

引文格式: 施涛, 邱明波, 卢攀, 等. 桌面型往复慢走丝电火花线切割机床试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 99-106, 114.

SHI Tao, QIU Mingbo, LU Pan, et al. Experimental research on desktop type reciprocating WEDM-LS machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 99-106, 114.

桌面型往复慢走丝电火花线切割机床试验研究*

施涛, 邱明波, 卢攀, 赵锦超, 姚宗秀

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 机床的微型化已经成为目前机械加工领域研究的热点之一, 根据不同的加工对象及应用条件, 研制出各式各样的微型机床, 可以实现经济型加工, 具有节省空间、能源和资源的优势, 并且还可以应用于教学教育中, 提高学生的参与度。结合电火花线切割的加工优势研制了一种桌面型往复慢走丝电火花线切割机床, 设计了机床的基本结构, 构建了PID恒张力运丝系统和开环运动系统。开展了不同类型的加工对比试验, 证明该机床具备良好的整体精度, 可完成不同要求的高质量加工任务。

关键词: 桌面型机床; 电火花线切割; 往复慢走丝; PID恒张力控制; 小型工件

Experimental Research on Desktop Type Reciprocating WEDM-LS Machine

SHI Tao, QIU Mingbo, LU Pan, ZHAO Jinchao, YAO Zongxiu

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

[ABSTRACT] The miniaturization of machine tools has become one of the current research hotspots in the field of machining. According to different processing objects and application conditions, a variety of micro and small machine tools have been developed, which can realize economical processing and save space, energy and resources. It can also be used in teaching and education to improve student participation. Combining the processing advantages of wire EDM, a desktop type reciprocating slow wire EDM wire cutting machine is developed, the basic structure of the machine tool is designed, and the PID constant tension wire transport system and the open loop motion system are constructed. Different types of machining comparison tests have been carried out to prove that the machine tool has good overall accuracy and can complete high-quality machining tasks with different requirements.

Keywords: Desktop machine tool; Wire-cut electrical discharge machining(WEDM); Reciprocating low speed wire-cut electrical discharge machining (RLS-WEDM); PID constant tension control system; Micro workpiece

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.099

桌面式机床、台式机床统称为微型机床, 这个概念是 Dutta 在 1970 年首次提出, 是应用于硅微细加工的一种微电机, 在当时并未被人们广泛接受^[1]。20 年后, 微细制造系统这一概念在 1990 年由日本 MEL 实验室提出, 并于几年后研制出了首台微型机床, 开创了微型机床的新领域, 质量约 100g, 大小为 32mm × 25mm × 30.5mm, 但存在加工精度与加工成形

等问题^[2]。为了解决这一问题, Lu 等^[3]经过不懈研究, 于 1999 年研制了一台新型长约 200mm 的微型车床, 三轴均采用步进电机驱动, 可以完成螺纹等多形状的加工任务, 采用单晶金刚石刀具对 0.3mm 的黄铜进行切削, 得到了较好的表面质量, 验证了微型化机床的可行性。

随着汽车零部件、电子产品、医疗设备、光学和手表等产品的使用量日益增多, 小型零件的需求与日俱增。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675271); 南京航空航天大学“实验技术与开发”项目。

桌面机床可以在小的空间内发挥出较大的性能,具有体积小、质量轻、生产成本低和便于搬运等优点^[4]。近年来,微型机床这一概念引起众多学者进行研究,如刘健^[5]、Ramírez-Cadena^[6]、Weber^[7]和 Okazaki^[8]等研究了“微型工厂”、微细机床、台式机械以及数控微小组件机床,微型机床由于具有能耗低和车间面积小等优点越来越受人欢迎。

为了验证桌面微小型机床的实际效用,日本 AIST 的 Okazaki 等^[8]设计研发了一种尺寸为 450mm × 300mm × 380mm 桌面微型 NC 铣床,最高转速可达 20000r/min,三轴行程分别为 100mm、60mm、30mm,各轴可以达到 0.1μm 的精度,采用这个微型桌面 NC 铣床进行 7075 铝合金材料加工,加工效果可以达到 40 左右的深宽比,并在一定程度上减小了能源、资源的浪费。

另一方面,桌面微小型机床还可以广泛应用于实验室、课堂等场所,能够帮助学生提炼、消化、吸收书本知识,增加动手实践机会,检验课本所学,提高创新意识和创新能力^[9]。如现有的桌面 FDM 打印机床和小型可重构设备广泛应用于教育教学中,提供了直观、形象的教学形式,大幅提高了学生的参与度^[10],与传统的数控机床相比,具有优良的教育效果和低廉成本优势^[11]。

电火花加工利用工件和电极间脉冲性火花放电产生的瞬时高温对材料进行加工,属于非接触加工,无宏观切削力,对材料的机械性能没有要求,是一种重要的机械加工方法^[12-13]。传统电火花机床占地面积大、成本高,实验室无法大规模安置,课堂教学只能局限于课本知识,难以展示给学生一个清晰直观的描述,影响教学效果,如何在有限的时间和空间内开展有效的放电加工试验成为特种加工教育专家需要解决的一个重要课题。

根据电极丝运行速度的不同,电火花线切割加工技术分为高速走丝电火花线切割(HSWEDM)和低速走丝电火花线切割(WEDM-LS)^[14]。其中 HSWEDM 电极丝作高速往复运动,电极丝可重复使用,加工速度较高^[15]。WEDM-LS 电极丝作低速单向运动,工作平稳、均匀、抖动小、加工质量较好。本研究设计的桌面机床结合了这两种优势,采取了往复慢走丝运行方式。桌面放电切割机床的研制不仅需要设计整体结构,更需要确定电极丝运行方式、张力控制等电火花线切割机床关键问题。

张力的波动问题自往复走丝线切割诞生以来就一直限制着机床的性能,对机床的加工精度和切割稳定性产生了严重影响。Chen 等^[16]建立了一种高精度的钢丝恒张力控制系统,以抑制钢丝的挠度和振动,提高工件的表面质量和几何精度。何赐文等^[17]研发了双丝筒长丝往复走丝电火花线切割加工技术及工艺方法,实现了电极丝的循环使用,节约了电极丝资源。齐文春等^[18]

提出了可逆单向走丝线切割机床的概念和方案。

本研究采取双丝筒恒张力往复慢走丝方式运行加工,研制了桌面电火花线切割机床。两个丝筒分为收丝轮和放丝轮,放丝轮匀速转动,控制收丝轮实时转速实现恒张力往复运行。运丝速度选择 0.2m/s,在双丝筒的配合下实现往复慢走丝运行。

1 桌面电火花线切割机床

1.1 桌面机床结构

图 1(a)、(b)为自主研发的桌面往复慢走丝电火花线切割机床,采用框架结构。机床的长、宽、高分别为 500mm、400mm、400mm,机床采用 20mm × 20mm 铝型材搭建而成。

图 1(c)是双丝筒运丝原理图,两个丝筒一个正转收丝,另一个反转放丝。运丝过程中,放丝速度匀速不变,当张力值过大时,减小收丝的速度,当张力值过小时,增加收丝的速度,以此实现双丝筒恒张力运丝。为提高加工精度,导向轮下方安装导丝器,保证电极丝的空间位置不发生变化,导丝器内部集成了喷水结构,工作液可以流入切割区域,实现冷却、排屑作用。工件通过平口钳连接脉冲电源正极,电极丝通过进电导轮连接脉冲电源的负极。平口钳安装在十字拖板上,可以实现 X、Y 方向的插补运动,完成轨迹切割。

1.2 控制系统的总体方案

桌面机床的控制系统包括运丝控制系统和进给控制系统两部分。运丝控制系统以 PID 恒张力控制为核心,由两个同步电机控制丝筒的运行。进给控制系统以 STM32 单片机为核心,通过驱动器控制两个步进电机实现插补运动。桌面机床使用两块控制系统板分别实时检测并控制运丝系统和进给系统的运行,通过 PID 运丝控制实现系统的恒张力运行。如图 2 所示,运丝控制系统 A 给出换向断电停给进给信号实现换向时电源断电和工件停止进给两个功能。

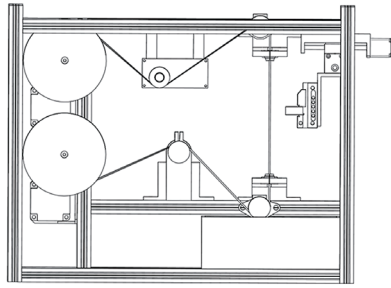
进给控制系统 B 控制工件进给的 X、Y 方向,完成本机床切割试验的运行轨迹。

如图 2 整体控制原理图所示,当换向时,运丝控制系统 A 给出断电信号到脉冲电源 C,给出暂停进给信号到进给控制系统 B,实现换向断电和停进给控制。

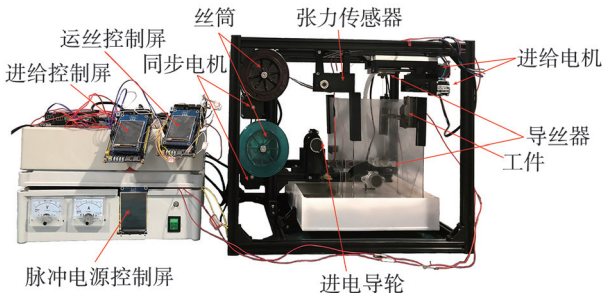
2 运丝控制系统

2.1 控制方案

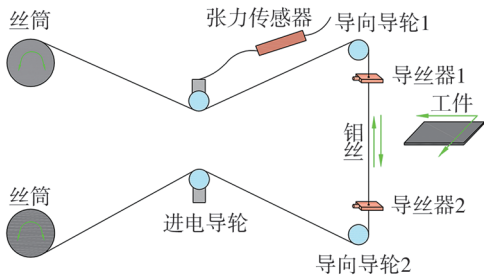
运丝系统中,放丝轮匀速转动,收丝轮根据压力传感器采集的值做变速转动,控制电极丝的张力保持在一个相对稳定的设定值。本研究的目的是控制电极丝在 0.2m/s 速度下稳定运行,张力变化波形在 0.5N 内,换向



(a) 桌面机床三维结构



(b) 桌面机床实物及控制系统



(c) 双丝筒运丝原理图

图1 桌面往复慢走丝电火花线切割机床

Fig.1 Desktop reciprocating WEDM-LS machine

平稳且不脱丝。

控制流程如图3所示,系统开始运行,设定初始张力输出 F 、运丝速度 V 和运丝圈数 N 。两个步进电机都以初始速度 $V=0.2\text{m/s}$ 运转,张力传感器检测出电极丝的张力,实时反馈给运丝系统。运丝控制系统根据实时张力与初始设定张力的大小来改变收丝电机的速度。当实时张力值大于设定张力时,说明收丝速度偏快,收丝轮根据 PID 计算降低相应的速度以保证钼丝运行的稳定;反之,当实时张力值小于设定初始张力值时,说明收丝速度偏慢,主动轮会根据 PID 计算提高一定的速度以保证钼丝稳定运行。当换向时,运丝控制系统 A 发出断电信号给脉冲电源 C,同时发出暂停进给信号给进给控制系统 B,实现换向断电同时停进给。换向之后主动轮与从动轮变换,通电、继续进给,恢复正常加工。

2.2 PID恒张力控制

PID 控制又称比例积分微分控制,其控制原理如图 4 (a) 所示,其中 $r(t)$ 为系统的给定值,表示初始设定的参考张力 F ; $c(t)$ 为实际输出,为系统实时检测的张力 f ; $u(t)$ 为控制量,是收丝轮的转速, PID 控制的表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中, $e(t) = r(t) - c(t)$, 为系统偏差; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

式(1)中的积分和微分运算可用数值计算的方法来逼近,即将微分项用差分代替,积分项用矩形和式代替,采样周期为 T 时, kT 时刻,式(1)可表达为

$$u(k) = k_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)) / T \quad (2)$$

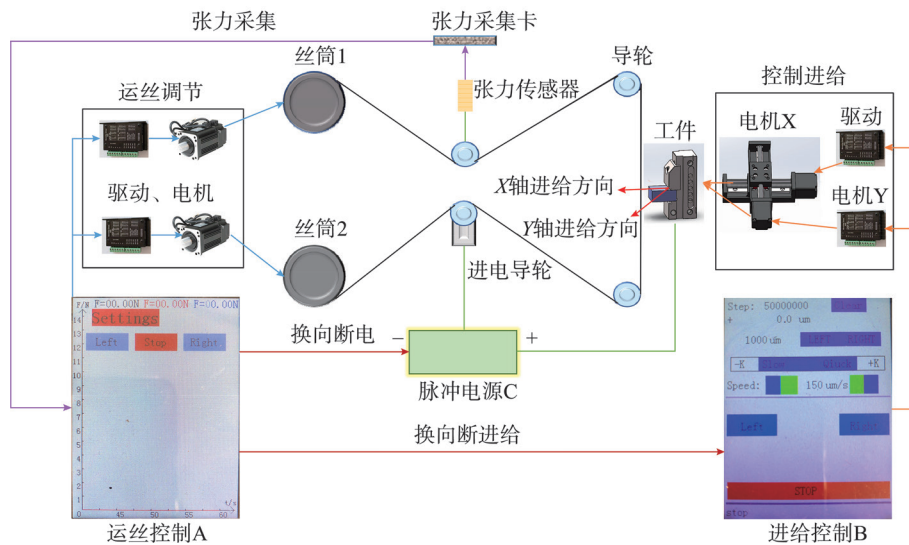


图2 整体控制原理图

Fig.2 Overall control schematic diagram

系统采用增量式PID控制算法。由式(2)可得,第 $k-1$ 时刻PID调节的表达式为

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i T \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d (e(k-1) - e(k-2)) / T \quad (3)$$

将式(2)和(3)相减可得

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i T e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) / T \quad (4)$$

式(4)为系统所用增量式PID控制的数学模型,其控制流程如图4(b)所示。预先设置比例 K_p 、积分 K_i 、微分参数 K_d 和初始张力 F , 在每个采样周期 T 内, 由PID控制模型计算主动丝筒旋转速度。当 $f < F$ 时, 主动丝筒做加速运动, 由式(4)可得控制变化量 $\Delta u(k)$, 即主动丝筒需要增加的速度, 而控制量 $u(k+1) = u(k) + \Delta u(k)$ 对应于主动丝筒变化后的速度, 速度增大, 由于从动轮为恒速运动, 所以运行钼丝的张力就会增大, 趋近于设置初始张力 F ; 反之, 当 $f > F$ 时, 主动丝筒做减速运动, 由式(4)可得控制变化量 $\Delta u(k)$, 即主动丝筒需减少的速度, 而控制量 $u(k+1) = u(k) - \Delta u(k)$ 对应于主动轮减速后的速度, 速度减小, 由于从动轮为恒速运动, 所以运行钼丝的张力就会减小, 趋近于设置初始张力 F 。

其中, 比例作用是依据偏差的大小来运作, 而桌面机床所需张力的偏差很小, 根据凑试法先固定比例时间常数 T_p 为 0.01, 即 $T_p = 0.01$ 。通过改变微分时间常数 T_d 和积分时间常数 T_i 对控制系统施加一个波动, 通过观察张力变化曲线来改变 T_d 、 T_i 。若曲线不够理想, 可多次

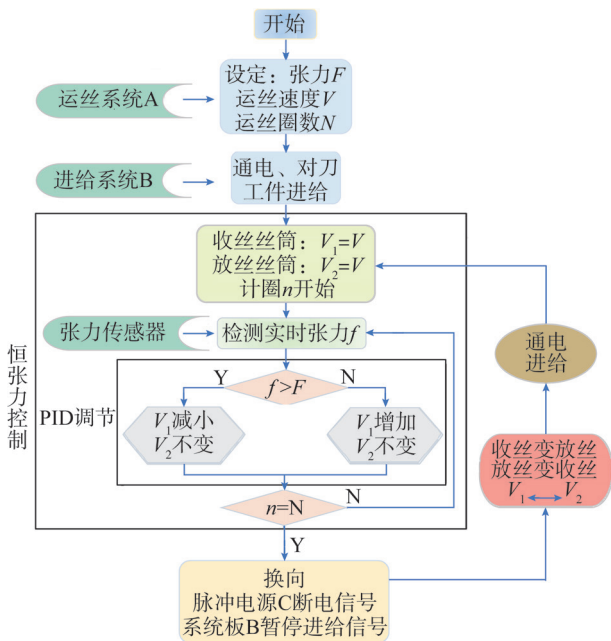


图3 控制流程图
Fig.3 Control flow chart

改变 T_d 、 T_i , 调试原则是减小 T_i , 增大 T_d , 首先设定 T_d 、 T_i 都为最小值: $T_i=0.0000$ 、 $T_d=0.0000$, 慢慢增加 T_d 的大小, 观察对应的张力变化波形, 反复凑试直到张力变化稳定在 $\pm 0.5N$, 这时的 T_d 和 T_i 最佳值, 分别是 $T_i=0.0000$ 、 $T_d=0.0210$, 实现加工的恒张力控制。

2.3 恒张力控制效果

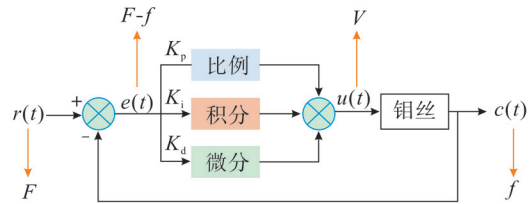
图5为调节前后的张力变化波形图, 选择实时张力、10s平均张力、100s平均张力3种张力显示方式, 可以准确表明某一时刻的实时张力以及一段时间内的张力波动状态。图5(a)~(c)为调节之前的张力变化波形图, 空载运行时张力波动在2N左右; 喷水运行时张力波动在3N左右; 加工运行时张力波动在3~4N左右, 变化幅度较大, 严重影响机床的加工质量。

图5(d)~(f)为调节后的张力变化波形图, 空载运行时张力波动稳定在0.25N内; 喷水运行时张力波动稳定在0.4N内; 加工运行时张力波动稳定在0.5N内, 大幅度提高了机床的加工质量。

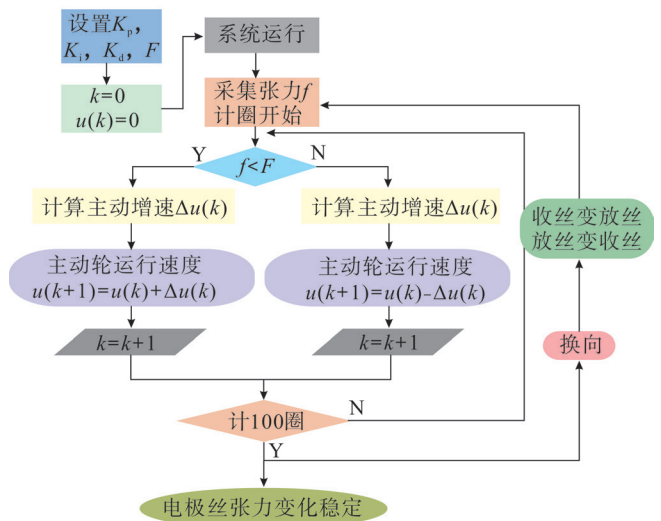
3 放电切割试验

3.1 直线切割试验

试验材料为模具钢 Cr12, 表1为桌面机床和快走丝机床切割试验的参数选择。



(a) PID控制系统原理图



(b) PID控制流程图

图4 PID控制运行过程

Fig.4 PID control operation process

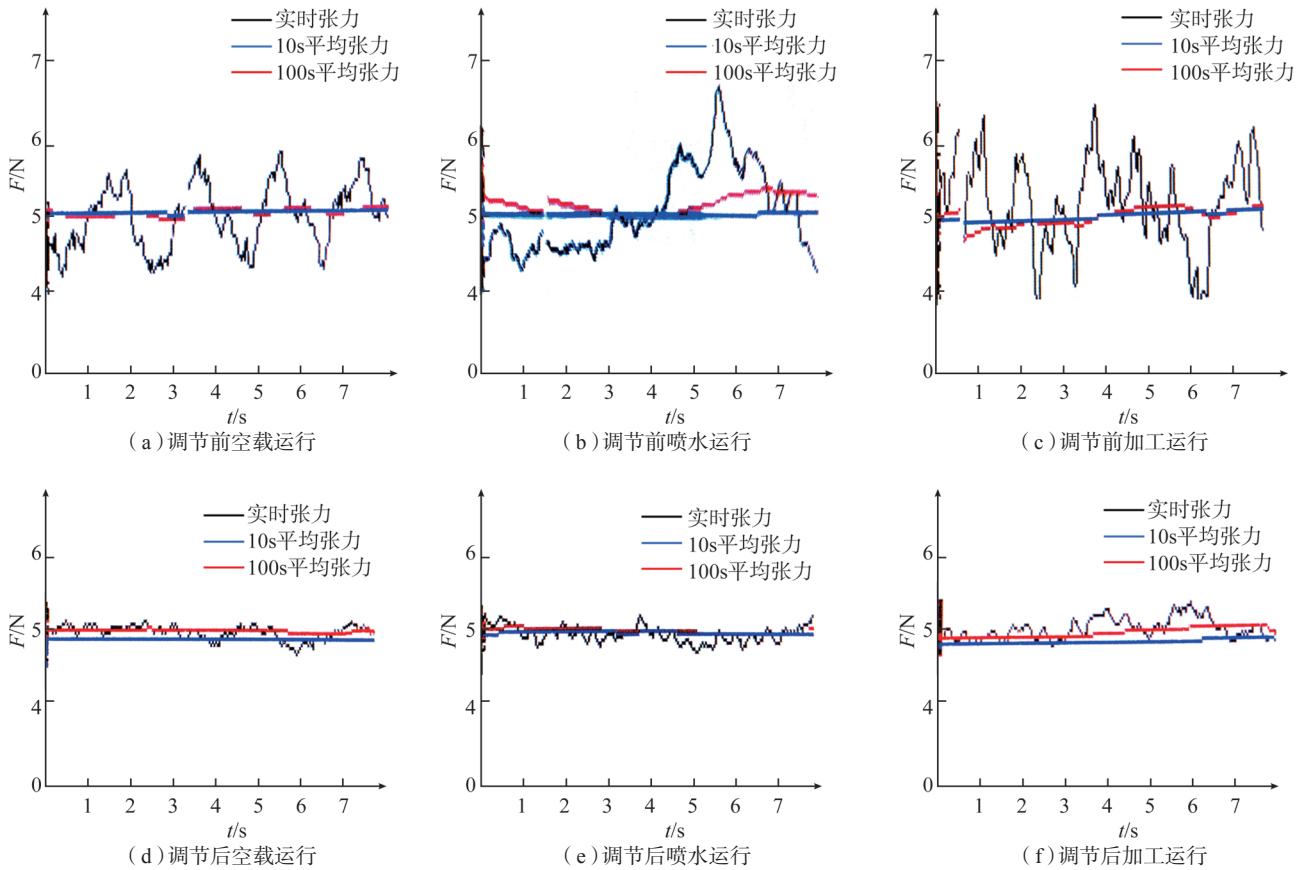


图5 调节前后的张力变化波形图

Fig.5 Waveform of tension change before and after adjustment

图 6 (a)为传统快走丝机床加工的工件表面实物图,工件表面有较明显的黑白条纹,并且表面比较暗淡,这是影响加工质量的宏观问题。桌面机床因加工电流大蚀除效率高,上下喷水板距离较小使得排屑和降温效果好,因此图 6 (b)所示桌面机床加工工件表面没有明显黑白条纹,表面也比较光亮。

图 7 为桌面机床与快走丝机床切割加工时的放电波形图,其中图 7 (a)为快走丝机床加工时的单脉冲波形,火花放电维持电压为 25V 左右,加工电流为 6A 左右。图 7 (b)为快走丝机床加工时的多脉冲放电波形,空载时存在 2~3A 的“漏电流”,损耗极间介质,影响加工效率和加工表面色泽度。图 7 (c)为桌面机床加工时的单脉冲波形,当通道击穿后,维持电压为 26V 左右,加工电流可达 18A。由于桌面机床结构小,设计的上下喷水装置距离近,排屑、降温效果较好,图 7 (d)为桌面机床空载时几乎没有“漏电流”,放电状态更加稳定,确保了良好的加工状态。

图 8 为桌面机床和快走丝机床加工表面微观对比,图 8 (a)、(b)、(c)分别为传统快走丝机床 30 倍、50 倍、100 倍的表面微观图,图 8 (d)、(e)、(f)分别为桌面机床 30 倍、50 倍、100 倍的表面微观图。桌面机床设计的

表1 桌面机床与快走丝机床试验参数

Table 1 Experimental parameters of table top machine tool and fast-moving WERM machine

试验设备	桌面机床试验参数	快走丝机床试验参数
工件材料	Cr12	Cr12
工件厚度 /mm	5	5
电极丝铜丝 /mm	Φ0.18	φ0.18
工作液	JRIA,浓度为 1 : 20	JRIA,浓度为 1 : 20
运丝速度 / (m · s ⁻¹)	0.2	10
张力调节装置 /N	5 (PID 恒张力控制)	10 (重锤式张力机构)
脉宽 /μs	40	40
占空比	1 : 7	1 : 7
电极端性	正	正
电压 /V	50	50
平均电流 /A	1	2
进给方式	15μm/s 匀速	采样伺服进给

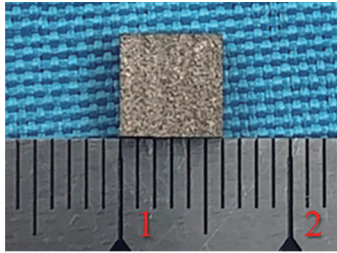
PID 恒张力控制比快走丝机床的重锤张力控制更为稳定,加工状态也更加良好,由此桌面机床微观表面图显得更加良好,加工工件表面优于快走丝机床,得到了更

好的加工质量。

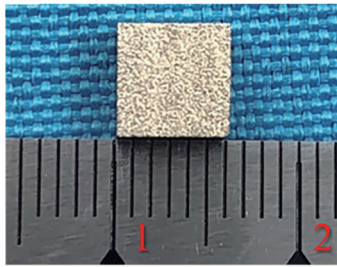
3.2 简单图形切割试验

为验证桌面机床的加工技术水平,采取简单图形切割,以切割圆形和八边形为例。图9为桌面机床切割的圆形工件和八边形工件实物图。

桌面机床具有稳定的PID恒张力控制、换向断电



(a) 快走丝机床



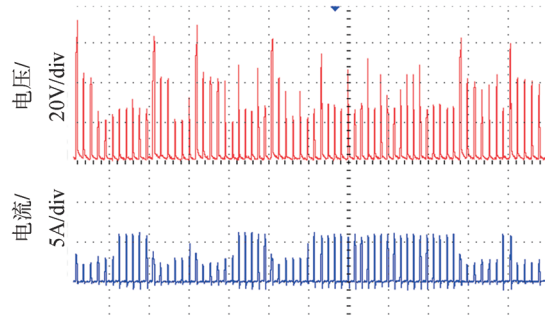
(b) 桌面机床

图6 桌面机床与快走丝机床加工表面实物图

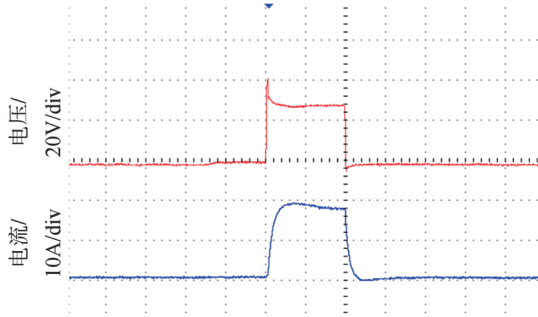
Fig.6 Physical map of machined surface of desktop machine tool and fast-moving WERM machine



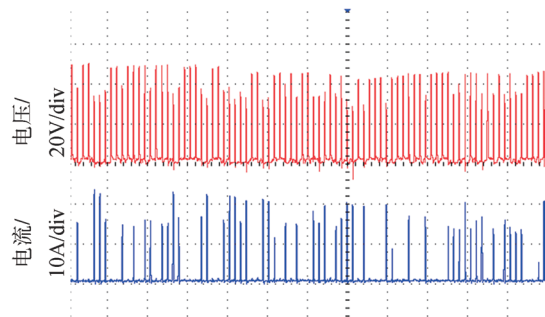
(a) 快走丝机床单脉冲



(b) 快走丝机床多脉冲



(c) 桌面机床单脉冲



(d) 桌面机床多脉冲

图7 桌面机床与快走丝机床加工放电波形图

Fig.7 Discharge waveform diagram of desktop machine tool and fast-moving WERM machine

停进给控制,电极丝运行稳定,具有良好的加工状态,因此图9所示的桌面机床加工图形工件形状精确度较好。

圆度是指工件的横截面接近理论圆的程度,最大半径与最小半径之差,通过千分尺进行两点法测量,圆形工件任意两点距离误差在 $30\mu\text{m}$ 内,圆度 $< 15\mu\text{m}$ 。

八方精度全面反映机床的位移精度、系统回差以及稳定性。通过千分尺对八方8个面进行测量,与 X 轴平行的两个直面尺寸与给定值相差 $12\mu\text{m}$,与 Y 轴平行的两个直面尺寸与给定值相差 $14\mu\text{m}$,说明桌面机床轴向与径向抖晃幅度较为稳定。而 45° 的两个平行斜面尺寸与给定值相差 $18\mu\text{m}$, 135° 的两个平行斜面尺寸与给定值相差 $13\mu\text{m}$,说明机床 X 轴与 Y 轴系统回差小。各个表面只存在轻微的换向条纹,综上可以证明桌面机床整体精度良好。

3.3 拐角切割精度分析

相对于直线切割,拐角切割加工时方向发生了改变,使得电极丝改变了放电状态,引入了图10所示的放电角进行描述。可知,随着拐角切割的进行和进给方向的变化,电极丝换了1个角度进行放电。随着切割角度的变化,放电角也会随之改变。

由于拐角的变化,放电角会随之改变,因此电极丝的受力会不同。如图11(a)所示,直线切割时的放电角 $\alpha=180^\circ$,整个前表面都放电,只受到 F_r 、 F_c 两个运动方向相反的作用力。而在拐角切割时,如图11(b)所示,

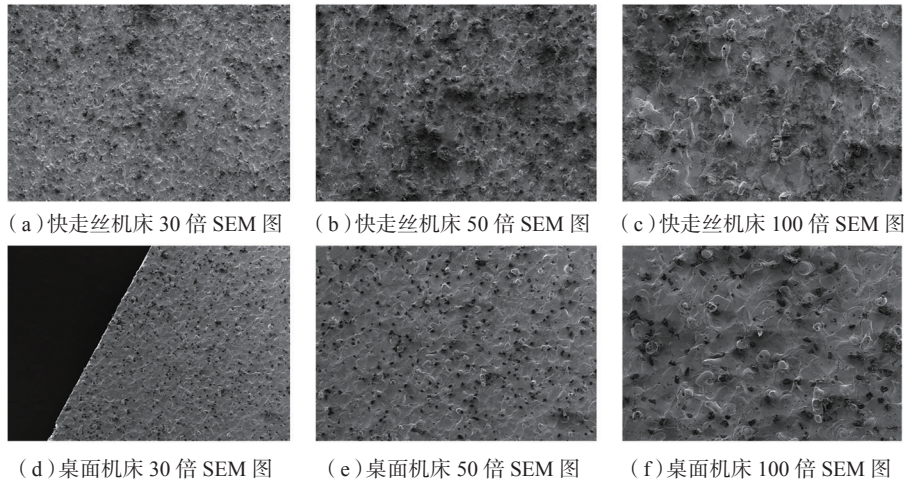
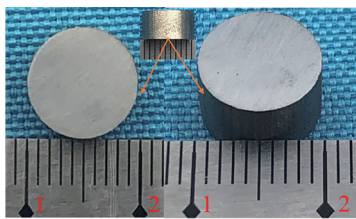
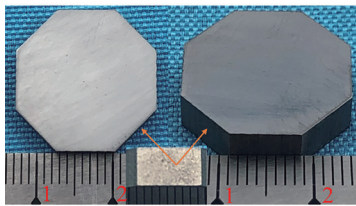


图8 桌面机床和快走丝机床表面微观对比图

Fig.8 Surface microscopic comparison chart of desktop machine tool and fast-moving WERM machine



(a) 圆形切割工件



(b) 八边形切割工件

图9 图形切割工件

Fig.9 Graphic cutting workpiece drawing

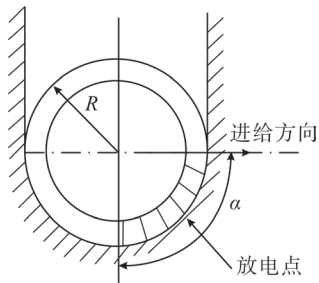
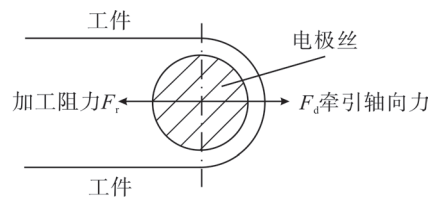


图10 放电角示意图

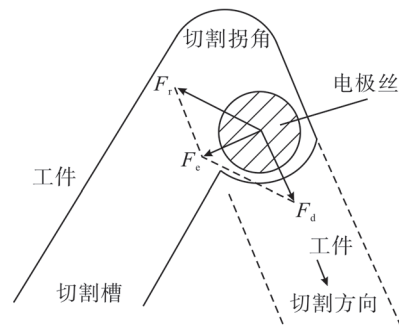
Fig.10 Schematic diagram of discharge angle

放电角 $\alpha < 180^\circ$, 前表面只有局部放电, 电极丝不仅受到反向的切向力 F_t , 还受到垂直于切割方向的法向合力 F_c 。

拐角加工技术是电火花线切割加工中的一项关键技术。拐角处的形状精度往往是衡量加工设备技术水平的重要因素之一。为检验此机床的加工技术水平, 选



(a) 直线切割受力分析



(b) 拐角切割受力分析

图11 切割状态受力分析

Fig.11 Force analysis of cutting state

择切割图 12 所示的 45° 直角三角形。

图 13 为桌面机床和传统快走丝机床拐角切割微观对比图, 其中 m 、 n 为加工工件两边延长线交点到产生拐角处的距离, $m \approx 750\mu\text{m}$, $n \approx 600\mu\text{m}$, $n < m$, 桌面机床距离优化约 $150\mu\text{m}$, 表明桌面机床加工的拐角形状精度优于传统快走丝机床, 具有较高的加工技术水平。

4 结论

(1) 研制了一种能够加工各种高质量小型零件的桌面型往复慢走丝电火花线切割机床, 设计了该机床的基本结构, 建立了以单片机为核心的运丝系统和工件进给控制系统。

(2) 建立了 PID 恒张力控制系统, 保证了电极丝运

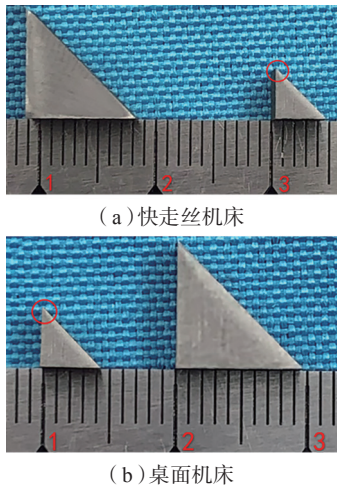
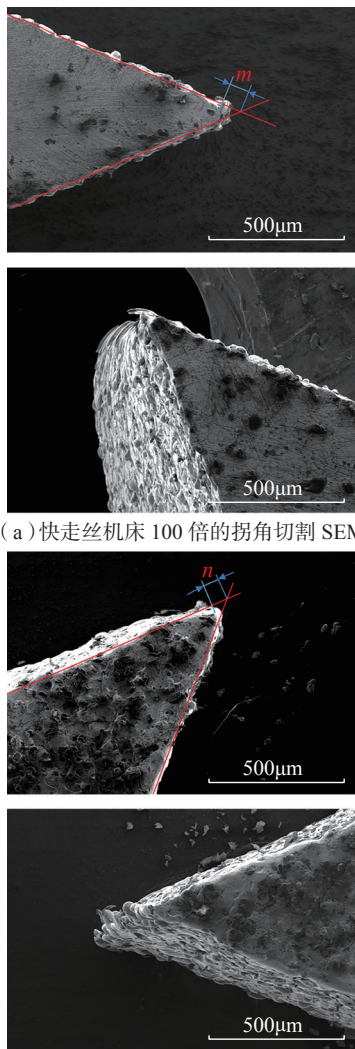


图12 桌面机床与快走丝机床拐角切割实物对比
Fig.12 Comparison of corner cutting between desktop machine tool and fast-moving WERM machine



(a) 快走丝机床 100 倍的拐角切割 SEM
(b) 桌面机床 100 倍的拐角切割 SEM

图13 桌面机床与快走丝机床拐角切割微观对比
Fig.13 Microscopic comparison of corner cutting between desktop machine tool and fast-moving WERM machine

行的稳定,减小了快走丝机床运行时电极丝抖动问题;通过换向断电停进给控制,避免了快走丝机床反向时的停顿现象;设计的双丝筒运丝结构解决了慢走丝机床单向走丝,资源消耗大、使用成本高等问题。

(3) 桌面机床恒张力控制提高了电极丝运行的稳定性,换向断电停进给控制确保了更为良好的加工状态,并进行金属直线切割试验对比,得到了良好的加工质量;通过简单图形切割试验分析圆度与八方精度,证明了桌面机床整体精度良好;进行拐角切割试验对比,验证了桌面机床具有较高的加工技术水平。

参考文献

- [1] DUTTA K, DEV P, DEWLDE P, et al. Integrated micromotor concepts[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Microelectronics, Circuits and System Theory. Sydney, 1970.
- [2] KITAHARA T, ISHIKAWA Y, TERADA T, et al. Development of micro-lathe[J]. Journal of Mechanical Engineering Laboratory, 1996, 50(5): 117-123.
- [3] LU Z, YONEYAMA T. Micro cutting in the micro-lathe turning system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(7): 1171-1183.
- [4] FORD S, MINSHALL T. Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 131-150.
- [5] 刘健. 桌面3D打印技术在模具教学中的实践应用[J]. 职业, 2017(10): 112.
LIU Jian. Practical application of 3D printing technology in mould teaching[J]. Occupation, 2017(10): 112.
- [6] RAMÍREZ-CADENA M, MIRANDA J, TELLO-ALBARRÁN G, et al. Reconfigurable didactic microfactory with universal numerical control[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(6): 463-468.
- [7] WEBER A. Small robots play a big role in automation[J]. Assembly, 2020, 63(4): 32-35.
- [8] OKAZAKI Y, MISHIMA AND N, ASHIDA K. Microfactory—concept, history, and developments[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 837-844.
- [9] LUO X C, CHENG K, WEBB D, et al. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2-3): 515-528.
- [10] WANG S M, YE Z Z, LEE C Y, et al. Design of a micro machine tool with double-toggle mechanisms[J]. Computational Materials Science, 2016, 117: 549-555.
- [11] AXINTE D A, AXINTEHUKOR D S A, S, HUKOR B S OZDANAA A T. An analysis of the functional capability of an in-house developed miniature 4-axis machine tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 191-203.
- [12] ZHANG Y Q, LIU Z D, PAN H W, et al. Dielectric fluid lifespan detection based on pulse discharge probability in wire electrical discharge machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4): 1481-1491.

(下转第114页)

参考文献

[1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
YUAN Shenfang. Structural health monitoring and damage control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[2] 杜善义, 张博明. 飞行器结构智能化研究及其发展趋势[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 773-778.
DU Shanyi, ZHANG Bomng. Status and developments of intelligentized aircraft structures[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 773-778.

[3] 袁慎芳, 邱雷, 吴键, 等. 大型飞机的发展对结构健康监测的需求与挑战[J]. 航空制造技术, 2009, 52(22): 62-67.
YUAN Shenfang, QIU Lei, WU Jian, et al. Challenge in structural health monitoring of large aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 62-67.

[4] 孙侠生, 肖迎春. 飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3199-3212.
SUN Xiasheng, XIAO Yingchun. Opportunities and challenges of aircraft structural health monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(12): 3199-3212.

[5] 邵飞, 杨宁, 孙维, 等. 基于光纤传感的航天器结构健康状态监测研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 95-103.
SHAO Fei, YANG Ning, SUN Wei, et al. Research on spacecraft structural health monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(2): 95-103.

[6] KIM H I, KANG L H, HAN J H. Shape estimation with distributed fiber Bragg grating sensors for rotating structures[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(3): 035011.

[7] WANG Z C, GENG D, REN W X, et al. Strain modes based dynamic displacement estimation of beam structures with strain sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 125045.

[8] 薛景锋, 宋昊, 王文娟. 光纤光栅在航空结构健康监测中的应用前景[J]. 航空制造技术, 2012, 55(22): 45-49.
XUE Jingfeng, SONG Hao, WANG Wenjuan. Application of optical fiber grating in health monitoring for aircraft structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(22): 45-49.

[9] 黄博, 白生宝, 宁宁, 等. 基于FBG动态应变监测的金属结构损伤识别方法研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(19): 67-71.
HUANG Bo, BAI Shengbao, NING Ning, et al. Study on metal structure damage identification based on dynamic strain monitoring using fiber Bragg grating sensor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(19): 67-71.

[10] CLEMENTS G M. Fiber optic sensor for precision 3-D position measurement: US6888623[P]. 2005-05-03.

[11] JUTTE C V, KO W, STEPHENS C A, et al. Deformed shape calculation of a full-scale wing using fiber optic strain data from a ground loads test[J/OL]. NTRS-NASA Technical Reports Server, 2011:1-56. [2011-12-01]. <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120004140>.

[12] GLASER R, CACCESE V, SHAHINPOOR M. Shape monitoring of a beam structure from measured strain or curvature[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(6): 591-606.

[13] SUN G K, WU Y P, LI H, et al. 3D shape sensing of flexible morphing wing using fiber Bragg grating sensing method[J]. Optik, 2018, 156: 83-92.

[14] YI J C, ZHU X J, ZHANG H S, et al. Spatial shape

reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array[J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 679-687.

[15] 张合生, 朱晓锦, 李丽, 等. 基于二维曲率数据的空间曲面形态重构算法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 1035-1046.
ZHANG Hesheng, ZHU Xiaojin, LI Li, et al. Space curved surface reconstruction method using two-dimensional curvature data[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(5): 1035-1046.

[16] GHERLONE M, CERRACCHIO P, MATTONE M. Shape sensing methods: Review and experimental comparison on a wing-shaped plate[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 99: 14-26.

[17] TESSLER A, ROY R, ESPOSITO M, et al. Shape sensing of plate and shell structures undergoing large displacements using the inverse finite element method[J]. Shock and Vibration, 2018(10): 1-8.

[18] 康永刚, 李春生, 陈希多, 等. 航空大壁板装配连接局部变形数值建模与仿真分析[J]. 航空制造技术, 2020, 63(3): 45-52.
KANG Yonggang, LI Chunsheng, CHEN Xiduo, et al. Numerical modeling and simulation analysis of local deformation for aircraft large-walled panel assembly connection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(3): 45-52.

通讯作者: 孙广开, 副教授, 博士, 主要研究方向为飞行器监测技术和生物医学检测技术。 (责编 古柔)

(上接第106页)

[13] 刘维东, 狄士春, 赵万生. 电火花加工技术的新发展[J]. 中国机械工程, 1998(5): 76-81.
LIU Weidong, DI Shichun, ZHAO Wansheng. State-of-the-art of electrical discharge machining[J]. China Mechanical Engineering, 1998(5): 76-81.

[14] 杨林, 谢建华, 张省. 慢走丝研究现状[J]. 通信电源技术, 2015, 32(2): 32-34, 70.
YANG Lin, XIE Jianhua, ZHANG Sheng. State-of-art of research on low speed wire electrical discharge machining[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(2): 32-34, 70

[15] 刘志东. 高速往复走丝电火花线切割的现状与发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(2):1-6.
LIU Zhidong. Current situation and development of high-speed reciprocating wire electrical discharge machining[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(2):1-6.

[16] CHEN Z, ZHANG G J, YAN H Z. A high-precision constant wire tension control system for improving workpiece surface quality and geometric accuracy in WEDM[J]. Precision Engineering, 2018, 54: 51-59.

[17] 何赐文, 赵晋胜. 双丝筒超长丝往复走丝电火花线切割加工技术[J]. 电加工与模具, 2017(6): 20-22.
HE Ciwen, ZHAO Jinsheng. Long wire reciprocated-WEDM with dual reels winded[J]. Electromachining & Mould, 2017(6): 20-22.

[18] 齐文春, 黄莺, 高坚强, 等. 可逆单向走丝线切割机床双丝筒走丝系统的设计[J]. 制造技术与机床, 2015(9): 53-56.
QI Wenchun, HUANG Ying, GAO Jianqiang, et al. Design of double wire tube wire winding system of reversible one-way WEDM[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(9): 53-56.

通讯作者: 邱明波, 副教授, 主要从事特种加工电火花线切割、半导体放电加工和高效加工研究。 (责编 古柔)