

双转台机床后置处理研究

王雪晴 王艳红*

沈阳工业大学 辽宁沈阳 110000

摘要: 针对双转台五轴机床, 考虑到五轴机床在加工过程中出现关节平行而导致奇异矩阵等问题, 结合机床部件之间的运动关系以及结构特性, 提出一种基于改进的 D-H 建模法的运动学求解机制。首先说明了改进的 D-H(Denavit-Hartenberg)法坐标系建立方法, 并增加了标准 D-H 法的参数, 其次给出了改进的 D-H 法齐次坐标转换矩阵表达式, 推导出正运动学模型。最后求得运动学逆解, 给出旋转轴以及平动轴的位姿计算表达式。对义齿刀位轨迹进行后置处理, 并通过 VERICUT 软件进行仿真实验, 验证后置处理方法的可行性。

关键词: 后置处理; 改进的 D-H 法; 齐次坐标变换; 五轴数控机床

Research on post-processing of double rotary machine tools

Xueqing Wang, Yanhong Wang*

Shenyang University of Technology, Liaoning, Shenyang, 110000

Abstract: This paper focuses on a dual-rotary table five-axis machine tool and considers the issues of singularity matrix caused by joint parallelism during the machining process of five-axis machine tools. Combining the motion relationships and structural characteristics among the machine tool components, an improved Denavit-Hartenberg (D-H) modeling method is proposed for kinematic analysis. Firstly, it describes the establishment method of the improved D-H coordinate system and introduces additional parameters to the standard D-H method. Then, the expression of the homogeneous transformation matrix based on the improved D-H method is presented, and the forward kinematic model is derived. Finally, the inverse kinematic solution is obtained, and the calculation expressions for the pose of the rotation and translation axes are provided. The paper performs post-processing on the tooth cutter's tool path and verifies the feasibility of the post-processing method through simulation experiments using VERICUT software.

Keywords: Post-processing; improved D-H method; homogeneous coordinate transformation; five-axis CNC machine tool

引言

五轴铣削加工技术由于存在额外的两个旋转轴, 可以随意调整工具的姿态, 因此, 比三轴加工效率更高。在数控加工过程中, 将工具的位置和姿态信息转换为机器运动轴的联动值, 以便根据加工路径移动工具, 这个过程称为后置处理, 它可以将 CL 数据转换成加工代码。近年来许多学者对五轴机床后置处理算法进行了研究, Zhou 等^[1]基于多体运动学理论, 建立了五轴机床加工姿态关系的静态精度模型。但由于多体学理论建模过程相对复杂, 需要对系统的运动学和动力学进行精细分析, 会导致运算量大, 且分析过程繁琐等问题。Baron 等^[2]利用 D-H 法优化机床后处理模块, 对刀尖铣削操作进行了改进, 确保了复杂三维形状的铣削可行性。Lin 等^[3]引入了 D-H 坐标系用于分析五轴机床逆运动学, 降低了运动学分析的复杂性。此外, 也有不少学者针对 D-H 法的一些不足进行了改进和优化, 以更好地适应机床的特定需求。Ma 等^[4]采用修改的 D-H 法对工业机器人进行运动学建模, 并使用六组随机的关节角数据进行轨迹规划仿真, 证

明了机器人运动的稳定性。Lai 等^[5]采用改进 D-H 法和螺旋理论对并联的五轴机床进行坐标转换, 实现了 CL 路径到 NC 代码的转换。针对机床在工作过程中, 出现关节之间平行或重合的情况, 而导致运动学反解时的奇异性问题, 也就是位姿突然发生跃变。奇异问题会导致刀具之间干涉和碰撞, 并引起刀路轨迹误差, 此问题是后置处理算法研究的重点^[6]。

本文基于机器人学理论, 提出了改进的 D-H 后置处理方法, 相比于标准的 D-H 四元法^[12]增加一个移动参数 l_i , 最后通过义齿加工仿真试验验证本文所提出方法的有效性。

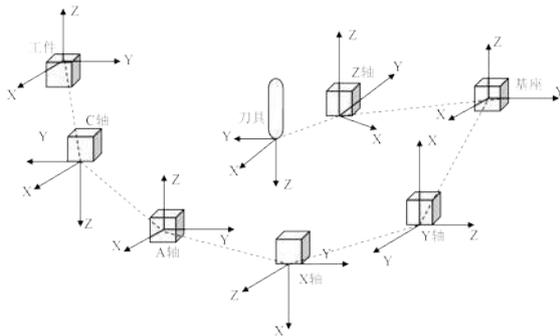
一、机床参数化模型建立

1.1 改进的 D-H 法坐标系建立

以 AC 双转台机床为例, 机床运动链依次为工件、C 轴、A 轴、X 轴、Y 轴、基座、Z 轴、刀具。由此建立各个部件坐标系, 工件坐标系为整个运动过程中的第一个坐标系, 如图 1 所示。根据机床参数以及 D-H 法定义可得到改进的 D-H 转换参数如表 1。

转换顺序	θ	b	a	α
工件-C 轴	π	b_w	0	0
C 轴-A 轴	θ_c	b_c	0	$\pi/2$
A 轴-X 轴	θ_A	0	a_a	0
X 轴-Y 轴	π	b_x	a_x	$\pi/2$
Y 轴-基座	$\pi/2$	b_y	a_y	$\pi/2$
基座-Z 轴	$-\pi/2$	b_z	a_z	0
Z 轴-刀具	0	b_{cutter}	0	0

表 1 AC 双转台机床改进的 D-H 参数表



$$\begin{bmatrix} \tilde{K} & \tilde{Q} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & Q_x \\ K_y & Q_y \\ K_z & Q_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^w A_t = {}^w A_c {}^c A_a {}^a A_x {}^x A_t {}^y A_y {}^y A_o {}^o A_z {}^z A_t \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由表 1 可知在机床后处理中待求解的参数有 θ_c 、 θ_A 、 b_x 、 b_y 和 b_z 。为求正向运动学的末端位姿表达式，可根据表 1 和

$${}^w A_t = \begin{bmatrix} \cos \theta_c \cos \theta_A & b_n \cos \theta_c \cos \theta_A - a_z \cos \theta_c \sin \theta_A + b_z \cos \theta_c \cos \theta_A + l_y \cos \theta_c \cos \theta_A + b_y \cos \theta_c \sin \theta_A + a_x \cos \theta_c \cos \theta_A - d_x \sin \theta_c - a_n \cos \theta_c \cos \theta_A & 0 & 0 \\ \sin \theta_c \sin \theta_A & b_n \sin \theta_c \cos \theta_A - a_z \sin \theta_c \sin \theta_A + b_z \sin \theta_c \cos \theta_A + l_y \sin \theta_c \cos \theta_A + b_y \sin \theta_c \sin \theta_A + a_x \sin \theta_c \sin \theta_A - d_x \cos \theta_c - a_n \sin \theta_c \cos \theta_A & 0 & 0 \\ -\sin \theta_A & -b_n \sin \theta_A - a_z \cos \theta_A - b_z \sin \theta_A - l_y \sin \theta_A + b_y \cos \theta_A - a_x \sin \theta_A + a_n \sin \theta_A + b_c + b_w & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 机床运动坐标逆运动学求解

刀具姿态受旋转轴变化的影响，因此旋转轴的逆运动学方程可以从旋转变换矩阵的姿态向量直接计算得到。在式(1)中可求解出改进 D-H 法的关节参数，将矩阵方程式左右第一列相等，求解出刀轴方向的单位矢量，将第二列相等可求

$$\theta_A = -\arcsin(K_z) \quad \theta_A \in \left[-\frac{\pi}{2}, 0\right] \quad \theta_C = \arctan 2(K_y \text{sign}(\cos[\theta_A]), K_x \text{sign}(\cos[\theta_A])) \quad (3)$$

NC 文件中的旋转轴部分还需将上式计算的结果减去机床安装时的角度，最终即为旋转轴的 NC 值。根据工件的加工要求，令机床加工的初始角度 $\theta_A = 0$ ， $\theta_C = 0$ 。令式(3)

$$\begin{cases} X = (b_c + b_w) \sin \theta_A - Q_z \sin \theta_A + Q_y \sin \theta_c \cos \theta_A + Q_x \cos \theta_c \cos \theta_A \\ Y = \sin \theta_c Q_x - \cos \theta_c Q_y \\ Z = -(b_c + b_w) \cos \theta_A - Q_z \cos \theta_A + Q_y \sin \theta_c \sin \theta_A - Q_x \cos \theta_c \sin \theta_A + b_y + b_c + b_w \end{cases} \quad (4)$$

图 1 双转台机床各部件坐标系

在求出各坐标系之间的转移矩阵后，将得到的一连串齐次坐标矩阵相乘即合成矩阵，求得刀具坐标系相对于工件坐标系的转换矩阵 ${}^w A_t$ 。其中 ${}^c A_a$ 和 ${}^a A_x$ 包含待求解参数 θ_c 和 θ_A 的矩阵。

1.2 机床运动学模型求解

在数控加工过程中，UG 生成的刀路轨迹文件的每条语句由 X, Y, Z, I, J, K 六个参数构成，前三个参数表示为刀位点坐标，后三个参数表示为刀轴矢量。工件坐标系 WCS 下的刀轴方向单位矢量 \tilde{K} 可用矩阵表示为 $[K_x \ K_y \ K_z]^T$ ，其中 K_x 、 K_y 、 K_z 为 \tilde{K} 的方向余弦。刀位点坐标 \tilde{Q} 可用矩阵表示为 $[Q_x \ Q_y \ Q_z]^T$ ，其中 Q_x 、 Q_y 、 Q_z 为 \tilde{Q} 的三个坐标分量。为求得接头参数，将刀路径矩阵与根据五轴机床建立的函数矩阵相等。即根据式(1)可推得式(2)。

式(1)推导出齐次坐标变换矩阵的合成积，即刀具坐标系相对工件坐标系的转换矩阵 ${}^w A_t$ 表示为：

得刀位点坐标。首先要对旋转轴进行求解，再对旋转轴的不同情况进行讨论，最后对线性轴进行求解，线性轴无需分类讨论。计算出旋转轴的角度为：本文研究对象为 AC 双转台机床， θ_A 和 θ_C 最终表示为：

右侧的矩阵每行相等，可求解出最终 X, Y 和 Z 的最终值如下，式(5)即为逆运动学求解的最终位姿表达式。

二、仿真实验

机床加工时采用的控制系统为发那科 15im, 在加工过程中直接调用。根据构建的机床参数和义齿的实际加工需求, 粗加工采用硬质合金的直刃平底铣刀, 移动距离为 1-200mm, 进给速度为 20000mm/min, 精加工采用 $\varnothing = 1mm$ 的硬质合金的直刃球头铣刀。在模拟仿真过程中, 未出现超程, 干涉和碰撞等问题, 仿真结果良好, 仿真误差控制在 0.5mm 范围内, 符合加工要求。

三、总结

本文对五轴双转台机床的后置处理方面进行了研究, 对改进的 D-H 法的原理进行了说明, 并在 AC 双转台机床模型的基础上进行虚拟仿真试验, 验证了后处理算法的可行性。

参考文献:

[1]Zhou T, Yinghua L , Jie J , et al. A method of sensitivity analysis and precision prediction for geometric errors of five-axis machine tools based on multi-body system theory[J]. The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, 2022:1-16.

[2]Baron L, Rolland L. An optimization post-processing module for complex tool-tip milling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80: 615-624.

[3]Lin T, Bohez E L J. New Simplified Inverse Kinematics Method for 5-Axis Machine Tools[J]. 2019.

[4]Ma W ,Gao G,Zhao J .Kinematics Modelling and Trajectory Planning for an Industrial Robot[C]// 2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2018.

[5]Lai Y L, Liao C C, Chan H Y, et al. Inverse Kinematics of a Postprocessor for Five-Axis Machine Tools[C]//2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering. Atlantis Press, 2015:2183-2186.

[6]Zhou Xu, Zhang Dinghua, Wu Baohai,et al. General Method of Post-processing for Non-orthogonal Five-axis Machine