

数控电解铣削加工机床研制*

张传运^{1,2}, 陈晓磊^{1,2}, 刘桂贤^{1,2}, 张永俊^{1,2}

(1. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006;

2. 广州市非传统制造技术及装备重点实验室, 广州 510006)

[摘要] 针对航空、医疗等领域内一些中小尺寸零件复杂曲面和窄深型腔的加工需求, 研制了数控电解铣削加工机床, 包括: 设计了带 X/Y/Z 移动和 C 轴旋转的 4 轴联动机床结构, 可实现 $2\mu\text{m}$ 的重复定位精度; 开发了具有快速短路响应及泄能模块的高频脉冲电解电源, 并能够与电解机床控制系统实时通信; 订制了过滤精度 $0.5\mu\text{m}$, 压力、温度可调可控的电解液循环过滤系统。最后以实例进行验证, 采用圆柱电极以电解铣削方式在 304 不锈钢上加工出宽 1.4mm、深 8mm、 $R_a 0.8\mu\text{m}$, 侧壁陡峭的大深宽比窄深盲槽, 加工过程稳定, 机床达到了预期设计目标。

关键词: 数控机床; 电解铣削; 脉冲电源; 大深宽比窄深盲槽; 4 轴联动

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.11.061



张传运

博士研究生, 主要研究方向为电解工艺研究及装备设计。

随着科技的进步和发展, 越来越多高强度材料、复杂结构、微细形状出现在航空航天、医疗机械、汽车制造等领域的产品零件中, 这对传统机

械加工刀具的强度、刚度和耐磨性都带来了严峻的挑战^[1-2]。电解工艺是利用阳极溶解原理进行的加工, 具有高加工效率、高表面质量、工具无损耗、不受材料硬度影响等优点, 突显了其独特的技术优势^[3]。

传统的电解加工采用成形阴极以拷贝方式进行加工, 但成形阴极的轮廓设计及制造困难, 需要反复试验 - 修正, 制造周期长, 再加上阴极形状复杂、加工面积大, 对电解电源容量要求较高, 而且拷贝式加工过程中, 已加工区域表面易受二次电解, 影响加工精度。电解铣削是以简单工具按照数控指令对工件型面进行加工, 其工作方式完全类似于机械铣削, 但加工机理为阳极溶解, 兼具了数控和电解的优势, 因其柔性大、工具制作简单且不损耗、成形精度高、不受工件硬度影响等, 已经成为电解加工的一个重要分支。

与一般切削机床及电火花机床相比, 电解机床工作环境恶劣, 设备易腐蚀, 电气受干扰, 电解液的温度、压力、浓度需要精确控制, 脉冲电源

输出电压的稳定性、波形规整性以及电源短路保护和泄能模块的可靠性要求高。

国内在电解机床研制方面已取得显著成绩。南京航空航天大学学者针对发动机叶片和整体叶盘的加工, 分别研制出了 3 轴联动和 6 轴分组联动的电解加工专用机床; 合肥工业大学的学者针对大型零件设计制作了卧式 3 轴联动的 20000A 大型电解加工机床; 西安工程大学的学者针对深孔膛线螺旋槽深、管身长、加工电流大等特点研制了卧式电解加工专用机床; 广东工业大学的学者针对大导程滚珠螺母内滚道的加工, 研制出了龙门式 4 轴两联动的电解加工专用机床; 同时, 其他高校针对不同用途也开发了各种不同类型的电解加工机床, 均取得良好的应用效果^[4-7]。

在国外, 美国 GE 公司和德国 EMAG 公司都已研制出了用于加工发动机叶片的 5 轴数控电解加工机床^[8-11], 但是价格极其昂贵。俄罗斯与日本也研制了各自的数控电解加

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51775119); 广东省科技计划项目(611296321148); 博士后科学基金项目(2016M600640)。

工机床。由于电解机床均针对专门用途开发,其结构特点各不相同,但总体来说在防腐、绝缘上下足了功夫,在条件和工艺许可的情况下都尽可能采用脉冲电源和振动装置。

大深宽比窄深槽常出现在航空、医疗、汽车等领域的重要零部件上,如航空发动机涡轮盘榫槽、变量泵的转子槽、窄深油槽等,一直是机械加工领域中的难题^[12-14]。传统铣削加工中,微铣刀尺寸小、刚性差,导致加工过程刀具损耗大,加工质量难以保证,同时加工效率极低^[15]。若采用电火花加工方法,窄深槽不易排屑,工具电极有损耗,无法保证加工的一致性,影响加工精度^[16]。本文针对中小尺寸零件的加工,设计了一种带X/Y/Z移动和C轴旋转的4轴联动数控电解铣削机床,并就该机床的整体方案设计、运动机构选型、电解液循环系统要求以及脉冲电源和控制系统研制进行了介绍,最后在304不锈钢上以电解铣削方式加工大深宽比窄盲槽,对机床性能进行了初步验证。

数控电解铣削加工机床的总体方案

数控电解铣削机床主要由4部

分组成:机床本体床身及运动机构、电解液循环系统、高频脉冲电解电源和控制系统,如图1所示。机床运动机构通过控制系统实现精准的定位和轨迹运动,电解电源为加工提供所需的能量,电解液系统提供导电和化学反应介质。

1 机床设计

机床结构可以采用龙门式、单立柱式等,龙门式刚性好,但操作主要在正面,其他3面均受阻挡;单立柱结构中,机床的左、前、右3面可以进行工件的安装、拆卸及加工过程观察。由于本机床为数控电解铣削机床,阴极尺寸较小,刚性易于满足,从使用方便性上考虑,机床设计为单立柱结构(该机床构造见图2,机床结构和运动机构技术指标见表1)。

与常规机床相比,电解加工机床对防腐、密封、引电、绝缘、排气等要求高,因此床身、立柱均采用大理石,外壳钣金和工作台面采用316不锈钢,导轨保护采用风琴防护罩。

在立柱所在面的立柱两侧分别布置进液口、进电铜排和抽风口,考虑到主要针对中小件加工,X、Y行程不大,故将X、Y移动轴与旋转C轴集成为模组,整体安装在立柱上的

Z轴上,而非下面工作台上,减小电解液对运动部件的腐蚀。总体来说机床结构有如下特点:

(1)机床刚性好。机床主体采用大理石立柱,刚性好、变形小,同时通过平衡气缸来保证主轴头在Z轴任意位置上的平衡。

(2)精度高。X、Y与Z轴均采用直线电机,配置高精度光栅尺实现全闭环运动控制,旋转轴C采用DD马达,可以实现高分辨率控制的旋转运动。

(3)密封性好,耐腐蚀性强。机床的基体采用大理石材质,工作台材料选用316L不锈钢;X、Y与C轴采用集成封闭式模组,模组外壳也选用316L不锈钢材料,同时在工作区间安装抽气装置,避免电解液及雾气进入运动机构,提高运动机构的寿命。

2 电解液过滤循环系统

电解加工中电解液通过电化学反应直接参与加工,其浓度、温度等参数影响电导率,从而直接影响蚀除速度;其压力、流量大小影响到电蚀产物的冲刷、流场分布等,也间接影响电解加工过程,因此其重要性不言而喻。本机床配置了一套性能较为完善的电解液循环过滤系统,具有加热、冷却功能及压力、流量调节功能,并具备亚微米级的过滤精度,不仅可以保证电解液参数的稳定及可调,而且能避免电解产物混入加工间隙内引起短路,这对小间隙精密电解加工

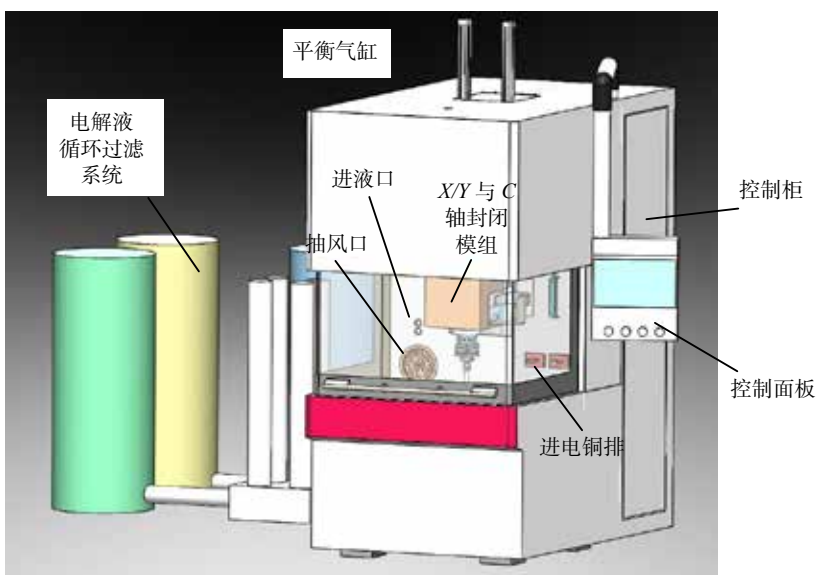


图1 数控电解加工机床示意图

Fig.1 Diagram of CNC electrochemical milling machine tool

表1 机床结构和运动机构技术指标

参数	数值
工作台(长×宽)/mm	800×800
X行程/mm	10
Y行程/mm	10
Z行程/mm	500
X、Y、Z轴运动最小分辨率/μm	0.1
X、Y、Z轴定位精度/μm	5
X、Y、Z轴重复定位精度/μm	2
C轴旋转运动分辨率/(°)	0.002

尤为重要,同时系统可以收集、压滤电解残渣,实现绿色加工。系统技术指标如表 2 所示(电解液为 NaNO_3 溶液)。电解液循环系统主要包括:配备溶液的原料罐(同时有收集加工排出工作液的作用)、过滤浊液的陶瓷过滤系统、工作液恒温控制系统(制冷系统与加热系统)、提供工作液的清液罐和压缩滤渣的板框压缩机以及为工作液循环提供动力的工作泵。电解液循环系统材料整体选用 304 不锈钢,控制操作界面和装配实物如图 3 所示。

3 高频脉冲电解电源的研制

电解电源是电解加工必不可少的核心组成部分,其发展历经了从直流到低频再到高频的过程,国内外的研究都已证明了高频窄脉冲电解电源能获得更高的加工精度和更稳定的加工过程。对高频脉冲电源的要

求是输出稳定,电压、频率、占空比可调,具有短路保护和泄能模块,且能实现与数控系统的联动。本项目采用课题组的专利技术,开发了基于可编程片上系统(SOPC)的脉冲电解加工电源,主电路采用“逆变+直流斩波+能量释放模块”的拓扑结构,以 FPGA 作为主控芯片,利用数字 PI 实现稳压与稳流,电源全部数字化;同时,结合电解加工工艺特点,电源可以设置电流或其上升率阈值作为短路保护触发信号,另外电源设计了 RS232 接口、485 接口,方便与机床控制系统和振动装置的协同控制。在一旦出现意外短路情况时,电源可自行切断输出并开通泄能模块,同时给机床数控系统发出停机信号;对振动装置来说,电源可以接收其位置信号,在工具抬起时关断,工具下降时通电。研制的高频脉冲电解电

源技术指标见表 3,实物见图 4。

4 控制系统

机床采用台湾新代 10MA 数控系统,能实现本机床要求的 4 轴联动控制,并且具有较丰富接口,能实现与电源的集成控制和加入电对刀定位模块。在以上自主研发的脉冲电源基础上,通过 Modbus 通讯协议和 RS232 接口的连接实现电源与电解机床控制系统的实时通信功能,从而

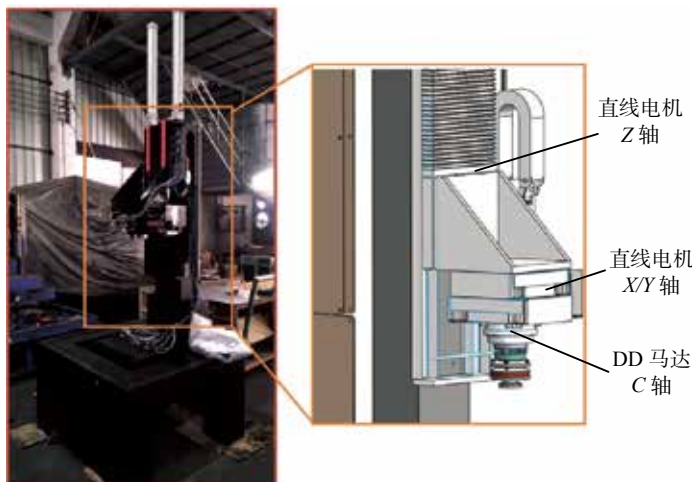


图2 电解铣削加工机床
Fig.2 Electrochemical milling machine tool



图4 高频脉冲电源
Fig.4 High frequency pulse power supply

表2 电解液循环过滤系统技术指标

参数	数值
处理能力 / $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	10
过滤精度 / μm	0.5
压力控制范围 /MPa	0~2 (连续可调)
压力控制精度 /MPa	± 0.01
温度控制精度 / $^{\circ}\text{C}$	± 1

表3 脉冲电解电源技术指标

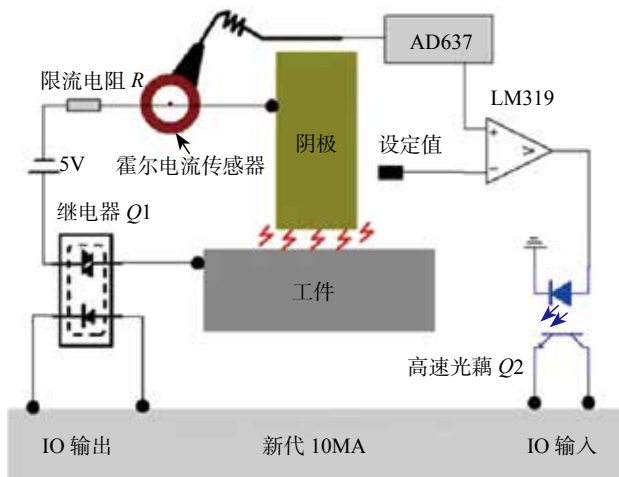
参数	数值
额定峰值电流 /A	500
输出电压 /V	0~30 (连续可调)
输出频率 /kHz	1~20 (连续可调)
占空比 /%	1~90 (连续可调)
快速短路保护 / μs	9



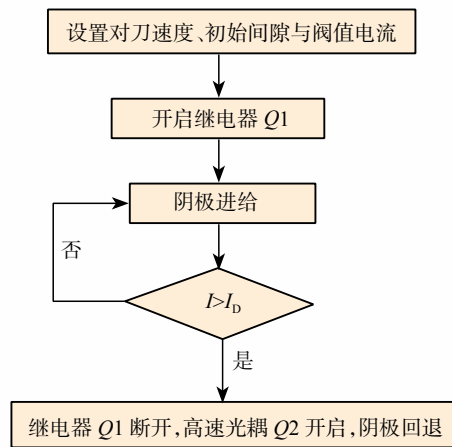
图3 电解液循环过滤系统
Fig.3 Electrolyte circulating filtration system

达到电解电源与机床运动控制系统集成。

电对刀定位模块是电解加工机床的重要组成部分,该模块的性能直接影响到加工工件的定位,从而影响电解加工的精度。如图 5 (a) 所示,本文采用低电压下的干式对刀方式,即在阴极与工件对刀时,加工间隙暴露于空气之中,阴极与工件接触之前,对刀电路中无任何电流通过。因此,只需要通过检测阴极与工件接触前后的电压突变即可确定电极接触点的位置。设计的电对刀控制的操作过程如图 5 (b) 所示,首先设定好阴极进给的速度与加工间隙,然后使能新代 10MA 扩展卡的输出 IO 脚控制继电器 Q1 来接通电对刀电路,阴极以设定的速度进给。在这个过程中,霍尔电流传感器一直在检测对刀回路的电流值,当检测到对刀回路的电流值 I 大于阈值电流 I_D 时,比较器 LM319 输出使能高速光耦,当系统检测到新代 10MA 扩展卡对应的输入 IO 脚状态改变时,控制继电器 Q1 立即断开,阴极停止进给,同时以一定速度回退到设定的加工间隙位置。



(a) 电对刀控制电路示意图



(b) 电对刀的控制流程

图5 电对刀控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of electric control tool

大深宽比窄深槽电解铣削加工试验

1 加工试验准备和试验参数

为了验证所研制的数控电解铣削机床的结构合理性和加工稳定性,在 304 不锈钢上进行了电解铣削大深宽比窄深盲槽的工艺试验。

本试验工件选取长宽高为 100mm × 30mm × 20mm 的 304 不锈钢块,采用外径 1mm 不锈钢作为工具阴极,电解液为 1.5mol/L 的 NaNO₃ 溶液,工作液压强为 0.9MPa,加工电压为 14V。加工示意图如图 6 所示,首先驱动 Z 轴向下进给,在工件上预制出所需深度盲孔,然后再驱动 X 轴将棒状阴极从盲孔开始横

向进给,进行盲槽加工。本次试验设计加工深度为 8mm,相同试验参数下进行 3 次盲槽的电解铣削加工。

2 试验结果与讨论

所加工的大深宽比窄深盲槽如图 7 所示。该窄深盲槽的宽度为 1.4mm,深度为 8mm,加工长度为 15mm。如图 7 (a) 所示,窄深盲槽在工件表面上的轮廓平整,宽度均匀。图 7 (c) 分别为窄深盲槽横向加工开始、中间和加工结束的剖面图,可以看出窄深盲槽的侧壁非常陡直,成形精度很高,一致性较好。将窄深盲槽纵向剖开,见图 7 (b),分别选取根部的区域 1、中间区域 2、上边缘部位区域 3,测量所选区域侧壁面粗糙度分别为 R_a 0.8884 μ m,

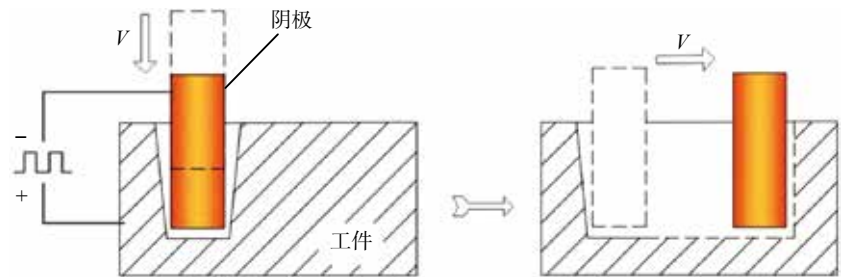
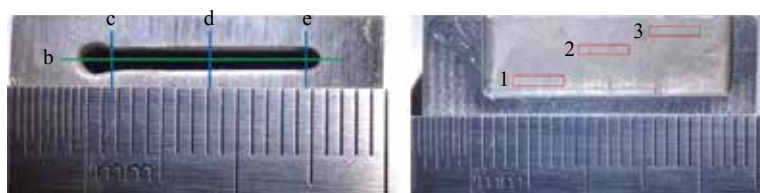


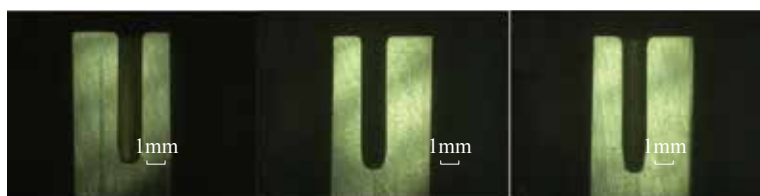
图6 大深宽比窄深槽电解铣削加工示意图

Fig.6 Diagram of large depth width ratio slot by electrochemical milling



(a) 加工整体图

(b) 纵向截面图



(c) 超景深显微镜下不同位置窄深槽的横向截面图

图7 大深宽比窄槽加工图

Fig.7 Diagram of large depth width ratio slot

$R_a 0.7228\mu\text{m}$ 、 $R_a 0.7313\mu\text{m}$ ，平均值为 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ，如图 8 所示。在整个加工过程中，无短路、火花和拉弧现象发生，机床运动平稳、控制可靠，电源与电解液系统工作正常。另外，在加工过程中抽风口排气扇可以及时将加工区间的电解液雾气排出，加工后抽风口处出现电解质结晶现象，而其他钣金部位较少，可以起到有效的防腐蚀作用，证明了结构设计的合理性。

结论

根据特定加工需求，研制了一台 4 轴联动高精度电解铣削加工机床，充分考虑电解机床的工作特点，在防

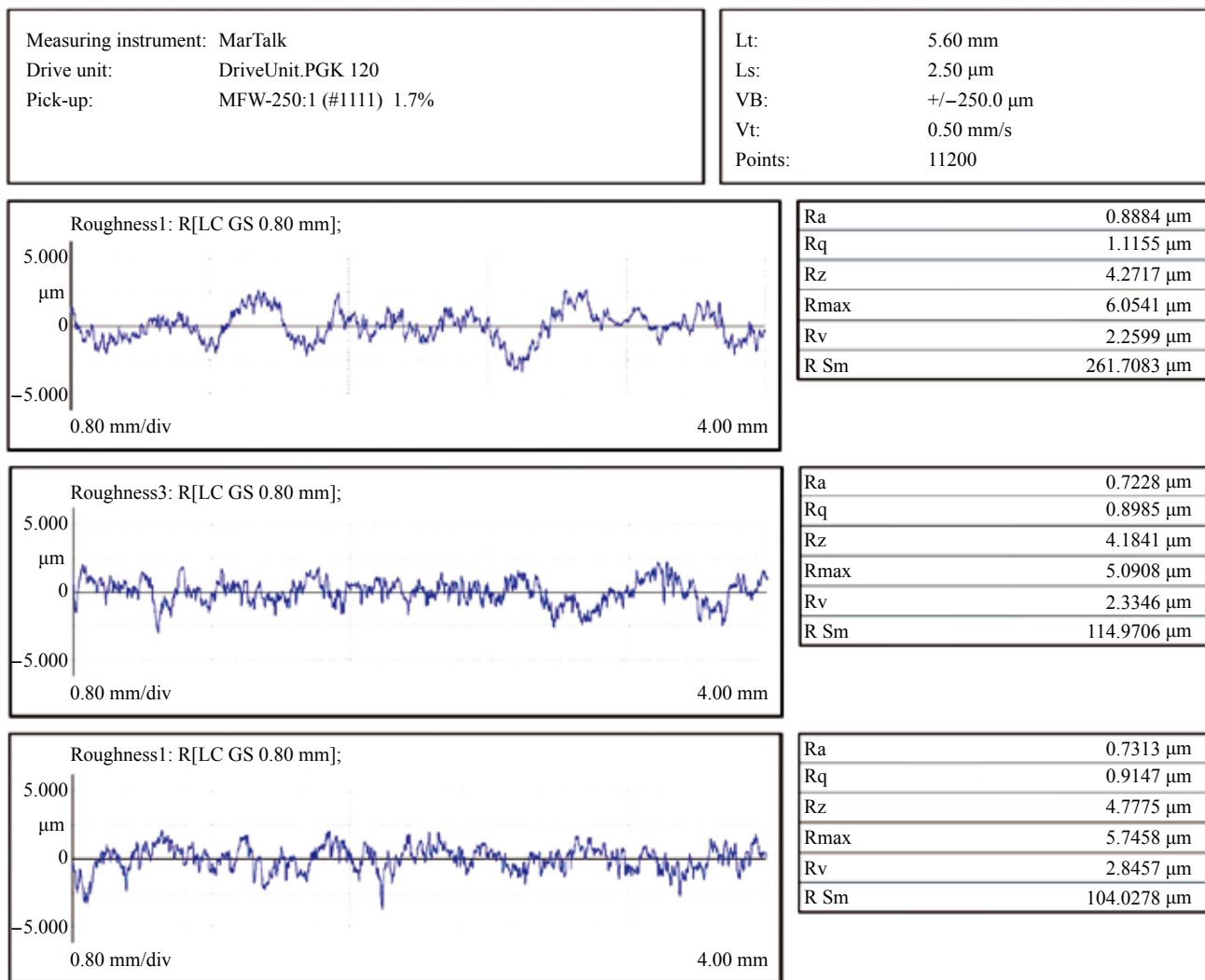


图8 大深宽比窄深槽粗糙度测量结果

Fig.8 Roughness test result of large depth width ratio slot

腐、绝缘、通气、引电、供液上精心设计,尤其是工作台上不布置任何运动部件,创新地将 X/Y 移动台和旋转 C 轴集成为封闭模组固定在 Z 轴上,有效地减轻了电解液及雾气对运动部件的腐蚀;自行研制的数字化高频脉冲电解电源和定制的电液系统在加工中运行稳定可靠;在试验过程中电解液水雾能够及时通过抽风口排出,加工后抽风口处出现电解质结晶现象,而其他钣金部位较少,有效达到防腐效果,证明了结构设计的合理性,整套设备性能达到预期目的。未来将通过更为复杂零件,更多种类、更长时间的加工进一步检验机床的稳定性、可靠性和加工质量。

参考文献

- [1] 傅秀清,康敏,杨勇. 基于 PMAC 5 轴数控电解加工机床的设计[J]. 电加工与模具, 2009(2): 62-65.
- FU Xiuqing, KANG Min, YANG Yong. Design of five-axis NC electrochemical manufacturing machine tool based on PMAC[J]. *Electrochemical & Mould*, 2009(2): 62-65.
- [2] 张海燕,张连锋. 航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述[J]. 航空制造技术, 2013, 56(23/24): 38-41.
- ZHANG Haiyan, ZHANG Lianfeng. Development overview of aeroengine integral blisk and its manufacturing technology at home and abroad[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(23/24): 38-41.
- [3] 王建业,徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- WANG Jianye, XU Jiawen. The principle and application of ECM[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [4] 史先龙,朱荻. 叶片电解加工机床的研制[J]. 机床与液压, 2006(1): 27-28.
- SHI Xianlong, ZHU Di. Development of electrochemical machine tool for blade machining[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(1): 27-28.
- [5] 李博,范植坚. 电解加工机床主轴旋转密封结构设计[J]. 机械设计与制造, 2017(5): 89-91.
- LI Bo, FAN Zhijian. The design of with dynamic seal structure in ECM machining tool[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(5): 89-91.
- [6] 任欣欣,曹煜明,陈远龙. 2 万安培大型电解加工机床结构设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 123-126.
- REN Xinxin, CAO Yuming, CHEN Yuanlong. Design and analysis of 20000 ampere large electrochemical machine tool[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013(10): 123-126.
- [7] 刘桂贤,张永俊,罗红平,等. 大导程滚珠螺母滚道电解加工机床[J]. 电加工与模具, 2016(1): 59-66.
- LIU Guixian, ZHANG Yongjun, LUO Hongping, et al. Electrochemical machine tool for manufacturing large-lead ball nut raceway[J]. *Electrochemical & Mould*, 2016(1): 59-66.
- [8] KOZAK J, BUDZYNSKI A F, DOMANOWSKI P. Computer simulation electrochemical shaping (ECM-CNC) using a universal tool electrode[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 76(1-3): 161-164.
- [9] KOZAK J. Computer simulation system for electrochemical shaping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109(1-3): 354-359.
- [10] 徐家文,王建业,田继安,等. 电解加工在航空制造中的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2002, 45(4): 27-30.
- XU Jiawen, WANG Jianye, TIAN Ji'an, et al. Application and development of electrochemical machining in the aviation manufacture[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002, 45(4): 27-30.
- [11] 陈远龙,张正元. 电解加工技术的现状与展望[J]. 航空制造技术, 2010, 53(5): 47-50.
- CHEN Yuanlong, ZHANG Zhengyuan. Current status and prospect of electrochemical machining technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 53(5): 47-50.
- [12] 张晓东,韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(15): 50-57.
- ZHANG Xiaodong, HAN Ce. Research review of deep hole machining technology for complex shell part[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(15): 50-57.
- [13] MISHRA K, DEY D, SARKAR B R, et al. Production experimental investigation into electrochemical milling of Ti6Al4V[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 113-123.
- [14] 胡飞嘉. 窄深油槽加工工艺分析[J]. 金属加工(冷加工), 2018(13): 40-41.
- HU Feijia. The analysis of processing technology on narrow deep oil tank[J]. *Machinist Metal Cutting*, 2018(13): 40-41.
- [15] 白艳艳,吕明,李文斌,等. 窄深槽加工技术的研究综述与展望[J]. 制造技术与机床, 2014(10): 45-49.
- BAI Yanyan, LÜ Ming, LI Wenbin, et al. Overview and expectation of research on narrow-deep-groove machining technology[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2014(10): 45-49.
- [16] YAHAGI Y, KOYANO T, KUNIEDA M, et al. Micro drilling EDM with high rotation speed of tool electrode using the electrostatic induction feeding method[J]. *Procedia CIRP*, 2012(1): 162-165.

通讯作者:张永俊,教授、博士生导师,研究方向为特种加工新工艺、新技术、新装备,E-mail: yjzhang@gdut.edu.cn.

Development of CNC Electrochemical Milling Machine Tool

ZHANG Chuanyun^{1,2}, CHEN Xiaolei^{1,2}, LIU Guixian^{1,2}, ZHANG Yongjun^{1,2}

(1. School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Key Laboratory of Non-Traditional Manufacturing Technology and Equipment, Guangzhou 510006, China)

[ABSTRACT] To satisfy the requirements for manufacturing complex surfaces and narrow deep cavity parts in aviation, medical, automobile and other industries, a CNC electrochemical milling system is developed, including: design of a machine tool with four-axis linkage (axis $X/Y/Z$ and rotating axis C) at a repositioning accuracy of $2\mu\text{m}$; development of a pulse power supply with high frequency, fast short circuit response and communication with the control system in real-time; an electrolyte circulating filtration system with $0.5\mu\text{m}$ filter precision, controllable pressure and temperature. Finally, a tubular electrode was employed for electrochemical milling high depth to width ratio structure on 304 stainless steel surface with this system. A narrow slot with the width of 1.4mm , depth of 8mm , and surface roughness of $R_a0.8\mu\text{m}$ was successfully manufactured. The machining process was stable and the side wall of the slot was steep. It indicated that the developed system has reached the desired design goal.

Keywords: CNC machine tool; Electrochemical milling; Pulse power supply; Large depth width ratio slot; 4-axis linkage
(责编 逸飞)

(上接第 54 页)

Real-Time Cutting Tool State Recognition Based on Cutting Force Signals, Geometric Information and Process Information

HUA Jiaqi, LI Yingguang, LIU Changqing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Real-time recognition of cutting tool states plays an important role to improve the efficiency and quality and reduce the cost of CNC machining. For complex parts with single-piece or small batch production, the geometry and cutting parameters in the machining process are constantly changing which makes a great challenge for accurate recognition of cutting tool state. To address the above problems, this paper presents a cutting tool state recognition approach based on cutting force signals, geometric information and process information. The cutting force signals of different tool states are collected and analyzed. The time analysis and time-frequency analysis methods are used to extract the features of cutting force signals. Associated with the machining process information and the geometric information of the parts, the input vector is established. Cutting tool state recognition model based on neural network is established and trained. The real-time recognition of cutting tool state is realized with the neural network model during the actual machining process. Experiments show that the approach can solve the real-time recognition of cutting tool states.

Keywords: Cutting force; Cutting tool state; Neural network; Real-time recognition; CNC machining
(责编 李丹)

(上接第 60 页)

Construction of Smart CNC for Real-Time Optimization of Milling Parameters

JIN Hongyu, FU Yunzhong, FU Hongya, HAN Zhenyu

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] Intelligent CNC machine tool is production terminal equipment of smart factory in the era of Industries 4.0. Technical implementation of network, intelligence and collaborative manufacturing of this machine tool can not do without open smart CNC which has high stability and precision retaining ability. In this paper, aimed at real-time optimization of cutting parameters during milling process, functional software modular is designed and developed in the platform of open modular architecture CNC. The algorithm of intelligent control is integrated into system coordinator modular of CNC, which could adjust spindle speed and feed rate in real-time through processing cutting force signals. The effectiveness of proposed smart CNC is validated by thin-wall cutting experiments.

Keywords: Smart machine tool; Smart CNC system; Real-time optimization; Intelligent control algorithm; Sensor
(责编 逸飞)