

DOI: 10.3901/JME.2019.13.151

综合多约束条件优化连续轨迹前瞻算法*

陈琳^{1,2} 黄旭丰¹ 刘梦¹ 袁山山¹ 贺飞翔¹ 易健¹ 潘海鸿^{1,2}

(1. 广西大学机械工程学院 南宁 530004;

2. 广西大学广西制造系统与先进制造技术重点实验室 南宁 530004)

摘要: 针对现有连续轨迹插补算法在加工过程中会出现法向加速度和轨迹误差超限现象, 导致加工效率及加工精度低等问题。为此, 提出一种基于综合多约束条件(Comprehensive multi-constraints, CMC)和前瞻技术的优化连续轨迹前瞻算法。该算法先用弓高误差和法向加速度作为约束限制圆弧加工的最大进给速度; 综合运动矢量关系、系统动力学性能和轨迹段长等约束条件, 计算获得最优的轨迹段间衔接点速度; 根据速度前瞻控制与非对称 S 曲线加减速控制实现对轨迹段间衔接进给速度的平滑处理。试验验证结果表明, 所提出的前瞻插补算法输出的法向加速度和轨迹误差不超过系统给定的最大值、合速度平滑过渡、运动轴速度不存在突变, 且全程范围内插补输出的轨迹误差最大值小于系统给定的最大弓高误差值; 在保证加工效率的同时, 提高加工平滑性及加工精度。

关键词: 前瞻插补; 连续轨迹规划; 非对称 S 曲线; 衔接进给速度

中图分类号: TP273

Optimized Continuous Trajectory Look-ahead Algorithm with Comprehensive Multi-constraints

CHEN Lin^{1,2} HUANG Xufeng¹ LIU Meng¹ YUAN Shanshan¹
HE Feixiang¹ YI Jian¹ PAN Haihong^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004;

2. Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System & Advanced Manufacturing Technology, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract: During machining process with existing continuous trajectory interpolation algorithms, normal acceleration and trajectory error exceed maximum result in low machining efficiency and machining precision. Therefore, a continuous trajectory look-ahead interpolation algorithm is proposed, which based on comprehensive multi-constraints and look-ahead technique. The algorithm limits the maximum feed rate of arc machining by restricting the chord error and the normal acceleration. The optimal link feedrate between the trajectory segments is calculated according to the constraints of the integrated motion vector relationship, system dynamics performance and the trajectory segment length. Smoothness of the link feedrate between trajectory segments is ensured, according to the speed look-ahead control and the asymmetric S-curve acceleration/deceleration control. The experiment results show that the normal acceleration and the trajectory error output by proposed look-ahead interpolation algorithm do not exceed allowable maximum of the system, and the synthesized reference velocity transits smoothly, and the kinematic axis velocity will not mutate, and the maximum trajectory error of the interpolation output is less than the maximum allowed chord error in the whole range. This algorithm can improve machining smoothness and machining accuracy while machining efficiency is ensured.

Key words: look-ahead interpolation; continuous trajectory planning; asymmetric S-curve; linked federate

* 国家自然科学基金(51465005)、广西科技计划(桂科 AB16380237)、广西高校现代设计与先进制造重点实验室主任课题基金(GXXD16ZD-01)、广西制造系统与先进制造技术重点实验室(14-045-15S09)和南宁市科学研究与技术开发计划(20161281)资助项目。20180719 收到初稿, 20181224 收到修改稿

0 前言

现代数控系统加工复杂零件时,通常先采用连续直线或圆弧轨迹对运动轮廓进行拟合,然后对每一段拟合轨迹进行插补完成复杂零件的加工。因轨迹之间衔接处一阶不连续,容易导致轨迹衔接速度过渡不平滑的问题。为了解决这一问题以满足高速高精加工要求,通常引入前瞻控制技术。

目前,国内外专家学者对轨迹前瞻插补算法进行大量研究。HU 等^[1]采用直线加减速算法前瞻处理进给速度,但仅考虑直线与直线轨迹衔接情况,并且直线加减速算法冲击较大,难以保证加工质量;CAO 等^[2]对直线与圆弧轨迹衔接情况进行建模,基于最大前瞻段数和轨迹几何性质约束条件求轨迹衔接点最优速度,采用对称 S 型加减速算法前瞻处理进给速度;冷洪滨等^[3]采用三次多项式加减速算法前瞻处理进给速度,保证加速度连续性;杨开明等^[4]基于轮廓误差约束条件对衔接点速度进行处理,虽然保证了加工精度,但未考虑衔接点处速度变化及加速度约束;张晓辉等^[5]通过建立拐角曲线过渡矢量模型,保证衔接点处曲率连续,该法加工效率虽高,但是未保证加工精度;WANG 等^[6-7]在前瞻控制中基于弓高误差、命令进给速度、衔接点速度矢量变化以及运动轴进给速度约束条件求轨迹衔接点最优速度,采用梯形曲线加减速算法前瞻处理进给速度;潘海鸿等^[8]在传统轨迹段间衔接速度求解约束条件的基础上增加基于非对称 S 曲线加减速轨迹段长约束条件,以优化衔接点速度;刘强等^[9]对直线、圆弧和参数曲线混合加工过程中的进给速度进行前瞻控制,根据插补几何误差和机床动力学约束条件求衔接点速度最优值,采用三次多项式加减速算法对进给速度进行平滑处理;QIAO 等^[10]对微小连续轨迹的插补机制进行研究,将插补过程划分为预处理和实时插补两部分,通过设置数据缓存器实现两者之间的数据交互,采用对称 S 型加减速算法前瞻处理进给速度,提高了加工效率;陈日东等^[11]根据加工轨迹的几何特征、误差、加减速要求,计算连续轨迹段间衔接最大允许速度;张勇等^[12]利用三次 Bézier 曲线将微小线段拟合为曲线,采用切向跃度连续加减速进行速度规划,并利用双向扫描算法实现速度前瞻,有效平衡了加工精度和效率。

上述研究大多从进给速度入手,运用直线加减速算法、对称 S 型加减速算法、三次多项式加减速算法等对进给速度进行前瞻处理,解决了轨迹间衔

接的优化问题,但未考虑连续轨迹衔接点运动轴速度突变、圆弧插补时轨迹误差超限等问题,严重影响加工平稳性和加工精度。为此,提出引入多约束条件实现连续轨迹优化的前瞻,即综合多约束条件优化连续轨迹(Comprehensive multi-constraints optimized continuous trajectory, MCOCT)前瞻算法。如在圆弧轨迹插补时,该算法在弓高误差约束条件基础上引入法向加速度约束,限制圆弧加工最大进给速度。该算法通过综合运动矢量关系、系统动力学性能和轨迹段长等约束条件,优化衔接点进给速度,实现数控加工中连续轨迹段平滑过渡,在保证加工效率的同时,提高加工精度及平稳性。

1 轨迹段间衔接速度综合多约束优化

1.1 圆弧轨迹插补的进给速度限制

在圆弧轨迹插补过程中,必须根据弓高误差和法向加速度等约束对圆弧轨迹插补最大进给速度进行限制,保证轨迹误差和法向加速度不超限,以减少冲击,提高加工精度。

在弓高误差约束下,圆弧轨迹允许的最大进给速度 v_{δ_max} 为

$$v_{\delta_max} = \frac{2}{T_s} \sqrt{2r\delta_{max} - \delta_{max}^2} \quad (1)$$

式中, T_s 为插补周期; r 为圆弧半径; δ_{max} 为系统给定的最大弓高误差。

在法向加速度约束下,圆弧轨迹允许的最大进给速度 v_{a_max} 为

$$v_{a_max} = \sqrt{a_{n_max} r} \quad (2)$$

式中, a_{n_max} 为系统给定的最大法向加速度。

设定圆弧轨迹插补的最大进给速度 v_{max} 为

$$v_{max} = \min\{v_f, v_{\delta_max}, v_{a_max}\} \quad (3)$$

式中, v_f 为命令进给速度。

1.2 轨迹段间衔接速度约束条件

设某复杂轨迹由 n 段直线/圆弧轨迹拟合而成,以第 i ($1 \leq i \leq n-1$) 段轨迹和第 $i+1$ 段轨迹为例分析。设第 i 段轨迹的最大进给速度为 v_{i_max} 、起点速度为 v_{i_s} 、终点速度为 v_{i_e} 、实际段长为 l_i , 第 $i+1$ 段轨迹的最大进给速度为 v_{i+1_max} 、起点速度为 v_{i+1_s} 、终点速度为 v_{i+1_e} 、实际段长为 l_{i+1} ; 设系统加速运动阶段和减速运动阶段允许的最大加加速度值分别为 j_{acc_max} 和 j_{dec_max} 。

为了保证数控系统加工过程的平稳性,提高系统的加工质量和加工效率,需综合运动矢量关系约

束、系统动力学性能约束、轨迹段长度约束条件, 求解相邻轨迹段间最优衔接速度。

1.2.1 基于运动矢量关系约束条件

衔接点处合成进给速度矢量变化会导致各运动轴的速度大小和方向产生突变, 影响加工精度。因此提出基于运动矢量关系约束条件修正衔接点速度。

以第 i 段轨迹为圆弧和第 $i+1$ 段轨迹为直线为例(图 1), $0 \leq \theta_{i-e} < 0.5\pi$ 的四种衔接情形如图 1 所示。

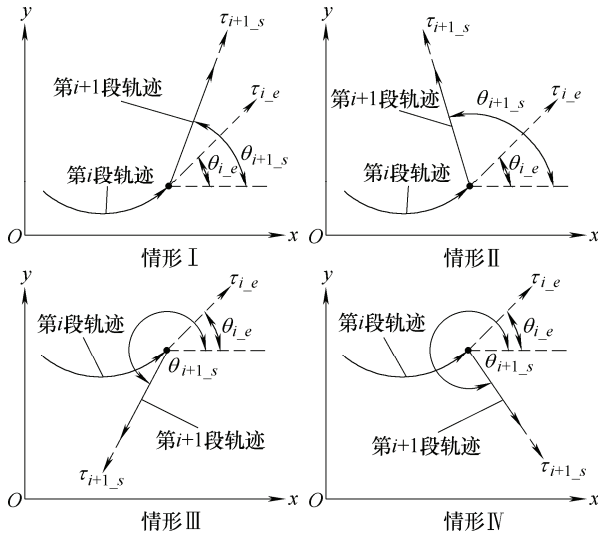


图 1 圆弧轨迹与直线轨迹衔接的四种情形

图 1 中, τ_{i-e} 为第 i 段轨迹终点处切线的单位矢量, τ_{i+1-s} 为第 $i+1$ 段轨迹起点处切线的单位矢量, θ_{i-e} 为第 i 段轨迹终点处单位切线矢量沿逆时针方向与 x 轴正方向的夹角, θ_{i+1-s} 为第 $i+1$ 段轨迹起点处单位切线矢量沿逆时针方向与 x 轴正方向的夹角。

由图 1 中情形 I 可知, $0 \leq \theta_{i-e} < 0.5\pi$, $0 \leq \theta_{i+1-s} < 0.5\pi$ 。 τ_{i-e} 在 x 、 y 轴分量分别指向 x 轴正方向、 y 轴正方向; τ_{i+1-s} 在 x 、 y 轴分量分别指向 x 轴正方向、 y 轴正方向。该情形下, 经过衔接点时, x 轴与 y 轴的速度不存在突变问题, 因此无需修正该衔接点速度。

由图 1 情形 II 可知, $0 \leq \theta_{i-e} < 0.5\pi$, $0.5\pi \leq \theta_{i+1-s} < \pi$ 。 τ_{i-e} 在 x 、 y 轴分量分别指向 x 轴正方向、 y 轴正方向; τ_{i+1-s} 在 x 、 y 轴分量分别指向 x 轴负方向、 y 轴正方向。该情形下, 经过衔接点时, x 轴的速度存在突变问题, 需将该衔接点速度修正为 0, 保证运动轴速度无突变。图 1 中情形 III、情形 IV 衔接点速度处理方法与情形 II 处理方法一致。即当 θ_{i-e} 与 θ_{i+1-s} 位于同一象限时, 无需修正该衔接点速度; 当 θ_{i-e} 与 θ_{i+1-s} 位于不同象限时, 将该衔接点速

度修正为 0。

设定基于运动矢量关系约束条件最优衔接点进给速度 $v_{i,M}$ 为

$$v_{i,M} = \begin{cases} v_{i-e} & 0 \leq \theta_{i-e} < 0.5\pi \quad 0 \leq \theta_{i+1-s} < 0.5\pi \\ v_{i-e} & 0.5\pi \leq \theta_{i-e} < \pi \quad 0.5\pi \leq \theta_{i+1-s} < \pi \\ v_{i-e} & \pi \leq \theta_{i-e} < 1.5\pi \quad \pi \leq \theta_{i+1-s} < 1.5\pi \\ v_{i-e} & 1.5\pi \leq \theta_{i-e} < 2\pi \quad 1.5\pi \leq \theta_{i+1-s} < 2\pi \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1.2.2 基于系统动力学性能约束条件

衔接点处合成进给速度矢量发生改变会导致运动轴加速度产生突变, 因此需要保证此时产生的加速度值在系统给定的最大值范围内。假设当前衔接点处的进给速度为 v_i , 由 θ_{i-e} 、 θ_{i+1-s} 和插补周期 T_s 得 x 轴与 y 轴的加速度 a_x 、 a_y 为

$$\begin{cases} a_x = \frac{v_i |\cos \theta_{i+1-s} - \cos \theta_{i-e}|}{T_s} \\ a_y = \frac{v_i |\sin \theta_{i+1-s} - \sin \theta_{i-e}|}{T_s} \end{cases} \quad (5)$$

设 x 轴与 y 轴允许的最大加速度分别为 a_{x_max} 、 a_{y_max} , 则由式(5)求得 x 轴与 y 轴衔接点处最大速度 v_{x_max} 、 v_{y_max} 为

$$\begin{cases} v_{x_max} = \frac{a_{x_max} T_s}{|\cos \theta_{i+1-s} - \cos \theta_{i-e}|} \\ v_{y_max} = \frac{a_{y_max} T_s}{|\sin \theta_{i+1-s} - \sin \theta_{i-e}|} \end{cases} \quad (6)$$

设定基于系统动力学性能约束条件最优衔接点速度 $v_{i,D}$ 为

$$v_{i,D} = \min\{v_{i-e}, v_{x_max}, v_{y_max}\} \quad (7)$$

1.2.3 基于轨迹段长约束条件

在加减速控制中, 当轨迹段长过短时, 系统无法从起点速度到达终点速度, 导致插补过程中进给速度突变。为保证加工过程中进给速度连续、平滑过渡, 设定基于轨迹段长约束条件修正衔接点速度。

(1) 对于第 i 段轨迹, 当 $v_{i-s} \geq v_{i-e}$ 时, 第 i 段轨迹以减速为主, 无需处理; 当 $v_{i-s} < v_{i-e}$ 时, 第 i 段轨迹以加速为主, 需要判断 l_i 是否满足加速运动所需的位移长度。速度从 v_{i-s} 加速到 v_{i-e} 所需的最短位移 l_{acc_min} 为

$$l_{acc_min} = (v_{i-s} + v_{i-e}) \sqrt{(v_{i-e} - v_{i-s}) / j_{acc_max}} \quad (8)$$

若 $l_i \geq l_{acc_min}$, 无需修正 v_{i-e} ; 若 $l_i < l_{acc_min}$, 则 l_i 不满足速度从 v_{i-s} 加速到 v_{i-e} 所需的位移长度, 需要按式(9)将 v_{i-e} 修正为 v'_{i-e} , 并令 $v_{i_max} = v'_{i-s}$ 。

$$v'_{i-e} = \frac{-v_{i-s} - (\sqrt[3]{x_1} + \sqrt[3]{x_2})}{3}$$

$$\begin{cases} x_1 = 1.5\sqrt{81j_{acc_max}^2 l_i^4 + 96v_{i-s}^3 j_{acc_max} l_i^2} - \\ 8v_{i-s}^3 - 13.5j_{acc_max} l_i^2 \\ x_2 = -1.5\sqrt{81j_{acc_max}^2 l_i^4 + 96v_{i-s}^3 j_{acc_max} l_i^2} - \\ 8v_{i-s}^3 - 13.5j_{acc_max} l_i^2 \end{cases} \quad (9)$$

(2) 对于第 $i+1$ 段轨迹, 设第 $i+1$ 轨迹段的起点速度和终点速度分别为 v_{i+1-s} 、 v_{i+1-e} , 第 $i+1$ 轨迹最大进给速度为 $v_{i+1-max}$, 第 $i+1$ 轨迹实际段长为 l_{i+1} 。

当 $v_{i+1-s} \leq v_{i+1-e}$ 时, 第 $i+1$ 轨迹段以加速为主, 无需处理; 当 $v_{i+1-s} > v_{i+1-e}$ 时, 第 $i+1$ 轨迹段以减速为主, 需要判断 l_{i+1} 是否满足减速运动所需的位移长度。假设第 $i+1$ 段轨迹终点速度为 v_x , 则速度从 v_{i+1-s} 减速到 v_x 所需最短位移 l_{dec_min} 为

$$l_{dec_min} = \sqrt{\frac{(-v_x^3 - v_x^2 v_{i+1-s} + v_x v_{i+1-s}^2 + v_{i+1-s}^3)}{j_{dec_max}}} \quad (10)$$

令 $f(v_x) = -v_x^3 - v_x^2 v_{i+1-s} + v_x v_{i+1-s}^2 + v_{i+1-s}^3$, 分别对 $f(v_x)$ 求取一阶、二阶和三阶导数得

$$\begin{aligned} f'(v_x) &= -3v_x^2 - 2v_x v_{i+1-s} + v_{i+1-s}^2 \\ f''(v_x) &= -6v_x - 2v_{i+1-s} \\ f'''(v_x) &= -6 \end{aligned} \quad (11)$$

由导数性质及函数单调性可知, 当 $v_x = v_{i+1-s} / 3$ 时, $f(v_x)$ 取得极大值

$$f(v_x)_{\max} = f(v_{i+1-s} / 3) = 32v_{i+1-s}^3 / 27 \quad (12)$$

因此, 减速运动所需最短位移的极大值为

$$l_{dec_min_max} = \sqrt{\frac{f(v_x)_{\max}}{j_{dec_max}}} = \sqrt{\frac{32v_{i+1-s}^3}{27j_{dec_max}}} \quad (13)$$

若 $l_{i+1} \geq l_{dec_min_max}$, 无需对 v_{i+1-s} 进行修正; 若 $l_{i+1} < l_{dec_min_max}$, 则需要按式(14)对第 $i+1$ 段轨迹起点速度 v_{i+1-s} 修正为 v'_{i+1-s} , 并令第 $i+1$ 段轨迹最大进给速度 $v_{i+1-max} = v'_{i+1-s}$ 。

$$v'_{i+1-s} = \sqrt[3]{\frac{27l_{i+1}^2 j_{dec_max}}{32}} \quad (14)$$

设定基于轨迹段长约束条件最优衔接点速度 $v_{i,T}$

$$v_{i,T} = \min\{v_{i-e}, v_{i+1-s}\} \quad (15)$$

1.2.4 轨迹段间衔接点速度最优值

综合上述约束条件, 求解轨迹段间衔接点速度最优值 $v_{i,i+1}$ 流程如图 2 所示。

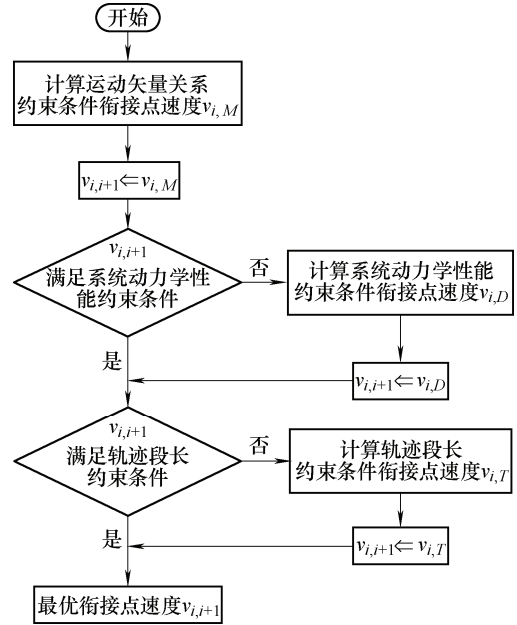


图 2 轨迹段间衔接点速度综合优化处理流程

2 算法实施过程

加工由 n 段轨迹组成的几何图案时, 首段轨迹起点速度 v_{1-s} 和末段轨迹终点速度 v_{n-e} 均等于 0。MCOCT 前瞻算法实施流程如图 3 所示, 分为前瞻处理模块和实时插补模块, 其中 i 为前瞻处理模块轨迹段的计数值, j 为实时插补模块轨迹段的计数值。为保证轨迹段间衔接速度连续且平滑过渡, 首先读取轨迹加减速和插补计算所需的计算参数; 然

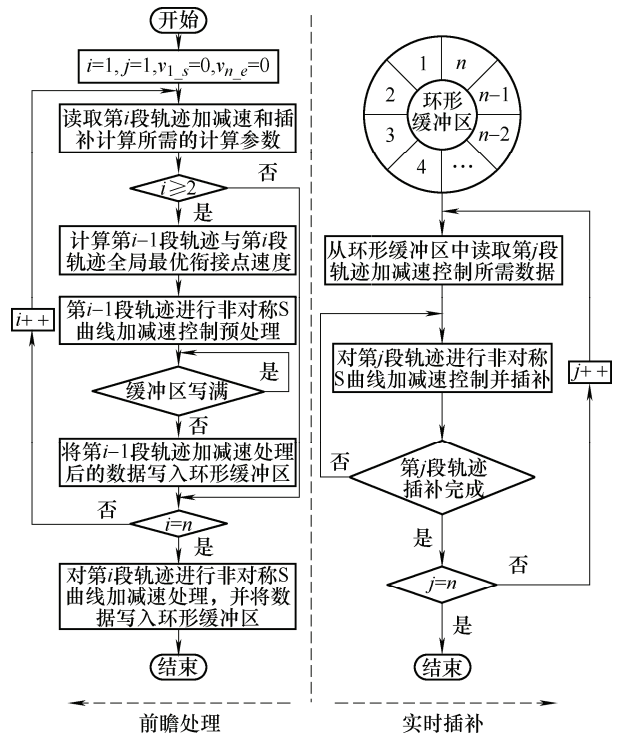


图 3 MCOCT 前瞻算法实施流程

后采用第1节所述算法求解相邻轨迹段最优衔接点速度;最后对各段轨迹进行非对称S曲线加减速控制并进行插补输出。

3 试验验证与分析

在基于两正交轴的数控伺服系统试验平台(图4)上对提出的MCOCT前瞻算法进行验证。试验平台包括计算机、多轴运动控制器板卡、伺服驱动系统及正交轴工作台。其中,多轴运动控制器板卡由双DSP+双FPGA组成。

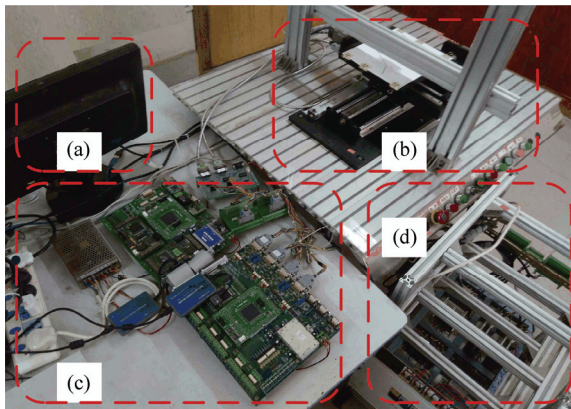


图4 两正交轴的数控伺服系统试验平台

3.1 连续轨迹衔接进给速度优化算法试验

设计图5所示运动轨迹,其由3段直线轨迹、1段顺圆弧轨迹和1段逆圆弧轨迹组成。

设定插补周期 T_s 为2 ms,允许的最大弓高误差为 $0.5\ \mu\text{m}$,允许的最大法向加速度为 $800\ \text{mm/s}^2$,允许的最大进给加速度为 $800\ \text{mm/s}^2$,允许的最大加加速度为 $8\ 000\ \text{mm/s}^3$ 。

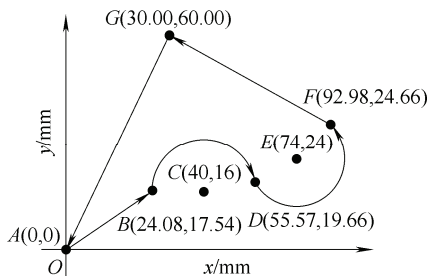


图5 连续轨迹衔接进给速度优化算法试验轨迹

将传统前瞻算法、文献[8]自适应前瞻算法与MCOCT前瞻算法分别在不同命令进给速度 v_f (20 mm/s、50 mm/s、100 mm/s、200 mm/s)下进行对比试验。 $v_f = 200\ \text{mm/s}$ 时三种算法所得的各衔接点进给速度如表1所示。

表1 算法所得各衔接点进给速度($V_f=200\ \text{mm/s}$)

衔接点	三种算法所得各衔接点进给速度/(mm/s)		
	传统前瞻	自适应前瞻	MCOCT 前瞻
A	0	0	0
B	0	2.247	2.247
D	0	126.469	113.117
F	0	1.911	1.563
G	0	1.911	0

在 $v_f = 200\ \text{mm/s}$ 情况下,三种算法插补输出的轨迹误差如图6所示。传统前瞻算法未限制圆弧插补中最大进给速度,导致插补过程中轨迹误差最大值为 $0.805\ \mu\text{m}$,超过系统给定的最大弓高误差值 $0.5\ \mu\text{m}$;自适应前瞻算法虽引入弓高误差约束条件,但其仅用于限制衔接点进给速度,未考虑圆弧插补轨迹误差超限问题,导致插补过程中轨迹误差最大值为 $0.864\ \mu\text{m}$,超过系统给定的最大弓高误差值 $0.5\ \mu\text{m}$;MCOCT前瞻算法在弓高误差约束条件的基础上引入法向加速度约束条件,限制圆弧轨迹衔接点速度和最大进给速度,使插补输出的轨迹误差最大值仅为 $0.4\ \mu\text{m}$,满足系统对轨迹精度的要求。

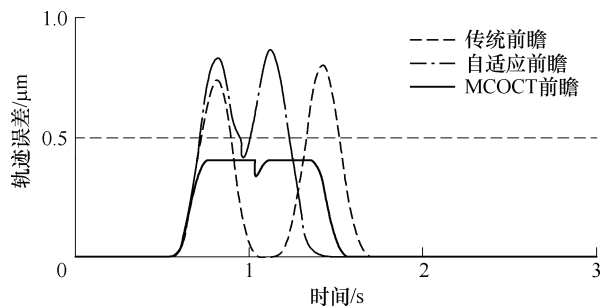
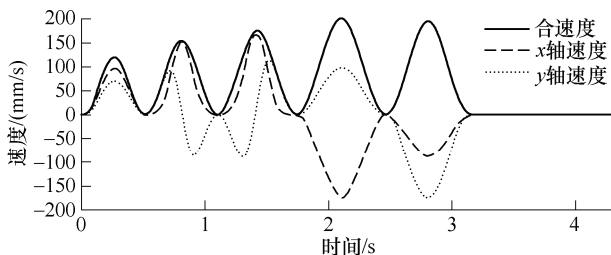
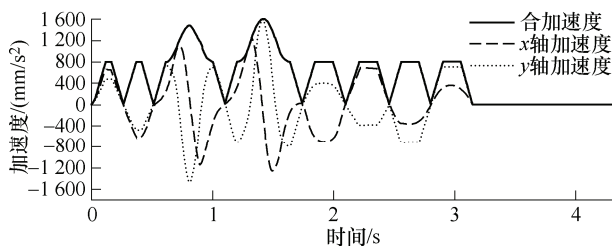


图6 $v_f = 200\ \text{mm/s}$ 三种算法插补输出的轨迹误差

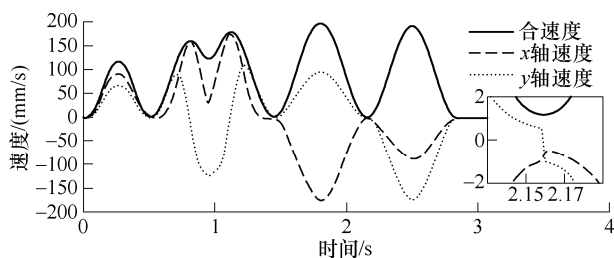
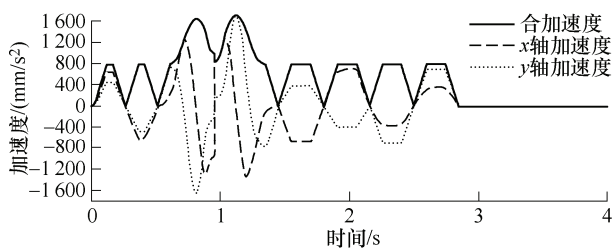
在 $v_f = 200\ \text{mm/s}$ 情况下,传统前瞻算法插补输出的速度和加速度如图7所示。由表1和图7可知,传统前瞻算法将每段运动轨迹的起点速度和终点速度均置为0,虽然能保证各轨迹段间合速度和运动轴速度的平滑过渡,但启停频繁,在加工过程中容易产生冲击和振动,影响加工精度,加工效率低。由于未考虑圆周运动中进给速度对法向加速度的影响,在加工圆弧轨迹时,插补输出的 x 轴和 y 轴加速度最大值分别为 $1\ 291.64\ \text{mm/s}^2$ 、 $1\ 598.33\ \text{mm/s}^2$,均超过系统给定的最大加速度 $800\ \text{mm/s}^2$ 。



(a) $v_f=200\ \text{mm/s}$ 传统前瞻插补的速度

(b) $v_f=200$ mm/s 传统前瞻插补输出的加速度图 7 $v_f=200$ mm/s 传统前瞻插补输出的速度和加速度

在 $v_f=200$ mm/s 情况下, 自适应前瞻算法插补输出的速度和加速度如图 8 所示。由表 1 和图 8 可知, 采用自适应前瞻算法对各衔接点进给速度进行处理后, 除第一段轨迹的起点速度和最后一段轨迹的终点速度等于 0 外, 其余衔接点进给速度均大于 0; 该算法虽加工效率较高, 合速度过渡平滑, 但运动轴速度存在突变问题, 如在衔接点 G(图 8a)处, y 轴速度由 0.566 mm/s 突变到 -1.034 mm/s, 加工过程中易产生冲击和振动, 影响加工精度。由于未考虑法向加速度约束条件, 加工圆弧轨迹时, 插补输出的 x 轴加速度最大值为 1348.65 mm/s², y 轴加速度最大值为 1728.48 mm/s², 均超过系统给定的最大加速度 800 mm/s², 严重影响实际加工效果, 并且会对机床产生较大损伤。

(a) $v_f=200$ mm/s 自适应前瞻插补输出的速度(b) $v_f=200$ mm/s 自适应前瞻插补输出的加速度图 8 $v_f=200$ mm/s 自适应前瞻插补输出的速度、加速度

在 $v_f=200$ mm/s 情况下, MCOCT 前瞻算法插补输出的速度和加速度如图 9 所示。MCOCT 前瞻算法能保证各轨迹段间合速度过渡平滑, 且运动轴速度不存在突变问题。在圆弧轨迹速度衔接处理过程中, 结合弓高误差和法向加速度约束条件对圆弧轨迹的衔接点速度和最大进给速度进行限制。在加工圆弧轨迹时, 插补输出的 x 轴和 y 轴加速度最大值分别为 783.25 mm/s²、 797.94 mm/s², 均未超过

系统给定的最大加速度值 800 mm/s²。

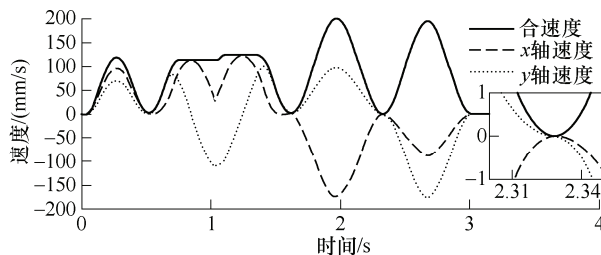
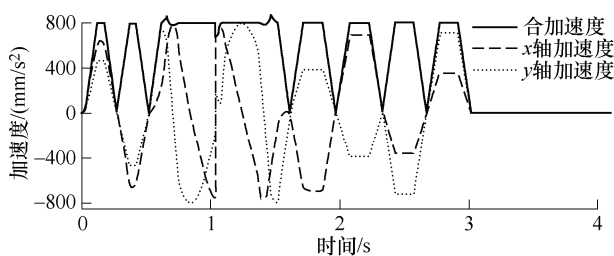
(a) $v_f=200$ mm/s 时 MCOCT 前瞻插补输出的速度(b) $v_f=200$ mm/s 时 MCOCT 前瞻插补输出的加速度图 9 $v_f=200$ mm/s MCOCT 前瞻插补输出的速度、加速度

表 2 表征了三种算法的插补效率、轨迹精度和运动轴参考信息。

表 2 不同命令进给速度下三种算法插补输出结果统计

v_f (mm/s)	算法名称	插补周期 个数	最大轨 迹误差 / μ m	运动轴速度 是否存在 突变问题	运动轴 加速度 是否超限
20	传统前瞻	7 007	0.012 5	不存在	未超限
	自适应前瞻	6 940	0.012 5	存在	未超限
	MCOCT 前瞻	6 945	0.012 5	不存在	未超限
50	传统前瞻	3 114	0.078 2	不存在	未超限
	自适应前瞻	3 017	0.078 2	存在	未超限
	MCOCT 前瞻	3 022	0.078 2	不存在	未超限
100	传统前瞻	1 927	0.312 6	不存在	未超限
	自适应前瞻	1 804	0.312 6	存在	未超限
	MCOCT 前瞻	1 808	0.312 6	不存在	未超限
200	传统前瞻	1 575	0.804 8	不存在	超限
	自适应前瞻	1 423	0.864 3	存在	超限
	MCOCT 前瞻	1 508	0.400 0	不存在	未超限

(1) 在不同命令进给速度 v_f 下, MCOCT 前瞻算法插补效率高于传统前瞻算法插补效率, v_f 为 20 mm/s、50 mm/s、100 mm/s、200 mm/s 时插补效率分别提高 0.89%、3.04%、6.58%、4.44%。

(2) 随着 v_f 增大, 传统前瞻算法和自适应前瞻算法插补输出的轨迹误差不断增大, 最后超过系统给定的最大弓高误差, 不满足系统对轨迹精度的要求; 而 MCOCT 前瞻算法能将轨迹误差限制在系统给定的最大值范围内, 满足系统对轨迹精度的要求。

(3) MCOCT 前瞻算法和传统前瞻算法插补输出的运动轴速度不存在突变问题; 而自适应前瞻算法插补输出的运动轴速度存在突变问题, 会引起机

床产生冲击和振动,影响加工精度。

(4) 随着 v_f 增大,传统前瞻算法和自适应前瞻算法插补输出的运动轴加速度超过系统给定的最大加速度;而MCOCT前瞻算法能确保插补输出的运动轴加速度小于等于系统给定的最大加速度值。

综合以上分析可知,MCOCT前瞻算法能保证插补输出的轨迹误差和运动轴加速度不超过系统给定的最大值范围、合速度平滑过渡、运动轴速度不存在突变问题,其综合性能优于传统前瞻算法和自适应前瞻算法。

3.2 实际加工性能试验

为验证MCOCT前瞻算法在实际运动平台上的加工效果,设计图10所示由190段微小直线和圆弧轨迹段组成的复杂图案。设定系统参数:命令进给速度为100 mm/s,允许的最大弓高误差为0.5 μm ,允许的最大法向加速度为800 mm/s^2 ,允许的最大进给加速度为800 mm/s^2 ,允许的最大加速度值为800 mm/s^2 ,允许的最大加加速度为8 000 mm/s^2 ,插补周期为2 ms。

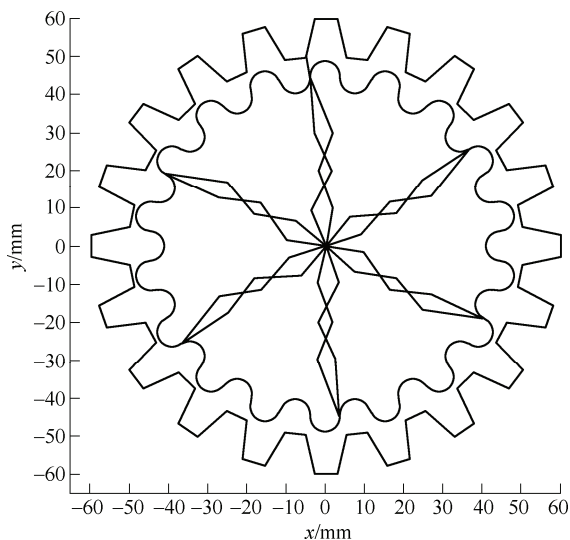
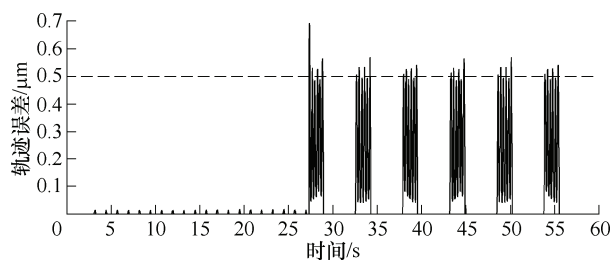


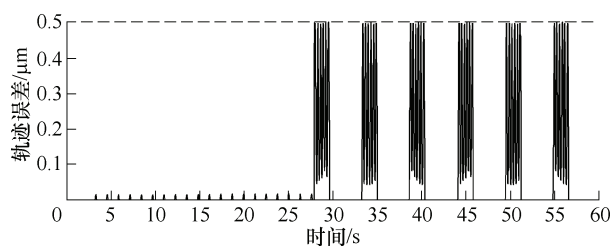
图10 综合加工试验参考轨迹

实际加工过程中文献[8]自适应前瞻算法和MCOCT前瞻算法插补输出的轨迹误差对比图见图11。采用MCOCT前瞻算法时,全程范围内插补输出的轨迹误差最大值为0.5 μm ,小于系统给定的最大弓高误差值;而采用自适应前瞻算法时,全程范围内插补输出的轨迹误差最大值为0.692 μm ,超过给定的最大弓高误差值38.4%。从加工效率角度分析,MCOCT前瞻算法加工时长为58.42 s,自适应前瞻算法时长为57.3 s,MCOCT前瞻算法加工效率低于自适应前瞻算法1.9%。这是因为自适应前瞻算法未考虑衔接点运动轴速度突变及法向加速度超限问题,其在衔接点的加速度过大,用时少,但轨迹

误差超限,不能满足对高精加工的精度要求。



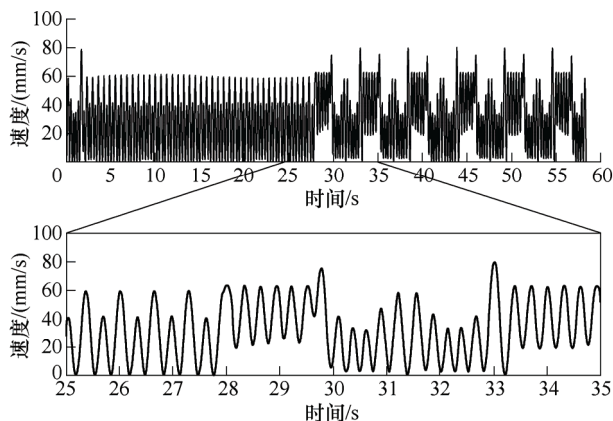
(a) 自适应前瞻插补输出的轨迹误差



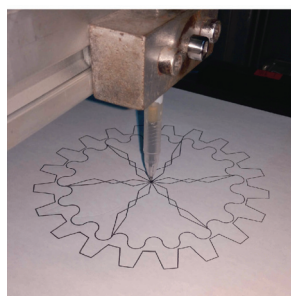
(b) MCOCT前瞻插补输出的轨迹误差

图11 实际加工过程中自适应前瞻和MCOCT前瞻插补输出的轨迹误差图

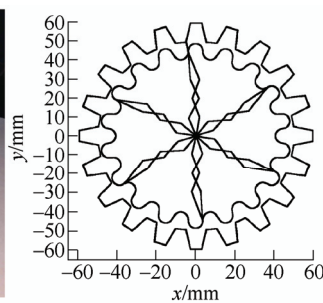
实际加工过程中MCOCT前瞻算法插补输出的合成进给速度、在正交轴工作台上实际加工的情况及两轴反馈位移合成曲线如图12所示。由图12a可知,实际插补输出的最大合成进给速度为80.172 mm/s,小于给定命令进给速度100 mm/s,轨迹段间衔接速度平滑过渡;图12c为通过实际加工中编码



(a) 实际加工过程中MCOCT前瞻插补输出的合成进给速度曲线



(b) 实际加工情况



(c) 两轴反馈位移合成曲线

图12 实际加工过程中MCOCT前瞻插补输出的合成进给速度、实际加工情况及两轴反馈位移合成曲线

器反馈数据计算绘制出的两轴反馈位移合成曲线。从图 12 中可以看出,所提出的算法能保证实际加工轨迹接近参考轨迹,保证加工精度。

综合上述分析可知, MCOCT 前瞻算法能控制轨迹误差并保证轨迹加工精度,在处理复杂轨迹段也能保持较高的插补精度,实现连续轨迹衔接点的速度平滑过渡,不存在突变问题,因而该算法具有良好的综合控制性能。

4 结 论

(1) 提出的 MCOCT 前瞻算法解决了现有算法未限制圆弧插补中最大进给速度,轨迹误差超过系统给定的最大弓高误差值的问题。在弓高误差约束基础上通过引入法向加速度约束,保证插补输出的切向和法向加速度均不会超过系统的限制值。

(2) 提出的 MCOCT 前瞻算法因综合考虑弓高误差、法向加速度、运动矢量关系、系统动力学性能及轨迹段长等约束条件,能够求解轨迹段最大运行速度和轨迹段间衔接点速度最优值,优化各轨迹段间衔接速度连续性,进而实现数控加工中连续轨迹段平滑过渡。

(3) 提出的 MCOCT 前瞻算法与现有算法相比,多约束条件环境下更全面的处理连续轨迹段间衔接点平滑问题,在保证加工效率的同时,输出的轨迹更加接近参考轨迹,合速度平滑过渡、运动轴速度不存在突变,因而轨迹误差小,适用于高精加工。

参 考 文 献

- [1] HU J, XIAO L, WANG Y, et al. An optimal feedrate model and solution algorithm for a high-speed machine of small line blocks with look-ahead[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(9-10): 930-935.
- [2] CAO Y, WANG T, CHEN Y, et al. A high-speed control algorithm using look-ahead strategy in CNC systems[C]// 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2008, 372-377.
- [3] 冷洪滨, 郭义杰, 潘晓弘. 三次多项式型微段高速自适应前瞻插补方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 73-79. LENG Hongbin, WU Yij, PAN Xiaohon. Adaptive prospective interpolation method for high speed machining of micro line blocks based on the cubic polynomial model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 73-79.
- [4] 杨开明, 石川, 叶佩青, 等. 数控系统轨迹段光滑转接控制算法[J]. 清华大学学报, 2007, 47(8): 1295-1299. YANG Kaiming, SHI Chuan, YE Peiqing. Smooth transfer control algorithm for continuous segment trajectory in computer numerical control systems[J]. Journal of Tsinghua University, 2007, 47(8): 1295-1299.
- [5] 张晓辉, 于东, 杨东升, 等. 面向微线段高速加工的拐角曲线过渡插补算法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 183-191. ZHANG Xiaohui, YU Dong, YANG Dongsheng. Corner curve transition interpolation algorithm for high speed machining of micro-line segment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 183-191.
- [6] WANG L, CAO J F, LI Y Q. Speed optimization control method of smooth motion for high-speed CNC machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1-4): 313-325.
- [7] LEE C. Generation of velocity profiles with speed limit of each axis for high-speed machining using look-ahead buffer[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(2): 201-208.
- [8] 潘海鸿, 杨增启, 陈琳, 等. 一种优化轨迹段间衔接速度的自适应前瞻控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 151-159. PAN Haihong, YANG Zengqi, CHEN Lin, et al. An adaptive look-ahead control algorithm using optimized transition velocity between two trajectory segments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 151-159.
- [9] 刘强, 刘焕, 周胜凯, 等. 连续多类型曲线段进给速度前瞻规划[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2369-2377. LIU Qiang, LIU Huan, ZHOU Shengkai, et al. Look-ahead feedrate planning for continuous multi-type curve segments[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(9): 2369-2377.
- [10] QIAO Z, WANG H, LIU Z, et al. Nanoscale trajectory planning with flexible Acc/Dec and look-ahead method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 1377-1387.
- [11] 陈日东, 李迪, 王世勇, 等. 连续轨迹动态前瞻插补算法研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(7): 152-155, 160. CHEN Ridong, LI Di, WANG Shiyong, et al. Study of a dynamic look-ahead algorithm for continuous trajectory interpolation[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(7): 152-155, 160.
- [12] 张勇, 叶佩青, 肖建新, 等. 基于 Bézier 曲线的小直线

段局部转接光顺研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 111-120.

ZHANG Yong, YE Peiqing, XIAO Jianxin, et al. Local Bézier transition method along continuous short-line toolpath[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 111-120.

作者简介: 陈琳, 女, 1973 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控系统、嵌入式系统、电动机控制、机器人控制技术和信号处理。

E-mail: gxdxcl@163.com

潘海鸿(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高速高精度运动控制、数控技术、嵌入式控制系统和伺服驱动技术。

E-mail: hustphh@163.com