

文章编号 1004-924X(2010)07-1577-09

可配置型五坐标 B 样条插补控制器的研制

刘 源, 韩振宇, 王永章, 富宏亚

(哈尔滨工业大学 数控技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对采用五轴联动数控机床的线性插补功能进行数控加工存在的不足,提出了一种 B 样条插补控制策略用于五轴联动数控机床以实现复杂曲面零部件的高速高精数控加工。参考开放式、模块化体系结构控制器(OMAC)标准,开发了具有 B 样条插补功能的五轴联动数控机床运动控制器。该控制器将控制任务按照实时性要求进行划分。人机交互、代码解析及参数映射关系构造等过程离线完成,插补运算、离散逻辑控制及逆运动学变换等过程由实时线程执行,保证了数控系统的硬实时性。为简化 NC 程序的编制过程,控制器设计为接收工件坐标系下的加工信息。通过开发适应各种形式数控机床的逆运动学变换模块,并将机床参数设计为可用户定制,使得控制器具有良好的通用性。在控制器内部建立 NC 程序文件中位置曲线和方位曲线间的参数映射关系,使得机床平动轴与转动轴间的运动规划符合实际加工要求,并可保证加工精度。实际加工实验中,在采用 B 样条插补算法的 NC 程序量降低为线性插补 NC 程序量 15% 倍时,其插补误差为线性插补误差的 45%,控制器插补精度为 0.68,表明该 B 样条插补控制器可以满足五坐标数控加工的要求。

关键词:数字控制;五坐标加工;B 样条插补;运动控制器

中图分类号: TP273.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1577

Development of configurable motion controller with 5-axis B-spline interpolation function

LIU Yuan, HAN Zhen-yu, WANG Yong-zhang, FU Hong-ya

(CNC Technology Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To improve the machining speed and precision of mechanical parts with complex shapes by Computer Numerical Control (CNC) machining, a B spline interpolation method for 5-axis CNC machine tools is proposed. By taking the Open and Modular Architecture Controller (OMAC) as a reference, a motion controller with B-spline interpolation function is developed. The controller divides the controlling tasks in accordance with real-time request, executes the man-machine interactive, code analysis and parameter mapping in an offline environment and runs the interpolation operation, discrete logic control and inverse kinematic transformation in a real-time thread. Therefore, the real-time performance of the controller is well realized by methods above. To simplify the procedure of NC program, the machining information received by the controller are vectors in a part coordinate system. Furthermore, the controller can offer a good generality by developing Inverse Kinematic Transformation Module (IKTM) units suitable for various 5-axis machine tools and designing the parameters of

收稿日期:2009-03-13;修订日期:2009-04-18.

基金项目:黑龙江省科技攻关重点项目(No. GB05A501)

machine tools as the customizable parameters. The mapping relation between the orientation and the position parameters in the NC program is established by the controller. As a result, the motions of linear axes and motion of rotary axis meet the machining requirement well and good machining accuracy is obtained. In a machining process, when the NC program capacity for B spline interpolation is 15% that of the NC program capacity for linear interpolation, its interpolation error is 0.45% that of the linear one. The interpolation accuracy of the controller is 0.68. These results show that the developed B spline interpolation controller can well meet demands of NC machining and has a good controlling performance.

Key words: numerical control; 5-axis machining; B-spline interpolation; motion controller

1 引言

五轴联动数控机床是机床数控技术制高点的重要标志,在国民经济发展和国防建设等方面具有特别重要的现实意义^[1-2]。目前,叶轮、叶片、船用螺旋桨、重型发电机转子、汽轮机转子、大型柴油机曲轴等复杂零部件的加工普遍采用五轴联动数控机床的线性插补功能完成,然而,该加工方式存在数控代码文件庞大、加工效率低和加工质量差等缺点,严重影响了五轴联动数控机床潜力的发挥^[3-5]。SIEMENS、FANUC 和 DMG 等数控机床制造商在其高端数控系统中推出了参数曲线插补功能,并在实际应用中取得了良好的加工效果^[6]。但是,这些参数曲线插补功能的实现方法尚未有公开的介绍,而购买具有参数曲线插补功能的数控机床价格昂贵,且购买条件受到诸多限制。

目前,五坐标样条曲线插补技术已成为机床数控领域的研究热点。Langeron 等人提出了一种采用非均匀 B 样条曲线表达刀具路径和刀具方位的数控代码指令格式^[7]。陈良骥等人提出双 NURBS 插补指令格式^[8]。Fleisig 等人提出了采用五次多项式样条插值刀具路径,采用贝齐尔曲线插值刀具方位点的曲线插补方法^[9]。以上曲线插补方法较好地解决了线性插补存在的问题,但仍有以下不足:Langeron 及陈良骥等人提出的方法中输入控制器的样条曲线为机床坐标系下加工信息,数控程序依赖于数控机床的形式,当加工条件变化时,NC 程序需重新编制;Fleisig 等人对型值点直接插值,控制器中的信息量将成倍增加,NC 程序量严重受限;位置曲线和方位曲线参数取同的方法只适用于两曲线长度相当的情况,当

长度差别较大时将出现大的加工误差。

基于以上问题,参考美国 OMAC 协议标准,本文设计并开发了具有五坐标 B 样条插补功能的可配置型控制器。该控制器最小量运行运动控制中的实时性任务,满足数控系统硬实时性要求。其 B 样条插补功能中立于机床运动学,可用于任意形式的五坐标机床、机器人手臂及并联机构的运动控制^[10-12]。通过建立位置曲线和方位曲线间的参数映射,机床平动轴与转动轴间的运动规划符合实际加工要求,实际加工实验验证了控制器的性能及插补方法的正确性。

2 可配置型控制器的结构

为满足可配置型运动控制器的要求,增强数控系统的开放性,设计的五坐标 B 样条插补控制器采用模块化的体系结构。每个模块为功能独立的组件单元,控制器的功能扩充及修改可针对具体模块施行。此外,通过更换有限模块单元,可使控制器方便、灵活地适应不同的机床形式。可配置型控制器的结构如图 1 所示。

人机接口模块单元负责操作者与控制器之间的交互,主要完成在系统运行前和运行中系统参数的修改和设定;任务协调模块单元进行任务分配,负责系统内各模块的协调与调度;任务生成模块单元用于解析零件加工程序文件,提取加工程序中的各种信息,生成包含运动信息的运动段指令和逻辑控制指令,还包括对运动指令进行刀具补偿;轴组模块单元完成插补任务,对译码得到的运动指令按照进给速度要求进行细分,得到单个插补周期内的进给量,并输出给各个轴模块;轴模块单元接收来自轴组模块的指令,同时读取外部的反馈信息,根据用户需求选择性地调用伺服控

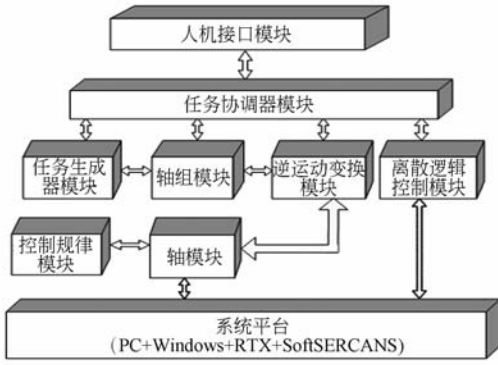


图1 可配置型控制器的结构

Fig.1 Structure of reconfigurable controller

制规律完成位置控制或速度控制等功能,并将控制信息发送给逆运动学变换模块单元;控制规律模块单元负责计算伺服控制规律,提供多种控制策略,如PID控制规律、模糊控制规律和神经网络等;离散逻辑控制模块单元负责对外部输入和内部状态变量进行布尔运算,得到相应输出和内部状态变量,并对外部输入输出设备进行控制;逆运动学变换模块单元负责对工件坐标系下表示刀具位置的位置矢量点及表示刀轴方位的刀位矢量点进行逆机床的运动学变换,求取插补周期结束时刻机床各运动轴的位置信息,并将控制信息发送给外部执行单元。

人机接口、任务协调和任务生成等模块单元执行非实时性任务,为机床控制器的非实时模块,采用组件对象模型(Component Object Model, COM)技术开发。轴组、轴、控制规律、离散逻辑控制和逆运动学变换等模块单元执行实时性任务,为机床控制器的实时模块,采用实时动态链接库(Real-time Dynamic Link Library, RTDLL)技术开发。各模块单元对外提供可操作和可执行接口,实现了功能应用与技术实现的分离,增强了模块单元的可重用性。各模块单元向用户提供程序接口,便于集成先进加工经验及开发特定应用的模块单元。

该控制器为运行在PC机上的应用程序系统,控制器产生的机床各轴运动指令通过SERCOS(数控系统和数字伺服通讯的唯一国际标准)接口传递给伺服系统。同时,加工过程中的检测量及监控量也通过该接口传输回控制器,由控制器进行处理。

3 B样条插补的指令格式

对零部件进行数控加工时,需要生成定义刀具相对工件表面运动的刀具路径。三坐标数控加工的刀具轨迹由一系列笛卡尔矢量表达。每个矢量(位置矢量)表达一个加工位置。对五坐标刀具路径而言,需同时指定刀具的姿态(刀位矢量)。因而,五坐标的刀具路径由位置矢量序列和刀位矢量序列构成的矢量集表达。刀具路径信息中的位置矢量 P 和方位矢量 T 如图2所示。

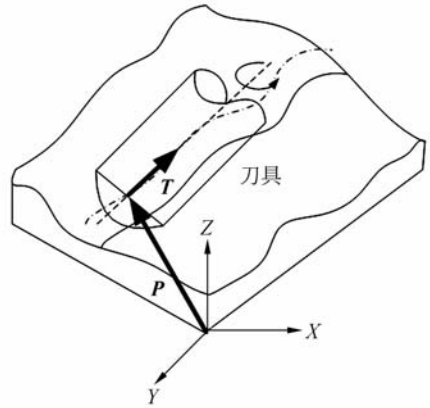


图2 刀具路径信息中的位置矢量和方位矢量

Fig.2 Position vector P and orientation vector T in tool path

用CAM系统进行五坐标数控程序编制时,根据所选取的刀具路径生成方法、初始给定的刀倾角和刀转角进行路径规划,根据干涉判别方法进行修正,可以分别计算出刀具刀心点位置矢量和刀轴方位矢量。将求得的一系列位置矢量和刀位矢量分别进行非均匀B样条拟合,根据拟合曲线信息生成符合图3所示的B样条插补指令格式的NC加工程序。

如图3所示,G05.1为准备机能指令,控制器读入其后的样条曲线信息进行插补运算; PX, PY, PZ 等代码指定位置样条曲线的控制顶点, PK 等代码指定其节点矢量; F 代码为进给速度指令; TX, TY, TZ 等代码指定方位样条曲线的控制顶点, TK 等代码指定其节点矢量。不同于一般的商品化机床,输入控制器的样条曲线信息其所在坐标系为工件坐标系,当机床形式发生变化时,保持NC程序文件不变,只需选取相应的逆运动学变换模块单元并定制机床参数即可构建适应新的机床形式的运动控制器。

```
G05.1 PX_PY_PZ_PK_F_;
      PX_PY_PZ_PK_;
      PX_PY_PZ_PK_;
      .....
      TX_TY_TZ_TK_;
      TX_TY_TZ_TK_;
      TX_TY_TZ_TK_;
      .....
      PK_TK_;
      .....
      PK_TK_;
```

图 3 B 样条插补指令格式

Fig. 3 B-spline interpolation format

4 数控程序信息提取及参数映射建立

4.1 数控程序信息提取

NC 程序输入数控机床控制器后,控制器的任务生成器模块单元将提取 NC 程序中的 B 样条曲线信息并开辟存储空间对加工信息存储。任务生成器模块单元中开发的用于加工信息存储的数据结构(C++语言编写)如下所示:

```
typedef struct spline_curve_struct{
    double traverse_rate, start_rate, end_rate; //速度信息
    double * nodevt; //位置曲线的结点矢量数组
    double * con1pt, * con2pt, * con3pt; //位置曲线的控制顶点数组
    double * tnodevt; //方位曲线的结点矢量数组
    double * tcon1pt, * tcon2pt, * tcon3pt; //方位曲线的控制顶点数组
    double * finalmval; //分段三次样条曲线的 M 参数值
    double * finalhvalue; //分段三次样条曲线 h 的参数值
    .....
} spline_curve;
typedef struct singleStep2_struct{
    SINGLESTEP_TYPE singleStep_type;
    m_struct m_struct;
    spspline spspline_struct;
```

```
spline_curve spline_curve;
.....
}singleStep2;
Typedef std:: deque < singleStep2 > singleStep_deque;
```

B 样条曲线信息及分段三次样条曲线信息存入双端队列 singleStep_deque 中,待译码工作完成以后通过共享内存传递给轴组模块单元进行数据点的密化工作。

4.2 参数映射构造

将位置曲线的节点矢量(数组 nodevt 中数值形成的矢量)记为 $U = \{u_i\}_{i=0}^n$,将刀位曲线的节点矢量(数组 tnodevt 中数值形成的矢量)记为 $V = \{v_i\}_{i=0}^n$ 。B 样条曲线表达的刀具路径信息中,节点的值间接反映了刀具的加工距离,另外,对曲线的实时插补工作最终将转化为对节点矢量的插补。因而,为保证平动轴与转动轴的运动与实际刀具运动要求一致,可以通过建立位置曲线节点矢量与刀位曲线节点矢量间的映射关系来获得平动轴运动与旋转轴运动的协调。采用分段三次样条插值方法构建 U 和 V 各分量间的函数关系。记插值样条函数为 $u = \varphi(v)$,则 u 在 $[v_j, v_{j+1}]$ ($j = 0, 1, \dots, n-1$) 上的表达式如下所示:

$$\varphi(v) = \frac{(v_{j+1} - v)^3}{6h_{j+1}}M_j + \frac{(v - v_j)^3}{6h_{j+1}}M_{j+1} + u_j \frac{h_{j+1}^2}{6}M_j + u_j + \frac{v - v_j}{h_{j+1}}(u_{j+1} - u_j - \frac{h_{j+1}^2}{6}(M_{j+1} - M_j)) - \frac{h_{j+1}^2}{6}M_j, \quad (1)$$

式中: $h_j = v_j - v_{j-1}$; M_j 为样条系数列。

5 曲线的实时插补运算

当双端队列 singleStep_deque 中的信息通过共享内存传递给轴组模块,并且控制器接收到 autorun 指令时,轴组模块进行实时插补运算。

假设输入控制器的位置样条曲线为 $p(u)$,方位样条曲线为 $r(v)$,任务生成器模块单元生成的分段三次样条曲线为 $u = \varphi(v)$ 。以第 $k+1$ 个插补周期的插补点求取为例说明曲线的实时插补运算过程。

假定进给速度设定为 v ,控制器的插补周期设定为 T ,则有:

$$v = \left\| \frac{d\mathbf{p}(u)}{dt} \right\| = \|\mathbf{p}'(u)\| \cdot \frac{du}{dt}, \quad (2)$$

所以:

$$\frac{du}{dt} = \frac{v}{\|\mathbf{p}'(u)\|}, \quad (3)$$

将参数 u 对 t 进行二阶 Taylor 展开, 得其截断高阶余项的计算公式:

$$u_{k+1} = u_k + T \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=kT} + \frac{T^2}{2} \cdot \left. \frac{d^2u}{dt^2} \right|_{t=kT}, \quad (4)$$

这里 $u_k = u(t_k)$ 为第 k 个插补周期, $t_k = kT$ 时刻参数 u 的值。

从而:

$$u_{k+1} = u_k + \frac{v(u_k) \cdot T_s}{\left\| \frac{d\mathbf{p}(u)}{du} \right\|_{u=u_k}}, \quad (5)$$

假定 $\mathbf{p}(u_k)$ 和 $\mathbf{p}(u_{k+1})$ 分别为参数 u_k 和 u_{k+1} 对应的位置样条曲线上的插补点, r 为该两点对应的曲率圆弧半径, L 为两点间弦长, 其对应关系如图 3 所示。其中 ξ 为弓高误差。

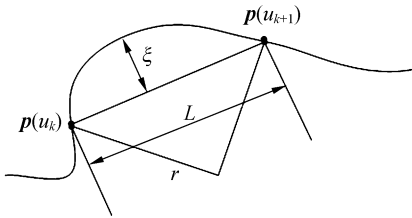


图4 插补过程中的弓高误差

Fig. 4 Chord error in interpolation process

两插补点间的弦长通过下式求取:

$$L = \|\mathbf{p}(u_{k+1}) - \mathbf{p}(u_k)\|, \quad (6)$$

弓高误差的求取表达式为:

$$\xi = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

从而可以求出满足弓高误差要求的插补最大弦长为:

$$L_{\text{exp}} = 2\sqrt{\xi(2r - \xi)}. \quad (8)$$

将式(6)求得的插补点间弦长与式(8)求得的插补最大弦长进行比较, 如果 L 超出最大弦长 L_{exp} 的范围, 则将 L_{exp} 作为插补弦长对 $\mathbf{p}(u_{k+1})$ 进行修正, 否则按照式(5)求得的 u_{k+1} 进行曲线插补。这样, 在曲率半径比较大的区域, 机床将按照给定的进给速度进行切削加工, 当进入曲率半径小的区域时, 通过降低切削速度使得控制器配置

过程中指定的插补误差得到保证。

五坐标数控插补过程中, 如何求取不同插补时刻机床的旋转轴角度值是五坐标插补技术的一个重要问题。文献7及文献8将位置曲线及方位曲线参数取同的做法只适用于位置曲线和方位曲线长度相当, 且曲线曲率变化均匀的场所。当两曲线长度存在较大差别或曲线曲率变化规律相似度较差时, 插补求得的机床角度值将存在较大的误差。提出的B样条插补控制方法中位置曲线参数及方位参数存在一一对应的关系, 求取插补周期结束时刻机床旋转轴角度值最终将转化为求取方位曲线参数值的问题。建立位置曲线参数和方位曲线参数间的映射关系, 可以获得机床线性轴与旋转轴间的协调运动关系。在4.2节中通过分段三次样条插值方法构建了位置曲线参数及方位曲线参数间的函数关系。将求得的 u_{k+1} 带入分段三次样条曲线方程 $u = \varphi(v)$, 可求出第 $k+1$ 个插补周期方位曲线对应的参数值 v_{k+1} 。

将求得的 u_{k+1} 和 v_{k+1} 依次带入位置曲线方程 $\mathbf{p}(u)$ 和方位曲线方程 $\mathbf{r}(v)$, 可以求出第 $k+1$ 个插补周期的插补点坐标。

6 插补点的逆运动学变换

由第3节可知, 机床控制器接收的NC文件中的曲线信息为工件坐标系下的加工信息, 因而, 经轴组模块实时插补运算所得的数据点位于工件坐标系下, 这些数据还不能输出给驱动器控制机床运动。逆运动学变换模块用于对插补所得数据点执行逆机床的运动学变换操作, 将该数据点坐标映射至数控机床的机床坐标系。下面以带回转工作台的X, Y, Z, A, C型五轴联动数控机床(带有三个平动轴和两个转动轴)为例, 说明插补点的逆机床的运动学变换过程。

假设求得的第 $k+1$ 个插补周期的插补点为: 位置矢量 $\mathbf{p}(t_{k+1}) = [x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}]$, 方位矢量 $\mathbf{r}(t_{k+1}) = [l_{k+1}, m_{k+1}, n_{k+1}]$ 。工件坐标系原点与机床坐标系原点间的距离为 λ (λ 为可定制参数)。

假定 $\mathbf{p}(t_{k+1})$ 和 $\mathbf{r}(t_{k+1})$ 映射至机床坐标系后, 所得机床各轴的运动坐标值为 $X_{\text{com}}, Y_{\text{com}}, Z_{\text{com}}, A_{\text{com}}, C_{\text{com}}$ 。

转动轴运动坐标值按下述方程求取:

$$\begin{cases} A_{\text{com}} = \arctan \frac{\sqrt{l_{k+1}^2 + m_{k+1}^2}}{n_{k+1}}, n_{k+1} > 0, \\ A_{\text{com}} = 90^\circ, n_{k+1} = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{\text{com}} = 90^\circ + \arctan \left| \frac{m_{k+1}}{l_{k+1}} \right|, l_{k+1} \geq 0, m_{k+1} \geq 0 \\ C_{\text{com}} = 270^\circ - \arctan \left| \frac{m_{k+1}}{l_{k+1}} \right|, l_{k+1} \leq 0, m_{k+1} \geq 0 \\ C_{\text{com}} = 270^\circ + \arctan \left| \frac{m_{k+1}}{l_{k+1}} \right|, l_{k+1} \leq 0, m_{k+1} \leq 0 \\ C_{\text{com}} = 90^\circ - \arctan \left| \frac{m_{k+1}}{l_{k+1}} \right|, l_{k+1} \geq 0, m_{k+1} \leq 0 \end{cases}, \quad (10)$$

平动轴运动坐标值按下述方程求取:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{com}} \\ Y_{\text{com}} \\ Z_{\text{com}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C_{\text{com}} \\ -\cos A_{\text{com}} \cdot \sin C_{\text{com}} \\ \sin A_{\text{com}} \cdot \sin C_{\text{com}} \end{bmatrix} \cdot x_{k+1} + \begin{bmatrix} \sin C_{\text{com}} \\ \cos C_{\text{com}} \cdot \cos A_{\text{com}} \\ -\cos C_{\text{com}} \cdot \sin A_{\text{com}} \end{bmatrix} \cdot y_{k+1} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sin A_{\text{com}} \\ \cos A_{\text{com}} \end{bmatrix} \cdot z_{k+1} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda \cdot \sin A_{\text{com}} \\ \lambda \cdot \cos A_{\text{com}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

开发了对应各种形式五轴联动数控机床的逆机床运动学变换模块单元,机床使用者可以根据自己机床的形式选取相应的逆运动学变换模块单元,定制机床参数,最后按照控制器的架构配置出自己需要的具有样条曲线插补功能的运动控制器。

7 实验验证及性能分析

将 B 样条插补运动控制器配置到齐齐哈尔第二机床厂与本实验室联合研制的带回转工作台的 X、Y、Z、A、C 型五轴联动数控机床 XKV715 上,并对图 5 所示的自由型曲面进行了加工实验。

将进给速度指令设定为 3 600 mm/min,插补周期设定为 0.002 5 s,对该自由曲面进行数控加工。位置曲线插补速度如图 7(a)所示,方位样条曲线插补速度如图 7(b)所示。由图可知当以指定速度恒速进给时,进给速度控制在 ± 3 mm/min 的误差范围内,其波动不超过设定速度的 0.083%。

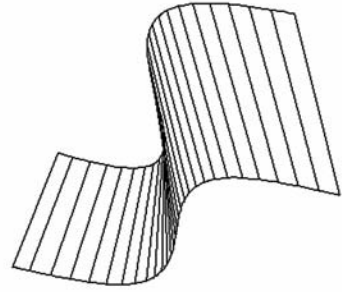
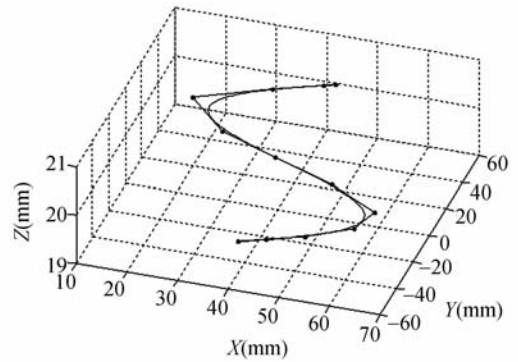


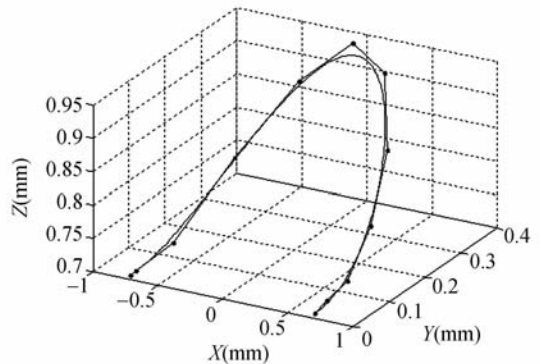
图 5 待加工的自由型曲面

Fig. 5 Free-form surface waiting to be processed



(a)位置样条曲线

(a) Position spline curve



(b)方位样条曲线

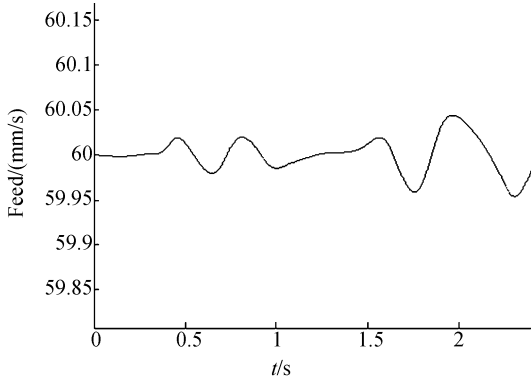
(b) Orientation spline curve

图 6 位置样条曲线和方位样条曲线

Fig. 6 Position spline curve and orientation spline curve

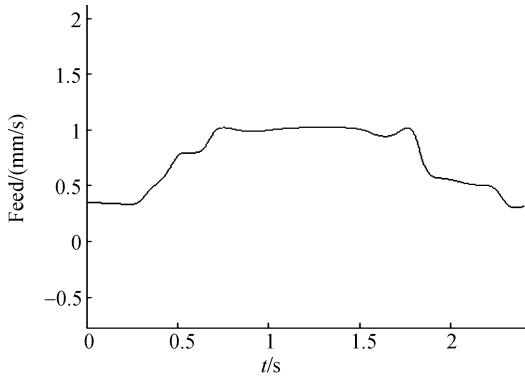
对该自由曲面分别采用五坐标线性插补方法和开发的 B 样条插补方法进行数控加工。其中线性插补时 NC 程序包含有 156 段加工信息,样条插补的 NC 加工程序为由 24 个控制顶点决定的两 B 样条曲线加工信息。

根据加工过程中的插补误差数据绘制了两种加工方法的插补误差曲线,如图 8 所示。采用 B



(a)位置曲线插补速度

(a)Feedrate of position curve



(b)方位样条曲线插补速度

(b)Feedrate of orientation curve

图 7 位置曲线插补速度及方位样条曲线插补速度

Fig. 7 Feedrates of position curve and of orientation curve

样条插补控制器进行数控加工时,在 NC 程序大量减少的同时,加工误差降低为直线插补误差的 45%。

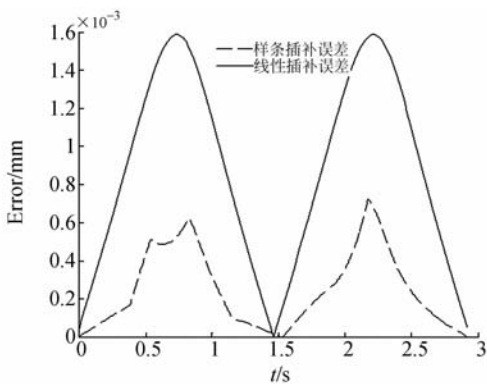


图 8 两种加工方法插补误差对比

Fig. 8 Interpolation error comparison of two machining methods

图 9 所示为图 5 自由曲面采用 B 样条插补控制器加工时,加工过程中图片及加工结果图片。

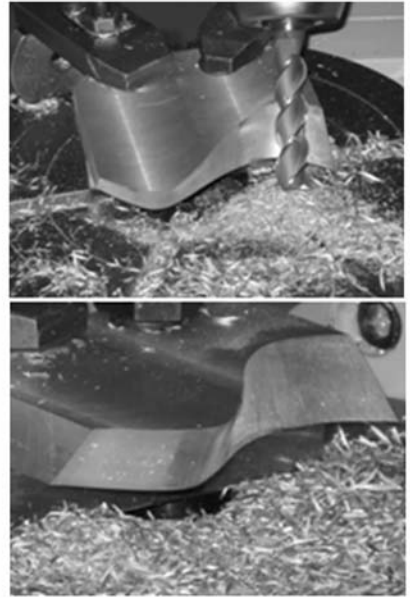


图 9 自由曲面加工过程(上)及加工结果(下)图片
Fig. 9 Photos of free-form part in machining process (top) and final machined part(bottom)

8 结 论

参考美国 OMAC 标准,本文设计并开发了具有五坐标 B 样条插补功能的可配置型运动控制器。该控制器具有可选配的机床逆运动学变换模块单元,机床参数设计为可定制参数,控制器可适应于各种形式的五轴联动数控机床。控制器接收的 B 样条曲线插补指令为工件坐标系下的加工信息,程序编制简单,并且输入控制器的信息量不会发生膨胀,满足了数控系统硬实时性要求。该 B 样条插补方法中立于机床运动学,也可用于机器人等领域的运动控制^[13-16]。通过构建位置样条曲线参数和方位样条曲线参数间的映射关系,机床各轴的运动分配更加合理,保证了加工精度。实际加工实验中,采用 B 样条插补时 NC 程序量降低为线性插补 NC 程序量 15%时,其插补误差为线性插补误差的 45%,控制器插补精度为 0.68 μm。该 B 样条插补控制器具有良好的控制性能。

参考文献:

- [1] 林胜. 五轴数控机床发展与应用[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 1-6.
LIN S. Developing of NC machine with simultaneously movement of five machine axis and application in industry [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2005, 41(4): 1-6. (in Chinese)
- [2] 杜玉湘, 陆启建, 刘明灯. 五轴联动数控机床的结构和应用[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(3): 14-20.
DU Y X, LU Q J, LIU M D. Structure and application of five-axis linkage CNC machine [J]. *Machine Building & Automation*, 2008, 37(3): 14-20. (in Chinese)
- [3] WANG Y Z, MA X B, CHEN L J. Realization methodology of a 5-axis spline interpolator in an open CNC system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(4): 362-369.
- [4] ANOTAIPAIBOON W, MAKHANOV S. Curvilinear space-filling curves for five-axis machining [J]. *Computer-Aided Desigh*, 2008, 40(3): 350-367.
- [5] ZHANG D L, ZHOU L S. Intelligent NURBS interpolator based on the adaptive feedrate control [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(5): 469-474.
- [6] YOU Y P, WANG M, ZHU J Y. An interpolator for NURBS curve machining with high-speed and high accuracy [J]. *Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 2001, 13(10): 943-947.
- [7] LANGERON J M, DUC E, LARTIGUE C. A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves [J]. *Computer-Aided Desigh*, 2004, 36(12): 1219-1229.
- [8] 陈良骥, 王永章, 富宏亚. 五轴联动双 NURBS 曲线的生成与插补方法研究[J]. 机械制造, 2006, 44(1): 67-70.
CHEN L J, WANG Y Z, FU H Y. Study on generation and interpolation methodology of five-axis coordinated Bi-NURBS curve [J]. *Machinery*, 2006, 44(1): 67-70. (in Chinese)
- [9] FLEISIG R V, SPENCE A D. A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi-axis machining[J]. *Computer-Aided De-*
sigh, 2001, 33(1): 1-15.
- [10] 节德刚, 刘延杰, 孙立宁. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 171-178. (in Chinese)
- [11] 张文博, 范大鵬, 朱华征. 基于采样控制理论的光电跟踪伺服系统内模控制[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(2): 221-228.
ZHANG W B, FAN D P, ZHU W H. Internal model control for electro-optical tracking servo system based on sampled-data control theory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 221-228. (in Chinese)
- [12] 金振林, 李研彪. 3-P-2SS 球平台机器人的运动传递性分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 658-661.
JIN ZH L, LI Y B. Kinematic transmission property of a novel 3-P-2SS spherical platform manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 658-661. (in Chinese)
- [13] 张秀峰, 孙立宁. 精密并联机器人控制算法及控制系统研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 177-180.
ZHANG X F, SUN L N. Research of precise parallels robot control method and system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(4): 177-180. (in Chinese)
- [14] 邵忠喜, 张庆春, 白清顺. 高精度大口径光栅拼接装置的控制算法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 158-165.
SHAO ZH X, ZHANG Q CH, BAI Q SH. Design method of controlling device for tiling high precision and large aperture grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 158-165. (in Chinese)
- [15] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1032-1040. (in Chinese)

- [16] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程,2007,15(3):368-371.
FAN W, YU X F, XI L. Research on driving sys-

tem and controlling means of PZT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):368-371. (in Chinese)

作者简介:



刘源(1981—),男,博士研究生,主要从事开放式数控系统、多坐标数字加工技术、CAD/CAM 技术方面的研究。
E-mail: liuyuan_hit@tom.com



韩振宇(1978—),男,博士,副教授,主要从事数控技术、智能加工、复合材料缠绕成型 CAD/CAM 技术、自动铺丝技术等方面的研究。E-mail: hanzy@hit.edu.cn



富宏亚(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事数控技术,计算机在机械制造上的应用技术,现代制造系统的设计、制造及控制技术,复合材料缠绕成型技术和非标数控设备研制,纤维铺放技术等方面的研究。E-mail: hongyafu@hit.edu.cn

导师简介:



王永章(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事数控加工技术,计算机在机械制造中的应用技术,现代制造系统的设计、制造及控制技术,复合材料缠绕成型技术和非标缠绕设备研制等方面的研究。E-mail:nc_mach@hit.edu.cn

●下期预告

水平式两轴转台库德光路快速装调

乔健¹,高云国¹,韩光宇¹,赵天²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033;

2. 中国农业大学信息与电气工程学院,北京 130083)

为对水平式两轴转台中库德光路快速高精度装调,建立了自准直平行光管与平面反射镜相组合的自准直装调和检测系统。本文在介绍水平式两轴转台库德光路组成和工作原理的基础上,根据光学自准直原理给出了库德光路的装调和检测方法,并结合库德光路的特点推导出基于坐标变换的库德镜辅助装调模型,进而实现了库德光路的快速装调,最后对装调好的库德光路进行了随经轴和纬轴转动的误差检测,得出两轴转台工作过程中库德光路的实际晃动误差。结果表明,通过装调的库德光路晃动误差仅为 5.2",满足设计指标要求的 8"。该装调技术不仅适用于库德光路也可对其它的反射镜装调提供一定的借鉴和参考。