圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化

金 曼 张 俐 陈志同

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 在刀具和被加工曲面误差带上等距曲面的交线与特征线存在两个交点这一事实的基础上,提出了一种固定有效特征线段(特征线上位于公差带内的曲线段)端点误差值的新型刀位优化方法. 以刀具有效特征线段上两端点进行定位,通过调整两端点间的距离及刀具绕这两端点连线旋转的角度避免干涉,并实现刀位优化. 编制了程序,通过实例验证了新方法在避免干涉获得最大行宽和实现等波高刀轨排列方面的有效性.

关 键 词: 曲面; 加工; 算法; 优化; 干涉避免

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1125-04

End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining

Jin Man Zhang Li Chen Zhitong

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

Abstract: There were two points in the character-curve whose errors were equal to the required tolerance of the contour. And in the cutter surface and the to-be-machined surface, the corresponding points existed. Based on the phenomenon, a novel algorithm was brought forward. It was mainly to optimize the tool position under the condition of fixing the errors at the end-points of effective-character-curve-segment (the part of character curve within the tolerance zone). The torus cutter was first positioned by the two end-points. Then by adjusting the distance between the two points and the rotating angle around the line connected to the points, interference could be avoided, and optimization of the tool-orientation could be achieved. A program was developed to verify the validity of the algorithm in avoiding interference and realizing maximal path interval, iso-scallop tool path planning.

Key words: surface; machining; algorithm; optimization; interference suppression

圆环面刀具具有曲率变化范围大、切削条件好等优点,在复杂曲面高效加工方面具有重要研究价值和实用意义,但是通用高效的圆环面刀具刀位计算方法还没有建立起来. 近年来,人们提出了多种基于多点切触思想和宏域曲率吻合原则的圆环面刀具刀位算法,如 Hermite 算法[1]、MPM 算法[2]等多点算法和固定刀心坐标中两个坐标的最短距离线法[3]等.

1 多点法和最短距离线法分析

多点算法是以刀具与设计曲面在两点保持切触为条件进行刀具定位的. 图 1 中的曲线段 $A_{10}B_{10}$ 和 $A_{20}B_{20}$ 为两个相邻刀位环心圆上的均匀离散点对应误差值的误差分布曲线,w^{t1} 为加工带宽,A_1 和 A_2 点分别是计算左右两行刀位的起点或参考点,δ 是曲面的加工误差限. 采用这种方法

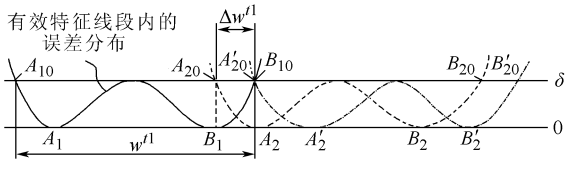


图 1 多点法中的相邻刀位之间的衔接关系

收稿日期: 2005-11-07

基金项目: 中国航空工业第一集团公司创新基金资助项目(CX03007)

作者简介: 金 曼(1982-),女,湖北石首人,硕士生,sunshinejinman@163.com.

得到的等效有效特征线段需要向参考点的两端延伸,如从 A_1 点出发找到 A_{10} 和 B_{10},从 A_2 点出发找到 A_{20} 和 B_{20},其结果是:由于 A_2A_{20} 之间的距离是后算的,因此要么牺牲有效特征线段处于参考点以外的某一端的有效行宽 Δw^{t1},要么需要增加额外的端点调整时间来搜索行宽方向的下一相邻刀位下的参考点 A'_2 计算出 B'_2 得到误差分布曲线 $A'_{20}B'_{20}$ 以获得最大的行宽.

刀心两坐标固定的最短距离线法若要控制精度也同样需要一定的调整来尽可能减少相邻刀轨的重叠.

本文提出一种端点误差控制刀位算法来解决该问题.

2 端点误差控制算法基本理论

2.1 等距曲面与等效原理

设目标曲面 $\boldsymbol{S}(u,v)$,其中 u,v 为曲面参数,刀具圆环面 T 的环心圆半径及小圆半径分别为 R 和 r. 如图2所示.

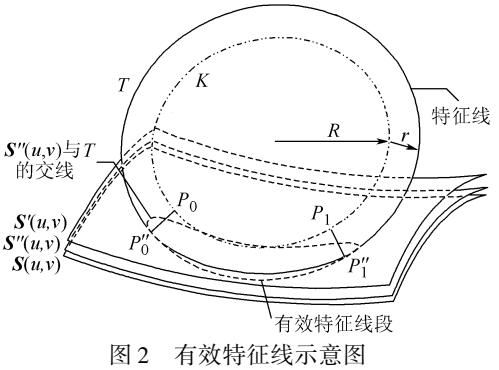


图2 有效特征线示意图

等距曲面 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 的方程为

$$\boldsymbol{S}'(u,v)=\boldsymbol{S}(u,v)+r\boldsymbol{n}(u,v) \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{n}(u,v)$ 为点 (u,v) 的单位外法线矢量.

设目标曲面 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 允许的加工过切误差(下偏差)为0,欠切误差(上偏差)为 δ. 则 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 为误差带的下误差界,与 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 距离为 δ 的等距曲面 $\boldsymbol{S}''(u,v)$ 为误差带的上误差界,上下误差界之间的区域为误差体,上误差界的方程为

$$\boldsymbol{S}''(u,v)=\boldsymbol{S}(u,v)+\delta\boldsymbol{n}(u,v) \tag{2}$$

根据文献[2]中所用结论,T 与 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 的位置关系可等效为刀具环心圆 K 与 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 的位置关系.

2.2 刀具的位姿方程

在 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 上取一点 P'_0,坐标为 (u,v),在对应的参数域上,以点 (u_0,v_0) 为圆心,l 为半径定义一个参数圆,此参数圆对应曲面 $\boldsymbol{S}''(u,v)$ 上的一条封闭曲线(如图3).

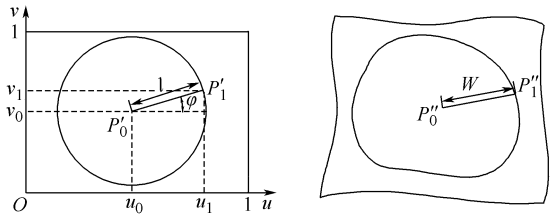


图3 参数圆及对应曲面上的封闭曲线

在该参数圆上取极角为 φ、极径为 l 的点 P'_1,坐标为 (u_1,v_1),其在参数坐标系中的直角坐标为

$$\begin{pmatrix}u_1\\v_1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}u_0\\v_0\end{pmatrix}+l\begin{pmatrix}\cos\varphi\\\sin\varphi\end{pmatrix} \tag{3}$$

将 (u_0,v_0),(u_1,v_1) 代入式(1)和式(2)可以得到这两点在曲面 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 和 $\boldsymbol{S}''(u,v)$ 上的对应坐标. 对应环心圆上的 P_0,P_1 点坐标为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{P}_0&=\boldsymbol{P}'_0+\delta\boldsymbol{n}_0\\\boldsymbol{P}_1&=\boldsymbol{P}_1'+\delta\boldsymbol{n}_1\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{n}_0$,$\boldsymbol{n}_1$ 分别是曲面 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 在 P'_0,P'_1 处的单位法矢.

使 K 通过 P_0,P_1 点,设 θ 为 K 绕 P_0P_1 的旋转角(如图4所示),K 相对 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 的位置可以由转角 θ 与 l,φ 唯一确定. 以 P_0 为坐标原点建立局部坐标系 $P_0e_1e_2e_3$[2],单位矢量 $\boldsymbol{e}_1,\boldsymbol{e}_2,\boldsymbol{e}_3$ 可表示为

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{e}_2&=\frac{\overrightarrow{P_0P_1}}{\|\overrightarrow{P_0P_1}\|}\\\boldsymbol{e}_1&=\frac{\boldsymbol{e}_2\times\boldsymbol{n}_0}{\|\boldsymbol{e}_2\times\boldsymbol{n}_0\|}\\\boldsymbol{e}_3&=\boldsymbol{e}_1\times\boldsymbol{e}_2\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

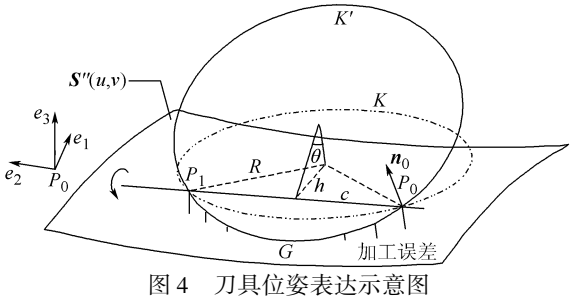


图4 刀具位姿表达示意图

设 $c=\frac{\|\overrightarrow{P_0P_1}\|}{2}$,$h=\sqrt{R^2-c^2}$,则在工件坐标系中,刀心点的坐标 $\boldsymbol{\rho}_c$ 和刀轴矢量 $\boldsymbol{A}_c$ 表示为

$$\boldsymbol{\rho}_c=h\cos\theta\boldsymbol{e}_1+c\boldsymbol{e}_2+h\sin\theta\boldsymbol{e}_3+\boldsymbol{P}_0 \tag{6}$$

$$\boldsymbol{A}_c=\cos\theta\boldsymbol{e}_3-\sin\theta\boldsymbol{e}_1 \tag{7}$$

2.3 圆环面刀具的有效特征线段

当圆环面刀具位于某一瞬时优化刀位时(如

图 2),在有工件存在的范围内,刀具表面和刀具表面包络面的交线就是特征线. 特征线上位于曲面 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 和 $\boldsymbol{S}''(u,v)$ 之间的部分 $P_0''P_1''$ 称作当前刀位下的有效特征线段.

2.4　误差分布函数

有效特征线段上的点到曲面 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 的有向距离的集合体现其误差分布. 现在这一误差分布可以从 K 上的点向 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 求有向距离获得. 均匀离散 K 成若干点,计算这些点到 $\boldsymbol{S}'(u,v)$ 的有向距离[4],该有向距离即为对应的刀具圆环面 T 上某点处的加工误差. P_0,P_1 间的小段圆弧对应的刀具圆环面部分为刀具实际参与切削的部分,这里称为前缘,大段圆弧对应的刀具圆环面部分称为后缘. 设前缘上点对应的有向距离集合为 E_f,后缘对应有向距离集合为 E_b,则环心圆上的点与集合 $E_f\cup E_b$ 存在映射关系,取自变量是与环心圆上的点存在一一映射关系的任何变量,如圆心角或点的序号. 称这一自变量到 $E_f\cup E_b$ 上的映射为误差分布函数.

3　端点误差控制刀位优化模型

3.1　基本约束条件

为了得到优化的刀位,我们需要控制每个刀位的有效特征线段的端点内的部分全部落在误差体中,这些点将复制出工件表面上合乎公差要求的点. 同时还要保证刀具的其它部分(后缘)不与 $\boldsymbol{S}(u,v)$ 发生干涉. 前一个条件称为精度控制条件,可以表示为

$$E_1=\left\{(\varphi,\theta,l)\ \middle|\ \min[E_f(\varphi,\theta,l)]\geqslant 0,\ \max[E_f(\varphi,\theta,l)]\leqslant\delta\ \middle|\ \right\}\tag{8}$$

后一个条件称为无干涉条件,可以表示为

$$E_2=\{(\varphi,\theta,l)\mid \min(E_b)\geqslant 0\}\tag{9}$$

满足上述条件的刀位称为基本可行刀位. 在图 5 中,A_{10},B_{10} 和 A_{20},B_{20} 分别为前后两个可行刀位的端点(A_{10} 和 A_{20} 对应图 2 中的 P_0'',B_{10} 和 B_{20} 对应图 2 中的 P_1''),这样就实现了两个刀位的首尾衔接,从而最大限度提高加工效率.

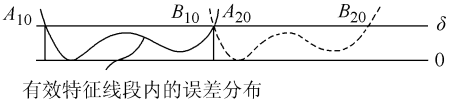


图 5　端点误差算法相邻刀位之间的衔接关系

3.2　目标函数

实现高效加工的一个方法是增加行宽,因此行宽是该优化问题的目标函数. 行宽应该在目标曲面上度量. 设刀具进给方向为 $\boldsymbol{f}$,则图 2 上刀位的行宽 W 可以表示为

$$W=\|\ \overrightarrow{P_0''P_1''}\times\boldsymbol{f}\ \|\tag{10}$$

将目标函数和基本约束条件写成刀位优化计算模型为

$$W^*(\varphi^*,\theta^*,l^*)=\max W(\varphi,\theta,l)\quad(\varphi,\theta,l)\in E_1\cap E_2\tag{11}$$

其中 W^* 为最优行宽. 对于某参考点 P_0,(φ^*,θ^*) 为最优刀位解. 该模型可以和不同使用者的其它具体要求相结合,构造出多种具体的优化模型.

4　端点误差控制算法流程

对于本文刀具定位中的 3 个参量 φ,θ 和 l,θ 是在 l 和 φ 确定的 P_0 和 P_1 点下使得刀具位姿满足 $\min[E_f(\varphi,\theta,l)]=0$ 的条件下求得的. 因此 θ 可以表示为 l 和 φ 的函数. 按照上述优化模型,首先对一定 φ 值下的 l 进行优化. 流程图如图 6 所示.

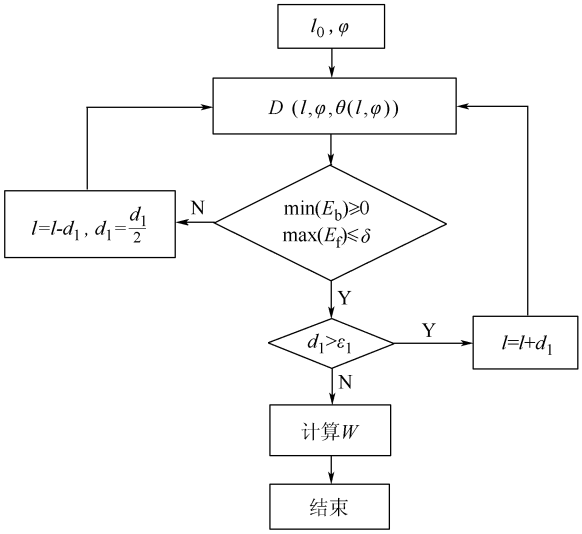


图 6　l 优化流程图

给定初始值 l_0,d_l 为 l 的调整步长,ε_l 为已经给定的极小正数. 因此对一定 φ 值就有一个优化的刀位 $D(l,\varphi,\theta(l,\varphi))$. 再参照每一 φ 值下的 l 对 φ 进行优化,确定其搜索区间. 当搜索区间 $[\varphi_a,\varphi_b]$ 的长度小于搜索精度 ε_φ 时,搜索结束. 在优化过程中可能分割成若干搜索区间,对每一区间收敛点上对应刀位的带宽进行比较,得到最大带宽 $W^*=\max\{W\mid W=f(\varphi)\}$ ($f(\varphi)$ 为 φ 的函数)即为最优刀位下的加工带宽,对应的刀位为最优刀位 D^*. 如图 7 所示.

当不确定刀具进给方向 $\boldsymbol{f}$ 时,按上述方法取得最佳刀位 D^* 和最大加工带宽 W^*,则一般情况下,结合曲面特性最佳进给方向 $\boldsymbol{f}$ 可以大致取为

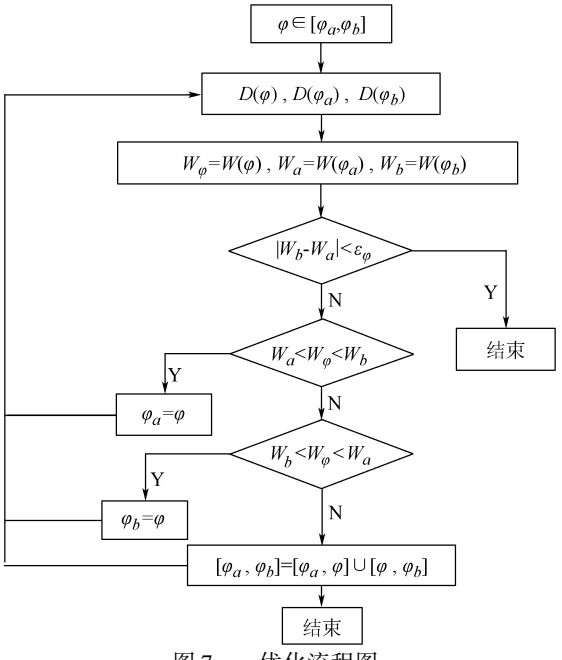


图 7 φ 优化流程图

与 $P_0''P_1''$ 垂直的方向. 当确定刀具进给方向 $\boldsymbol{f}$ 时,行宽可以按照式(10)计算. 从优化过程知道,该算法对 l,φ 的优化计算速度是线性收敛的. 这样的优化方法比较可靠.

5 实 例

以文献[4]中式(13)的曲面为例,刀具参数为 $R=5, r=3$. 则有

$$\boldsymbol{S}(u,v)=\begin{pmatrix}-94.4+88.9v+5.6v^2-131.1u+28.1u^2\\ 5.9(u^2v^2+u^2v)-3.9v^2u+76.2u^2+\\ 6.7v^2-27.3uv-50.8u+25.0v+12.1\end{pmatrix} \tag{12}$$

当误差限 δ 为 0.01 mm 且沿 u 方向进行加工时,采用本文算法加工整个曲面需要 14 行刀轨,平均行宽达到 8.2 mm 以上. 在 $u=0.5$ 处的等参数线上,其沿 v 方向上参数对应的误差分布如图 8 所示.

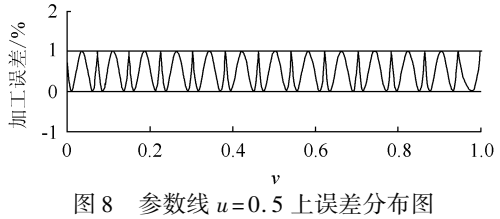
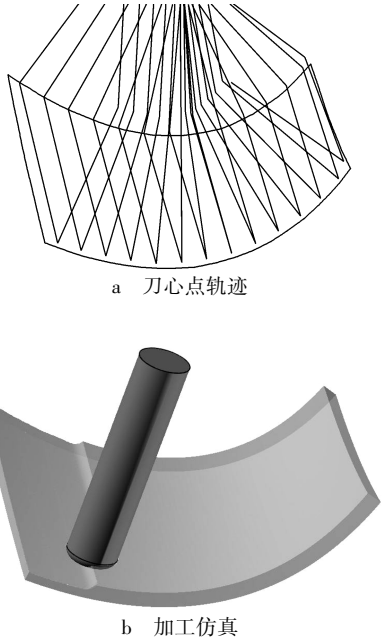


图 8 参数线 $u=0.5$ 上误差分布图

可以看到其误差分布呈“W”形,且实现了相邻误差带首尾相接. 与以往各种刀位优化算法相比[4],端点误差控制刀位优化算法在刀轨首尾衔接的精度控制上取得了较好的效果,避免了重复切削. 其加工刀心点轨迹图和加工仿真分别如图 9a 和图 9b 所示.



a 刀心点轨迹

b 加工仿真

图 9 刀心点轨迹图及加工仿真图

6 结 束 语

本算法在刀位优化的过程中有效地避免了干涉,刀位算法本身对走刀方向无限制,能得到较大行宽. 直接实现了行宽方向两个相邻刀位的首尾衔接,实现了精度的控制并提高了加工效率.

参考文献 (References)

[1] Max E, Jorg W, Thomas S. Method for processing work pieces by removing material[P]. United States Patent: US6,485,236, 2002-11-26

[2] Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Multi-point tool positioning strategy for five-axis machining of sculptured surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2000(17), 83-100

[3] 吕雪丽. 圆环面刀具五坐标数控宽行线接触加工复杂曲面的研究[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2003

Lü Xueli. On wide strip linear contact NC 5-axis machining of sculptured surface with torus mill[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[4] 沈兵, 高军. 用密切曲率法加工自由曲面[J]. 新技术新工艺,1998(4):19-21

Shen Bing, Gao Jun. Machining sculptured surfaces by curvature catering[J]. New Technology & New Process, 1998(4): 19-21(in Chinese)

(责任编辑:彭 徽)