

# 五轴联动数控加工的刀具路径优化方法研究

赵 鹏<sup>1</sup> 楼佩煌<sup>1</sup> 刘明灯<sup>2</sup> 胡荣华<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 南京四开电子企业有限公司, 南京, 210007

**摘要:**为解决五轴联动加工复杂曲面过程中的刀具路径不连续问题,提出了五轴数控的刀具路径优化方法。通过五轴 NC 代码的坐标变换还原有效切削路径,对切削路径进行误差约束下的非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线拟合。对旋转轴路径采用五次样条曲线进行插值,建立切削路径和旋转轴路径的参数映射关系,通过机床逆运动变换求解  $C^2$  连续的平动轴路径。实验表明,经过该方法优化后,切削路径和各驱动轴运动路径具有良好的平滑性,显著提高了五轴加工曲面精度和表面质量。

**关键词:**数控;五轴加工;曲线拟合;刀具路径

**中图分类号:**TP273

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.006

## Research on Tool Path Optimization Method for 5-axis CNC Machining

Zhao Peng<sup>1</sup> Lou Peihuang<sup>1</sup> Liu Mingdeng<sup>2</sup> Hu Ronghua<sup>1</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Nanjing SKY electronics enterprise Co., Ltd., Nanjing, 210007

**Abstract:** A tool path optimization system for 5-axis machining was proposed to solve the tool path discontinuity problem in free-form spline machining. The NC codes coordinate conversion was implemented to compute the relative cutting path curve between tool center and work piece. The cutting path optimization based on NURBS curve fitting was proposed to resume contouring continuity. The quintic spline interpolation was implemented to smooth the rotary axes motion and synchronize its parameter to cutting path curve,  $C^2$  continuity linear axes motion path can be achieved by the inverse kinematics transformation. The experiments present that the contouring path and physical axes motion get good smoothness to satisfy the high performance requirements in free-form surface 5-axis machining.

**Key words:** CNC; 5-axis machining; curve fitting; tool path

## 0 引言

在复杂曲面高速、高效、高精度加工中,五轴联动数控是目前研究和发展的方向。由于 ISO6983 规定的 NC 代码标准和五轴刀具路径规划算法的限制, CAM 将 CAD 中的参数曲线模型离散为微小直线段进行规划,生成一阶不连续的刀具路径,造成各驱动轴的运动路径呈现离散特征,在加工中发生速度和加速度的跳动,影响机床动态特性,并降低了零件轮廓加工精度和表面质量。这些刀具路径的不连续性缺陷在后续处理的速度规划和插补中无法进行补偿。现代 CNC 期望直接处理参数曲线信息以获得平滑的刀具路径,一些厂家的 CNC 提供了参数曲线插补功能,与传统直线插补方式相比,可以得到更高的加工精度<sup>[1-2]</sup>。然而由于五轴联动中旋转轴附加运动路径与工件坐标系没有线性映射关系,造成五轴加工刀具路径规划困难,国际上只有极少数高档 CAM 软件支持输出五轴联动加工的参数曲线

NC 代码,但这些 CAM 软件价格昂贵。有学者将刀具路径平滑算法作为独立模块并将其作为 CAD/CAM 和 CNC 的中间组件<sup>[3-10]</sup>。文献[2]研究了五次参数样条的拟合刀具路径,文献[3-8]提出了 NURBS 曲线拟合刀具路径的方法,但这些方法都没有说明五轴加工中旋转轴附加运动带来的影响;文献[9-11]对五轴数控刀具路径中的位置矢量和方向矢量采用离线曲线插值方法优化,但增加了对 CAM 系统输出代码的特殊要求。FANUC 数控系统应用了五轴刀具路径平滑方法<sup>[12]</sup>,在曲面加工中获得了良好的加工质量,但未公开其关键技术。笔者应用通用 CAM 输出的五轴 NC 代码进行刀具路径优化,消除了由加工路径不连续引起的机床振动,提高了工件的表面质量和加工精度。

## 1 五轴加工运动分析

### 1.1 五轴加工 NC 代码分析

通用 CAM 软件输出的五轴加工 NC 代码为

G01 X\_Y\_Z\_A\_B\_C\_F\_;

该代码表示机床各驱动轴的实际运动量。其中, X、Y、Z 为平动轴的位移, A、B、C 为旋转轴的转角

收稿日期: 2011-02-25

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011182, BE2010189); 江苏省重大科技成果转化专项资金资助项目(BA2007034)

(分别对应旋转轴 A、B、C),  $F$  为进给速度。三轴加工中, 刀具中心点运动路径直接表达刀具相对零件轮廓的有效切削运动。五轴加工中, 旋转轴转动不仅会改变刀具相对工件的方向, 还会改变两者的相对位置, 产生附加运动, 而附加运动在刀具运动路径中进行补偿。因此, 五轴联动中的刀具中心点运动路径不能真实表达刀具相对零件轮廓的有效切削运动。如图 1 所示, 工件装夹于转台  $abc$  位置, 以多轴方式加工工件轮廓  $ab$ , 开始加工时, 刀具中心点位于点  $a$ , 一段加工时间后, 由于旋转台转过角度  $\theta$ , 工件位置随转台转至  $a'b'c'$ , 刀具中心点切削到轮廓  $ab$  上的  $M$  处。在这段加工过程中, 刀具中心点实际从  $a$  点运动到  $M$  点, 但有效切削路径是沿工件轮廓的运动路径  $a'M$ 。在五轴加工中, 工件轮廓的精度和表面质量由有效切削运动路径决定, 而机床运动的稳定性和连续性由各驱动轴运动路径决定。

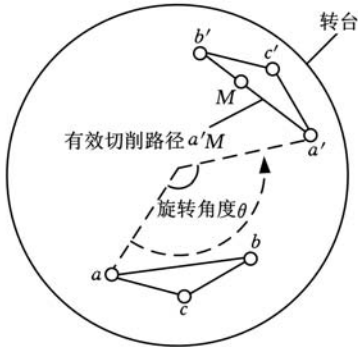


图 1 机床驱动轴运动和刀具切削运动路径

### 1.2 刀具切削路径计算

数控加工的首要目标是保证工件的加工质量, 刀具相对于工件的切削加工路径的精度和平滑性直接影响工件的加工精度和表面质量。本文首先将机床坐标系中的驱动轴运动路径转换为工件坐标系中的刀具切削路径, 对切削路径进行平滑处理。由于五轴数控机床类型繁多, 坐标转换关系复杂, 故本文以应用广泛的立式双转台五轴机床为例。双转台结构中的旋转自由度是由工件旋转实现的, 因此, NC 代码中的  $(X, Y, Z)$  为刀心点在机床坐标系  $O_RXYZ$  中的位置, 工件坐标系在初始状态 ( $A=0, C=0$ ) 时平行于机床坐标系, 工件坐标系原点与机床实际旋转中心偏差为  $(d_x, d_y, d_z)$ , 刀具中心点在工件坐标系  $O_wxyz$  中的坐标  $(x, y, z)$  表示刀具相对工件轮廓的有效切削运动路径点。有效切削运动路径点的坐标求解过程如下<sup>[13]</sup>: ① 将机床坐标系平移到工件坐标系, 变换矩阵为  $T_1$ ; ② 工件绕 Z 轴旋转角度  $C$ , 变

换矩阵为  $T_2$ ; ③ 工件绕 X 轴旋转角度  $A$ , 变换矩阵为  $T_3$ 。可得:  $(x, y, z, 1)_R = (X, Y, Z, 1)_W T_1 T_2 T_3$ 。

## 2 五轴数控刀具路径优化

### 2.1 刀具切削路径优化

刀具切削路径平滑优化采用 NURBS 曲线拟合方法。NURBS 曲线表达式为<sup>[6]</sup>

$$R(u) = \frac{\sum_{i=0}^l \omega_i N_{i,p}(u) V_i}{\sum_{i=0}^l \omega_i N_{i,p}(u)} \quad (1)$$

式中,  $\omega_i$  为权因子;  $V_i$  为 NURBS 曲线控制顶点;  $l+1$  为控制顶点数目;  $N_{i,p}(u)$  为  $p$  次规范 B 样条基函数,  $u$  为 NURBS 曲线参数。

影响 NURBS 曲线形状的主要因素为控制顶点  $V_i$ 。在 NURBS 曲线拟合过程中, 权因子  $\omega_i$ 、基函数次数  $p$  和节点向量  $U$  可提前设定, 通过求解控制顶点的数目和坐标最终实现离散刀具路径的 NURBS 曲线拟合平滑。

为实现 NURBS 拟合, 需确定权因子值, 权因子代表各个控制顶点对曲线形状的影响力, 为简化运算, 曲线节点向量  $U$  则由文献[4]中的曲线拐点特征搜索法设定, 通常设定权因子<sup>[4-7]</sup>  $\omega_i = 1 (i = 0, 1, \dots, l)$ 。根据 B 样条基函数定义,  $\sum_{i=0}^l N_{i,p}(u) = 1$  恒成立, 因此, NURBS 曲线方程可简化为  $R(u) = \sum_{i=0}^l N_{i,p}(u) V_i$ 。

如图 2 所示, 对任意刀位点  $P_j$ , 拟合 NURBS 曲线上均有点  $R(u_j)$  与其对应:

$$P_j \approx R(u_j) = \sum_{i=0}^l N_{i,p}(u_j) V_i \quad (2)$$

其中,  $u_j$  为点  $P_j$  对应参数值, 根据向心弦长法可求出<sup>[4-5]</sup>:

$$u_j = \begin{cases} 0 & j = 0 \\ |P_0 P_j| / |P_0 P_m| = u_{j-1} + & j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $|P_0 P_j|$  为起点到当前点  $P_j$  间的微小直线段长的和;  $|P_0 P_m|$  为本拟合段所有微小直线段长的总和。

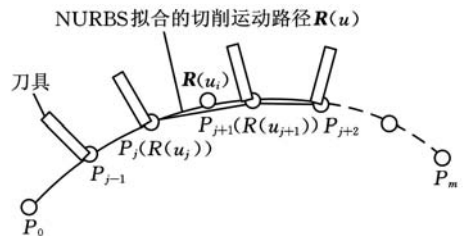


图 2 刀具切削路径拟合和对应的刀具角度

每个刀位点与曲线偏差为  $|R(u_j) - P_j|$ , 最小二乘法拟合目标是优化控制顶点, 使拟合曲线到各刀位点偏差的总和最小, 建立偏差总和与控

制顶点的函数：

$$D(\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_l) = \sum_{j=0}^m |\mathbf{R}(u_j) - \mathbf{P}_j|^2 = \sum_{j=0}^n (|\sum_{i=0}^l N_{i,p}(u_j) \mathbf{V}_i - \mathbf{P}_j|^2) \quad (4)$$

如要偏差总和最小，则第  $q(q=0, 1, \dots, l)$  个控制点处方程为

$$\frac{\partial D}{\partial \mathbf{V}_q} = 2 \sum_{j=0}^m (N_{q,p}(u_j) |\sum_{i=0}^l N_{i,p}(u_j) \mathbf{V}_i - \mathbf{P}_j|) = 0 \quad (5)$$

由式(2) ~ 式(5) 可初步求出各控制顶点坐标，确定拟合的 NURBS 曲线方程。

### 2.2 切削加工路径误差分析

切削路径的拟合精度决定了工件的轮廓精度，如图 3 所示，为保证刀具切削路径的拟合最大误差小于允许误差  $\zeta_0$ ，要计算拟合曲线与原直线段链的最大弦高误差。为简化计算过程，采用近似弦高法求解<sup>[6]</sup>，以其中一直线段  $P_i P_{i+1}$  为例进行误差分析，具体过程如下：

- (1) 设  $P_i, P_{i+1}$  对应曲线上的点  $\mathbf{R}(u_i), \mathbf{R}(u_{i+1})$ ；
- (2) 将参数区间  $u_i u_{i+1}$  等分为  $n$  个子区间，计算各等分点处的弦高误差  $\zeta_k$  和各弦高误差最大差值  $\Delta\zeta_{\max}$ ；
- (3) 若  $\Delta\zeta_{\max} > \epsilon$  ( $\epsilon$  为一个设定的极小数，小于  $\epsilon$  的数可判定为 0)，则选取包含最大弦高值的相邻参数作为新的  $u_i u_{i+1}$ ，返回步骤(2)；
- (4) 若  $\Delta\zeta_{\max} \leq \epsilon$ ，则各参数点处弦高误差相同， $\zeta_k$  为  $P_i P_{i+1}$  的最大弦高误差；
- (5) 若  $\zeta_k \leq \zeta_0$ ，则微直线段  $P_i P_{i+1}$  可以由 NURBS 曲线  $\mathbf{R}(u)$  拟合；
- (6) 若  $\zeta_k > \zeta_0$ ，需要对  $\mathbf{R}(u)$  进行调整，将线段  $P_i P_{i+1}$  中点作为新的型值点，按 2.1 中所述拟合方法重新计算  $\mathbf{R}(u)$ 。

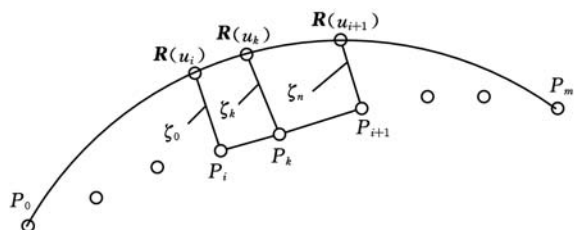


图 3 NURBS 曲线拟合弦高误差判断

按以上方法对整个 NURBS 曲线段进行调整，直到所有线段弦高误差均在允许值以内。

### 2.3 机床驱动轴运动路径优化

机床驱动轴的不连续运动造成各轴在微段转接点发生冲击，缩短机床寿命，降低精度，为消除上述缺陷，五轴刀具路径优化系统将驱动轴运动

路径进行二阶连续曲线化处理。刀具切削路径优化保证了加工零件的精度和表面质量，旋转轴运动路径优化保证各驱动轴运动的平滑性。为便于与切削加工路径参数进行统一化处理，选取刀具切削路径中的弦长为参数，进行五次样条曲线拟合。

如图 2 所示，为求解拟合路径在点  $P_j$  处的一阶和二阶导数，选取  $P_{j-1}, P_j, P_{j+1}, P_{j+2}$  四个点，设旋转轴在各点的旋转角度分别为  $A_{j-1}, A_j, A_{j+1}, A_{j+1}$ ，相应点参数为  $0, l_{j-1,j}, l_{j-1,j+1}, l_{j-1,j+2}$ ，对 4 个点的角度值  $A_{j-1}, A_j, A_{j+1}, A_{j+1}$  进行 3 次参数曲线插值得到参数曲线  $C_j(l)$ ，可设定旋转轴 A 的路径在点  $P_j$  处对切削路径弦长参数的 1 阶、2 阶导数分别为  $\dot{C}_j(l_{j-1,j})$  和  $\ddot{C}_j(l_{j-1,j})$ 。对点  $P_{j+1}$  进行同样处理，设点  $P_j, P_{j+1}$  间的旋转轴 A 的运动路径五次样条插值曲线方程为  $A_{j,j+1}(l)$ 。

由下式求出五次参数曲线方程系数

$$\left. \begin{aligned} A_{j,j+1}(0) &= P_j \\ \dot{A}_{j,j+1}(0) &= \dot{C}_j(l_{j-1,j}) \\ \ddot{A}_{j,j+1}(0) &= \ddot{C}_j(l_{j-1,j}) \\ A_{j,j+1}(l_{j,j+1}) &= P_{j+1} \\ \dot{A}_{j,j+1}(l_{j,j+1}) &= \dot{C}_{j+1}(l_{j,j+1}) \\ \ddot{A}_{j,j+1}(l_{j,j+1}) &= \ddot{C}_{j+1}(l_{j,j+1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(6) 计算出的曲线方程在切削路径微线段转接点处保证了 2 阶连续。同理可对旋转轴 B、C 进行插值平滑。由以上处理对刀具切削路径和旋转轴运动路径进行优化，实现了 2 阶连续。若平动轴路径仍然由五轴 NC 代码中的离散路径单独拟合优化，则机床驱动轴运动路径可能偏离刀具切削运动路径，造成实际加工误差。为解决该问题，平动轴路径可由切削运动路径和旋转轴运动路径经过机床逆运动变换后表达。

由于旋转轴运动路径插值参数和刀具切削路径的 NURBS 曲线拟合参数不同，首先需要建立不同路径参数的同步映射关系。如图 2 所示，路径段  $P_0 P_m$  为一个切削路径 NURBS 拟合段，拟合结果为  $R(u)$ ，点  $P_j, P_{j+1}$  为路径段  $P_0 P_m$  上任意两点，设其分别对应的切削路径  $R(u)$  上的  $R(u_j)$  和  $R(u_{j+1})$ 。设  $l$  为切削路径  $R_1(u)$  上的路径点到  $P_j$  的距离，则旋转轴 A 在点  $P_j, P_{j+1}$  间的优化曲线运动路径为  $A_{j,j+1}(l)$ 。点  $R(u_i)$  在为切削路径上  $P_j P_{j+1}$  间任意一点，根据切削路径参数的单调递增性，可知  $u_j < u_i < u_{j+1}$ ，由切削路径 NURBS 曲线拟合的参数选取方法可知，点  $P_j$  在切削路径中参数  $u_j = |P_0 P_j| / |P_0 P_m|$ ，点  $R(u_i)$  在切削

路径中参数  $u_i = (l + |P_0 P_j|) / |P_0 P_m| = u_j + l / |P_0 P_m|$ , 切削点  $R(u_i)$  所对应的旋转轴 A 的角度为  $A_{j,j+1}(u_i |P_0 P_m| - |P_0 P_j|)$ 。通过上述参数映射处理使刀具切削路径和旋转轴路径的曲线参数一致, 机床坐标系下的平动轴运动路径通过机床逆运动变换求出:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = x \begin{bmatrix} \cos C \\ -\cos A \sin C \\ \sin A \sin C \end{bmatrix} + y \begin{bmatrix} \sin C \\ \cos A \cos C \\ -\sin A \cos C \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} 0 \\ \sin A \\ \cos A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d \sin A \\ d \cos A \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $d$  为机床坐标系原点和工件坐标系原点的距离。由于切削路径和旋转轴运动路径均为 2 阶连续曲线并且参数为线性映射关系, 式(7) 中的  $x, y, z, A, C$  均二阶连续变化, 并且三角函数均为无限阶连续函数, 因此, 式(7) 所求出的平动轴运动路径为 2 阶连续的平滑路径。五轴加工的刀具路径优化过程如图 4 所示。

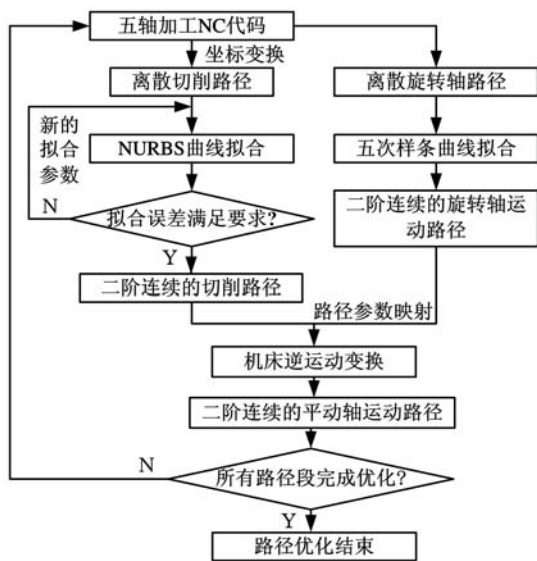
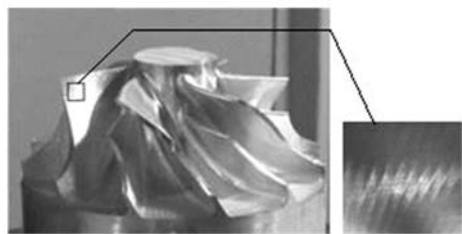


图 4 五轴加工的刀具路径优化流程

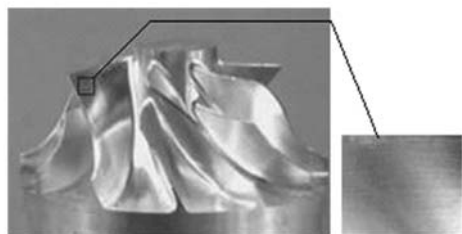
### 3 实例和验证

在自主研发的数控系统 SKY2010 上采用本文提出的五轴数控刀具路径优化方法, 控制双转台立式铣床 SK5L-70100 进行典型工件叶轮的 5 轴联动精加工, 使用通用五轴 CAM 软件 POWERMILL 输出设定曲面精度为  $1\mu\text{m}$ 、弦高误差为  $0.01\text{mm}$  的五轴 NC 代码。对刀具路径优化处理, 设置刀具切削路径最大拟合误差为  $5\mu\text{m}$ , 设置进给速度为  $3\text{m}/\text{min}$ , 得到的加工效果如图 5 所示, 从图 5a 可看出明显的加工纹路, 图 5b 中零件的表面基本是平滑曲面。测量结果如表 1 所示, 其中, 平均误差由三坐标测量仪测量叶

片上表面获得。实验结果表明, 经过五轴刀具路径优化后, 加工误差显著降低, 表面更加光滑, 加工效率也有较大提高。



(a) 未经过刀具路径优化



(b) 经过刀具路径优化

图 5 加工效果

表 1 叶轮在不同刀具路径处理下的加工效果对比

	加工时间 (min)	平均误差 ( $\mu\text{m}$ )	表面粗糙度 $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
未经过 NURBS 拟合	216	14	1.6
经过 NURBS 拟合	172	9	0.7

### 4 结语

本文提出复杂曲面五轴加工中的驱动轴运动路径优化方法, 通过坐标变换求解刀具相对零件轮廓的有效切削路径, 对切削路径进行 NURBS 曲线拟合, 最终获得 2 阶连续的五轴数控刀具路径。实验结果表明, 采用本文提出的方法优化五轴数控加工路径可显著提高曲面加工的表面质量, 减小曲面轮廓误差, 提高加工精度和加工效率。

### 参考文献:

[1] Yau H T, Lin M T, Tsai M S. Real-time NURBS Interpolation Using FPGA for High Speed Motion Control[J]. Computer - Aided Design, 2006, 38 (10):1123-1133.

[2] Xu R Z, Xie L, Li C X, et al. Adaptive Parametric Interpolation Scheme with Limited Acceleration and Jerk Values for NC Machining[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3/4):343-354.

[3] Erkorkmaz K, Altintas Y. High Speed CNC System Design. Part I: Jerk Limited Trajectory Generation and Quintic Spline Interpolation [J]. Machine Tools & Manufacturing, 2001, 41(9):1323-1345.

[4] Lin K Y, Ueng W D, Lai J Y. CNC Codes Conversion

# 一种计及滑块裙部变形的滚珠 直线导轨副模态分析方法

陈 汀 黄其柏

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉, 430074

**摘要:**基于计及滚珠直线导轨副滑块裙部变形的刚度模型,提出了一种滚珠直线导轨副的有限元模态分析方法,建立了一种滚珠直线导轨副的三维有限元模型并进行了有限元模态分析,求得了滚珠直线导轨副的模态频率及模态振型。利用实验模态分析技术,对滚珠直线导轨副进行了模态测试,测得了滚珠直线导轨副的模态。测试结果验证了有限元建模与分析方法的有效性。

**关键词:**滚珠直线导轨副;接触刚度;有限元分析;模态分析

中图分类号:TH113

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.007

## A Modal Analysis Method of a Linear Ball Guide Incorporating Flexibility of the Carriage

Chen Ting Huang Qibai

The State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:**Based on the rigidity model of a linear ball guide incorporating the flexibility of the carriage, a modal analysis method was proposed by using finite element analysis. A three dimensional finite element model of a linear ball guide was established. The finite element modal analysis was conducted and the modal frequencies and vibration modes were presented. The modal testing experiment was conducted on the type of linear ball guide. For the occurrence of the modes, the finite element analysis results based on the presented method almost match with the experimental ones.

**Key words:**linear ball guide; contact rigidity; finite element analysis; modal analysis

## 0 引言

滚珠直线导轨副具有低摩擦、高刚性、高耐磨

性、高可靠性和精确的导向性等特点,已成为各类数控机床、制造装备的必要部件。当前,有限元分析技术在制造装备整机设计过程中的应用日益广泛,但系统部件之间的滚动接触面(如滚动轴承、滚动直线导轨等运动部件的接触面)特性在系统

收稿日期:2011-02-22

基金项目:数字制造装备与技术国家重点实验室资助项目(2010Z014)

- from Linear and Circular Paths to Nurbs Curves [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39 (7/8):760-773.
- [5] Yeh S S, Su H C. Implementation of Online NURBS Curve Fitting Process on CNC Machines[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(5/6):531-540.
- [6] 李建刚,张婷华,李泽湘,等. 数控加工中的连续多段直线轨迹 B-Spline 拟合[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10):1606-1608.
- [7] 杨旭静,胡仲勋,钟志华. 面向刀具路径生成的 NURBS 曲线拟合算法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(8):984-987.
- [8] Lee R S, Liang S P. A Strain Energy Minimization Method for Generating Continuous NURBS-based Motion Curves in Free-form Surface Machining [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28 (11/12):1136-1145.
- [9] Wang Y Z, Liu Y, Han Z Y, et al. Integration of a 5-axis Spline Interpolation Controller in an Open CNC System[J]. Chinese Journal of Aeronautics,

2009, 22(2):218-224.

- [10] 刘源,王永章,富宏亚,等. 用于五轴联动数控机床的曲线插补控制策略[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4):758-761.
- [11] Fleisig R V, Spence A D. A Constant Feed and Reduced Angular Acceleration Interpolation Algorithm for Multi-axis Machining[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(1):1-15.
- [12] Toshiaki O, Hideo O, Soichiro I, et al. Curve Interpolation Method; USA, US2004/0122549[P]. 2004-06-24.
- [13] 胡寅亮,熊涛,黄翔. 五轴联动数控机床的后置处理方法[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(7):175-177.

(编辑 张 洋)

**作者简介:**赵 鹏,男,1984 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。主要研究方向为复杂曲线曲面高速数控加工技术。发表论文 5 篇。楼佩煌,男,1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。刘明灯,男,1975 年生。南京四开电子企业有限公司总工程师。胡荣华,男,1980 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。