文章编号：1000-8608(2008)02-0210-05

一种基于NURBS插补器的高精度交叉耦合控制方法

赵国勇[1,2]， 赵福令*[1]， 徐志祥[1]

（1.大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室，辽宁 大连 116024；
2.山东理工大学 机械工程学院，山东 淄博 255049）

摘要： 数控机床各联动轴动态性能不一致会给零件加工带来较大的轮廓误差.在分析传统机床轮廓控制方案不足的基础上，针对高精度数控加工需要，提出了一种基于NURBS插补器的简单实用的高精度交叉耦合控制方法，克服了传统交叉耦合控制方法轮廓误差模型计算的非线性、时变性、不精确性.在建立的基于DSP的数控实验台上验证了该方法的有效性.该方法对于零件的高精度数控加工具有重要意义.

关键词： 高精度加工；NURBS插补器；交叉耦合控制；DSP
中图分类号： TH12 **文献标志码：** A

0 引 言

随着高精度复杂型面零件数控加工不断增长，轮廓精度已成为CNC系统的一个重要精度指标.数控机床伺服系统结构复杂，且在运行过程中电气、机械参数会有变化，使得各轴实际的伺服动态性能不能完全匹配，这样在采用传统轮廓运动控制方法时，轮廓精度往往难以达到要求[1].

采用轮廓误差补偿技术是提高系统轮廓加工精度的有效途径.Sarachik和Ragazzini最早提出了交叉耦合控制（cross-coupled control，简称CCC）方法，用来进行轮廓误差补偿控制.该方法包括轮廓误差模型的建立和附加补偿修正量的分配，其原理主要是在每个采样周期根据各轴的反馈信息和插补值寻找最佳补偿率并将补偿修正信息反馈给各轴.随后国内外诸多学者对此方法展开研究[2~5]，但是由于采用的轮廓误差模型具有非线性、时变性，轮廓误差的计算繁琐、不够精确，很难满足数控系统实时性和高精度的要求.

交叉耦合控制方法研究中一个关键问题是：如何能准确、实时地计算出当前加工矢量点的轮廓误差，并做到算法简单，然后进行误差补偿控制.只有解决了这个关键问题，交叉耦合控制方法才能更加实用化.本文针对高精度数控加工需要，提出一种基于NURBS插补器的简单实用的交叉耦合控制方法，以取得良好的控制效果.

1 数控机床传统交叉耦合控制方案

在廓形加工系统中，轮廓误差是影响最大的误差.对复杂型面零件的数控加工，传统CNC系统都是将由CAD/CAM系统生成的几何型面和刀具路径按精度要求离散成大量直线段，再进行线性插补加工.这种方法的插补点不一定在曲线轮廓上.

轮廓误差的定义为刀具的实际位置距指定轨迹在轨迹法线方向上的偏差[5].如图1所示，对于一般二维曲线轮廓模型，设 P 为某时刻刀具实际位置，P^* 为该时刻指令位置，L 为过 P^* 点指令轮廓的切线，L 与 x 轴的夹角为 θ.E 为跟随误差，即刀具的实际位置与指令位置之间的距离，有 $E=P^*-P$，沿 x 方向和 y 方向的分量为 E_x、E_y.P_1 为曲线上 P 距离目标轮廓最近的点.刀具实际位置在 P 点时，轮廓误差 $\varepsilon=P_1-P$.设 P 点与切线 L 垂直于 P_1^* 点，传统的交叉耦合控制一般用 $\varepsilon^*=P_1^*-P$ 来近似 ε.通常由下式计算：

收稿日期： 2006-09-25； **修回日期：** 2008-01-19.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50275022).
作者简介： 赵国勇(1976-)，男，博士，讲师；赵福令*(1945-)，男，教授，博士生导师.

$$\varepsilon \approx \varepsilon^{*} = -E_x C_x + E_y C_y \tag{1}$$

其中

$$C_x = \sin\theta - E_x/(2\rho) \tag{2}$$

$$C_y = \cos\theta + E_y/(2\rho) \tag{3}$$

式(2)和(3)中 ρ 为曲线上该点的曲率半径.

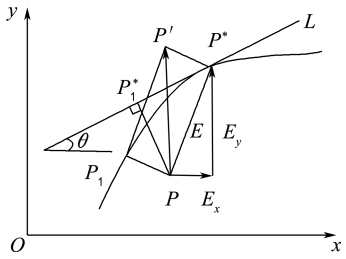

图 1　轮廓误差定义

Fig. 1　The definition of contour error

传统的交叉耦合控制根据式(1)至式(3)来近似计算轮廓误差 ε，建立轮廓误差模型，并通过一定的 PID 控制算法计算出补偿量并附加到各轴的控制中去，控制的目的是使刀具趋向期望的轮廓轨迹. 传统的二轴数控机床轮廓控制方案如图 2 所示，其中前馈控制的作用是减少伺服滞后和跟随误差.

这种交叉耦合控制方法是一个多变量、非线性、时变的控制系统，只适合跟随误差 E 较小即进给速度较低的情况，在进给速度较高的情况下用这种方法近似计算轮廓误差 ε 不够精确；并且这种方法中曲率半径 ρ 具有时变性，在每个插补周期计算繁琐，很难满足数控系统实时性的要求；这种 CCC 方法很难计算多轴数控加工时的轮廓误差.

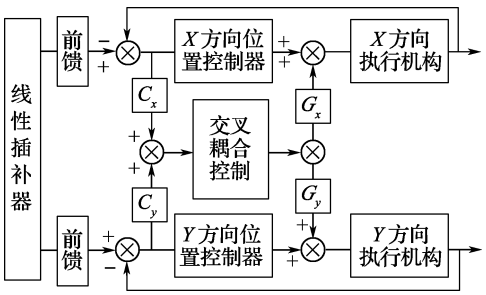

图 2　传统的数控机床轮廓控制方案

Fig. 2　The scheme of traditional CCC

2　一种简单实用的高精度 CCC 方法

针对高精度数控加工需要，本文提出一种基于 NURBS 插补器、简单实用的高精度 CCC 方法. 这种基于 NURBS 插补器的三轴 CCC 控制方案如图 3 所示，在每个采样周期根据 NURBS 插补器的插补结果、FIFO 内存中存储的数据以及从各工作台反馈回的实际位置信息计算出轮廓误差并分配到各轴，进而计算出跟随误差，再经位置控制计算出向伺服执行机构输出的电压控制量，控制执行机构运动进行数控加工.

在 CNC 系统软件中，除了基于硬件定时中断的插补、位控和 CCC 任务外，再开辟一插补子任务和一块内存，将插补子任务中 NURBS 插补得到的一部分微小线段(如 50 个)以先进先出(FIFO)的方式存储在内存中. 在每一个采样周期，存储在内存块中的插补点数据相应地调整变化.

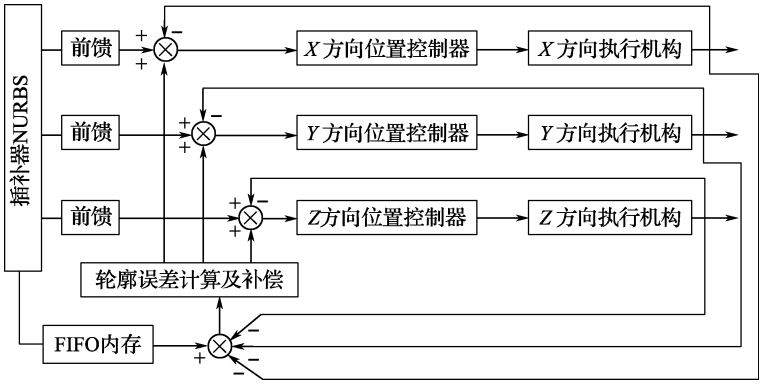

图 3　一种简单实用的高精度交叉耦合数控方案

Fig. 3　The simple applied high-precision CCC scheme

例如针对某一加工程序段，刚开始插补加工时在第 k 个采样周期，当 $k<30$ 时，由插补子任务中 NURBS 插补得到的存储在 FIFO 内存块中插补点为(P_{xi}，P_{yi}，P_{zi})，其中 $i=0,1,\cdots,k+20$；当

该加工程序段快要结束时，如还差 N 个采样周期结束，N＜20 时，由插补子任务中 NURBS 插补得到的存储在 FIFO 内存块中插补点为（P_{xi}，P_{yi}，P_{zi}），其中 $i=k-30,k-29,\cdots,k+N$；在其他时刻，由插补子任务中 NURBS 插补得到的存储在 FIFO 内存块中插补点为（P_{xi}，P_{yi}，P_{zi}），其中 $i=k-30,k-29,\cdots,k+20$.

因为 NURBS 曲线插补点均在曲线上，没有径向误差，加工精度高[6]，所以在每个采样周期，可根据各轴反馈的实际刀具位置与存储的一定数量的 NURBS 插补指令点，找到距离实际刀具位置 P 最近的点 P_1，则轮廓误差 $\varepsilon=P_1-P$. 很显然，这种计算 ε 的方法简单、准确，并可应用于多轴控制. 如果像传统 CNC 系统那样将由 CAD/CAM 系统生成的几何型面和刀具路径按精度要求离散成大量直线段，再进行线性插补加工，因为线性插补点不一定在曲线轮廓上，所以再采用这种计算轮廓误差 ε 的方法是不准确的，不适当的.

得到轮廓误差 ε 后，将 ε 沿坐标轴方向分解为 ε_x、ε_y、ε_z，则

$$\varepsilon_x=\varepsilon\frac{P_{1x}-P_x}{\sqrt{(P_{1x}-P_x)^2+(P_{1y}-P_y)^2+(P_{1z}-P_z)^2}} \tag{4}$$

$$\varepsilon_y=\varepsilon\frac{P_{1y}-P_y}{\sqrt{(P_{1x}-P_x)^2+(P_{1y}-P_y)^2+(P_{1z}-P_z)^2}} \tag{5}$$

$$\varepsilon_z=\varepsilon\frac{P_{1z}-P_z}{\sqrt{(P_{1x}-P_x)^2+(P_{1y}-P_y)^2+(P_{1z}-P_z)^2}} \tag{6}$$

其中（P_{1x}，P_{1y}，P_{1z}）为 P_1 的空间坐标；（P_x，P_y，P_z）为 P 的空间坐标.

然后根据一定的 PID 控制算法计算出各轴的跟随误差补偿修正量并累加到跟随误差中去参与坐标轴的位置控制. 设在第 k 个采样周期由 NURBS 曲线插补器得到的插补指令值和采样得到的各轴实际位置信息计算出跟随误差为 $E_x(k)$、$E_y(k)$、$E_z(k)$. 将轮廓误差 $\varepsilon(k)$ 沿坐标轴方向分解为 $\varepsilon_x(k)$、$\varepsilon_y(k)$、$\varepsilon_z(k)$，计算各轴跟随误差补偿量时采用 PD 算法，则 x、y、z 轴的跟随误差补偿修正量为

$$\zeta_x(k)=k_{px}\varepsilon_x(k)+k_{dx}\varepsilon_x(k) \tag{7}$$

$$\zeta_y(k)=k_{py}\varepsilon_y(k)+k_{dy}\varepsilon_y(k) \tag{8}$$

$$\zeta_z(k)=k_{pz}\varepsilon_z(k)+k_{dz}\varepsilon_z(k) \tag{9}$$

式中：k_{px}、k_{dx} 为计算 x 轴跟随误差补偿量时的比例系数和微分系数；k_{py}、k_{dy} 为计算 y 轴跟随误差补偿量时的比例系数和微分系数；k_{pz}、k_{dz} 为计算 z 轴跟随误差补偿量时的比例系数和微分系数.

经过修正补偿后 x、y、z 轴的跟随误差为

$$E'_x(k)=E_x(k)+\zeta_x(k) \tag{10}$$

$$E'_y(k)=E_y(k)+\zeta_y(k) \tag{11}$$

$$E'_z(k)=E_z(k)+\zeta_z(k) \tag{12}$$

得到轮廓误差后再由位置控制器计算控制量. 如图 1 所示，这种方法是沿着 PP' 方向进行误差补偿控制的. 这种交叉耦合控制方法流程图如图 4 所示. 这种算法的优点是简单，计算轮廓误差 ε 的精度高，符合数控系统实时性、稳定性的要求，适用于多轴高精度数控加工.

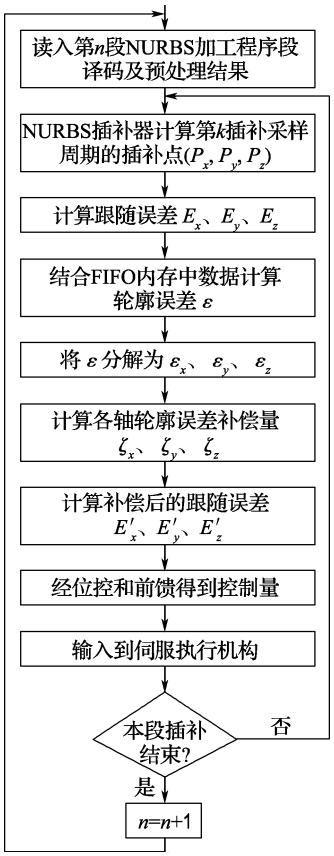

图 4 基于 NURBS 插补器的交叉耦合控制流程图

Fig. 4 The CCC flowchart based on NURBS curve interpolation

3　交叉耦合控制实验

3.1　实验平台

为了验证所提出的 CCC 方法，搭建了一个数控实验平台，硬件结构如图 5 所示. 其中，PC 机和 DSP 运动控制器构成上下位机结构，PC 作为上位机，充当人机接口，实现命令控制、代码编辑及显示等功能；DSP 运动控制器作为下位机，实现插补和位置控制等. 上位机以 Windows2000 为工作平台，采用 VC＋＋6.0 作为开发工具，通过 USB2.0 实现上位机与下位机之间的数据通信. 采用的 DSP 控制卡是 SEED-DEC2812，其中核心 DSP 处理芯片为 TMS320-F2812，主频为 150 MHz，开发环境为 CCS2.0[7]. 采用了松下伺服驱动器和伺服电机，型号分别为 MSDA023A1A 和 MSMA022A1C. 在每个伺服电机之后通过丝杠传动机构连结和驱动工作台. 本实验平台主要是通过在 DSP 运动控制器里编写控制软件，来实现特定的控制模块，以进行实验研究. 插补和采样周期均为 2 ms.

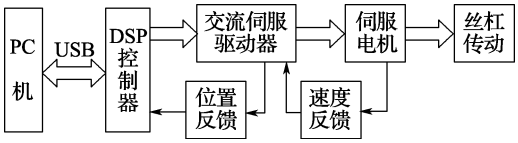

图 5　实验平台硬件结构图

Fig. 5　The CNC hardware structure

3.2　交叉耦合控制实验

本实验是驱动两联动轴走圆轮廓，分两种情况：一是采用传统交叉耦合控制方案；一是采用本文提出的基于 NURBS 插补器的高精度交叉耦合控制方法. 并将两种情况下圆轮廓曲线和轮廓误差曲线进行对比.

圆轮廓的半径为 16.6 mm，运行速度为 15 mm/s. 当采用传统交叉耦合控制时圆轮廓曲线和轮廓误差曲线分别如图 6 和 7 所示. 其中 data1 表示的是理想圆轮廓；data2 表示的是实际圆轮廓.

当采用所提出的 CCC 方法时圆轮廓曲线和轮廓误差曲线分别如图 8 和 9 所示. 其中 data1 表示的是理想圆轮廓；data2 表示的是实际圆轮廓.

对比图 6 和 8 发现：采用提出的 CCC 后，实际圆轮廓与理想圆轮廓曲线更加接近和吻合；对比图 7 和 9 发现：采用提出的 CCC 后，轮廓误差大大减小，轮廓误差最大值从 68 μm 左右减小到了 35 μm 左右. 这说明提出的 CCC 方法是非常有效的.

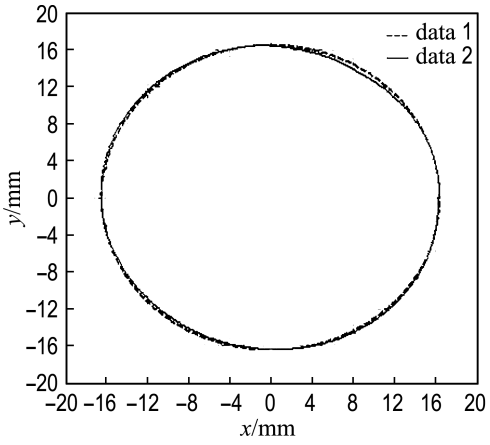

图 6　采用传统交叉耦合控制时的圆轮廓曲线

Fig. 6　The circle that adopted traditional CCC

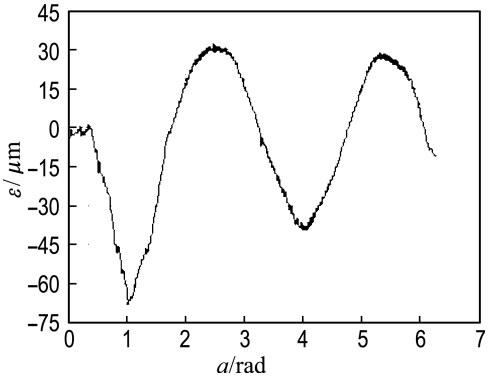

图 7　采用传统交叉耦合控制时的轮廓误差曲线

Fig. 7　The contour error curve that adopted traditional CCC

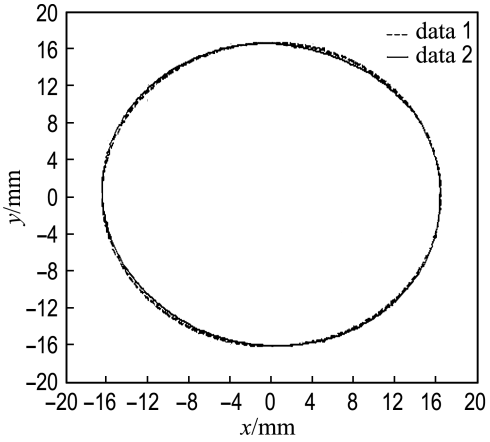

图 8　采用提出的 CCC 时的圆轮廓曲线

Fig. 8　The circle that adopted the developed CCC

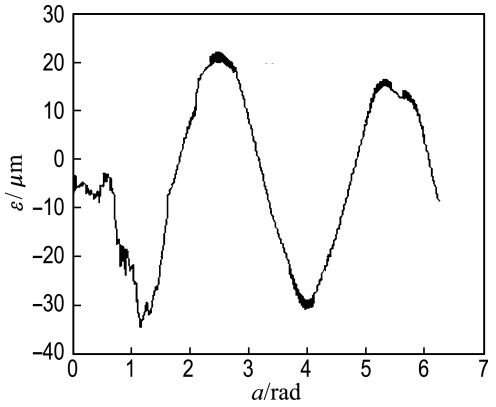

图9 采用提出的CCC时的轮廓误差曲线

Fig. 9 The contour error curve that adopted the developed CCC

4 结 语

伺服系统结构复杂,且涉及机械、电气、控制、摩擦及在运动过程中参数的变化,轮廓精度往往难以达到要求.本文针对高精度数控加工需要,提出了一种基于NURBS插补器的简单实用的交叉耦合控制方法,详细讨论了控制方法和流程.最后实验证明该方法可取得良好的控制效果.

参考文献:

[1] 李圣怡,张云洲,张明亮,等. 交叉耦合算法的超精密数控机床伺服控制[J]. 制造技术与机床,2000,**7**:10-12

[2] YEH Syh-shiuh, HSU Pau-lo. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design [J]. **IEEE/ASME Transaction on Mechatronics**, 2002, **7**(1):44-51

[3] LIN Faa-jeng, SHIEH Hsin-jang. An adaptive recurrent-neural-network motion controller for X-Y table in CNC machine [J]. **IEEE Transactions on Cybernetics**, 2006, **36**(2):286-299

[4] YEH Syh-shiuh, HSU Pau-lo. New approach to biaxial cross-coupled control [J]. **Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications.** Anchorage: IEEE, 2000:168-173

[5] 王广炎,张润孝,帅 梅,等. 数控机床的轮廓误差的控制[J]. 机床与液压,1999,**6**:59-61

[6] 赵国勇,徐志祥,赵福令. 高速高精度数控加工中NURBS曲线插补的研究[J]. 中国机械工程,2006,**17**(3):291-294

[7] 苏奎峰. TMS320F2812原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2005

High-precision cross-coupled control approach based on NURBS curve interpolator

ZHAO Guo-yong[1,2], ZHAO Fu-ling[*1], XU Zhi-xiang[1]

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The dynamic performance variance of each machine axis may lead to bigger contour error when machining. After analyzing the weakness of the conventional machine contour control scheme, a simple and practical high-precision cross-coupled control(CCC) approach based on NURBS curve interpolator is put forward aiming at the demand of high accuracy CNC machining, which overcomes the non-linearity, time-varying and inexactness of traditional CCC contour error model. The validity of this approach is tested on a CNC experiment table based on DSP. The conclusion is much significant to high accuracy machining.

Key words: high-precision machining; NURBS curve interpolator; cross-coupled control; DSP