

# 空间曲线轮廓误差实时估算与补偿方法研究

肖晓萍<sup>1,2</sup>,殷国富<sup>1\*</sup>

(1. 四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065;2. 西南科技大学 工程技术中心,四川 绵阳 621010)

**摘要:**为提高复杂轮廓线的加工精度,提出一套轮廓误差实时估算及误差补偿算法。该算法通过当前刀位点数据,建立局部搜索的曲线实时轮廓误差模型,结合数控机床伺服控制系统,利用数控插补器输出位置,采用Z变换预测各运动轴在下一时刻的输出值并估算其轮廓误差,运用泰勒级数求解各运动轴的补偿值,并将其送入伺服系统输入端,从而实现加工过程中轮廓误差的实时补偿。以空间直线、圆柱螺旋线和B样条曲线为例,构建其轮廓误差模型并进行仿真分析,最后对“S”形B样条曲线进行实验验证。结果表明,该方法能有效地控制空间曲线的轮廓误差。

**关键词:**空间曲线;轮廓误差;局部估算;泰勒级数;误差补偿

中图分类号:TP242.2

文献标志码:A

## Study on Real-time Estimation and Error Compensation of Contour Error for Space Curve

XIAO Xiaoping<sup>1,2</sup>, YIN Guofu<sup>1\*</sup>

(1. School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Center of Eng. and Technol., Southwest Univ. of Sci. and Technol., Mianyang 621010, China)

**Abstract:** A real time estimation model of contour error and the approach of error compensation were developed to improve the machine precision of complex space contour curve. Only information on the tool position and the reference input positions defining the desired curve were employed to model contour error instead of searching the whole curve for saving time. The output values of the next instant, which was estimated by Z transformation based on the servo control system of machine tool, were applied to estimate the contour error using the above-mentioned method. After that, the compensation terms of each axis were generated using Taylor series expansion in the form of one- or two-order expression and an estimation of the contour error at next time. These were then added to the reference position inputs for the next instant in order to reduce the contour error during the machining process. The error compensation model of space line, cylindrical spiral and B-Spline were simulated, and “S” shape B-Spline curve was experimented. The results showed that the proposed solution can reduce contour error effectively.

**Key words:** space curve; contour error; local estimation model; Taylor series; error compensation

数控加工误差一直是数控机床研究的热点,现有研究成果主要集中于建模与补偿方法<sup>[1-2]</sup>以及误差评价方法<sup>[3]</sup>方面。在数控加工过程中,插补器根据输入数据计算出各个坐标轴的位置指令,对各运动轴进行独立闭环控制,驱动相应执行机构动作,完成曲线轮廓运动。由于存在单轴跟踪误差、各运动轴间参数不匹配以及运动不协调等因素影响工件的轮廓精度,从而产生轮廓误差<sup>[4]</sup>。轮廓误差是影响

工件质量的主要因素之一,目前关于轮廓误差研究主要从以下2方面展开:

一方面是轮廓误差控制研究,从改善机床伺服系统性能角度提出了几种经典的控制与补偿方法,如:零相差跟踪控制(zero phase error tracking control, ZPETC)<sup>[5]</sup>及其改进的自适应ZPETC<sup>[6]</sup>、扩展带宽ZPETC<sup>[7]</sup>等,存在控制器设计困难等方面的不足。交叉耦合控制(cross-couple control, CCC)<sup>[8]</sup>、基于

收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家重大科技专项课题资助项目(2013ZX04005-012);四川省科技支撑计划资助项目(2011GZ0065);四川省教育厅资助项目(12ZD1120);绵阳市科技局资助项目(13ZD2108)

作者简介:肖晓萍(1979—),女,博士生,讲师。研究方向:机床精度检测与评价。Email:xxp8108@126.com

\*通信联系人 E-mail:gfyin@scu.edu.cn

神经元的自适应交叉耦合控制器<sup>[9]</sup>等,轮廓误差计算时间不稳定,难以满足轮廓误差实时补偿要求。郑子文<sup>[10]</sup>提出的两轴精密数控机床伺服控制的变增益交叉耦合控制算法,可在不改变位置环的情况下,有效提高伺服系统的轮廓精度,但该算法提出的轮廓误差模型难以应用于 3 轴及以上联动的数控机床空间轮廓误差的控制中。

另一方面是轮廓误差估算方法研究,如文献<sup>[11]</sup>在建立轮廓误差时,涉及到该时刻实际与理想刀位点的速度,导致建立的轮廓误差模型复杂,不满足实时性要求。李小力等<sup>[9]</sup>、孙开珊<sup>[12]</sup>采用空间解析几何的矢量化建模方法推导 3 平动轴下空间曲线的轮廓误差,该方法在线性化近似的计算中易产生截断误差,导致轮廓误差估算精度下降。王宝仁等<sup>[13]</sup>提出的通用空间曲线轮廓误差估算算法,利用数控插补器输出的路径点序列和伺服系统的跟随误差实现精确的轮廓误差计算,并以空间矢量的形式表示,可直接用于轮廓反馈控制,具有一定的通用性。但该算法在轮廓误差估算精度上有待提高。文献<sup>[14]</sup>运用 Taylor 级数展开获得任意时刻刀具位置的轮廓误差,仿真显示若数控机床伺服控制系统动态的模型确定,该方法即使在各轴参数不匹配的情况下,也能有效消除轮廓误差。但此方法不具有通用性,且需要系统的先验知识。

相比平面曲线,空间曲线具有更高的维度和更复杂的表达,采用上述算法来对空间曲线进行轮廓误差估计,需要更长的计算时间以及更复杂的计算过程,因此实时性较差,不能实现轮廓误差的实时估计与补偿。

针对现有算法存在的不足,作者提出利用当前刀具指令位置数据来建立空间曲线通用局部搜索的实时轮廓误差估算算法,避免现有算法通过搜索整个曲线来估计轮廓误差实时性差的不足。

提出的方法思路如下:在建立机床进给伺服控制系统的闭环传递函数模型基础上,利用零阶保持器的 Z 变换和 2 阶差分法估算各运动轴在下一时刻的输出值,利用实时轮廓估算算法计算出下一时刻的轮廓误差值,同时采用 Taylor 级数一阶展开式对下一时刻的轮廓误差展开,求出各运动轴的补偿值,通过控制器反馈到伺服进给控制系统的输入端,实现对下一时刻轮廓误差的实时补偿。最后,采用空间直线、空间圆柱螺旋曲线以及“S”形 3 次 B 样条曲线来验证上述算法的正确性。

## 1 实时轮廓误差估算算法

轮廓误差<sup>[12]</sup>就是在指令(理想)曲线上找一点,使得实际点到该点的距离最短。传统采用全局搜索计算轮廓误差方法是从整个指令曲线上搜索与当前刀具位置距离最近的点,该方法虽能得到较高的精度,但性能差,不适用于实时轮廓误差估算和实时补偿。现有基于智能方法计算轮廓误差的算法,如基于粒子群的轮廓误差算法<sup>[15]</sup>和基于微粒群的轮廓误差算法<sup>[16]</sup>等。一方面,智能计算方法的特性决定了其计算结果是近似解而不是最优解;另一方面,智能计算方法的寻优过程是一个不断迭代过程,同时也是一个耗时的过程,因而更适用于离线计算,很难应用到轮廓误差的实时补偿中去。

针对全搜索方法和智能计算方法的不足,作者采用局部搜索方法估算点到空间曲线最短距离。与全搜索方法不同,通过给定数据区间长度  $N$ ,选择  $k$  时刻对应的空间曲线的局部数据区间,首先,在局部区间内找到与空间点距离最短的曲线点及对应的时刻点,然后,以该时刻对应曲线点与前后各一时刻点构成的弦代替弧线,计算空间点到两弦的距离,选择距离值最小者作为曲线在此时刻的轮廓误差。

### 1.1 空间任意曲线实时轮廓估算算法

对于空间任意曲线  $T$ ,如图 1 所示,点  $P_a$  为  $k$  时刻的刀具实际位置值, $P_r(k-t)$  ( $t=0,1,\dots,N$ ) 为  $k-t$  时刻的刀具指令位置值, $N$  为搜索区间长度,其算法如下:

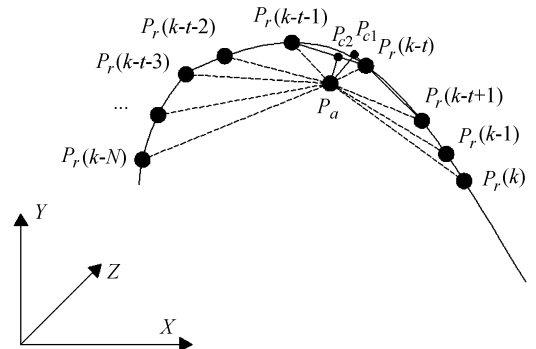


图 1 空间曲线轮廓误差算法图

Fig. 1 Contour errors estimation algorithm for space curve

- 1) 给定区间搜索长度  $N$ ;
- 2) 构建搜索区间  $[P_r(k-N), P_r(k)]$ ;
- 3) 分别计算点  $P_a$  到点  $P_r(k)$ 、 $P_r(k-1)$ 、 $\dots$ 、 $P_r(k-N)$  的距离,找出距离最短者对应点为  $P_r(k-t)$ ;
- 4) 比较  $N$  与  $t$  的值,若  $t \geq N$ ,则增大搜索区间

( $N = N + 1$ ) 执行第2)步,否则,则执行第5)步;

5) 连接  $P_r(k-t+1)$  与  $P_r(k-t)$  形成直线  $L_1$ , 连接  $P_r(k-t)$  与  $P_r(k-t-1)$  形成直线  $L_2$ , 分别作点  $P_a$  到  $L_1$  和  $L_2$  的垂线, 垂足为  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$ , 计算点  $P_a$  到直线  $L_1$ 、 $L_2$  的距离  $d_1$ 、 $d_2$ , 比较  $d_1$ 、 $d_2$ , 若  $d_1 < d_2$ , 则点  $P_{c1}$  为  $k$  时刻点  $P_a$  到空间曲线  $T$  的最近点, 则点  $P_a$  到点  $P_{c1}$  的距离  $d_1$  即为  $k$  时刻的轮廓误差。

### 1.2 B 样条曲线实时轮廓误差估算算法

由于 B 样条曲线及非均匀有理 B 样条曲线是现代产品的基本结构体, 因而对此类曲线的轮廓误差实时算法进行研究是有必要的。文献[17]基于3次样条插值轮廓误差计算方法的不足, 提出了一种修正的实时轮廓误差估算方法, 经双轴运动验证其估算的轮廓误差有很高的精度, 并没有把此方法应用到空间 B 样条曲线上, 更无验证结果。

当空间曲线为3次非均匀有理 B 样条时, 传统的轮廓误差估算方法是基于重构轮廓曲线的基础上计算轮廓误差值, 计算量大、计算过程复杂。提出的算法在样条插值算法的基础上进行修改, 在不改变其计算精度的情况下能有效提高其计算速度, 为空间 B 样条曲线轮廓误差的实时估算以及后续的实时误差补偿提供了可能。如图2所示, 其算法如下:

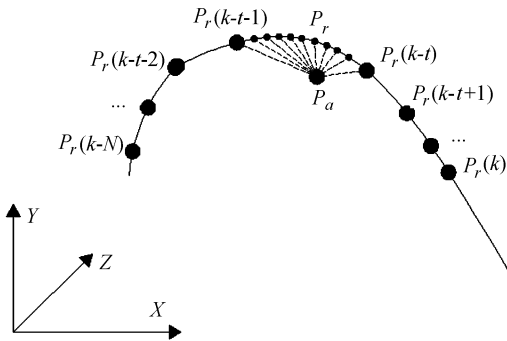


图2 B 样条曲线实时轮廓误差算法图

Fig.2 Contour errors estimation algorithm for B-spline

1) 由1.1节的算法可确定点  $P_r(k-t)$  为到点  $P_a$  最近的点。比较点  $P_r(k-t)$  的相邻点  $P_r(k-t+1)$ 、 $P_r(k-t-1)$  到点  $P_a$  的距离, 选择最小距离对应的点, 假设是点  $P_r(k-t-1)$ 。

2) 重构  $[P_r(k-t-1), P_r(k-t)]$  区间的轮廓曲线。以点  $P_r(k-t)$ 、 $P_r(k-t-1)$  为中心, 分别选取与其相邻的点  $P_r(k-t+1)$ 、 $P_r(k-t-2)$  作为重构3次非均匀有理 B 样条的4个型值点, 同时令点  $P_r(k-t)$  对应的参数  $u_1 = 0$ , 点  $P_r(k-t-1)$  对应的参数  $u_2 = 1$ , 在区间  $[u_1, u_2]$  上通过反求控制点重新构建  $[P_r(k-t-1), P_r(k-t)]$  区间的轮廓曲线。

3) 求点  $P_a$  到  $[P_r(k-t-1), P_r(k-t)]$  轮廓曲

线的最短距离。先将区间  $[0, 1]$  分成  $M$  等分, 计算区间  $[0, 1]$  上点到点  $P_a$  的距离, 求取最短距离  $d_n$  对应的点  $P_r'(k-t)$  以及次短距离  $d_{n-1}$  对应点并假设其为  $P_r'(k-t-1)$ 。

4) 判断  $|d_{n-1} - d_n|$  是否满足计算精度要求, 若满足, 则停止执行, 此时  $d_n$  即为  $k$  时刻点  $P_a$  到轮廓曲线的轮廓误差  $\varepsilon(k)$ , 其对应的点为  $P_r(x_0, y_0, z_0)$ , 反之, 重复2)、3)步, 直至满足计算精度为止。

因此,  $k$  时刻刀具实际位置点  $P_a(y_x(k), y_y(k), y_z(k))$  到轮廓曲线的轮廓误差  $\varepsilon(k)$  可表示为:

$$\varepsilon(k) = \sqrt{(y_x(k) - x_0)^2 + (y_y(k) - y_0)^2 + (y_z(k) - z_0)^2} \quad (1)$$

采用上述算法对空间 B 样条曲线或非均匀有理 B 样条曲线进行轮廓误差的计算, 无需重构全部轮廓曲线, 只需重构局部曲线, 降低了计算量, 节约了时间, 保证了实时补偿的实现。

## 2 基于泰勒级数展开的实时补偿算法

### 2.1 数控机床进给伺服系统模型的建立

数控机床进给伺服系统是联系 CNC 系统和机床进给运动执行机构的桥梁, 加工工件轮廓形状精度很大程度上取决于进给伺服系统的工作精度, 因而对进给伺服系统建立模型是进行轮廓误差分析的基础, 图3是简化后的进给伺服位置闭环控制系统图。

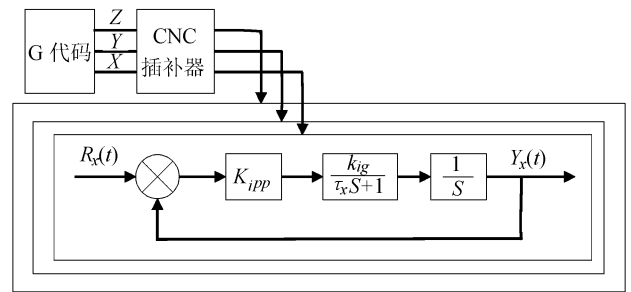


图3 数控机床进给伺服控制系统简图

Fig.3 System diagram for CNC servo control system

图3中,  $K_{ipp}$  ( $i = x, y, z$ ) 为 X、Y 及 Z 轴控制器的位置环比例增益,  $\frac{k_{ig}}{\tau_i S + 1}$  为伺服动态模型 ( $\tau_i$ 、 $k_{ig}$  分别为机床各轴速度环时间常数、增益常数),  $\frac{1}{S}$  为机械传动机构的传递函数,  $Y_i(t)$  为伺服系统输出位置值,  $R_i(t)$  数控插补器输出值, 则整个进给伺服系统的开环传递函数为:

$$G_{io}(S) = K_{ipp} \times \frac{k_{ig}}{\tau_i S + 1} \times \frac{1}{S} \quad (2)$$

## 2.2 X、Y、Z 轴输出值实时预测算法

对式(2)进行Z变换之前,在开环控制函数上串联一个传递函数为  $G_h(S) = \frac{1 - e^{-TS}}{S}$  ( $T$ 为采样时间)的零阶保持器(zero order hold,ZOH),然后将式(2)进行Z变换,得到其闭环传递函数如下:

$$G_{ic} = \frac{Y_i(Z)}{R_i(Z)} = \frac{G_{io}(Z)}{1 + G_{io}(Z)} = \frac{a_{i1} \times Z + a_{i2}}{Z^2 + b_{i1} \times Z + b_{i2}} \quad (3)$$

其中,  $b_{i1} = K_i \times (T - \tau_i + \tau_i \times e^{-T/\tau_i}) - 1 - e^{-T/\tau_i}$ ,  
 $b_{i2} = a_{i2} + e^{-T/\tau_i}$ ,

$$a_{i1} = K_i \times (T - \tau_i + \tau_i \times e^{-T/\tau_i}),$$

$$a_{i2} = K_i \times (\tau_i - T \times e^{-T/\tau_i} - \tau_i \times e^{-T/\tau_i}).$$

式中,  $K_i = K_{ipp} \times k_{ig}$  为伺服增益常数,  $b_{i1}$ 、 $b_{i2}$ 、 $a_{i1}$ 、 $a_{i2}$  为常系数。

不妨假设当前采样时刻为  $k$ ,则  $k$  时刻各运动轴的输入为  $R_i(k)$ ,输出为  $Y_i(k)$ ,由  $G_{ic} = \frac{Y_i(k)}{R_i(k)}$ ,经2阶差分变换得出  $k+1$  时刻各运动轴的实际输出值,如式(4)所示:

$$y_i(k+1) = -b_{i1}y_i(k) - b_{i2}y_i(k-1) + a_{i1}r_i(k) + a_{i2}r_i(k-1) \quad (4)$$

式中,  $y_i(k)$  和  $y_i(k-1)$  为无补偿情况下的实际输出值,  $r_i(k)$  和  $r_i(k-1)$  为理想输入值。

## 2.3 基于泰勒级数的实时补偿算法

由式(1)可知,空间任意曲线在  $k+1$  时刻的轮廓误差与  $k+1$  时刻的实际位置有关,又由式(4)可看出,  $k+1$  时刻的刀具实际位置又与  $k$  时刻的  $r_i(k)$  的值有关。假设  $k$  时刻的  $r_i(k)$  又可写成:

$$r_i(k) = r_i^*(k) + \Delta r_i(k) \quad (5)$$

式中,  $\Delta r_i(k)$  为  $k$  时刻各运动轴的补偿增量,  $r_i^*(k)$  为无补偿条件下的输入值。

定义  $k$  时刻的轮廓误差  $\varepsilon(k)$  表示为  $P(y_i(k))$ ,结合式(4)和(5),则  $k+1$  时刻的轮廓误差为:

$$\varepsilon(k+1) = P(y_i(k+1)) = P(y_i(k), y_i(k-1), r_i(k), r_i(k-1)) = P(r_i^*(k) + \Delta r_i(k)) \quad (6)$$

式中,除  $r_i(k)$  未知之外,其余值已知。在无补偿的情况下,  $\Delta r_i(k) = 0$ 。因而在  $k$  时刻的输入值为  $r_i^*(k)$ ,运用1阶Taylor级数在  $r_i^*(k)$  处展开,得到  $k+1$  时刻的轮廓误差:

$$\varepsilon(k+1) = P(r_i(k)) = P(r_i^*(k)) + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial P}{\partial r_i(k)} (r_i(k) - r_i^*(k)) \Big|_{r_i(k)=r_i^*(k)} = P(r_i^*(k)) + \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial P}{\partial r_i(k)} \Delta r_i(k) \Big|_{r_i(k)=r_i^*(k)} \quad (7)$$

令  $\frac{\partial P}{\partial r_i(k)} \Big|_{r_i(k)=r_i^*(k)} = C_i$ ,且在理想状态下  $k+1$  时刻的轮廓误差为零,  $\varepsilon(k+1) = 0$ 。则将式(7)展开:

$$-\varepsilon^*(k+1) = C_x \times \Delta r_x(k) + C_y \times \Delta r_y(k) + C_z \times \Delta r_z(k) \quad (8)$$

式中,系数  $C_i = \frac{\partial P}{\partial r_i(k)} \Big|_{r_i(k)=r_i^*(k)}$  ( $i = x, y, z$ ),根据式(6),同时对式(1)求偏导,得到:

$$C_i = \frac{a_{i1} \times (y_i(k+1) - i_0)}{\sqrt{\sum_{i=x,y,z} (y_i^*(k+1) - i_0)^2}}$$

式中,  $y_i^*(k+1)$  ( $i = x, y, z$ ) 为无补偿条件下进给伺服系统的输出值。同时假设各运动轴的补偿值与其偏导成正比,将  $C_i$  代入式(8),各运动轴的补偿值如下:

$$\Delta r_i(k) = \frac{-C_i \times \varepsilon^*(k+1)}{\sum_{i=x,y,z} C_i^2} \quad (9)$$

最后,再由式(5)和(4)可估算出补偿之后的  $k+1$  时刻的输出值  $y_i(k+1)$ 。实时控制补偿过程如图4所示。

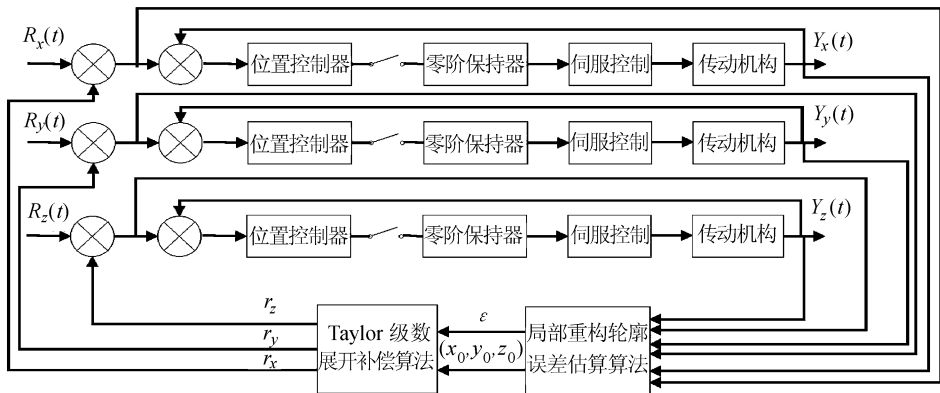


图4 局部重构轮廓误差估算与补偿图

Fig. 4 Basic structure of contour error estimation and compensation based on local reconstruction

该系统由各运动轴独立控制的位置闭环系统和以控制轮廓误差为目标的各运动轴相互耦合的轮廓误差闭环控制系统 2 大部分组成。在 2 组控制系统的共同作用下,既能实现各运动轴的精确定位,又能控制空间曲线的轮廓误差,从而提高了空间复杂曲线的加工精度。

### 3 仿真验证与结果分析

为了验证提出的空间任意曲线轮廓误差建模及补偿方法的可行性,根据上述方法建立其数控进给伺服系统控制模型,其伺服控制系统参数如表 1 所示。

表 1 数控机床伺服控制系统参数

Tab.1 The parameters of CNC servo control system

参数	X 轴	Y 轴	Z 轴
$\frac{k_{ig}}{\tau_i S + 1} / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\frac{200}{0.015S + 1}$	$\frac{100}{0.015S + 1}$	$\frac{125}{0.015S + 1}$
比例增益 $K_{ip} / \text{mm}$	5	10	8
进给速度 $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	2 400	2 400	2 400
采样时间/s	0.001	0.001	0.001

#### 3.1 空间直线的轮廓误差分析

被加工轮廓为空间直线,其数学模型如下:

$$\begin{cases} l = f \times T \times k, \\ r_x(k) = -1 + l \times (\sqrt{3}/3), \\ r_y(k) = l \times (-\sqrt{3}/3), \\ r_z(k) = 2 + l \times (\sqrt{3}/3) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f$ 为机床进给速度,mm/min; $T$ 为系统采样时间,s; $l$ 为从起点 $(-1,0,2)$ 到 $k$ 时刻空间直线上理论点 $(r_x(k), r_y(k), r_z(k))$ 的距离,mm。

根据表 1 数控机床进给伺服系统控制参数值,采用 Matlab 软件进行实验仿真,建立了其补偿前、后的空间直线轮廓误差图 5 和 6(采样点数为 3 636)。

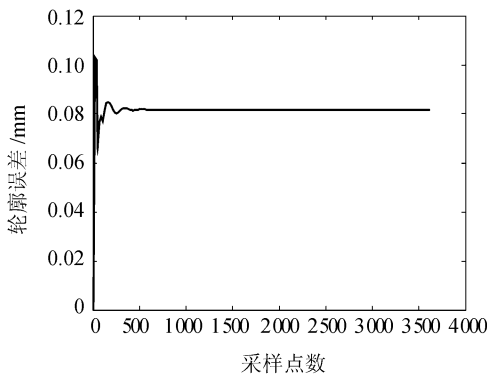


图 5 补偿前的线性轮廓误差图

Fig.5 Uncompensated contour error for linear contour

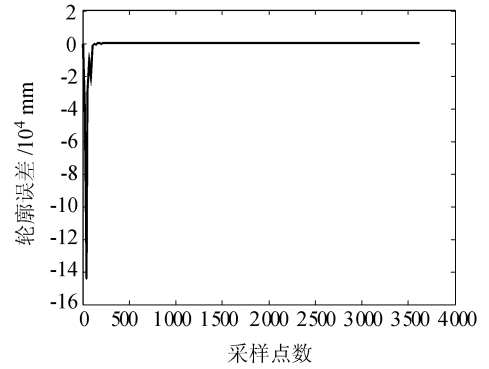


图 6 补偿后的轮廓误差图

通过分析图 5 和 6 得知,补偿之前的直线轮廓误差最大值为 0.1 mm 左右,随着采样值的增加,最终稳定在 0.08 mm 左右,运用泰勒级数展开补偿之后直线轮廓误差最大值为  $-1.4 \times 10^{-3}$  mm,随着采样点数不断增加,轮廓误差接近于零,因而运用泰勒一级级数展开可对空间任意直线轮廓进行有效的误差补偿。

#### 3.2 圆柱螺旋曲线的轮廓误差分析

圆柱螺旋曲线及螺旋形体如弹环、螺杆、螺旋铣刀等在机械制造领域有着广泛的应用<sup>[18]</sup>。圆柱螺旋曲线如图 7 所示。

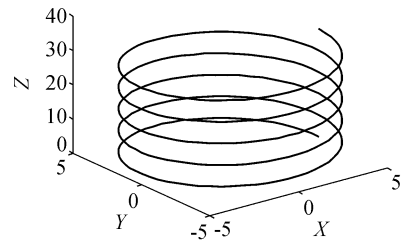


图 7 圆柱螺旋曲线

Fig.7 Figure of cylindrical spiral curve

图 8 和 9 分别为补偿前和补偿后的轮廓误差补偿图,圆柱螺旋曲线的最大轮廓误差值已经从补偿前的 0.043 mm 降到补偿后的  $0.82 \times 10^{-3}$  mm。

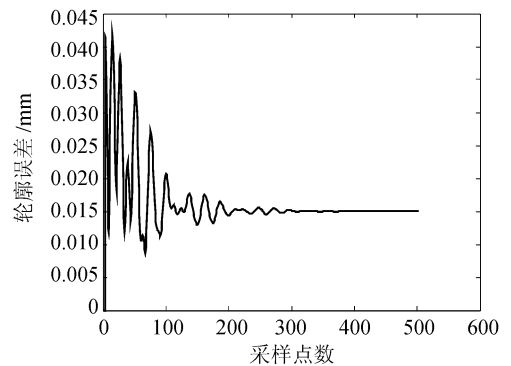


图 8 补偿前的圆柱螺旋曲线轮廓误差图

Fig.8 Uncompensated contour error for cylindrical spiral curve

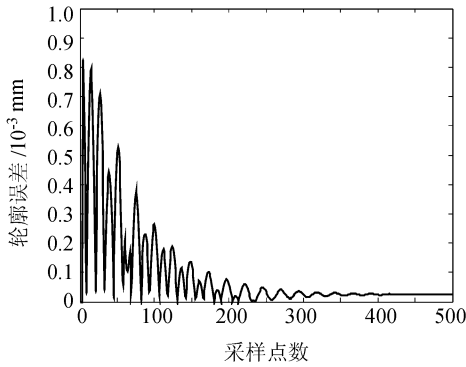


图 9 补偿后的圆柱螺旋曲线轮廓误差图

Fig. 9 Compensated contour error for cylindrical spiral curve

### 3.3 空间“S”曲线的轮廓误差分析

空间“S”曲线基于 3 次均匀有理 B 样条,如图 10 所示。补偿前、后的“S”形轮廓误差曲线如图 11 和 12 所示。可以看出,轮廓误差从无补偿时的最大值 0.095 mm 减少到补偿后的  $2.4 \times 10^{-4}$  mm。

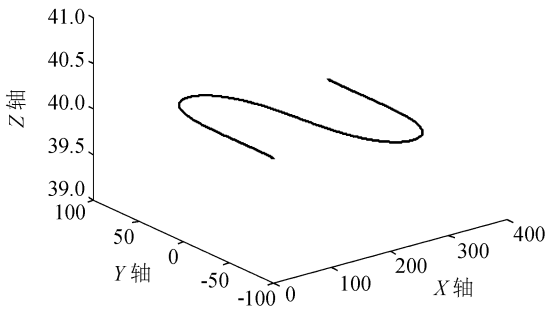


图 10 “S”形 3 次均匀 B 样条曲线

Fig. 10 Figure of cubic uniform B-spline curve of S shape

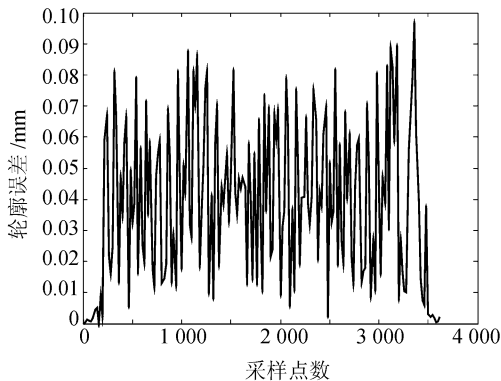


图 11 补偿前的“S”形曲线轮廓误差图

Fig. 11 Uncompensated contour error for S shape curve

## 4 实验验证

实验装置为四轴立式加工中心, X 轴、Y 轴、Z 轴均采用松下 MSMA-042A1E 交流伺服电机驱动,运动控制卡为 MESAm5i20。各轴进给速率为 2 400

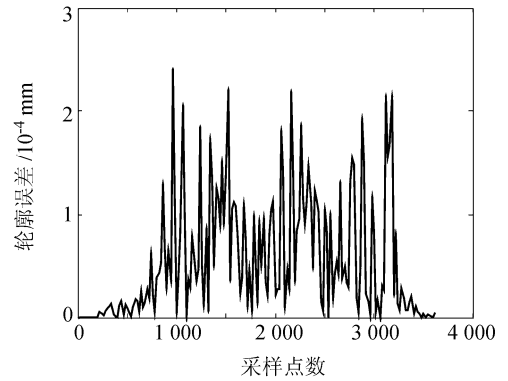


图 12 补偿后的“S”形曲线轮廓误差

Fig. 12 Compensated contour error for S shape curve mm/min。实验对象为基于空间的“S”形 3 次均匀 B 样条曲线。由于空间曲线无法直接测量,因而首先需要通过上、下 2 条参数相同的“S”形 3 次均匀 B 样条曲线形成高为 50 mm、厚度为 5 mm 的样条曲面等厚缘条,沿着曲面缘条高度方向距离顶部 10 mm 的取 1 条“S”形截线,在其上选取 40 个测量点,采用三坐标测量机检测。图 13 中的曲线 a、曲线 b 分别为未采用误差补偿算法和采用误差补偿算法后的曲线轮廓图,图 14 和 15 为未采用误差补偿和采用误差补偿算法的轮廓误差图。

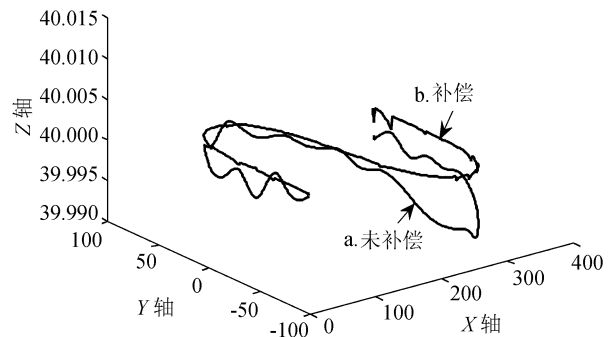


图 13 补偿前后“S”形轮廓曲线

Fig. 13 Graph of S shape curves

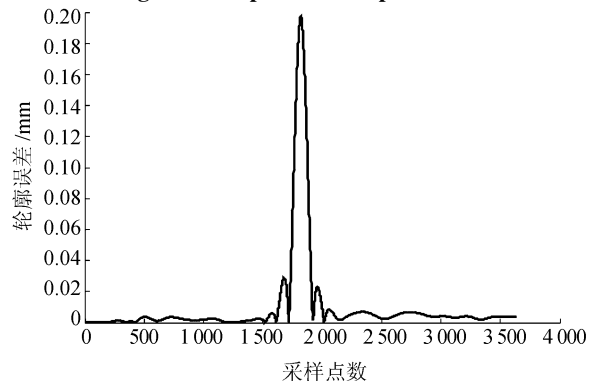


图 14 补偿前“S”形曲线轮廓误差图

Fig. 14 Uncompensated contour error for experimental S shape curve

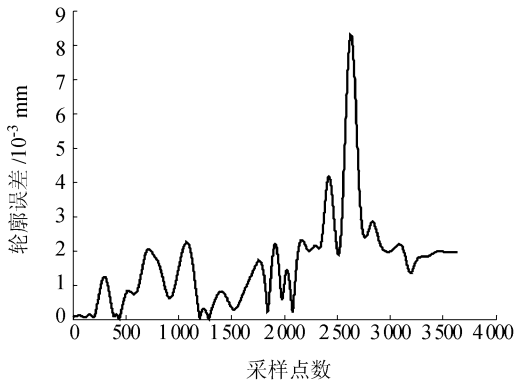


图 15 补偿后“S”形曲线轮廓误差图

Fig. 15 Compensated contour error for experimental S shape curve

实验结果分析如下:

1) 对比 3.3 节中“S”形 3 次均匀 B 样条曲线轮廓误差图发现,由于轮廓误差除受伺服系统的影响因素外,还应考虑机床本身几何误差、热误差以及外界环境的影响,所以无论是补偿前还是补偿后,试验轮廓误差值均比仿真的误差值大。

2) 图 14 和 15 显示,“S”形曲线的最大轮廓误差值从补偿前的 0.19 mm 减少到补偿后的  $8.5 \times 10^{-3}$  mm,补偿效果明显,同时也验证了该算法的有效性。

## 5 结 论

在 3 轴及多轴运动控制系统中,对于空间复杂曲线轮廓误差的估算与补偿很大程度上依赖于曲线的数学模型,从而使得误差补偿变得十分困难。作者在分析离线轮廓误差估算的基础上,提出针对空间任意曲线的轮廓误差实时估算算法,基于数控机床伺服进给系统控制模型,建立了基于泰勒级数一级展开的轮廓误差补偿算法,通过对空间具有代表性的曲线,如直线、圆柱螺旋曲线以及空间 B 样条曲线进行仿真和试验验证,结果表明,该算法能够有效地提高空间曲线的轮廓精度,具有一定的实用价值。下一步的研究重点将针对 4 轴、5 轴机床建立基于转动轴的空间轮廓误差与补偿模型。

### 参考文献:

[1] Zhu S, Ding G, Qin S, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1): 24 - 29.

[2] Yao Xiaopeng, Yin Guogu, Fang Hui. A new synthesis error modeling and compensating algorithm of the five-axis ma-

chine tools[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(5): 154 - 159. [要小鹏,殷国富,方辉. 五轴机床误差建模补偿解析新算法[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2013, 45(5): 154 - 159.]

- [3] Sun Huijuan, Yin Guofu, Fang Hui, et al. Research on integrated error modeling and evaluation method of five-axis machine tools[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6): 197 - 202. [孙惠娟,殷国富,方辉,等. 五轴数控机床综合误差建模评价方法研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2012, 44(6): 197 - 202.]
- [4] Zhu L M, Zhao H, Ding H. Real-time contouring error estimation for multi-axis motion systems using the second-order approximation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 68: 75 - 80.
- [5] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Tracking and contour error control in CNC servo systems[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(3): 301 - 326.
- [6] Tsao T C, Tomizuka M. Adaptive and repetitive digital control algorithms for noncircular machining[C]. American Control Conference, 1988, New York; IEEE, 1988: 115 - 120.
- [7] Torfs D, de Schutter J, Swevers J. Extended bandwidth zero phase error tracking control of nonminimal phase systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1992, 114(3): 347 - 351.
- [8] Koren Y, Lo C C. Advanced controllers for feed drives[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1992, 41(2): 689 - 698.
- [9] Li Xiaoli, Chen Wei, Yan Rong. Adaptive compensation of contour errors based on BP neural networks[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(16): 1902 - 1906. [李小力,陈威,闫蓉. 基于 BP 神经网络的空间轮廓误差自适应补偿[J]. 中国机械工程, 2010, 21(16): 1902 - 1906.]
- [10] Zheng Ziwen. Research on servo control techniques for ultra-precision machine[D]. Changsha: National University

- of Defense Technology,2001. [郑子文. 超精密机床伺服控制技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2001.]
- [11] Sun D, Shao X, Feng G. A model-free cross-coupled control for position synchronization of multi-axis motions; Theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2007,15(2):306-314.
- [12] Sun Kaishan. Modeling of spatial contour error and compensation with cross-coupled controller in multi-axis machining[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology,2007. [孙开珊. 多轴空间轮廓误差的建模与交叉耦合补偿[D]. 武汉:华中科技大学,2007.]
- [13] Wang Baoren, Wang Jie, Zhang Chengrui, et al. Contour error vector model and its application to CNC systems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2010,16(7):1401-1407. [王宝仁,王婕,张承瑞,等. 数控系统轮廓误差矢量模型及应用[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(7):1401-1406.]
- [14] Xi X C, Poo A N, Hong G S. Taylor series expansion error compensation for a bi-axial CNC machine[C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics,2008, New York:IEEE,2008:1614-1619.
- [15] Liao Ping. Calculation of complex surface profile errors based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. China Mechanical Engineering,2010,21(2):201-205. [廖平. 基于粒子群算法和分割逼近法的复杂曲面轮廓度误差计算[J]. 中国机械工程,2010,21(2):201-205.]
- [16] Guo Hui, Lin Dajun. Profile error computation of complicated surface based on particle swarm optimization[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2008, 34(3):274-277. [郭慧,林大钧. 基于微粒群算法的复杂曲面轮廓度误差计算[J]. 东华大学学报:自然科学版,2008,34(3):274-277.]
- [17] Li Peixin, Ma Yue, Yu Dong, et al. A method of real-time estimation of contouring errors[J]. China Mechanical Engineering,2011,22(4):419-423. [李培新,马跃,于东,等. 一种实时轮廓误差估算方法[J]. 中国机械工程,2011,22(4):419-423.]
- [18] Kuang Yuchun, Shu Feng, Wu Longmei, et al. Numerical simulation method of forming grinding wheel contour for complex spiral curved surfaces[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2013,45(2):182-187. [况雨春,舒峰,吴龙梅,等. 复杂螺旋曲面成形磨砂轮廓形数值仿真方法[J]. 四川大学学报:工程科学版,2013,45(2):182-187.]

(编辑 黄小川)