



非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的三阶切触法(II): 刀位规划算法

朱利民^{①*}, 丁汉^②, 熊有伦^②

① 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;

② 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

* E-mail: zhulm@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-09-03; 接受日期: 2009-12-24

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2005CB724103)和国家自然科学基金(批准号: 50835004, 50775147)资助项目

摘要 基于单个刀位下刀具包络曲面的三阶近似模型, 提出了非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的刀位规划新方法. 该方法通过优化刀具的前倾角和侧倾角使得在刀触点处刀具包络曲面与设计曲面达到三阶切触, 适用于任意的回转刀具, 并且可以自然地处理无干涉约束、机床工作空间约束以及刀具路径光顺性约束. 圆环刀加工螺旋面的仿真实例表明该方法可以显著增大加工带宽, 提高加工效率.

关键词
非球头刀
三阶切触
刀位规划

五轴数控加工已成为工业中复杂高性能零件高效加工的重要手段. 采用非球头刀加工, 可以在刀具运动过程中通过调整其位置和姿态, 使得在刀触点轨迹线附近的带状区域内刀具包络曲面充分逼近理论设计曲面, 从而显著提高给定精度下的加工带宽, 因此在大型、平坦、敞口类曲面零件制造中有着广泛的应用. 五轴数控加工的成形原理为单参数面族包络原理, 真实的加工误差为刀具包络面相对于工件曲面的法向误差. 由于只有在所有刀位都确定之后才能计算刀具包络面^[1,2], 因此如何在单个刀位规划的时候考虑刀具包络面与工件曲面之间的偏差是个非常关键的问题, 它直接关系到刀位计算的精度. 由于操作上的难度及复杂性, 多数文献都采用了近似的简化处理^[3~11], 将刀位规划转化为单个刀位下, 刀具曲面与工件曲面间的优化逼近问题, 给出的各种刀位优化模型并不能真实地反映实际加工过程. 并且现有的方法多是“一把

钥匙开一把锁”, 仅仅适合某种曲面或某种刀具的刀位计算, 在通用性、可操作性、稳定性或加工精度方面还有许多需要改进的地方.

王小椿, Rao, Gong 等人^[12~14]相继从刀具包络面与设计曲面在刀触点处高阶切触的角度研究了刀位规划问题. 但这些工作存在以下不足. 1) 王小椿和 Rao 的方法仅适用于平底铣刀, 不能拓展到其他类型的回转刀具, 并且 Rao 的方法仅考虑了二阶切触条件; Gong 的方法虽然适用于一般的回转刀具, 但仅能实现刀具包络面与工件曲面的二阶切触. 这些方法的理论模型也互不兼容. 2) 上述工作均是将切触条件转化为等式方程, 从而严格计算出满足切触条件的刀位. 但在实际应用中, 由于刀具和设计曲面的复杂性, 以及无干涉约束、机床工作空间约束和刀具路径光顺性约束的存在, 往往无法实现精确的高阶切触加工. 本文将在前期工作^[15]中建立的单个刀位下刀具包络

曲面的三阶近似模型的基础上, 提出非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的刀位规划新方法. 该方法通过优化刀具的前倾角和侧倾角使得在刀触点处刀具包络曲面与设计曲面达到三阶切触, 适用于一般的回转刀具, 并且可以自然地处理各种几何学和运动学约束.

1 回转刀具五轴数控加工自由曲面的位置和姿态描述

1.1 刀具相对于设计曲面的姿态

如图 1 所示, 在设计曲面上建立局部坐标系 $\{O; T, B, N\}$, 其中 O 为刀触点, T 为进给方向单位矢量(即刀触点轨迹线的单位切矢), N 为设计曲面的单位法矢, $B = N \times T$. 为描述刀具相对于该局部坐标系的位置和姿态, 建立同刀具固联的坐标系 $\{O_i; X_i, Y_i, Z_i\}$, 其中 O_i 为刀具参考中心点, Z_i 为刀具轴线单位矢量, X_i 为 O_i 到刀触点所在母线的径向单位矢量, $Y_i = Z_i \times X_i$.

刀具曲面与设计曲面在刀触点 O 处相切. 刀具在局部坐标系 $\{O; T, B, N\}$ 中的姿态可以用其绕 B 轴旋转的角度-前倾角 λ 和绕 N 轴旋转的角度-侧倾角 ω 来描述. 如图 2 所示, 前倾角 λ 表示刀触点处曲面法矢 N 与刀具轴线 Z_i 的夹角, 而侧倾角 ω 则表示刀触点处刀具进给方向 T 与刀具母线的切方向 K 的夹角. 因此, 刀具固联坐标系与曲面局部坐标系之间有如

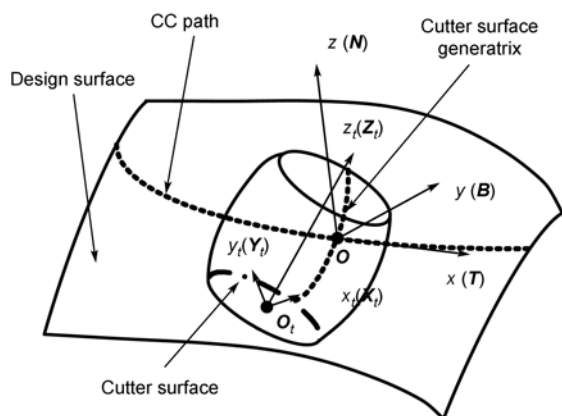


图 1 曲面上刀触点处局部坐标系与刀具固联坐标系

下旋转变换

$$[X_i \ Y_i \ Z_i] = [T \ B \ N]Q, \quad (1)$$

其中 Q 为旋转矩阵,

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & \sin \lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \lambda & 0 & \cos \lambda \end{bmatrix}. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得

$$[X_i \ Y_i \ Z_i] = [T \ B \ N] \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \lambda & -\sin \omega & \cos \omega \sin \lambda \\ \sin \omega \cos \lambda & \cos \omega & \sin \omega \sin \lambda \\ -\sin \lambda & 0 & \cos \lambda \end{bmatrix}. \quad (3)$$

1.2 刀具相对于设计曲面的位置

对于一般回转刀具, 其母线可以表示为固联坐标系中 $X_i - Z_i$ 平面的参数曲线

$$p(u) = [x(u) \ 0 \ z(u)]^T,$$

其中 $x(u)$ 和 $z(u)$ 分别表示母线上一点的回转半径和轴向距离.

回转刀具与 $X_i - Z_i$ 平面的截面如图 3 所示. O 为刀具回转面上的刀触点, N 为该点处的单位法矢, q 为该点处的法线与刀具轴线的交点. 刀具坐标系原点的位置可以表示为

$$O_i = O + aN - bZ_i, \quad (4)$$

其中 a 为 O 点到 q 点的距离, b 为 q 点到 O_i 点的距离. 刀具母线上刀触点 O 处的法向 N 与刀具轴向 Z_i 的夹角即为前倾角 λ , 因此有

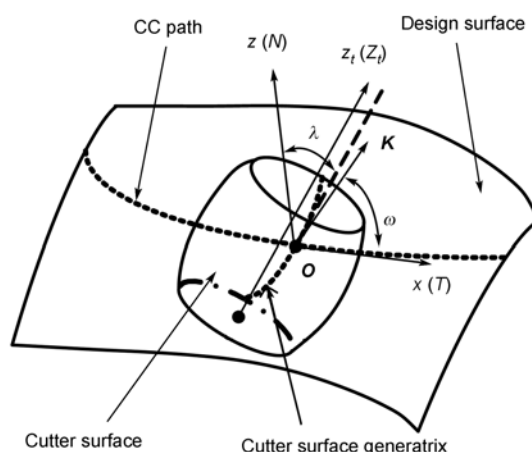


图 2 回转刀具的前倾角和侧倾角

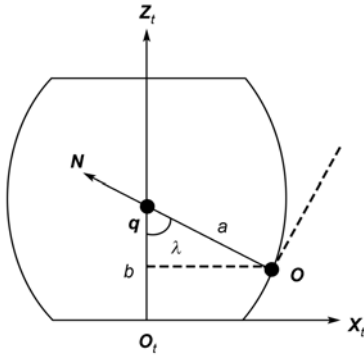


图3 回转刀具与 \$x_t\$-\$z_t\$ 平面的截面

$$\tan \lambda = \frac{z'(u)}{x'(u)}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} a = \frac{x(u)}{\sin \lambda}, \\ b = z(u) + \frac{x(u)}{\tan \lambda}. \end{cases} \quad (6)$$

给定前倾角 \$\lambda\$, 由(5)式可求得对应的 \$u\$, 代入(6)式即可求出对应的 \$a\$ 和 \$b\$.

由(3)~(6)式可知, 给定曲线上的刀触点 \$O\$ 和刀具前倾角 \$\lambda\$、侧倾角 \$\omega\$, 可确定刀具在局部坐标架中表示的刀位

$$\begin{cases} O_t = O - b(\lambda) \cos \omega \sin \lambda T \\ \quad - b(\lambda) \sin \omega \sin \lambda B + (a(\lambda) + b(\lambda) \cos \lambda) N, \\ Z_t = \cos \omega \sin \lambda T + \sin \omega \sin \lambda B + \cos \lambda N. \end{cases} \quad (7)$$

1.3 圆环刀相对于设计曲面的位置和姿态

如图 4 所示, 在圆环刀上建立刀具固联坐标架 \$\{O_t; X_t, Y_t, Z_t\}\$, 其中 \$O_t\$ 为圆环的环心. 设圆环的环心圆半径为 \$R\$, 母圆半径为 \$r\$, 刀具坐标架原点的位置为

$$O_t = O + rN - RX_t. \quad (8)$$

由(3)和(8)式知, 给定曲线上的刀触点 \$O\$ 和刀具前倾角 \$\lambda\$、侧倾角 \$\omega\$, 可确定圆环刀在局部坐标架中表示的刀位

$$\begin{cases} O_t = O - R \cos \omega \cos \lambda T \\ \quad - R \sin \omega \cos \lambda B + (r + R \sin \lambda) N, \\ Z_t = \cos \omega \sin \lambda T + \sin \omega \sin \lambda B + \cos \lambda N. \end{cases} \quad (9)$$

1.4 平底刀相对于设计曲面的位置和姿态

如图 5 所示, 在平底刀上建立刀具固联坐标架

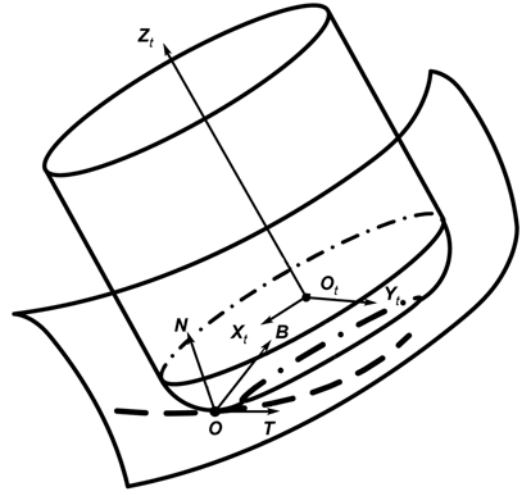


图4 圆环刀加工自由曲面的位置与姿态

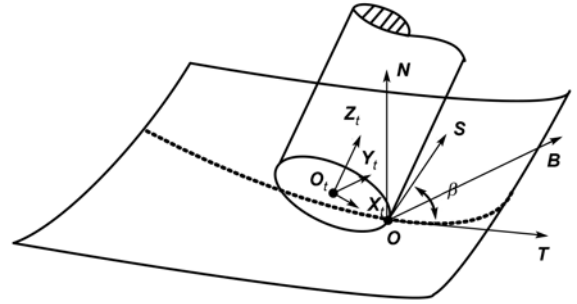


图5 平底刀加工自由曲面的位置与姿态

\$\{O_t; X_t, Y_t, Z_t\}\$, 其中 \$O_t\$ 为端圆的圆心, \$X_t\$ 为 \$O_t\$ 到刀触点 \$O\$ 的径向单位矢量. 刀具前倾角 \$\lambda\$ 为刀尖轨迹面与刀触点处设计曲面的切平面之间的夹角, 侧倾角 \$\omega = \beta - \pi/2\$, 其中 \$\beta\$ 为刀触点处平底刀端圆切方向 \$S\$ 与刀具进给方向 \$T\$ 之间的有向夹角. 设平底刀端圆半径为 \$R\$, 刀具坐标架原点的位置为

$$O_t = O - RX_t. \quad (10)$$

由(3)和(10)式知, 给定曲线上的刀触点 \$O\$ 和刀具前倾角 \$\lambda\$、侧倾角 \$\omega\$, 可确定平底刀在局部坐标架中表示的刀位

$$\begin{cases} O_t = O - R \cos \omega \cos \lambda T \\ \quad - R \sin \omega \cos \lambda B + R \sin \lambda N, \\ Z_t = \cos \omega \sin \lambda T + \sin \omega \sin \lambda B + \cos \lambda N. \end{cases} \quad (11)$$

1.5 圆柱刀相对于设计曲面的位置和姿态

如图 6 所示, 在圆柱刀上建立刀具固联坐标架

$\{O_i; X_i, Y_i, Z_i\}$, 其中 O_i 为端圆的圆心. 对于圆柱刀, 由(5)式知其前倾角 λ 为常数 $\pi/2$, 因此无法由(6)式求出刀具中心点的位置. 刀具可以沿其轴线移动, 参考中心点的位置是移动距离的函数. 由于圆柱刀的半径沿其轴线是恒定的, 因此刀具(中心点)沿轴线的移动对刀具曲面和设计曲面间的接触状态无影响. 为简化计算, 可将(7)式中的 a 设置为柱刀半径 R , b 设置为常数 b_0 . 因此给定曲面上的刀触点 O 和刀具侧倾角 ω , 可确定圆柱刀在局部坐标架中表示的刀位

$$\begin{cases} O_i = O - b_0 \cos \omega T - b_0 \sin \omega B + RN, \\ Z_i = \cos \omega T + \sin \omega B. \end{cases} \quad (12)$$

1.6 圆锥刀相对于设计曲面的位置和姿态

如图 7(a)所示, 在圆锥刀上建立刀具固联坐标架 $\{O_i; X_i, Y_i, Z_i\}$, 其中 O_i 为端圆的圆心. 设圆锥刀的端圆半径为 R , 半锥角为 φ . 圆锥刀与圆柱刀类似, 其前倾角 λ 为常数 $\pi/2 - \varphi$. 刀具可以沿其轴线移动, 参考中心点的位置是移动距离的函数. 参考图 7(b), 可得

$$\begin{cases} a = \frac{h \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} + \frac{R}{\cos \varphi}, \\ b = R \tan \varphi + \frac{h}{\cos^2 \varphi}. \end{cases} \quad (13)$$

因此给定曲面上的刀触点 O 和刀具侧倾角 ω 、刀具上刀触点的高度 h , 可确定圆锥刀在局部坐标架中表示的刀位

$$\begin{cases} O_i = O - b(h) \cos \omega \cos \varphi T \\ \quad - b(h) \sin \omega \cos \varphi B + (a(h) + b(h) \sin \varphi) N, \\ Z_i = \cos \omega \cos \varphi T + \sin \omega \cos \varphi B + \sin \varphi N. \end{cases} \quad (14)$$

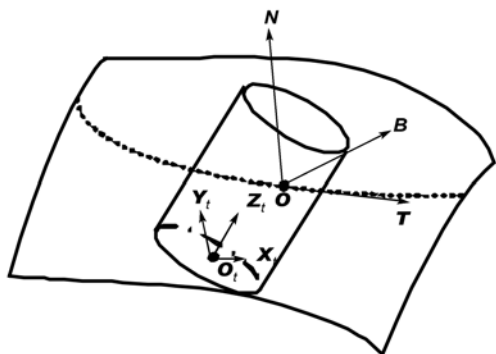


图 6 圆柱刀加工自由曲面的位置与姿态

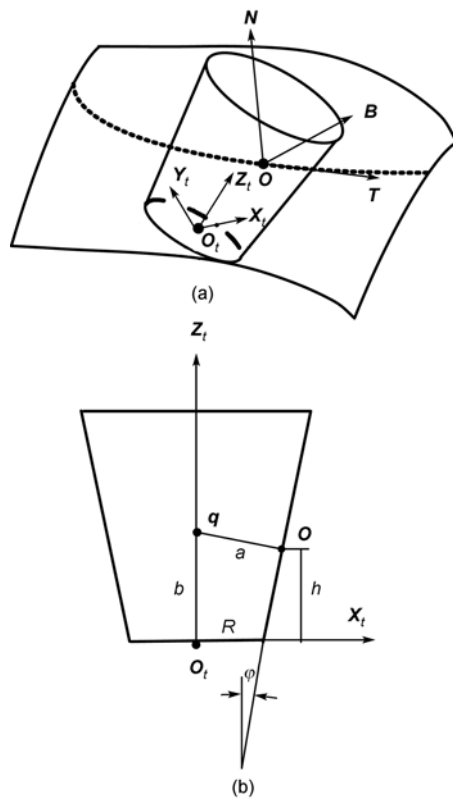


图 7 圆锥刀加工自由曲面的位置与姿态

在实际应用中, 由于锥刀移动不能超出待加工曲面的空间范围, 同时考虑到全局干涉的影响, 刀具的移动范围(即 h 值的变化范围)有很大的限制.

2 三阶切触加工自由曲面的刀位规划

2.1 一般回转刀具三阶切触法加工自由曲面的刀位优化模型

记刀具曲面为 $r^{(0)}$, 刀具包络曲面为 $r^{(1)}$, 设计曲面为 $r^{(2)}$, 刀触点为 O , O 点处的进给方向为 T , O 点处刀具包络面特征线的切方向为 S 与进给方向 T 之间的有向角为 β . 由 1.1 和 1.2 节的讨论知刀具的位置和姿态由前倾角 λ 和侧倾角 ω 决定, 且三阶切触刀位规划可以表述为如下约束优化问题

$$\begin{aligned} \text{P1.} \quad & \min_{(\lambda, \omega)} c(\lambda, \omega) = \left| \frac{(\dot{\kappa}_n^{(0)} - \dot{\kappa}_n^{(2)})|_{\beta(\lambda, \omega)}}{\sin^3 \beta(\lambda, \omega)} \right|, \\ \text{s.t.} \quad & (\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta(\lambda, \omega)} = 0. \end{aligned}$$

其中等式约束表示二阶切触条件, 若该问题无可行解, 可通过求解如下无约束优化问题得到近似的二阶切触刀位

$$\text{P2.} \quad \min_{(\lambda, \omega)} d(\lambda, \omega) = \left| \frac{(\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta(\lambda, \omega)}}{\sin^2 \beta(\lambda, \omega)} \right|.$$

2.2 平底刀三阶切触法加工自由曲面的刀位优化模型

平底刀的刀具包络面为刀尖轨迹圆空间运动生成的圆纹面, 其三阶局部重建模型不同于一般的回转面刀具. 平底刀的三阶切触刀位规划可以表述为如下约束优化问题

$$\text{P3.} \quad \min_{(\lambda, \omega)} c(\lambda, \omega) = \left| \frac{3\tau_s^{(2)}|_{\omega+\pi/2} \cos \lambda}{R \cos^3 \omega} + \frac{\dot{\kappa}_n^{(2)}|_{\omega+\pi/2}}{\cos^3 \omega} \right|,$$

$$\text{s.t.} \quad \kappa_n^{(2)}|_{\omega+\pi/2} = \frac{\sin \lambda}{R}.$$

给定侧倾角 ω , 由约束条件可以直接求出对应的前倾角 λ . 同样, 若不存在可行解, 可通过求解如下无约束优化问题得到近似的二阶切触刀位

$$\text{P4.} \quad \min_{(\lambda, \omega)} d(\lambda, \omega) = \left| \frac{\sin \lambda}{R \cos^2 \omega} - \frac{\kappa_n^{(2)}|_{\omega+\pi/2}}{\cos^2 \omega} \right|.$$

2.3 圆柱刀切触法加工自由曲面的刀位优化模型

对于圆柱刀, 在刀位优化时只能调整侧倾角 ω , 通过求解如下无约束优化问题得到近似的二阶切触刀位

$$\text{P5.} \quad \min_{\omega} d(\omega) = \left| \frac{(\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta(\omega)}}{\sin^2 \beta(\omega)} \right|.$$

2.4 圆锥刀切触法加工自由曲面的刀位优化模型

对于圆锥刀, 在刀位优化时可以调整侧倾角 ω 和轴向位移 h , 通过求解如下约束优化问题得到近似的三阶切触刀位

$$\text{P6.} \quad \min_{(\omega, h)} c(\omega, h) = \left| \frac{(\dot{\kappa}_n^{(0)} - \dot{\kappa}_n^{(2)})|_{\beta(\omega, h)}}{\sin^3 \beta(\omega, h)} \right|,$$

$$\text{s.t.} \quad (\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta(\omega, h)} = 0.$$

若该问题无可行解, 可通过求解如下无约束优化问

题得到近似的二阶切触刀位

$$\text{P7.} \quad \min_{(\omega, h)} d(\omega, h) = \left| \frac{(\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta(\omega, h)}}{\sin^2 \beta(\omega, h)} \right|.$$

2.5 一般回转刀具三阶切触法加工自由曲面的刀位规划算法

上述优化问题 P1~P7 表达式很复杂, 直接应用数值优化算法求解比较困难. 以优化问题 P1 为例, 我们提出如下半离散搜索算法, 其原理也适用于其它的优化问题.

输入. 设计曲面 $\mathbf{r}^{(2)}$ 及其上的刀触点 $\mathbf{O}$ 和进给方向 $\mathbf{T}$, 刀具坐标系中表示的回转刀具曲面 $\mathbf{r}^{(0)}$.

输出. 刀触点 $\mathbf{O}$ 处的近似三阶切触刀位 $(\lambda_{opt}, \omega_{opt})$.

步骤.

i) 计算刀触点 $\mathbf{O}$ 处 $\mathbf{r}^{(2)}$ 沿 $\mathbf{T}$ 方向的法曲率 $\kappa_{nT}^{(2)}$ 和测地挠率 $\tau_{sT}^{(2)}$.

ii) 固定刀具的前倾角 $\lambda = \lambda_i$, 对每一给定的侧倾角 ω 可确定刀具的位置和姿态, 计算 $\mathbf{r}^{(0)}$ 沿 $\mathbf{T}$ 方向的法曲率 $\kappa_{nT}^{(0)}$ 和测地挠率 $\tau_{sT}^{(0)}$, 由参考文献[15]中的(40)式计算特征线切方向 $\mathbf{S}$ 及其与进给方向 $\mathbf{T}$ 的夹角 β , 并进一步得到 $(\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta}$. 用数值法搜索得到满足二阶切触条件 $(\kappa_n^{(0)} - \kappa_n^{(2)})|_{\beta} = 0$ 的刀具侧倾角 ω_i 以及相应的切方向 $\mathbf{S}_i$ 与 $\mathbf{T}$ 间的夹角 β_i .

iii) 计算在摆角参数 (λ_i, ω_i) 确定的刀位下 $\mathbf{r}^{(0)}$ 和 $\mathbf{r}^{(2)}$ 沿 β_i 角方向的法曲率导数 $\dot{\kappa}_n^{(0)}$ 和 $\dot{\kappa}_n^{(2)}$, 以及相应的目标函数 $c(\lambda_i, \omega_i)$.

iv) 令刀具前倾角 λ 取不同值 $\lambda_i, i = 1, \dots, n$, 重复上述步骤 ii 和 iii, 得到一系列满足二阶切触条件的刀具摆角组合 (λ_i, ω_i) 及相应的目标函数值 $c(\lambda_i, \omega_i), i = 1, \dots, n$.

v) 取使目标函数取得最小值的摆角参数 $(\lambda_{opt}, \omega_{opt})$ 作为近似的三阶切触刀位.

在第 v) 步中, 可以将不满足几何学和运动学约束的二阶切触刀位排除在外^[16], 仅在满足要求的二阶切触刀位中筛选出近似的三阶切触刀位.

3 仿真算例

例 1. 以圆环刀加工螺旋面为例来验证三阶切触法的正确性和有效性. 该螺旋面的参数方程为

$$S(u,v)=\begin{bmatrix} u\cos v-\left(a+u\sqrt{\frac{a+u}{a-u}}\right)\sin v \\ u\sin v+\left(a+u\sqrt{\frac{a+u}{a-u}}\right)\cos v \\ -pv \end{bmatrix}.$$

$$-6\leq u\leq 8,\quad 0\leq v\leq 1.$$

(15)

螺旋面参数的取值为 $a=10, p=100$. 选定由 $u=-2$ 指定的参数线作为刀触点曲线, 参数 $u=-2, v=0.5$ 指定的点为感兴趣的刀触点, 设计曲面及其上的刀触点轨迹线和刀触点如图 8 所示.

圆环刀的环心圆半径为 10 mm, 圆角半径为 2.5 mm. 刀位优化计算结果如图 9 所示, 其中上图为满足二阶切触条件的所有刀位, 下图为不同刀位下的目标函数值(未取绝对值). 图中选定的两组刀具摆角值分别对应于目标函数值为 0 和 -0.016 的刀位. 显然三阶切触刀位是使目标函数值为零的刀位, 即摆角值 $(46.30^\circ, -35.46^\circ)$ 所确定的刀位. 如果在该刀位下会发生全局干涉, 则可在上图中将发生全局干涉, 以及不满足机床运动学约束和刀具路径光顺性约束的刀位点去除, 在剩余的可行刀位点中选取使目标函数取得最小值的那一个作为近似的三阶切触刀位.

如图 10 所示, 曲线(1)为与进给方向垂直的法截面

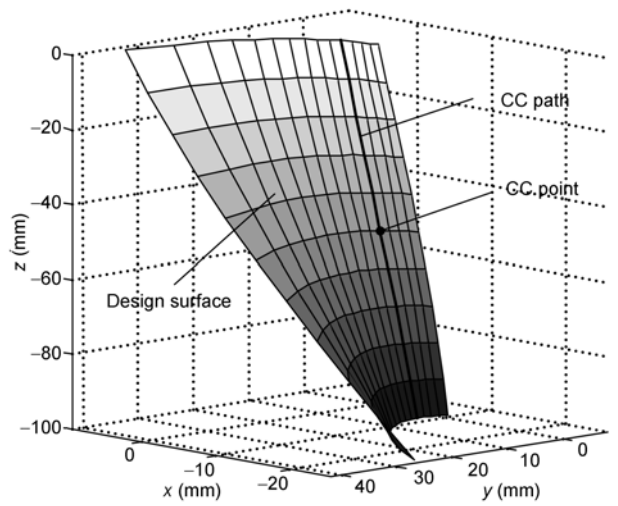


图 8 螺旋面及其上的刀触点轨迹线

面与设计曲面的交线, 曲线(2)、(3)为由图 9 所示的两个刀位重建的刀具包络曲面与该法截面的交线, 曲线(4)为 $R=5.5\text{ mm}$ 的球头刀具包络曲面与该法截面的交线(当采用球头铣刀加工该螺旋面时, 为了避免局部干涉, 刀具半径被限制为 <5.77). 限定加工误差 δ 为 0.005, 0.01 时, 上述三种加工方式的加工带宽如表 1 所示. 可以看出三阶切触加工实现了刀具包络曲面与设计曲面的局部最佳逼近, 即使与二阶切触加工相比也显著提高了加工效率.

表 1 加工带宽比较

	球头刀 ($R=5.5\text{ mm}$)	环刀二阶密切 ($\lambda=25^\circ$)	环刀三阶密切
$\delta=0.005$	0.69	2.48	5.28
$\delta=0.01$	0.98	3.12	6.14

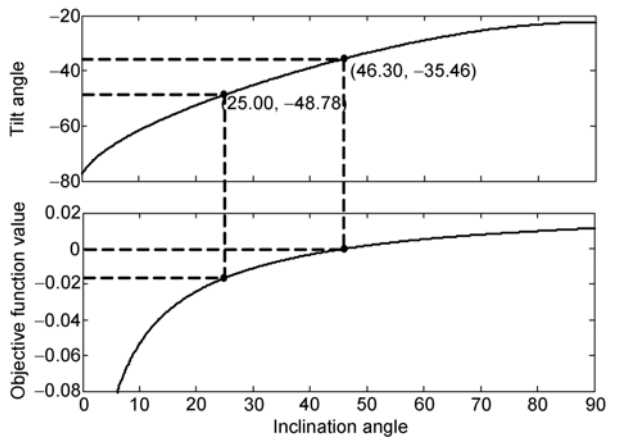


图 9 满足二阶切触条件的所有刀位及其对应的目标函数值

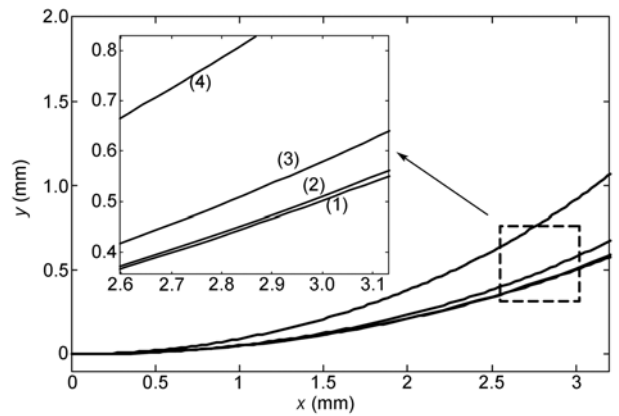


图 10 垂直于进给方向的法截面与设计曲面和刀具包络曲面的交线

例 2. 下面给出圆锥刀三阶切触法侧铣加工自由曲面的算例. 该例子取自文献[14], 设计曲面的参数方程为

$$\begin{cases} S(u, v) = \mathbf{r}(u, v) + 5\mathbf{n}(u, v), \\ \mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v}{\|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v\|}, \quad u \in [20, 60], \quad v \in [0, 1], \\ \mathbf{r}(u, v) = [0.974u \cos v \quad 0.974u \sin v \quad 11v + 0.224u]^T. \end{cases} \quad (16)$$

选定由 $u=35$ 指定的参数线作为刀触点轨迹线, 参数 $u=35, v=0.5$ 指定的点为感兴趣的刀触点, 设计曲面及其上的刀触点轨迹线和刀触点如图 11 所示.

选用的圆锥刀参数为: 底圆半径 $R=10$ mm, 高度 $H=40$ mm, 半锥角 $\varphi=11.31^\circ$. 刀位优化计算结果如图 12

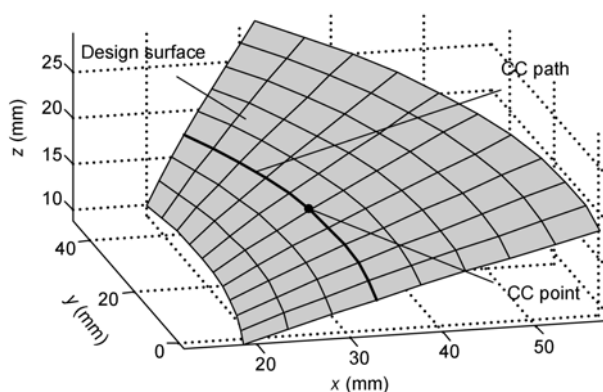


图 11 设计曲面及其上的刀触点轨迹线

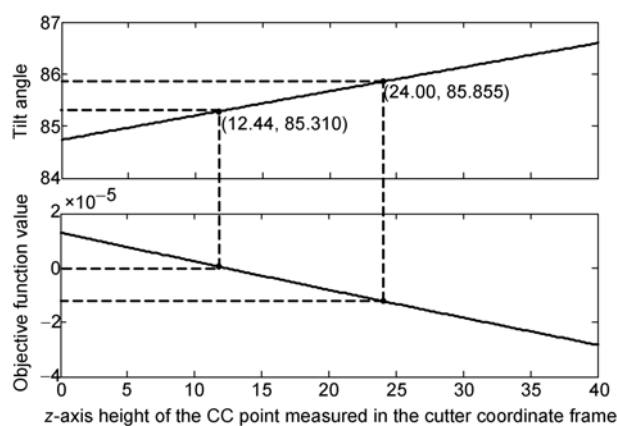


图 12 满足二阶切触条件的所有刀位及其对应的目标函数数值

所示, 三阶切触刀位是由轴向位移 12.44 mm, 侧倾角 85.31° 确定的刀位. 文献[14]中采用的是由轴向位移 24 mm, 侧倾角 85.855° 确定的二阶切触刀位.

4 结论

基于单个刀位下刀具包络曲面的三阶近似模型, 提出了非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的刀位规划新方法. 该方法通过优化刀具的前倾角和侧倾角使得在刀触点处刀具包络曲面与设计曲面达到三阶切触, 适用于任意的回转刀具, 并且可以自然地处理无干涉约束、机床工作空间约束以及刀具路径光顺性约束, 应用于较平坦的敞口曲面的五轴数控加工, 可以显著增大加工带宽, 提高加工效率.

致谢 作者就有关几何学模型与官虎博士进行过有益的探讨, 博士生郑刚为仿真算例编写了程序, 在此表示感谢.

参考文献

- 1 Zhu L M, Zheng G, Ding H. Formulating the swept envelope of rotary cutter undergoing general spatial motion for multi-axis NC machining. *Int J Mach Tool Manu*, 2009, 49(2): 199—202
- 2 Zhu L M, Zhang X M, Zheng G, et al. Analytical expression of the swept surface of a rotary cutter using the envelope theory of sphere congruence. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2009, 131(4): 041017-1—041017-7
- 3 Deng Z, Leu M C, Wang L, et al. Determination of flat-end cutter orientation in 5-axis machining. *ASME Med*, 1996, 4: 73—80
- 4 Kruth J P, Klewais P. Optimization and dynamic adaptation of the cutter inclination during five-axis milling of sculptured surfaces. *CIRP Ann-Manuf Tech*, 1994, 43(1): 443—448
- 5 Rao N, Bedi S, Buchal R. Implementation of the principal-axis method for machining of complex surfaces. *Int J Adv Manuf Tech*, 1996, 11(4): 249—257

- 6 Bedi S, Gravelle S, Chen Y H. Principal curvature alignment technique for machining complex surface. *J Manuf Sci E-T ASME*, 1997, 119(4B): 756—765
- 7 Warkentin A, Ismail F, Bedi S. Multi-point tool positioning strategy for 5-axis machining of sculptured surfaces. *Comput Aided Geom D*, 2000, 17(1): 83—100
- 8 Chiou C J, Lee Y S. A machining potential field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining. *Comput Aided Design*, 2002, 34(5): 357—371
- 9 Yoon J H, Pottmann H, Lee Y S. Locally optimal cutting positions for 5-axis sculptured surface machining. *Comput Aided Design*, 2003, 35(1): 69—81
- 10 倪炎榕, 马登哲, 张洪, 等. 圆环面刀具五坐标数控加工复杂曲面优化刀位算法. *机械工程学报*, 2001, 37(2): 87—91
- 11 曹利新, 吴宏基, 刘健. 基于五坐标数控圆柱形刀具线接触加工自由曲面的几何学原理. *机械工程学报*, 2003, 39(7): 134—137
- 12 王小椿, 吴序堂, 李艳斌. 密切曲率法——一种自由曲面加工的新概念. *西安交通大学学报*, 1992, 26(5): 51—58, 109—110
- 13 Rao A, Sarma R. On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools. *Comput Aided Design*, 2000, 32(7): 409—420
- 14 Gong H, Cao L X, Liu J. Second order approximation of tool envelope surface for 5-axis machining with single point contact. *Comput Aided Design*, 2008, 40(5): 604—615
- 15 朱利民, 丁汉, 熊有伦. 非球头刀宽行五轴数控加工自由曲面的三阶切触法(I): 刀具包络曲面的局部重建原理. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(12): 1268—1275
- 16 Bi Q Z, Wang Y H, Zhu L M, et al. Generating collision-free tool orientations for 5-axis NC machining with a short ball-end cutter. *Int J Prod Res*, 2010, 10.1080/00207540903436679