

面向高质量加工的 NURBS 曲线插补算法

王允森^{1,2)}, 盖荣丽^{1,3,4)}, 孙一兰^{1,3)}, 杨东升¹⁾, 韩娟^{1,2)}

¹⁾(中国科学院沈阳计算技术研究所总线实验室 沈阳 110168)

²⁾(中国科学院大学 北京 100049)

³⁾(中国科学院沈阳自动化研究所装备制造技术研究室 沈阳 110016)

⁴⁾(大连大学信息工程学院 大连 116021)

(wangyuns@mail.ustc.edu.cn)

摘要:通过分析数控系统加工时常用的插补算法的特点,提出一种基于 NURBS 曲线的插补算法.该算法包括速度规划和实时插补两部分:速度规划部分考虑了工件加工时允许的最大轮廓误差,以保证高速运行过程中加速度的连续,使机床运行平稳,避免产生大的冲击;实时插补部分应用弦截法计算插补参数,能将实时插补产生的速度波动控制到理想水平,进一步减小了机床震颤.仿真实验结果表明,文中算法能够减小机床振动,实现高质量加工.

关键词: 数控;NURBS 插补;速度规划;弦截法;高质量加工

中图分类号: TP273; TP391

NURBS Interpolation Algorithm for High-Quality Machining

Wang Yunsen^{1,2)}, Gai Rongli^{1,3,4)}, Sun Yilan^{1,3)}, Yang Dongsheng¹⁾, and Han Juan^{1,2)}

¹⁾(NC Buslab, Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168)

²⁾(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³⁾(Advanced Equipment Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

⁴⁾(School of Information Engineering, Dalian University, Dalian 116021)

Abstract: Through analyzing the characteristics of commonly used interpolation algorithms in the computer numerical control (CNC) system, a novel real-time NURBS interpolation algorithm is proposed. The algorithm includes velocity planning and real-time interpolation. The velocity planning module considers the maximum contour errors during the machining of workpieces to ensure the continuous acceleration of the process of high-speed operation, which enables the CNC machine tools to run smoothly and avoids intense vibration in high speed CNC machining. The real-time interpolation module uses the secant iteration method to calculate the interpolation parameters, which can dominate the feedrate fluctuation to ideal level and further reduce the tremor of the CNC machine tools. Simulation experimental results show that the NURBS interpolation algorithm proposed in the paper can reduce machine vibration and implement high-quality CNC processing.

Key words: computer numerical control; NURBS interpolation; velocity planning; secant iteration method; high-quality processing

收稿日期:2012-08-08;修回日期:2012-12-10.基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题(2011ZX04016-071).王允森(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式软件、数控技术;盖荣丽(1980—),女,博士后研究人员,副研究员,主要研究方向为嵌入式系统、数控技术、智能控制等;孙一兰(1980—),女,博士后研究人员,副研究员,主要研究方向为数控技术、智能算法等;杨东升(1965—),男,硕士,研究员,博士生导师,主要研究方向为自动控制、数控技术等;韩娟(1987—),女,硕士研究生,主要研究方向为数控技术等.

传统数控系统只能实现圆弧和直线等有限个插补方法,在加工复杂型面零件时需要经过 CAD 建模后再借助于 CAM 离线编程系统进行曲线离散化,生成大量的小线段(微小圆弧段或微小直线段)来进行加工.这种加工方法的问题首先是工件程序量大,增加了 CAD/CAM 与 CNC 系统之间的通信负担,同时增大了 CNC 的预处理工作量;另外,用小线段拟合刀具轨迹破坏了工件表面的光滑性,频繁加减速容易引起机床震动并加快刀具磨损,进而影响加工零件的尺寸精度和表面精度.

针对小线段逼近参数曲线存在的不足,一些高档数控系统,如 SIEMENS, FANUC 等实现了样条曲线插补功能.样条插补技术改变了传统的小线段逼近参数曲线的方法,可直接对参数曲线进行插补,简化了加工程序代码,缩短了程序的传输时间,同时减少了精度损失. NURBS 曲线是国际标准化组织规定的 CAD/CAM 的数据交换标准.由于 NURBS 曲线不仅能精确统一表示二次解析曲面和自由曲线,而且它的形状控制功能也特别强大灵活,因此将 NURBS 插补技术应用在数控加工领域会大大提升高速、高精加工技术的整体水平.

国内外学者已经提出了许多样条曲线的插补方法. Bedi 等^[1]提出的均匀参数插补算法首次给出了样条曲线直接实时插补的解决方案,但由于样条曲线弧长与参数之间存在非线性关系,采用这种方法瞬时插补速度和插补误差均无法控制; Shpitalni 等^[2]首先提出了基于一阶泰勒展开法的样条曲线插补算法,而 Yang 等^[3]采用了二阶泰勒展开式来获得插补参数,提高了计算精度;文献^[4-5]提出了用一阶常微分方程法来获得插补参数的算法,使得参数的截断误差更小,减小了进给速度波动;孙海洋等^[6-7]提出了基于牛顿迭代法的插补算法,进一步提高了收敛速度和计算精度.但是,上述算法没有考虑加减速过程中的速度变化要求,难以保证插补精度,存在误差难以控制的问题. Yeh 等^[8]和 Cheng 等^[9]提出了限定误差的自动调节进给速度插补算法,即刀具的进给速度在弦高误差超出预定的范围时会进行自动行调节; Nam 等^[10]和游有朋等^[11]提出的加速度控制算法将加速度约束考虑在内,减小了数控机床在加工过程中的震动,但是该算法实现复杂.

本文在前人的基础上提出了基于弦截法的样条曲线插补算法,该算法包括速度规划和实时插补两部分.速度规划部分采用三次多项式加减速控制方法,控制简单,可实现速度和加速度的平滑变化,缓

解高速加工产生的过冲;而参数计算部分则采用弦截法来计算下一个插补参数,以减小速度波动,进一步提高加工质量.仿真实验结果表明,该算法能够得到连续的速度和加速度曲线,缓解高速加工过程中产生的振动和过冲,减小机床震颤,并且能够将进给速度波动控制到理想范围.

1 NURBS 插补概述

1.1 NURBS 曲线的定义

NURBS 曲线是基于分段有理 B 样条多项式基函数定义的,一条 k 次 NURBS 曲线定义为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i P_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}$$

其中, u 为 NURBS 曲线的自变量; P_i ($i=0, 1, \dots, n$) 为控制顶点,共有 $n+1$ 个; ω_i ($i=0, 1, \dots, n$) 为控制顶点的权因子,其首末权因子 $\omega_0, \omega_n > 0$,其余 $\omega_i \geq 0$; $N_{i,k}(u)$ 是 k 次 NURBS 曲线基函数,由节点矢量 $U = (u_i, u_{i+1}, \dots, u_{i+k})$ 确定,并满足 Cox-de Boor 递推关系式

$$\begin{cases} N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases}$$

这里规定 $\frac{0}{0} = 0$.

1.2 NURBS 曲线插补

样条曲线插补按照 ISO14649^[12]的论述,将符合 STEP 标准的三维几何模型加工信息直接作为数控系统的输入,也就是直接对参数曲线进行插补.

NURBS 曲线插补时通常用弦线来逼近弧线,其原理如图 1 所示.图 1 中, $C(u)$ 为参数曲线, u 为插补参数, L_i 为插补步长,设当前插补点 $P_i = C(u_i)$,下一个插补点 $P_{i+1} = C(u_{i+1})$,刀具在 P_i 点处的理想瞬时速度为 $V_{ds}(u_i)$,插补周期为 T ,在理想情况下有

$$\begin{cases} L_i = V_{ds}(u_i) \cdot T = \\ \| C(u_{i+1}) - C(u_i) \| = \| P_i P_{i+1} \| \\ \| P_i P_{i+1} \| \approx \int_{u_i}^{u_{i+1}} \| C'(u) \| du \end{cases}$$

根据上述信息可以求出下一个插补点参数

u_{i+1} , 然后代入 NURBS 方程, 可以求出各个轴的移动量。

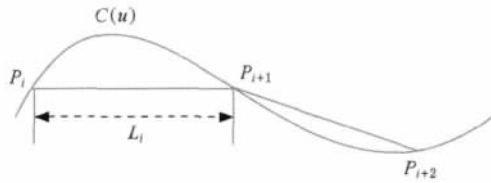


图 1 样条曲线插补图

由于 NURBS 曲线的弧长和参数之间存在非线性关系, 所以插补时往往不能获得 u_{i+1} 的精确值, 只能获得近似值, 这就造成了理想进给速度与实际进给速度之间存在差异, 也就是进给速度波动。此外, 速度和加加速度的突变会导致机床振动, 也会造成进给速度的波动。进给速度的波动不仅会导致加工工件精度下降, 甚至还有可能引起机床震颤, 影响加工质量。速度波动的大小可用速度波动率 δ_i

衡量^[6-7]

$$\delta_i = \frac{\Delta V_i}{V_{ds}(u_i)} \times 100\% = \left[1 - \frac{C(u_{i+1}) - C(u_i)}{V_{ds}(u_i) T} \right] \times 100\%.$$

2 基于弦截法的 NURBS 曲线插补算法

本文提出的基于弦截法的 NURBS 曲线插补算法包含速度规划和实时插补两部分, 下面以减速过程为例进行介绍。

2.1 速度规划

2.1.1 三次多项式速度规划方程

三次多项式速度规划方程的速度曲线为三次, 故加速度曲线为二次抛物线, 加加速度曲线为线性直线。减速过程的速度曲线、加速度曲线、加加速度曲线如图 2 所示。

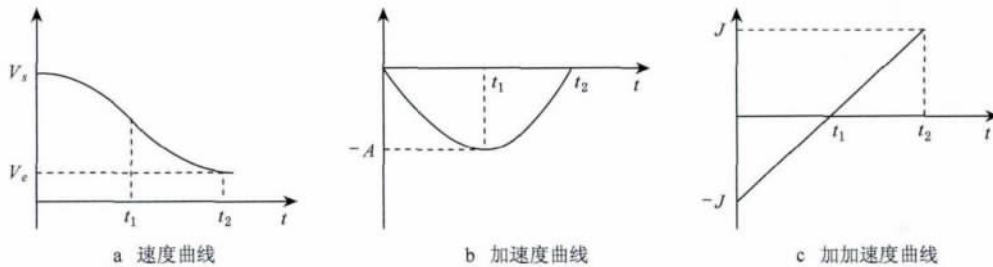


图 2 减速过程三次多项式速度规划模型

设减速段的速度曲线方程为

$$V(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3.$$

对速度方程分别求一阶导数和二阶导数, 可以得到加速度和加加速度方程

$$A(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2,$$

$$J(t) = 2a_2 + 6a_3 t.$$

假设减速阶段开始的时间为 0, 所用的时间为 t_2 , 起始速度为 V_s , 终止速度为 V_e , 最大的加速度为 A , 最大的加加速度为 J 。

从图 2 中可以看出, 当 $t=0$ 时, 速度为 V_s , 加速度为 0, 加加速度为 J , 即 $V(0)=V_s, A(0)=0, J(0)=J$ 。由以上信息可得 $a_0=V_s, a_1=0, a_2=-0.5J$ 。

当 $t=t_1$ 时, 加速度达到逆向最大值 $-A$, 加加速度变成 0, 即 $A(t_1)=-A, J(t_1)=0$; 而当 $t=t_2$ 时, 加速度变为 0, 加加速度达到最大值 J , 即 $A(t_2)=0, J(t_2)=J$ 。由以上信息可得 $t_1 = \frac{2A}{J}, t_2 = \frac{4A}{J}, a_3 =$

$\frac{J^2}{12A}$, 所以减速段的速度方程为

$$V(t) = V_s - \frac{J}{2} t^2 + \frac{J^2}{12A} t^3 \quad (1)$$

考虑减速到 $t=t_2$ 时刻时, 速度达到最小值 V_e , 即

$$V(t_2) = V_e \quad (2)$$

从式(1)(2)中可以推出

$$V_s - V_e = \frac{8A^2}{3J} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 当速度的变化量等于 $\frac{8A^2}{3J}$ 时, 能够达到最大加速度和最大加加速度。若

$$V_s - V_e < \frac{8A^2}{3J},$$

则加速度无法达到最大值 A , 设此时达到的最大加速度为 A_1 , 由式(3)可得

$$A_1 = \sqrt{\frac{3J(V_s - V_e)}{8}}.$$

如果

$$V_s - V_e > \frac{8A^2}{3J},$$

则最大加加速度无法达到 J , 设此时最大加加速度为 J_1 , 由式(3)可得

$$J_1 = \frac{8A^2}{3(V_s - V_e)}.$$

因此在计算减速段的速度方程时,首先根据速度变化量与 $\frac{8A^2}{3J}$ 的关系,计算减速阶段能达到的最大的加速度和最大加加速度,然后代入式(1),可以获得减速段的速度方程.同理,加速段的速度方程可以用相同的方法计算.

2.1.2 预处理

预处理阶段实际上是一次快速插补阶段,需要记录插补路径的长度,并根据加工精度的要求记录减速开始点和速度极小值点,然后计算该极小值点需要的减速距离.

在 NURBS 曲线实时插补中,通常用圆弧近似的方法来求出弦高误差、进给速度以及曲率之间的关系,计算参数 u_i 处的弦高误差 E_i ,如图 3 所示,其中 ρ_i 为曲率半径,设 $V(u_i)$ 为实际进给速度.

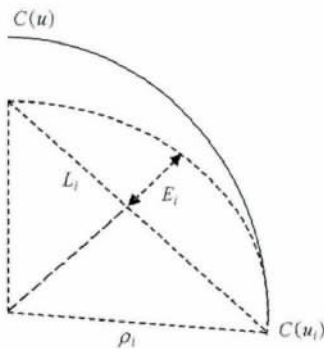


图 3 利用圆弧计算弦高误差

通过几何关系可以求出

$$E_i = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{L_i}{2}\right)^2} = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{V(u_i)T}{2}\right)^2} \tag{4}$$

根据式(4),假设加工所要求的最大弦高误差为 E_{max} ,则该误差约束下的速度为

$$V_e(u_i) = \frac{T}{2} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - E_{max})^2}.$$

若设定加工时的编程速度为 F ,则实际的插补速度为

$$V(u_i) = \min(F, V_e(u_i)).$$

假设在参数 $u = u_i$ 处,按加工精度要求加工的速度开始递减,此时的速度为 V_i ,而在 $u = u_j$ 处速度达到速度极小值 V_j ,对应的加工路径长度为 l_j .

为了确定该减速段的速度方程,首先比较 $V_i - V_j$ 和 $\frac{8A^2}{3J}$ 的大小,确定最大加速度和最大加加速度,代入式(1),可以得到该减速段的速度方程;然后对该速度方程求积分,得到位移方程

$$S_1(t) = S_0 + a_0 t + \frac{1}{2} a_1 t^2 + \frac{1}{3} a_2 t^3 + \frac{1}{4} a_3 t^4.$$

所以减速段的位移量为

$$L_1 = S_1(t_2) - S_1(0).$$

获得减速距离 L_1 后,向前依次寻找插补参数,直到找到参数 u_k ,其对应插补路径 l_k 满足

$$l_j - l_k \geq L_1.$$

比较 u_i 和 u_k 的大小,若 $u_i < u_k$,则记录 u_i 为实际减速段的起点参数;否则,记录 u_k 为减速起点参数,并记录相应的速度值.

预处理结束时,得到一个加减速段数组 $ADS[]$,数组中每个数据的结构如下:

```
struct ACC_DECSTAGE //记录加减速段信息
{
    double U_s; //记录加减速段的起始参数
    double U_e; //记录加减速段的结束参数
    double V_s; //记录起始速度
    double V_e; //记录加减速结束时的速度
    int Flag; //加减速标记,0 为加速,1 为减速
    double a_0, a_1, a_2, a_3; //加减速阶段速度方程的系数
};
```

2.2 实时插补算法

样条插补中实时插补的核心是插补参数的计算.泰勒展开法是最常用的参数计算方法,但其比较耗时且造成的速度波动比较大,影响加工质量.本文采用弦截迭代法来计算插补参数.

2.2.1 弦截法公式推导

2.2.1.1 迭代式的确定

设当前的插补参数为 u_i ,下一个插补参数为 ξ .采用逼近弦长的策略,根据速度波动率的定义创建构造函数

$$F(\xi) = \| C(\xi) - C(u_i) \| - V(u_i) T,$$

则问题转化为求 $\xi = \xi^*$,使得

$$F(\xi^*) = 0.$$

采用弦截法来计算 ξ 的值,其原理如图 4 所示.

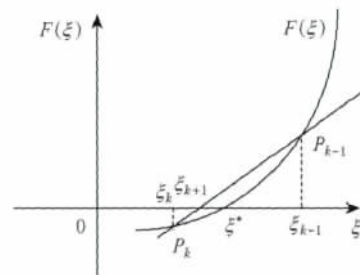


图 4 弦截法迭代示意图

设 ξ_k, ξ_{k-1} 是 $F(\xi) = 0$ 的近似根,利用 $F(\xi_k)$ 和

$F(\xi_{k-1})$ 构造一次插值多项式 $p(\xi)$, 并利用 $p(\xi) = 0$ 的根作为 $F(\xi) = 0$ 的新的近似根 ξ_{k+1} . 由于

$$p(\xi) = F(\xi_k) + \frac{F(\xi_k) - F(\xi_{k-1})}{\xi_k - \xi_{k-1}}(\xi - \xi_k),$$

可以得到迭代公式

$$\xi_{k+1} = \xi_k - \frac{F(\xi_k)(\xi_k - \xi_{k-1})}{F(\xi_k) - F(\xi_{k-1})} \quad (5)$$

由于选择的 NURBS 曲线为三次, $C(u)$ 具有连续的二阶导数, 所以 $F(\xi)$ 同样具有连续的二阶导数, 而 $F'(\xi) \neq 0^{[6]}$, 故只要迭代初值选取恰当, 迭代式(5)满足超线性收敛^[13].

2.2.1.2 迭代初值的获取

通过式(5)可以看出, 应用弦截法来迭代计算插补参数时需要 2 个迭代初值. 本文采用线性递推法来获得 2 个参数初值

$$u_{i+1}^{(1)} = 3u_i - 3u_{i-1} + u_{i-2} \quad (6)$$

$$u_{i+1}^{(2)} = \frac{1}{48}(95u_i - 73u_{i-1} + 41u_{i-2} - 19u_{i-3}) \quad (7)$$

式(6)为线性泰勒递推方程, 其推导过程如下:

二阶泰勒展开式的方程为

$$u_{i+1} = u_i + Tu'_i + \frac{T^2}{2}u''_i \quad (8)$$

用差分方程代替求导运算

$$u'_i = \frac{3u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{2T} \quad (9)$$

$$u''_i = \frac{u_i - 2u_{i-1} + u_{i-2}}{T^2} \quad (10)$$

将式(9)(10)代入二阶泰勒展开式(8)中, 化简后可得到二阶线性泰勒递推方程式(6).

式(7)为线性阿当姆斯递推方程, 其推导过程如下:

三阶阿当姆斯预测方程为

$$u_{i+1} = u_i + \frac{T}{24}(55u'_i - 59u'_{i-1} + 37u'_{i-2} - 9u'_{i-3}) \quad (11)$$

用差分方程代替求导运算

$$u'_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{T} \quad (12)$$

$$u'_{i-1} = \frac{u_i - u_{i-2}}{2T} \quad (13)$$

$$u'_{i-2} = \frac{u_{i-1} - u_{i-3}}{2T} \quad (14)$$

$$u'_{i-3} = \frac{u_{i-2} - u_{i-3}}{T} \quad (15)$$

将式(12)~(15)代入阿当姆斯预测方程, 化简后可以得到线性阿当姆斯递推方程式(7).

利用线性递推式(6)(7)可以获得插补参数的 2 个迭代初值. 在应用式(6)(7)估计下一个插补参数 u_{i+1} 时, 仅需要用到前面 4 步的插补参数线性加减运算, 而初始的 4 个插补参数可以用二阶泰勒展开法来获得.

2.2.1.3 迭代终止条件

通常, 弦截迭代算法的迭代终止条件为

$$|\xi_{k+1} - \xi_k| \leq \epsilon \quad (16)$$

其中 ϵ 为迭代结果的误差精度. 但是满足式(16)时速度精度不一定能满足, 因此结合速度波动率 δ 的值, 并设置其上限 Δ 作为迭代终止条件. 另外, 考虑算法的实时性, 设定了算法的最大迭代次数 K .

2.2.2 实时插补策略

预处理阶段已经获得了加速段或减速段的始末插补参数、速度方程等信息, 实时插补时则要根据这些信息计算实时插补的进给速度; 然后用弦截法计算插补参数, 代入样条曲线方程后可以求出各个轴的移动量. 在确定进给速度时, 主要思想如下:

比较当前的插补参数 u_i 和当前的加减速段的起始参数 $ADS[x].U_s$ 和结束参数 $ADS[x].U_e$ 的大小: 若 $u_i < DL[x].U_s$, 则保持刀具做匀速运动; 若 $ADS[x].U_s < u_i < ADS[x].U_e$, 则根据预插补阶段求出的速度方程进行实时插补; 若 $u_{i-1} < ADS[x].U_e, u_i > ADS[x].U_e$, 则将 $x+1$, 并保持刀具做匀速运动.

在减速时, 有可能出现 $u_i < ADS[x].U_e$, 而 $V(u_i) \leq ADS[x].V_e$, 即速度提前减为最小值的情况, 为了避免频繁有加减速控制, 应使其保持当前速度做匀速运动.

3 实验仿真

为了验证本文算法的有效性, 我们选择二维 NURBS 曲线进行仿真, 如图 5 所示. 曲线参数如下: 控制点为 (150, 150), (0, 0), (0, 300), (150, 150), (300, 0), (300, 300), (150, 150), 单位 mm; 参数值为 0, 0, 0, 0, 0.25, 0.500, 0.750, 1, 1, 1, 1; 权值为 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1. 仿真时, 编程速度 $F = 200 \text{ mm/s}$, 插补周期 $T = 0.003 \text{ s}$, 最大加速度 $A = 0.005 \text{ m/s}^2$, 最大加加速度 $J = 0.0004 \text{ m/s}^3$, 允许的最大弦高误差 $E_{\max} = 0.0005 \text{ mm}$, 最大允许速度波动率 $\Delta = 10^{-6}$, 最大迭代次数 $K = 5$, 允许的最大迭代计算误差 $\epsilon = 10^{-6}$.

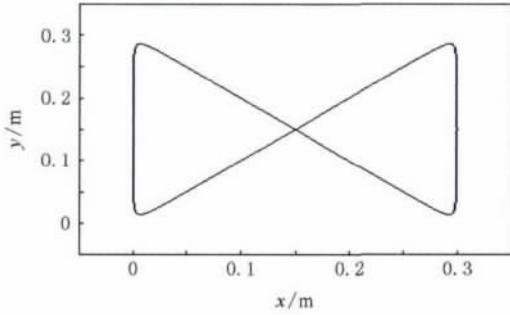


图 5 NURBS 曲线

实验得到的速度曲线、加速度曲线、加加速度曲线分别如图 6~8 所示,可以看出,插补过程中,进给速度限制在编程速度 F 内,加速度和加加速度也都限制在最大加速度 A 和最大加加速度 J 的范围内.实验得到的误差曲线如图 9 所示,可以看出,本文算法满足了加工的精度要求,即所有插补点的弦高误差都控制在 E_{max} 以内.

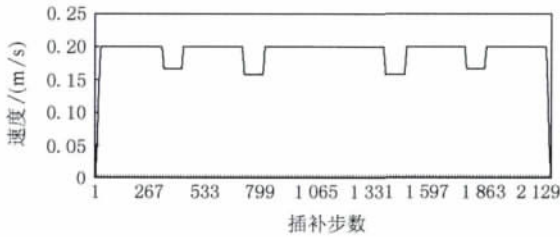


图 6 速度曲线

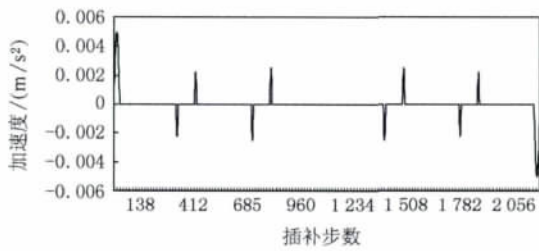


图 7 加速度曲线

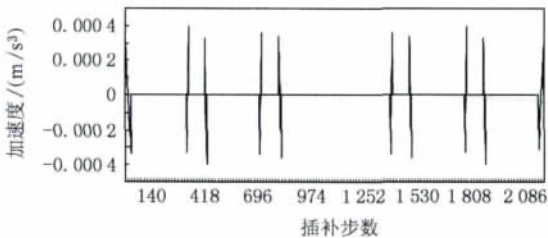


图 8 加加速度曲线

为了说明本文算法的速度规划方法的特点,我们选取局部速度曲线及相应的加速度曲线和加加速度曲线进行分析,如图 10~12 所示,该速度曲线包含减速段、匀速段和加速段.从图 11,12 中可以看出,减速段和加速段的加速度曲线能实现连续变化,

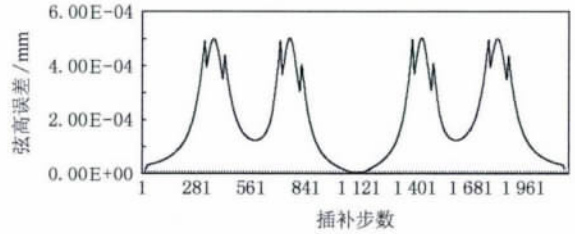


图 9 弦高误差曲线

加加速度则实现了线性变化,并且在加速和减速时没有达到最大加速度 A .

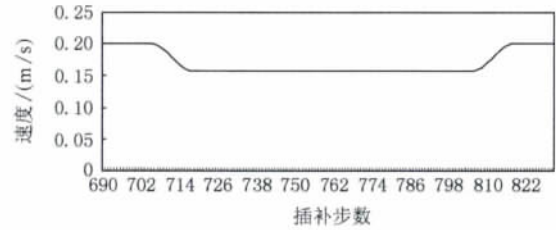


图 10 局部速度曲线

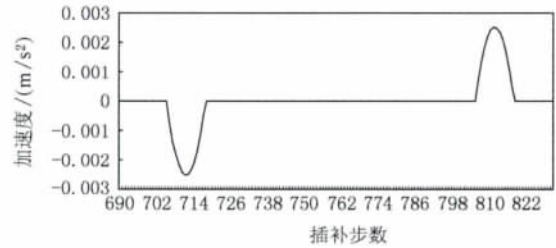


图 11 局部加速度曲线

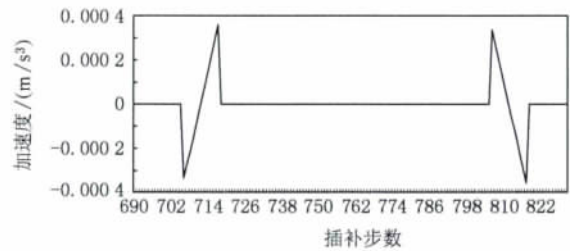


图 12 局部加加速度曲线

为了验证实时插补算法的有效性,我们在仿真实验中进一步以一阶泰勒展开法、二阶泰勒展开法作为对比,测试本文算法在速度波动方面的表现,对比结果如图 13~15 及表 1 所示.

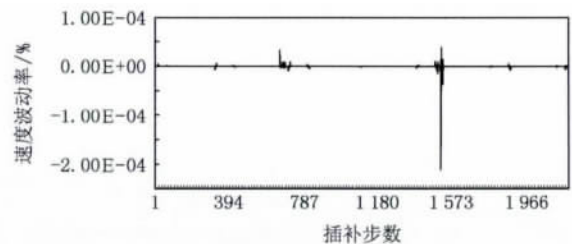


图 13 弦截法的速度波动曲线

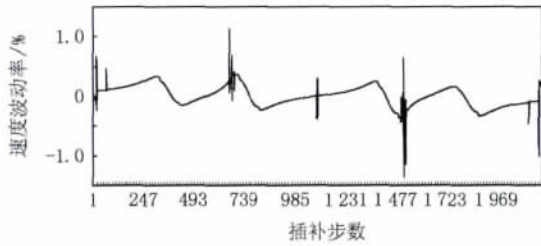


图 14 一阶泰勒展开法速度波动曲线

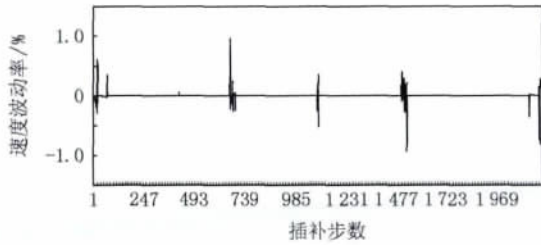


图 15 二阶泰勒展开法速度波动曲线

表 1 3 种算法速度波动率比较 %

	最大值	逆向最大值	绝对值平均值
本文方法	3.83E-05	-2.11E-04	8.79E-07
一阶泰勒展开法	1.12	-1.35	0.11
二阶泰勒展开法	0.95	-0.93	2.08E-04

从图 13~15,表 1 可以看出,一阶泰勒展开法速度波动率较高,最大的速度波动率达到了 1%;而二阶泰勒展开法较一阶泰勒展开法有了一定的改进,大部分点的速度波动率比较小,只有少部分的插补点超过 0.5%,且速度波动率的平均值较一阶泰勒展开法降低了 3 个数量级;本文算法几乎所有插补点的速度波动率已经控制在 10^{-6} 范围内(仅有一个点的速度波动率超过了 10^{-6} ,但仍控制在 10^{-6} 数量级),且平均的速度波动率达到了 10^{-9} 量级,较一阶泰勒展开法降低了 10^6 倍,较二阶泰勒展开法降低了 10^3 倍。

实验结果验证了本文算法的正确性和有效性,其中的速度规划方法可以保证加工时的速度和加加速度实现连续变化,减小了机床振动,而且应用弦截法计算插补参数,采用对弦长逼近的策略更符合样条插补本质.因此,本文算法获得了更好的速度控制效果。

4 总 结

本文通过分析样条曲线插补的原理,指出了进给速度波动产生的原因,提出一种基于的弦截法的

NURBS 曲线插补算法.该算法中的速度规划部分采用三次多项式加减速度控制方法,保证了高速运行过程中加速度的连续,使机床运行平稳,避免对机床产生大的冲击;而参数计算部分则采用了弦截迭代法来计算插补参数,减小了速度波动,进一步减小了机床震颤.仿真实验结果表明,本文算法能够得到连续的速度和加速度曲线,且能够将实时插补的速度波动控制在理想范围内,实现机床的平稳运行,满足高速度、高质量加工的要求。

参考文献 (References):

- [1] Bedi S, Ali I, Quan N. Advanced interpolation techniques for N. C. machines [J]. Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(3): 329-336
- [2] Shpitalni M, Koren Y, Lo C C. Real-time curve interpolators [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(11): 832-838
- [3] Yang D C H, Kong T. Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(3): 225-234
- [4] Cheng M Y, Tsai M C, Kuo J C. Real-time NURBS command generators for CNC servo controllers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(7): 801-813
- [5] Cheng C W, Tsai M C, Maciejowski J. Accurate feedrate control of CNC machine tools along NURBS curves [C] // Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2004, 3: 3053-3058
- [6] Sun Haiyang, Fan Dapeng, Li Ling. A novel method for real-time CNC curved path interpolation calculating [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(3): 122-127 (in Chinese)
(孙海洋, 范大鹏, 李玲. 一种参数曲线实时数控插补计算新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(3): 122-127)
- [7] Sun Haiyang, Fan Dapeng. Feedrate-control method for CNC real-time parametric curve path interpolation [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(17): 2032-2036 (in Chinese)
(孙海洋, 范大鹏. CNC 参数曲线实时插补进给速度控制方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(17): 2032-2036)
- [8] Yeh S S, Hsu P L. Adaptive-feedrate interpolation for parametric curves with a confined chord error [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(3): 229-237
- [9] Cheng C W, Tsai M C, Maciejowski J. Feedrate control for non-uniform rational B-spline motion command generation [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220(11): 1855-1861
- [10] Nam S H, Yang M Y. A study on a generalized parametric interpolator with real-time jerk-limited acceleration [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(1): 27-36

- [11] You Youpeng, Wang Min, Zhu Jianying. An interpolator for NURBS curve machining with high-speed and high accuracy [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, 13(10): 943-947 (in Chinese)
(游有鹏, 王 珉, 朱剑英. NURBS 曲线高速高精度加工的插补控制[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(10): 943-947)
- [12] ISO 14649/FDIS—2003 Data model for computerized numerical controllers [S]
- [13] Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2003: 155-160 (in Chinese)
(李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003: 155-160)



(上接第 1548 页)

- (周杰韩, 范文慧, 熊光楞, 等. 面向复杂产品协同设计的元模式设计[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2003, 43(7): 883-886)
- [16] He Keqing, He Yangfan, Wang Chong, *et al.* The method and theory of ontology element modeling and its application [M]. Beijing: Science Press, 2008: 96-116 (in Chinese)
(何克清, 何扬帆, 王 翀, 等. 本体元建模理论与方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 96-116)
- [17] Sudarsan R, Fenves S J, Sriram R D, *et al.* A product information modeling framework for product lifecycle management [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(13): 1399-1411
- [18] Kim Y S, Jeon Y H, Lee D H. Multi-objective and multidisciplinary design optimization of supersonic fighter wing [J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(3): 817-824