

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.11.014

基于多项式加减速的多头螺纹磨削算法研究*

张 威^{1,2}, 吴双峰^{2*}, 贺明茹^{1,2}, 邢 虎^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国机械总院集团
宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波 315700)

摘要: 对多头螺纹进行磨削加工时, 为了实现砂轮与切入点对齐, 砂轮需要回到零点, 并在零点等待一转信号和主轴转过偏转角度, 而等待固定的信号会导致插补效率降低。针对这一问题, 设计了一种基于混合非对称多项式加减速控制算法的多头螺纹快速分头算法。首先, 分析了螺纹分头原理和砂轮切入方法, 提取了切入点选择特征; 然后, 采用分区建立了插补时间规划模型, 根据插补时间规划方法和砂轮切入点选择特征, 建立了砂轮与每个切入点对齐的脉冲时间变化模型; 之后, 根据五次速度曲线加减速控制算法和三次速度曲线加减速控制算法的基本原理, 设计了混合非对称多项式加减速控制算法模型, 建立了参数控制模型及快退区目标速度预测模型; 最后, 采用 MATLAB 仿真的方法, 验证了多头螺纹快速分头算法的正确性和有效性。研究结果表明: 在工况 1、工况 2 条件下(螺纹头数分别为 20、25, 其他条件相同), 顺序切入和对称切入的加工效率分别提高了 12.98%、0.67%, 根据工况参数可以确定加工效率最高的砂轮切入方法; 采用变加减速控制的方法, 在快退区减速段可以实现 ± 4 ms 的容差控制目标, 降低了砂轮与切入点对齐算法的容差压力; 采用混合非对称多项式加减速控制算法, 可以对多头螺纹快速分头插补和加加速度进行柔性控制, 以提高螺纹分头的效率。

关键词: 多头螺纹分头算法; 五次速度曲线; 三次速度曲线; 插补时间规划; 螺纹切入点; 混合非对称加减速控制算法; 参数控制模型
中图分类号: TH162; TG580 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4551(2024)11-2050-10

Multi-thread grinding algorithm based on polynomial acceleration and deceleration

ZHANG Wei^{1,2}, WU Shuangfeng², HE Mingru^{1,2}, XING Hu^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. China Academy of Machinery Ningbo Academy of Intelligent Machine Tool Co., Ltd., Ningbo 315700, China)

Abstract: To address the challenge of aligning the grinding wheel with the entry point during multi-head thread grinding, where the grinding wheel returns to zero point and waits for a revolution signal while the spindle rotates through a deflection angle, and affects the interpolation efficiency, a rapid threading algorithm was devised based on a hybrid asymmetric polynomial acceleration-deceleration control. Firstly, the principles of thread threading and grinding wheel entry methods were analyzed to identify the critical entry point selection characteristics. Then, a zoning-based interpolation time planning model was established, and a pulse time variation model was formulated to align the grinding wheel with each entry point based on the interpolation planning and entry point selection features. Subsequently, a hybrid asymmetric polynomial acceleration-deceleration control model was designed, incorporating the fundamentals of fifth-order and third-order velocity curve control algorithms, along with a parameter control model and a target speed prediction model for the rapid retreat zone. Finally, MATLAB simulations were employed to validate the correctness and effectiveness of the proposed multi-head thread rapid threading algorithm. The research results show that under conditions 1 and 2 (the number of thread heads is 20 and 25 respectively, other conditions are the same), the processing efficiency respectively increases by 12.98% and 0.67% for sequential and symmetric entry methods, with the

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大专项(2022Z047)

作者简介: 张威(1998-), 男, 安徽凤阳人, 硕士研究生, 主要从事智能制造方面的研究。E-mail: zwahpu@163.com

通信联系人: 吴双峰, 男, 研究员。E-mail: ws010@126.com

optimal method determined by the operating parameters. Furthermore, the variable acceleration-deceleration control achieves a tolerance control of ± 4 ms in the deceleration segment of the rapid retreat zone, reducing the tolerance pressure on the grinding wheel-entry point alignment. The hybrid asymmetric polynomial acceleration-deceleration control algorithm can enable flexible interpolation and flexible control of jerk, enhancing the efficiency of multi-head thread threading.

Key words: multiple thread split algorithm; quintic velocity curve; cubic velocity curve; interpolation time planning; screw thread entry point; hybrid asymmetric acceleration and deceleration control algorithm; parameter control model

0 引言

行星滚柱丝杠副是一种将旋转运动转化为直线运动的新型精密传动机构^[1-2]。丝杠、多个滚子和螺母之间的线接触增大了丝杠的承载能力^[3]。行星滚柱丝杠副具有运动精度高、使用寿命长和刚度高等优点^[4],被广泛应用于航空航天、机床装备等领域^[5]。

要保证行星滚柱丝杠副具有较好的传动性能,行星滚柱丝杠和螺母的加工精度是其关键因素之一。在行星滚柱丝杠副中,每个滚子啮合独立的滚道,因此,丝杠和螺母的螺纹滚道为多头螺纹。多头螺纹的分头精度会对螺纹加工精度产生重要影响。

传统的螺纹分头方法有圆周分头方法和轴向分头方法^[6]等。轴向分头方法是利用砂轮架上的刻度盘或百分表,在螺纹导程上分头;圆周分头方法是利用挂轮或工件主轴上安装的脉冲编码器,在圆周上分头。螺纹分头精度高度依赖机床硬件条件,难以保证螺纹的分头精度和效率,因此,需利用软件条件辅助磨削。

插补算法是螺纹磨削软件的核心。

加减速控制算法由数控系统实现分头计算,可对工况变化进行决策,自动调整加工参数,是保证螺纹快速精密分头的关键。

直线加减速控制算法^[7]和指数加减速控制算法^[8]的实现方式都比较简单,且响应速度也较快。但是,二者作为非柔性加减速控制算法,其加速度突变会导致机床产生柔性冲击,影响螺纹磨削加工的精度。

为了提高运动控制曲线的平滑度,一些学者提出了S型加减速控制算法^[9]和多项式加减速控制算法^[10-11]。CICEK E等人^[12]阐述了非对称S曲线结构,使用S型加减速控制算法,生成了所需的控制曲线,实现了对加速度曲线进行连续控制的目标。冷洪滨等人^[13]提出了一种三次多项式加减速控制算法,保证了加速度的连续性。

虽然上述这两种控制方式实现了对加速度进行连续控制的目标,但是其仍然存在加加速度的突变问题,使加速度曲线不能平滑过渡。

为了避免加加速度的突变,国内外学者提出了高

阶S型曲线加减速控制算法、多项式加减速控制算法和三角函数型加减速控制算法^[14]。

王允森等人^[15]提出了一种四次多项式加减速控制算法,使加速度曲线和加加速度曲线连续变化。WANG Yun-sen等人^[16]采用了预插补和前瞻插补,对三角函数型加减速控制算法进行了实时插补处理,实现了对速度、加速度、加加速度进行柔性控制的目标;但是该算法不光计算复杂,同时对硬件条件的要求也较高。

虽然采用上述算法实现了对加速度和加加速度进行连续及柔性控制的目标,但其在连续循环加工和快速往返控制过程中,砂轮回零点后直接进行快速往返运动控制时,加加速度曲线仍然存在尖点,导致加加速度曲线不能平滑过渡,从而产生难以避免的振动。

为了解决这个问题,HALINGA M S等人^[17]基于S曲线加减速控制算法,在加加速度限制曲线中加入谐波运动,实现了对加加速运动曲线进行平滑控制,以及对五次速度曲线进行等效控制的目标。CHEN Jin-hung等人^[18]提出了一种五次速度曲线的多项式加减速控制算法,实现了对加加速曲线进行平滑控制的目标。

虽然采用五次多项式加减速控制算法,可以实现对加加速度在循环过程中控制曲线光滑的目标,但是算法的难度相比之前的算法大大增加,需要花费大量的时间去计算其数值。

目前,螺纹磨床大多利用机床硬件条件实现对多头螺纹进行分头的目的,但是缺少螺纹插补算法在多头螺纹磨削和分头计算上的研究与应用,更缺少高阶加减速控制算法在多头螺纹磨削和分头计算上的研究与应用。这导致砂轮回零时,需要在零点等待主轴转过一定的偏转角度,且等待的时间也不可控制;另外,在平动轴快速往返时,加加速变化曲线不能光滑过度,还会导致机床振动等问题。

笔者将螺纹磨削过程划分为四个阶段,并提前规划每个阶段的磨削时间,设计一种允许实时误差补偿的混合非对称多项式加减速规划算法,进而对多头螺纹进行快速分头。

首先,笔者分析多头螺纹磨削原理和螺纹切入点选择方法;然后,根据插补时间规划方法,建立插补时间变化模型;设计混合非对称多项式加减速控制算法,构建参数控制模型和目标速度预测模型;最后,采用仿真的方法,验证多头螺纹快速分头算法的正确性和优越性。

1 多头螺纹磨削方法

1.1 多头螺纹分头原理

多头螺纹磨削加工时,需要根据螺纹头数对磨削的起始点做相应偏移,以达到螺纹分头的目的^[6]。

常用的分头方法有圆周分头方法和轴向分头方法。多头螺纹分头方法的原理如图 1 所示。

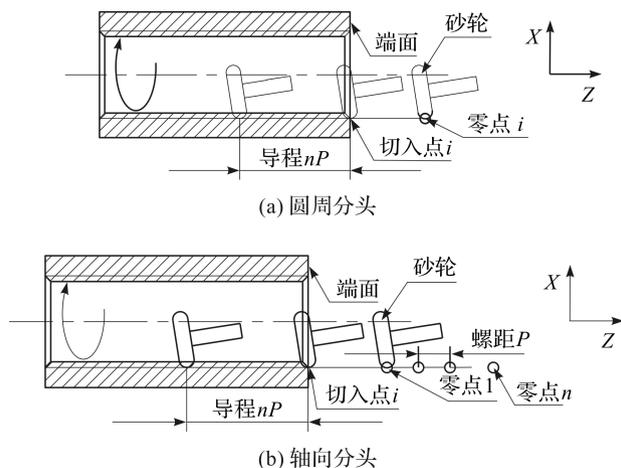


图 1 多头螺纹分头方法

Fig. 1 Method for dividing threads in multi-start threading

由图 1 可知:

1) 圆周分头方法利用等待工件主轴转过偏移角度的方式,实现砂轮与切入点的对齐目标。该方法需要磨床具备主轴编码器,且对相位误差的要求也比较高;

2) 轴向分头方法采用控制砂轮架在轴向偏移一个螺距的方式,保证砂轮与切入点对齐。该方法增加了砂轮空刀行程,加工效率低,且对轴向位置精度的要求比较高。

1.2 螺纹切入点判断方法

多头螺纹的螺旋线起点均匀分布在端面上,即砂轮切入点均布在端面上。

当工件安装完毕后,砂轮根据对刀结果和一转信号,选定一条螺纹滚道开始加工;其他螺纹滚道磨削顺序,需要根据螺纹头数和砂轮切入方法确定。

常用的砂轮切入方法为顺序切入方法。

顺序切入方法如图 2 所示。

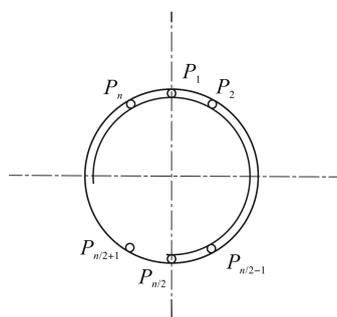


图 2 顺序切入方法

Fig. 2 A step-by-step sequential engagement approach

图 2 中,在同一圆周上,均匀分布 n 个砂轮切入点。假设 P_1 点为第一个砂轮切入点,即首先磨削 P_1 滚道,则第二个砂轮切入点是 P_2 。

根据上述规律,当需要磨削 n 头螺纹的第 P_i 滚道时,该滚道的砂轮切入点与 P_1 滚道的切入点在圆周上的偏移角度为 $\frac{2\pi(i-1)}{n}$;与 P_{i-1} 滚道的切入点在圆周上的偏移角度为 $\frac{2\pi}{n}$ 。

由于相邻螺纹滚道磨削时存在相互影响,因此,笔者给出对称式砂轮切入点判断方法。

对称切入方法如图 3 所示。

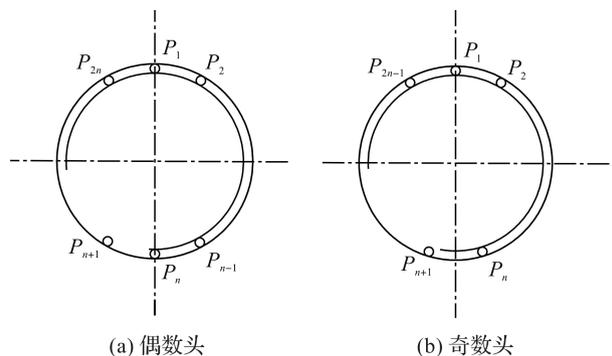


图 3 对称切入方法

Fig. 3 A methodology for symmetrical cutting-in

图 3 中,在同一圆周上,根据均匀分布的进刀点个数奇偶性的不同,可得到对称点分布的不同。

图 3(a)中,圆周上均布 $2n$ 个砂轮切入点,假设选定 P_1 点为第一个砂轮切入点,则第二个砂轮切入点为距离 P_1 点最远的 P_n 点。从第二个切入点开始按照切入顺序,每个切入点与 P_1 点的偏转角度为: $\pi, \frac{\pi}{n},$

$\frac{(n+1)\pi}{n}, \frac{2\pi}{n}, \dots, \frac{(n-1)\pi}{n}, \frac{(2n-1)\pi}{n}$; 每个切入点与上一个切入点的偏转角度为: $\pi, \frac{(n+1)\pi}{n}, \pi, \frac{(n+1)\pi}{n}, \dots, \pi。$

图 3(b) 中,圆周上均布 $2n - 1$ 个砂轮切入点,假设 P_1 点为第一个砂轮切入点,当工件主轴逆时针转动,则第二个砂轮切入点为 P_{n+2} 点。从第二个切入点开始按照切入顺序,每个切入点与 P_1 点的偏转角度为: $2n \frac{\pi}{(2n-1)}, 2 \frac{\pi}{(2n-1)}, 2(n+1) \frac{\pi}{(2n-1)}, \dots, 2 \frac{(2n-1)\pi}{(2n-1)}, \frac{2(n-1)\pi}{(2n-1)}$; 每个切入点与上一切入点的偏转角度为: $2n \frac{\pi}{(2n-1)}, 2n \frac{\pi}{(2n-1)}, \dots, 2n \frac{\pi}{(2n-1)}$ 。

2 多头螺纹磨削算法设计

2.1 插补时间规划算法

进行多头螺纹磨削加工时,假设砂轮回零点时数控系统接收到的脉冲信号为磨削 P_1 滚道时的一转信号,则需要等待主轴转过对应的偏转角度 θ_1 , 才能开始对 P_2 滚道进行磨削插补计算^[6]。

一转信号原理如图 4 所示。

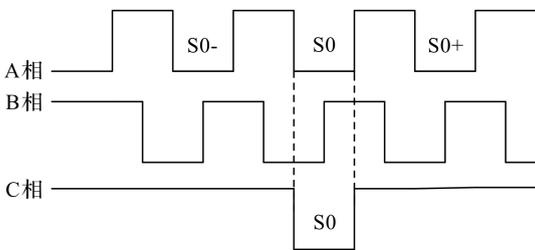


图 4 一转信号原理

Fig.4 The operating principle of single-turn signaling mechanism

图 4 中,假设 $S0$ 为磨削 P_i 滚道的一转信号,当数控系统接收到信号 $S0 -$ 时,等待时间为 $S0 -$ 到 $S0$ 的时间,等待时间较短;当数控系统接收到信号 $S0 +$ 时,等待时间较长,且接近工件主轴一转时间。

为了避免上述情况的发生,笔者采用砂轮与切入点对齐算法^[19],对螺纹进行插补分区,规划各个阶段的插补时间。

插补时间规划模型如图 5 所示。

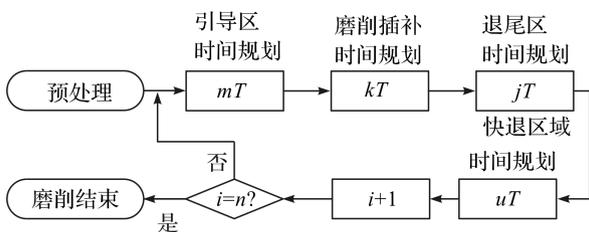


图 5 插补时间规划模型

Fig.5 A temporal planning model utilizing interpolation techniques

由图 5 可知,数控系统从开始磨削插补计算到砂轮回零点的插补时间关系式为:

$$zT = mT + kT + jT + uT \quad (1)$$

式中: mT 为引导区(零点到砂轮切入点)插补时间; kT 为磨削区域(螺纹有效长度)插补时间; jT 为退尾区插补时间; uT 为快退区域插补时间; z, m, k, j, u 为时间系数; T 为工件主轴一转时间。

根据 1.2 节所述两种砂轮切入点判断方法,以及螺纹头数和插补时间规划方法,笔者分别推导分头插补时间变化模型。

1) 采用顺序切入方法时,由于连续的两个切入点之间的间隔角度固定为 $\frac{2\pi}{n}$ (脉冲信号上体现为间隔脉冲信号 $\frac{N}{n}$, N 为一转脉冲数,脉冲时间上间隔 $\frac{T}{n}$), 为了保证砂轮回零点时数控系统开始插补计算,需要根据进刀点个数和偏转角度约束插补时间。

当整个插补过程中使用的加速度和快退速度不允许增加时,可通过降低加速度或速度的方法,增加插补的时间;当整个插补过程中使用的加速度或快退速度允许增大时,可增大加速度或速度,以减少插补的时间。

此时插补时间更新为:

$$xT = \begin{cases} \left(z + \frac{1}{n}\right)T, zT \uparrow \\ \left(z - \frac{(n-1)}{n}\right)T, zT \downarrow \end{cases} \quad (2)$$

式中: xT 为更新后的插补时间; x 为插补时间系数; n 为螺纹头数; $zT \uparrow$ 为增加插补时间; $zT \downarrow$ 为减少插补时间。

2) 采用对称式切入法时,螺纹头数的奇偶性对连续的两个切入点间隔角度会产生不同的影响,需针对奇偶性分别建立时间补偿模型。

① 当螺纹头数为偶数时,连续的两个切入点之间的

间隔角度为: $\frac{N}{2}, \frac{\left(\frac{n}{2} + 1\right)N}{n}, \dots$ 。脉冲时间间隔为: $\frac{T}{2}, \frac{\left(\frac{n}{2} + 1\right)T}{n}, \dots$ 。

② 当螺纹头数为奇数时,连续的两个切入点之间的间隔角度为 $\frac{(n+1)N}{2n}$, 脉冲时间间隔为 $\frac{(n+1)T}{2n}$ 。为了保证砂轮回零点时,数控系统开始插补计算,需根据螺纹头数和偏转角度约束插补时间。

同理,当螺纹头数 n 为奇数时,插补时间更新为:

$$xT = \begin{cases} \left(z + \frac{(n+1)}{2n}\right)T, zT \uparrow \\ \left(z - \frac{(n-1)}{2n}\right)T, zT \downarrow \end{cases} \quad (3)$$

当螺纹头数 n 为偶数时,插补时间更新为:

$$xT = \begin{cases} \left(z + \frac{1}{2}\right)T, zT \uparrow \\ \left(z + \frac{\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{n}\right)T, zT \uparrow \\ \left(z - \frac{1}{2}\right)T, zT \downarrow \\ \left(z - \frac{\left(\frac{n}{2} - 1\right)}{n}\right)T, zT \downarrow \end{cases} \quad (4)$$

2.2 混合非对称加减速控制算法

多项式型加减速控制算法属于柔性加减速控制算法;在数学关系上,位移、速度、加速度和加加速度曲线是关于时间次数递减的导数关系。

假设: L_i 为总位移; V_i 为螺纹磨削时的目标速度; V_q 为快退区目标速度; a_i 为加速度最值, $i = 1, \dots, 4$; J_i 为加加速度最值, $i = 1, \dots, 4$; T_i 为各个阶段持续时间, $i = 0, \dots, 17$ 。

混合非对称多项式加减速控制曲线如图 6 所示。

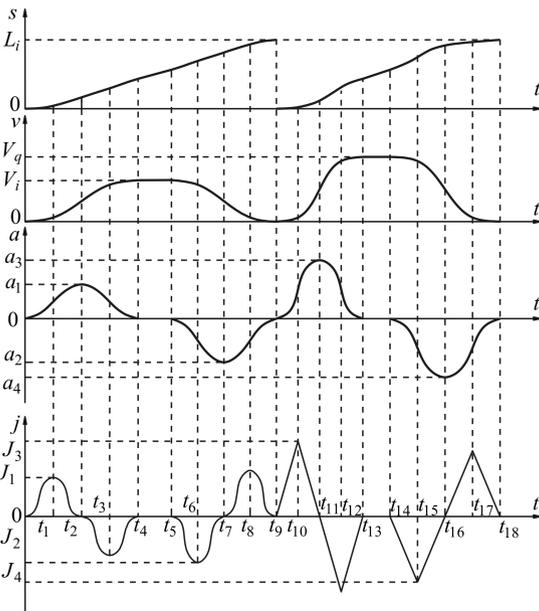


图 6 混合非对称多项式加减速控制曲线

Fig. 6 A hybrid control curve for asymmetric polynomial acceleration and deceleration

由图 6 可知:加减速过程划分为 18 个运动阶段。其中,前 9 个阶段为五次速度曲线加减速控制曲线,后 9 个阶段为三次速度曲线加减速控制曲线。

由图 6 可得到三次速度曲线加减速控制曲线中加

加速度与插补时间关系式为:

$$j(t) = \begin{cases} k_0\tau_i + j(t_i); i = 9 \vee 12 \\ -k_0\tau_i + j(t_i); i = 10 \vee 11 \\ k_1\tau_i + j(t_i); i = 14 \vee 17 \\ -k_1\tau_i + j(t_i); i = 15 \vee 16 \\ 0; i = 13 \end{cases} \quad (5)$$

式中: j 为加加速度; k_0, k_1 为加加速度关于时间的系数; t_i 为每个阶段的转折点; τ_i 为以每个阶段转折点为零点的局部时间坐标; \vee 为“或”。

由图 6 可得五次速度曲线加减速控制曲线中加加速度与插补时间关系式为:

$$j(t) = \begin{cases} k_2\tau_i^2 + k_3\tau_i^3 + j(t_i); i = 0 \vee 3 \\ -k_2\tau_i^2 - k_3\tau_i^3 + j(t_i); i = 1 \vee 2 \\ 0; i = 4 \\ k_4\tau_i^2 + k_5\tau_i^3 + j(t_i); i = 5 \vee 8 \\ -k_4\tau_i^2 - k_5\tau_i^3 + j(t_i); i = 6 \vee 7 \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_j 为系数, $j = 2, \dots, 5$ 。

$$\text{其中: } k_2 = -\frac{3k_3T_0}{2}; k_4 = -\frac{3k_5T_5}{2}; T_0 = \frac{t_{a1}}{4}; T_5 = \frac{t_{d1}}{4}。$$

由加加速度函数、加速度函数、速度函数和位移函数之间的关系^[9],可以得到加速度、速度和位移与时间的关系式为:

$$\begin{cases} a(t) = a(t_i) + \int_{t_i}^t j(\tau_i) d\tau_i \\ v(t) = v(t_i) + \int_{t_i}^t a(\tau_i) d\tau_i \\ s(t) = s(t_i) + \int_{t_i}^t v(\tau_i) d\tau_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: a 为加速度; v 为速度; s 为位移。

根据式(5)~式(7)可知:加加速度系数 k_j 需要根据多头螺纹参数、机床参数、工艺参数和时间规划模型进行求取。

2.3 参数控制模型

当进行螺纹磨削时,工件主轴每转动一转,平动轴就会沿着轴向进给一个导程^[19]。

根据式(6)、式(7)和图 6 可得:

$$a(t_2) = a_1 = \frac{J_1 t_{a1}}{4} = \frac{2V_i}{t_{a1}} \quad (8)$$

式中: a_1 为引导区加速度最大值; t_{a1} 为加速时间; s, J_1 为加加速度最大值; V_i 为平动轴目标速度。

其中: $V_i = \frac{nPV_w}{60}$, n 为螺纹头数; P 为螺距; V_w 为工件主轴转速。

由式(8)可得:

$$J_1 = \frac{8V_i}{t_{a1}^2} = j(t_1) = k_2 t_1^2 + k_3 t_1^3 \quad (9)$$

已知平动轴承受的最大加速度值为 a_m , 即加速度最大值满足 $a_1 < a_m$, 加速时间满足 $t_{a1} > \frac{nV_w P}{30a_m}$; 平动轴能承受的加加速度最大值为 J_m , 加加速度最大值满足

$$J_1 \leq J_m, \text{ 加速时间 } t_{a1} \geq \sqrt{\frac{2nV_w P}{15J_m}}.$$

已知 $k_2 = -\frac{3k_3 T_0}{2}$, 由式(8)和式(9)可得加加速度模型的加加速度系数为: $k_2 = \frac{32nPV_w}{5t_{a1}^4}$;

$$k_3 = \frac{-256nPV_w}{15t_{a1}^5}.$$

已知引导区插补距离, 根据式(7)可得引导区插补时间为:

$$mT = \frac{60l_1}{nPV_w} + \frac{t_{a1}}{2} \quad (10)$$

式中: mT 为引导区插补时间, 其中, $T = \frac{60}{V_w}$; l_1 为引导区插补距离。

引导区需要提供足够的距离和插补时间, 以保证平动轴达到 100% 编程进给量^[19]。因此, 该段插补时间满足 $mT > t_{a1}$, 引导区插补距离满足 $l_1 > \frac{nV_w P t_{a1}}{120}$ 。

由于工件主轴转速保持不变, 因此, 磨削区平动轴进给速度需要保持为 V_i 。由式(7)可得:

$$kT = \frac{60l_2}{nPV_w} \quad (11)$$

式中: kT 为磨削区插补时间; l_2 为磨削区插补距离。

没有退刀槽的螺纹在磨削时会产生“尾巴”现象, 因此, 为了保证螺纹的退尾质量, 需要提前预测减速点, 以保证“尾巴”的精度。

根据螺纹参数和加工工艺需求, 可得到退尾插补路径。根据式(6)、式(7)可得:

$$t_{d1} = jT = \frac{2l_3}{V_i} = \frac{120l_3}{nPV_w} \quad (12)$$

式中: l_3 为退尾区插补距离; t_{d1} , jT 为退尾区插补时间。

退尾区加速度最值 a_2 为:

$$a(t_7) = a_2 = \frac{J_2 jT}{4} = \frac{-2V_i}{jT} = \frac{-V_i}{l_3} \quad (13)$$

退尾区加加速度最值 J_2 为:

$$J_2 = \frac{-8V_i}{(jT)^2} = j(t_6) = k_4 T_5^2 + k_5 T_5^3 \quad (14)$$

退尾区加速度最值满足 $a_2 \geq -a_m$, 减速时间满足

$jT \geq \frac{nV_w P}{30a_m}$; 加加速度最值满足 $J_2 \geq -J_m$, 减速时间满足

$$jT \geq \sqrt{\frac{2nV_w P}{15J_m}}; \text{ 插补距离满足 } l_3 \geq \frac{V_i^2}{a_m} \text{ 且 } l_3 \geq \sqrt{\frac{2V_i^2}{J_m}}.$$

已知 $k_4 = -\frac{3k_5 T_5}{2}$, 根据式(7)、式(13)可以得到

$$\text{加加速度系数: } k_4 = \frac{-24V_i^5}{l_3^4}; k_5 = \frac{32V_i^6}{l_3^5}.$$

由于快退区插补路径长度为引导区插补路径长度、磨削区插补路径长度和退尾区插补路径长度之和, 因此可以得到:

$$l_0 = l_1 + l_2 + l_3 \quad (15)$$

式中: l_0 为快退区插补距离。

快退区插补过程中目标速度为 V_q 。由于螺纹磨床平动轴所能达到的最大速度被限制在一定范围内, 快退时的目标速度满足 $V_q \leq V_m$ 。

根据式(5)、式(7)可得:

$$J_3 = j(t_{10}) = k_0 T_9 = \frac{k_0 t_{a2}}{4} \quad (16)$$

式中: J_3 为快退区加速段加加速度最值; t_{a2} 为快退区加速时间; T_9 为快退区加速段加加速度达到最值的时间。

快退区加速度最值 a_3 为:

$$a_3 = \frac{J_3 (T_9 + T_{10})}{2} = k_0 T_9^2 = \frac{k_0 t_{a2}^2}{16} \quad (17)$$

快退区目标速度式中 V_q 为:

$$V_q = \frac{1}{2} a_3 t_{a2} = 2k_0 T_9^3 = \frac{1}{32} k_0 t_{a2}^3 \quad (18)$$

快退区加速距离式 l_{a2} 为:

$$l_{a2} = \frac{1}{2} V_q t_{a2} = 4k_0 T_9^4 = \frac{1}{64} k_0 t_{a2}^4 \quad (19)$$

上述关系式的未知参数较多。为了简化计算模型, 可以采用给定加加速度系数 k_0 , 或给定加速时间 t_{a2} 的方法约束参数。

给定 k_0 会导致目标速度计算模型阶数高。因此, 需提前给定加速时间。

已知平动轴加加速度最值 J_3 满足 $J_3 \leq J_m$; 加速度最值 a_3 满足 $a_3 \leq a_m$; 快退时的目标速度 V_q 满足 $V_q \leq V_m$ 。由式(16)、式(17)可得加加速度系数 k_0 的边界条件为: $0 < k_0 \leq \frac{J_m^2}{a_m}$ 。

当目标速度 $V_q = V_m$ 时, 加速时间 t_{a2} 最短为 $\frac{2V_m}{a_m}$ 。

因此, 加速时间满足: $t_{a2} \geq \frac{2V_m}{a_m}$ 。由式(18)可得加加速

$$\text{度系数: } k_0 = \frac{32V_q}{t_{a2}^3}。$$

由式(5)和式(7)可得快退区减速段加加速度最大值 J_4 、加速度最大值 a_4 、目标速度 V_q 和减速距离 l_{d2} ，与减速时间 t_{d2} 的关系为：

$$J_4 = j(t_{15}) = k_1 T_{14} = \frac{k_1 t_{d2}}{4} \quad (20)$$

式中： J_4 为快退区减速段加加速度最大值； t_{d2} 为快退区减速时间； T_{14} 为快退区减速段加加速度达到最值的时间。

快退区减速段加速度最大值 a_4 为：

$$a_4 = a(t_{16}) = k_1 T_{14}^2 = \frac{k_1 t_{d2}^2}{16} \quad (21)$$

快退区减速距离 l_{d2} 为：

$$V_q = -2a_4 T_{14} = -\frac{k_1 t_{d2}^3}{32} \quad (22)$$

$$l_{d2} = 4k_1 T_{14}^4 = -\frac{k_1 t_{d2}^4}{64} \quad (23)$$

快退区砂轮需要精确回零。为了避免预测减速点时插补时间波动导致回零精度降低，需要采用变加减速的方法来补偿插补时间。因此，要提供加速度和加加速度的容差空间。容差范围需要由系统误差来确定。

假设容差范围为 Δt ，减速时间 t_{d2} 满足 $t_{d2} \geq \frac{2V_m}{a_m} + \Delta t$ 。此时，加加速度最大值 J_4 满足 $J_4 \leq J_m$ ；加速度最大值 a_4 满足 $a_4 > -a_m$ 。

根据式(22)得到加加速度系数与目标速度关系为 $k_1 = -\frac{32V_q}{t_{d2}^3}$ 。

由式(7)可以得到：

$$l_{c2} = V_q T_{13} = V_q t_{c2} = l_0 - l_{a2} - l_{d2} \quad (24)$$

式中： l_{c2} 为快退区匀速插补距离； t_{c2} 为快退区匀速插补时间，且匀速插补时间满足 $t_{c2} = \frac{l_0}{V_q} - \frac{(t_{a2} + t_{d2})}{2}$ 。

$$\text{快退区时间为 } uT = \frac{l_0}{V_q} + \frac{(t_{a2} + t_{d2})}{2}。$$

数控系统从开始磨削插补计算到砂轮回零点的插补时间为：

$$xT = \frac{60(l_1 + l_2 + 2l_3)}{nPV_w} + \frac{t_{a1}}{2} + uT \quad (25)$$

根据式(2)~式(4)可知，插补时间 xT 的系数 x 为未知数，需要进行预测。

由最值预测可得：

$$uT_{\min} = \frac{l_0}{V_m} + \frac{(t_{a2} + t_{d2})}{2} \quad (26)$$

式中： uT_{\min} 为最短快退时间； V_m 为快退区目标速度最大值。

将式(26)代入式(1)，可以得到最快插补时间 zT 。当系数 z 不为整数时，需要对系数 z 取整，并加 1。

根据式(2)~式(4)中每个螺纹滚道磨削的插补时间，可以得到更新后的插补时间 xT ；将 xT 代入式(25)后，可以得到更新后的快退时间 uT ；再将更新后的快退时间 uT 代入式(24)，最终可得：

$$V_q = \frac{l_0}{uT - \frac{(t_{a2} + t_{d2})}{2}} \quad (27)$$

式中： V_q 为更新后的快退区目标速度，需通过保证更新后的 $V_q \leq V_m$ 来合理选择插补时间规划模型。

3 仿真实验与结果分析

为了验证混合非对称多项式加减速控制算法应用在多头螺纹快速分头上的正确性和有效性，笔者采用 MATLAB，对多头螺纹磨削插补进行仿真实验。

在文献[19]中，由于引导区的砂轮与一转信号对齐方法和该方法在提高加工效率上的优势已得到了验证，且退尾区的精度与减速点预测精度相关，因此，笔者对此不再进行讨论，直接选取快退区插补路径进行速度规划。

为了贴近实际操作中的变量，笔者根据螺纹磨床实际参数，给出的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

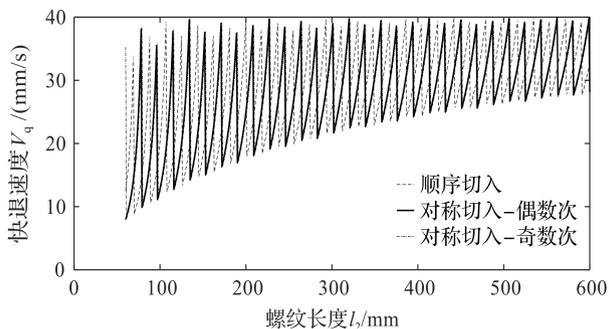
Table 1 Simulation parameters

参数	数值
加速度最大值 $a_m / (\text{mm/s}^2)$	2 000
主轴转速 $V_w / (\text{r/min})$	5 ~ 200
引导区加速时间 t_{a1} / ms	50
快退区加速时间 t_{a2} 、减速时间 t_{d2} / ms	60/64
主轴一转脉冲数 N	10 000
平动轴速度最大值 $V_m / (\text{mm/s})$	40
磨削区长度 l_2 / mm	60 ~ 600
退尾区长度 l_3 / mm	0.1
加加速度最大值 $J_m / (\text{mm/s}^3)$	100 000
螺纹头数 n 、螺纹螺距 P / mm	20/1
引导区插补距离 l_1 / mm	5

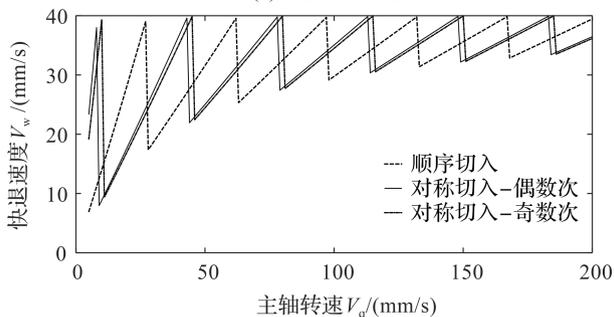
插补计算前，首先要将表 1 中的仿真参数输入参数控制模型，进行数据的预处理，以得到螺纹插补控制参数。

快退区目标速度预测曲线如图 7 所示。

图 7(a) 中，笔者设置主轴转速为 9 r/min，螺纹头



(a) 改变螺纹长度



(b) 改变主轴转速

图 7 速度预测曲线

Fig. 7 Forecasted velocity curve

数为 20, 螺纹长度为 60 mm ~ 600 mm。

由图 7(a)可知:快退区目标速度根据螺纹长度变化产生周期性变化,且一个周期为 20 mm 即为一个螺纹导程。根据螺纹长度可以得到快退区目标速度最优值,此时的加工效率最高。

图 7(b)中,笔者设置主轴转速为 5 r/min ~ 200 r/min,螺纹头数为 20,螺纹长度为 60 mm。

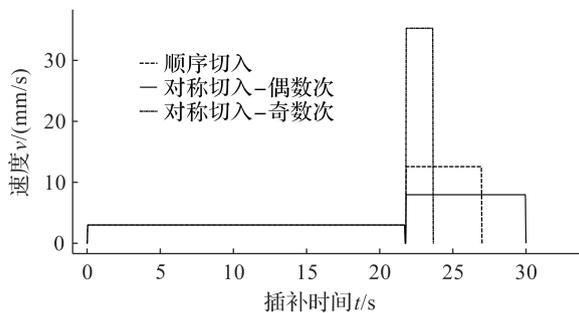
由图 7(b)可知:快退速度根据工件主轴转速变化产生规律性波动。随着主轴转速的增大,预测的快退区目标速度越接近平动轴最大速度 V_m , 加工效率越高。因此,根据螺纹参数和螺纹磨床工件主轴转速范围,多头螺纹快速分头算法可以预测加工效率最高的工件主轴转速。

根据不同的工艺参数,快退区目标速度预测值始终满足 $V_q \leq V_m$,由此可见,多头螺纹快速分头算法具有逻辑正确性。

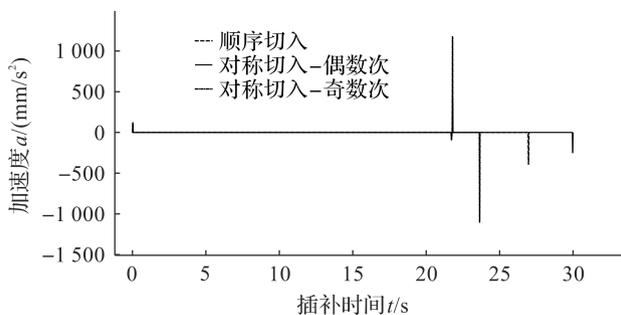
以上笔者讨论了砂轮顺序切入和对称切入两种方式,不同的切入方式快退区目标速度预测情况不同。因此,针对具体的工况参数,依据多头螺纹快速分头算法可以筛选出加工效率更高的分头方法。

为了验证多头螺纹快速分头算法在螺纹分头加工时的正确性,并对比不同切入点选择方式的磨削效率,笔者修改表 1 中的部分参数,然后进行仿真分析。

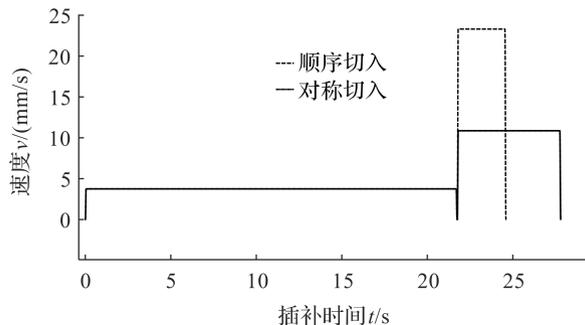
工况 1 和工况 2 条件下,磨削速度、加速度的规划曲线如图 8 所示。



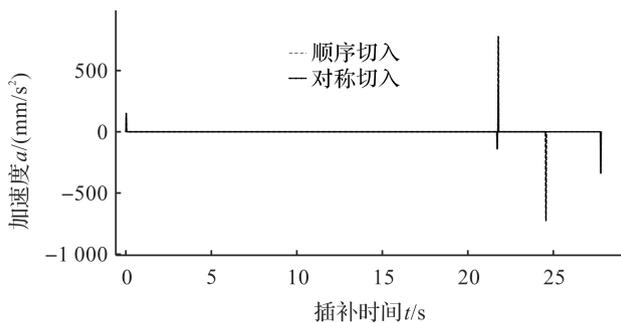
(a) 工况 1—时间速度曲线



(b) 工况 1—时间加速度曲线



(c) 工况 2—时间速度曲线



(d) 工况 2—时间加速度曲线

图 8 磨削速度、加速度规划曲线

Fig. 8 Combined planning curve for grinding speed and acceleration

图 8(a)和图 8(b)中,在工况 1 时:设置表 1 中主轴转速为 9 r/min,螺纹头数为 20,螺纹长度为 60 mm。

根据式(25)插补计算,连续两次顺序切入插补时间为 54.008 s;连续两次对称切入插补时间为 53.645 s;对称切入效率较顺序切入效率提高了 0.67%。

图 8(c)和图 8(d)中,在工况 2 时:设置表 1 中主轴转速为 9 r/min,螺纹头数为 25,螺纹长度为 60 mm。

根据式(25)插补计算,连续两次顺序切入插补时间为 49.206 s,连续两次对称切入插补时间为 55.595 s,顺序切入效率较对称切入效率提高了 12.98%。

由图 8 可知:多头螺纹快速分头算法实现了对螺纹分头磨削的目的;速度和加速度曲线具有完整性、连续性且连接处平滑过渡。

笔者设置容差时间 $\Delta t = \pm 4 \text{ ms}$,在减速段采用变加速度的方法控制补偿误差时间。

退尾区减速段变加速控制曲线如图 9 所示。

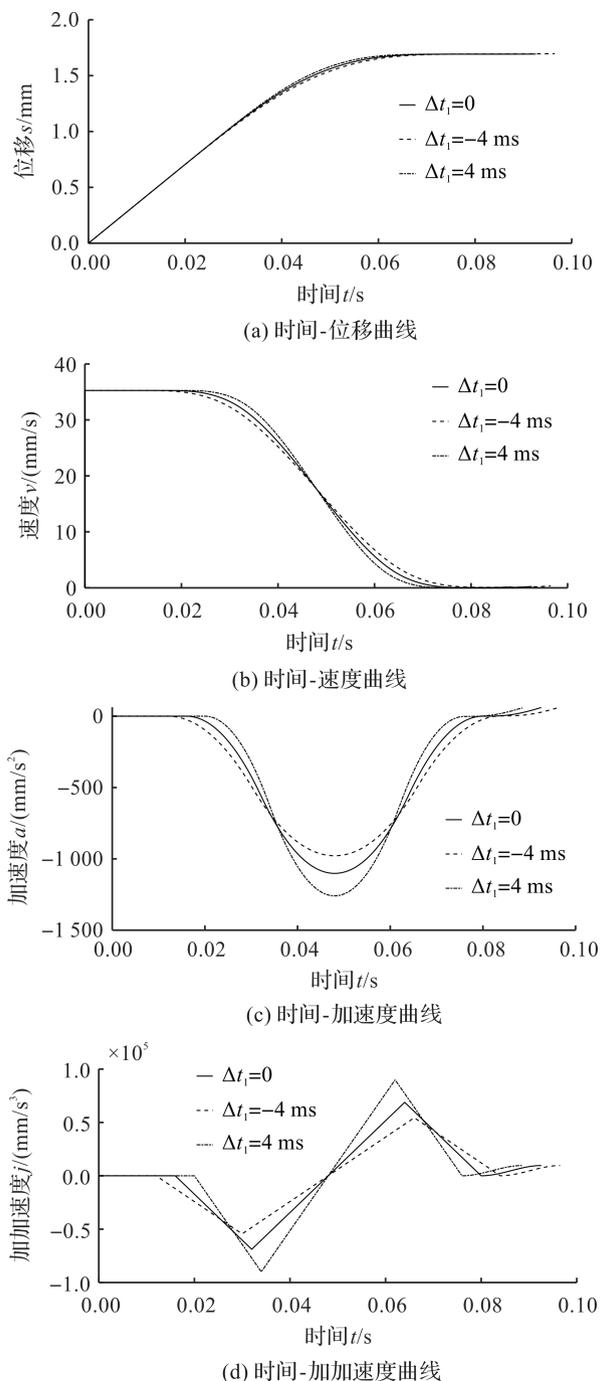


图 9 变加速控制曲线

Fig. 9 A dynamic control curve for variable acceleration and deceleration

由图 9 可知:速度、加速度控制曲线连续,且平滑过渡,实现了使平动轴快速往返运动的柔性控制。

图 9 中,当 $\Delta t = 4 \text{ ms}$ 时,减速点推迟;当 $\Delta t = -4 \text{ ms}$ 时,减速点提前。砂轮精确回零,且数控系统补偿了脉冲误差,因此,降低了砂轮与切入点对齐算法^[19]的容差压力;根据减速段容差时间,改变了减速点的位置。

因此,多头螺纹快速分头算法根据容差范围设置减速点预测范围,砂轮进入减速点预测范围时,开始实时预测减速点。

虽然笔者提出的多头螺纹快速分头算法并未在实际环境中得到实验验证,可能缺乏与现实工况直接相关的实验数据支持;但通过 MATLAB 仿真实验,分析得到的多头螺纹快速分头算法,依然具有理论可靠性和逻辑正确性。

4 结束语

笔者采用了多项式加减速控制算法和插补时间规划方法,分析并推导了多头螺纹分头算法,运用了 MATLAB 软件,对多头螺纹磨削插补算法进行了仿真实验。

研究表明:

1) 工况 1 时,顺序切入加工效率较对称切入提高了 0.67%;工况 2 时,顺序切入加工效率较对称切入提高了 12.98%。不同的螺纹参数和机床参数会导致顺序切入和对称切入快退区目标速度变化。因此,针对不同的工况参数,采用多头螺纹快速分头算法,可以筛选出加工效率更高的分头方法;

2) 快退区减速段采用变加速控制算法,设置容差时间 $\Delta t = \pm 4 \text{ ms}$,可以对脉冲时间进行误差补偿,降低砂轮与一转信号对齐算法的容差压力;

3) 混合非对称多项式加减速控制算法实现了多头螺纹快速分头,快退区目标速度算法实现了砂轮回零时的脉冲信号动态可调,变加速控制算法实现了对定位误差和脉冲误差的容差控制。

螺纹退尾算法包括了减速点的预测算法,而减速点的预测精度会影响螺纹尾巴的精度;同时,在进行螺纹磨削时,砂轮补偿算法也会影响螺纹的磨削精度。因此,笔者后续将分别对螺纹退尾算法和砂轮补偿算法进行深入研究。

参考文献 (References):

- [1] DU Xing, LU Shi-yi, TANG R, et al. An efficient method for designing high-performance planetary roller screw mechanism with low contact stress [J]. Tribology International, 2023, 187 (9): 108709.

- [2] 吴翰林,魏沛堂,蔡磊,等. 基于加工误差敏感度与模糊层次分析法的行星滚柱丝杠公差匹配优化方法[J]. 中国机械工程,2022,33(22):2693-2703.
WU Han-lin, WEI Pei-tang, CAI Lei, et al. Optimization of planetary roller screw tolerance matching based on machining error sensitivity analysis and fuzzy analytic hierarchy processes [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (22):2693-2703.
- [3] YAO Qin, ZHANG Meng-chuang, LIU Yong-shou, et al. Multi-objective optimization of planetary roller screw mechanism based on improved mathematical modelling [J]. Tribology International,2021,161(9):107095.
- [4] HU Rui, WEI Pei-tang, DU Xue-song, et al. Investigation of loaded contact characteristics of planetary roller screw mechanism based on influence coefficient method and machine learning [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023,58(8):102146.
- [5] HU Rui, WEI Pei-tang, LIU Huai-jun, et al. Investigation on load distribution among rollers of planetary roller screw mechanism considering machining errors: analytical calculation and machine learning approach [J]. Mechanism and Machine Theory,2023,185(7):105322.
- [6] 王永军. 数控车加工多线螺纹的方法[J]. 金属加工(冷加工),2019(11):17-19.
WANG Yong-jun. The method of machining multiple thread with CNC lathe [J]. MW Metal Cutting,2019(11):17-19.
- [7] HAO Xian-yang, XIA Guo-feng, ZHANG Shi-ying, et al. Study of Metal 3D Printing Stepper Motor Control Based on S-trapezoid Algorithm [C]//5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM). USA:[s. n.],2022:1107-1111.
- [8] NIE Ming-xing, ZHOU Ai-jun. Development of look-ahead NURBS interpolation based on the exponential function [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,2022,22(5):1681-1696.
- [9] 张相胜,朱道坤,潘丰. 数控加工中S型曲线柔性加减速控制算法研究[J]. 制造业自动化,2020,42(12):68-73,124.
ZHANG Xiang-sheng, ZHU Dao-kun, PAN Feng. Research on S-curve flexible Acc/Dec control algorithm in NC machining [J]. Manufacturing Automation, 2020, 42 (12): 68-73, 124.
- [10] 李浩,吴文江,韩文业,等. 基于自适应前瞻和预测校正的实时柔性加减速控制算法[J]. 中国机械工程, 2019,30(6):690-699.
LI Hao, WU Wen-jiang, HAN Wen-ye, et al. Real-time flexible acceleration and deceleration control algorithm based on adaptive look-ahead and predictor-corrector method [J]. China Mechanical Engineering,2019,30(6):690-699.
- [11] ALPERS B. On fast jerk-continuous motion functions with higher-order kinematic restrictions for online trajectory generation [J]. Robotics,2022,11(4):73-73.
- [12] CICEK E, TURKER T, AKBATI O, et al. Asymmetric S-curve Generation and Tracking Under Motion Constraints: an Experimental Validation [C]//2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). USA: Conference Publishing Services,2022:1-6.
- [13] 冷洪滨,郭义杰,潘晓弘. 三次多项式型微段高速加工速度规划算法研究[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(2):336-340,397.
LENG Hong-bin, WU Yi-jie, PAN Xiao-hong. Velocity planning algorithm for high speed machining of micro line blocks based on cubic polynomial model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14 (2): 336-340, 397.
- [14] HSU Kuan-lun. Synthesis of trigonometric motion programs with lower motion characteristics [J]. Mechanical Sciences,2022,13(1):111-121.
- [15] 王允森,盖荣丽,孙一兰,等. 高质量加工中四次多项式速度规划算法研究[J]. 中国机械工程,2014,25(5):636-641.
WANG Yun-sen, GE Rong-li, SUN Yi-lan. Research on quartic polynomial velocity planning algorithm for high-quality machining [J]. China Mechanical Engineering, 2014,25(5):636-641.
- [16] WANG Yun-sen, YANG Dong-sheng, GE Rong-li, et al. Design of trigonometric velocity scheduling algorithm based on pre-interpolation and look-ahead interpolation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015,96(9):94-105.
- [17] HALINGA M S, NYOBUYA H J, UCHIYAMA N. Generation and experimental verification of time and energy optimal coverage motion for industrial machines using a modified S-curve trajectory [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125 (7): 3593-3605.
- [18] CHEN Jin-hung, YEH Syh-shuih, SUN Jin-tsu. An S-curve acceleration/deceleration design for CNC machine tools using quintic feedrate function [J]. Computer-Aided Design and Applications,2011,8(4):583-592.
- [19] 张威,吴双峰,郭远东,等. 基于S型加减速的内螺纹磨削算法研究[J]. 制造业自动化,2023,45(11):166-171.
ZHANG Wei, WU Shuang-feng, GUO Yuan-dong, et al. Research on internal thread grinding algorithm based on S-type acceleration and deceleration [J]. Manufacturing Automation,2023,45(11):166-171.

本文引用格式:

张威,吴双峰,贺明茹,等. 基于多项式加减速的多头螺纹磨削算法研究[J]. 机电工程,2024,41(11):2050-2059.

ZHANG Wei, WU Shuangfeng, HE Mingru, et al. Multi-thread grinding algorithm based on polynomial acceleration and deceleration[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024,41(11):2050-2059.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>