

# 基于商品机床的电火花展成加工可行性研究

## Research on Feasibility of Electrical Discharge Generating Machining Based on Commercial Machine Tool

南京航空航天大学机电学院 黄瑞华 云乃彰 陈建宁

**[摘要]** 介绍了电火花展成加工技术的研究现状, 阐述了商品电火花加工机床用于展成加工的优势。通过多次试验, 验证了在商品数控精密电火花成形机上进行电火花展成加工的可行性。

**关键词:** 电火花成形加工 展成加工 表面粗糙度 电极损耗 加工精度

**[ABSTRACT]** The research status of electrical discharge generating machining is introduced and the advantages of commercial machine tool used in generating machining are described. The feasibility of electrical discharge generating machining is confirmed through many experiments on precise commercial electrical discharge generating machine tool.

**Keywords:** Electrical discharge machining Generating machining Surface roughness Electrode wear Machining accuracy

电火花展成加工技术是指利用简单形状的电极(如棒状电极), 在数控系统的控制下按照指定的轨迹运动, 在不同位置通过电极与工件之间的放电而加工出所需工件的形状<sup>[1]</sup>。电火花展成加工是一种非接触加工, 电极和工件之间没有宏观切削作用力, 电极可视加工需要进行多种复杂的运动; 加工过程中多采用简单形状的电极, 故电极设计制备非常容易, 省去通常成形加工中必须制作复杂形状电极的麻烦; 一般说来, 放电区域较小, 且放电部位不断转移, 加工过程较“拷贝式”更为稳定, 能有效地避免持续电弧放电和短路现象的产生。由于电火花展成加工具有以上诸多优点, 因此电火花展成加工(亦称电火花铣削加工)的研究与应用越来越受到重视, 国内外的一些研究机构及厂商也研制出专用的电火花展成加工机床。

### 1 电火花展成加工的研究现状

自 20 世纪 90 年代后, 国内外诸多学者纷纷开始尝试使用简单形状电极进行电火花展成加工的研究。

比利时天主教鲁汶大学的 J.P.Kruth 和英国伯明

翰大学的 A.W.Duffill 对电火花腔槽加工工艺 (EDM Pocketing) 进行了大量试验, 试验涉及放电参数、加工面积、冲液条件等对材料去除率和电极损耗的影响<sup>[2]</sup>。

土耳其的 B.Bayramoglu 和英国的 A.W.Duffill 分别对使用球头和平头工具电极的电火花铣削 (EDM Milling) 工艺进行了试验研究, 并提出放电面积与材料去除率的关系。

日本的 T.Kaneko 和 Tsuchiya 等人对电火花铣削进行了卓有成效的研究, 率先建立了电火花铣削加工系统。

增泽隆久等人在利用简单电极进行三维微细电火花加工的研究中, 提出采用电极底面放电加工的策略, 推出了加工三维锥孔的电极损耗补偿公式, 在实际加工中取得较好的效果<sup>[3]</sup>。

国外有些国家也利用电火花铣削进行了制作三维结构的研究。如美国 Sandia 国家实验室制作出 10mm×10mm×5mm 的微型步进电机; 比利时天主教鲁汶大学还采用 EDM 方法加工出带力传感器的微钳、1mm×1mm 的“庙宇”结构; 日本东京大学的增泽隆久、余祖元采用 EDM 方法加工了球径为  $\phi 150\mu\text{m}$  的 1/8 球瓣、0.5mm×0.2mm×0.2mm 的汽车模具。

国外一些厂家推出了商品专用电火花展成加工机床, 或对原有的电火花成形机进行改进以实现一定的电火花展成加工功能。例如, 日本松下精机生产的 MG-ED82W 微型电火花加工机床可稳定加工  $\phi 10\mu\text{m}$  的微孔和宽度 10 $\mu\text{m}$  的槽, 在电极直径小于  $\phi 50\mu\text{m}$  时可加工深径比为 5:1 的孔。瑞士夏米尔公司 1993 年即推出了电火花铣削机床样机, 1994 年在日本展出其定型产品 ROBOMILL200, 该机床加工的表面粗糙度  $R_a$  为 1.0 $\mu\text{m}$ , 能够加工小至 1.1mm 的窄槽。日本三菱电机公司也于 1996 年推出了不需要成形电极的创成电火花加工机床 EDSCAN8, 采用独自开发的 EDSCAN 技术, 可在加工过程中自动在线补偿电极损耗。

国内在电火花展成加工技术方面的研究起步稍晚, 哈尔滨工业大学对电火花展成加工进行了多方面研究和探索, 利用电火花铣削技术加工出 IC 模具及

复杂三维曲面<sup>[4]</sup>;南京航空航天大学曾在两轴半数控电火花成形装置上对电火花仿铣技术进行了研究<sup>[5]</sup>。但国内大多数研究还只停留在实验室阶段,试验设备大多采用研制的专用机,且并未真正投入实用。虽然一些科研单位在电火花展成加工专机开发方面取得了进展,但与国外的技术水平相比,还有较大的实用差距。

## 2 商品电火花成形机床用于展成加工的优势

与国内尚处于实验室研制阶段的电火花展成加工专用样机相比,商品机床的优势主要表现在以下几个方面<sup>[6]</sup>:

(1)商品机床机械传动机构精度高、稳定性好。机床所选用的机械传动机构零部件多为知名专业厂商生产,能长期保持静、动态的高精度和高稳定性。

(2)运动数控系统功能强大。例如可多轴联动的商品数控电火花成形机,具有强大的数控编程系统,可通过软件造型进行加工仿真,最终完成加工。采用全闭环控制的数控机床可以消除由传动部件制造、装配造成的运动误差给加工带来的影响,从而获得很高的加工精度。这为进行零件微三维结构的加工提供了很好的硬件支持。

(3)电源性能稳定。虽然商品电火花成形机电源所能获取的单个脉冲放电能量可能没有某些微细加工专用机那么小,但是其电源性能稳定,放电输出能量均一,协调多种加工环境的自适应调节能力强,且可根据实际需要进行多种波形的放电加工,这些都是专机通常采用的 RC 电源无法比拟的。

(4)电极夹具精度高。商品机床多使用 3R、EROWA 等系列高精度夹具系统来装夹电极(包括微小简单电极在内),能在很大程度上减少装夹、定位等环节误差,并且操作便捷,重复性好。

(5)加工状态检测系统功能完善,伺服机构性能优异。在加工过程中,检测系统可以准确、及时地检测电极间状态,并能迅速做出反应。

(6)多样的控制策略。如一种机床电源的 SPAC 单元,具有短路脉冲清扫功能,能及时消除间隙内可能出现的短路、电弧,从而获得稳定的加工状态。

(7)丰富的工艺数据库。通过无数次的工艺试验,将电压、电流、脉宽、脉间等基本参数加以优化组合,可得到稳定而理想的工艺指标。

由上述特点可知,商品机床应用于展成加工时,在传动精度、定位精度、稳定性、能量控制、运动控制

多样性与灵活性等方面都更具优势。

## 3 电火花展成加工的可行性试验及结果分析

### 3.1 试验条件

为了验证商品电火花成形机展成加工的可行性及优越性,进行了基础试验研究。所用机床为瑞士夏米尔公司生产的 ROBOFORM 35 精密数控电火花成形机。工件材料为 45 钢,电极为直径  $\phi 1.2\text{mm}$  的紫铜棒,工作液为电火花成形加工专用液。电极和工件的质量在加工前后用 METTLER AE240 电子分析天平(精度为 0.1mg)称量。

用简单电极进行电火花展成加工主要有电极侧面放电和端面放电 2 种形式。采用侧面放电方式时,电极放电部位及尖角棱边处会出现不均匀损耗而影响加工精度,故试验采用电极端面放电形式进行。

试验集中研究粗、中、精 3 种电规准下电极转速和分层厚度对电极损耗、材料去除率、加工精度、表面质量的影响。

### 3.2 试验结果及分析

#### 3.2.1 粗规准模式试验

第一步试验采用粗规准模式进行加工,具体电规准见表 1。

表 1 粗规准主要参数

间隙电压/V	峰值电流/A	脉宽/ $\mu\text{s}$	脉间/ $\mu\text{s}$	主轴抬升间隔/s	加工间隙/ $\mu\text{m}$
24	6	200	100	0.8	85

在电火花加工过程中,电极损耗是影响工件几何形状精度的主要因素之一。而展成加工过程中电极损耗的大小又与分层厚度有着直接关系。试验主要从电极损耗、材料去除率、加工精度以及表面质量几个方面分析电火花展成加工的可行性。

#### (1) 电极损耗。

在利用电极端面放电进行展成加工时,电极的端部会出现损耗现象,其端部的尖角、棱边处出现一定的圆角损耗。由图 1 可以看出,随分层厚度增加,电极相对损耗随之增大,而且在不同的电极自身旋转速度下,仍能保持这种关系。在同样的分层厚度下,电极相对损耗与转速变化的关系视具体分层厚度而各不同。这可能是由于电极旋转能改善极间冲液条件,更有利于避免有害放电状态的持续发生,使得在一个脉冲放电时间内发生多次击穿,消耗在介质中的能量增加,

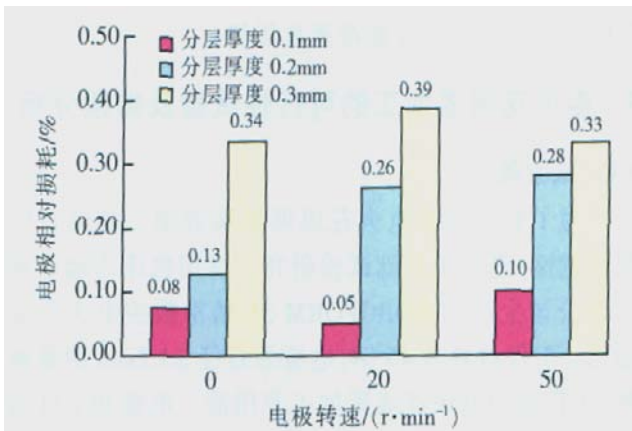


图1 粗规准下分层厚度与电极相对损耗的关系  
Fig.1 Relationship between hierarchy thickness and relative electrode wear in rough machining

电极表面覆积碳层厚度增大,从而使电极相对损耗减小;当电极转速较高时,介质裂变的碳和抛出的工件材料可能难以镀覆在电极表面,使积碳层厚度不再随电极转速的提高而变化,因而电极相对损耗稍有增加后渐趋稳定。

(2) 材料去除率。

材料去除率是电火花成形加工的一项重要工艺指标。图2反映了电极转速不同情况下,分层厚度与工件蚀除速度之间的关系:电极不旋转即转速为零时,随着分层厚度的增加,工件蚀除速度趋于增大,但工件蚀除速度与同等分层厚度下电极旋转时相比仍较低,并且电极形状有明显损耗性改变,对控制加工精度不利;电极转速在20r/min时,工件蚀除速度仍较低;随着电极转速进一步增大至50r/min,工件蚀除速度呈小幅增加。可以认为电极的旋转运动使极间冲液条件得到改善,有利于极间电蚀产物的排出,从而在很大程度上避免了短路等异常放电的影响,使加工速

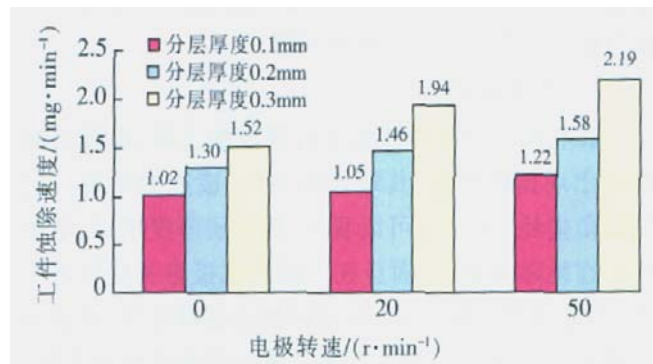


图2 粗规准下分层厚度对工件蚀除速度的影响  
Fig.2 Effect of hierarchy thickness on corrosion speed of component in rough machining

度得以提高。此外,随着分层厚度的增加,加工速度有所升高,不过分层厚度增大时,不利于粗规准下较多电蚀产物的及时排出,放电状态不够稳定。

(3) 加工精度。

电火花展成加工中,加工精度主要取决电极形状和尺寸损耗形成的误差,体现为放电去除深度的差异以及清角半径的变化。在利用电极端部进行展成放电加工时,电极端部尖角棱边处会出现损耗圆角,使得工件底侧清角不彻底。此外,由于电极底面也不可避免发生损耗,造成工件在深度方向也会出现误差。试验表明,可以采取更换电极的方式来保证加工精度。

(4) 表面质量。

本文仅从表面粗糙度来表征表面质量。表面粗糙度主要取决于单个脉冲放电能量:单个脉冲放电能量越大,表面粗糙度值越高。在分层厚度不同时,试验条件下所得到的表面粗糙度  $R_a$  均在  $3.5\mu\text{m}$  左右。

由以上试验结果可以看出,在粗规准加工模式下,只要选取适当的电规准、分层厚度以及电极自身旋转速度,就可顺利实现商品机床的电火花展成加工,获取一定的工艺指标。

3.2.2 中规准模式试验

第二步试验进行中规准模式下展成加工的可行性探索,具体电参数见表2。

试验所得数据如图3所示:分层厚度为0.1mm

表2 中规准主要参数

间隙电压/V	峰值电流/A	脉宽/ $\mu\text{s}$	脉间/ $\mu\text{s}$	主轴抬升间隔/s	加工间隙/ $\mu\text{m}$
24	3	100	100	0.4	46

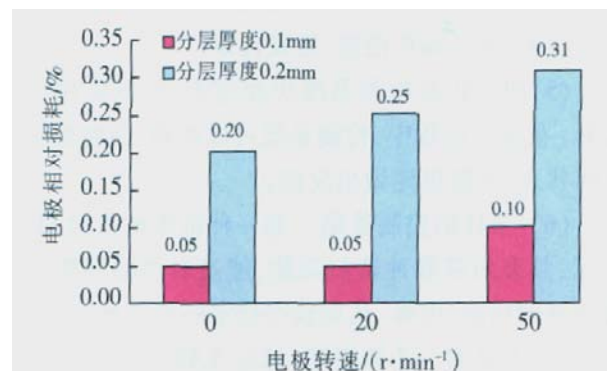


图3 中规准下分层厚度与电极相对损耗的关系  
Fig.3 Relationship between hierarchy thickness and relative electrode wear in middle finish machining

时,电极相对损耗较小,随着分层厚度增加,电极相对损耗随之增加,这是由于参与放电的电极侧面积增大,电极相对损耗也相应增大。分层厚度相同时,电极转速提高,相对损耗也明显增加。在电火花展成加工中,分层厚度的选取应综合考虑电规准、加工精度以及材料去除率等因素。

图4所示为不同电极转速情况下,分层厚度分别为0.1mm和0.2mm时的工件蚀除速度。分层厚度深时,材料去除率相对较高,而且随电极转速的增加,材料去除率有所增高。图5为中规准加工的工件表面SEM图,工件的表面粗糙度 $R_a$ 能达到 $3.2\mu\text{m}$ 。

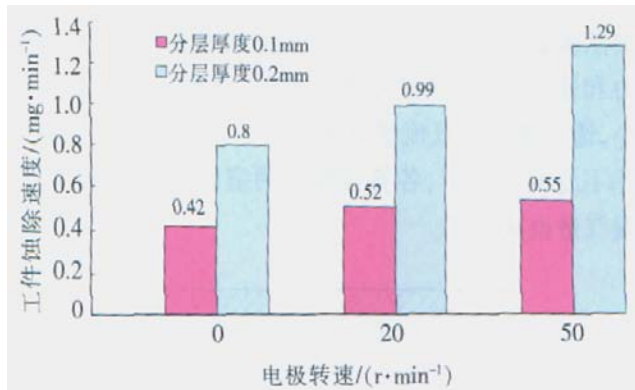


图4 中规准下分层厚度对工件蚀除速度的影响

Fig.4 Effect of hierarchy thickness on corrosion speed of component in middle finish machining

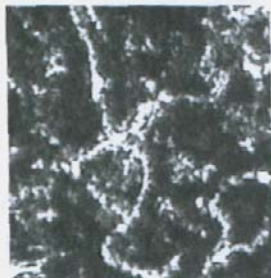


图5 中规准下工件表面SEM图像(×100)

Fig.5 SEM of component surface in middle finish machining (×100)

### 3.2.3 精规准模式试验

第三步进行精加工模式下的电火花展成加工探索,主要电参数见表3。

由表4可以看出,当分层厚度为0.05mm,电极转速分别为0、20r/min、50r/min时,电极相对损耗最低可达0.03%;表面粗糙度 $R_a$ 能达到 $1.4\mu\text{m}$ ;随着电极转速的提高,冲液条件随之改善,工件蚀除速度也随

表3 精规准主要参数

间隙电压/V	峰值电流/A	脉宽/ $\mu\text{s}$	脉间/ $\mu\text{s}$	主轴抬升间隔/s	加工间隙/ $\mu\text{m}$
26	2	100	100	0.4	20

表4 精规准下试验数据

分层厚度/mm	电极转速/(r·min <sup>-1</sup> )	电极相对损耗/%	工件蚀除速度/(mg·min <sup>-1</sup> )
0.05	0	0.03	0.21
	20	0.05	0.28
	50	0.03	0.38

着提高。试验证实,商品机床电火花展成加工能够获得非常理想的综合工艺指标。

由试验结果可知,综合考虑电极损耗、材料去除率、加工精度等因素,加工时电极转速以20r/min,分层厚度在粗、中、精加工时分别选择0.2mm、0.1mm、0.05mm为宜。由于加工一段时间后,电极侧面及尖角处会出现较为明显的损耗,对加工不利,故此时应采取更换电极的方式来提高加工精度,更换电极的周期应以30min(即电极行程约12mm)为宜。

## 4 结论

通过试验,分析了在粗、中、精3种加工模式下,商品电火花成形机用于展成加工时的电极损耗、生产率、加工精度以及表面质量等情况,结果表明:

(1) 利用商品电火花成形机进行电火花展成加工不但是可行的,而且具有很多优越性,可以非常简捷地实现电火花展成加工工艺。

(2) 在电火花展成加工中,要兼顾加工精度和生产率,只要选取适当的粗、中、精加工参数、分层厚度以及电极自旋转速度,就可以获得理想的加工效果。

(3) 由于更换电极比在线补偿电极损耗简便易行,而且商品电火花成形机使用的电极夹具精度高,电极重新装夹定位误差小,因此更适合采用更换电极的补偿措施。

## 参 考 文 献

- [1] 赵万生. 先进电火花加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 刘光壮, 杨晓东, 迟关心, 等. 电火花铣削加工技术及其发展状况. 电加工, 1998(1): 1-5.

(下转第88页)

应的数组标号相等,其余的数据位表示有效的周期数据,在每个通信周期中自动加1。从图5可见,实时监听站对周期数据的监听是成功的。

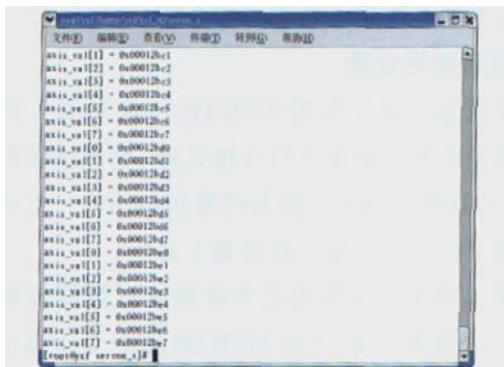


图5 周期性数据传输监听结果的截图  
Fig.5 Snapshot of cyclic data transmission monitoring result

### 3 结论

本课题的设计中在 SERCOS 环路中加入一个实时监听站,监听控制单元发往某个或某些伺服装置的数据报文,通过相应的分析处理,判断所发送的数据是否正确,并给出了 RTLinux 实时操作系统下实时监听程序的基本框架和重要模块的实现方法。在开发和调试基于 SERCOS 接口的控制系统时,可利用实时监听站重现控制单元发出的数据报文,克服了伺服装置缺乏数据显示能力、交互性差的缺点,使得控制单元的开发和调试过程真正成为有明确的输入和输出的可控过程。另外,本课题所设计和实现的实时监听站在对 SERCOS 控制系统进行在线故障诊断方面亦有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

[1] International Standard: IEC 61491, Electrical equipment of industrial machines—serial data link for real-time communication between controls and drives.

[2] 郇极,尹旭峰.数字伺服通讯协议 SERCOS 驱动程序设计及应用.北京:北京航空航天大学出版社,2005.

[3] 张玉彬,贾培发,赵雁南,等.基于 RTLinux 的串行实时通信系统 SERCOS 的设计.计算机工程与应用,2002(19): 153-155.

[4] 张承瑞,吴净.软件化嵌入式运动控制器.电气时代,2004(10): 62-64.

[5] 施华,陈一民,李超,等.基于 RT-Linux 的实时机器人控制器研究.计算机工程与科学,2002,24(6): 91-95.

(责编 微凉)

(上接第 81 页)

[3] 张天鹏,云乃彰,陈建宁,等.商品电火花成形机微细加工的应用探索.中国机械工程学会年会特种加工分会论文集,2005: 134-137.

[4] 衣建刚,刘正坝.电火花数控仿铣加工研究现状与展望.电加工,1998(1): 5-8.

[5] Bleys P, Kruth J P, Lauwers B. Sensing and compensation of tool wear in milling EDM. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149: 139-146.

[6] Fleischer J, Masuzawa T, Schmidt J, et al. New applications for micro-EDM. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149: 246-249.

(责编 晓霏)

\*\*\*\*\*

### 空客倡议中国合作伙伴 携手共建绿色航空业

2008年4月16日,空中客车中国公司在中国大饭店举行了“空中客车中国公司环保大会”,携手中国政府及中国民航业倡导发展绿色航空业,共同为保护生态环境做出积极贡献。此次环保大会由空中客车中国公司发起,国家环境保护部有关官员、中国国际航空股份有限公司有关领导、空中客车公司高级管理人员和航空业界人士出席了大会。

专程从总部赶来参加此次大会的空中客车公司公共及传播事务高级副总裁 Rainer Ohler 先生讲解了空中客车公司的环保理念和愿景,并向中国合作伙伴、供应商和有关各方发出倡议,号召各方为把航空业建设成为环保型行业共同努力。

(本刊记者 依然)

\*\*\*\*\*

### 我国下半年发射神舟七号 将释放伴飞小卫星

中国载人航天工程有关负责人近日表示,我国将于今年下半年实施神舟七号载人航天飞行任务,实现航天员首次空间出舱活动。

目前,航天员出舱活动有关的关键技术已经突破,飞船、火箭等产品研制试验进展顺利,空间应用、发射场、测控通信、着陆场等系统准备工作稳步推进,航天员正在进行紧张训练。

我国载人航天工程实施 16 年来,已完成 4 次无人飞行和 2 次载人飞行。这次进行航天员空间出舱活动,其技术难度和风险性很大,无论是技术攻关、产品研制、航天员训练,还是任务组织指挥,都面临前所未有的挑战。

(本刊记者 微凉)