

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.06.010

一种插补前连续微小线段平滑过渡前瞻算法

李光炀^{1,2,3}, 陈兴武^{1,2,3}, 聂明星^{1,2}, 邵明^{1,3}

(1. 福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建工程学院 数字装备与通讯技术中心, 福建 福州 350118; 3. 福建工程学院 电子信息与电气技术国家级实验教学示范中心, 福建 福州 350118)

摘要: 针对数控系统中连续微小线段的加工, 提出一种前瞻的方法。结合段间圆弧过渡, 简化 S 加减速, 双向前瞻缓冲, 实现各段起点速度、刹车速度和终点速度的计算, 从而达到段间速度平滑过渡。实验结果表明, 该方法具有计算量小、处理速度快、速度变换柔和等优点, 可以满足数控系统实时快速的控制需求。

关键词: 连续微小线段; 平滑过渡; 前瞻算法; S 加减速

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0560-06

A look-ahead algorithm for smooth transition of continuous micro line segments before interpolation

LI Guangyang^{1,2,3}, CHEN Xingwu^{1,2,3}, NIE Mingxing^{1,2}, SHAO Ming^{1,3}

(1. School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. CNC and Communication Research Center of Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Electronic Information and Electrical Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A look-ahead approach was presented for the machining of continuous micro line segments in NC system. Combined with the arc transition between segments, the S-curve acceleration and deceleration was simplified together with the two-way look-ahead buffering, so as to compute the starting velocity, braking velocity and terminal velocity for each segment, and then achieve a smooth transition between segments. Experimental results show that the method has such advantages as a small calculation amount, fast processing speed and soft speed transformation, which can meet the demands of real-time and fast control requirements of the numerical control (NC) system.

Keywords: continuous micro line segments; smooth transition; look-ahead algorithm; S-curve acceleration and deceleration

在数控加工制造过程中, CAM 工具根据被加工对象的轮廓生成加工代码, 这些加工代码包含大量的微小直线段和小圆弧线段。为了提高加工效率, 需要对连续微小线段的速度进行预处理, 避免加工过程中车床多次启停^[1]。另外在加工过程中速度变换如果过于频繁, 将直接影响工件的

精度和光滑度^[2]。

众多学者对连续微小线段高速插补加工进行了大量的研究^[1-6]。文献[1]在满足转接处误差约束和加速度约束的条件下, 插入直线段进行过渡, 并提出一种基于 S 型曲线加减速的速度前瞻算法, 通过判断转接点的限制速度来确定前瞻的

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 福建省数控装备技术重大研发平台(2014H2002); 福建工程学院科研发展基金(GY-Z13004)

第一作者简介: 李光炀(1983-), 男, 福建龙岩人, 实验师, 工程硕士, 研究方向: 工业自动化与机器人控制。

段数。然而,处理加工速度变化平缓的小线段时,前瞻的段数将增加,不利于快速前瞻。文献[2]采用圆弧过渡矢量夹角的平滑过渡方法来保证过渡点的平滑性。文献[3]提出一种通用型前瞻速度规划算法,并采用直线加减速和三角函数加减速的方法进行速度前瞻,缺点是速度衔接不够平滑。文献[4]提出一种自适应前瞻加减速的控制策略,根据路径夹角修正段进给速度,从而实现段间衔接。文献[5]提出一种根据加工路径的几何特性导出衔接点处的速度约束条件,并通过双向扫描获取最优进给速度的方法。文献[6]提出一种微小线段间圆锥截线拐角过渡的插补算法,该算法的缺点是基于 2 次有理 Bezier 形式的圆锥截线拐角过渡矢量模型计算量较大。

本文在以上述文献的基础上提出一种在前瞻队列里按给定参数的圆弧矢量过渡,简化 S 型加减速的快速插补前速度预处理的方法,从而提高加工效率和加工过程速度变化的平滑性,减少插补前速度规划的运算时间,适合应用于嵌入式数控系统设备。

1 衔接点过渡速度处理方法

段间的速度过渡是为了避免因线段间衔接处速度频繁变化导致的机床不平稳运行,从而保证零件表面的精度^[5]。为了满足工件的加工精度,段间衔接的速度曲线应尽量平滑。衔接点圆弧的过渡如图 1 所示,线段 AB 和 BC 形成夹角,段间过渡点 B 的速度为 V_{junction} 。在满足设定过渡点最大加工误差 d 的条件下,做一半径为 R 且相切于 AB 和 BC 的圆 O。加工误差最大点为 B' 点,则 B 点的速度可由 B' 点的速度替代。而 B' 点的速度为圆 O 向心加速度等于 A_{junction} 时的圆周运动线速度,可知圆 O 向心加速度 A_{junction} 为机床工作时的转角最大加速度。

在给定衔接处最大加工误差 d 的条件下,由公式(1)求得两个向量夹角 δ 的余弦值,进而求出该过渡圆弧 Q_0Q_1 的半径 R 。圆弧半径 R 及过渡点 B 的速度 V_{junction} 的推导公式由(1)–(4)表述。只要给定最大加工误差 d ,求出向量 AB 和 BC 夹角,在给定转角最大加速度 A_{junction} 的条件下,就可以求出 B 点转角处的最大速度 V_{junction} 。

$$\cos(\delta) = \frac{\mathbf{AB} \cdot \mathbf{BC}}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{BC}|} \quad (1)$$

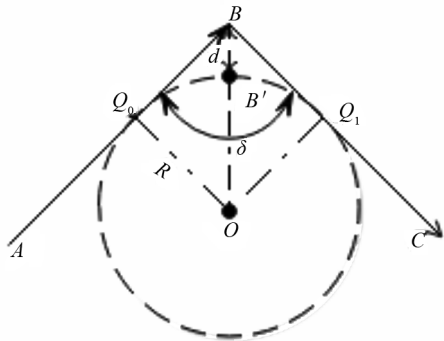


图 1 衔接点圆弧过渡示意图

Fig.1 Arc transition of connecting points

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \pm \sqrt{1 - \frac{\cos(\delta)}{2}} \quad (2)$$

$$R = d \times \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) / \left(1 - \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)\right) \quad (3)$$

$$V_{\text{junction}} = \sqrt{R \times A_{\text{junction}}} \quad (4)$$

图 1 中,给定向量 AB 和 BC 的起始速度 V_s ,指令速度 V_c ,终点速度 V_e ,如果在 B 点使用合理的速度替代终点速度 V_e ,则可以提高加工效率,且速度过渡更加平滑,进而提高工件的光滑度和加工精度。采用前瞻若干加工段的方法,可以动态的调整各段之间衔接点的过渡速度。为了得到前瞻缓存中各衔接段之间的衔接速度,则需按加减速算法对各衔接点的速度进行约束。

2 简化 S 加减速方法

如图 2 所示,标准的 S 曲线加减速的计算的目的是将一段已知长度的线段从给定的起始速度 V_s 加速到指令速度 V_c ,在指令速度运行一段行程后,减速运行到终点速度 V_e 。

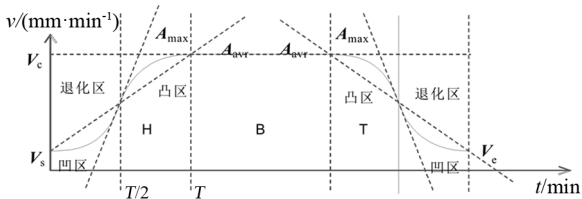


图 2 标准 5 段 S 加减速速度曲线

Fig.2 Speed curve of standard 5-segment's S-type acceleration and deceleration

如图 2 所示,标准 5 段 S 加减速的加速和减速特性很相似,分别存在一个凹区域和一个凸区域,加速区的凹区的速度由公式(5)表述,凸区的

速度由公式(6)表述;减速区的凹区的速度由公式(7)表述,凸区的速度由公式(8)表述。图2中, V_s 为起始速度, V_e 为终点速度, V_c 为加工的指令速度, A_{\max} 为最大加速度, A_{avr} 为平均加速度,图3中, J_m 为机床最大加速度,是机床运行过程中加速度对时间的导数。

$$V = V_s + J_m t^2 / 2 \quad (5)$$

$$V = \frac{V_s + V_c}{2} + A_{\max} t - \frac{J_m t^2}{2} \quad (6)$$

$$V = V_c - J_m t^2 / 2 \quad (7)$$

$$V = \frac{V_s + V_e}{2} + A_{\max} t + \frac{J_m t^2}{2} \quad (8)$$

其中,最大加速度 A_{\max} 为加速或减速区中最大的加速度值,由图2可知,在加速或减速区 T 时间内, $T/2$ 的时候加速度最大,且加速度 J_m 为加速度 A 在时间上的一阶导数,从而可以在给定机床最大加速度 J_m 的条件下,推出式(9):

$$A_{\max} = J_m T / 2 \quad (9)$$

平均加速度 A_{avr} 为加速度 A 在加减速时间内的平均值,加速度 A 从0变化到 A_{\max} ,再由 A_{\max} 变化到0。 A_{avr} 用式(10)计算:

$$A_{\text{avr}} = \frac{A_{\max} - 0}{2} = \frac{J_m T}{4} \quad (10)$$

由式(9)和(10)可以得到加减速时间 T ,由式(11)表述,式(11)中 $V_{s/e}$ 为起始速度或终点速度,在加速区时, $V_{s/e}$ 为起始速度 V_s ,在减速区时 $V_{s/e}$ 为终点速度 V_e 。

$$T = \frac{V_c - V_{s/e}}{A_{\text{avr}}} = \frac{4(V_c - V_{s/e})}{J_m T} = 2 \left(\frac{V_c - V_{s/e}}{J_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

加减速长度 L 应为平均速度乘于加速时间 T ,即图2中H区或T区中的阴影面积,加减速长度 L 可由式(12)求得,但该公式不能体现在前瞻过程中因速度变化带来的长度变化情况。

$$L = \frac{V_c + V_{s/e}}{2} T = (V_c + V_{s/e}) \left(\frac{V_c - V_{s/e}}{J_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

在使用前瞻方法的加工过程中,为实现速度平滑,当前加工段的速度可能是加速、减速、匀速的一种或这3种速度的组合,当前加工段的速度曲线取决于当前加工段的实际长度 L_a 和加减速方法。因此需要对当前段的实际长度 L_a 与加减速

速带来的变化长度 L_o 进行比较,从而确定出当前加工段的速度曲线。从图2可以看出,退化区空白处的面积表示加减速带来的变化长度 L_o ,因采用标准的5段S加减速, J_m 曲线如图3所示,可知退化区中凹区和凸区的面积相等。因此退化区的面积可用三角形面积公式求得,如式(13)所示:

$$L_o = \frac{(V_c - V_{s/e})}{2} T = (V_c - V_{s/e}) \left(\frac{V_c - V_{s/e}}{J_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

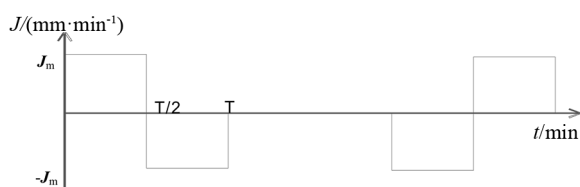


图3 标准5段S加减速加加速度曲线

Fig.3 Jerk curve of standard 5-segment's S-type acceleration and deceleration

在已知加减速变化长度 L_o 的条件下,可以用公式(14)求得 V_c , V_c 表示从起始速度 V_s 按给定 J_m 所能达到的最大指令速度,或已知终点速度 V_e 按给定 J_m 能及时停止的最大指令速度,即给定加减速约束条件下的最大刹车速度。

$$V_c = (L_o^2 J_m)^{\frac{1}{3}} + V_{s/e} \quad (14)$$

图2中,加速区为H,匀速区为B,减速区为T,在H区和T区存在凹区和凸区两种状态。在实际运行当中H、B、T3区不一定都存在,可以确定在实际运行中可能会出现HBT、HT、HB、BT、H、B、T7种情况,因此需要对这7种情况进行判断和优化。

第1步:根据两点坐标计算该线段长度 L_a ,然后根据式(13),在给定初始速度 V_s 、指令速度 V_c 及停止速度 V_e 条件下,计算出由加减速带来的长度变化值 L_o 。

第2步:根据线段实际长度 L_a 和长度变化值 L_o 的关系,判断加工类型。

(1) $L_a \leq L_o$,则属于H区或者T区。

(2) $L_a > L_o$,则属于HBT、HB、HT、BT、B的其中一种。

第3步:如果第2步的判断结果是属于H区或者T区,再根据 V_s 和 V_e 的关系进一步判断。

(1) $V_s > V_e$,则属于T区。在T区如果实际长

度 $L_a < L_o$, 则该段长度 L_a 不足以减速, 需要根据式 (14) 在满足 V_e 条件下修正 V_e , 使得 $V_s = V_e$, 此时减速 T 区长度 $L_t = L_o$ 。

(2) $V_s < V_e$, 则属于 H 区。在 H 区如果实际长度 $L_a < L_o$, 则实际距离 L_a 不足以加速, 需要根据式 (14) 在满足 V_s 条件下修正 V_e , 使得 $V_e = V_s$, 此时加速 H 区长度 $L_h = L_o$ 。

如果属于 HBT、HB、HT、BT、B 模式之一, 根据式 (13), 给定初始速度 V_s 和指令速度 V_e 计算加速 H 区长度 L_h , 给定指令速度 V_e 和终点速度 V_e 计算减速 T 区长度 L_t 。

(1) $L_a \leq L_h + L_t$, 则属于 HT 区, 如果 V_s 与 V_e 相等, 则 $L_t = L_h = L_a/2$, 如果 V_s 和 V_e 不等, 则需要满足线段长度 L_a 、起始速度 V_s 、终点速度 V_e 不变的条件下, 迭代计算得到目标速度 V_e , 然后再按式 (13) 求出该段加速区长度 L_h , 然后可得减速区长度 $L_t = L_a - L_h$ 。

(2) $L_a > L_h + L_t$, 则属于 HBT、HB、BT、B 模式之一, 根据计算得到的 H 区长度 L_h 和 T 区长度 L_t 重新修正能达到的最大指令速度 V_e , 使之满足计算总行程等于实际总长, 且 B 区的长度满足 $L_b = L_a - L_h - L_t$ 。

第 4 步: 取一条加工段数据, 在插补阶段, 判断当前加工点落在加工段对应速度曲线的哪个区。

(1) 如果在 H 区的凹区, 则按公式 (5) 计算速度并插补计算分段长度; 如果在凸区则按公式 (6) 计算速度并插补计算分段长度。

(2) 如果在 B 区, 则按修正后的 V_e 进行插补分段计算。

(3) 如果在 T 区的凹区则按公式 (7) 计算速度并插补计算分段长度, 如果在凸区则按公式 (8) 计算速度并插补计算分段长度。

3 插补前速度前瞻方法

前瞻的目的是给各衔接段提供一个优化的 V_s 和 V_e , 定义一个前瞻环形缓冲区。

如图 4 所示, 将待加工的线段先后放进缓冲区, 经前瞻速度优化后, 取出一段进行加工; 同时每插入一条加工数据, 进行一次动态修正缓冲区中未被加工段的速度。

前瞻算法采用如下 4 个步骤来完成:

(1) 向缓冲区申请 1 个空间, 根据公式 (1) 至

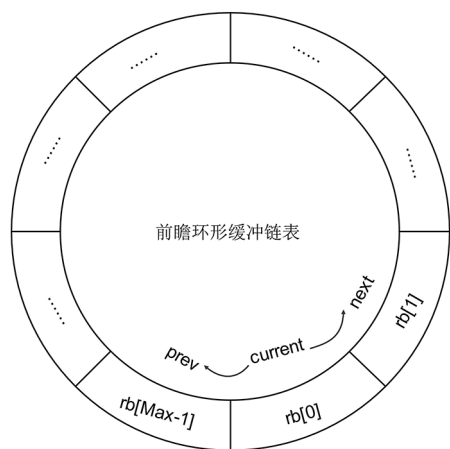


图 4 前瞻环形缓冲链表

Fig.4 Look-ahead loop buffer list

公式 (4) 计算当前段 $L_{current}$ 与前一段 L_{i-prev} 衔接的速度 $V_{junction}$, $L_{current}$ 段的起始速度 $V_s = \min(V_e, V_{junction})$; 根据公式 (14) 计算 $L_{current}$ 段减速到 0 所需的刹车速度 $V_{break-0}$ 。由图 2 可知, 当起始速度 V_s 不为 0, 将刹车速度 $V_{break-0}$ 平行上移 V_s 得到的速度为最终所需的刹车速度, 则 $L_{current}$ 段的 $V_e = \min(V_e, V_s + V_{break-0})$, V_e 为给定的指令速度。

(2) 从 $L_{current}$ 段开始, 逆向遍历缓冲区 (prev 方向), 更新各段的刹车速度, 各段的刹车点因衔接角度和该段的长度的影响, 可能在下一段的起始点就要开始减速以满足过渡点速度衔接的约束条件, 或者可能在下一段的减速点才开始减速。因此当前段的刹车速度 $V_{current-break}$ 应为下一段起始速度 V_{next-s} 和下一段指令速度 V_{next-c} 的最小值与终点速度为 0 的刹车速度 $V_{break-0}$ 之和, 即 $V_{current-break} = \min(V_{next-s}, V_{next-c}) + V_{break-0}$ 。遍历完毕后, 此时指针指向第 1 个正在加工的段, 并且此时各段的减速区的最大速度已经确定, 为后面求取各段衔接速度提供了参考。

(3) 正向遍历缓冲区 (next 方向), 将第 1 段的初始速度 V_s 设置为 0, 其它段的初始速度 V_s 等于前一段的终点速度 V_{e-prev} 。该步骤中, 前一段的终点速度 V_{e-prev} 为前一段停止速度 V_e 、后一段刹车速度 $V_{next-break}$ 、后一段初始化速度 V_{next-s} 及当前段刹车速度 $V_s + V_{break-0}$ 的最小值, $V_{e-prev} = \min(V_e, V_{next-break}, V_{next-s}, (V_s + V_{break-0}))$ 。插补计算时, 从环形缓冲区取出第 1 段数据, 并根据该段的起始速度 V_s 和终点速度 V_e , 采用本文的 S 曲线加减速

算法的第 1 步到第 3 步,计算出每一段的 HBT 区域的长度。遍历完毕后,把最后一段的停止速度设置为 0。

(4)计算完毕后,只要环形缓冲区没有填满,则继续向环形缓冲区加入下一条加工段,每加入一条加工段进行一次前瞻计算,回到第 1 步。

只要环形缓冲区中有数据,插补器就会从环形缓冲器中取走最先进入缓冲区的加工段,且每插补完一条加工段都会从缓冲区中取走最先进入缓冲区的加工段,并更新当前段在环形缓冲区的位置。如此反复循环,一直到所有加工段被放入缓冲区前瞻完毕,被插补器取走缓冲中的所有加工数据并插补完毕,加工流程结束。

4 实验验证

设定 X 、 Y 、 Z 各轴的最大加速度为 $J_m = 10\ 000\ 000\ \text{mm}/\text{min}^2$,段与段之间转接处最大加速度 $J_{\text{junction}} = 50\ 000\ \text{mm}/\text{min}^2$,转接处圆弧与夹角偏差 $d = 0.01\ \text{mm}$,插补周期为 $2\ \text{ms}$,前瞻缓冲区大小为 24 线段, $G00$ 最快速度为 $600\ \text{mm}/\text{min}$, $G01$ 最快进给速度 $600\ \text{mm}/\text{min}$,Windows 7 64 位操作系统,内存 4G,Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU P9600 2.66 G,刀具选用平底半径为 $0.25\ \text{mm}$ 刀具半角为 10° 的平底刻刀,切割深度为 $0.5\ \text{mm}$ 。

加工轨迹采用蝴蝶形样条曲线,模型大小约为 $65\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 。如图 5 所示,外轮廓为模型实际轮廓,内轮廓为刻刀刀具轨迹路径,生成的内轮廓加工代码 316 行,即模型的轮廓轨迹由 316 条小线段衔接组成。

图 6 为插补后生成的实际插补走刀路径,该路径中包含进退刀轨迹。

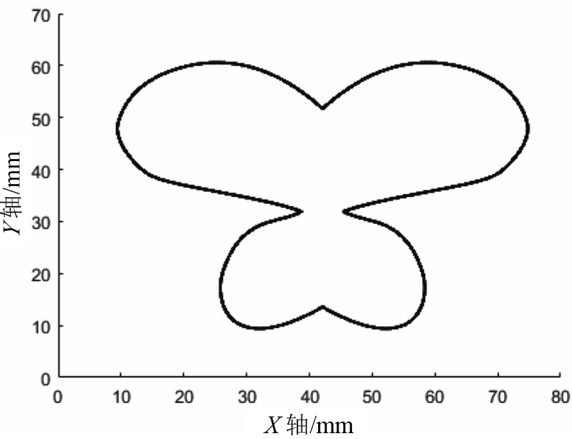


图 5 蝴蝶形样条加工矢量图
Fig.5 Processing vector of the butterfly-shaped spline

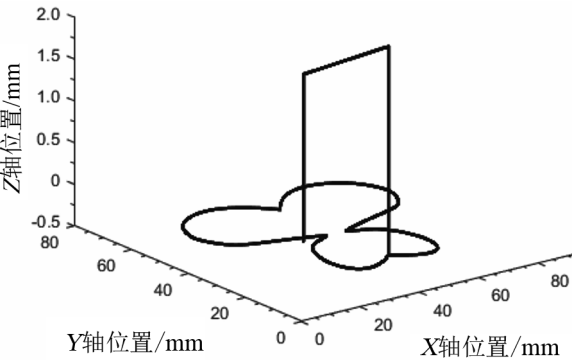


图 6 插补计算输出的加工轨迹路径
Fig.6 Machining path of interpolation calculation output

图 7 为带 S 加减速无前瞻加工速度曲线,整个加工过程中有 130 678 次插补计算,每加工一条微小线段需要进行一次起始速度和终点速度均为零的 S 曲线加减速,加减速过于频繁,且大多加

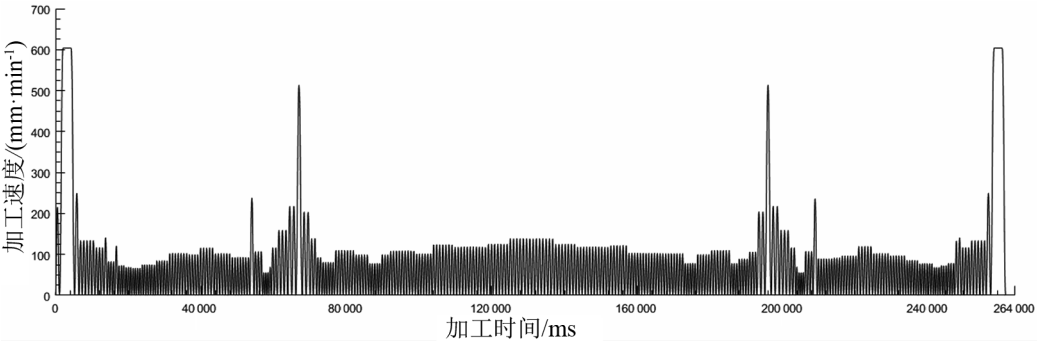


图 7 带 S 加减速无前瞻加工速度曲线
Fig.7 Machining velocity curve with S type acceleration and deceleration without looking-forward

工段不能达到要求的指令速度。图 8 为带 S 加减速有前瞻加工速度曲线, 整个加工过程有 19 437 次插补计算, 加减速过程中拐角变化剧烈的地方, 在约束条件下完成了减速, 且在平坦的地方达到指令速度, 整体加工速度比无前瞻时提高了, 避免

了频繁的加减速。

图 7 和图 8 中头尾对称的速度变化区为进刀和退刀快移速度。前瞻处理过程中, 所需时间大多在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 以下, 最大值出现在 63 段附近, 为 $2.5\text{ }\mu\text{s}$, 加工所耗的时间如图 9 所示。

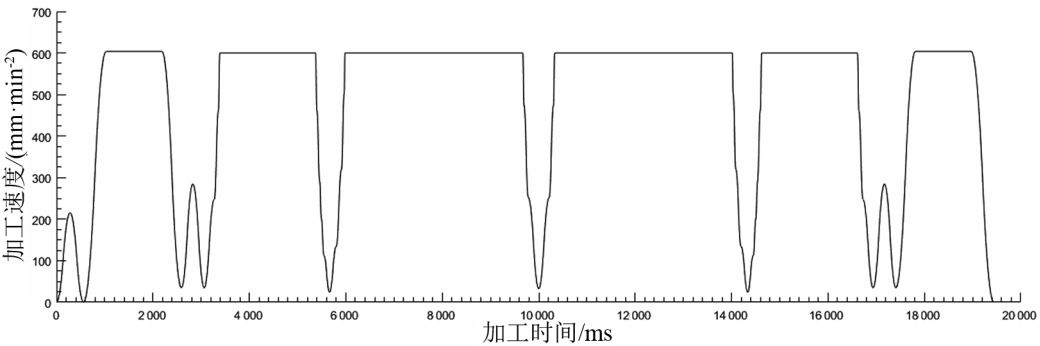


图 8 带 S 加减速有前瞻加工速度曲线

Fig.8 Machining velocity curve with S type acceleration and deceleration with looking-forward

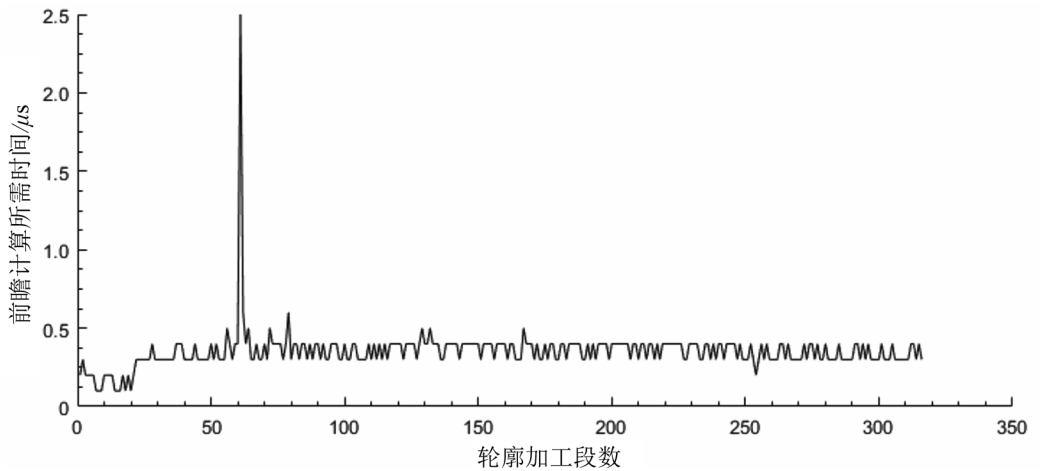


图 9 前瞻深度 24 时前瞻计算所需时间

Fig.9 Time required for look-ahead calculations with a depth of 24

5 结语

本文采用加速度限定方法,在微小线段过渡点用圆弧匀速运动速度替代衔接点速度,简化 S 曲线

加减速并结合前瞻技术,实现了连续微小线段加工的速度平滑过渡,并对所描述算法进行验证,验证结果表明该方法运算速度快,过渡效果好,可以有效减少加工过程的速度变化,减少机床振动。

参考文献:

[1] 陈铮杰, 赵东标, 李克强. 一种自适应前瞻的微线段速度平滑插补算法[J]. 机械设计与制造, 2014, 43(3): 41-44.

[2] 张晓辉, 于东, 郑颺默, 等. 面向高速加工的微小线段平滑过渡算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011(1): 177-180.

[3] 董靖川, 王太勇, 王自静, 等. 通用型前瞻速度规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 529-538.

[4] 徐志明, 冯正进, 汪永生, 等. 连续微小路径段的高速自适应前瞻插补算法[J]. 制造技术与机床, 2003(12): 20-23.

[5] 黄昕, 李迪, 李方, 等. 基于双向扫描算法的小线段速度规划[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(11): 2187-2192.

[6] 许晨伟, 姚进. 微线段高速加工的圆锥截线拐角插补算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 42(5): 201-205.

(特约编辑: 黄家瑜)