

# 曲面切削原理在五轴数控模具铣床上的实现

华南理工大学(510000) 胡青春

香港理工大学

C. Y. Chan

**摘要:**根据曲面切削原理控制铣床刀具的运动,从而实现无轴数控模具铣床,通过运用数学的坐标转换,理论分析在五轴数控模具铣床上实现曲面切削加工。

**关键词:**曲面切削 数控加工

## Contact Principle and the Realization on the 5 Axis - NC Machining Tool

Hu Qing-Chun C. Y. Chan

**Abstract:** Base on the principle of curved surface cutting and touching, it controls milling machine moving. Through mathematics coordinate transform, theory analyse the curved processing in five shaft Numerical control mold miller.

**Key words:** curved surface cutting; numerical control process

### 1 前言

在机械加工中,曲面加工难度大,技术含量高,随着数控机床的出现,曲面加工变得方便快捷,而且加工精度高,现通过理论分析曲面切削原理在五轴数控模具铣床上的实现。

### 2 坐标系的建立

根据曲面切削原理和高效加工方法,在被加工曲面任意点建立局部坐标系,  $x_m$ 、 $y_m$  在切平面上,刀具切线方向用  $\omega$  表示,刀具平面与切平面用  $\lambda$  表示。刀具坐标系与局部坐标系的关系:

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega & -\sin\omega & 0 \\ \sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\lambda & 0 & \sin\lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\lambda & 0 & \cos\lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_s & -\gamma \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\lambda & -\sin\omega & \cos\omega\sin\lambda \\ \sin\omega\cos\lambda & \cos\omega & \sin\omega\sin\lambda \\ -\sin\lambda & 0 & \cos\lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_s & -\gamma \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

刀具轴线在局部坐标系下:

$$\begin{bmatrix} l_m \\ m_m \\ n_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega\cos\lambda & -\sin\omega & \cos\omega\sin\lambda \\ \sin\omega\cos\lambda & \cos\omega & \sin\omega\sin\lambda \\ -\sin\lambda & 0 & \cos\lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega\sin\lambda \\ \sin\omega\sin\lambda \\ \cos\lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

刀具中心在局部坐标系下:

$$(x_c \ y_c \ z_c)^m = (\gamma\cos\lambda\cos\omega, -\gamma\cos\lambda\sin\omega, \gamma\sin\lambda) \quad (3)$$

局部坐标与总体坐标之关系,设  $i_m$ 、 $j_m$ 、 $k_m$  和  $i$ 、 $j$ 、 $k$  分别为坐标与总体坐标的基轴,则坐标变换矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} i_m \cdot i & j_m \cdot i & k_m \cdot i \\ i_m \cdot j & j_m \cdot j & k_m \cdot j \\ i_m \cdot k & j_m \cdot k & k_m \cdot k \end{bmatrix} \quad (4)$$

刀具轴线和刀心坐标在总体坐标系下:

$$(l \ m \ n)^T = A(l_m \ m_m \ n_m)^T \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} x_c & y_c & z_c \end{pmatrix}^T = A \begin{pmatrix} x_c^{(M)} & y_c^{(M)} & z_c^{(M)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

### 3 机床运动的约束

如何根据上述刀具轴线方向和刀具中心坐标来约束机床的运动呢?现在以二汽进口的西班牙 Kelingberg 五轴数控模具铣床为例,设机床刀轴方向是这样控制的,先过刀心建立与机床移动轴平行的  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$  坐标系,先绕  $z_1$  轴旋转  $\beta$  角得  $x_2$ 、 $y_2$ 、 $z_2$  坐标系,其中  $z_2$  与  $z_1$  重合,再绕  $x_2$  轴转  $\alpha$  角,得

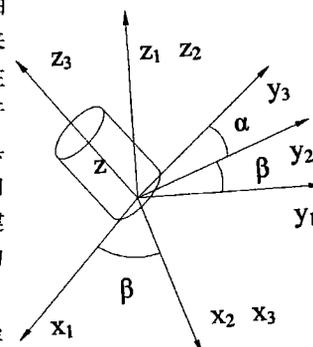


图3

$x_3$ 、 $y_3$ 、 $z_3$  坐标系,其中  $x_3$  与  $x_2$  重合,  $z_3$  轴便是刀具轴线方向,坐标变换矩阵:

$$C_{13} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta & -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\cos\beta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

刀具的轴线方向:  $[0 \ 0 \ 1]^T$  (8)

变换到坐标系  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$ :

$$(l' \ m' \ n')^T = C_{93} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T = (\sin\alpha\sin\beta - \sin\alpha\cos\beta \ \cos\alpha)^T \quad (8)$$

为使机床调整的刀具方向与高阶切削所要求的轴线方

作者简介:胡青春,男(1963-),博士,毕业于西安交大,岗位教授,主要从事机械加工自动化方面的研究。

收稿时期:2003-4-14

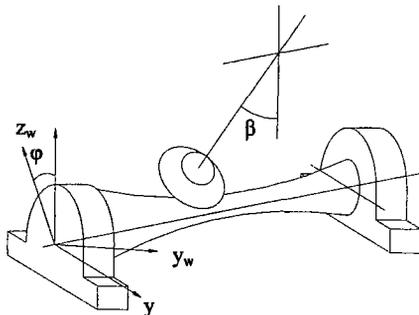
向一致,应有:

$$\frac{l}{l'} = \frac{m'}{m} = \frac{n}{n'} \quad (9)$$

由此求  $\alpha, \beta$ , 再由(6)式确定刀具中心位置。

#### 4 在东方汽轮机厂之瑞士进口的叶片专用五坐标数控铣床上

该机床上叶片安装在两支承上并可转动,刀轴可在铅垂平面内偏摆,同时可沿  $x, y, z$  三方向平移,工件固定坐标系与局部坐标系的变换矩阵:



图(2)

$$A_{WM} = \begin{bmatrix} i_m \cdot i_w & j_m \cdot i_w & k_m \cdot i_w \\ i_m \cdot j_w & j_m \cdot j_w & k_m \cdot j_w \\ i_m \cdot k_w & j_m \cdot k_w & k_m \cdot k_w \end{bmatrix} \quad (10)$$

刀轴在工件固定坐标系下:

$$(l_w \ m_w \ n_w)^T = A(l_m \ m_m \ n_m) \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_w \\ m_w \\ n_w \end{bmatrix}$$

工件转角应使刀轴在  $y$  方向分量为 0, 令  $m = 0$ , 求相应的  $\varphi$ 。再由  $\text{tg}\beta = L/n$ , 求刀轴摆角  $\beta$ 。

刀心坐标的确定:在工件坐标系下:

$$\begin{bmatrix} x_c^{(w)} \\ y_c^{(w)} \\ z_c^{(w)} \end{bmatrix} = A_{ij} \begin{bmatrix} x_c^{(m)} \\ y_c^{(m)} \\ z_c^{(m)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

在空间固定坐标系下:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_c^{(w)} \\ y_c^{(w)} \\ z_c^{(w)} \end{bmatrix}$$

#### 5 在双转台机床上

双转台机床具有刚性等优点,过工件轴与回转台回转轴之交点作固定坐标系,其中  $y, z$  平面平行于刀具平面,工件坐标系与局部坐标系的关系仍如(11)式,固定坐标与工件坐标系的关系:

$$\begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\cos\beta \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l_w \\ m_w \\ n_w \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } l = 0 \quad n = 0$$

$$-\sin\alpha m_w + \cos\alpha n_w = 0$$

$$\cos\beta l_w + \cos\alpha\cos\beta m_w + \sin\beta\sin\alpha n_w = 0$$

分别求  $\alpha, \beta$ , 其中  $\alpha$  为绕工件转角,  $\beta$  为回转角。刀心坐标:

$$r_c = A(\beta, \alpha)r_c^{(w)}$$

$$r_c^{(w)} = A(i_m, j_m)r_c^{(m)} + r_0$$

在双转台机床上(同上略)。

#### 参考文献

- 1 吴大任.微分几何(第二版).高等教育出版社,2001.
- 2 何兆太.曲面三阶局部切削及其应用.机械,2002(第5期):10-12.

(上接第40页)

$$r_i = x_{左} - x_i = x_i - x_{右} = z_i \text{tg}\beta_{左} - z_i \text{tg}\beta_{右} = z_i \text{tg}\beta_{右} - z_i \text{tg}\beta_{左} \quad (6)$$

$\beta_{左} \beta_{右}$  分别为斜锥体最左侧和最右侧母线的倾斜角。

相交平面的位置:

$$x = X \quad (7)$$

展开图起始向径:

$$\rho_0 = OA = \frac{X}{\cos\beta_{左}} \quad (8)$$

对左截平面和展角:

$$z_0 = \frac{X}{\text{tg}\beta_{左}} \quad \varphi = 0 \quad (9)$$

采用上述方法,用一系列平面  $z = z_i$  截斜圆锥体,再利用所得到的一系列截面求展角  $\varphi$  与  $t$  的对左关系。由俯视图,BCD 平面上  $s$  与  $t$  的关系

$$s_i(t) = r_i t \quad \frac{ds_i}{dt} = r_i \quad (10)$$

$t$  的最大值(即与所示的向径  $OC$  对左的  $t$  值):

$$r_i \cos t_i = X - x_i = X - z_i \text{tg}\beta \quad (11)$$

向径  $\rho$  与  $t$  的关系:

$$\rho_i(t) = \sqrt{X^2 + z_i^2 + (r_i \sin t)^2} \quad (12)$$

将以上表达式代入(3)式

$$\varphi_i = \int_0^{t_i} \frac{\sqrt{(\frac{ds}{dt})^2 + (\frac{d\rho_i}{dt})^2}}{\rho_i(t)} \quad (13)$$

$$\rho_i = \rho_i(t_i) \quad (14)$$

由(13)(14)式得到所要展开图上一点的坐标  $(\rho_i, \varphi_i)$ , 依次取截面,可得到一系列  $(\rho_i, \varphi_i)$ , 从而得到斜圆锥体相贯线的展开曲线。

#### 3 结论

用类似替代的方法就避开了常规方法中遇到的问题,并能计算和准确的确定。文中对这种方法进行了详细的分析,提出的处理方法为斜圆锥体交线展开和类似问题的解决找到了一种很好的思路。

#### 参考文献

- 1 艾运均.曲面展开图计算[M].水电出版社.