

# 基于定长补偿法的短电弧铣削加工电极补偿研究\*

王帅帅<sup>1</sup>, 李雪芝<sup>1</sup>, 陈小康<sup>1</sup>, 周建平<sup>1†</sup>, 王恪典<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 在短电弧铣削加工中, 工具电极的严重损耗影响着机床的加工效率和被加工零件的几何精度. 为了实现更加高效高质和稳定的短电弧铣削加工, 本文对短电弧铣削加工电极损耗量进行研究. 基于定长补偿法, 利用VS2012软件对UG进行二次开发, 搭建短电弧铣削加工工具电极损耗补偿软件, 通过改变加工数据, 运用软件预测出电极损耗量, 并通过软件将损耗量作为补偿量对加工NC代码进行定长补偿. 通过实验证明, 使用定长补偿法补偿后的加工工件几何精度和加工效率都有大幅提高, 所采用的补偿方法有效的降低了电极损耗带来的加工误差.

**关键词:** 短电弧铣削; 电极损耗; 定长补偿; UG二次开发

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.02.12.0001

**中图分类号:** TH164 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)02-0242-09

**引文格式:** 王帅帅, 李雪芝, 陈小康, 等. 基于定长补偿法的短电弧铣削加工电极补偿研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(2): 242-250.

**英文引文格式:** WANG S S, LI X Z, CHEN X K, et al. Research on electrode compensation system of short electric arc milling based on fixed length compensation method[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(2): 242-250.

## Research on Electrode Compensation System of Short Electric Arc Milling Based on Fixed Length Compensation Method

WANG Shuaishuai<sup>1</sup>, LI Xuezhizhi<sup>1</sup>, CHEN Xiaokang<sup>1</sup>, ZHOU Jianping<sup>1</sup>, WANG Kedian<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830047, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shanxi 710049, China)

**Abstract:** In short electric arc milling, the serious wear of tool electrode affects the machining efficiency of machine tool and the geometric accuracy of machined parts. In order to achieve more efficient and high-quality, stable short electric arc milling. Means: This paper studies the electrode wear of short electric arc milling, based on the fixed length compensation method, uses vs2012 software to redevelop UG, and builds the electrode wear compensation software of short electric arc milling tool. By changing the machining data, the electrode wear is predicted by software, and the wear is used as compensation to compensate the machining NC code with fixed length by software. Result: Experiments show that the geometric accuracy and machining efficiency of the workpiece are greatly improved by using the compensation method of fixed length. Conclusion: The compensation method effectively reduces the machining error caused by electrode wear.

**Key words:** short arc milling; electrode wear; fixed length compensation; UG secondary development

## 0 引言

短电弧加工是指在一定比例带压力气、液混合物工作介质作用下, 利用两个电极之间产生的受激发短电弧放电群组或火花放电群组蚀除金属或非金属导电材料的一种电加工方法<sup>[1]</sup>. 该技术是一种专门针对高强度、高硬度和高耐磨等非规导导电材料的去除工艺. 近年来, 短电弧加工技术在煤磨辊、水泥轧辊、航空机匣和航空发动机密封零件等方面均已投入使用, 且表现出良好的去除性能. 但在加工过程中仍存在问题, 例如: 表

\* 收稿日期: 2020-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51765063); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2018B02009-4); 新疆维吾尔自治区天山雪松计划项目(2018XS01).

作者简介: 王帅帅(1994-), 男, 硕士生, 从事特种加工技术研究.

† 通讯作者: 周建平(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事机电控制技术、特种加工与数控技术、信号采集与分析的研究.

面较为粗糙、电极损耗较大等。其中加工过程工具电极损耗影响着短电弧加工的加工效率和几何精度<sup>[2]</sup>,制约着短电弧技术的发展。

为改善电极损耗所带来的问题,国内外学者针对电火花铣削加工中电极损耗补偿问题进行了大量的研究, Jae Won Jung等<sup>[3]</sup>提出一种将加工蚀除物体积和放电脉冲数量建立比例关系的方式,对放电间隙和脉冲频率之间关系进行控制,达到对电火花加工中电极损耗进行补偿。Jayakumar Narasimhan等<sup>[4]</sup>提出一种刀具路径规划模型,将电极补偿和刀具路径相关联,损耗补偿融入刀具路径模型中,进而在加工中进行工具电极补偿。黄河<sup>[5]</sup>运用RBF神经网络进行电极损耗预测,将工艺参数作为网络输出,从而直接通过工艺参数进行电极补偿。李剑忠等<sup>[6]</sup>基于微细电火花提出了一种线性补偿和均匀补偿相结合的方法,将此方法和CAD/CAM技术相结合进行电极损耗补偿。裴景玉团队<sup>[7,8]</sup>针对电火花加工提出了定长补偿方法,运用电磁理论建立电极损耗模型,通过此模型预测电极损耗量,从而将补偿量事先写入加工程序中,通过仿真和实验证明取得良好的补偿效果。上述结果均为电火花加工领域的相关研究,针对短电弧铣削加工技术工具电极损耗尚未应用有效的补偿方法,所以本文采取相应补偿手段改善电极损耗带来的影响。

本文基于定长补偿法运用VS2012软件对UG进行二次开发建立短电弧铣削加工补偿软件,通过软件将定长补偿值插入到NC代码中,实现对NC代码离线更改,达到加工工具电极损耗的补偿效果,最后通过实验对补偿前后加工结果进行对比,从而为补偿软件的有效性提供依据。

## 1 电极损耗模型的建立

短电弧加工是非接触放电加工的一种,其工作方式为正极性加工,根据能量分配原则,放电产生能量将被分配在工具电极、工件和工作介质周围,分配到工具电极的能量是造成工具电极损耗的直接因素<sup>[9]</sup>。工具电极加工前后电极形貌如图1所示,从图1(a)中可知加工前工具电极形状为标准中空圆柱电极;图1(b)所示为加工后工具电极形貌,可以看出工具电极底面和边角都已经产生了较为严重的损耗,电极几何形状产生较大变化,导致加工工件表面完整性和预加工几何形状受到影响。

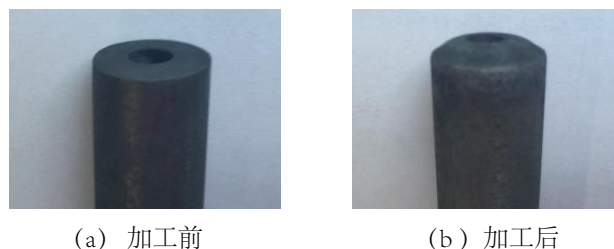


图1 工具电极加工前后电极形貌图  
Fig 1 Electrode morphology before and after tool electrode processing

数控短电弧铣削通槽电极损耗原理如图2所示。理想状态为加工深度为 $\Delta z$ 的通槽,加工轮廓线应是一条水平线,但是由于在加工过程中工具电极损耗,深度为 $\Delta z$ 的通槽随加工方向X的进给逐渐变浅,使加工轮廓线不是理想的水平线。根据端面磨损理论,使用合适的加工参数,电极在进入稳定损耗期后,加工中形状保持不变,仅在长度方向上产生磨损<sup>[10]</sup>。加工过程中,电极损耗不是突然发生的,而是伴随在整个加工过程中,因此进行通槽加工时,被加工工件的加工截面轮廓线不是理想的水平线,一般呈现为曲线或者斜坡状线。

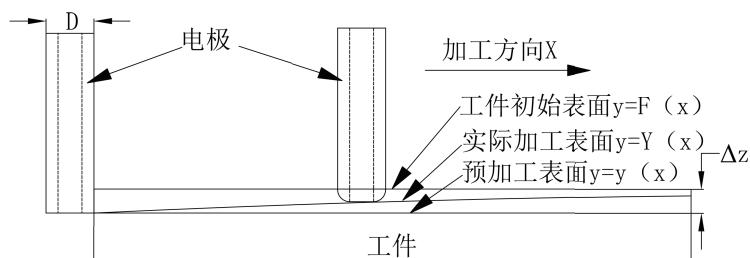


图2 铣削过程电极损耗原理图  
Fig 2 Schematic diagram of electrode wear during milling

短电弧铣削加工电极损耗率常用体积损耗率、质量损耗率和重量损耗率等表示。本文采用体积损耗率进行计算。即:

$$\delta = V_E / V_R \quad (1)$$

式中:  $\delta$ 为体积损耗率;  $V_E$ 为电极损耗体积;  $V_R$ 为工件去除体积.

如图2所示, 设初始加工表面轨迹为 $y = F(x)$ , 电极预加工表面轨迹为 $y = f(x)$ , 由于电极损耗在加工过程中是不可能避免, 故设电极实际加工表面轨迹为 $y = Y(x)$ . 当电极沿 $X$ 方向运动加工一个很小的单位 $\Delta x$ 时, 则去除体积 $\Delta V_R$ 为:

$$\Delta V_R = [F(x) - Y(x)]D\Delta x \quad (2)$$

式中:  $\Delta V_R$ 为在 $\Delta x$ 距离的工件去除体积;  $D$ 为工具电极直径;  $\Delta x$ 为电极在 $X$ 方向运动的距离.

电极损耗体积 $\Delta V_E$ 表达式为:

$$\Delta V_E = S_E \cdot \Delta h \quad (3)$$

式中:  $\Delta V_E$ 为在 $\Delta x$ 距离的电极损耗的体积;  $S_E$ 为工具电极横截面面积;  $\Delta h$ 为电极轴向损耗长度.

由图3可知, 加工了 $\Delta x$ 距离的电极损耗量为 $\Delta h$ , 表达式为:

$$\Delta h = \frac{dY(x)}{dx} \Delta x - \frac{df(x)}{dx} \Delta x \quad (4)$$

由(1)(2)(3)式可得

$$\frac{dY(x)}{dx} = \frac{\delta D}{S_E} F(x) + f(x) - \frac{\delta D}{S_E} Y(x) \quad (5)$$

由式(5)非齐一阶线性微分方程可得

$$Y(x) = e^{-\frac{\delta D}{S_E} x} (f(0) + \int_0^x (\frac{\delta D}{S_E} F(x) + f'(x)) e^{\frac{\delta D}{S_E} x} dx) \quad (6)$$

因为加工工件为简单的平面, 且预加工轨迹也为平面, 则 $F(x) = 0$ ,  $f'(x) = 0$ . 方程简化为:

$$Y(x) = f(0) e^{-\frac{\delta D}{S_E} x} \quad (7)$$

当加工深度为 $\Delta z$ 时, 则 $f(0) = -\Delta z$ ,  $S_E = \pi(\frac{D}{2})^2$ . 将式(7)进一步简化得到加工电极损耗模型为:

$$Y(x) = -\Delta z e^{-\frac{4\delta}{\pi D} x} \quad (8)$$

模型 $Y(x)$ 图像如图4所示.

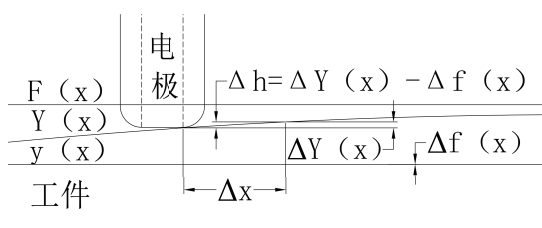


图3 铣削过程电极损耗数学模型图

Fig 3 Mathematical model of electrode wear in milling process

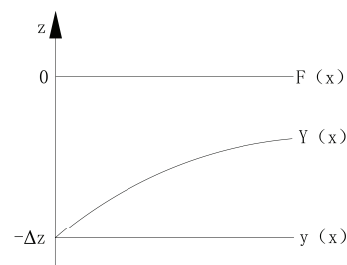


图4 无补偿已加工底面轮廓

Fig 4 No compensation has been processed base contour

## 2 工具电极损耗补偿方法

为了提高短电弧铣削加工效率和精度, 本文基于定长补偿法, 利用VS2012建立补偿软件. 定长补偿原理如图5所示. 根据加工所需精度, 可以决定补偿间隙时间和补偿量的大小, 当预加工工件体积对应的电极损耗量达到设定值 $h_E$ 时, 便会补偿为 $h_E$ 的量,  $h_E$ 为补偿量, 当确定补偿量后可通过公式进行电极补偿距离 $l_E$ 的计算. 也就是说当工具电极沿 $X$ 方向进给 $l_E$ 的距离就会沿 $Z$ 方向负方向进给 $h_E$ 的量, 如此重复以上过程则称为定长补偿法. 如图5所示, 设电极沿直线加工距离 $l_E$ 后损耗 $h_E$ , 根据式(8)可得:

$$-\Delta z e^{-\frac{4\delta}{\pi D} l_E} = -\Delta z + h_E \quad (9)$$

简化可得:

$$l_E = -\frac{\pi D \ln \frac{\Delta z - h_E}{\Delta z}}{4\delta} \tag{10}$$

式中:  $l_E$ 为电极补偿距离;  $h_E$ 为补偿量;  $\Delta z$ 为加工深度;  $D$ 为电极直径;  $\delta$ 为体积损耗率.

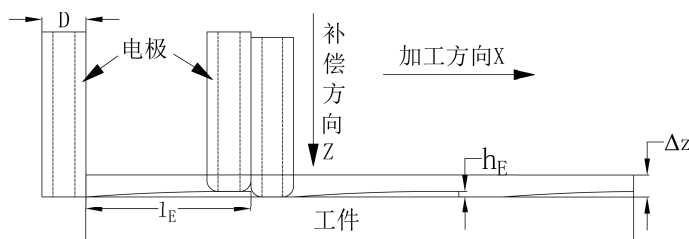


图5 定长补偿原理图

Fig 5 Fixed length compensation schematic diagram

由图5可知, 运用定长补偿法所加工零件剖面线呈锯齿状, 补偿精度与机床精度和选取补偿量 $h_E$ 有关.

### 3 基于UG二次开发的补偿软件搭建

该补偿软件基于定长补偿法使用Microsoft Visual Studio2012为开发工具对UG进行二次开发, 软件以UG为运行环境, 使用NXopen和C语言联合开发. 通过补偿软件将定长补偿值插入到短电弧加工NC代码中, 实现短电弧铣削可以在离线状态先进行定长补偿.

#### 3.1 补偿软件搭建前期准备

##### 3.1.1 后台文件设置和菜单挂载

后台文件设置和菜单挂载步骤如下: ①建立电极补偿菜单文件夹, 在该文件夹中建立Application、Startup等文件夹, 如图6所示; ②在Startup文件夹中建立.men文件, 以文本文档方式打开添加菜单内容如图7所示, 添加内容包括图标、快捷方式、挂载位置和菜单等级等; ③通过改变软件在电脑环境变量把开发的工具挂载在UG NX10.0菜单栏上, 如图8所示; ④完成短电弧刀具补偿菜单的挂载, 其中包括刀具补偿的下拉菜单, 如图9所示.

Application	2019/4/11 2:20	文件夹
icon	2018/10/23 19:51	文件夹
ini	2018/10/23 19:51	文件夹
Kfa	2018/11/1 13:42	文件夹
Startup	2019/1/9 21:25	文件夹

图6 补偿菜单文件夹

Fig 6 Compensation menu folder

```

UGdaojubuchang - 记事本
文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)
VERSION 120
EDIT UG_GATEWAY_MAIN_MENUBAR

AFTER_UG_HELP
CASCADE_BUTTON XXX
LABEL 短电弧刀具补偿
END_OF_AFTER
MENU_XXX

BUTTON_CN_CN_DAOJU_BTN
LABEL 刀具补偿
BITMAP asterisk_sc
ACCELERATOR Alt+O
ACTIONS 电极补偿
END_OF_MENU
    
```

图7 菜单内容

Fig 7 Menu content

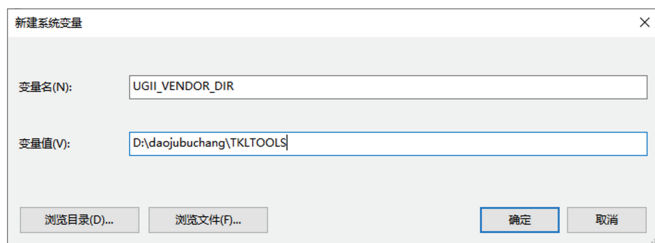


图8 更改环境变量

Fig 8 Change the environment variable



图9 菜单挂载

Fig 9 Mount the menu

##### 3.1.2 UI界面的设计

使用UG NX10.0中自带的UI样式编辑器进行UI界面的设计, 在UI界面中添加插入模块、数字框、浏览文件、

浏览文件夹等功能,并对每个功能进行默认功能设置,如图10所示为UI界面搭建过程.界面搭建完成后保存生成.hpp、.cpp和.dlx模块文件.

将UI界面生成的.dlx模块复制到电极补偿菜单文件夹的Application文件夹中,然后进行UG NX10.0和VS2012的内部连接配置,达到软件联合开发的目的,将UI界面生成的.hpp和.cpp导入到VS2012进行后台代码的编写.

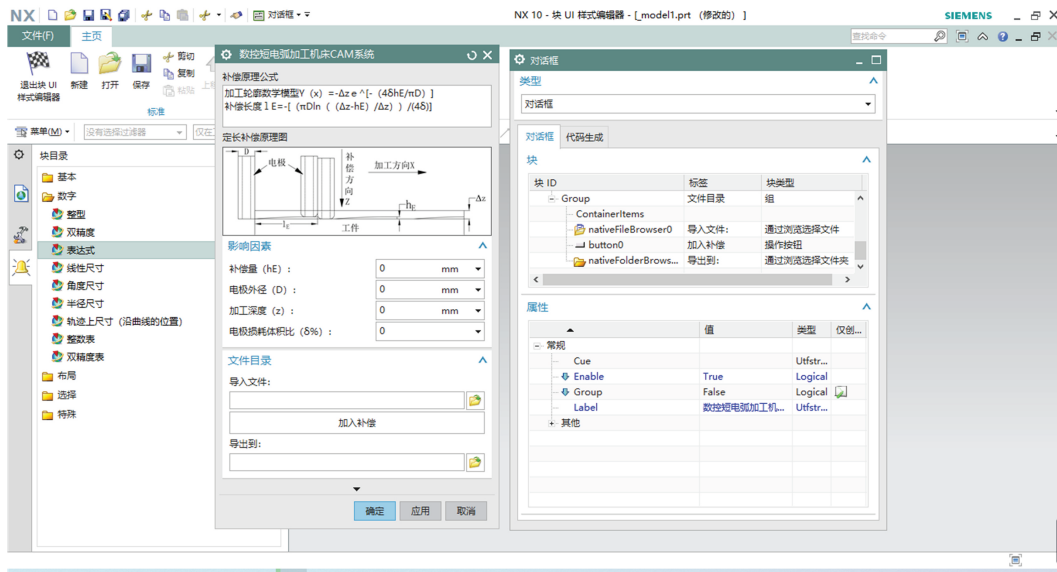


图 10 UI界面的搭建

Fig 10 Construction of UI interface

### 3.2 补偿软件开发流程

该补偿软件主要以程序运行流程和加工代码解释流程两个重要部分组成.程序运行流程如图11所示,运行步骤如下:①通过导入模块读取NC代码文件,并判断文件是否为空;②对NC代码进行逐行读取,通过程序判断代码是否为空,或者是否有效,将有效代码进行解释流程,通过解释和运算得到加工长度、加工深度、损耗量或补偿量等加工数据;③通过对代码的读取获得补偿类别,并对读取数据进行补偿值的插入;④导出补偿后的NC代码.

加工代码解释流程如图12所示,运行步骤如下:①获得有效非空的第*i*行代码,对第*i*行代码所读取内容进行判断;②通过判断结果分别调用对应函数进行数据处理;③将处理后的数据存入暂存区中,以备下一步运算的调用.

补偿软件如图13所示,软件由补偿量原理公式、补偿原理图、所需计算数据和文档的导入导出四部分构成.通过更改加工路径定长量、电极内外径和电极损耗率等数据使用补偿运力公式计算出在定长加工时的补偿量,通过读取导入的加工代码文档,对其坐标值进行计算和更改,最后存入新的文档中并导出文档.

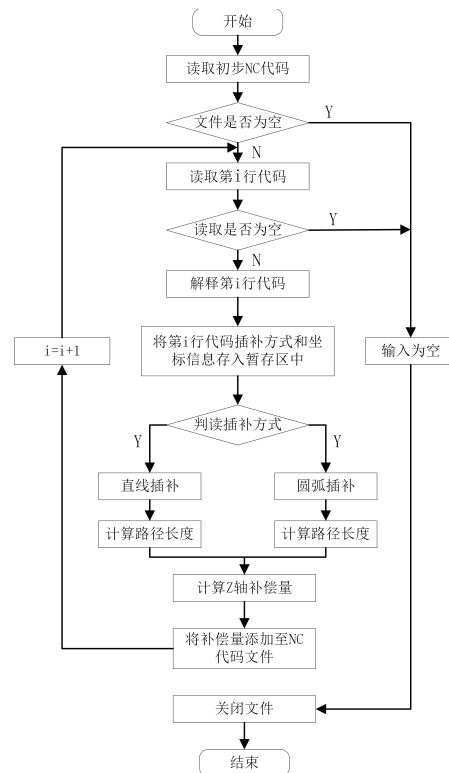


图 11 补偿程序开发流程示意图

Fig 11 Compensation program development process diagram

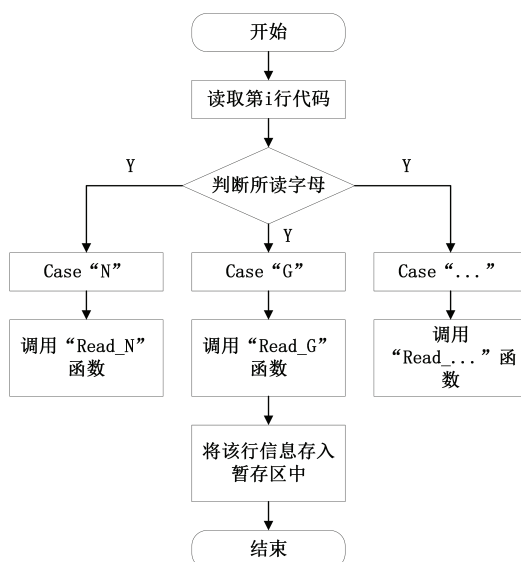


图 12 加工代码解释流程

Fig 12 Process code interpretation process

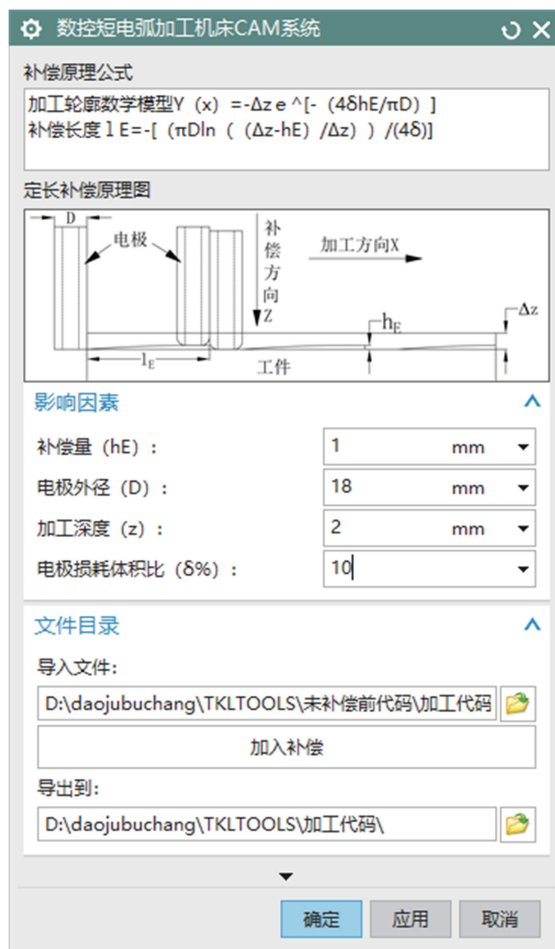


图 13 完成后补偿软件

Fig 13 Compensation software after completion

## 4 实验验证

本次实验使用设备为三轴数控短电弧铣削装置, 主要包括铣床床身部分、控制部分和气液循环系统, 配合直流短电弧电源组成, 设备示意图如图14所示.

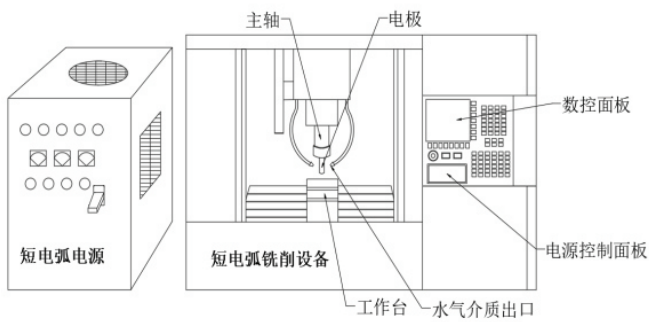


图 14 数控短电弧设备示意图

Fig 14 Schematic diagram of nc short arc equipment



(a) 工件

(b) 工具电极

图 15 加工工件和工具电极

Fig 15 Machining workpiece and tool electrode

本次实验采用45#钢为加工工件,如图15(a)所示,工具电极采用石墨覆铜电极,如图15(b)所示.石墨作为工具电极时,相对电极损耗率均在10%以下,并且体积损耗率在5%以下的占70%<sup>[11]</sup>.故补偿实验选取相对电极损耗率 $\delta$ 为5%.其他实验数据如表1所示.

表 1 短电弧加工实验参数

Tab 1 Experimental parameters of short arc machining

实验条件	实验参数
工件	45#钢 (60×40×5) mm长方体
工具电极	石墨覆铜电极 (外径16 mm, 内径10 mm)
铣削深度	2 mm
加工距离	60 mm
工作电压	28 V
极性	正极性
主轴转速	300 r/min
补偿量 $h_E$	1 mm

未使用补偿软件加工工件如图16所示,工件材料去除量为9.1 g,未达到预期效果.由图16(a)所示,加工的通槽宽度逐渐变窄,并且在槽的两侧有明显圆弧状区域,该现象说明短电弧设备在铣削过程中工具电极的边角损耗较为严重,已经影响到了加工表面的完整性,如再继续进行加工,将造成电极损耗量过大而无法对工件材料进行去除.从图16(b)所示剖面图可知铣削的加工深度逐渐变浅,且加工剖面线呈曲线,这是由于在铣削过程中工具电极轴向被放电损耗,所以不能有效完成预期的加工深度.



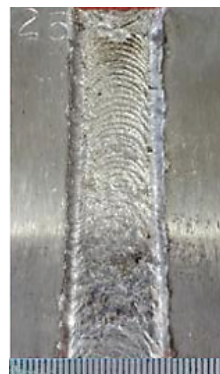
(a) 加工表面图



(b) 加工剖面图

图 16 未使用补偿软件加工工件图

Fig 16 No compensation software is used to process the workpiece diagram



(a) 加工表面图



(b) 加工剖面图

图 17 使用补偿软件加工工件图

Fig 17 Use compensation software to process the workpiece diagram

加入补偿后加工工件如图17所示, 由图17(a)所示可知加工的槽前后加工宽度没有明显变化; 由图17(b)剖面图可知加工剖面线几乎呈一条直线, 没有出现曲线或斜坡状, 说明补偿软件对解决边角损耗和轴向损耗均有效. 使用软件补偿后工件材料去除量为17.1 g, 与预期理想工件材料去除量较为相近, 证明了补偿软件的使用明显的提高了加工效率.

未使用补偿软件和使用补偿软件加工后通槽的加工深度对比如图18所示. 从图18可知未使用补偿软件的工件铣削深度大幅下降, 逐步趋于零, 使用补偿软件的工件铣削深度较为平缓, 且接近预加工深度; 未使用补偿软件和使用补偿软件加工后, 通槽的铣削宽度对比如图19所示. 从图19可知未使用补偿软件铣削宽度存在大幅下降趋势, 若再进一步加工, 由于电极损耗已经超过加工深度, 吃刀量趋向于零, 则存在无法加工的现象; 使用补偿软件的工件铣削宽度较为平缓, 且铣削宽度和电极外径接近. 由图18、图19可知, 该补偿软件在加工中能够补偿大部分的电极损耗, 证明了该软件在实际加工运用中效果较为理想.

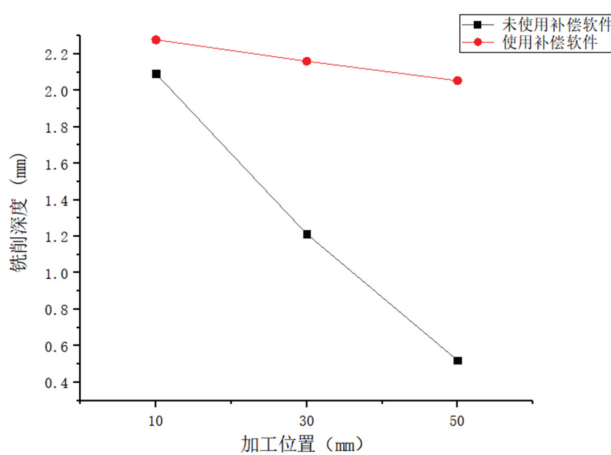


图 18 铣削深度对比图

Fig 18 Milling depth comparison diagram

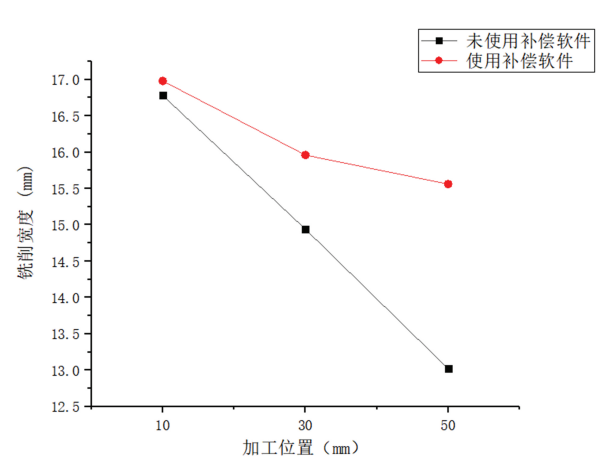


图 19 铣削宽度对比图

Fig 19 Milling width comparison diagram

通过上述实验, 从实际运用层面验证了补偿软件的有效性, 明显的降低了由电极损耗所带来的加工误差, 显著的提高加工效率和几何精度.

## 5 结束语

短电弧加工技术中电极损耗补偿是加工的关键技术之一, 本文以加工效率和材料去除量为衡量指标, 提出将定长补偿法运用在短电弧铣削过程中.

首先根据体积损耗率和加工轨迹微分建立短电弧铣削电极损耗模型; 然后运用定长补偿法建立电极损耗补偿模型; 再将定长补偿模型导入到UG二次开发的软件中; 通过输入关键加工参数计算出补偿距离, 将补偿量插入到加工NC代码中完成补偿; 最后通过对比实验验证了该补偿方法在短电弧铣削中的可行性.

由实验结果可知: 该补偿方法在短电弧铣削中运用, 有效的降低了由于电极损耗所带来的加工误差, 提高了加工效率和几何精度, 为短电弧铣削电极损耗补偿技术进一步发展打下了基础.

## 参考文献:

- [1] 卢江, 梁楚华, 周碧胜. 基于短电弧切削加工技术高效性特点的研究[J]. 电加工与模具, 2011(2): 61-64.  
LU J, LIANG C H, ZHOU B S. The research of the high efficiency based on the short electricity arc cutting[J]. Electrical Processing and Mold, 2011(2): 61-64. (in Chinese)
- [2] 陈小康, 周建平, 许燕, 等. 短电弧铣削加工圆柱电极边角损耗研究[J]. 现代制造工程, 2019(10): 77-81.  
CHENG X K, ZHOU J P, XU Y, et al. Study on the marginal wear of cylindrical electrode with short arc milling[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(10): 77-81. (in Chinese)
- [3] JUNG J W, JEONG Y H, MIN B K, et al. Model-based pulse frequency control for Micro-EDM milling using real-time discharge pulse monitoring[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering Transactions of the Asme, 2008, 130(3): 876-877.

- [4] NARASIMHAN J, YU Z, RAJURKAR K P. Tool wear compensation and path generation in Micro and Macro EDM[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2005, 7(1): 75-82.
- [5] 黄河. 基于内冲液旋转电极的电火花铣削机床与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
HUANG H. Research on Ed-milling machine tool and key technologies based on rotational electrode and inner jetted dielectrica[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 李剑忠, 栾纪杰, 虞慧岚, 等. 微细电火花三维加工中电极损耗补偿新方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(4): 525-528.  
LI J Z, LUAN J Z, YU H L, et al. A new method of electrode wear compensation in 3D micro-EDM[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(4): 525-528. (in Chinese)
- [7] ZHANG L A, DU J Y, ZHUANG X S, et al. Geometric prediction of conic tool in Micro-EDM milling with fix-length compensation using simulation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015(89): 86-94.
- [8] PEI J Y, ZHUANG X S, ZHANG L, et al. A model of tool wear in electrical discharge machining process based on electromagnetic theory[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018(124): 22-32.
- [9] 高睿恒, 张发旺, 顾琳, 等. 水中电火花放电能量分配系数研究[J]. 电加工与模具, 2014(2): 1-4+9.  
GAO R H, ZHANG F W, GU L, et al. Research on energy distribution coefficient of electro-discharge in water[J]. Electrical Processing and Mold, 2014(2): 1-4+9. (in Chinese)
- [10] 董颖怀. 一种微型涡轮发动机的关键结构及其制造技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
DONG Y H. A study of key structures and fabrication technology of a Micro turbine engine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 王博. 数控短电弧铣削加工工具电极损耗规律研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.  
WANG B. Study of NC short arc milling tool wear law[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017. (in Chinese)

责任编辑: 赵新科

(上接第 241 页)

- [13] 胡松伶, 王渝红, 李兴源. 有利于多馈入系统恢复的自适应变结构VDCOL控制[J]. 高压电器, 2016(5): 90-95.  
HU S L, WANG Y H, LI X Y. Adaptive variable structure VDCOL control strategy for coordinated recovery of MIDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2016(5): 90-95. (in chinese)
- [14] 毛晓明, 张妍. 交流故障后MIDC系统交错协调恢复研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 571-578.  
MAO X M, ZHANG Y. Research on coordinated staggered recovery of MIDC systems after AC faults[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 571-578. (in chinese)
- [15] 李新年, 陈树勇, 庞光恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.  
LI X N, CHEN S Y, PANG G H, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for east China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140. (in chinese)
- [16] 袁阳, 卫志农, 王华伟, 等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 565-570.  
YUAN Y, WEI Z D, WANG H W, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570. (in chinese)
- [17] WEI Z N, YUAN Y, LEI X, et al. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2417.
- [18] 尹纯亚, 李凤婷, 张增强, 等. 直流闭锁引发多馈出直流系统换相失败分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 138-145.  
YIN C Y, LI F T, ZHANG Z Q, et al. Commutation failure analysis of multi-outfeed HVDC system caused by DC blocking[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2019, 36(2): 138-145. (in chinese)
- [19] 牟文涛, 李凤婷. 电网不对称故障时双馈风电机组的运行特性仿真分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 273-278.  
MU W T, LI F T. Simulation analysis of DFIG operation characteristics during asymmetrical grid fault[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2015, 32(3): 273-278. (in chinese)

责任编辑: 赵新科