往复一个周期的时间。

(2) 通过机床工作台 2 $\mu\text{m}/\text{pass}$ 的进给调整电极与砂轮间隙，使其处于放电状态。启动模糊控制程序，在程序面板上设定各个采集及控制参数。

(3) 持续采集电极与砂轮之间的电压与电流，并将砂轮旋转一周的电流序列作为一个记录单位，把机床往复一个周期作为一个采样间隔周期，通过比较选择电流累计值最大的电流记录单位作为该采样间隔周期内砂轮放电最为激烈的一周。将该周电流最大值与设定的放电电流值比较判断该圈放电与否，若不放电，输出设置的空载状态电压调整值并转到第(6)步。

(4) 将该电流序列通过基于放电电流的脉冲放电状态鉴别程序，得到一个连续放电脉冲的电流序列，表征砂轮一周放电最大处的放电程度。统计连续放电脉冲的放电电流得出连续放电系数、不正常放电率两个参数值，与设立的目标值比较，得出模糊控制器的两个输入参数 e_N 、 e_R 。

(5) 对 e_N 、 e_R 进行量化和模糊化后，应用基于控制规则和模糊推理得到的公

式，得出应该输出的控制量（模糊量），将控制量进行反模糊化及量化后得到应该输出的电压调整量。

(6) 检测原输出电压，判断其所在的范围，根据表4-2，电压调整量乘以相应的线性化倍数得到实际电压调整量。原输出电压加上实际电压调整量就得到本次应该输出的电压。

(7) 输出的控制电压通过低通滤波电路，经过驱动电源放大后，驱动微进给工作台对砂轮与电极之间间隙进行调节。继续本次伺服进给转到第(3)步。

(8) 当输出电压使得驱动电源电压达到最大值后，停止采集，输出线性递减电压使微进给工作台下落，本次放电整形加工停止。继续加工转到第(2)步。

(9) 整理机器及其他设备，加工结束。

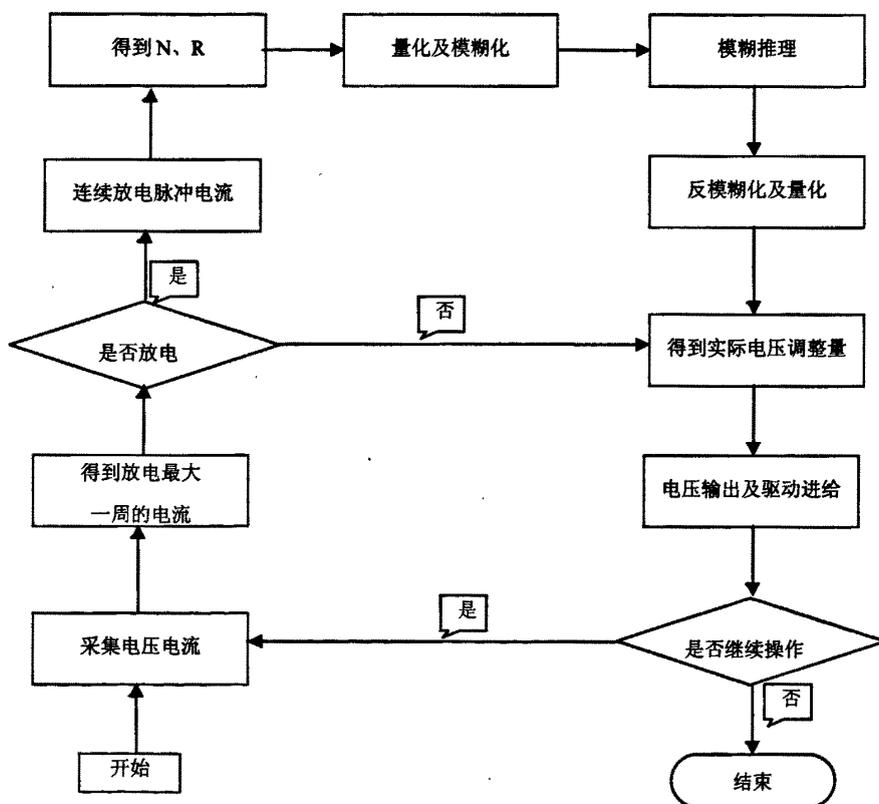


图4-8 电火花整形砂轮模糊控制系统的基本步骤

4.5.2 实验过程及结果

首先在砂轮轴向两个不同的位置测得未整形的砂轮的圆度误差。图4-9所示为轴向位置一的砂轮外表面形状示意图，除去较明显的凹坑外，其圆度误差为 $14.18\mu\text{m}$ ，轴向位置二的砂轮圆度误差为 $19.56\mu\text{m}$ ，可见砂轮的圆度误差和圆度柱误差较大。

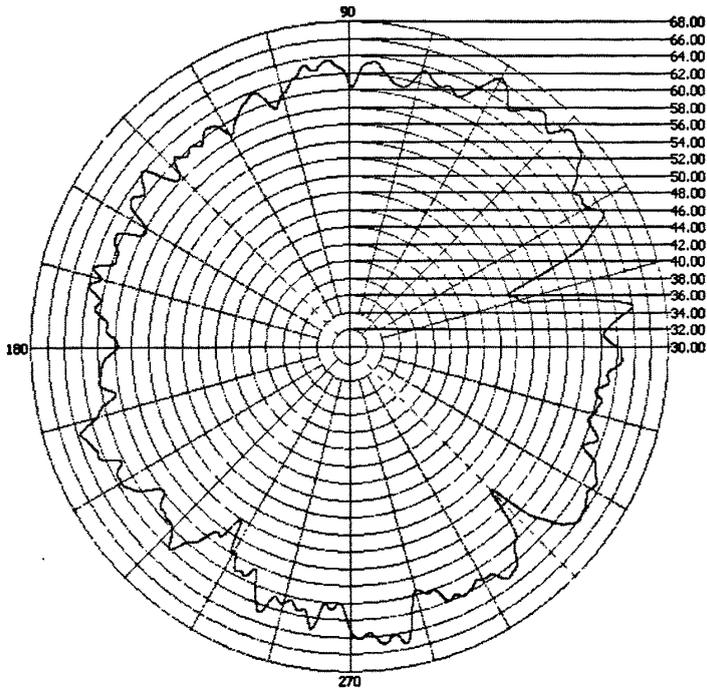


图4-9 砂轮外表面初始形状和圆度误差

粗整形和半精整形时电参数为 90V ，占空比为 $40:40\mu\text{s}$ ，输出控制量的量化参

数为： $K_U = \frac{n}{U} = -20$

粗整形和半精整形时每周期电极间隙调整量的范围为 $[-0.9, 0.9]\mu\text{m}$ 。

精密整形时电参数为 60V ，占空比为 $20:20\mu\text{s}$ ，控制量的量化参数为 $K_U = -30$ 。每周期砂轮与电极间隙调整量的范围为 $[-0.6, 0.6]\mu\text{m}$ 。

粗整形和半精整形过程中微进给工作台进给曲线如图4-10所示。

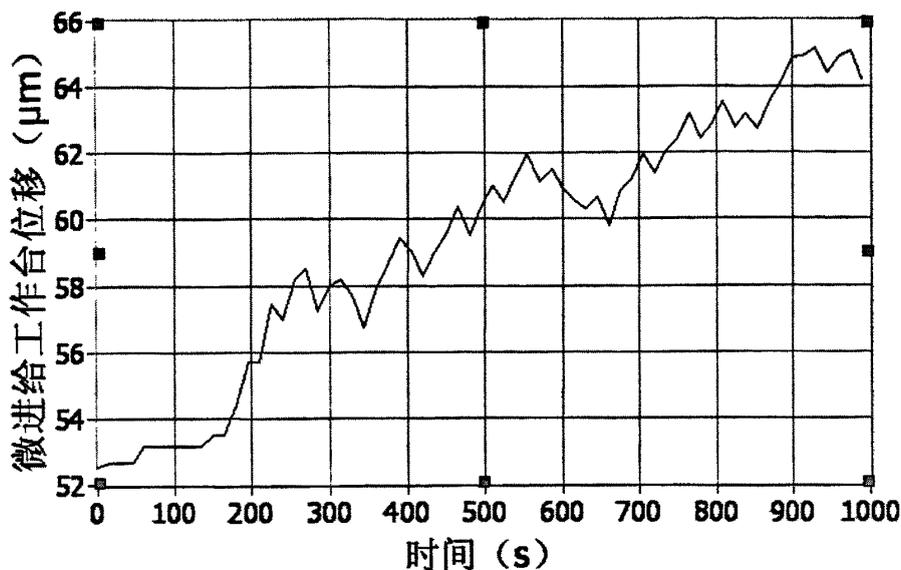


图4-10 粗整形和半精整形时微进给工作台进给过程

从图中可以看出，微进给工作台的进给方向在整形过程中经常发生变化，一方面是因为在圆度误差较大的情况下，最高点放电蚀除后次高点的情况未定，造成砂轮次高点处对间隙的变化比较敏感；另一方面可能是因为在加工状态较小时，经过模糊推理得出的实际间隙进给量大于该状态对应的实际需求进给量，间隙调整后造成放电状态变得剧烈，经过下一循环中的放电状态判断此次加工状态过大，需要微进给工作台进行下降调节，如此重复这个过程，使得微进给工作台的进给方向频繁变化，加工过程稳定性不好。但总体而言，微进给工作台的进给调节速度和放电蚀除造成的砂轮和电极之间间隙增大速度比较匹配，较少出现放电非常剧烈和非常微弱的现象，因此是基本满足粗加工要求的。

粗整形和半精整形约17min后，在砂轮轴向两处不同的位置测取砂轮的外表面形状，如图4-11中a)、b)所示，砂轮圆度误差分别为 $2.13\mu\text{m}$ 、 $2.66\mu\text{m}$ 。粗整形和半精整形过程的使得砂轮圆度误差大大减小。

精密整形过程的输出曲线如图4-12所示，从图中可以看出，在整形过程中微进给工作台的进给方向基本上没有改变，并且进给量随时间呈线性，一方面跟砂轮圆度误差很小有关，另一方面则是因此微进给工作台进给速度近似于砂轮与电极蚀除造成的间隙扩大速度，使得放电状态比较稳定，也使得整形过程稳定进行。

经过约7min的精密整形后在砂轮轴向两处不同的位置测取砂轮外表面的形状，如图4-13中a)、b)所示，砂轮的圆度误差分别为 $0.74\mu\text{m}$ 、 $0.82\mu\text{m}$ ，圆度误差和圆柱度误差均变得很小。

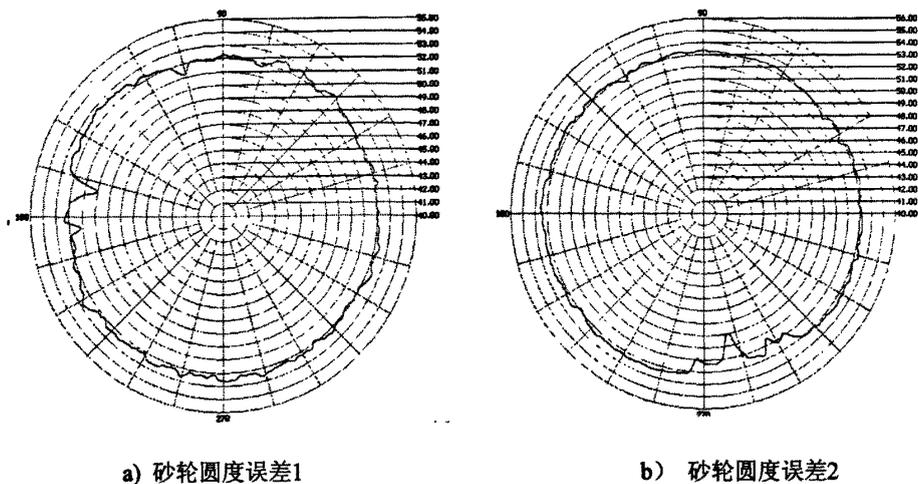


图4-11 粗整形和半精整形后砂轮的外表面形状

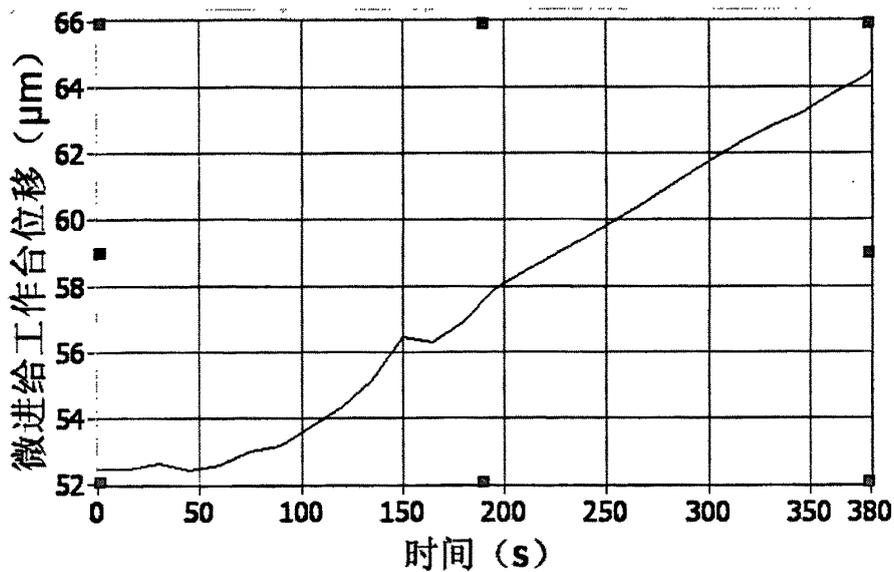


图4-12 精密整形时微进给工作台进给过程

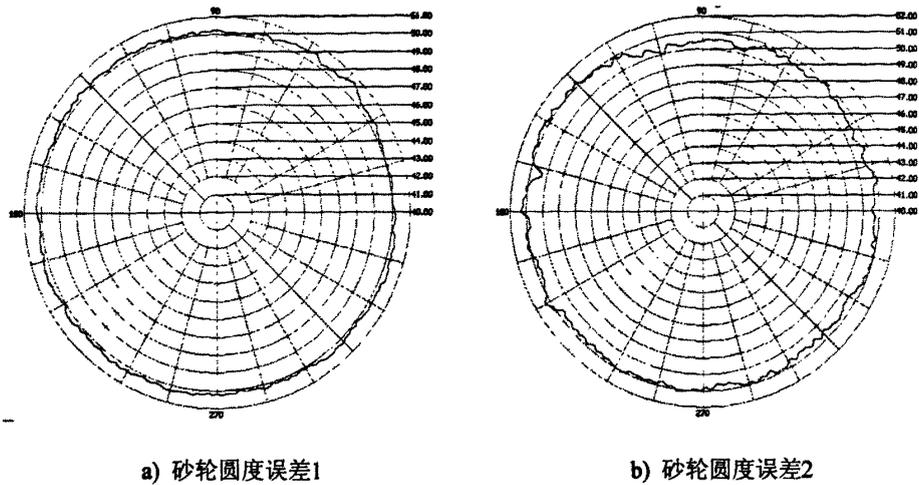


图4-13 精密整形后砂轮的外表面形状

4.6 本章小结

本章首先简要介绍了模糊集合和模糊关系、语言变量和模糊蕴含关系、基于规则库的模糊推理等概念，以及模糊控制系统的基本结构。其次根据电火花整形的特点，提取了表征电火花加工状态的两个参数：连续放电系数和不正常放电率，并通过实验建立表征参数同电极间隙调整量之间的关系。然后利用模糊控制理论，构建了能够实现自动调节电极间隙的电火花整形伺服控制系统。最后通过电火花模糊控制整形系统的实验，得出以下结论：

(1) 通过采取不同的电参数和进给量，整形过程分为注重整形速度的粗整形与半精整形阶段和注重整形精度的精密整形阶段。

(2) 通过粗整形和半精整形时微进给工作台的进给曲线可以看出，本文设计的模糊控制系统可以有效防止加工状态的突变，避免电弧、短路的产生，同时又可以减小脉冲出现空载状态的概率，使得加工状态能够稳定在目标范围内。

(3) 粗整形和半精整形以及精密整形时的微进给工作台的进给曲线表明，微进给工作台的进给速度和放电蚀除造成的间隙增大速度能够达到一个较好的匹配状态，即模糊控制系统能够针对砂轮圆度的不同状况基于规则库得出比较正确的决策，这就说明了规则库即知识库的是准确的，推理算法实用性较强。

(4) 砂轮整形后圆度误差的结果表明，模糊控制的电火花整形系统不但能够显著提高整形砂轮的效率，而且能获得更好的整形精度。

第五章 结论与展望

ELID 磨削技术具有使金属结合剂超硬磨料砂轮在磨削过程中始终保持锐利状态的特点, 已经成为开发研究超精密磨削技术的热点。金属基超硬磨料砂轮的修整技术成为影响 ELID 磨削效果的重要因素。电火花整形技术因其具有不受加工材料硬度影响、没有机械力作用等优点, 非常适合于金属基金刚石砂轮的整形过程。

5.1 全文结论

ELID 磨削对砂轮的圆度误差具有很高的要求。普通电火花整形砂轮系统经常出现加工状态波动过大、易出现损害性放电、整形效率低等问题。为了解决上述问题, 本文基于模糊控制理论构建了能够实现间隙自动调节的电火花整形砂轮系统。主要结论如下:

使用数据采集卡和 Labview 语言编写应用程序, 利用驱动程序中的函数编写了数据采集、数据输出程序。使用 Labview 语言编写的程序, 实现了对加工信号的实时显示、记录、分析, 控制数据的输出, 以及采集数据与输出数据控制的运行, 为以后电火花整形实验、ELID 磨削实验研究分析及控制系统的建立提供了支持。

对电火花放电状态进行了分析, 利用 Labview 语言编写程序对砂轮单周的所有脉冲的放电状态进行了统计, 为电火花整形的阶段划分提供了判据, 也为电火花加工的自动控制系统的实验提供了有效的手段; 通过实验, 利用鉴别程序提取出了能够表征电火花整形过程加工状态的连续放电系数(N)和不正常放电率(R)两个参数, 并建立了与电极间隙调节量的关系。

分析了普通电火花整形过程中出现的问题及原因, 将模糊控制理论运用到电火花整形的控制上来。基于建立的控制规则, 利用模糊推理算法, 将加工状态表征参数和电极间隙调节量对应起来, 构建了能够实现自动调节的电火花整形砂轮的伺服控制系统。该系统使得微进给工作台的进给速度能够同砂轮与电极的放电蚀除造成的间隙增大速度建立较好的匹配关系。与普通电火花整形过程相比, 既避免了损害性放电的出现, 砂轮获得了更好的圆度和圆柱度, 又极大的提高了整形效率。

5.2 课题展望

本文在 ELID 磨削用铸铁基金刚石砂轮的电火花整形的控制方面取得了一些创造性成果。由于时间和条件所限，在电火花整形砂轮和 ELID 磨削的控制方面还应该在以下几个方面开展工作：

(1) 由于电参数的影响直接影响到整形砂轮的整形精度和整形效率，因此需要根据整形过程中的加工状态能够实现对电参数的调节，并同已经建立的电极间隙调节系统进行融合，实现稳定高效的整形。

(2) 由于磨削过程中钝化膜的状态直接影响到 ELID 磨削的效果，而钝化膜的状态又跟钝化膜的生成状态和钝化膜的去除状态有关。可以从这两个方面入手，分别建立能够调节钝化膜生成的控制系统和调节钝化膜去除的控制系统，并对两者进行融合，以达到理想的磨削状况。

参考文献

- [1] Jun Qian, Wei Li, Hitoshi Ohmori, Precision internal grinding with a metal-bonded diamond grinding wheel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 05: 80~86
- [2] 关佳亮, 范晋伟, ELID 磨削技术在硬脆材料精密超精密加工中的应用, *北京工业大学学报*, 2001, 27 (4): 486~488
- [3] 任敬心, 康仁科, 史兴宽, 难加工材料的磨削, 北京: 国防工业出版社, 1999.2
- [4] 周曙光, 袁哲俊, ELID 镜面磨削技术—综述, *制造技术与机床*, 2001, 2: 38~40
- [5] D. J. Stephenson, D. Veselovac, S. Manley, J. Corbett, Ultra-precision grinding of hard steels, *Precision Engineering*, 2001, 25 (4): 336~345
- [6] 周志平, 刘劲松, 高温结构陶瓷的磨削去除机理及磨削加工技术, *工具技术*, 2004, 38 (8): 71~75
- [7] 王树启, 黄红武, 在线电解修锐 (ELID) 磨削液的成膜特性实验研究, *磨料磨具通讯*, 2006, 1:13~16, 7
- [8] 王平, 居冰峰, 铸铁砂轮电解氧化膜在 ELID 镜面磨削中的作用机理研究, *金刚石与磨料磨具工程*, 1996, 6: 25~28.
- [9] K. Katahira, Y. Watanabe, H. Ohmori, T. Kato, ELID grinding and tribological characteristics of TiAlN film, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42 (12): 1307~1313
- [10] Jung-Sik Heo, Yang Koo, Soung-Sam Choi, Grinding characteristics of conventional and ELID methods in difficult-to-cut and hardened brittle materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155~156, 1196~1200
- [11] 关佳亮, 王凡, 杨朝旭, 氧化铝增韧陶瓷的高效 ELID 精密磨削实验研究, *金刚石与磨料磨具工程*, 2006, 2: 68~70
- [12] 肖强, 朱育权, 王丽君, ELID 磨削试验电解参数对光学玻璃表面质量的影响研究, *表面技术*, 2006, 35 (2): 24~26
- [13] 张飞虎, 曹红波, 栾殿荣, GCr15 钢的 ELID 磨削性能实验研究, *金刚石与磨料磨具工程*, 2005, 6: 57~61
- [14] 沈剑云, 徐西鹏, ELID 磨削后石材的表面微观特性研究, *超硬材料工程*, 2005, 17 (1): 22~25, 30
- [15] 舒展, 脉冲电源改进及 ELID 磨削技术实验研究, 硕士[天津大学硕士论文], 天津大学, 2004

- [16] H. Liu, Z.J. Pei, Graham R. Fisher, ELID grinding of silicon wafers: A literature review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47 (3-4): 529-536
- [17] Jun Qian, Wei Li, Hitoshi Ohmori, Cylindrical grinding of bearing steel with electrolytic in-process dressing, *Precision Engineering*, 2000, 24 (2): 153-159
- [18] 关佳亮, 袁哲俊, ELID 镜面磨削技术—金属结合剂砂轮的研制, *制造技术与机床*, 2001, 3: 25-27
- [19] 邹峰, 于爱兵, 王长昌, 金属基金刚石砂轮修整技术的研究进展, *精密制造与自动化*, 2003, 2: 12-14
- [20] 滕燕, 盖玉先, 超精密磨削中的超硬砂轮修整技术, *航空精密制造技术*, 2000, 36 (1): 17-20
- [21] 王先逵, 马明霞, 金刚石微粉砂轮超精密磨削技术, *世界制造技术与装备市场*, 2003, 2: 83-87
- [22] 王平, 张春和, ELID 镜面磨削用铸铁超硬砂轮的快速精密整形研究, *哈尔滨工业大学学报*, 1995, 27 (6): 112-116
- [23] 莫时雄, 超硬磨料砂轮修整与 ELID 修磨技术, *金刚石与磨料磨具工程*, 2003, 5: 64-65
- [24] 冯宝富, 盖全文, CBN 砂轮的修整方法及其应用, *工具技术*, 2001, 35 (12): 8-11
- [25] 郭隐, 庄司克雄, 圆弧金刚石砂轮的修形及修锐技术研究, *制造技术与机床*, 2003, 4: 38-40
- [26] 王振明, 金刚石软弹性磨具的现状与发展, *石材*, 2000, 2: 11-13, 19
- [27] 马新毅, 赵波, 超声振动修整砂轮的效果, *新技术新工艺*, 2003, 4: 19-19
- [28] 樊全堂, 赵波, 砂轮磨削的超声修整效果, *机械研究与应用*, 2003, 16 (1): 21-22, 25
- [29] 傅文宏, 邓琦林, 胡德金, 金刚石砂轮的激光修整技术研究, *机械*, 2004, 31 (4): 16-18
- [30] 张建中, 左敦稳, 超硬磨料砂轮的激光修整新技术, 2001, 4: 1-4
- [31] 关佳亮, 刘顺周, 段慧琴等, 金属结合剂超硬磨料砂轮动态高效快速电火花电解磨削复合精密修形技术的研究, *金刚石与磨料磨具工程*, 2005, 3: 30-32
- [32] 朱波, 于海波, 金属基结合剂超硬砂轮的电火花修整, *工具技术*, 2000, 34 (12): 19-21
- [33] 奥山繁树, 蒋修治, 结合剂密实型超硬磨料砂轮的整形与修锐, *磨料磨具通讯*, 2004, 8: 5-7, 12
- [34] 舒展, 任成祖, 铸铁结合剂金刚石砂轮电火花整形影响因素初探, *航空精密制造技术*, 2006, 42 (2): 30-32

- [35] 曹凤国, 电火花加工技术, 北京: 化学工业出版社, 2004, 8
- [36] 赵万生, 先进电火花加工技术, 北京: 国防工业出版社, 2003, 10
- [37] 李翔龙, 殷国富, 石华刚, 电火花加工模糊驱动系统的研究, 机床与液压, 2003, 1: 209~210
- [38] 崔红, 庞中华, 刘军, 电火花加工控制技术综述, 电加工与模具, 2005, B04: 32~6
- [39] 赵万生, 董衍善, 何广敏, 专家系统及其在电加工计算机辅助编程中的应用, 电加工, 1997, 6: 7~10
- [40] 李翔龙, 殷国富, 高枝宝, 基于遗传算法的电火花加工参数优化, 现代机械, 2001, 3: 50~51, 47
- [41] Behrens A, Ginzl J, A comparison of different input values for gap-width controllers used in electro-discharge machining, Proc. ISEM XIII. Bilbao, 2001: 93~107
- [42] 裴景玉, 高长水, 智能模糊控制技术在微细电火花加工中的应用, 上海交通大学学报, 2001, 35 (12): 1830~1833
- [43] 罗元丰, 狄士春, 迟关心等, 基于神经网络的电火花加工过程的分类, 电加工与模具, 2001, 1: 14~16
- [44] 彭泽军, 王宝瑞, 陈辉, 基于神经网络的电火花加工工艺选择模型研究, 机械科学与技术, 2006, 25 (4): 394~397
- [45] 倪益华, 郑良桂, EDM伺服系统灰色预测控制器的研制, 电加工, 1994, 6: 19~21
- [46] 白羽, 雷凯, 模糊神经网络在电火花加工机中的应用, 机床与液压, 2005, 2: 23~24, 56
- [47] 马明建, 数据采集与处理技术, 西安: 西安交通大学出版社, 2005, 9
- [48] 沈兰荪, 数据采集技术, 北京: 中国科学技术大学出版社 1990, 1
- [49] 秦树人, 汤宝平, 虚拟仪器, 北京: 中国计量出版社, 2004, 1
- [50] 连苓, 唐一平, 卢秉恒, 电火花加工间隙状态的鉴别与检测方法, 电加工与模具, 2000, 2: 10~13.
- [51] 霍盟友, 张建华, 艾兴, 电火花加工间隙放电状态检测方法综述, 电加工与模具, 2003, 3: 17~20.
- [52] 耿春明, 赵万生, 赵家齐等, 电火花加工中间隙放电状态检测的一种新方法, 电加工与模具, 2001, 3: 272~9.
- [53] 高梅, 电火花脉冲加工及电参数对加工效率和加工精度的影响, 机械制造与自动化, 2006, 35 (4): 153~155
- [54] 李文卓, 于云霞, 微细电火花加工的关键技术分析, 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26 (3): 65~68
- [55] 戎月莉, 计算机模糊控制原理及应用, 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995

- [56] 李少远, 王景成, 智能控制, 北京: 机械工业出版社, 2005, 1
- [57] 胡建华, 汪炜, 高长水等, 模糊控制技术在电火花成形加工过程中的应用, 电加工与模具, 2000, 1: 20-23

发表论文和参加科研情况说明

发表的论文:

[1] 王志强, 任成祖, 高大晓, “基于 Labview 软件的电火花放电状态检测”,
《电加工与模具》, 2007 年 2 月

参与的科研项目:

本人参与了国家自然科学基金资助项目“在线电解修整超精密磨削砂轮表面钝化膜状态的表征与主动控制”（项目编号：50575161）

致 谢

本论文的工作是在我的导师任成祖教授的悉心指导下完成的,其中倾注了导师的大量心血。在将近三年的时间里,导师渊博的学识、严谨的作风和热情的教导让我铭记终生,受益匪浅。正是导师的循循善诱的教诲和无微不至的关怀,使得得以敲开科学研究的大门,窥得科研工作方法的一斑,并最终完成论文的写作。此论文完成之际,谨向尊敬的导师致以衷心的感谢。

靳新民老师悉心指导我们完成了实验室的科研工作,在学习上和生活上都给了我很大的关心和帮助,在此向靳老师表示衷心的感谢。

在实验室工作及论文撰写期间,高大晓博士对我的研究工作给予了热情帮助,实验室的其他同学在我的研究过程中给予了积极的支持,在此向他们表达我的感激之情。

最后要感谢我的父母及家人,他们的理解和付出使我能够在学校专心完成我的学业。