鼓形刀宽行刀位优化纬线分割算法

李正强 陈志同 肖 俊

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：为便于鼓形刀定位和姿态调整，结合最短距离线对思想，将刀具沿纬度方向进行离散.为使刀具更好地适应工件的曲率分布，实现广域曲率分布吻合，采用单点切触方法，在加工曲面一定范围内寻求最佳切触点，以达到最大切削行宽；分别采用等参数和等波高2种刀位优化算法，编制了程序；通过实例验证了新算法在避免干涉并获得最大行宽、以及实现等参数和等波高刀轨排列方面的有效性.该技术对于提高航空复杂曲面结构件的加工效率和加工质量具有重要意义和广泛的应用前景.

关 键 词：鼓形刀；单点切触；最短距离线；宽行切削；优化刀位

中图分类号：TP 391.73

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0731-05

Latitude distribution algorithm of cutter position optimization on drum-like cutter for strip-maximization

Li Zhengqiang Chen Zhitong Xiao Jun

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

Abstract: Based on the theory of the shortest lines, the drum-like cutter was dispersed along the latitude direction convenient for the cutter location and pasture regulation. For global fitting the curvature distribution of the cutter and the surface to be machined, cutter was firstly located to one point at the machining surface; the best contact point was searched in a certain range at the machining surface for the maximum bandwidth. The iso-parametric tool-path planning method and the iso-scallops tool-path planning method were used. A program was developed to verify the validity of the new algorithm in avoiding interference, realizing maximal path interval, achieving the iso-parametric tool-path planning method and the iso-scallops tool-path planning method. It is very important and can be widely used to promote the machining efficiency and the quality of the machining sculptured surface in navigation apparently.

Key words: drum-like cutter; single-point contact; the shortest line; strip-maximization cutting; optimal tool position

复杂曲面在航空、航天、造船和模具行业中的应用非常广泛，其制造水平决定着这些机械系统的技术性能水平.自从20世纪70年代出现了五坐标数控加工机床以来，五坐标数控加工已经日益成为实现复杂曲面精密加工的必备手段.传统的采用球头刀加工复杂曲面的方法加工效率很低，远远不能满足批量生产的要求，机床的性能不能得到充分发挥.采用具有非单一曲率的复杂结构刀具得到了应有的重视，研究利用非球头刀具加工复杂曲面的刀位轨迹的计算方法成为近年的一个重要课题.

在关于五坐标加工的刀位计算中，很多文献都是基于刀具与被加工曲面在一点相切触来确定刀位，主要有 Sturz 方法[1]、基于局部曲率吻合[2]

收稿日期：2006-08-08

基金项目：国家自然科学基金资助项目

作者简介：李正强(1981—)，男，湖北襄樊人，硕士生，lizheng_2004@126.com.

的方法、滚球法[3]和泰勒算法[4].以上这些算法都是从微分几何的角度出发,只考虑刀刃与曲面在刀触点及小邻域范围内的接触情况,没有从刀刃和曲面接触的全局方面来考虑优化刀位、增大加工带宽,没有更有效地利用公差带.

目前五坐标侧铣加工通常都采用圆柱或圆锥铣刀,且多用于加工可展或不可展直纹面,这在一定程度上限制了侧铣加工在实际生产中的应用.与圆柱铣刀相比,鼓形刀的曲率变化更丰富,更适合于加工复杂曲面[5].引用将理论曲面蜕变成逼近的平面或直纹面的思想[6],采取分段逼近,实现侧铣高效加工.

传统的窄行点接触刀位算法主要是针对球头刀,只考虑切触点局域,且曲率恒定不变.本文算法采用的单点切触算法是利用最短距离线[7]的思想提出的一种鼓形刀刀位计算方法,在刀具母线上取一点使刀具在该点与工件相切触,在加工曲面一定区域内,通过计算寻求最佳切触点和调整刀具姿态角,进而调整落在公差带[8]内的最短距离线对,从而实现最大切削行宽,是一种基于宏域曲率吻合[9]的宽行线接触加工刀位优化算法.该算法充分利用了鼓形刀曲率变化的特点,使刀具与被加工曲面在比较宽的范围内曲率吻合,实现了宽行线接触加工.

1 算法基本原理

1.1 刀具定位

鼓形刀几何形状及尺寸参数如图1所示.其中,R_e为刀具母线半径,L为刀具长度,O为刀具母线圆心,O_t为刀具中心,R为过刀具中心且垂直于刀轴的截圆半径,$\boldsymbol{T}_a$为刀轴矢量.

为便于计算刀具表面上任意一点P_t的位置,在刀具中心O_t处建立刀具坐标系$O_t x_t y_t z_t$,如图1所示.S_2为$x_t O_t y_t$所在平面,S_1为过刀轴且与S_2成φ角的平面,π为过P_t点且垂直于刀轴的截平面,设π平面到刀具中心O_t距离为h,$C_p X_p$为S_2与π的交线,$C_p P_t$为S_1与π的交线,可知$C_p X_p$与$C_p P_t$的夹角为φ,刀具表面上任一点P_t在刀具坐标系下的坐标可用2个变量φ和h表示:

$$\left.\begin{aligned} x_t &= \left[\sqrt{R_e^2-h^2}-(R_e-R)\right]\cdot\cos\varphi \\ y_t &= \left[\sqrt{R_e^2-h^2}-(R_e-R)\right]\cdot\sin\varphi \\ z_t &= h \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中,$h\in[-L/2,L/2]$;$\varphi\in[-\pi,\pi]$.

首先让刀具上一点P_t和待加工曲面上任意一点P_0相切触,为便于计算刀具的位置和姿态,在刀触点P_0处建立局部坐标系$P_0 x_L y_L z_L$(如图2).x_L沿曲面$S(u,v)$在P_0点处u向偏导$\mathrm{d}u$的反方向,z_L沿曲面$S(u,v)$在P_0点处的外法线方向,y_L由x_L和z_L按右手螺旋法则确定.3个坐标轴正方向上的单位矢量分别为$\boldsymbol{b}$,$\boldsymbol{f}$,$\boldsymbol{n}$.图中,P_t与P是位于刀具表面同一母线上的2点;O为该母线圆心;θ_1为P_tO与PO的夹角;θ_2为刀具绕z_L的转角(沿z_L逆时针为正).此时,刀具位姿可由θ_1和θ_2唯一确定.刀位的计算过程即求在各切触点P_0所在局部坐标系中的2个摆角θ_1和θ_2,而这2个值由该点处各瞬时刀位中满足公差要求且加工行宽最宽的刀具位姿决定.

由图2中所示几何关系知,某一瞬时刀具在局部坐标系中的刀位如下:

1) 刀具中心位置:

$$\boldsymbol{O}_t(\theta_1,\theta_2)=\begin{pmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}d\sin\theta_1\\ 0\\ R_e-d\cos\theta_1\end{pmatrix} \quad (2)$$

2) 刀轴矢量:

$$\boldsymbol{T}_a(\theta_1,\theta_2)=\begin{pmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_1\\ 0\\ \sin\theta_1\end{pmatrix} \quad (3)$$

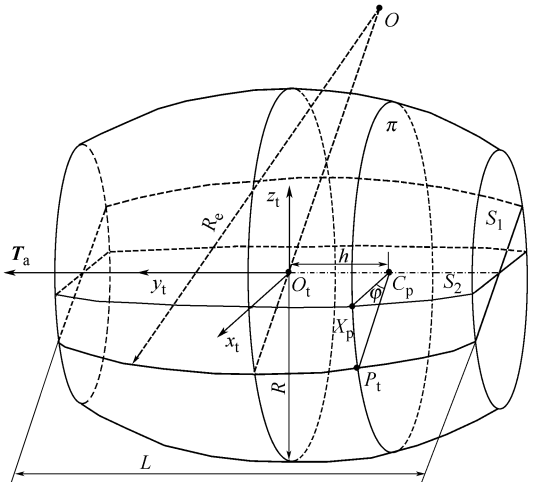


图1 鼓形刀几何参数

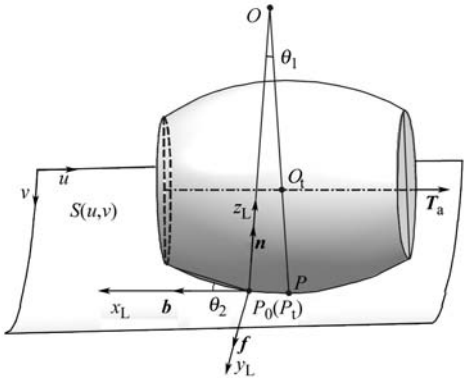


图2 局部坐标系中的刀位

式中,$d=R_e-R$;$\theta_1\in[-\theta,\theta]$;$\theta_2\in[0,2\pi]$;$\theta=\arcsin\left(\frac{L}{2R_e}\right)$;$\theta_2$ 绕 $\boldsymbol{n}$ 逆时针转为正.

1.2　刀位优化及刀轨规划

最优刀位即在不干涉情况下加工行宽最大的刀位.由此可知,刀位优化的过程亦即一个以加工行宽为目标函数、以不干涉为约束条件的优化过程.

1) 初始化 θ_1 和 θ_2(本算法取 $\theta_1=\theta_2=0$)以确定一个初始刀位 L_0,并通过求该刀位处刀具与被加工曲面的最短距离分布确定加工行宽 w,如图 3 所示.为便于刀具姿态的调整,沿刀具纬线方向将刀具离散成一定数量的截圆(纬线分割,设截圆数量为 $n+1$),求每个截圆到曲面的最短距离,将刀具和曲面上对应的距离最近点分别依次连接起来构成最短距离线对.此时,刀具上满足公差要求(刀具截圆到曲面的最短距离在允许加工误差范围之内)的最短距离线在走刀方向上的投影即为加工行宽.

2) 在初始刀位 L_0 基础上调整 θ_1(取 $\theta_1=-\arcsin(L/2R_e)+2i/n\cdot\arcsin(L/2R_e)$,$i=0,1,2,\cdots,n$),对于每一 θ_1,在$[-\pi/2,\pi/2]$范围内调整 θ_2 并记下最大行宽 $D_{1,\max}$处的 θ_1 和 θ_2,对于每一 θ_1 都可以找到使得行宽最大 $D_{i,\max}$($i=0,1,2,\cdots,n$)对应的 θ_2,则该刀位下的最大行宽 $D_{\max}=\max\{D_{i,\max}\}$($i=0,1,2,\cdots,n$),此时的 θ_1 和 θ_2 即为最优刀位所对应参数值.

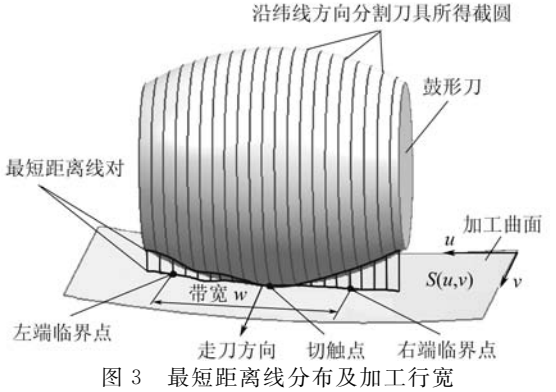


图 3　最短距离线分布及加工行宽

由于曲面参数的连续性,下一刀位的优化可在前一优化刀位的基础上进行,θ_1 和 θ_2 均在上一优化刀位参数的左右小领域范围内取值,具体搜索过程和前一刀位类似,最终得到一最优刀位.

刀轨规划上,本文分别采用等参数线法和等波高法,根据曲面的曲率分布情况确定走刀方向.为讨论方便,设该参数曲面沿 u 向曲率较小,为使刀具和曲面更好地吻合,选择沿 v 方向走刀.

1.2.1　等参数线法

1) 取曲面 $S(u,v)$的 v 参数线上一点 $P(u_{s,0},v_0)$作为初始刀位的切触点 P_0(一般取 $u_{s,0}=v_0=0$),在 v 参数线上按一定步长取点 $P(u_{s,0},v_0+\Delta v)$作为下一个刀位的切触点,并由上一个刀位求出当前的优化刀位直到 $v=1$,记下曲面上试算行刀轨中满足公差要求的所有左端临界点 $v_{l,i}$($i=0,1,\cdots,N-1$)的最大值 $\max v_{l,0}$,其中 N 为一行刀轨要计算的刀位数,所谓左端临界点即为刀具上满足公差要求的最左端截圆到曲面最短距离所对应的曲面上的点,如图 3.通过迭代求出满足 $-\varepsilon<\max v_{l,0}\leqslant 0$ 的切触点 $P(u_0,v_0)$作为第 1 行刀轨的第 1 个切触点,其中 ε 为相邻 2 行端点重叠误差,$\varepsilon=\min v_{r,0}$(前一行各刀位右端临界点 v 值的最小值)$-\max v_{l,0}$(后一行各刀位左端临界点 v 值的最大值).然后,在 v 参数线上按一定步长取点 $P(u_0,v_0+\Delta v)$作为下一个刀位的切触点,并由上一个刀位求出当前的优化刀位直到 $v=1$,即第 1 行刀轨结束.图 4a 中刀触点轨迹 1 为 $P(u_0,v_0+i\times\Delta v)$($i=0,1,\cdots,N-1$),刀心点轨迹 1 和右端点轨迹 1 分别为在以上各刀触点处优化刀位的刀心点和右端临界点轨迹.记下第 1 行刀轨中满足公差要求的所有右端临界点的 u 值 $u_{r,i}$($i=0,1,\cdots,N-1$)的最小值 $\min u_{r,0}$,如图 4a.

2) 取曲面 v 参数线上一点 $P(u_{s,1},v_1)$作为试算第 2 行刀位的切触点 P_0(一般取 $u_{s,1}=\frac{3}{2}u_0$),在 v 参数线上按一定步长取点 $P(u_{s,1},v_1+\Delta v)$作为下一个刀位的切触点,并由上一个刀位求出当前的优化刀位直到 $v=1$.图 4a 中刀触点轨迹 2 为 $P(u_{s,1},v_1+i\times\Delta v)$($i=0,1,\cdots,N-1$),刀心点轨迹 2 和左(右)端点轨迹 2 分别为在以上各刀触点处优化刀位的刀心点和左(右)端临界点轨迹.记下试算行刀轨中满足公差要求的所有左端临界点 u 值 $u_{l,i}$($i=0,1,\cdots,N-1$)的最大值 $\max u_{l,1}$,通过迭代求出满足 $0\leqslant\min u_{r,0}-\max u_{l,1}<\varepsilon$ 的切触点 $P(u_1,v_1)$作为第 2 行刀轨的第 1 个切触点.

重复上述 2 个步骤直到整个曲面加工完为止.

1.2.2　等波高法

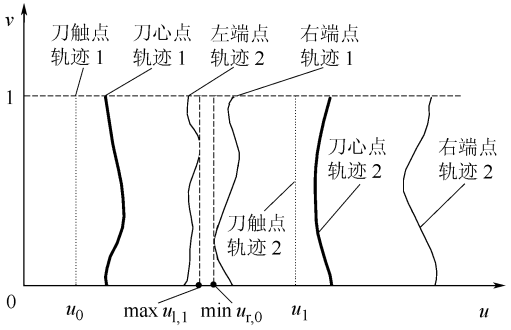
第 1 行刀位的计算同等参数线法,此时需要记下第 1 行每一个刀位满足公差要求的右端临界点的 u 值 $u_{r,i}$($i=0,1,\cdots,N-1$).

1) 取曲面 v 参数线上一点 $P(u_{s,1},v_1)$(取

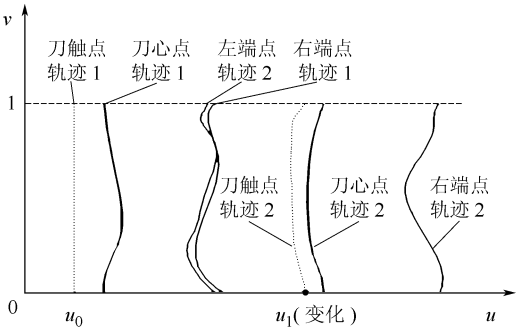
$u_{s,1}=\frac{3}{2}u_0$，$v_1=0$）作为试算第2行第1个刀位的切触点 P_0，记下满足公差（波高）要求的左端临界点的 u 值 $u_{l,1}$，通过迭代求出满足 $0\leqslant u_{r,1}\leqslant u_{l,1}<\varepsilon$ 的切触点 $P(u_1,v_1)$ 作为第2行第1个刀位的切触点（如图4b）.

2）在 v 参数线上按一定步长取点 $P(u_{s,2},v_1+\Delta v)$（Δv 同第1行相邻刀位间距，取 $u_{s,2}=\frac{3}{2}u_0$）作为下一个刀位的切触点，刀位调整方法同上一刀位，得到满足公差要求的切触点 $P(u_2,v_2)$，其中 $v_2=v_1+\Delta v$，依次求出该行各优化刀位直到 $v=1$.

重复上述2个步骤直到整个曲面加工完为止.



a 等参数刀轨编排



b 等波高刀轨编排

图4 刀轨编排

2 算法验证

2.1 刀具参数的选取

以文献[10]中如下参数方程定义的曲面为例：

$$\boldsymbol{S}(u,v)=\begin{pmatrix}-94.4+88.9v+5.6v^2\\-131.3u+28.1u^2\\5.9(u^2v^2+u^2v)-3.9v^2u+76.2u^2+\\6.7v^2-27.3uv-50.8u+25.0v+12.1\end{pmatrix}\tag{4}$$

参数曲面如图5所示.

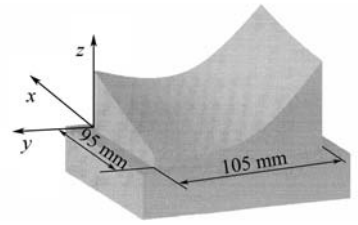
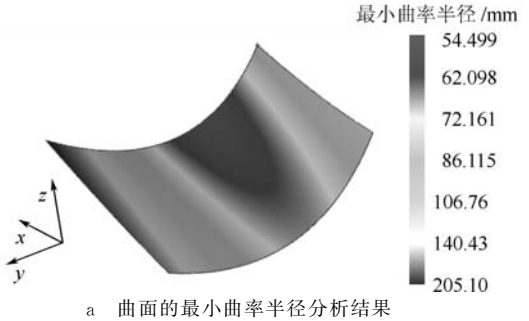


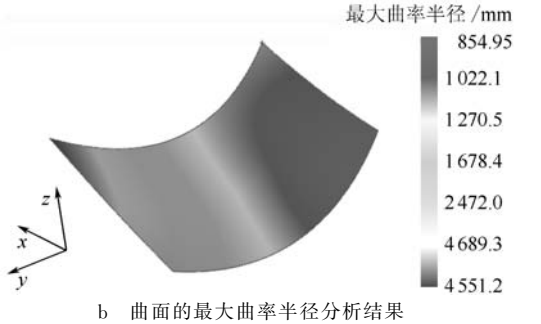
图5 参数曲面

从图1可以看出，当 $R=R_e$ 时，鼓形刀就变为球形刀；当 $R>2R_e$ 时，鼓形刀就变为圆环面刀. 刀具参数的选取以不与曲面发生过切为原则.

利用UG/CAD模块中的曲面分析功能对该参数曲面的最大最小曲率半径进行了分析，结果如图6所示. 曲面最小曲率半径的最小值为54.499 mm，曲面最大曲率半径的最小值为854.95 mm. 为避免刀具与曲面发生局部干涉，所选鼓形刀具的母线半径必须小于854.95 mm，且过刀心截圆半径要小于54.499 mm，初步选择鼓形刀的母线半径 $R_e=750$ mm，$R=50$ mm.



a 曲面的最小曲率半径分析结果



b 曲面的最大曲率半径分析结果

图6 曲面最大最小曲率半径分析

2.2 加工仿真

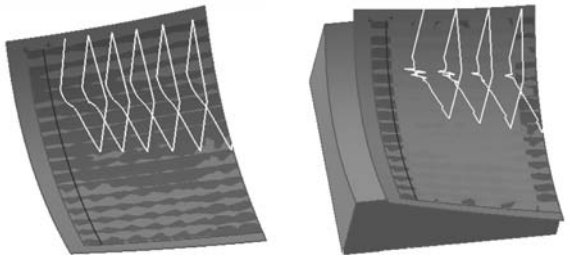
利用鼓形刀刀位优化算法，生成的刀轨分布比较均匀，如图7所示.

将生成的刀轨文件在VERICUT 5.3中进行仿真，结果如图8所示.

2.3 结果对比与分析

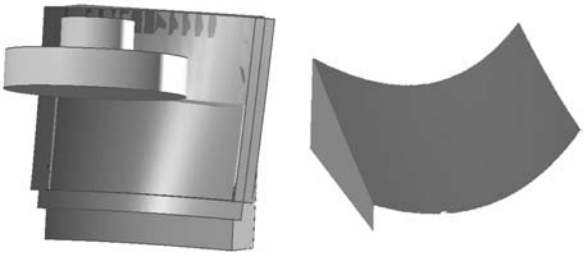
将精度控制在0.01 mm内，对于鼓形刀，刀具参数 $R_e=750$ mm，$R=50$ mm，$L=20$ mm，将2

种方法所求刀位结果进行对比可得表 1 所示结果.



a　等参数线法生成刀轨　　b　等波高法生成刀轨

图 7　鼓形刀刀心点轨迹图



a　加工过程仿真　　b　仿真结果

图 8　切削过程仿真及结果

表 1　不同算法的刀位结果

算法	刀轨数/行	平均带宽/mm
等参数线法	7	13.5
等波高法	5	18.9

具体加工视曲面曲率分布特征选择不同的算法,当曲面曲率变化较为缓慢时选择等波高法可提高加工效率,反之则采用等参数线法.

3　结 束 语

本文应用最短距离线对思想,在满足宏域曲率吻合原则的基础上,提出了一种鼓形刀宽行侧铣刀位优化算法.计算实例验证了算法的可行性.

参考文献(References)

[1] Madhavulu G, Sundar S V N A, Ahmed B. CAD/CAM solutions for efficient machining of turbo machinery components by sturz milling method[J]. Industrial Electronics Control and Instrumentations, 1996, 3(8):1490－1495

[2] Rao N, Ismail F, Bedi S. Tool path planning for five-aixs machining using the principal axis method[J]. Int J Machine Tools Manufact, 1997, 37(7):1025－1040

[3] Gray P, Bedi S, Ismail F. Rolling ball method for 5-axis surface machining[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(4):347－357

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

[5] 刘雄伟,张定华,杨海成,等. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000
Liu X W, Zhang D H, Yang H C, et al. NC machining theory and programming technologies[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000(in Chinese)

[6] 李亢,郭连水. 透平机叶轮叶片五轴数控粗加工优化方法的研究[J]. 航空学报,2006,27(3):505－508
Li K, Guo L S. Research on method of 5-axis NC rough machining of turbine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3):505－508(in Chinese)

[7] 吕雪丽. 广域曲率吻合原则与复杂曲面数控加工的全面优化[D].北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2003
Lü X L. Global curvature inosculate principle and comprehensive optimization of complex surface NC machining[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese)

[8] 金曼,张俐,陈志同. 圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(9):1125－1128
Jin M, Zhang L, Chen Z T. End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(9):1125－1128(in Chinese)

[9] 吕雪丽,张洪. 广域曲率吻合原则与复杂曲面数控加工的全面优化[J]. 机械设计与制造,2003,10(5):94－96
Lü X L, Zhang H. Principle of global curvature fitting and global optimization of sculptured surface NC machining[J]. Machinery Design and Machining, 2003, 10(5): 94－96(in Chinese)

[10] Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Comparison between multi-point and other five-axis tool positioning strategies[J]. Machining Tool & Manufacture, 2000, 40(2):185－208

(责任编辑:文丽芳)