

# 不可展直纹面五轴侧铣加工刀路优化研究

计开顺

上海烟草机械有限责任公司, 上海, 201206

**摘要:** 本文基于不可展直纹面五轴侧铣加工中的实际问题, 推导了不可展直纹面侧铣加工原理误差和回转轴坐标转换关系, 提出了一种结合解析计算与CAD/CAM软件的刀路优化方法。该方法采用三次样条插值对侧铣刀路进行优化, 对回转轴急加减速区域的刀轴矢量进行修改或增加插补点, 在不可展直纹面加工实际中解决了因数模U、V信息失真造成的回转轴急加减速、干涉、过切、计算无解等问题, 有效改善了机床回转轴运动平滑性, 使速度波动平缓, 使加工出来的曲面更为光滑。

**关键词:** 不可展直纹面; 五轴联动; 侧铣加工; 刀路优化

## Tool Path Optimization for 5-Axis Undevelopable Ruled Surfaces Side Milling

Kaishun Ji

Shanghai Tobacco Machinery Co., Ltd, Shanghai, 201206

**Abstract:** The tool path optimization for five-axis side milling of undevelopable ruled surfaces is studied in this paper. And the mechanism of machining error of undevelopable ruled surface based on the geometrical error is analyzed. An arithmetic model of 5-axis milling center with double tables is established by means of applying matrix transformation theory. Practical problems in applying side milling in undevelopable ruled surface are considered such as tool orientation changing drastically between two neighboring contact points because of U/V data distortion in the tool path generated by CAD/CAM. A tool axis vector optimization method is introduced therefore. It revises the related vectors or inserts interpolation points in the non-interference region. Example shows that this method can effectively smooth the tool path and avoid overcut, interference induced by U/V data distortion.

**Keywords:** undevelopable ruled surface; 5-axis; side milling; tool path optimization

## 1 引言

复杂曲面类零件高精度成形加工技术是一个国家在国防、航空航天、能源、船舶运输、精密医疗设备等领域研发制造能力的体现。不可展直纹面正是此类核心零件型面的常见构造方法, 其相关研究对提升我国先进制

造工艺水平, 实现核心零件自主研发制造具有重要意义。五轴联动侧铣加工是国际上复杂曲面高效高精度加工技术领域的研究热点。与目前广泛采用的球头铣刀点接触加工方式相比, 侧铣加工利用立铣刀侧刃切削, 是一种线接触加工方式, 其材料去除率显著提高, 刀具磨损有效减少, 表面质量

明显改善。

在刀路轨迹设计方面, 使用球头铣刀点接触加工只需考虑刀具的可达性和干涉情况, 而使用立铣刀侧铣加工, 曲面加工精度不仅取决于刀具位置(x, y, z), 也与刀轴矢量(i, j, k)息息相关。而且在五轴加工过程中, 刀轴矢量的变化过程决定了机

床旋转轴的插补运动过程。所以刀具矢量规划是否合理对加工过程的稳定性有着直接影响。Liu X W对五轴侧铣加工刀具路径的生成算法进行了详细的分析,提出了目前实际应用最为广泛的单点偏置法(SPO)与双点偏置法(DPO)<sup>[1]</sup>。CHIOU从包络面与理论面的角度,将在加工过程中刀具回转曲面与直纹面的偏差作为目标函数,通过调整离散刀位使偏差达到最小,从轮廓整体误差的思路进行刀路设计<sup>[2]</sup>。REDONNET等提出了用于柱刀侧铣加工的三点规划方法<sup>[3]</sup>,两点是直纹面两条导线上的点,第三点则是母线上的点,通过解7个超越方程,让刀具与被加工曲面三点相切的算法,该算法是“点偏置”和“整体轮廓”两种思路的折衷。目前侧铣加工的应用仍局限于可展直纹面和少量不可展直纹面,但是国际上已经有学者和企业致力于研究任意曲面直纹化并进行侧铣高效加工的方法<sup>[4]</sup>。

尽管侧铣加工的刀路设计理论研究已不可谓不丰富,但侧铣加工在生产中的实际应用还有诸多问题有待于技术人员与学者解决。生产实际中多使用CAD/CAM软件根据通用3D模型生成刀路,经后处理转换成数控程序用于生产。但由于数字模型的U、V信息在建模过程中或格式转换过程中常出现失真的情况,CAD/CAM软件计算的五轴联动侧铣刀路往往存在干涉、过切、计算无解等种种问题。本文基于不可展直纹面五轴联动侧铣加工技术的实际应用,对CAD/CAM软件生成的刀具路径进行后期优化修改,将优化后的刀路用于实际加工,取得了良好的加工效果。

## 2 侧铣刀路设计与原理误差分析

由于不可展直纹面的高斯曲率不为零,母线上任意一点的法向矢量都互不平行,因此不可能存在与直纹面上所有点的法向矢量相交的刀轴矢量。也就是说理论上不可能用半径大于零的圆柱滚动包络面形成不可展直纹面。如图1所示被加工表面为不可展直纹面, $P_1$ 、 $P_2$ 分别为其母线的两个端点,曲线 $C_1$ 和 $C_2$ 为该直纹面的导线, $P_1$ 、 $P_2$ 点处的单位法向矢量为 $e_{n1}$ 、 $e_{n2}$ 。采用五轴联动数控加工,使刀具轴向与母线方向一致,设计刀路轨迹令铣刀沿导线运动形成加工包络面。由于铣刀只能在母线上某一点处使两曲面的法线方向一致,在其他点处法线方向不同,所以所形成包络面与设计曲面之间存在原理误差。

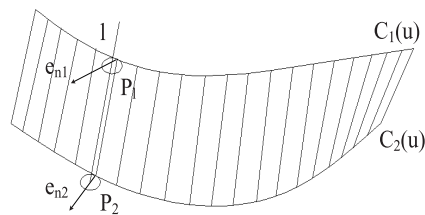


图1 刀路轨迹示意图

设图1所示不可展直纹面的矢量方程为:

$$r(u, v) = (1 - v)C_1(u) + vC_2(u) \quad (1)$$

其中,  $C_1(u)$ 、 $C_2(u)$ 为导线方程, $u$ 、 $v$ 为参数域内的变量。

过点 $P_2$ 作母线 $P_1P_2$ 的法平面,并将图1中各元素向法平面投影,如图2所示。作导线 $C_2$ 上点 $P_2$ 的曲率圆,半径为 $R_2$ ,圆心为 $O_2$ 。点 $P$ 为点 $P_1$ 、 $P_2$ 投影重合点, $\alpha$ 为 $e_{n1}$ 、 $e_{n2}$ 的夹角, $O_t$ 为刀具轴线1的投影点。

母线 $P_1P_2$ 上每一点到刀具旋转轴的距离为 $R$ ,即当立铣刀位于图1中的

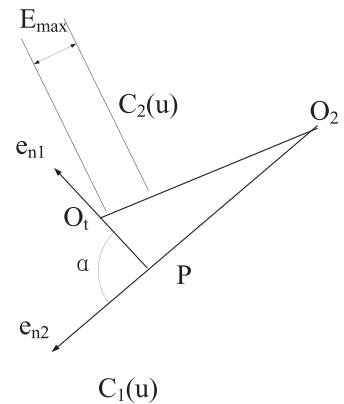


图2 法平面投影视图

位置,母线 $P_1P_2$ 上的加工误差为0,但由于 $e_{n1}$ 、 $e_{n2}$ 异向均会导致曲线 $C_2$ 上存在加工误差。最大加工误差发生在直线 $O_2O_t$ 与母线 $C_2$ 的交点处,如图2中阴影部分所示。经推导,当所加工表面为外凸表面时,最大加工误差 $E_{max}$ 为

$$E_{max} = R - d_{min} \quad (2)$$

由图2可知,不论加工凸面或凹面,由于 $e_{n1}$ 、 $e_{n2}$ 异向均会导致曲线 $C_2$ 上存在加工误差。最大加工误差发生在直线 $O_2O_t$ 与母线 $C_2$ 的交点处,如图2中阴影部分所示。经推导,当所加工表面为外凸表面时,最大加工误差 $E_{max}$ 为

$$E_{max} = R + R_2 - \sqrt{R^2 + R_2^2 + 2RR_2 \cos \alpha} \quad (3)$$

同理,当所加工表面为内凹表面时,最大加工误差 $E_{max}$ 为

$$E_{max} = R - R_2 + \sqrt{R^2 + R_2^2 - 2RR_2 \cos \alpha} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知, $E_{max}$ 与母线两个端点处法矢夹角 $\alpha$ 、刀具半径 $R$ 以及导线 $C_2$ 在点 $P_2$ 的曲率半径 $R_2$ 相关。两端点处法矢夹角 $\alpha$ 与两端点距离正相关。

## 3 刀轴矢量优化

五轴联动加工既是几何过程又

是物理过程，刀轴矢量的变化过程对整个机床—刀具—工件系统动力学性能有直接影响，在加工（特别是高速加工）中剧烈的刀轴矢量突变将导致机床旋转运动速度和加速度突变，直接影响加工质量甚至导致刀具破损。

五轴联动加工的物理过程由刀路轨迹和机床物理结构共同决定。以我公司某A、C轴双转台五轴联动机床为例，如图3所示，以刀具中心点 $O_t$ 为原点建立刀具坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$ ，刀轴矢量为 $(i, j, k)$ ；以机床两个回转轴的交点 $O_m$ 为原点建立机床转动坐标系 $O_m X_m Y_m Z_m$ ；坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为工件坐标系。刀具坐标系和工件坐标系的原点重合，记交点 $O_m$ 在工件坐标系中的位置矢量为 $r_m (m_x, m_y, m_z)$ ， $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$ 与机床转台结构尺寸有关。机床平动轴相对于初始状态的位置为 $r_s (s_x, s_y, s_z)$ ，回转轴A、C相对于初始状态的转角为 $a$ 、 $c$ 。在刀具坐标系中，刀具的位置和刀轴矢量分别为 $[0 \ 0 \ 0]^T$ 和 $[0 \ 0 \ 1]^T$ 。设工件坐标系中刀轴方向和位置矢量分别为 $u (x, y, z)$ 和 $r_p (i, j, k)$ 。

由机床运动链坐标变换，得：

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = T(r_m)R_z(-c)R_x(-a)T(r_s - r_m)[0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i & j & k & 0 \end{bmatrix}^T = T(r_m)R_z(-c)R_x(-a)T(r_s - r_m)[0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (6)$$

机床运动关系对应的各坐标变换矩阵为：

$$T(r_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & 1 & 0 & m_y \\ 0 & 0 & 1 & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

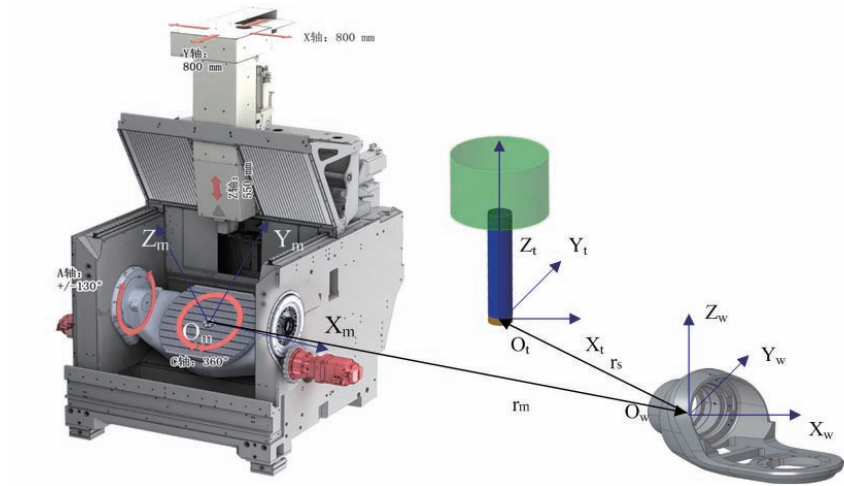


图3 相关坐标系

$$T(r_s - r_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x - m_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y - m_y \\ 0 & 0 & 1 & s_z - m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_z(-c) = \begin{bmatrix} \cos c & \sin c & 0 & 0 \\ -\sin c & \cos c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_x(-a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a & 0 \\ 0 & -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将坐标变换矩阵代入，得

$$\begin{cases} x = m_x + (s_x - m_x) \cos c + (s_y - m_y) \cos a \sin c + (s_z - m_z) \sin a \sin c \\ y = m_y - (s_x - m_x) \sin c + (s_y - m_y) \cos a \cos c + (s_z - m_z) \sin a \cos c \\ z = m_z - (s_y - m_y) \sin a + (s_z - m_z) \cos a \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i = \sin a \cos c \\ j = \sin a \sin c \\ k = \cos a \end{cases} \quad (12)$$

解方程得：

$$\begin{cases} a = \pm \arccos k \\ c = \arctan(\frac{j}{i}) - k\pi \end{cases} \quad k = 0, 1 \quad (13)$$

由以上坐标变换关系可知，机床旋转轴坐标不受线性轴变量影响，仅与工件坐标系下刀轴矢量非线性相关，因此仅通过刀轴矢量优化就能改善加工过程中的A、C轴动态性能。为了保证机床在运动时旋转轴的速度和加速度均匀变化，至少满足A、C轴转角在刀具路径上每个节点一阶、二阶连续。另外由于使用高阶多项式插值常常产生病态的结果，而三次样条是最常用的一种避免病态结果的插值方法[5]。因此本文选用三次样条插值对回转轴急加减速区域的刀轴矢量进行修改或增加插补点，从而对A、C轴转动平稳性进行优化。

结合上文对侧铣刀路原理误差的分析和旋转轴运动转换关系的推导，在加工实际中，优化流程如下：

- (1) 提取高斯曲率变化较大的区域刀路轨迹信息；
- (2) 对各刀位点对应的A、C转角值进行三次样条拟合；
- (3) 对原来的刀位点进行局部修改或增加过渡刀位点，代入拟合函