

引文格式: 刘家豪, 罗学科, 刘建勇, 等. 基于主方向摄动的电火花直线轴联动加工效率研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 122-129.

LIU Jiahao, LUO Xueke, LIU Jianyong, et al. Research on efficiency of EDM linear axis linkage machining based on main directional ingestion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 122-129.

基于主方向摄动的电火花直线轴联动加工效率研究*

刘家豪, 罗学科, 刘建勇, 李殿新, 杨晓宇, 张慧杰, 李若冰, 寇鹏远, 王高博

(北京石油化工学院, 北京 102600)

[摘要] 基于电火花联动加工算法的实现机理进行了建模与试验研究, 探究了电火花直线轴多轴联动加工效率与单轴加工效率的差异性。根据多种联动需要和电火花加工自身工艺特点, 设计开发了主方向摄动插补算法, 与传统逐点比较法插补相比可提升联动加工效率。通过分析消耗的增加减速时间以及连续运动时间, 比较非放电和放电两种条件下单轴与联动插补的效率。结果表明, 通过基于主方向摄动算法与插补轴逐级耦合的方式实现多轴联动是可行的; 多轴联动与单轴运动相比有着较大幅度效率损失, 非放电情况下, 二轴联动的效率损失最大值约 25.47%, 三轴联动的效率损失最大值约 46.30%, 结果的波动受单轴连续进给比例影响。放电情况下, 在本组试验中, 将该直线插补算法与逐点比较法的材料去除速率进行对比, 二轴联动提升约 7.91%, 三轴联动提升约 11.92%。

关键词: 直线轴联动; 电火花数控机床; 直线插补; 主方向摄动; 联动加工效率

中图分类号: V261.6+1; TP202 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.122

Research on Efficiency of EDM Linear Axis Linkage Machining Based on Main Directional Ingestion

LIU Jiahao, LUO Xueke, LIU Jianyong, LI Dianxin, YANG Xiaoyu, ZHANG Huijie, LI Ruobing,

KOU Pengyuan, WANG Gaobo

(Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China)

[ABSTRACT] This paper studies the efficiency differences between multi-axis and single-axis EDM using a spark link algorithm. A main direction ingestion interpolation algorithm was designed and developed, based on various linkage requirements and EDM process characteristics. Compared with the traditional point-by-point comparison method, this algorithm can improve linkage efficiency. By analyzing the consumed acceleration and deceleration time and continuous motion time, the efficiency of single-axis and linkage interpolation under non-discharge and discharge conditions was compared. The results show that multi-axis linkage has a significant efficiency loss compared to single-axis motion. Furthermore, the main direction ingestion interpolation algorithm can effectively reduce the efficiency loss caused by linkage. Under non-discharge conditions, the maximum value of efficiency loss for two-axis linkage is about 25.47%, and the maximum value of efficiency loss for three-axis linkage is about 46.30%, and the results fluctuate depending on the continuous feed ratio of single-axis motion. Under discharge conditions, in terms of material removal rate comparisons, the two-axis linkage improved by about 7.91%, and the three-axis linkage improved by about 11.92%.

Keywords: Linear axis linkage; EDM CNC machine tool; Linear interpolation; Main direction ingestion;

Multi-axis linkage efficiency

随着航空航天、军工能源领域大型能源压缩机、重型运载火箭的快速发展, 新材料新结构不断出现, 使得电火花加工技术的应用越来越广泛^[1], 在当前制造业数字

化的结构性调整趋势下, 数字化工厂建设进程加速^[2], 多轴联动数控电火花机床的需求越来越大。

数控机床的插补算法通常分为基于脉冲增量插补和

* 基金项目: 北京石油化工学院交叉科研探索项目 (BIPTCSF-017); 北京石油化工学院致远科研基金 (2023003)。

数据采样插补两种^[3]。基于脉冲增量插补又细分为逐点比较法与数字积分插补,通常应用于步进电机、伺服电机等控制系统中;数据采样插补通常应用于数控机床、机器人等需要高精度、高速度控制的系统中^[4]。电火花加工属于一种非接触式加工,具有“以柔克刚”、精密微细、仿形逼真等特点,但达到高精度高效率的加工效果依赖于稳定的火花放电,需要自动伺服进给系统及时切断放电脉冲,以避免拉弧和寄生放电,导致电火花加工中工件的蚀除速度非均匀,只能大致估计当前的加工速度,不符合数据采样插补方法中加工速度精确预置的要求,因此基于脉冲增量插补的逐点比较法更加适合电火花^[5]。

多轴联动数控机床在实际运用中存在联动加工效率比单轴加工低的弊端,国内外学者不断在优化算法方面进行研究。逐点比较法直线插补方法在开环数控系统中被广泛应用,但存在插补误差大、直线光滑性差等缺点,国内学者席港港^[6]、张柱银^[7]等提出基于逐点比较法的优化算法,避免了无穷大导数计算、多分支判断编程复杂等缺陷,提高了逐点比较法的直线插补精度。在提升插补质量和效率方面的研究中, Yang 等^[8]提出了一种新的数控机床拐角平滑局部方法,可以精确地获得更平滑的转弯轨迹、加速度和稳定的速度,从而实现最优运动;王旭浩^[9]、Bu^[10]、魏栋^[11]等提出了一种关于 S 形加减速控制的多轨迹段平滑过渡的前瞻插补算法,以减少插补冲击与误差。五轴联动是高端数控机床的优势,因此曲线插补也是近年来研究的热门方向,国内外学者对 NURBS 等曲线插补进行了多种方式的优化^[12-18]。

现有较新的插补算法研究多应用于传统机加工,而电火花频繁进给回退的伺服特性与传统机加工存在显著区别,因此大多数较新的联动插补算法研究成果并不适用于电火花加工。目前关于电火花加工效率的研究主要集中在电参数与放电环境上,较少有关于电火花加工伺服特性与联动方式对加工效率影响的研究。本文提出一种针对电火花加工的直线插补算法,在伺服运动控制层面提升电火花的加工效率,采用理论建模与试验测试分析相结合的方法,对基于该算法的电火花加工效率进行定量分析与研究。

1 基于主方向摄动的直线插补算法

由于电火花加工数控系统受到放电加工蚀除速度、油槽工作液阻力及不稳定性等因素限制,对系统移动速度的要求不高,基于脉冲增量控制的逐点比较法更适合电火花的伺服特点。传统逐点比较法与优化后的逐点比较法关注当前位置与目标路径的位置关系,即解析式的正负判断,导致该算法更倾向控制不同的轴交替插补,考虑到每个脉冲当量下的伺服进给都会存在一个加速与一

个减速时间,频繁交换插补轴将会极大影响联动效率。

本文提出一种主方向摄动插补算法,其基本原则是:在二轴插补过程中规定一个允许误差 μ 与一个摄动主方向,在摄动过程中计算副方向与目标轨迹的轴向距离,若小于 μ ,则继续主方向进给;若大于 μ ,则向副方向进给一步后,再继续主方向进给。这种插补方式的特点是在误差允许范围内,最大限度地保证同方向的进给,每进行一步同方向的进给,就会节省一个启动和减速时间,从而提高联动效率。

1.1 主方向摄动插补的进给判别

以直线插补为例, X 轴为主方向,直线的一端点为坐标原点,另一个端点为终点 $D(x_d, y_d)$,则直线方程为

$$x_d y - y_d x = 0 \quad (1)$$

假设下一步向主方向 X 进给后的点与直线在 Y 方向的距离为 ε ,若 $|\varepsilon| \leq \mu$ (μ 为预先设定的允许误差),则继续向主方向进给一步;若 $|\varepsilon| > \mu$,则向副方向进给一步。由此建立判别函数。

$$F_n = \left| \frac{y_d}{x_d} x_n - j\tau \right| - \mu \quad (2)$$

式中, F_n 为该算法的函数式; x_n 为第 n 个插值点的横坐标变量; j 为已经主方向进给的脉冲数; τ 为 1 个脉冲的轴向进给距离。

若 $F_n \leq 0$,下一步向主方向 X 进给一个脉冲当量,则递推判别式变为

$$F_{n+1} = \left| \frac{y_d}{x_d} x_{n+1} - j\tau \right| - \mu \quad (3)$$

若 $F_n > 0$,下一步向副方向 Y 进给一个脉冲当量,而 X 方向不动, $j = j + 1$,则递推判别式变为

$$F_{n+1} = \left| \frac{y_d}{x_d} x_n - j\tau \right| - \mu \quad (4)$$

定义目标直线更靠近直角坐标轴的轴向为主方向,否则在插补初期就会偏离目标直线,导致完成整个插补周期后误差过大。插补算法流程如图 1 所示。

以图 2~4 为例,简要说明与逐点比较法的区别。如图 2 所示,点 A 的位置在直线下方,按解析式判断此处为小于 0,逐点比较时应向上进给。基于主方向摄动插补以允许误差为判断依据,点 A 与直线的轴向距离小于允许误差 μ ,则继续向主方向进给,这样就减少了一次插补轴的交替。

当直线的斜率较小或较大时,该插补方法的效果将更加明显。如果采用传统逐点比较法,如图 3 所示,在 A、B 两点处的判断使插补误差增加,而主方向摄动插补在该两点上的处理会更贴合目标直线,如图 4 所示。

主方向摄动法插补在处理较大斜率和较小斜率直

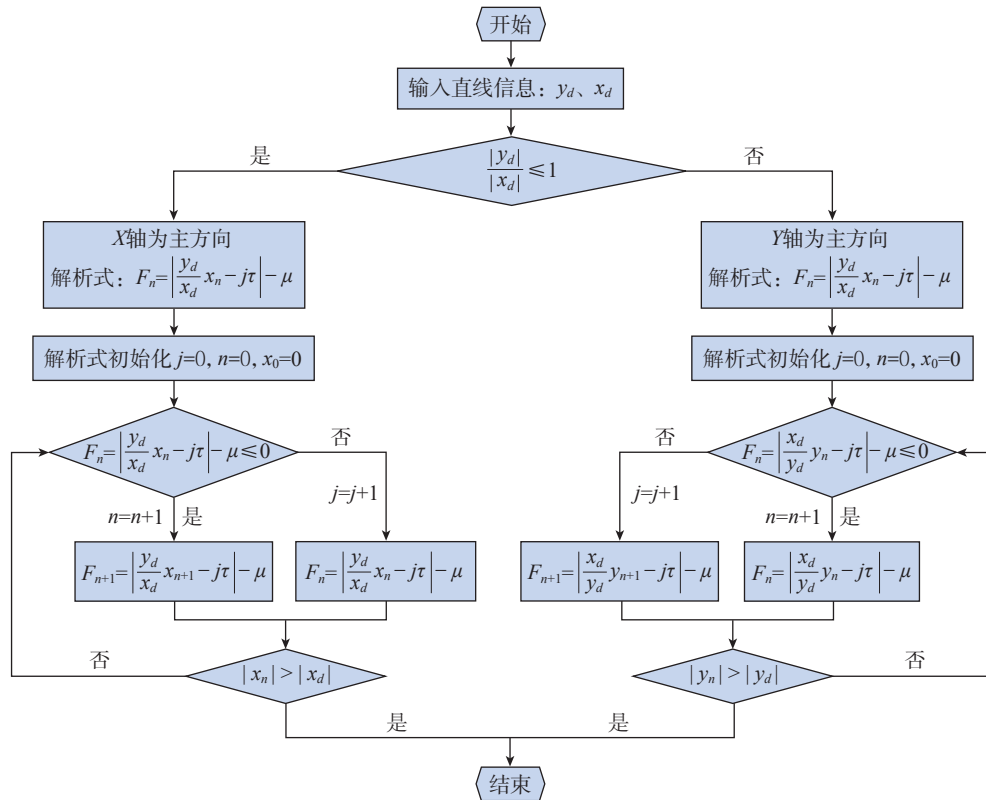


图1 主方向扰动插补算法流程图
Fig.1 Flow chart of main direction perturbation interpolation algorithm

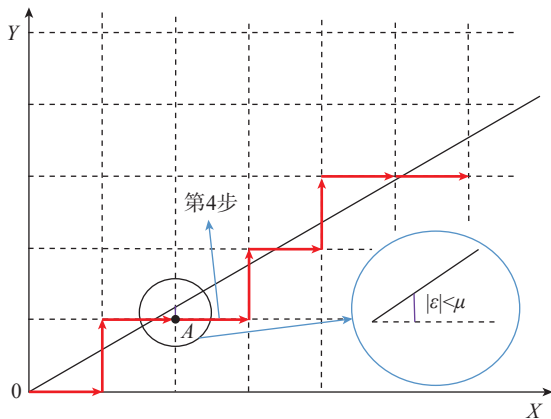


图2 主方向扰动插补
Fig.2 Main direction perturbation interpolation

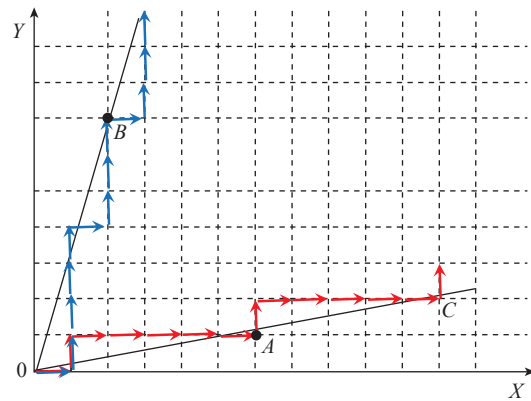


图3 逐点比较法插补大/小斜率直线
Fig.3 Interpolation of high/low slope lines using point by point comparison method

线时,首先可以通过选择扰动主方向来减少插补后的锯齿状;其次在允许误差的条件下保证单个轴的连续进给,在图4中A、B、C 3点处的处理提高了单轴连续进给时间在整个插补周期的占比,换言之就是降低了因联动轴交替插补而产生的加减速时间在整个插补周期的占比,提高了联动效率。

1.2 直线插补误差对尺寸精度的影响

该直线插补算法不当预设的误差会使后续插补轨迹与原目标有所偏差,导致尺寸精度受到影响,本文在几何

关系上计算最大偏差的值,预设的允许误差值可根据工件尺寸、放电状态、放电间隙等因素综合考量选取。

以图5为例说明直线插补误差对尺寸精度的影响。直线AB在图5中的几何关系为 $L_{AB}=2l(1-\tan\theta)$,当 $l(1-\tan\theta)<|\mu|<3l(1-\tan\theta)$ 时,可证明插补点距目标直线的最大偏差为 $2l\sin\theta<|\varepsilon_{\max}|<3l\sin\theta$ 。此关系可扩展为当 $(n-1)\cdot l(1-\tan\theta)<|\mu|<(n+1)\cdot l(1-\tan\theta)$ 时,插补点距目标直线的最大偏差 $n\cdot l\sin\theta<|\varepsilon_{\max}|<(n+1)\cdot l\sin\theta$,其中 l 为插补步长, θ 为直线与主方向坐标轴的

夹角, $\theta \leq 45^\circ$ 。特别的, 当 $n=1$ 且 $|\varepsilon| < l(1-\tan\theta)$ 时, $|\varepsilon_{\max}| < 2l \sin\theta$ 。

1.3 多轴联动插补逐级耦合的思想与实现

基于脉冲增量控制的插补, 各轴均由脉冲驱动的伺服电机进行控制, 每个电机具有一定的分辨率。若分辨率为 1‰, 则每个脉冲驱动下直线轴运行 0.001 mm, 旋转轴转动 0.001° 。每个长度或者角度都可以最终统一转化为脉冲数。装备运行采用 G 代码控制, 目标工件的具体空间结构最终都要转化为一组 G 代码提供给数控系统, 系统正确地从 G 代码当中提取出各轴的运行数据和运行方式以驱动装备运行。

为实现对空间直线的插补, 需要进行多轴联动配合。具体插补步骤如下。

(1) 目标路径的划分。根据不同直线或曲线的特点选取若干特征点, 将整条路径划分为若干直线段进行直线插补。

(2) 根据运动学变换计算下一步目标点的坐标位

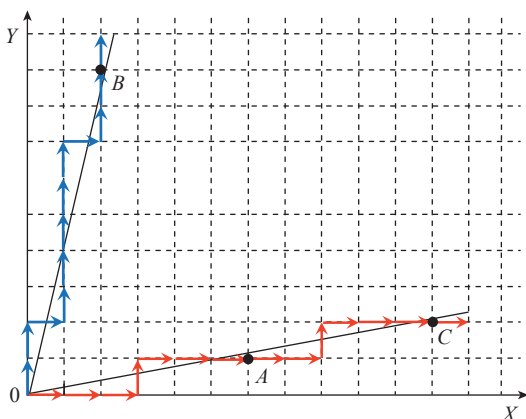


图 4 主方向摄动法插补大/小斜率直线
Fig.4 Interpolation of high/low slope lines using main direction perturbation method

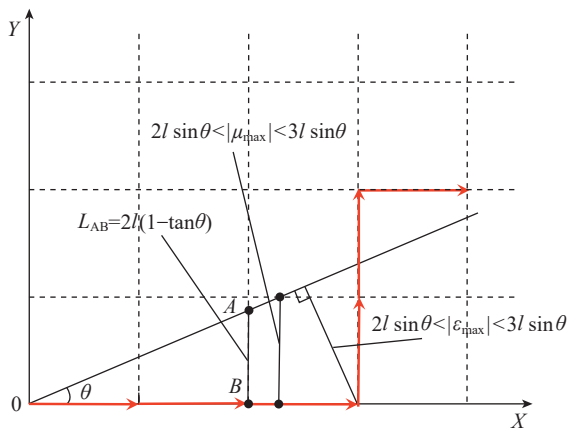


图 5 尺寸精度影响
Fig.5 Impact of dimensional accuracy

置。随着多轴联动的进行, 坐标系也在不断改变, 设 a 坐标系下一点坐标转换到 b 坐标系下的齐次变换矩阵为 b_aT , 建立该机床的正运动学变换矩阵^[19-22]。

$${}^p_zT = {}^p_xT {}^x_yT {}^y_zT \quad (5)$$

其中各变换矩阵表达式为

$${}^y_zT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{zy} \\ 0 & 1 & 0 & y + \Delta y_{zy} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^x_yT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x + \Delta x_{yx} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_{yx} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_{yx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^p_xT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{xp} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_{xp} \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_{xp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, x, y, z 分别为在 X, Y, Z 3 个方向上的伺服控制系统的进给量; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为各坐标系间转换时因整体机械结构导致的 X, Y, Z 3 个方向上的位移增量常数。

(3) 通过主方向摄动算法与分组逐级耦合相结合的思想实现多轴联动控制。以六轴联动为例, 三组二轴进行一级插补, 再由两个一级插补组成二级插补, 根据主方向摄动法判断标准分配脉冲, 逐级耦合完成空间直线路径目标, 如图 6 所示。

2 电火花伺服特性对联动效率的影响

稳定的火花放电在持续一段时间后会向电弧放电转变, 若不能及时切断放电通道, 则容易产生拉弧现象灼伤工件表面, 影响加工精度和质量, 因此在电火花放电加工过程中需要不断的伺服回退; 另一方面, 在工件表面材料被蚀去或回退完成后, 电极与工件表面间隙变大, 又需要电极进给来持续放电加工。这种频繁进给回

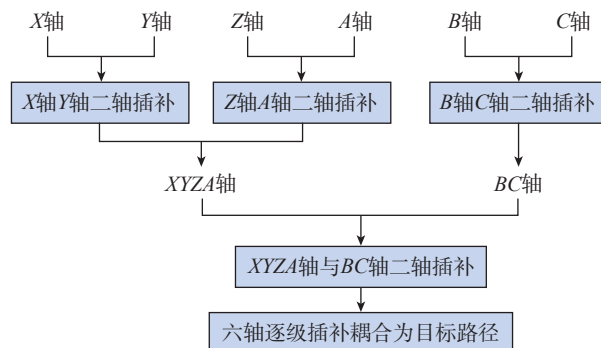


图 6 多轴联动插补逐级耦合
Fig.6 Multi-axis linkage interpolation with step-by-step coupling

退的过程是电火花的伺服特性,在放电加工过程中,还存在其他因素影响效率,包括联动伺服特性影响、微动进给过程中轴伺服响应特性影响、放电加工影响等。

2.1 联动伺服特性影响

在脉冲增量控制的插补过程中,各轴根据在判别式分配的脉冲下,频繁“启动-匀速-减速”,如图7所示,一个脉冲周期有3个过程^[23]。

(1)加速过程 T_a : 接受进给脉冲,处于加速阶段,即 $v_{i+1} = v_s + a_1 T_a$ (9)

式中, a_1 为 T_a 过程加速度; v_s 为前次脉冲进给继承到下一个脉冲进给的初速度。

(2)匀速过程 T_m : 保持输出速度不变,即 $v_{i+1} = v_m$ (10)

式中, v_m 是匀速保持的速度。

(3)减速过程 T_b : 在接到下一次进给脉冲之前保持匀减速,即

$v_{i+1} = v_m - a_2 T_c$ (11)

式中, a_2 为 T_c 过程加速度; T_b 为匀速保持过程的时间; v_c 是减速过程结束时的速度

各插补轴在电机接收到1个脉冲后,开始进行一次 $1 \mu\text{m}$ 的距离或 0.001° 的进给,但由于系统内各部分的响应信号的传递在纳秒级别,而轴的响应速度在毫秒级别^[24],二者之间有着量级的差距,前一次进给还在匀速进给的过程中就收到了下一次的进给信号,那么将保持这个匀速阶段继续进行下一次的进给,如图8所示,因此联动时间不能简单地用脉冲次数乘以一个完整的电机进给周期。

频繁地启动和停止会影响到多轴联动的效率,而单轴直线运动就是只有一个加速和一个减速阶段,其余部分为匀速运动阶段,因此通过联动合成的直线与单轴直

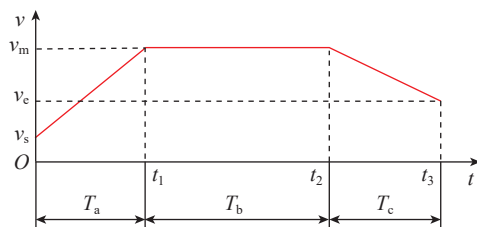


图7 基于脉冲控制的直线型加减速

Fig.7 Linear acceleration and deceleration based on pulse control

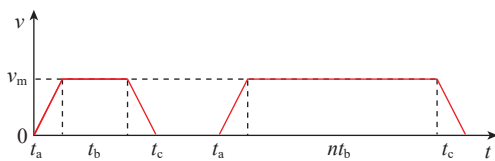


图8 基于脉冲控制的连续进给

Fig.8 Continuous feed based on pulse control

线进给相比一定会造成效率损失。由以上论述可知,联动时间不能简单地用脉冲次数乘以一个完整的电机进给周期,基于主方向摄动法控制的两轴插补可以在误差允许范围内尽可能地保留更多的同轴进给,降低联动插补时过多加减速产生的效率影响。

2.2 电火花伺服特性影响

在电火花加工中,电极与工件之间必须保持一定的间隙。由于工件不断被蚀除,电极也有一定损耗,间隙将不断扩大,如果电极不能及时进给补偿,放电过程会因间隙过大而停止;反之,间隙过小又会引起拉弧烧伤或短路,此时要求电极迅速离开工件,待短路消除后再重新调节到适宜的放电间隙。自动伺服控制系统通过比较检测的间隙平均电压与预先设定的伺服参考电压 S_r , 调节进给方向与进给速度,实现及时切断放电脉冲避免拉弧和寄生放电的产生的目的,因此在放电加工过程中伴有频繁的插补进给与原轨迹回退,导致前文所提的联动效率损失放大。

根据图9所示的放电间隙与加工速度和表面粗糙度的关系曲线,保持放电间隙在短路间隙 S_d 和最佳放电间隙 S_j 之间,通过图10所示的自动进给系统实时调节放电间隙,进行伺服进给和回退。自动进给调节系统控制的伺服回退会沿原轨迹回退,直至检测间隙电压达到伺服基准电压附近。

另一方面,随着放电过程中工件蚀除的深入,排屑

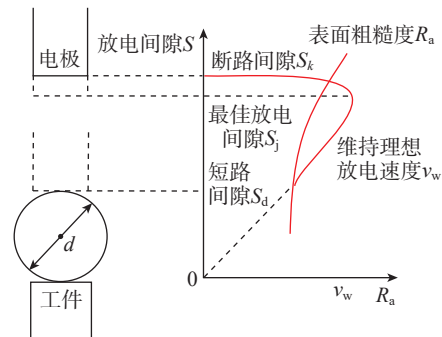


图9 放电间隙与加工速度、表面粗糙度关系曲线

Fig.9 Relationship curve between discharge gap, machining speed, and surface roughness

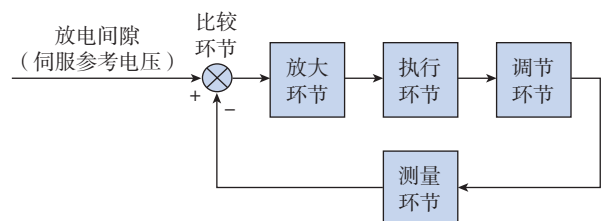


图10 自动进给调节系统组成方框图

Fig.10 Block diagram of the composition of the automatic feed adjustment system

条件变差,电蚀产物无法顺利排出,甚至充满电极间隙,导致大量二次放电,大幅降低加工效率,甚至造成短路。

3 联动效率的试验验证

以本团队针对电火花伺服特性自主研发的基于 Windows+RTX 系统的三轴成型电火花数控机床为试验对象,如图 11 所示,各轴均采用交流伺服电机。

试验材料采用 $\phi 5$ mm 紫铜柱状电极,试验中还用到工件夹具和磁性加工台,试验的电参数如表 1 所示。

试验方案为空载与放电两种工况下,对比单轴运动与多轴联动完成相同直线长度时的效率,以及多轴联动完成不同斜率直线插补的效率。

3.1 空载时二轴三轴联动的效率损失

在空载条件下,以单轴运动完成特定距离,再以主



图 11 基于 Windows 的电火花机床
Fig.11 EDM machine tool based Windows

方向扰动插补算法下的二轴联动与三轴联动耦合出对应路径长度,测量并分析联动对效率的影响,表 2 和表 3 分别为二轴联动和三轴联动与单轴运动的时间及时间效率占比。

根据前文分析并结合表 2 和表 3 中的试验数据验证,可以得到如下结论。

(1) 根据表 2 和表 3 的时间效率占比可知,多轴联动会大幅度降低时间效率,随着联动轴数目增加效率下降的现象十分明显,二轴联动的效率下降最大值约为

表 1 试验的电参数

Table 1 Electrical parameters of the experiment

脉宽/ μs	脉间/ μs	峰值电流/ A	伺服基准 电压/V	主回路 电压/V
8	20	6.0	15	180

表 2 二轴联动与单轴的时间效率对比

Table 2 Comparison of time efficiency between two axis linkage and single axis

序号	各轴进给距离 (X, Y)/mm	二轴联动 时间/s	单轴运动 时间/s	时间效率 占比/%
1	(30, 40)	2.14	1.81	84.57
2	(60, 80)	4.28	3.42	79.90
3	(50, 120)	5.38	4.01	74.53
4	(80, 150)	6.67	5.33	79.91
5	(200, 120)	9.12	6.85	75.10
6	(280, 200)	12.92	9.81	75.92

表 3 三轴联动与单轴的时间效率对比

Table 3 Comparison of time efficiency between three axis linkage and single axis

序号	各轴进给距离 (X, Y, Z)/ mm	轨迹长度/mm	三轴联动时间/s	单轴运动时间/s	时间效率占比/%
1	(30, 40, 50)	70.71	3.21	2.52	78.50
2	(45, 45, 30.8)	70.71	3.76	2.52	67.02
3	(60, 80, 100)	141.42	7.15	3.84	53.70
4	(70, 90, 82.95)	141.42	5.81	3.84	66.09
5	(100, 80, 100)	162.48	8.05	4.78	59.37
6	(120, 60, 90.8)	162.48	6.67	4.78	71.66
7	(80, 150, 170)	240.42	11.31	7.01	61.98
8	(95, 130, 177.97)	240.42	9.44	7.01	74.28
9	(200, 120, 100)	253.78	10.72	7.26	67.72
10	(140, 160, 137)	253.78	12.18	7.26	59.61
11	(120, 160, 200)	282.84	13.34	8.02	60.12

25.47%，三轴联动效率下降最大值约为 46.30%。

(2) 根据表 3 中的 5 组数据：序号 1 和 2、序号 3 和 4、序号 5 和 6、序号 7 和 8、序号 9 和 10 可知，当轨迹长度相同但直线路径斜率不同时，主方向扰动插补下更贴近主方向坐标轴的直线轨迹，有更多的连续进给，因此其效率更高，印证前文“伺服特性及理论联动时间的分析”中的单个轴连续进给的次数越多，节省的加减速时间越多，联动效率就越高的理论猜想。

3.2 放电条件下的效率验证

在放电条件下，衡量加工效率的指标为单位时间的材料去除量，即材料去除速率， mm^3/min 。直径 5.0 mm 的紫铜柱状电极以 X 轴在 5 mm 深处单轴进给 20 mm 的材料去除量 598.125 mm^3 为基准，换算出二轴和三轴联动应进给的距离，如图 12 所示。二轴联动在 4.551 mm 深处，X 轴进给 20 mm，Y 轴进给 10 mm；三轴联动的 X 轴进给 17.32 mm，Y 轴进给 10 mm，Z 轴进给 10 mm。通过试验比较主方向扰动插补算法与逐点比较法的材料去除率。

试验结果如图 12 和表 4、表 5 所示，经试验测得放电情况下应用逐点比较插补算法时，随着联动轴数目的增加，材料去除速率逐渐下降，二轴联动下降约 14.7%，三轴联动下降约 21.1%；应用主方向扰动插补算法时，二轴联动下降约 8.07%，三轴联动下降约 11.76%。也就是说对比本组试验中直线插补算法与逐点比较法的材料去除速率，二轴联动提升约 7.91%，三轴联动提升约 11.92%。该对照试验证明了本插补算法有助于提高电火花成形加工的加工效率。

4 结论

(1) 伺服电机频繁进行“启动-匀速-减速”动作，使联动插补时各轴的匀速运动段的时间在整个运动周期中的占比量较单轴时大幅减少。非放电条件下，本文

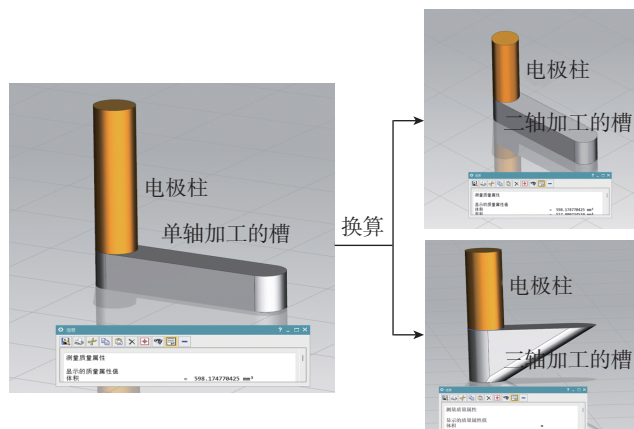


图 12 相同材料去除量下的加工轨迹模拟

Fig.12 Simulation of machining trajectories under the same material removal amount

所做试验中的两轴联动效率损失最大约为 25.47%，三轴联动效率损失最大约为 46.30%，结果随着联动轴数目的增加而显著降低。

(2) 电火花因其伺服特性，会放大联动损失带来的影响，通过尽可能保证单个轴在插补过程中连续进给，可以提升联动效率。本文提出的基于主方向扰动插补算法令较大或较小斜率的直线路径在插补中有更多连续进给的机会。

(3) 经试验验证，本文提出的基于主方向扰动直线插补法与逐级耦合算法的方式实现多轴联动切实可行，在实际放电加工时，提高了材料去除率，有助于提高加工效率，对比直线插补算法与逐点比较法材料去除速率，二轴联动提升约 7.91%，三轴联动提升约 11.92%。



图 13 放电加工材料去除

Fig.13 Removal of discharge machining materials

表 4 放电条件下的试验验证 (逐点比较法)

Table 4 Experimental verification under discharge conditions (point by point comparison method)

联动轴数量	材料去除量/ mm^3	运动距离/ mm	完成时间/ min	材料去除速率/ (mm^3/min)
单轴	598.125	20.0	46.92	12.75
二轴	598.125	20, 10, 0	55.04	10.87
三轴	596.156	17.32, 10, 10	59.28	10.06

表 5 放电条件下的试验验证 (主方向扰动法)

Table 5 Experimental verification under discharge conditions (main direction perturbation method)

联动轴数量	材料去除量/ mm^3	运动距离/ mm	完成时间/ min	材料去除速率/ (mm^3/min)
单轴	598.125	20.0	46.87	12.76
二轴	598.125	20, 10, 0	50.97	11.73
三轴	596.156	17.32, 10, 10	52.93	11.26

参考文献

- [1] 赵万生, 康小明, 顾琳, 等. 放电加工技术在航空航天制造中的应用[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 32–46.
- ZHAO Wansheng, KANG Xiaoming, GU Lin, et al. Application of electrical discharge machining technology in aerospace manufacturing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 32–46.
- [2] 杨白冰, 杨子明, 郭迎锋. 企业数字化转型中的就业结构效应——基于制造业上市企业年报文本挖掘的实证分析[J]. 中国软科学, 2023(4): 141–150.
- YANG Baibing, YANG Ziming, GU Yingfeng. Employment structure effect in enterprises digital transformation: Empirical analysis based on text mining of annual reports of manufacturing industry listed enterprises[J]. *China Soft Science*, 2023(4): 141–150.
- [3] 于博, 于正林, 顾莉栋, 等. 数控机床的插补技术研究[J]. 计量学报, 2015, 36(2): 128–131.
- YU Bo, YU Zhenglin, GU Lidong, et al. Interpolation technology research of CNC[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(2): 128–131.
- [4] 逢启寿, 杨杰, 刘本辉, 等. 数控加工中两种插补原理及对应算法[J]. 机械工程师, 2007(2): 121–122.
- PANG Qishou, YANG Jie, LIU Benhui, et al. Discussion of interpolation principle and interrelated arithmetic in NC machining[J]. *Mechanical Engineer*, 2007(2): 121–122.
- [5] 黄海鹏, 迟关心, 王振龙. 多轴联动电火花加工数控系统可逆插补研究[J]. 电加工与模具, 2009(1): 4–8.
- HUANG Haipeng, CHI Guanxin, WANG Zhenlong. Reversible interpolation of multi-axis EDM-CNC system[J]. *Electromachining & Mould*, 2009(1): 4–8.
- [6] 席港港, 赵庆志, 王军, 等. 传统逐点比较法直线插补方法的改进[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(1): 67–69.
- XI Ganggang, ZHAO Qingzhi, WANG Jun, et al. The improvement for the exist problems of interpolation with point-to-point comparison method of straight lines[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 26(1): 67–69.
- [7] 张柱银, 姚建民, 李硕. 数控系统中逐点比较法的优化算法[J]. 机械研究与应用, 2010, 23(1): 42–44.
- ZHANG Zhuyin, YAO Jianmin, LI Shuo. Optimization algorithm of point-to-point comparison method in NC[J]. *Mechanical Research & Application*, 2010, 23(1): 42–44.
- [8] YANG J, ZHANG L Q, LIU G. Linear interpolation algorithm of machining tool path with curvature smoothing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(15): 8367–8383.
- [9] 王旭浩, 张华. 多轨迹段平滑过渡的前瞻插补算法[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(4): 118–125.
- WANG Xuhao, ZHANG Hua. Prospective interpolation algorithm for smooth transition of multi-trajectory segments[J]. *Computer Systems & Applications*, 2020, 29(4): 118–125.
- [10] BU X F, LIN H, ZHENG L M, et al. Small line segment interpolation algorithm for smoothing machining[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 842: 420–426.
- [11] 魏栋, 张树有, 刘晓健. 非均匀有理B样条曲线的高精度 低速度波动插补算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(11): 2215–2223.
- WEI Dong, ZHANG Shuyou, LIU Xiaojian. NURBS curve interpolation algorithm with high accuracy and minimal feedrate fluctuation[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Edition)*, 2016, 50(11): 2215–2223.
- [12] LIU H, LIU Q, SUN P P, et al. A polynomial equation-based interpolation method of NURBS tool path with minimal feed fluctuation for high-quality machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 2751–2759.
- [13] LIU Q, LIU H, YUAN S M. High accurate interpolation of NURBS tool path for CNC machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(5): 911–920.
- [14] LEI C L, NUKMAN Y, YAP H J, et al. Local tool path smoothing based on symmetrical NURBS transition curve with look ahead optimal method: Experimental and analytical study[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(3): 1509–1526.
- [15] 吴闯, 吴继春, 杨世平, 等. 基于 NURBS 曲线的 S 型级数式速度规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(12): 3249–3255.
- WU Chuang, WU Jichun, YANG Shiping, et al. S-type series velocity planning algorithm based on NURBS curves[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(12): 3249–3255.
- [16] 梁宏斌, 李霞. 基于 STEP-NC 的 NURBS 曲面插补五轴数控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 917–925.
- LIANG Hongbin, LI Xia. 5-axis NC systems with interpolator for NURBS surface based on STEP-NC[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 917–925.
- [17] JI G S, YU W J, CHEN Z C. Bilateral optimization feedrate on splitting NURBS curve with its curvature monotonicity[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(2): 377–383.
- [18] NGUYEN P H, T M, PHAM D V, et al. Multi-objective optimization of micro EDM using TOPSIS method with Tungsten carbide electrode[J]. *Sādhanā*, 2022, 47(3): 133.
- [19] HENDRAWAN Y M, FARRAGE A, UCHIYAMA N. Iterative NC program modification and energy saving for a CNC machine tool feed drive system with linear motors[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(9): 3543–3562.
- [20] YANG M, YANG J X, ZHU L M, et al. A novel curvature circle iterative algorithm for contour error control of multi-axis CNC machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2020, 65: 23–31.
- [21] 张星, 赵万华. 数控机床多轴联动铣削加工动力学集成建模研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 214.
- ZHANG Xing, ZHAO Wanhua. Research on integrated modeling of multi-axis linkage milling machining dynamics for CNC machine tools[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(9): 214.
- [22] LI L. Mechanical grinding method of multi-axis linkage for elliptic contour based on algebraic geometry[J]. *Thermal Science*, 2020, 24(3 Part A): 1561–1568.
- [23] 宋嘎, 崔剑平. 基于静态频率曲线测试的数控机床伺服参数优化[J]. 装备制造技术, 2019(10): 84–86, 100.
- SONG Ga, CUI Jianping. Optimization of servo parameters of CNC machine tool based on static frequency curve test[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2019(10): 84–86, 100.
- [24] 李国超, 柏小祥, 王黎明, 等. 多轴联动工具磨削软件关键技术与发展趋势[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8): 943–951.
- LI Guochao, BAI Xiaoxiang, WANG Liming, et al. Key technologies and development trends of multi-axis tool grinding software[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(8): 943–951.

通信作者: 刘建勇, 教授, 博士, 研究方向为特殊材料特种加工技术, 数控系统开发, 装备智能化、数字化设计, 精密脉冲电源开发。

(责编 阳光)