

文章编号:1000-6893(2007)02-0438-07

# 端点误差控制刀位算法的改进

王瑞秋, 金 曼, 陈五一, 陈志同

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

## Improvement of End-point Error Controlling Tool Path Generation Method

WANG Rui-qiu, JIN Man, CHEN Wu-yi, CHEN Zhi-tong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 对端点误差控制数控加工刀位算法进行了改进:采用 2 个端点间偏置距离代替它们的参数差值用于衡量加工带宽和进行加工误差控制,提出了一种新的采用循环迭代计算刀具旋转角度的方法,并给出了格点法对偏置方向角进行优化的过程;使得算法不受具体的曲面参数化方式影响,简化了刀具定位时计算量,刀位得到了充分的优化。利用 UG 二次开发技术进行的实例计算表明:设置走刀方向沿着曲面的最小主曲率方向比沿着曲面的最大主曲率方向加工带宽更宽,前者应该是该算法的最优走刀方向,而且沿着最优方向走刀的优化刀位和多点切触加工算法得到的加工刀位一致,该算法也比多点切触加工算法有更大的适应性。

**关键词:** 刀位计算; 端点误差控制; 数控加工; 优化算法

**中图分类号:** TP391.72

**文献标识码:** A

**Abstract:** Much improvement is made on the end-point error controlling tool path generation method in NC machining. Instead of the difference of surface parameters between the two end points, the offset distance is taken as a variable to represent the cutter path interval and used in machining error controlling. A novel iterative method is proposed in the cutter rotation angle calculation, and the procedure with grid point method for the optimal offset direction angle is introduced. During the improvement, the parameterization of the surface has no influence on the algorithm, the computation cost for tool positioning is also reduced, and the tool path is optimized thoroughly. The computation example carried out with UG further development technology indicates that the tool path interval generated when taking the direction of minimal principle curvature of surface as the feed direction is wider than that when taking the direction of maximal principle curvature of surface as feed direction. And the former should be the optimal feed direction. It also shows that the tool path generated using the algorithm is the same as that generated using multi-point machining method when taking optimal direction as feed direction, but the novel algorithm is more robust.

**Key words:** tool path generation; end-point error controlling; NC machining; optimization algorithm

为了提高数控加工的效率,近年来,宽行数控加工算法已经被广泛深入地进行研究。目前的宽行数控加工算法主要有两类:一类是:广域曲率吻合刀位算法<sup>[1]</sup>,该算法以宏观区域上刀具包络截形和曲面截形大概一致为要求;另一类为基于双点进行刀具定位的一系列数控加工算法,包括 Waterloo 开发的 MPM (Multi-Point Machining) 算法<sup>[2]</sup>和 Starrag 开发的 Hermite 算法<sup>[3]</sup>等。

然而广域曲率刀位算法的刀位调整过程复杂,算法的耗时较长,难于实现。而 MPM 算法和 Hermite 算法计算过程比较复杂,在刀位计算的时候容易出现无解的情况,特别是算法要求走刀

方向不能偏离曲面的最小主曲率方向。否则获得加工刀位带宽极窄。

针对上述宽行数控加工算法的缺陷,金曼等<sup>[4]</sup>提出了一种新的宽行数控加工算法,即端点误差控制数控加工算法,该算法可以简单有效地获得有较大加工带宽的无干涉优化刀位。本文将文献[4]中算法进行简化,并且给出相应的改进。

### 1 端点误差控制数控加工算法的几何参数

#### 1.1 刀具定位中两个端点的计算

在文献[4]中,端点误差控制数控加工算法的第 2 端点的选取类似于 Hermite 算法,是在参数域上选取的。并且在以后的刀位算法的优化,即刀位的加工带宽控制过程中,以 2 个端点的参数

收稿日期:2005-10-21; 修订日期:2006-03-13  
基金项目:中国航空第一集团创新基金(CX03007)  
通讯作者:陈五一 E-mail:wychen@buaa.edu.cn

差值作为优化自变量。这样,刀位计算将严重依赖于曲面参数,对于同一张曲面来说,采用不同的曲面参数,刀位计算和优化的结果将各不相同。为了消除这一弊端,将采用在切平面偏置的方法获得第 2 端点,使得刀位计算只与曲面形状有关,不受具体的曲面参数化方式影响。

图 1 为用圆环面刀具  $T$  加工自由曲面  $S(u, v)$  的情况。设刀具的环心圆 半径为  $R$ ,小圆半径为  $r$ ,最大允许加工误差为  $e$ 。而  $P_1$  是被加工曲面  $S(u, v)$  上一条端点轨迹(类似于刀触点轨迹,不同的是刀具在端点轨迹上的加工误差值为允许加工误差  $e$ )。  $P_1(u_1, v_1)$  是  $P_1$  上的一个刀触点,  $a$  是在  $P_1$  点刀具的走刀方向的单位矢量,  $n_1$  为曲面在  $P_1$  点处的单位法矢,  $v = a \times n_1$ , 则  $(v, a, n_1)$  构成局部加工坐标系。  $\pi_1$  是曲面在  $P_1$  点的切平面,设切平面  $\pi_1$  上有过  $P_1$  点的单位矢量  $d$ , 矢量  $d$  和  $v$  的夹角为  $\alpha$ , 则  $d = \cos \alpha \cdot v + \sin \alpha \cdot a$ 。  $P_3$  是  $P_1$  点沿着矢量  $d$  偏置距离为  $w$  的一点,  $r_{P_3} = r_{P_1} + w d$ 。令  $P_2(u_2, v_2)$  为曲面  $S(u, v)$  上离  $P_3$  最近的点。在  $P_1$  和  $P_2$  点沿着曲面的法矢取两点  $C_1, C_2$ , 它们的坐标为:  $r_{C_1} = r_{P_1} + (r + e) n_1$ ,  $r_{C_2} = r_{P_2} + (r + e) n_2$ 。设  $c = (r_{C_1} + r_{C_2}) / 2$ ,  $e_2 = (r_{C_1} - r_{C_2}) / (2c)$ ,  $e_1 = \frac{e \cdot n_1}{e \cdot n_1}$ ,  $e_3 = e_1 \times e_2$ , 则  $(e_1, e_2, e_3)$  构成刀具旋转坐标系。刀具定位时,圆环面刀具的环心圆 通过  $C_1$  和  $C_2$  点,同时刀具可以绕着  $e_2$  轴旋转调整刀具的位置和姿态,改变当前刀位的加工误差。

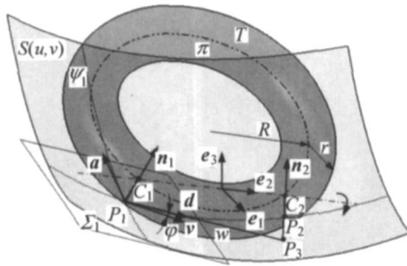


图 1 刀具定位中 2 个端点的选取

Fig. 1 Selection of the two end points in tool positioning

### 1.2 刀具前端误差和后端误差的计算

如图 2 所示,  $C_0$  是刀具环心圆 的圆心,也是刀心点。把  $C_1, C_2$  之间的环心圆圆弧对应的圆环刀具的部分称为刀具前端(图中阴影较深的刀具部分);而  $C_1, C_2$  之外的环心圆圆弧对应的圆环刀具的部称为刀具后端(图中阴影较浅的刀具部分)。为了获得整个刀具和曲面的接触状况,

把圆环面刀具的环心圆 按照等圆心角间隔的方法进行离散成许多采样点,对这些点求其到曲面的有向距离,则这些有向距离减去圆环面刀具的小圆半径  $r$ ,就可以被近似看做当前刀位的加工误差集合<sup>[1]</sup>。设在  $C_1, C_2$  之间的刀具环心圆圆弧离散点为  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ 。用这些点计算的刀具前端的误差集合为  $E = \{E_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 。设在  $C_1, C_2$  之外的刀具环心圆圆弧离散点  $Q_1, Q_2, \dots, Q_M$ ,用这些点计算的刀具后端的误差集合为  $E = \{E_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ ,为了保证刀具和工件曲面不发生干涉,则需要当前刀位的刀具前端误差满足  $\max\{E\} \leq e, 0 \leq \min\{E\}$ ,且刀具后端误差满足  $0 \leq \min\{E\}$ 。

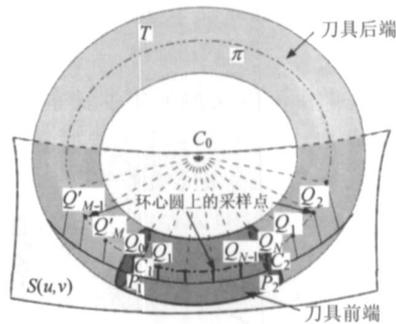


图 2 圆环面刀具加工时的加工误差计算

Fig. 2 Machining error calculation with tours cutter

## 2 端点误差控制数控加工算法

为了获得满足上述加工误差约束条件的最佳优化加工刀位,端点误差控制数控加工算法将采用以下 3 个步骤进行刀具的定位和刀位的优化:

(1) 在给定  $P_1$  和  $P_2$  之间的近似距离  $w$  和矢量  $d$  和  $v$  的夹角  $\alpha$  的情况下,以旋转坐标系  $(e_1, e_2, e_3)$  的  $e_2$  轴旋转刀具,使得所有的刀具前端误差  $0 \leq \min\{E\}$ ,消除前端干涉;并且使得某个刀具前端离散点  $Q_j (j = 1, 2, \dots, N)$ ,对应的加工误差值  $E_j = 0$  即刀具和工件曲面上在  $Q_j$  点“伪切触”。伪切触,是指刀具和工件曲面并非在  $Q_j$  严格符合切触条件<sup>[3]</sup>。在考察当前刀位的加工误差时,只能从离散点中计算刀位误差,而对并非处在离散点的地方,无法获得加工误差信息。在  $Q_j$  点附近的很小的邻域内,刀具和工件曲面可能产生干涉,但是一方面这种干涉量很小,另外可以通过加密离散点的方法,消除这一微小干涉。

(2) 在给定矢量  $d$  和  $v$  的夹角  $\alpha$  情况下,以第(1)步中的旋转方法进行刀具定位为基准,通过二分法优化曲面上  $P_1$  和  $P_2$  之间的近似距离  $w$ ,得到能够使当前刀位满足  $\max\{E\} \leq e, 0 \leq \min\{E\}$

$\min\{E_j, 0\}$  条件的  $w$  的最大值。

(3) 根据第(2)步方法计算在不同  $\theta$  角时, 得到对应的  $w$  的最大值和相应刀位, 以获得最大的加工带宽为目的, 通过格点法优化矢量  $d$  和  $v$  的夹角, 最后以经过优化  $\theta$  角和偏置距离  $w$  及与工件有伪切触的刀位为最优化刀位。

### 2.1 刀具旋转角的计算

如图3所示,  $S(u, v)$  是距被加工曲面  $S$  距离为  $r$  的等距曲面。  $C_0, C_1, C_2, e_1, e_2, e_3, Q_j$  的定义和上述相同,  $i_m$  是刀具的刀轴矢量。刀具的环心圆首先定位在  $(e_1, e_2)$  所确定的平面内。为了消除刀具前端的干涉, 将刀具沿着  $e_2$  轴旋转。根据圆环面刀具和中空平底刀加工自由曲面的等效关系, 只要把刀具旋转  $\theta$  角以后, 刀具环心圆所有的刀具前端离散点落在被加工曲面的等距曲面  $S(u, v)$  上方, 并且有至少一个刀具前端离散点落在等距曲面  $S(u, v)$  上时, 当前刀位的刀具前端的误差集合  $E$  就可以满足  $0 \leq \min\{E_j\}$ , 且有一个误差值为0。

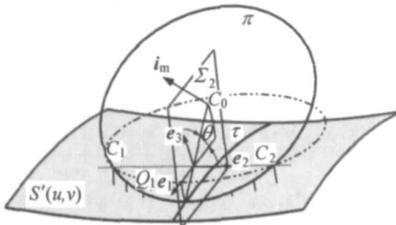


图3 刀具在旋转坐标系下的旋转

Fig. 3 Cutter rotation described in rotation coordinates system

在文献[4]中, 通过二分法计算刀具环心圆上所有的刀具前端参考点  $Q_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 旋转到偏置曲面  $S$  上, 刀具需要绕  $e_2$  轴转动的角度  $\theta_i (i = 1, 2, \dots, N)$  ( $\theta_i$  可以为负值), 然后找出  $\theta = \min\{\theta_i\}$  作为刀具的旋转角。这样需要计算每一个刀具前端离散点, 计算速度较慢。刀位计算的实践表明, 最小的  $\theta_i$  通常发生在刀具中间的几个前端离散点。为了简化计算量, 如图4所示, 可以通过如下方法计算刀具的旋转角。

(1) 设置刀具前端离散点个数  $N = 2L + 1$  和极小距离值  $\epsilon$ , 计算所有的环心圆上所有的刀具前端离散点  $Q_j (j = 1, 2, \dots, 2L + 1)$ 。

(2) 首先利用数值迭代的方法计算  $\theta_L$ 。在图3中,  $\rho_L$  是过  $Q_L$  点且垂直  $e_2$  轴的平面,  $\tau$  是平面  $\rho_L$  和工件曲面的交线。如图5所示: 设  $p(k)$  是刀具的环心圆以  $e_2$  轴旋转  $\theta_L(k-1)$  角以后, 环心圆上的  $Q_L$  到等距偏置曲面  $S$  的有向距离,

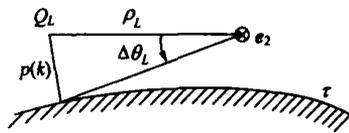


图4 刀具旋转角  $\theta$  的计算

Fig. 4 Calculation of the cutter rotation angle  $\theta$

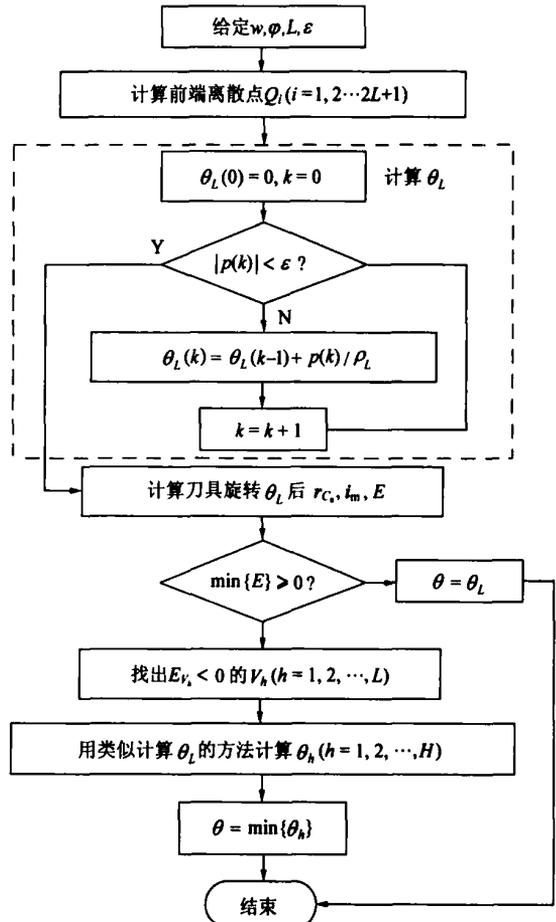


图5  $\theta_L$  的迭代计算

Fig. 5 Iterative calculation of  $\theta_L$

$L$  是  $Q_L$  到  $e_2$  轴的距离, 则为了把  $Q_L$  旋转到曲线上, 刀具需要再旋转  $\theta = p(k)/L$ 。可以通过如下的迭代过程计算

$$\left. \begin{aligned} \theta_L(0) &= 0 \\ \theta_L(k) &= \theta_L(k-1) + p(k)/L \quad (k = 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

迭代的中止条件  $|p(k)| < \epsilon$ 。

令刀具的旋转角度  $\theta = \theta_L$ , 按照下式计算刀具旋转后的刀心点坐标  $r_{c_0}$  和刀轴矢量  $i_m$ , 并计算旋转后  $Q_j$  到曲面的有向距离, 获得当前刀位刀具前端误差集合  $E$ 。

$$\left. \begin{aligned} r_{c_0} &= r_{p_1} + (r + e) n_1 + c e_2 + \\ &\quad \sqrt{R^2 - c^2} (-\sin \theta \cdot e_1 + \cos \theta \cdot e_3) \\ i_m &= \cos \theta \cdot e_1 + \sin \theta \cdot e_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(3) 判断是否  $\min\{E\} > 0$ , 是, 则旋转后的刀位满足刀位优化中的第(1)步要求, 完成刀位优化中刀具旋转角度的计算; 否, 转下一步。

(4) 找出所有的加工误差  $E_{V_h}$  小于零的前缘离散点  $V_h (h=1, 2, \dots, H), V_h \in Q = \{Q_i | i=1, 2, \dots, N\}$ 。对所有的  $V_h$ , 可以用类似第(2)步中的迭代方法计算, 把该点旋转到等距曲面  $S$  上对应的  $h$ 。

(5) 令  $w = \min\{w_h\}$ , 这样可以保证在旋转以后, 某个刀具前端离散点和工件曲面上“伪切触”, 并且所有的刀具前端误差  $0 < \min\{E\}$ 。就是满足要求的刀具旋转角, 然后可以用式(2)计算旋转以后的刀位。

### 2.2 偏置距离的控制和优化

刀具在沿着  $e_2$  轴旋转以后, 可以满足刀具和工件曲面的伪切触, 并且所有的刀具前端误差满足  $0 < \min\{E\}$ ; 但是当前刀位前端误差有可能超出允许加工误差, 形成欠切; 刀位的刀具后端误差也有可能发生干涉。当向量  $d$  和  $v$  的夹角为  $\alpha$  恒定时, 可以用 2 个端点之间的偏置量  $w$  衡量当前刀位的加工带宽。可以调整  $w$  的大小控制加工误差: 当  $w$  取值过大, 经过上述旋转以后的刀具定位, 越容易发生刀具前端欠切和刀具后端干涉; 反之如果  $w$  取值过小, 经过上述旋转以后的刀具定位, 并不是最优刀位。如果要获得有效的优化刀位, 必须找到偏置距离  $w$  的最优值  $w^*$ 。如图 6 所示, 偏置距离  $w$  的优化方法可以按照文献[4]中采用二分法进行优化。

优化的基本流程如下:

(1) 初定  $w$  的取值空间  $[w_a, w_b]$ , 迭代循环结束取值空间间隔最大值  $\delta_1$ 。

(2) 根据上述的方法, 计算  $w = w_a$  时的刀具旋转角  $\theta_a$  和相应的刀位  $r_{C_0,a}, i_{m,a}$  以及该刀位刀具前端误差  $E_a$ 、刀具后端误差  $E'_a$ 。同样计算  $w = w_b$  时的刀具旋转角  $\theta_b$  和相应的刀位  $r_{C_0,b}, i_{m,b}$  以及该刀位刀具前端误差  $E_b$ 、刀具后端误差  $E'_b$ 。

(3) 判断  $\max\{E_a\} < \epsilon$  且  $0 < \min\{E'_a\}$  是否成立? 是, 则令  $w_l = w_a, E_l = E_a, E'_l = E'_a$ ; 否, 则令  $w_a = 0.5w_a$ , 返回步骤(2)重新计算。同样判断  $\max\{E_b\} < \epsilon$  且  $0 < \min\{E'_b\}$  是否成立? 是, 则令  $w_r = w_b, E_r = E_b, E'_r = E'_b$ 。

(4) 获得包含  $w^*$  的区间  $[w_l, w_r]$ , 取  $w_m = (w_l + w_r) / 2$ , 并且计算  $w = w_m$  时的刀具旋转角

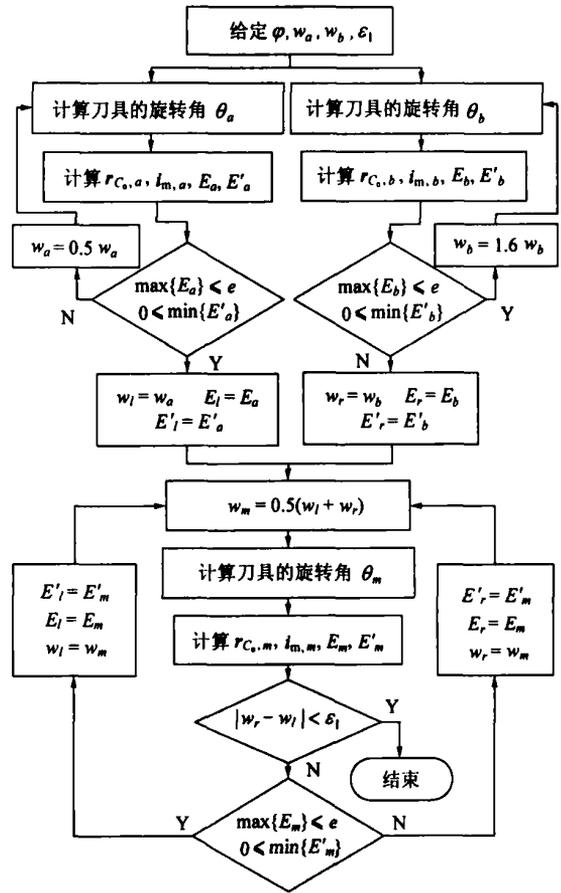


图 6 偏置距离  $w$  的控制和优化

Fig. 6 Control and optimization of offset distance  $w$

$w_m$  和相应的刀位  $r_{C_0,m}, i_{m,m}$  以及该刀位刀具前端误差  $E_m$  和刀具后端误差  $E'_m$ 。

(5) 判断区间长度  $|w_r - w_l| < \delta_1$ ? 是, 则  $w^* = w_m$ , 在步骤(4)中计算出来的刀位可以作为优化刀位; 否, 继续。

(6) 判断  $\max\{E_a\} < \epsilon$  且  $0 < \min\{E'_a\}$  是否成立? 是, 则执行步骤(7), 否, 则执行步骤(8)。

(7) 令  $E_l = E_m, E'_l = E'_m, w_l = w_m$ , 缩小左端区间并转到步骤 4。

(8) 令  $E_r = E_m, E'_r = E'_m, w_r = w_m$ , 缩小右端区间并转到步骤(4)。

### 2.3 偏置方向角的优化

为了获得当前刀位点的最优刀位, 除了对偏置距离进行控制和优化外, 还要对偏置方向角进行优化。如图 7 所示, 对偏置方向角的优化可以采用格点法<sup>[5]</sup>进行:

(1) 设置  $\alpha$  角的优化区间  $[\alpha_l, \alpha_r] = [\alpha_a, \alpha_b]$ , 设置迭代循环结束时区间长度最大值  $\delta_2$  和内分点个数  $n$ 。

(2) 令  $\alpha_k = \alpha_l + \frac{k}{n}(\alpha_r - \alpha_l), k=1, 2, \dots, n$ , 对

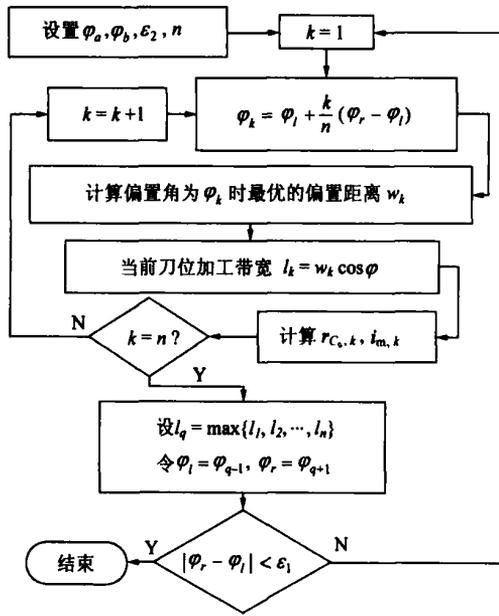


图 7 偏置方向角的优化

Fig. 7 Optimization of offset direction angle

于每一个  $k$ , 利用上节所述的方法优化计算  $w_k$  时最优偏置距离  $w_k$ ; 同时获得此时的加工刀位  $r_{C_0,k}$  和  $i_{m,k}$  和其加工带宽  $l_k = w_k \cos \phi_k$ 。

(3) 设  $l_q = \max\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$  是所有带宽最大值, 则令  $l = q-1, r = q+1$ 。

(4) 判断区间长度  $|w_r - w_l| < \epsilon_2$ ? 是, 继续, 否, 转到步骤(2)。

(5) 以  $l = q$  计算得到的  $r_{C_0,q}$  和  $i_{m,q}$ , 即为优化以后的加工刀位, 刀位加工带宽为  $l_q$ 。

这样经过 3 层的嵌套计算, 完成对偏置距离  $w$  和偏置角度  $\phi$  的优化以后, 就可以获得最终的优化刀位。

### 3 计算实例

应用 UG Open/ API 二次开发技术在 UG/ CAM 中集成了端点误差控制数控加工算法。采用了 UG Open/ API 中的 User Exit 技术<sup>[6]</sup>, 在 UG 中名称为 CAM User Defined Operation 的 User Exit 所对应的 UG Open/ API 入口函数 udop 中编写端点误差控制数控加工算法的代码, 通过编译生成动态链接库, 启动 UG 以后, 加载该动态链接库就可以实现曲面的端点误差控制加工算法的刀位计算。

采用环心圆半径  $R = 10 \text{ mm}$ , 小圆半径  $r = 6 \text{ mm}$  的圆环面刀加工一个 Beizer 曲面, 其中 Beizer 曲面的控制顶点的  $x, y, z$  的坐标值如表 1 所示。

表 1 Bezier 曲面的控制顶点的  $z$  坐标值

Table 1 The  $z$  coordinate values of the control points of the Bezier surface

y/ mm	x/ mm			
	- 60	- 30	30	60
- 60	0	- 20	- 20	5
- 30	- 5	- 15	- 25	- 5
30	- 5	- 25	- 20	- 5
60	5	- 15	- 15	0

取允许加工误差  $e = 0.01 \text{ mm}$ , 利用等参数线法安排走刀轨迹, 生成了曲面加工的刀轨。图 8 是刀具沿着曲面的  $u$  向走刀的轨迹图。图 9 是刀具沿着曲面的  $v$  向走刀的轨迹图。很明显工件曲面  $v$  向接近曲面的最小主曲率方向。通过两图的对比可以看出采用相同的刀具沿着工件曲面的最小主曲率方向可以获得较大的加工带宽。

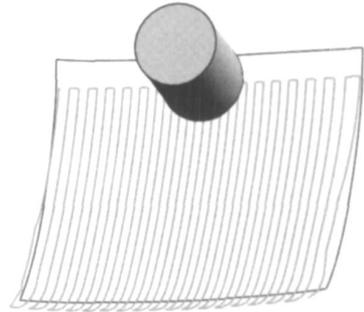


图 8 刀具沿着曲面的  $u$  向走刀的轨迹

Fig. 8 Tool path generated when feed direction is along  $u$  parameter of the surface

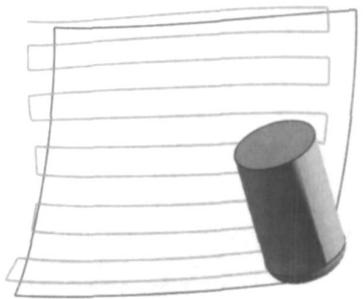


图 9 刀具沿着曲面的  $v$  向走刀的轨迹

Fig. 9 Tool path generated when feed direction is along  $v$  parameter of the surface

为了进一步考察刀位计算的结果, 可以对曲面上参数为  $u = 0.4, v = 0.5$  的点分别按照  $u$  向和  $v$  向作为走刀方向用端点误差控制数控加工算法计算加工刀位。经过优化计算后得到的最优刀位的加工带宽分别为  $5.707 \text{ mm}$  和  $16.858 \text{ mm}$ 。很明显以  $v$  向为走刀方向获得优化刀位有更大的加工带宽。以采样点对应环心圆的圆心角  $\phi$  为横

轴, 并且设第 1 个偏置点的横坐标为零, 可以得到这两个最优加工刀位对应的刀具前端误差分别为如图 10 和图 11 所示。

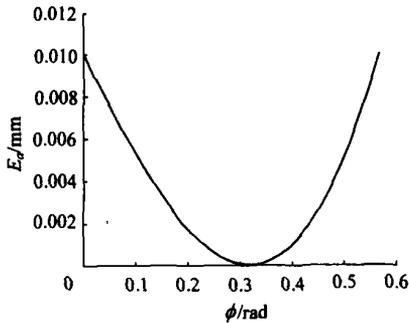


图 10 沿着  $u$  向走刀的最优刀位的刀具前端误差

Fig. 10 Forward machining error of the cutter calculated at the cutter location when feed direction is along  $u$  parameter of the surface

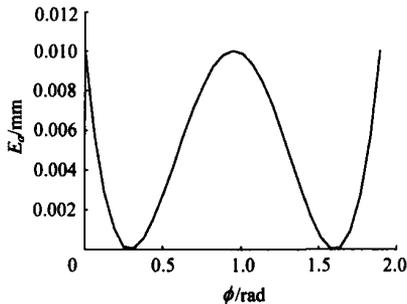


图 11 沿着  $v$  向走刀的最优刀位的刀具前端误差

Fig. 11 Forward machining error of the cutter calculated at the cutter location when feed direction is along  $v$  parameter of the surface

从图 10 和图 11 中可以看出, 当沿着工件曲面的  $u$  向走刀时, 刀具前端误差呈“U”形, 而沿着  $v$  向走刀时, 刀具前端误差呈“W”形。后者在加工带宽中有两个刀具前端离散点对应误差为零值, 这两个刀具前端离散点之间最大过切误差正好是允许加工误差。这种特征正是多点切触加工算法得到的刀位误差特征。当然和多点切触加工算法刀具和工件曲面在误差曲线上 2 个零点的满足切触条件的绝对切触不同, 在端点误差控制数控加工算法误差曲线上的 2 个零点处刀具和工件曲面是“伪切触”的, 但是这和获得较高的加工带宽并不产生矛盾。对其进行进一步的考察: 在加工误差曲线中误差为 0.01 mm 的两端对应的圆心角  $\phi_1 = 0$ ,  $\phi_2 = 1.89270$  rad。而加工误差曲线中误差近似为零的位置对应的圆心角  $\phi_0 = 0.31545$  rad,  $\phi_1 = 1.57725$  rad。根据参考文献 [3] 的关于 Hermite-Chebyshev 方法的推论, 如果得到加工误差曲线完全符合 Hermite 算法中的

四次曲线理论, 则圆心角  $\phi_1, \phi_0, \phi_2, \phi_r$  满足:  $\phi_1 = 0.5(\sqrt{2} + 1)\phi_0 - 0.5(\sqrt{2} - 1)\phi_2$ ,  $\phi_r = 0.5(\sqrt{2} + 1)\phi_2 - 0.5(\sqrt{2} - 1)\phi_0$  (在文献 [3] 中给出了错误的公式)。用端点误差控制数控加工算法得到的  $\phi_1, \phi_0, \phi_2, \phi_r$ , 代入有:  $\phi_1 - 0.5(\sqrt{2} + 1)\phi_0 - 0.5(\sqrt{2} - 1)\phi_2 = -0.05412$  rad,  $\phi_r - 0.5(\sqrt{2} + 1)\phi_2 - 0.5(\sqrt{2} - 1)\phi_0 = -0.07654$  rad, 可以发现它们近似满足 Hermite-Chebyshev 方法计算公式。对加工过程中的其他刀位点的计算也有类似相同特点。从而进一步证明端点误差控制数控加工算法可以获得加工带宽很宽, 并且与多点切触加工算法类似的刀位。

## 4 结 论

(1) 提出了用 2 个端点间偏置距离代替它们的参数差值衡量加工带宽, 并进行刀位优化方法, 使得刀位计算只与曲面形状有关, 不受具体的曲面参数化方式影响。

(2) 提出了新的刀具的旋转角度的计算方法, 通过首先计算把刀具前端中间离散点旋转到偏置曲面上所需的旋转角, 并在计算中引入数值迭代计算, 以大大简化刀具旋转角度的计算量。

(3) 提出了采用格点对偏置方向角进行优化的方法和计算流程, 完成整个端点误差控制数控加工算法的优化过程。

(4) 根据实例计算, 同样用端点误差控制数控加工算法进行刀位计算, 设置走刀方向沿着曲面的最小主曲率方向比沿着曲面的最大主曲率方向加工带宽更宽。前者应该是该算法的最优走刀方向。

(5) 实例计算表明, 当刀具沿着曲面的最小主曲率方向走刀时, 最优化的刀位和多点切触加工算法得到的加工刀位一致。而该算法同样适合于刀具的走刀方向偏离曲面的最小主曲率方向, 说明该算法有更大的适应性。

## 参 考 文 献

- [1] 倪炎榕. 环面刀具五坐标数控加工复杂曲面优化刀位计算及图形显示 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.  
Ni Y R. Optimal tool location calculation of sculpture surface and its graphics display in 5-axis NC machining with tours cutter [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999. (in Chinese)
- [2] Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Multi-point tool positioning strategy for 5-axis machining of sculptured surfaces [J].

Computer Aid Geometric Design ,2000 ,17 : 83-100.

- [3] Engeli M ,Waldvogel J ,Schnider T. Method for processing work pieces by removing material [ P]. United States Patent : US 6 485 236 26 ,2002.
- [4] 金曼. 基于叶片型面的五坐标刀位优化算法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学 ,2006.  
Jin M. Research on optimal algorithm of 5-axis tool positioning based on blade surface [D]. Beijing : Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,2006. (in Chinese)
- [5] 刘惟信. 机械优化设计[M]. 北京:清华大学出版社 ,1994.  
Liu W X. Optimal design in mechanics [ M]. Beijing : Tsinghua Uiniversity Press ,1994. (in Chinese)
- [6] 黄翔,李迎光. UG应用开发教程与实例精解[M]. 北京:清华大学出版社 ,2005.  
Huang X ,Li Y G. Tutorial and detail analysis with example of UG application development [ M]. Beijing : Tsinghua Uiniversity Press ,2005. (in Chinese)

作者简介:



王瑞秋(1981 - ) 男,博士研究生。主要研究方向:五坐标数控加工编程技术。  
E-mail :wrq\_work @126.com



金曼(1982 - ) 女,硕士研究生。主要研究方向:五坐标数控加工编程技术。  
E-mail :jinmanyjinmany @163.com



陈五一(1951 - ) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:并联数控加工机床技术、五坐标数控加工编程技术。  
Email :wychen @buaa.edu.cn



陈志同(1967 - ) 男,副教授,硕士生导师。主要研究方向:数控加工过程参数优化,数控加工编程优化技术以及精密机械加工与检测设备研制。

(责任编辑:蔡斐)