

曲线的三参数路径规划车削插补算法研究*

余震¹, 易磊¹, 唐秋华¹, 李明^{1,2}, 曹俊¹

(1. 武汉科技大学机械自动化学院, 湖北武汉 430081; 2. 武汉科技大学理学院, 湖北武汉 430081)

摘要: 为了保证数控加工中复杂曲线零件的车削加工精度, 在普通二参数车削加工的基础上, 提出了一种三参数路径规划车削插补算法。该算法将复杂曲面数控加工插补过程的路径规划分解为若干插补点之间的最优路径搜索和选取问题, 根据不同加工要求设置决策变量, 并进行取值判别, 通过 3 个参数联动对曲线进行插补运算, 优化加工过程中刀具的路径, 并应用于相关的实例分析。研究表明, 该优化算法能保证加工曲线的光滑性, 有利于提高曲线的加工质量, 并且该算法还具有计算规模小、求解迅速、数控加工插补误差小等优点。

关键词: 数控车削; 三参数曲线插补; 路径规划算法

中图分类号: TH166; TC51; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)09-1033-05

Curve turning interpolation algorithm with three parameters path planning

YU Zhen¹, YI Lei¹, TANG Qiu-hua¹, LI Ming^{1,2}, CAO Jun¹

(1. College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. College of Sciences, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Aiming at maintaining the machining accuracy of components with complex curve in CNC turning, a turning interpolation algorithm with three parameters path planning based on ordinary two parameters process was proposed. The interpolation process was decomposed into the optimal path searching and selecting problem between several interpolation points. Decision variable was set, value was discriminated according to the machining requirements, thus three parameters were integrated to achieve the interpolation of parts with complex curve, and adjustment of tool was accomplished. According to the related calculation examples, the results indicate that the smoothness of processing curve can be guaranteed through the proposed approach, and the machining quality is improved, also lower computational scale, smaller solution time and less processing error are achieved.

Key words: CNC turning; tri-parameters curve interpolation; path planning algorithm

0 引言

数控加工技术是衡量一个国家机械制造水平高低的重要指标^[1-2], 插补算法是数控加工的核心问题, 对数控系统的稳定性和算法精度有着直接影响。在数控加工工业实践中, 直线插补、圆弧插补和螺旋线插补是当前的数控技术最普遍的几种插补方法。对于非直

线、非圆弧曲线母线工件来说, 一般通过二次样条曲线拟合、三次样条曲线拟合等方法进行插补。这些方法虽然有效解决了复杂曲线、曲面的数控加工难度, 但仍存在一定的误差。对于复杂曲线、曲面的数控加工, 研究相关的插补算法、减小插补误差是关键和一个很好的切入点。

应用高速计算机和数据处理能力强的数控系统,

收稿日期: 2013-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275366, 51175395); 湖北省博士后科技活动项目择优资助项目(2011); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室开放基金资助项目(Y201109); 武汉科技大学青年科技骨干培育计划资助项目(2011xz030)

作者简介: 余震(1973-), 男, 安徽岳西人, 博士后, 主要从事精密机电一体化设备开发、超精密现代加工技术研究及现代制造技术路径规划方面的研究. E-mail: for_chenyu@sohu.com

通过交叉耦合^[3-4]、一阶泰勒展开、高阶泰勒展开^[5-6]等插补方法,在极短的插补周期内以微距、小步长进行运动,以实现加工轨迹的高速精密控制,是目前该领域研究的重点。

王海涛和赵东标等^[7]分别利用泰勒展开式对一阶和二阶参数曲线进行插补计算;Liyan Zhang 和 Jun-Bin Wang 等^[8]分别利用二阶泰勒展开式对参数曲线进行插补计算;对于非均匀有理 B 样条曲线,Zhang 等^[9]研究了利用一阶泰勒展开式插补计算方法。以上方法虽然在一定程度上改善了数控系统插补计算性能,但在速度点预测和进给速度波动问题上仍然存在不足。

Yeh 等^[10-11]提出将由连续微小线段指定的加工路径转化成由 NURBS 曲线表示的加工路径,通过对 NURBS 曲线插补来实现自由曲面的高速、高精加工,但该方法因为涉及 NURBS 曲线的拟合和插补,计算过程十分复杂,难以满足当前数控系统对实时性的要求。

本研究在普通 x, y 二参数插补原理的基础上,本研究引入一个新的参数变量,对车削加工中插补点的选取进行选择,通过优化插补路径,提出复杂曲线母线零件的三参数路径规划插补算法。

1 复杂曲线的车削误差参数分析

高阶连续复杂曲线的精密加工是当前机械制造领域的热点问题,它利用刀具与零件之间具有严格几何约束和物理约束的相对运动,对精密零件进行微量切削,从而获得较高的零件形状精度和表面光洁度。

精密加工领域的主要研究对象之一是复杂曲线零件,由于该类零件具有尺度大、加工精度高以及母线高阶光滑连续等特点,在运载、能源、航空航天、国防等行业被大量、广泛应用。

一般描述其母线的方程为:

$$F(x, y) = C \quad (1)$$

式中: C —常数,以下略。

数控加工中,机床各轴在每个插补周期内以单位脉冲当量运动。在进行曲线零件加工时,刀具只能以一系列离散的点来逼近待加工曲线,因此,插补计算本身存在一定的误差。

以回转零件轴线为 x 轴,一端面回转中心为左边原点,建立平面直角坐标系,在零件表面任意点 A 处,对应的横坐标为 x_a ,理想纵坐标与实际纵坐标分别为 y_a, y'_a ,则误差可表示为二者之差的绝对值,即:

$$\Delta d = |y_a - y'_a| \quad (2)$$

2 三参数车削插补算法及实现

对于非直线和圆弧曲线零件的车削,传统的方法是采用直线和圆弧分段拟合的方法进行插补,从而导致数据量大、精度差、进给速度不均、编程复杂等一系列问题存在,这些问题的存在必然对加工质量和加工成本高低产生较大的影响。

2.1 三参数插补原理

在普通的 x, y 二参数数控车削插补的基础上,本研究引入一个新的变量—刀具相对 y 轴正向的转角 θ 。这样,刀具具有 x 方向、 y 方向的平动和 $x-y$ 平面内的转动 3 个参数,通过这 3 个变量的联动来对复杂曲线进行插补运算。

理论上,在零件加工时,刀具是作刚体运动的。将刀具与工件接触位置处理成一个质点,在加工过程中, x, y 轴,转角 θ 方向在每个插补周期内改变一个脉冲当量 $\delta x, \delta y, \delta \theta$ 。根据曲线和当前位置,数控系统通过计算决策 y 轴方向和转角 θ 变化情况,即相对于当前位置增加、不变或减少一个脉冲当量。脉冲当量设置可根据工件材料、刀具硬度、车床性能和加工精度等因素要求事先选定,并在加工过程中保持不变。

三参数数控插补方法如图 1 所示,以零件轴线为 x 坐标,水平面内垂直轴线方向为 y 坐标,车床主轴卡盘外端中心为坐标原点建立平面直角坐标系。

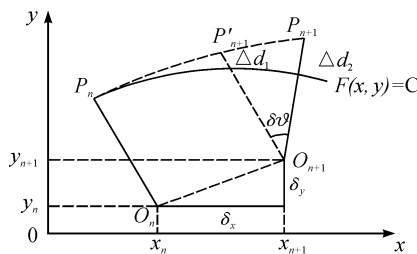


图 1 三参数数控插补方法

假设需要加工的曲线方程为 $F(x, y) = C$, 存在隐函数 $y = f(x)$ 。

在第 n 个插补周期末,刀具回转中心位于 $O_n(x_n, y_n)$ 点处,刀尖位于 $P_n(x_{pn}, y_{pn})$ 位置,刀具倾角为 θ 。在第 $n+1$ 个插补周期末,假定数控系统选定刀具在 x, y 轴方向增加一个脉冲当量,则刀具回转中心运动至 $O_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 处;同时,为了保证刀具刀尖方向 $O_{n+1}P'_{n+1}$ 沿着被加工圆弧母线的法线方向,数控系统选定刀具在转角 θ 方向需增加一个脉冲当量,则刀尖运动至 $P_{n+1}(x_{pn+1}, y_{pn+1})$ 位置。

图1中, P'_{n+1} 为转角 θ 不变时刀尖的位置, 转角 θ 减少一个脉冲当量时刀尖的位置未标出, 则刀尖在相邻两插补点之间运动的位移为:

$$s = \sqrt{(x_{pn+1} - x_{pn})^2 + (y_{pn+1} - y_{pn})^2} \quad (3)$$

位移 s 与脉冲当量 δx 、 δy 、 $\delta\theta$ 相关, 故需选取适当的值, 保证 s 不至于过大, 以免超过被加工零件的精度要求。

2.2 决策变量

本研究将 x 轴、 y 轴和转角 θ 变化情况分别用决策变量 a 、 b 、 c 来表示。假定 a 、 b 、 c 取值均为 $\{-1, 0, 1\}$, 即向坐标轴的反向运动、不变和向坐标轴和转动方向的正向运动, 转动相对 y 轴逆时针、不变和顺时针。

加工过程中的第 $n+1$ 个插补周期内, 刀具横坐标从 x_n 匀速运动至 x_{n+1} 处, 若此时决策轴方向为增加一个脉冲当量, 则刀具纵坐标坐标从 y_n 运动至 y_{n+1} 处, 刀具回转中心运动至点 $O_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 处。

同理, 在第 $n+1$ 个插补周期内, 若此时决策转角 θ 为增加一个脉冲当量, 则刀尖位于点 P_{n+1} 处。若刀具回转中心距刀尖的长度为 l , 则刀尖扫过的弧长可表示为:

$$A = 2l \sin \frac{\delta\theta}{2} \quad (4)$$

于是 P_{n+1} 点的坐标由 P_n 点坐标, x 、 y 轴轴向变化量, 转角 θ 变化量三部分决定, 可以表示为:

$$(x_{pn+1}, y_{pn+1}) = (x_{pn}, y_{pn}) + (a\delta x, b\delta y) + A \left(\cos \left(\theta + c \frac{\delta\theta}{2} \right), \sin \left(\theta + c \frac{\delta\theta}{2} \right) \right) \quad (5)$$

如此进行完成第 $n+1$ 个插补周期, 数控系统再将实际加工情况和预计加工路线进行计算比较, 决定下一个插补周期内 y 轴方向和转角 θ 变化情况, 直至完成整个工件的加工。

在每一个插补周期末时刻, P 点处的坐标值 x 、 y 、 θ 可表示为:

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + a\delta x + A \cos \left(\theta + c \frac{\delta\theta}{2} \right) \\ y_{n+1} = y_n + b\delta y + A \sin \left(\theta + c \frac{\delta\theta}{2} \right) \\ \theta_{n+1} = \theta_n + c\delta\theta \end{cases} \quad (6)$$

数控系统在每个插补周期末对 x 、 y 、 θ 的值进行更新。

2.3 目标函数

由于该方法是一种三变量决策拟合插值法, 故在一定程度上仍存在加工误差。该加工误差可由曲线上横坐标 x_{n+1} 对应的点的纵坐标和 P 点纵坐标之差的绝

对值表示, 如下式所示:

$$\Delta d = |y_{pn+1} - f(x_{pn+1})| \quad (7)$$

插补过程中, 对以上 3 个量进行循环累加, 直至 x_{n+1} 达到零件长度时, 完成整条曲线的加工。结合式 (6) 可知: Δd 与定量 A 、 δx 、 δy 、 $\delta\theta$ 有关, 且是变量 a 、 b 、 c 的函数, 理论上 $3^3 = 27$ 中不同的路径。因此, 在有限的可行决策情况中, 数控系统通过枚举法, 能得到令 Δd 最小的变量 a 、 b 、 c 的取值, 并由此确定最佳路径。

根据前面所述, 数控系统在每个加工点处均取得误差最小。由于被加工曲线和刀尖轨迹均为平滑曲线, 且不存在跳跃和突变, 则可知刀具在相邻两插补点之间任意位置的加工误差均不会超过两插补点误差中较大者, 即:

$$\Delta d^* \leq \max[\Delta d_n, \Delta d_{n+1}] \quad (8)$$

2.4 路径规划决策标准

车削加工可看作是插补点之间的连续加工过程, 理论上每一个加工点都存在误差, 因此, 在规划刀具路径、选择方案的过程中, 可供参考的决策标准为最小单点误差法, 即在每个加工点处取误差最小的那一种方案, 保证在每个插补点处的误差绝对值最小。这种方法是一种逐步优化的方法, 具有计算量小、计算速度快的特点。

用 J 表示决策过程, 则最小单点误差法可表示为: J subject to $\{\min\Delta d_1, \min\Delta d_2, \dots, \min\Delta d_n\}$ (9)

2.5 插补计算流程

对于给定的参数曲线, 该方法的插补计算流程如图 2 所示。

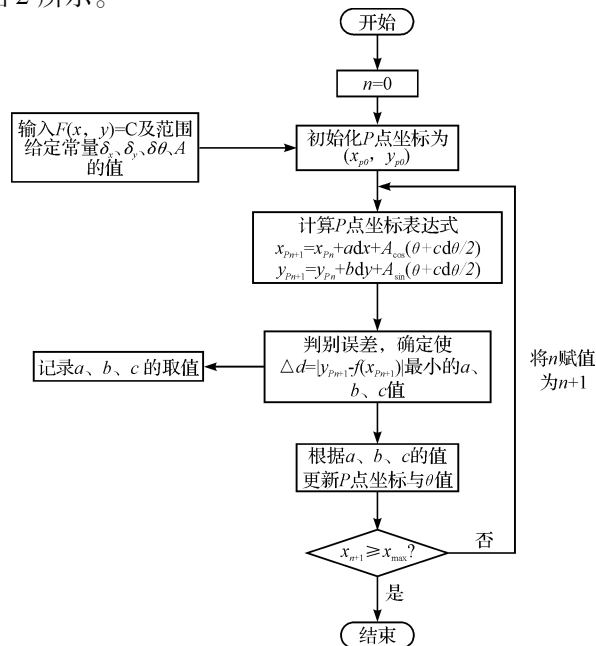


图 2 插补计算流程

详细步骤如下所述:

(1) 初始阶段, $n = 0$, 输入待加工参数曲线方程 $F(x, y) = C$ 及横坐标 x 取值范围, 并根据曲线方程初始动点 P 的坐标 (x_{pn}, y_{pn}) ;

(2) 加工开始, 将动点 P 坐标表达为常量 $A, \delta x, \delta y, \delta \theta$ 与决策变量 a, b, c 的函数式;

(3) 用误差函数 Δd 进行逐点判别, 找出并记录令 Δd 最小的决策变量 a, b, c 取值;

(4) 根据决策变量 a, b, c 的取值更新动点 P 坐标;

(5) 结束条件判别, 若 $x_{n+1} \geq x_{\max}$, 则表明加工插补已完成, 计算结束; 否则将 n 赋值为 $n + 1$, 重复步骤(2)。

3 实验结果及分析

为验证该方法的有效性, 本研究利用 Matlab 编写算法程序, 并在计算机工作站进行测试。

计算机工作站的硬件配置为: Intel i5-2320 3 GHz 4 核处理器, 6G 内存, NVIDIA GeForce GT520 独立显卡。考虑到脉冲当量影响数控机床的加工精度, 其值取得越小, 加工精度越高。

结合实际车削加工参数, 取脉冲当量 $\delta x = 0.05 \text{ mm}$ 、 $\delta y = 0.05 \text{ mm}$ 、 $\delta \theta = 0.1^\circ$, 根据一种常用合金刀具属性计算得 $A = 0.12 \text{ mm}$ 。

3.1 实验结果

(1) 实验 1: 引入的测试参数曲线为对数函数:

$$y = \ln(x + 1), x \in [0, 60(\text{mm})] \quad (10)$$

对数曲线插补轨迹如图 3 所示。

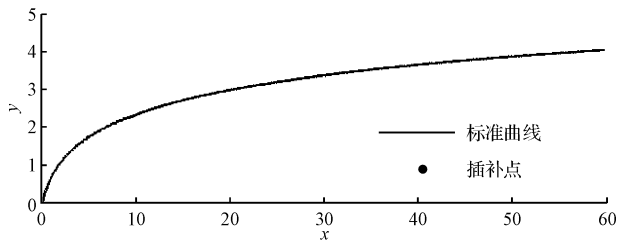


图 3 对数曲线插补轨迹

对数曲线插补点处的误差如图 4 所示。

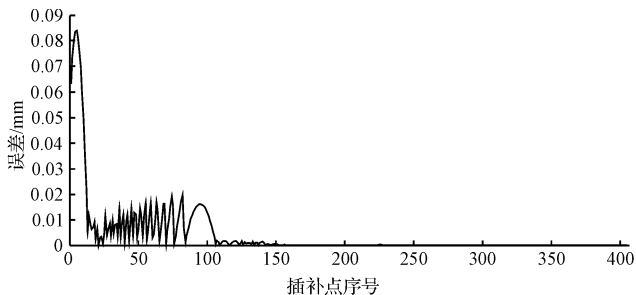


图 4 对数曲线插补误差

从图 3、图 4 可看出, 运用本方法计算得到的插补曲线光滑, 插补点分布均匀, 在对数函数曲率半径较小处, 插补误差相对较大, 之后误差逐步减小并稳定在 10^{-8} mm 级。

对计算过程中 405 个插补点的误差值进行统计分析后, 得到的统计数据如表 1 所示。

表 1 插补计算误差统计数据(单位:mm)

最大值	最小值	平均值	标准差
0.083 8	5.37×10^{-8}	0.004 1	0.012

(2) 实验 2: 引入的测试参数曲线为正弦函数:

$$y = 5 + \sin\left(\frac{x}{5}\right), x \in [0, 60(\text{mm})] \quad (11)$$

正弦曲线插补轨迹如图 5 所示。

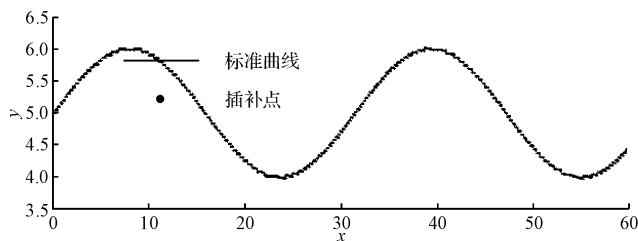


图 5 插补轨迹

正弦曲线插补点处的误差如图 6 所示。

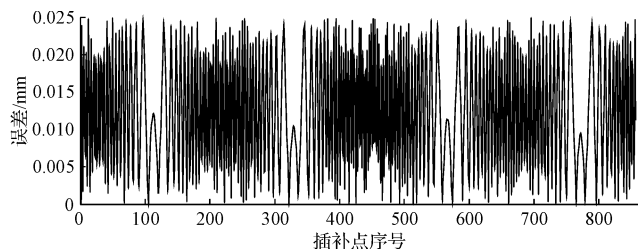


图 6 插补误差

从图 5、图 6 可看出, 运用该方法计算得到的插补曲线光滑, 插补点分布均匀, 插补误差分布稳定在接近微米级, 并随正弦函数呈现周期性变化。

对计算过程中 857 个插补点的误差值进行统计分析后, 得到的统计数据如表 2 所示。

表 2 插补计算误差统计数据(单位:mm)

最大值	最小值	平均值	标准差
0.024 9	0	0.012 3	0.007 2

3.2 决策变量取值

记录实验 1、实验 2 中决策变量 a, b, c 的取值矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}_{3 \times 405} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}_{3 \times 857} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & \cdots & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

从矩阵中可以看出,插补算法中决策变量均取到了-1、0、1三种情况,且分布无明显的规律,说明事先关于刀具 x 轴方向、 y 轴方向和转角 θ 的变化情况是贴合实际的。

相对于普通 x 、 y 二参数插补而言,引入的新变量 θ 在路径规划插补算法中起到了重要作用。

3.3 结果分析

实验1与实验2中的插补算法计算耗时分别为0.55 s和0.75 s,计算时间短,路径规划求解迅速。与普通的二坐标参数插补相比,该方法加入了新的参数,误差减小显著,这表明三参数路径规划插补算法较传统的方法更为精确、更为高效。

此外,由于每个加工点 P 的位置选取情况相互独立,该方法没有累计误差,单步误差只与每个周期内三参数的变化有关,且保证每个点的误差都是最小情况,误差控制简洁有效。

4 结束语

本研究所提出的基于复杂曲线母线的三参数插补算法将车削路径分解为若干插补点之间的最优路径搜索和选取问题,在3个参数耦合过程中,使插补点处误差最小,有效控制了两相邻插补点之间路径上的误差,插补计算过程中无累计误差,满足复杂曲线零件的车削精度要求。

相关的实验表明:该算法插补质量高,插补点分布均匀,插补曲线光滑,达到预期加工要求,具有较大的实用价值。同时,计算实验和实例也验证了该方法具有计算规模小、求解迅速、误差小等优点。

参考文献(References):

[1] 罗永顺. 机床数控化改造实例[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

- [2] 周济,邵新宇,周艳红. “数控一代”机械产品创新工程的战略意义和技术路线[J]. 中国机械工程,2012,23(1):1-6.
- [3] SU Ke-han, CHENG Ming-yang. Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,2008,48(12-13):1444-1453.
- [4] CHEN Chin-sheng, CHEN Li-yeh. Cross-coupling position command shaping control in a multi-axis motion system[J]. **Mechatronics**,2011,21(3):625-632.
- [5] XI Xue-cheng, POO Aun-neow, HONG Geok-soon, et al. Experimental implementation of Taylor series expansion error compensation on a bi-axial CNC machine[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2011,53(1-4):285-299.
- [6] HUO Feng, XI Xue-cheng, POO Aun-neow. Generalized Taylor series expansion for free-form two-dimensional contour error compensation[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**,2012,53(1):91-99.
- [7] 王海涛,赵东标,高素美. 参数曲线的自适应实时前瞻插补算法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(2):385-389.
- [8] ZHANG Li-yan, WANG Kui-sheng, BIAN Yu-chao. A real-time NURBS interpolator with feed rate adjustment[J]. **Advanced Intelligent Computing Theories and Applications**,2008,226(5):1064-1071.
- [9] WANG Jun-bin, YAU Hong-tzong. Real-time NURBS interpolator: application to short linear segments[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2009,41(11-12):1169-1185.
- [10] YEH S S, TSAI Z H, HSU P L. Applications of integrated motion controllers for precise CNC machines[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2009,144(9-10):906-920.
- [11] YEH S S, SU H C. Implementation of online NURBS curve fitting process on CNC machines[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2009,40(5-6):531-540.

[编辑:罗向阳]