

文章编号 1004-924X(2010)06-1309-10

三维微细电解铣削加工的实时控制与检测

刘 勇, 曾永彬, 朱 荻, 黄绍服, 王少华
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了实现三维微细电解铣削加工过程的实时监测, 建立了基于 Labwindows/CVI 软件平台的控制与检测系统。对该系统所采用的三维轨迹生成及控制策略, 数据采集及抗干扰算法, 加工时间误差补偿算法等进行了研究。首先, 根据微细电解铣削加工的特点, 分析了加工控制与检测系统的需求。接着, 搭建了高精度的三维微细铣削加工实验硬件平台。然后, 利用虚拟仪器平台建立了基于分层铣削加工方式的三维轨迹进给控制模块, 并对刀具轨迹的优化进行了讨论。最后, 介绍了数据采集及反馈控制模块以及实时控制的时间补偿函数。基于上述控制与检测系统, 实验并成功加工出了单层尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 55\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的三层阶梯结构, 结果表明, 本系统可以满足微细电解铣削加工的高精度、快响应、稳定可靠等要求。

关键词: 微细电解铣削加工; Labwindows/CVI; 分层铣削; 数据采集; 反馈控制

中图分类号: TG662 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1309

Real-time control and data acquisition system for 3D micro electrochemical milling

LIU Yong, ZENG Yong-bin, ZHU Di, HUANG Shao-fu, Wang Shao-hua

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

Abstract: In order to realize the real-time control and detection of three-dimensional micro electrochemical milling process, a data acquisition and control system is established based on virtual instrument software Labwindows/CVI. The three-dimensional tool path generation and control strategy, data acquisition and anti-jamming algorithm and the machining time error compensation algorithm for the system are investigated. Firstly, the requirements of the control and detection system are analyzed according to the characteristics of micro electrochemical milling process and a high-precision experimental system for 3D micro electrochemical milling is built up. Then, the feed control module for three-dimensional tool path is established based on a virtual instrument platform, and the optimization of tool path is discussed. Finally, the data acquisition and its feedback control module and the machining time error compensation function are introduced. On the basis of the system above, a three-step staircase structure with one stair of $15\ \mu\text{m} \times 55\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ is fabricated successfully. It shows that the system can meet the requirements of micro electrochemical milling for high machining precision,

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2009-12-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z302); 国家自然科学基金重点项目(No. 50635040)

fast response, accuracy control and reliable and stable abilities.

Key words: micro electrochemical milling; Labwindows/CVI; milling by layer; data acquisition; feedback control

1 引言

近年来,随着微机电系统(MEMS)的发展,电子、光学、医疗、汽车、生物、通信和航空行业对微细金属部件和产品的需求正快速增长。目前采用的微细加工方法主要有 LIGA/准 LIGA 技术、微细切削技术以及微细激光和微细电火花加工技术等,这些方法各具所长,构成了金属微结构加工技术群,国内外学者利用上述技术已经取得了许多显著性成果^[1-6]。

近年来,国内外很多专家学者特别关注微细电解加工技术,期望利用其独特的加工原理和特性解决微细金属部件的微制造难题。国际上,德国、美国、韩国等工业发达国家对微细电解加工技术进行了大量的科研投入,取得了长足的进展,如德国 MPG 加工出了数十微米的三维型腔^[7],美国的 Trimmer 加工出了结构尺寸为亚微米级的复杂图案^[8],韩国的 Kim 等人加工出了表面粗糙度好的微三维结构^[9-10]。在国内,哈尔滨工业大学、南京航空航天大学等科研院所也在微细电解加工领域取得了很多成果^[11-12]。

微细电解加工是基于电化学离子去除原理来微量溶解工件的技术,它具有表面质量好,与零件材料硬度无关,加工后工件无应力和变形,无工具损耗等优点,可以实现微米级精度的加工。与其它加工工艺相比,微细电解加工有许多优势。与 LIGA 工艺相比,不需要昂贵的同步辐射源,设备成本低廉;与微细切削技术相比,无切削力,无刀具易断问题;与微细电火花相比,加工时电极无损耗,不需要电极补偿,已加工表面具有良好的表面粗糙度,无毛刺,无再铸层。

对于微细电解加工工艺来说,影响加工精度的关键技术主要包括:微小电极的制备技术,高精度高频响的微细电解加工进给装置,微小能量脉冲电源技术,以及微细电解加工过程监控技术等。微细电解加工系统必须配备实时控制与检测模块,且要求实时控制好;对加工电流突变能快速响应;能控制执行机构相应动作,且稳定性好、抗

干扰能力强。

本文基于 Labwindows/CVI 虚拟仪器平台,配合精密运动轴、伺服电机、电流传感器、运动控制卡和数据采集卡等设备建立了三维微细电解铣削加工控制与检测系统,并对该系统所采用的三维轨迹生成及控制策略、数据采集及抗干扰算法、加工时间误差补偿算法等进行了研究。试验表明该系统具有控制精确迅速、稳定可靠、操作简便等特点。

2 微细电解铣削加工原理及系统构成

2.1 微细电解铣削加工原理及特点

随着精密机械和数控技术的发展,出现了以简单形状的工具阴极来完成复杂零件的电解加工技术。采用旋转微米级柱状电极,通过控制其加工运动轨迹,能够实现复杂工件的微细电解铣削加工^[10-11],并且可以减小加工过程中释放的热和气体等对电解加工的影响。对于复杂结构和高深宽比三维型腔的电解加工,可以分多层进行电解铣削。微细电解铣削加工是利用金属在电解液中发生电解阳极溶解的原理,通过工具阴极的数控运动将工件分层加工成型,其加工原理如图 1 所示。

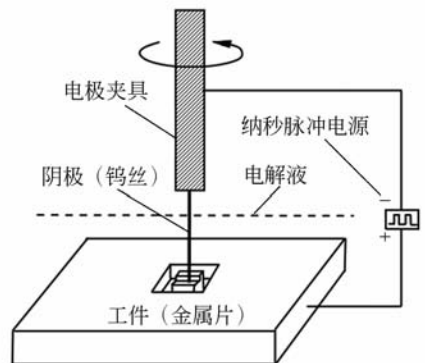


图 1 加工原理图

Fig. 1 Principle of micro electrochemical milling

由于微细电解铣削加工的加工间隙是微米级,很难检测,所以加工的稳定性向其加工系统的实时检测控制提出了挑战。微细电解铣削加工系

统平台本身对隔振和刚性要求很高,任何微小的振动都会严重影响加工精度。对直径仅为数微米的电极而言,在加工过程中必须保持良好的低速运动品质,不能出现爬行现象,更不能撞上工件发生短路。为保证加工尺寸精度和加工稳定性,要求微细电解铣削加工的加工间隙应控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以下,进给分辨率控制在 $0.2\ \mu\text{m}$ 或更小。由于微细电解铣削加工的加工间隙很小且无法直接测量,因此加工过程中要求实时检测加工电流来反映间隙状态,在短路时通过运动控制系统快速回退,避免微米尺度电极受损,导致加工彻底中断。

2.2 加工控制与检测系统硬件构成

通过对微细电解铣削加工及其控制系统的分析,本文建立了三维微细电解铣削加工试验平台,其加工示意图如图2所示。试验系统由纳秒脉冲电源、电极系统、运动控制系统、加工状态检测系统、电解液循环系统、温度控制系统等组成,加工系统实物图如图3所示。

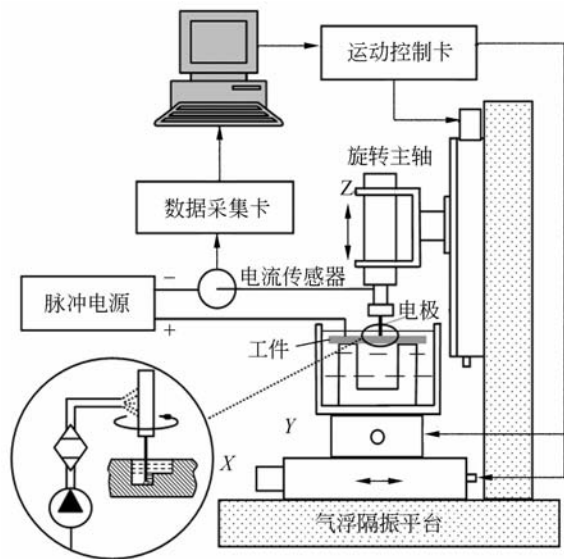


图2 微细电解铣削加工系统示意图

Fig.2 Sketch of micro electro-chemical milling system

电极系统由工具阴极、电极夹具、高速旋转主轴和工件阳极组成。实验采用微米级柱状钨电极作为工具阴极,工具阴极由电极夹具与旋转电主轴螺纹连接,并一起装夹在微细电解加工机床主轴Z上;工件固定于电解液槽内,电解液槽安装在X-Y二维工作台上可作平面运动。试验中,纳秒脉冲电源的正负极分别接工件和工具电极,



图3 微细电解铣削加工系统实物图

Fig.3 Photo of micro electro-chemical milling system

电解液采用低浓度的酸性溶液(如: H_2SO_4 , HCl 等),并采用循环流动方式,由微量泵将电解液抽出,经过过滤后沿Z向平缓流入加工区,可避免侧面冲液造成的电极振动。

运动控制系统由X、Y、Z直线运动轴和旋转轴C组成,分别由各自的电机驱动器驱动。旋转轴C由DELTA VFD-B型可编程控制器控制,转速在 $0\sim 40\ 000\ \text{r/min}$ 范围内连续可调,径向跳动在 $3\ \mu\text{m}$ 以内;3个直线运动轴采用德国PI公司的C843运动控制卡作为运动控制系统核心,控制M4XX.CG系列高精度三轴运动平台实现X-Y-Z3个方向的联动进给,可以保证加工时 $0.1\ \mu\text{m}/\text{step}$ 的进给分辨率和 $0.2\ \mu\text{m}$ 的单向运动精度,能够满足微米级的加工与定位要求。

试验中使用的电源为纳秒级脉冲发生器,可以输出峰值电压为 $\pm 10\ \text{V}$,最小脉宽为 $5\ \text{ns}$ 的脉冲电流。加工检测系统主要负责电路中的信号检测,加工过程中电流的变化直接反映着加工所处的状态,加工电流的检测和由此做出的控制策略是保证加工稳定性的重要环节。检测过程通过在电路中串联小欧姆值的采样电阻,然后将传感器检测到的采样电阻两端电压值转换为相应的电流值,再由多功能数据采集卡NI PCI-6221将检测的信号经A/D转换器实时输入到控制计算机中。在计算机中通过对数据进行分析处理,实现加工状态的实时检测与反馈控制,加工控制与检测系统的组成如图4所示。

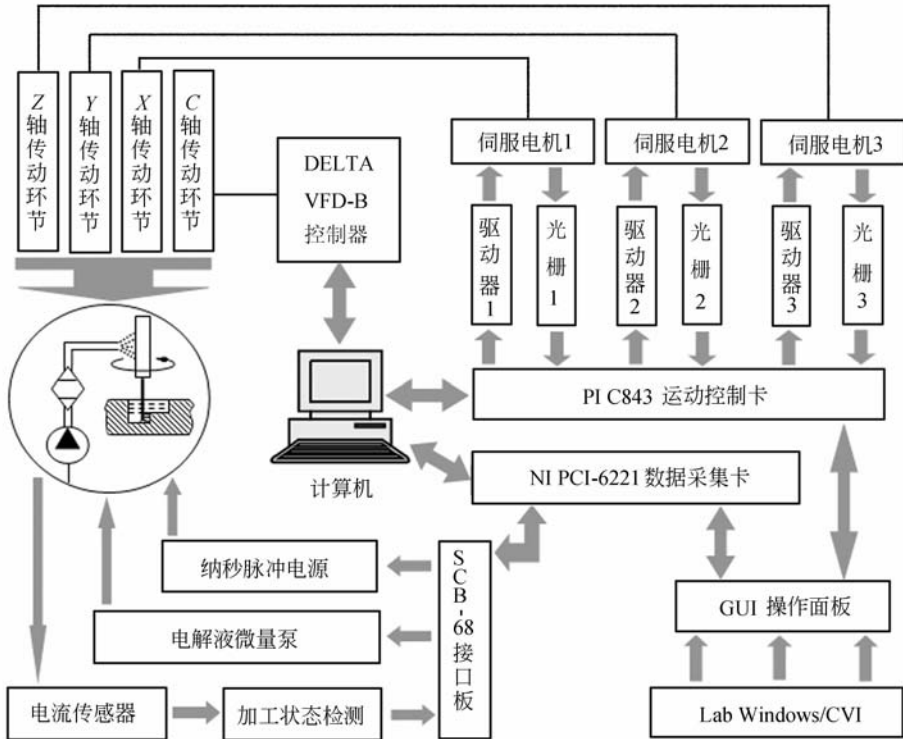


图 4 控制与检测系统组成

Fig. 4 Sketch of control and detection system

2.3 软件系统设计及工作流程

复杂三维微结构的加工可预先在 CAM 软件 (如: MasterCAM, UG 等) 中按铣削加工方式自动编程, 生成刀具路径后, 再传给微细电解加工数控系统, 完成任意三维结构的分层铣削加工。本文提出的对三维微结构电解铣削加工的执行方案, 如图 5 所示, 实现了微细电解铣削加工的 CAD/CAM 一体化。

其中, 自动编程模块主要解决的是图形数据

获取、自动寻迹、加工方向判别、刀具路径自动插补等功能, 是整个系统的核心。为解决此核心问题, 本文基于 Labwindows/CVI 虚拟仪器软件平台, 采用了模块化结构编制了加工控制系统软件, 它由加工控制模块、数据采集模块和人机交互操作等模块组成。本系统可以直接读取 DXF 图形文件中的三维实体模型数据, 实时控制电极按照文件中所描述的刀具路径伺服进给。

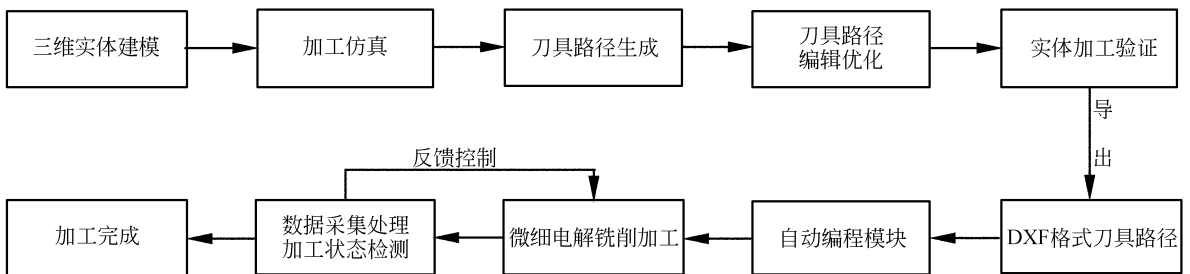


图 5 加工系统总体方案

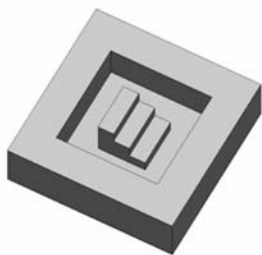
Fig. 5 Overall plan of machining system

3 软件系统关键策略与算法

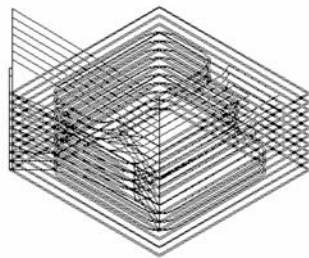
3.1 刀具路径的编辑与优化

刀具路径经 CAM 软件铣削加工模块计算完成之后,一般需要对其进行一定的编辑与修改。即使对于一些点、面或简单形状零件的加工,有时也要对自动生成的刀具路径进行人为的优化。尤其对于较复杂的零件来说,曲面加工时的刀位路径有时会出现几十次甚至上百次抬刀,而这些抬刀在加工时是完全没有必要的。另外,在刀具轨迹计算中,采用的走刀方式经刀位验证或实际加工检验不合理,需要改变走刀方式或走刀方向;生成的刀具轨迹上刀位点可能过密或过疏,需要进行一定的匀化处理等等,所有这些都需要进行刀具路径优化处理。

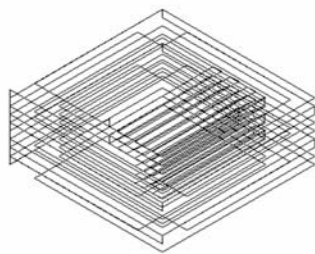
对于微细电解加工而言,工具电极路径的优化结果直接关系着加工结果的形状精度。自动生成的路径在分层铣削时,各分层点的 X 、 Y 坐标往往重叠,这势必对这一点的侧壁进行多次电解加工,严重影响此处的形状精度,所以在优化微细电解加工的工具电极路径时,要把各分层点位置分散开来,避免重复在同一位置向下进给,减小电极侧壁对已加工表面的多次加工,提高工件的形状精度。图 6(a)是要加工零件的实体模型,图 6(b)是由 CAM 软件仿真自动得出的刀具路径,从图中可以看出,自动生成的刀具路径进行了多次抬刀,并且各分层起始点 X 、 Y 坐标重复,为保证微细电解加工结果的形状精度,必须对图 6(b)中的路径进行优化,优化结果如图 6(c)所示,其中删除了不必要的抬刀,分散了各分层点的位置,并且改变了部分走刀方式和走刀方向。



(a) 实体模型
(a) Solid model



(b) 自动生成的刀具路径
(b) Default tool path



(c) 优化后的刀具路径
(c) Optimized tool path

图 6 实体模型及其工具路径

Fig. 6 Solid model and its tool paths

3.2 刀具路径伺服进给算法

DXF 文件的结构由 4 个段 (Section) 和文件结尾标志 (EOF) 组成,其顺序为:标题段 (HEADER)、表段 (TABLES)、块段 (BLOCKS)、实体段 (ENTITIES)、文件结束 (END OF FILE)。在这 5 部分中,与几何图形相关的几何信息都包含在实体段中,因此读取实体信息过程中其他段均可忽略。

实体段(记录组成图形的实体的定义及几何信息)由若干个组构成,每个组占两行。第 1 行为组代码 (GROUP CODE),第 2 行为组值。组代码用来描述数据类型,组值为实体的具体数值。例如直线 LINE,用组代码 10、20、30 代表起始点 (X_1, Y_1, Z_1) ,用组代码 11、21、31 来说明终点 (X_2, Y_2, Z_2) 。对于圆弧 ARC,组代码 10、20、30 代表圆心坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,40 代表圆弧半径 r ,50、51 代表圆弧的起始角度、终止角度。基于此本文用 C 语言编制了接口程序读取,程序流程如图 7 所示。

在读取 DXF 文件的实体信息后,对其进行排序生成实体链表,然后再对各实体段进行高精度的插补运算,生成一连串首尾相连的加工位

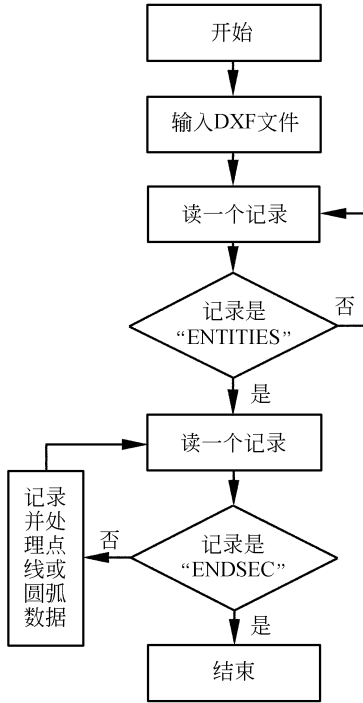


图 7 实体信息读取流程

Fig. 7 Flow of reading entity information

置点位,在微细电解铣削加工过程中,通过调用加工指令链表来控制电极的运动方向。如发生短路现象,要求电极按原进给轨迹快速回退,所以控制系统必须有正、反双向插补功能。图 8 是刀具路径双向进给控制流程图,其中的加工位置点位链表采用双向链表数据结构,链表节点包括本节点的数据、指向前驱节点的指针 prev 和指向后继节点的指针 next,从而实现了刀具路径的双向插补。

加工位置链表是存储运动轨迹中一系列点的位置的数据结构,它精确地控制电极相对于工件运动以获得所需的形状和尺寸,是整个刀具路径运动控制的核心。

3.3 数据处理及反馈控制算法

微细电解加工的加工间隙状态以及加工过程的稳定性对加工质量均有很大的影响。纳秒脉冲微细电解加工中,当间隙小到一定程度时,会发生阳极膜的微火花击穿,此时由于极间被击穿,极间电阻很小,因而相应的回路电流会变得非常大,极易烧断工具电极造成加工彻底中断,所以要对加工间隙的状况进行实时监测,但是由于微米级的加工间隙太小,无法直接测量出其大小。实际加工中多采用实时测量与加工间隙相关的加工过程

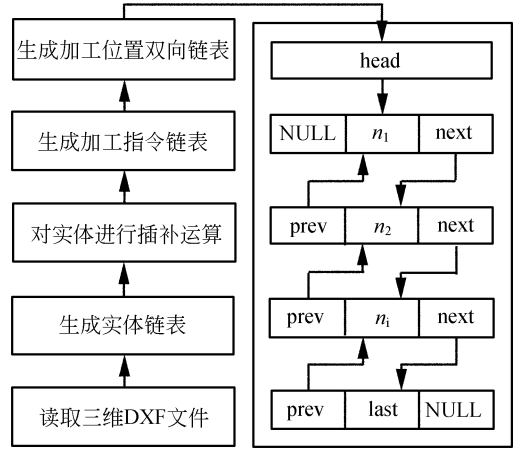


图 8 刀具路径双向进给控制流程图

Fig. 8 Flow of bidirectional feed control for tool path

电参数来间接反映加工间隙的变化,以实时监测电参数的变化,从而及时发现加工短路征兆,迅速采取相应措施,防止间隙过小产生火花放电和短路。

本文实时测量加工中的电流来反应加工间隙的状况,并采用 NI 公司的 6221 数据采集卡作为本系统数据采集与分析的核心,选用两个模拟量输入分别采集对刀电流和加工电流,其 A/D 转换时间仅为 $6 \mu\text{s}$,采集频率为 $3.33 \times 10^5 \text{ sample/s}$,实时性很强。本文采用 NI 公司 Labwindows/CVI 作为软件开发平台,可以方便地调用 NI-DAQmx 数据采集库函数,能最大限度地发挥 NI-6221 的采集性能。

在微细电解铣削加工中,通过实时检测加工电流来监控加工过程中的间隙变化并防止短路现象的发生,把平衡间隙处电流的理论计算值作为加工电流阈值。

$$\Delta_b = \frac{\eta \omega \kappa (U - \delta E)}{v}, \quad (1)$$

$$I = \frac{\kappa (U - \delta E) \cdot A}{\Delta}, \quad (2)$$

式(1),(2)中: k 为电解液电导率, $U - \delta E$ 为极间电压降, v 为加工进给速度, η 为电流效率, ω 为体积电化学当量, I 为加工电流, A 为加工面积。

根据以上两式可推算出到达平衡间隙 Δ_b 时的加工电流:

$$I_b = \frac{vA}{\eta \omega}. \quad (3)$$

以式(3)计算出来的加工电流 I_b 作为阈值,通过实时监视加工过程电流值 I 大小,与 I_b 比较

判断加工是否进入危险状态。若 $I \geq I_b$, 则停止并快速回退, 直到 $I < I_b$, 继续进给加工, 由此可见数据采集子系统是整个加工系统的基础。

微细电解加工时的电流数值一般在 1 mA 以下, 数值很小, 所以很容易受到外界环境的干扰, 这就对数据的采集及反馈控制带来了不利影响, 在实际加工中, 由于受到电主轴旋转时的电磁噪音干扰, 采集的电流数据出现明显的噪音波形, 如图 9 所示, 噪音的波峰可达 100 mA 以上。如果不对噪音进行处理, 只按 $I < I_b$ 判断则极易产生误判, 以致产生错误控制。分析研究表明, 加工中的电磁噪音有一定的周期规律, 每个噪音波形持续的时间周期不大于 15 ms。针对此特点, 可以编制抗干扰算法来甄别噪音引起的电流突变与短路引起的电流突变。

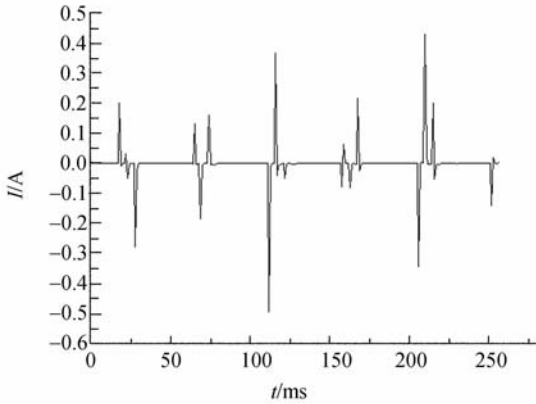


图9 含噪音的电流波形

Fig.9 Current waveform with noise

预设采集卡的采样频率为 1 000 Hz, 单位时间内采样点数为 1 000, 即 1 ms 采集一个数据点。

设采集到的每个电流数据值为 $I_i (i=0, 1, 2 \dots n)$, 对此基于均值滤波原理进行滤波, 以 15 ms 为周期对连续的一组电流绝对值进行平均运算, 表达式如下:

$$\bar{I} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} |I_i|, \quad (4)$$

式(4)中, \bar{I} 为一周期内电流均值, I_i 为采样数据点。

通过以上均值处理后, 噪音信号的持续时间将不会超过 2 个连续的数据点。所以, 可由以下判别算法来区分噪音和短路信号。

Int flag, $j, t=0$;

For ($j=1; j < 1000; j++$)

```
{
If ( $\bar{I}_j > \bar{I}_b$ )
{
If ( $\bar{I}_{j+1} < \bar{I}_b$ )
{ $P_t = \bar{I}_{j+1}; t = t + 1; \text{flag} = 0;$ } //屏蔽  $\bar{I}_j$ , 标识正常;
elseif ( $\bar{I}_{j+1} > \bar{I}_b$ ) && ( $\bar{I} < \bar{I}_b$ )
{ $P_t = \bar{I}_{j+2}; t = t + 1; \text{flag} = 0;$ } //屏蔽  $\bar{I}_j$  和  $\bar{I}_{j+1}$ , 标识正常;
else { $\text{flag} = 1; \text{break};$ } //短路处理;
}
else { $P_t = \bar{I}_j; t = t + 1;$ }
}
```

若超常数据点连续出现 2 个以内, 就视为噪音信号, 将其屏蔽掉; 但若超常数据点连续出现 2 个以上, 则视为短路, 并沿原路径快速回退 1 μm , 然后再次检测电流信号是否正常, 如超常则继续回退。据加工经验, 一般的暂时性短路电极回退 5 μm 以内电流信号就会恢复正常, 但如果连续回退 5 μm 还未恢复正常, 则标识为不可恢复性短路, 只能终止加工。

3.4 加工时间误差补偿算法

为保证高的加工精度, 本文采用脉冲增量法^[13-14]进行插补运算, 脉冲增量法的特点是每次插补的结果仅产生一个单位的行程增量, 以一个脉冲指令的方式输出给电机, 用折线来逼近直线和曲线, 其插补精度取决于脉冲当量的大小。在一定的插补精度下再对刀具路径实体链表进行插补, 生成加工位置链表。

由于软硬件限制, 指令的发出、执行需要占用一定的固有时间 Δt , 其值虽然为毫秒级但对超低速运行的运动平台而言是不可忽略的。这就使平台的预设速度小于实际加工速度, 从而使实际加工时间增长。为使实际加工时间和预设时间相符, 就得对其进行误差补偿, 补偿方式有两种, 一种是在高插补精度下提高平台的进给速度, 另一种是降低插补精度。假设平台实际进给速度为 X , 平台预设速度为 Y , 插补精度为 S , 则 X, Y, S 存在以下函数关系式:

$$\frac{1}{\Delta t + S/Y} \times S = X, \quad (5)$$

现在以第一种补偿方式对加工时间进行误差补偿, 经检测本文中系统平台的 $\Delta t \approx 0.02 \text{ s}$, 微细

电解加工需要的较高插补精度为 $0.2 \mu\text{m}$, 则上式变为:

$$\frac{1}{0.02+0.2/Y} \times 0.2 = X$$

假设欲使平台的实际加工速度 X 为 $2 \mu\text{m/s}$, 则平台预设速度 Y 为:

$$Y = \frac{X}{1-0.1 \times X} = 2.5 \mu\text{m/s}$$

通过以上速度补偿算法, 可以弥补因指令的发出和执行带来的时间延迟。经实际加工验证, 补偿后的加工时间与预设时间一致性好, 平台运行平稳, 加工稳定。

4 加工实验及结果

本文基于图 10 所示的加工控制与检测软件系统, 采用直径 $10 \mu\text{m}$ 的圆柱钨电极作为工具阴极, 以图 3 所示模型为实例, 在厚度为 $300 \mu\text{m}$ 的镍基高温合金 GH3030 上进行了微细电解分层

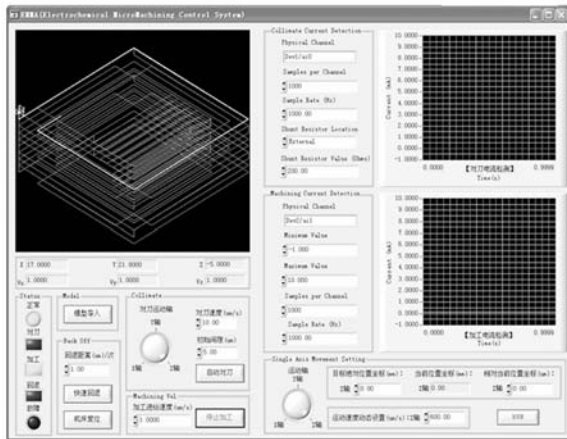


图 10 控制与检测系统软件界面

Fig. 10 System software interface of control and detection

铣削加工试验, 试验参数为: $0.2 \text{ mol/LH}_2\text{SO}_4$ 电解液, 加工电压 4.5 V , 脉宽 95 ns , 脉冲周期 $1 \mu\text{s}$ 。型腔分 9 层加工, 单层铣削厚度为 $5 \mu\text{m}$, 加工结果如图 11 所示, 型腔总深约 $45 \mu\text{m}$, 单层阶梯尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。加工结果边棱明显, 侧壁陡直, 具有较高的形状精度。

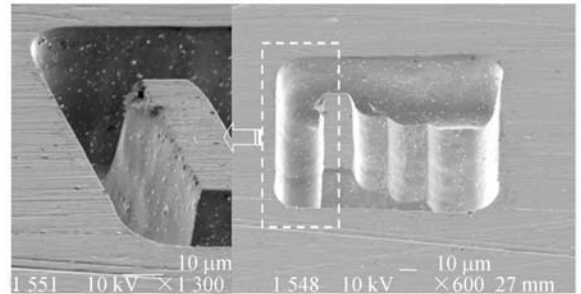


图 11 微三层阶梯结构

Fig. 11 Micro structure of three steps

5 结论

本文根据微细电解铣削加工精度高和响应速度快等需求, 建立了基于 Labwindows/CVI 软件平台的控制与检测系统, 利用虚拟仪器平台建立了基于分层铣削加工方式的三维轨迹进给控制模块, 并对刀具路径的优化进行了讨论。然后, 介绍了数据采集处理算法以及加工实时控制的时间补偿函数。最后, 基于以上控制系统, 成功加工出了单层尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 的三层阶梯结构, 加工结果具有较大的深宽比, 良好的形状精度, 侧壁陡直、边棱明显, 表明本系统可以很好地满足微细电解铣削加工的高精度、快响应、稳定可靠等要求。

参考文献:

- [1] TAKAHATA K, GIANCHANDANI Y B. Batch mode micro-electro-discharge machining [J]. *Microwelectromech. Syst*, 2002, 11: 102 - 110.
- [2] 赵万生, 李志勇, 王振龙, 等. 微三维结构电火花铣削关键技术研究[J]. *微细加工技术*, 2003, (3): 49-55.
- ZHAO W S, LI Z Y, WANG Z L, *et al.*. Research on key techniques of 3D Micro-EDM milling [J].

Microfabrication Technology, 2003, 9 (3): 49-55. (in Chinese)

- [3] 明平美, 朱荻, 胡洋洋, 等. U-V LIGA 技术制备微型柔性镍接触探针[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 735-740.

MING P M, ZHU D, HU Y Y, *et al.*. Fabrication of nickel soft contact microprobe based on UV-LIGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 735-740. (in Chinese)

- [4] 黄文浩,朱兰芳,陈宇航,等.基于原子力显微镜的PMMA飞秒激光纳米加工技术[J].光学精密工程,2007,15(12):1959-1962.
HUANG W H, ZHU L F, CHENG Y H, *et al.*. AFM based femto-second laser nanofabrication of PMMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1959-1962. (in Chinese)
- [5] 郑晓虎,朱荻.金属微结构阵列的电铸成型[J].光学精密工程,2008,16(3):473-477.
ZHENG X H, ZHU D. Micro electroforming of metal microstructure array [J]. *Precision Engineering*, 2008, 16(3): 473-477. (in Chinese)
- [6] 赵岩,梁迎春,白清顺,等.微细加工中的微细铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J].光学精密工程,2007,15(6):894-902.
ZHAO Y, LIANG Y C, BAI Q S, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Precision Engineering*, 2007, 15(6): 894-902. (in Chinese)
- [7] SCHUSTER R, KIRCHINER V, ALLONGUE P, *et al.*. Electrochemical micromachining [J]. *Science*, 2000, 289: 98-101.
- [8] TRIMMER A L. Electrochemical Machining of Micro and Nanostructures with Ultra-shot Voltage Pulse [D]. Virginia: University of Virginia, 2005.
- [9] KIM B H, NA C W, LEE Y S, *et al.*. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using dilute sulfuric acid [J]. *Annals of the CIRP*, 2005, 54/1: 191-194.
- [10] KIM B H, RYU S H, CHOI D K, *et al.*. Micro electrochemical milling [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(1): 124-129.
- [11] 李小海,王震龙,赵万生.基于多功能加工平台的维系电解加工工艺[J].上海交通大学学报,2006,40(6):909-913.
LI X H, WANG Z L, ZHAO W S. The electrochemical micromachining based on multifunction tool for micromachining [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*. 2006, 40(6): 909-913. (in Chinese)
- [12] 张朝阳,朱荻,王明环.纳秒脉冲微细电化学加工的理论及试验[J].机械工程学报,2007,43(1):208-213.
ZHANG Z Y, ZHU D, WANG M H. Theoretical and experimental research into electrochemical micro-machining using nanosecond pulses [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 208-213. (in Chinese).
- [13] 吴晓苏,吴伟.计算机数据采样插补算法及其在现代数控系统中的应用[J].机械设计与制造,2005,(8):103-105.
WU X S, WU W. Data sampling interpolation algorithm bases on computer sampling theory and its application in modern numerical control system [J]. *Machinery Design & Manufacture*. 2005, (8): 103-105. (in Chinese)
- [14] 施群,王小椿.步进伺服系统高效插补控制算法研究[J].电气传动,2005,35(3):30-35.
SHI Q, WANG X C. Study on interpolating algorithm in CNC using stepping servo system [J]. *Electric Drive*. , 2005, 35(3): 30-35. (in Chinese)

作者简介:



刘勇(1982—),男,山东日照人,博士研究生,2004年、2007年分别于山东理工大学获得学士、硕士学位,主要从事微机电控制、精密和微细加工方面的研究。E-mail: rzliuyong@163.com



曾永彬(1977—),男,重庆人,博士,讲师,2008年于南京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为特种加工、微细加工。E-mail: binyz@nuaa.edu.cn



黄绍服 (1974—), 男, 辽宁兴城人, 副教授, 博士研究生, 主要从事微机电控制、精密和微细加工方面的研究。
Email: shfhuang@nuaa.edu.cn



王少华 (1981—), 男, 浙江湖州人, 博士研究生, 主要从事微机电控制、精密和微细加工方面的研究。E-mail: shaohuafei2008@yahoo.cn

导师简介:



朱 毅 (1954—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 1985 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学校长, 主要从事特种加工和微细加工方面的研究。E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

● 下期预告

全光纤 MZI 型三信道波长交错滤波器的改进

任恩恩¹, 鲁 彦², 鲁怀伟¹, 罗冠炜¹

- (1. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 西南交通大学 峨眉校区电气工程系, 四川 峨眉 614202)

为改善全光纤三信道波长交错器的输出特性, 提出了一种不对称结构的三光纤臂 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI), 该光纤干涉仪由一个一字型 3×3 单模光纤耦合器和一个品字型 3×3 单模光纤耦合器以及三条光纤干涉臂组成, 其中一字型 3×3 单模光纤耦合器作为输入耦合器, 品字型 3×3 单模光纤耦合器作为输出耦合器。推导了该器件的输出表达式, 并进行了数值模拟。模拟结果表明: 相对于常规全光纤 MZI 型三信道波长交错器, 该交错器具有较低的信道间功率旁瓣, 信道间功率旁瓣降低了约 13.6 dB, 并且对器件参数偏差不敏感。实验上用光纤熔融拉锥法制作了该器件, 实验结果与理论分析吻合很好, 实验样品的信道间旁瓣值 < -34.6 dB, 插入损耗 < 1.0 dB, 信道隔离度 > 30 dB。