



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104678888 B

(45)授权公告日 2017.08.25

(21)申请号 201310628007.3

(22)申请日 2013.12.02

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104678888 A

(43)申请公布日 2015.06.03

(73)专利权人 昌河飞机工业(集团)有限责任公  
司

地址 333002 江西省景德镇市109信箱

(72)发明人 徐汝锋 吴献珍 陈志同 胡超鹏  
熊曦耀 徐义平 蒋理科

(74)专利代理机构 中国航空专利中心 11008  
代理人 杜永保

(51)Int.Cl.  
G05B 19/19(2006.01)

(56)对比文件

CN 102508956 A,2012.06.20,

US 4070608 ,1978.01.24,

CN 103197601 A,2013.07.10,

CN 103286360 A,2013.09.11,

XU Rufeng等.Tool Positioning

Algorithm Based on Smooth Tool Paths for  
5-axis Machining.《Chinese Journal of  
Mechanical Engineering》.2011,第24卷(第5  
期),第851-858页.

审查员 傅磊

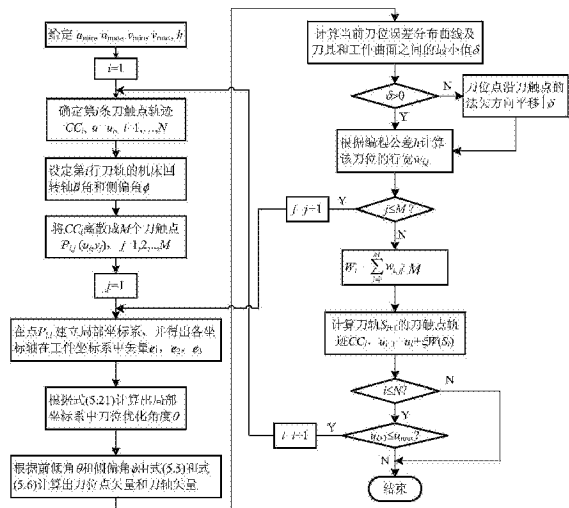
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲  
面刀轨生成方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法。该方法以摆头转台类五轴数控机床为例进行阐述,首先建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程,以及刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程,进而推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程。然后,对于上述方程进行了分析和讨论,并推导出已知方程组中任意两个变量求解另外两个变量的公式,从而得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式。在此基础上,给出了环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成算法的基本原理和计算流程。试验结果表明,该算法不仅能避免机床旋转轴大幅度变化和提高了机床运动轴的进给速度,而且能获得较高的曲面加工质量,具有一定的实际应用价值。



CN 104678888 B

1. 基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,其特征是,该方法包括以下步骤:

A、建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程,以及刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程,进而推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程;

B、根据上述关系方程,推导出已知方程中任意两个变量求解另外两个变量的公式,并根据工件曲面的特点和所使用多轴数控机床的具体结构特征,得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式;

C、基于上述刀位计算公式,计算得到环形刀多轴加工复杂曲面刀轨;.步骤A中,建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程:

$$\mathbf{t}_{\text{axis}}^{\text{WCS}} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \cos \phi \sin \theta + x_2 \sin \phi \sin \theta + x_3 \cos \theta \\ y_1 \cos \phi \sin \theta + y_2 \sin \phi \sin \theta + y_3 \cos \theta \\ z_1 \cos \phi \sin \theta + z_2 \sin \phi \sin \theta + z_3 \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  和  $(x_3, y_3, z_3)$  分别为局部坐标系  $O_L X_2 Y_2 Z_2$  的坐标轴  $X_2$ 、 $Y_2$  和  $Z_2$  在工件坐标系 WCS 中的单位矢量,  $\theta$  为刀轴绕  $Y_2$  轴旋转的偏航角,  $\phi$  为刀轴绕  $Z_2$  轴旋转的俯仰角;

然后,根据所使用的摆头转台类五轴数控机床的具体结构特征,建立刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程:

$$\begin{cases} i = \sin B \\ j = -\cos B \sin A \\ k = \cos B \cos A \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $(i, j, k)$  为刀轴方向矢量,  $A$  为摆头转台类五轴数控机床的旋转轴绕  $X$  轴的回转角度,  $B$  为摆头转台类五轴数控机床的旋转轴绕  $Y$  轴的回转角度;

最后,推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程:

$$\begin{cases} \sin B = x_1 \cos \phi \sin \theta + x_2 \sin \phi \sin \theta + x_3 \cos \theta \\ -\cos B \sin A = y_1 \cos \phi \sin \theta + y_2 \sin \phi \sin \theta + y_3 \cos \theta \\ \cos B \cos A = z_1 \cos \phi \sin \theta + z_2 \sin \phi \sin \theta + z_3 \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

2. 如权利要求1所述的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,其特征是,步骤B中,首先,通过分析和讨论上述关系方程-式(3),并推导出已知方程中任意两个变量求解另外两个变量的公式;通过分析该方程组总共可以确定有六种求解情况:(1)已知  $\theta$  和  $\phi$  求解  $A$  和  $B$ , (2)已知  $A$  和  $B$  求解  $\theta$  和  $\phi$ , (3)已知  $\phi$  和  $B$  求解  $\theta$  和  $A$ , (4)已知  $\phi$  和  $A$  求解  $\theta$  和  $B$ , (5)已知  $\theta$  和  $B$  求解  $\phi$  和  $A$ , (6)已知  $\theta$  和  $A$  求解  $\phi$  和  $B$ ;针对上述各种情况,都可以确定相应的计算公式;

然后,根据工件曲面的特点和所使用多轴数控机床的具体结构特征,得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式。

3. 如权利要求1所述的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,其特征是,步骤C的具体计算流程如下:

首先,要利用步骤B中得到的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式来进行刀具定位;

然后,利用等参数线法、等截面线法或等残留高度法进行刀轨规划,并生成覆盖整个工件曲面的刀具轨迹。

4.如权利要求3所述的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,其特征是,上述步骤C中刀具定位包括:将对所述的环形刀的刀心位置矢量和刀轴矢量进行确定;

$$t_{axis}^{WCS} = (e_1, e_2, e_3) t_{axis}^{LCS} \quad (6)$$

$$t_{pos}^{WCS} = (e_1, e_2, e_3) t_{pos}^{LCS} \quad (7)$$

其中,  $e_1 = (x_1, y_1, z_1)^T$ ,  $e_2 = (x_2, y_2, z_2)^T$ ,  $e_3 = (x_3, y_3, z_3)^T$ 。

## 基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种多轴数控机床加工复杂曲面的刀轨生成方法,尤其涉及一种基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法。

### 背景技术

[0002] 当五轴加工复杂曲面时,由于曲面几何性质较差,比如曲面的法向量、主方向、曲率等,因此容易导致所生成的刀具轨迹波动较大和刀轴矢量突变。即使采用球头刀五轴加工这些曲面区域,也会引起刀轴矢量的剧烈变化,从而影响机床运动的平稳性、超出机床进给轴的伺服能力和增大加工过程中的非线性误差等。因此,获得多轴数控加工中光滑的刀具轨迹和刀轴矢量成为曲面加工技术的重要发展方向。

[0003] 现有技术中,环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法有多种。

[0004] 现有技术一,刀轴倾斜法(Sturz Method),是在曲面刀触点处使刀具沿进给方向向前倾斜一个指定的角度来进行刀具定位。

[0005] 现有技术二,曲率匹配算法(Curvature Matched Method),是一种在切触点附近使刀具运动的包络面截形线和理想工件表面截形线曲率相近或者相同的一种算法。

[0006] 上述现有技术至少存在以下缺点:

[0007] 上述两种刀具定位方法都严重依赖工件曲面刀触点处的几何性质(如曲面的法向量、主方向、曲率等),即使在局部坐标系中刀位设计变量保持不变,在工件坐标系或机床坐标系中刀具轨迹也可能发生突变或不光滑的情况,影响机床运动的平稳性、超出机床进给轴的伺服能力和增大加工过程中的非线性误差等,进而影响工件曲面的加工质量和加工效率。

### 发明内容

[0008] 本发明的目的是提供一种具有较高的加工效率和加工质量多轴数控机床加工复杂曲面的刀轨生成方法。

[0009] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的:

[0010] 基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,该方法包括以下步骤:

[0011] A、建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程,以及刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程,进而推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程。

[0012] B、根据上述关系方程,推导出已知方程中任意两个变量求解另外两个变量的公式,并根据工件曲面的特点和所使用多轴数控机床的具体结构特征,得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式。

[0013] C、基于上述刀位计算公式,计算得到环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法。

[0014] 由上述本发明提供的技术方案可以看出,该方法不仅能避免机床旋转轴大幅度变化和提高了机床运动轴的进给速度,而且能获得较高的曲面加工质量。多轴加工复杂曲面刀

轨生成方法的好坏将直接影响曲面的加工效率和加工质量,因此刀轨生成方法在曲面加工中具有十分重要的意义。本发明的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法主要着眼于将机床一个回转角固定或保持不变来避免旋转轴运动的剧烈波动,使机床旋转轴运动更加平稳和光滑,从而提高了曲面的加工效率和表面质量。

[0015] 本发明刀轨生成算法可以直接通过将机床一个回转角固定或保持不变来避免旋转轴运动的剧烈波动,使机床旋转轴运动更加平稳和光滑,从而提高了曲面的加工效率和表面质量。

### 附图说明

- [0016] 图1为刀具初步定位示意图;  
 [0017] 图2为B-A'五轴摆头转台机床的结构示意图;  
 [0018] 图3为B-A'五轴摆头转台机床运动链示意图;  
 [0019] 图4为B-A'五轴摆头转台机床坐标系示意图;  
 [0020] 图5为参数域内刀轨排列的示意图;  
 [0021] 图6为本发明提出的刀轨生成算法的流程图。

### 具体实施方式

[0022] 本发明的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法,该方法以摆头转台类五轴数控机床为例进行阐述,其较佳的具体实施方式是,包括:

[0023] 步骤A、建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程,以及刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程,进而推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程。

[0024] 首先,刀具进行初步定位,如图1所示,建立刀位设计变量与刀位数据之间的关系方程:

$$[0025] \quad \mathbf{t}_{axis}^{WCS} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \cos \phi \sin \theta + x_2 \sin \phi \sin \theta + x_3 \cos \theta \\ y_1 \cos \phi \sin \theta + y_2 \sin \phi \sin \theta + y_3 \cos \theta \\ z_1 \cos \phi \sin \theta + z_2 \sin \phi \sin \theta + z_3 \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0026] 其中,  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$  和  $(x_3, y_3, z_3)$  分别为局部坐标系  $O_L X_2 Y_2 Z_2$  的坐标轴  $X_2$ 、 $Y_2$  和  $Z_2$  在工件坐标系 WCS 中的单位矢量,  $\theta$  为刀轴绕  $Y_2$  轴旋转的偏航角,  $\phi$  为刀轴绕  $Z_2$  轴旋转的俯仰角。

[0027] 然后,根据所使用的摆头转台类五轴数控机床的具体结构特征,如图2-5所示,建立刀位数据与机床回转轴之间的运动变换方程:

$$[0028] \quad \begin{cases} i = \sin B \\ j = -\cos B \sin A \\ k = \cos B \cos A \end{cases} \quad (2)$$

[0029] 其中,  $(i, j, k)$  为刀轴方向矢量,  $A$  为摆头转台类五轴数控机床的旋转轴绕  $X$  轴的回转角度,  $B$  为摆头转台类五轴数控机床的旋转轴绕  $Y$  轴的回转角度。

[0030] 最后,推导出刀位设计变量和机床回转轴之间的关系方程:

$$[0031] \quad \begin{cases} \sin B = x_1 \cos \phi \sin \theta + x_2 \sin \phi \sin \theta + x_3 \cos \theta \\ -\cos B \sin A = y_1 \cos \phi \sin \theta + y_2 \sin \phi \sin \theta + y_3 \cos \theta \\ \cos B \cos A = z_1 \cos \phi \sin \theta + z_2 \sin \phi \sin \theta + z_3 \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

[0032] 步骤B、分析和讨论上述关系方程-式(3),推导出已知方程中任意两个变量求解另外两个变量的公式,并根据工件曲面的特点和所使用多轴数控机床的具体结构特征,从而得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式。

[0033] 首先,通过分析和讨论上述关系方程-式(3),并推导出已知方程中任意两个变量求解另外两个变量的公式。通过分析该方程组总共可以确定有六种求解情况:(1)已知 $\theta$ 和 $\phi$ 求解A和B,(2)已知A和B求解 $\theta$ 和 $\phi$ ,(3)已知 $\phi$ 和B求解 $\theta$ 和A,(4)已知 $\phi$ 和A求解 $\theta$ 和B,(5)已知 $\theta$ 和B求解 $\phi$ 和A,(6)已知 $\theta$ 和A求解 $\phi$ 和B。针对上述各种情况,都可以确定相应的计算公式。

[0034] 然后,根据工件曲面的特点和所使用多轴数控机床的具体结构特征,得到基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式(可以根据上述6种具体情况确定不同的刀位计算公式)。假设本发明已知偏航角 $\phi$ 和B角,确定求解俯仰角 $\theta$ 、A角的关系方程。

$$[0035] \quad \sin B = x_1 \cos \phi \sin \theta + x_2 \sin \phi \sin \theta + x_3 \cos \theta \quad (4)$$

$$[0036] \quad \tan A = \frac{y_1 \cos \phi \sin \theta + y_2 \sin \phi \sin \theta + y_3 \cos \theta}{z_1 \cos \phi \sin \theta + z_2 \sin \phi \sin \theta + z_3 \cos \theta} \quad (5)$$

[0037] 步骤C、基于上述刀位计算公式(4)和(5),计算得到环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法。步骤C的具体计算流程如下:

[0038] 首先,要利用步骤B中得到的基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀位计算公式来进行刀具定位;

[0039] 然后,利用等参数线法、等截面线法或等残留高度法进行刀轨规划,并生成覆盖整个工件曲面的刀具轨迹。

[0040] 上述步骤C中刀具定位包括:将对所述的环形刀的刀心位置矢量和刀轴矢量进行确定;

$$[0041] \quad \mathbf{t}_{axis}^{WCS} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3) \mathbf{t}_{axis}^{LCS} \quad (6)$$

$$[0042] \quad \mathbf{t}_{pos}^{WCS} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3) \mathbf{t}_{pos}^{LCS} \quad (7)$$

[0043] 其中, $\mathbf{e}_1 = (x_1, y_1, z_1)^T$ , $\mathbf{e}_2 = (x_2, y_2, z_2)^T$ , $\mathbf{e}_3 = (x_3, y_3, z_3)^T$ 。

[0044] 实施例:下面以加工叶片进排气边的刀轨生成方法为例,对本方法做进一步详细说明。

[0045] 基于机床运动约束环形刀多轴加工复杂曲面刀轨生成方法的具体计算步骤如下所述:

[0046] 通过分析给定的叶片进排气边曲面 $S: r(u, v)$  ( $u \in [0, 1]$ ,  $v \in [0, 1]$ )的几何性质,确定刀具走刀方向,在参数域中描述的工件曲面刀触点轨迹的排列情况,如图5所示。设刀具沿 $v$ 参数方向走刀,曲面在参数域中的加工范围为 $u \in [u_{min}, u_{max}]$ , $v \in [v_{min}, v_{max}]$ , $u_{min}$ 和 $u_{max}$ 分别代表曲面加工的左右边界, $v_{min}$ 和 $v_{max}$ 分别代表曲面加工的前后边界; $CC_i$ 为曲面上第 $i$ 条刀触点轨迹, $W_i$ 为第 $i$ 条刀轨 $S_i$ 的平均行宽。假设 $h$ 为给定的编程公差, $\xi$ 为加工行宽系

数。图6为本文刀具轨迹生成算法的基本流程,具体过程如下:

[0047] (1) 给定曲面的加工范围  $u \in [u_{\min}, u_{\max}]$ ,  $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$ , 以及编程公差  $h$ 。

[0048] (2) 假设曲面加工的第  $i$  行刀轨  $S_i$  的刀触点轨迹为  $CC_i$ , 其方程为  $u = u_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ ,  $N$  为加工刀轨的总行数。

[0049] (3) 根据叶片进排气边的曲面几何性质进行分析, 从而估计出机床主轴的回转角度  $B$ , 以及前置处理局部坐标系中的偏航角  $\phi$ 。

[0050] (4) 由等参数离散逼近法将刀触点轨迹为  $CC_i$  离散为  $M$  个刀触点  $P_{i,j}$ ,  $j = 1, \dots, M$ 。对于  $\forall P_{i,j}$  其对应参数坐标为  $(u_i, v_j)$ ,  $v_j = v_{\min} + (j-1)(v_{\max} - v_{\min}) / (M-1)$ 。

[0051] (5) 对于  $CC_i$  上的  $\forall P_{i,j}$ , 建立局部坐标系  $O_L X_L Y_L Z_L$ , 从而得出各坐标轴在工件坐标系中矢量  $e_1, e_2, e_3$ 。

[0052] (6) 结合步骤(3)和(4)中给定的变量值, 由式(4)可以求得局部坐标系中的俯仰角  $\theta$ 。

[0053] (7) 由步骤(3)和(6)中给出的俯仰角  $\theta$  和偏航角  $\phi$ , 并根据式(6)和(7)则可以确定工件坐标系中的刀轴矢量  $T_{\text{axis}}^{\text{WCS}}$  和刀位点矢量  $T_{\text{pos}}^{\text{WCS}}$ 。

[0054] (8) 计算步骤(7)得到的刀位误差分布, 判断刀具是否与工件曲面干涉? 若刀具过切曲面, 则计算过切量的值  $\delta$ , 将刀位点沿刀轴矢量或刀触点法矢方向平移  $\delta$ , 并根据给定的编程公差  $h$  计算该刀位相应的加工行宽  $w_{i,j}$ ; 否则, 得到该刀位相应的加工行宽  $w_{i,j}$ 。

[0055] (9) 判断该刀触点  $P_{i,j}$  是否超出了加工范围, 即  $j > M$ ? 若在给定加工区域, 则  $j = j+1$ ,

转到步骤(5); 否则, 计算第  $i$  行刀轨的平均行宽  $W_i = \sum_{j=1}^M w_{i,j} / M$  转到步骤(10)。

[0056] (10) 根据上一行刀轨的平均行宽  $W_i$  确定本行刀轨的刀触点轨迹  $u_{i+1} = u_i + \xi W_i$ , 判断刀触点轨迹  $CC_i$  是否超出了加工范围? 若在给定加工区域, 则转动步骤(2); 否则, 曲面加工完毕, 程序结束。

[0057] 通过测试曲面对本发明进行实验验证:

[0058] 设给定的编程公差为  $0.01\text{mm}$ , 机床旋转轴  $B$  为  $20^\circ$ , 刀位优化的偏航角为  $0^\circ$ , 叶片进气边的加工区域为  $u \in [0.4, 0.6]$ ,  $v \in [0.0, 1.0]$ , 走刀方向为  $v$  向, 采用等弦高误差离散逼近的方法确定加工步长, 其弦高误差为  $0.001\text{mm}$ 。利用本发明的刀轨生成算法加工叶片进气边区域所生成的刀具轨迹, 总共有 30 行刀轨。

[0059] 本发明刀轨生成算法由于限制旋转轴  $B$  的摆动, 实际上是由旋转轴  $A$  和三个平动轴组成的四轴联动, 而只有旋转轴  $A$  摆动, 且运动范围较小, 因而理论上对机床旋转轴的伺服能力要求相对较低。通过分析对比 UG 算法的加工结果可知, 在给定相同的编程进给速度下, 本发明算法每行刀轨的切削时间比 UG 算法缩短了约 20%。由此可见, 针对五轴联动机床旋转轴伺服能力较差, 且因工件曲面曲率变化大而引起旋转轴的大范围急剧变化情况, 本发明刀轨生成算法能够解决该类问题。通过比较上述两种算法所加工的叶片型面可知, 本发明算法所加工叶片型面的轮廓度在  $0.03\text{mm}$  以内, 而 UG 算法型面的轮廓度在  $0.05\text{mm}$  以内, 因此本发明刀轨生成算法的加工精度能够满足给定的加工要求。

[0060] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换,

---

都应涵盖在本发明的保护范围之内。



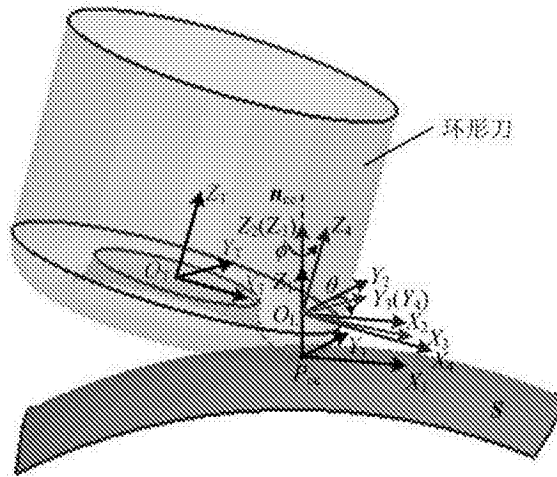


图1

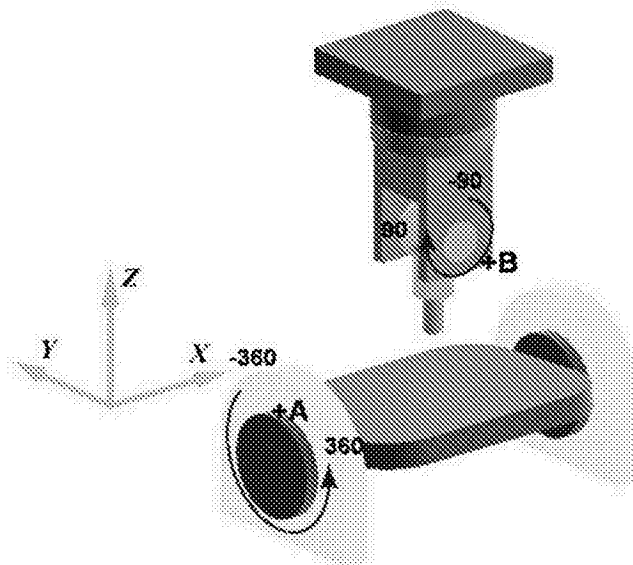


图2

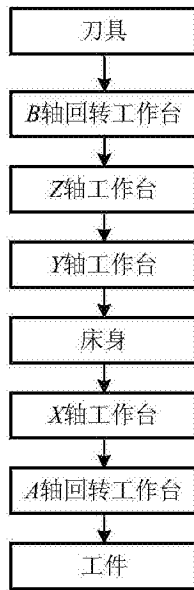


图3

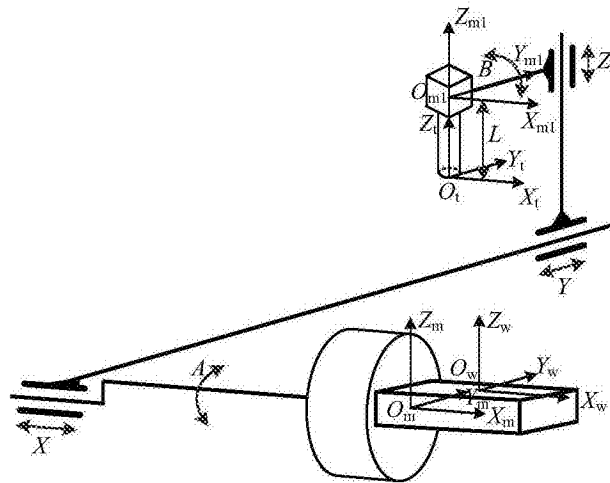


图4

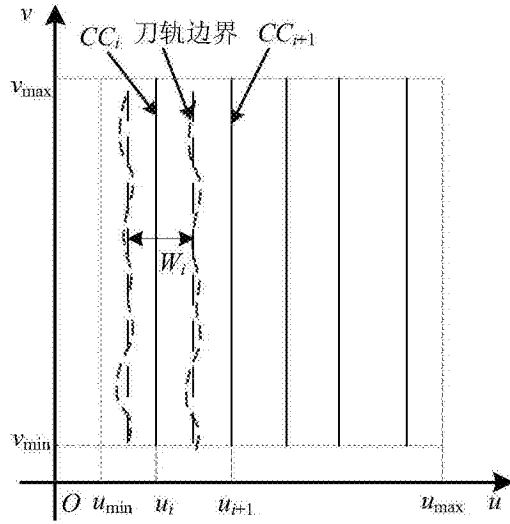


图5

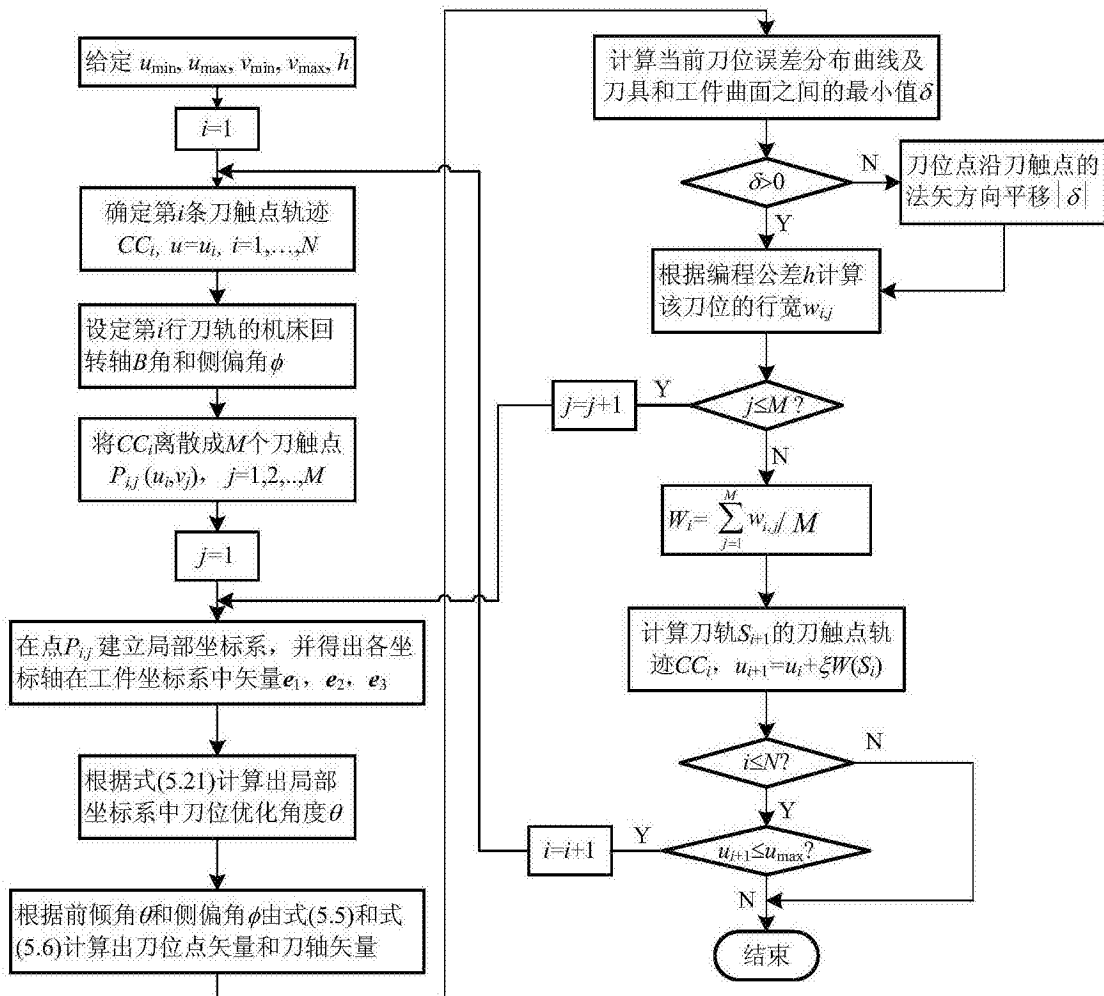


图6