

引文格式: 江磊, 张越新凯, 梁彬, 等. 面向五轴数控加工仿真的机床运动位姿算法研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 47-55.

JIANG Lei, ZHANG Yuexinkai, LIANG Bin, et al. Research on motion position and attitude algorithm of machine tool for five-axis CNC machining simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 47-55.

面向五轴数控加工仿真的机床运动位姿算法研究*

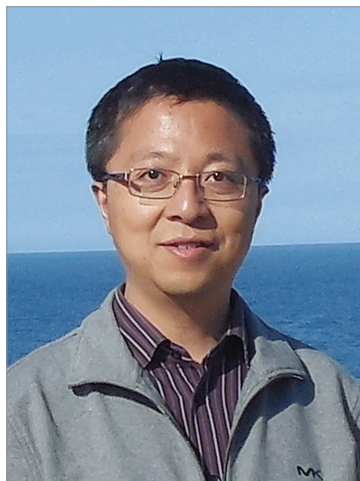
江磊, 张越新凯, 梁彬, 丁国富

(西南交通大学, 成都 610031)

[摘要] 数控加工仿真是制造业发展过程中数字化与智能化的集中体现, 然而现有研究在机床运动位姿计算精度上还存在不足, 如未考虑数控系统指令模式、加减速控制以及机床几何误差等约束条件。针对上述问题, 本文对五轴机床仿真运动算法进行研究, 首先对五轴数控机床拓扑结构、模型和坐标系进行了完整定义, 在此基础上探索了基于数控系统指令模式的刀具轨迹仿真密化以及相应的时间标记计算方法, 并结合五轴数控机床几何误差模型, 得到了更符合实际几何状态的机床模型运动位姿。通过对仿真机床实例的拓扑结构建模、刀位轨迹仿真密化以及机床模型位姿计算, 对所提出的机床运动位姿算法进行了验证, 证明该算法的可行性和有效性。

关键词: 五轴数控机床; 加工仿真; 刀位轨迹; 运动位姿; 运动算法

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.05.047



江磊

副教授, 博士, 主要研究方向为数控机床精度控制、轨迹计算和加工仿真。

数控加工仿真技术依赖于多种先进技术的交叉集成, 通过计算机技术与虚拟现实技术建立加工仿真环境, 结合数控技术与运动算法实现仿

真机床的运动控制。由于数控加工仿真技术可实现机床加工状态的预先分析与工艺优化, 并且五轴数控加工由于刀具位姿和机床运动的动态可变, 因此五轴数控机床加工仿真技术的应用需求愈加迫切。

数控加工仿真技术包括三维仿真引擎、模型切削算法以及机床运动位姿计算等。针对三维仿真引擎, 现有的研究主要围绕于 Dixel 表达式^[1-2]、离散矢量求交法^[3]、三角面片离散法^[4]等仿真引擎算法展开, 并成功搭建了图形学仿真环境。围绕模型切削算法, 目前的研究主要针对布尔运算^[5]、四叉树表达式^[6]、八叉树表达式^[7]等, 实现了对模型体的高精度切削仿真。而在机床运动位姿计算方面, Bohez^[8]、彭健钧^[9]、肖通^[10]等对五轴数控机床刀具运动仿真算法进行了研究, 采用刀具扫描体的方式表达刀具运动轨迹, 但未能对

综上所述, 数控加工仿真技术在三维仿真引擎与模型切削算法方面已形成较为完整的技术体系, 但在机床运动位姿计算上还存在精度不足, 如未考虑数控系统指令模式、加减速控制以及机床几何误差等约束条件。针对上述问题, 本文基于五轴机床拓扑结构, 重点考虑仿真空间中对于刀具运动轨迹密化计算与时间标记计算, 并引入五轴数控机床运动轴几何误差参数, 研究机床仿真模型实际位姿变换矩阵, 保证机床仿真运动过程的准确性。

1 五轴数控机床仿真运动位姿计算流程

五轴数控机床仿真运动位姿计算方法主要用于对机床仿真运动过程的精确控制, 其实现需要借助于对机床仿真拓扑结构定义、刀具位姿仿真密化计算与机床部件运动位姿计算。计算流程如图 1 所示。

* 基金项目: 四川省重点研发计划(23ZDYF0244)。刀具仿真运动轨迹进行精确表达。

(1) 五轴数控机床仿真拓扑结构定义。

五轴数控机床运动结构可视为3个平动进给轴与2个转动进给轴的串联运动形式,共同实现刀具相对工件的位姿变化。为了实现仿真机床建模,将机床运动轴定义为运动节点和与之固联的几何模型,以及依附于其节点坐标系、模型坐标系、编程坐标系等。

(2) 基于数控系统的刀具位姿仿真密化。

为了实现基于NC程序驱动的加工仿真过程,需要按照机床数控系统规则,从NC程序中提取机床运动数据。但是,目前NC程序段中的运动数据均为低密度的离散数据,若直接使用不仅将导致无法形成连续的仿真运动过程,而且运动轨迹与真实机床运动过程存在较大的偏差。因此,需要将机床运动数据转换为刀具位姿数据,并进行仿真密化计算、时间标记计算与转动轴转角计算,从而获得较为平滑的机床模型运动数据。

(3) 基于仿真坐标系的机床模型运动位姿计算。

以平滑后的机床模型运动数据与机床拓扑结构为基础,推导机床仿真运动传递关系,获得机床模型理论位姿计算方法,结合机床实际运动轴几何误差项,获得机床模型实际位姿计算方法。

2 五轴数控机床仿真拓扑结构定义

2.1 拓扑结构定义

数控机床运动系统是由夹具、工作台、床身、各进给轴、刀具等组成的具有精密运动控制的复杂机械系统^[11]。由刚体的多体运动学理论可知,五轴数控机床的每个运动部件均可简化为对应的拓扑节点^[12]。拓扑节点分为运动型与功能型(即主轴、刀具、夹具、毛坯、工件、床身等)两种,其中运动型拓扑节点可进一

步分为平动型(即机床X、Y、Z平动轴)与转动型(即机床A、B、C转动轴)。在进行机床仿真运动位姿计算时,为了描述机床运动的层级传递关系,定义机床床身节点层次为0级,其余节点按联接关系依次进行层次编号,直到刀具和毛坯节点结束,形成机床床身到工件和机床床身到刀具的两条单向运动链。以拓扑结构为WYXZCAT的五轴数控机床为例,其拓扑结构如图2所示。

2.2 机床模型定义

机床模型为数控机床部件在仿真空间中的几何映射^[13],仿真机床

通常使用三维模型导入(如stl、igs等格式的三维模型文件)或者参数化建模的方式构建。虽然实际上机床结构复杂,但是很多机床部件(如液压部件、机床外壳等)并没有直接参与加工仿真中的工件切除,可在不丢失仿真功能精度的条件下对机床模型进行简化。因此,可将数控机床仿真模型简化为运动轴模型、主轴模型、刀具模型、毛坯模型以及工作台模型等,模型实例如图3(a)所示。模型的位姿依附于对应的拓扑节点,并随节点位姿变化而变化。可以通过机床模型外表面的几何特征参数

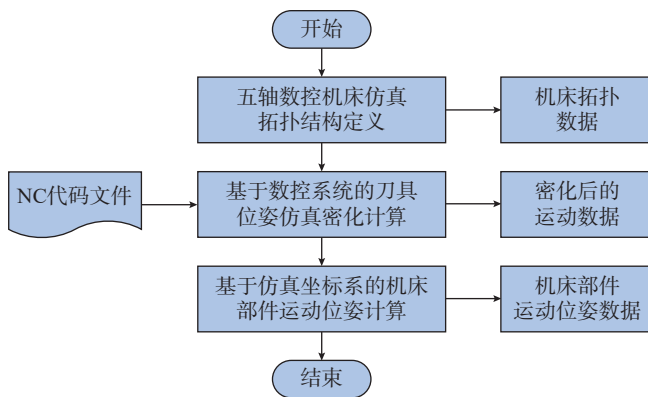


图1 五轴数控机床仿真运动位姿计算流程

Fig.1 Calculation flow of simulation movement position and attitude of five-axis CNC machine tool

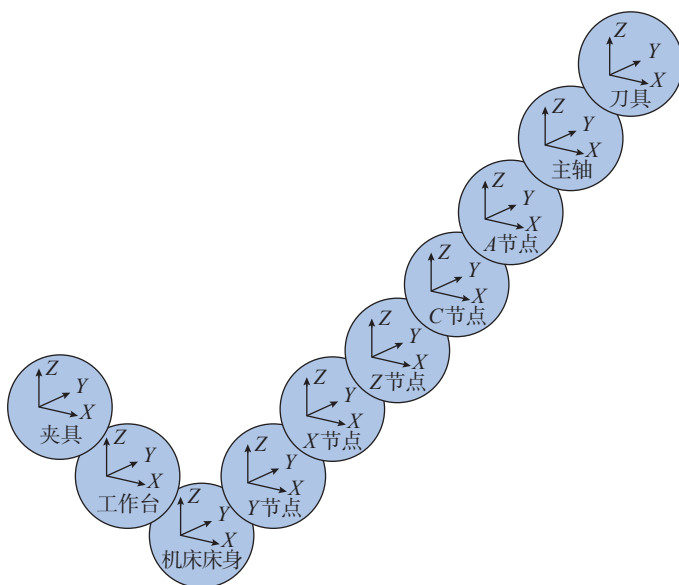


图2 五轴数控机床拓扑结构(以WYXZCAT为例)

Fig.2 Topology structure of five-axis CNC machine tool (take WYXZCAT as an example)

对加工过程进行碰撞干涉检测,模型表面特征如图3(b)所示。

2.3 机床仿真坐标系定义

按照右手直角笛卡尔坐标系的定义规则,定义下列坐标系,并通过坐标系的原点和坐标轴矢量表达其空间位姿关系。

(1) 仿真坐标系定义。

为了在仿真实空中准确统一地描述机床运动,定义固定在仿真实空内的仿真坐标系SCS,定义点 O_{SCS} 为其坐标系原点,矢量 $V_{X_{SCS}}$ 、 $V_{Y_{SCS}}$ 、 $V_{Z_{SCS}}$ 表达其坐标轴方向。仿真坐标系位姿参数数据如表1所示。

(2) 编程坐标系定义。

为了实现在NC驱动下的机床仿真运动与实际运动的一致性,满足机床加工工艺要求,定义编程坐标系PCS,其也为刀具位姿仿真化计算的坐标基准。定义点 O_{PCS} 为其坐标系原点,矢量 $V_{X_{PCS}}$ 、 $V_{Y_{PCS}}$ 、 $V_{Z_{PCS}}$ 表达其坐标轴方向。编程坐标系位姿参数数据如表2所示。

(3) 节点坐标系定义。

为了准确描述拓扑节点的坐标和方向,在节点上固联对应的节点坐标系NCS。以平动轴节点X为例,定义点 $O_{X_{NCS}}$ 为其坐标系原点,矢量 $V_{X_{X_{NCS}}}$ 、 $V_{X_{Y_{NCS}}}$ 、 $V_{X_{Z_{NCS}}}$ 表达其坐标轴方向。平动轴节点X坐标系位姿参数数据如表3所示。其他节点坐标系定义与之类似,不再赘述。

(4) 模型坐标系定义。

为了准确描述机床各模型的坐标和方向,在模型上固联对应的模型坐标系UCS。在同一节点下可包含多个模型,需对其进行编号。以平动轴节点X下的第n个模型为例,定义点 $O_{X_n_{UCS}}$ 为其坐标系原点,矢量 $V_{X_{X_n_{UCS}}}$ 、 $V_{X_{Y_n_{UCS}}}$ 、 $V_{X_{Z_n_{UCS}}}$ 表达其坐标轴方向。平动轴节点第n个模型的模型坐标系位姿参数数据如表4所示。其他模型坐标系定义与之类似,不再赘述。

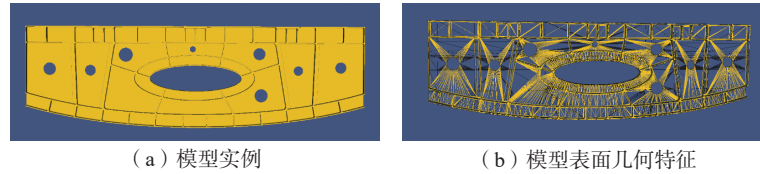


图3 机床模型实例

Fig.3 Example of machine tool model

表1 仿真坐标系位姿数据

Table 1 Simulated coordinate system position and attitude data

| 位姿名称 | 位姿参数 | 位姿数据 |
|-------|---------------|---------|
| 坐标系原点 | O_{SCS} | (0,0,0) |
| X轴矢量 | $V_{X_{SCS}}$ | (1,0,0) |
| Y轴矢量 | $V_{Y_{SCS}}$ | (0,1,0) |
| Z轴矢量 | $V_{Z_{SCS}}$ | (0,0,1) |

表2 编程坐标系位姿数据(基于仿真坐标系)

Table 2 Programmatic coordinate system position and attitude data (based on a simulated coordinate system)

| 位姿名称 | 位姿参数 | 初始位姿数据 |
|-------|---------------|---------|
| 坐标系原点 | P_{PCS} | (0,0,0) |
| X轴矢量 | $V_{X_{PCS}}$ | (1,0,0) |
| Y轴矢量 | $V_{Y_{PCS}}$ | (0,1,0) |
| Z轴矢量 | $V_{Z_{PCS}}$ | (0,0,1) |

表3 平动轴X节点坐标系位姿数据(基于仿真坐标系)

Table 3 Position and attitude data of translation axis X node coordinate system (based on a simulated coordinate system)

| 位姿名称 | 位姿参数 | 初始位姿数据 |
|-------|-------------------|---------|
| 坐标系原点 | $O_{X_{NCS}}$ | (0,0,0) |
| X轴矢量 | $V_{X_{X_{NCS}}}$ | (1,0,0) |
| Y轴矢量 | $V_{X_{Y_{NCS}}}$ | (0,1,0) |
| Z轴矢量 | $V_{X_{Z_{NCS}}}$ | (0,0,1) |

表4 平动轴X节点模型坐标系位姿数据(基于仿真坐标系)

Table 4 Position and attitude data of translation axis X node model coordinate system (based on a simulated coordinate system)

| 位姿名称 | 位姿参数 | 初始位姿数据 |
|-------|---------------------|---------|
| 坐标系原点 | $P_{X_n_{UCS}}$ | (0,0,0) |
| X轴矢量 | $V_{X_{X_n_{UCS}}}$ | (1,0,0) |
| Y轴矢量 | $V_{X_{Y_n_{UCS}}}$ | (0,1,0) |
| Z轴矢量 | $V_{X_{Z_n_{UCS}}}$ | (0,0,1) |

3 基于数控系统的刀具轨迹仿真密化计算

不同数控系统的刀位轨迹插补算法存在差异,并且同一数控系统也存在不同插补模式。以西门子 840D 五轴数控系统为例,其 G01 指令存在线性插补 ORIXES、大圆插补 ORIVECT、锥面插补 ORICONCW 3 种模式。为了确保机床仿真运动的准确性,需在 NC 程序离散的位姿数据基础上,对不同数控运动指令的刀具位姿进行密化。本文以 G01 指令的大圆插补模式为例,说明刀具轨迹仿真密化的计算流程。

3.1 刀具轨迹仿真密化计算流程

刀具位姿仿真密化计算分为 NC 程序解析、密化次数计算、刀具轨迹仿真密化位姿计算增减内容、刀具轨迹仿真密化时间标记计算与机床转动轴转角计算 5 个步骤,其流程如图 4 所示。

(1) NC 程序解析。

根据西门子 840D 数控系统定义,NC 程序的指令包括各种功能字符与运动数据。由于仿真密化计算仅对 NC 程序中的运动数据进行处理,故需对运动数据进行提取,称该

过程为 NC 程序解析。

(2) 密化次数计算。

定义刀位点间的密化间距 λ 和刀轴间的密化转角 φ 。将密化位姿计算精度值作为输入项,对密化间距 λ 和密化转角 φ 进行等分,将两者等分次数进行比较,更大值即为密化次数 q 。

(3) 刀具轨迹仿真密化位姿计算。

通过机床多体运动学计算方式,将 NC 运动数据转变为刀轴矢量数据,并在此基础上进行刀位坐标和刀轴矢量的密化计算,得到密化后的刀具位姿数据。

(4) 刀具轨迹仿真密化时间标记计算。

通过 S 型加减速控制对密化后的刀具位姿数据进行运动规划,建立密化后运动数据与运动时间的关系,获得刀具轨迹仿真密化时间标记。

(5) 机床转动轴转角计算。

将密化后的刀轴矢量通过机床多体运动学逆运算,得到密化后的刀轴矢量对应的机床转动轴转角。

3.2 刀具轨迹仿真密化位姿计算

在完成 NC 程序解析和密化次数计算的基础上,结合大圆插补

ORIVECT 所具备的扇形刀具轨迹特征,完成对刀轴矢量与刀尖点坐标的密化计算。

(1) 刀轴矢量转换。

设 NC 程序解析得到的第 m 行程序的转角数据为 C_m 、 A_m ,则该行程序转角数据的目标刀轴矢量为

$$V_{PCS_m} = \begin{bmatrix} i_m \\ j_m \\ k_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos C_m & -\sin C_m & 0 & 0 \\ \sin C_m & \cos C_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 刀轴矢量与坐标密化计算。

根据第 m 行与第 $m-1$ 行刀轴矢量 V_{PCS_m} 、 $V_{PCS_{m-1}}$ 及密化次数 q ,可得到刀具位姿仿真密化过程中的刀轴矢量递增角度为

$$\theta = \arccos\left(\frac{V_{PCS_{m-1}} \cdot V_{PCS_m}}{|V_{PCS_{m-1}}| |V_{PCS_m}|}\right) / q \quad (2)$$

根据递增角度 θ 进行刀轴矢量密化计算,可得第 m 行 NC 程序运动数据的第 t 段刀轴矢量密化结果为

$$V_{PCS_{m,t}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cos\theta + (1 - \cos\theta) \begin{bmatrix} i_m \\ j_m \\ k_m \end{bmatrix} + \sin\theta \begin{bmatrix} 0 & -k_r & j_r \\ k_r & 0 & -i_r \\ -j_r & i_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ j_m \\ k_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

设 NC 程序解析得到的第 m 行与第 $m-1$ 行程序的刀尖点数据为 (X_m, Y_m, Z_m) 与 $(X_{m-1}, Y_{m-1}, Z_{m-1})$,得到密化后的第 t 段刀尖点坐标为

$$P_{PCS_{m,t}} = (P_{PCS_m} - P_{PCS_{m-1}}) / q \quad (4)$$

3.3 刀具轨迹仿真密化时间标记计算

不同的数控系统对于刀具轨迹

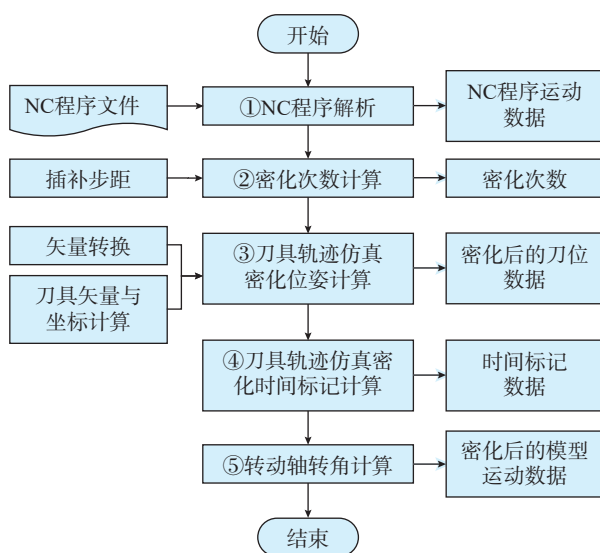


图 4 刀具位姿仿真密化计算流程

Fig.4 Tool position and attitude simulation densification calculation process

控制,不仅包括刀具位姿控制,而且还包括刀具进给加减速控制。为了准确对刀具轨迹运动过程进行仿真,将根据数控系统的加减速控制策略,在刀具密化位姿计算的结果上完成对应的时间标记计算。S型加减速控制是一种数控系统比较常见的控制策略^[14],本文以常用的S型加减速为例说明具体的计算过程。

将S型加减速简化为变加速段、匀速段、变减速段3个阶段。根据第 m 行NC程序起止刀具位姿数据,其在3个阶段的位移量与运动速度关系可表达为

$$S_{PCS_m} = \begin{cases} S_{PCS_{m-1}} = \frac{F + v_{PCS_s}}{2} T_{PCS_{m-1}} \\ S_{PCS_{m-3}} = \frac{F + v_{PCS_e}}{2} T_{PCS_{m-3}} \\ S_{PCS_{m-2}} = F \cdot T_{PCS_{m-2}} - \\ \quad (S_{PCS_{m-1}} + S_{PCS_{m-3}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, S_{PCS_m} 为第 m 行起止点的距离; $S_{PCS_{m-1}}$ 、 $S_{PCS_{m-2}}$ 、 $S_{PCS_{m-3}}$ 为第 m 行密化后的变加速段、匀速段、变减速段的位移量; F 为指令进给速度; v_{PCS_s} 为程序起始速度; v_{PCS_e} 为程序终止速度; $T_{PCS_{m-1}}$ 、 $T_{PCS_{m-2}}$ 、 $T_{PCS_{m-3}}$ 为第 m 行密化后的变加速段、匀速段、变减速段的运动时间。

进一步可得第 m 行密化后的刀具位姿在3个阶段所对应的整体运动时间为

$$T_{PCS_m} = \begin{cases} T_{PCS_{m-1}} = \frac{F - v_{PCS_s}}{a_{PCS}} \\ T_{PCS_{m-2}} = \frac{S_{PCS_{m-2}}}{F} \\ T_{PCS_{m-3}} = \frac{F - v_{PCS_e}}{a_{PCS}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, a_{PCS} 为仿真运动加速度。

定义刀具每段密化位姿在第 m 行的时间标记 $t_{PCS_{m,t}}$,根据刀具密化位姿在不同的加减速阶段,可得

$$t_{PCS_{m,t}} = \begin{cases} (2T_{PCS_{m-1}} - 2) \times \\ \quad \arcsin\left(\frac{S_{PCS_{m,t}} - S_{PCS_{m-1}}}{S_{PCS_{m-1}}}\right) + \pi T_{PCS_{m-1}} \\ T_{PCS_{m-1}} + \frac{(S_{PCS_{m,t}} - S_{PCS_{m-1}})}{F} \\ T_{PCS_{m-1}} + T_{PCS_{m-2}} + \left(\frac{2T_{PCS_{m-3}}}{\pi}\right) \times \\ \quad \arcsin\left(\frac{S_{PCS_{m,t}} - S_{PCS_{m-3}}}{S_{PCS_{m-3}}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

4 基于仿真坐标系的机床模型位姿计算

4.1 机床模型理论位姿计算

为准确描述机床仿真运动,采用齐次坐标变换矩阵计算各节点相对初始状态的位姿变化量,其中平动轴节点运动变换矩阵如式(8)~(10)所示。

$$T_{M(X)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & SX_{PCS_{m,t}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_{M(Y)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & SY_{PCS_{m,t}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_{M(Z)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & SZ_{PCS_{m,t}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $SX_{PCS_{m,t}}$ 、 $SY_{PCS_{m,t}}$ 、 $SZ_{PCS_{m,t}}$ 为第 m 行第 t 段密化后平动轴运动量;M为平移运动。转动轴节点运动变换矩阵如式(11)~(13)所示。

$$T_{R(A)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{A_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & y_{A_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & z_{A_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A_{PCS_{m,t}} & -\sin A_{PCS_{m,t}} & 0 \\ 0 & \sin A_{PCS_{m,t}} & \cos A_{PCS_{m,t}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{A_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{A_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{A_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_{R(B)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{B_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & y_{B_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & z_{B_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos B_{PCS_{m,t}} & 0 & \sin B_{PCS_{m,t}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin B_{PCS_{m,t}} & 0 & \cos B_{PCS_{m,t}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{B_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{B_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{B_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T_{R(C)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{C_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & y_{C_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & z_{C_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos C_{PCS_{m,t}} & -\sin C_{PCS_{m,t}} & 0 & 0 \\ \sin C_{PCS_{m,t}} & \cos C_{PCS_{m,t}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{C_NCS} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{C_NCS} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{C_NCS} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $A_{PCS_{m,t}}$ 、 $B_{PCS_{m,t}}$ 、 $C_{PCS_{m,t}}$ 为第 m 行第 t 段密化后转动轴运动量; R 为旋转运动。

根据节点的拓扑层级,借助节点运动变换矩阵表达各拓扑结构节点的位姿传递关系,可得机床模型理论位姿计算的运动变换矩阵,如表5所示。

4.2 考虑几何误差的机床模型实际位姿计算

为了进一步提高仿真机床运动与实际机床运动的一致性,在仿真机床模型理论位姿计算的基础上,

引入实际机床几何误差项。参考五轴数控机床几何误差项的详细描述^[15-17],定义机床运动型节点的误差矩阵分别 $T_{M(X)_e}$ 、 $T_{M(Y)_e}$ 、 $T_{M(Z)_e}$ 、 $T_{R(A)_e}$ 、 $T_{R(B)_e}$ 和 $T_{R(C)_e}$,根据机床模型理论位姿计算矩阵,可得仿真机床模型的实际位姿计算变换矩阵如表 5 所示。

5 应用验证

本文以拓扑结构为 WYXZCAT 的大型龙门式五轴数控机床为例进行仿真验证。为了简化节点建模过程,各节点坐标系坐标轴矢量均与仿真坐标系相同,如表 6 所示。

为了简化模型建模过程,实例中的各节点只附属 1 个模型。根据机床的具体结构关系,对各模型坐标系进行了调整。调整后的机床模型位姿参数如表 7 所示。模型位姿调整实例如图 5 所示。

对某 NC 程序进行解析,程序部分示例如图 6 所示。

提取 NC 程序中未密化的仿真运动数据,进行刀轴矢量转换与密化次数计算,获得密化次数 q 为 100 次,进行刀具轨迹位姿仿真密化计算,密化结果如图 7 所示。

设定进给速度 F 为 1000 mm/min,程序起始速度 v_{PCS_s} 与程序终止速度 v_{PCS_e} 为 0,仿真运动加速度 a_{PCS} 为 500 mm/s²,并进行仿真密化时间标记计算与转动轴转角计算,其计算结果如图 8 所示。

基于密化后的机床仿真运动数据,结合表 5 中机床模型理论位姿计算方法,得到机床模型理论位姿数据如表 8 所示。

依据所测量的五轴数控机床运动轴几何误差数据,结合机床模型实际位姿变换矩阵,可得到机床模型实际位姿数据,如表 9 所示。

表 5 机床模型理论位姿和实际位姿计算变换矩阵(以机床拓扑结构 WYXZCAT 为例)
Table 5 Transformation matrix for calculating theoretical and actual position and attitude of machine tool model (take WYXZCAT as an example for machine tool topology)

| 节点名称 | 所属节点的模型位姿计算变换矩阵 | |
|------|--------------------------------|---|
| | 理论位姿 | 实际位姿 |
| Y | $T_{T1_Y} = T_{M(Y)}$ | $T_{T1_Y} = T_{M(Y)_e} T_{M(Y)}$ |
| X | $T_{T2_X} = T_{M(X)} T_{T1_Y}$ | $T_{T2_X} = T_{M(X)_e} T_{M(X)} T_{T1_Y}$ |
| Z | $T_{T3_Z} = T_{M(Z)} T_{T2_X}$ | $T_{T3_Z} = T_{M(Z)_e} T_{M(Z)} T_{T2_X}$ |
| C | $T_{T4_C} = T_{R(C)} T_{T3_Z}$ | $T_{T4_C} = T_{R(C)_e} T_{R(C)} T_{T3_Z}$ |
| A | $T_{T5_A} = T_{R(A)} T_{T4_C}$ | $T_{T5_A} = T_{R(A)_e} T_{R(A)} T_{T4_C}$ |
| S | $T_{T6_S} = T_{T5_A}$ | $T_{T6_S} = T_{T5_A}$ |
| T | $T_{T7_T} = T_{T6_S}$ | $T_{T7_T} = T_{T6_S}$ |

表 6 调整后的机床节点坐标系位姿参数(基于仿真坐标系)
Table 6 Adjusted position and attitude parameters of machine tool node coordinate system (based on simulation coordinate system)

| 节点名称 | 节点坐标系位置/mm | X轴矢量 | Y轴矢量 | Z轴矢量 |
|------|---------------------------|---------|---------|---------|
| Y | $O_{Y_NCS} (0,0,0)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| X | $O_{Y_NCS} (0,0,0)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| Z | $O_{Z_NCS} (0,0,0)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| C | $O_{C_NCS} (0,0,2800)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| A | $O_{A_NCS} (0,-75,2800)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |

表 7 调整后的机床模型坐标系位姿数据
Table 7 Adjusted position and attitude data of machine tool model coordinate system

| 模型名称 | 模型坐标系位置/mm | X轴矢量 | Y轴矢量 | Z轴矢量 |
|-------|-------------------------------|---------|---------|---------|
| Y节点模型 | $P_{Y_1} (1575,-1500,6000)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| X节点模型 | $P_{X_1} (375,3100,2550)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| Z节点模型 | $P_{Z_1} (-1500,-1500,5000)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| C节点模型 | $P_{C_1} (-1500,-1500,-1300)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |
| A节点模型 | $P_{A_1} (1500,1575,1300)$ | (1,0,0) | (0,1,0) | (0,0,1) |

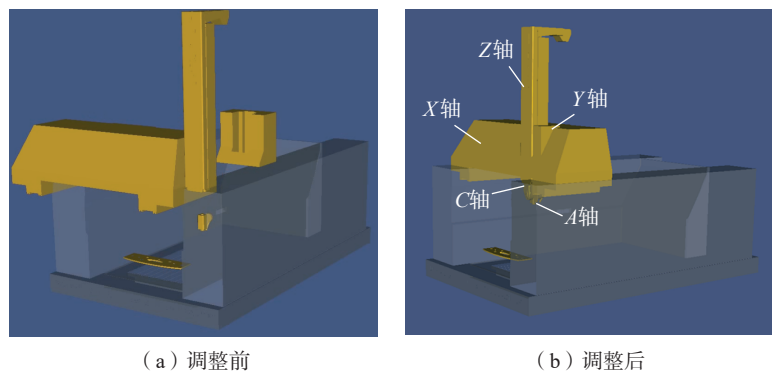


图 5 模型坐标系位姿调整前后对比
Fig.5 Position and attitude adjustment example of model coordinate system

```

N7 X -1320 Y -1320 Z 1000 A 0 C 0
N8 X -1100 Y -1100 Z 800 A 45.330289 C 0
N9 X -700 Y -700 Z 500 A 60.562182 C -33.005382
N10 X -300 Y -300 Z 400 A 84.379591 C -33.005382
N11 X -200 Y -200 Z 0 A 100.257863 C -33.005382
N12 X -100 Y -100 Z -500 A 47.330289 C -33.005382
N13 X 0 Y 0 Z -1000 A 112.166567 C -33.005382
N14 X 1000 Y 1000 Z 0 A 122.090487 C -33.005382
N15 X 350 Y 458 Z -1000 A 138.630354 C -33.005382
N16 X 500 Y 769 Z -920 A 153.847032 C -33.005382
N17 X 400 Y 879 Z -1100 A 167.74052 C -33.005382
N18 X 250 Y 957 Z -880 A 183.618792 C -33.005382
N19 X 600 Y 1112 Z -920 A 160.462978 C -33.005382
N20 X 150 Y 150 Z -860 A 144.584706 C -33.005382
N21 X 160 Y 160 Z -850 A 130.691218 C -33.005382
N22 X 170 Y 170 Z -840 A 98.27307 C -33.005382

```

图6 NC程序示例(部分)
Fig.6 NC program example (part)

```

GOTO/20,20,-990,0.55400158,-0.62957506,-0.54471781
GOTO/30,30,-980,0.5466951,-0.63593001,-0.54471781
GOTO/40,40,-970,0.53931573,-0.64220017,-0.54471781
GOTO/50,50,-960,0.53186445,-0.6483847,-0.54471781
GOTO/60,60,-950,0.52434226,-0.65448278,-0.54471781
GOTO/70,70,-940,0.51675016,-0.66049359,-0.54471781
GOTO/80,80,-930,0.50908915,-0.66641635,-0.54471781
GOTO/90,90,-920,0.50136027,-0.67225024,-0.54471781
GOTO/100,100,-910,0.49356454,-0.67799451,-0.54471781
GOTO/110,110,-900,0.48570301,-0.68364837,-0.54471781
GOTO/120,120,-890,0.47777671,-0.68921109,-0.54471781
GOTO/130,130,-880,0.46978671,-0.69468191,-0.54471781
GOTO/140,140,-870,0.46173408,-0.70006011,-0.54471781
GOTO/150,150,-860,0.45361988,-0.70534496,-0.54471781
GOTO/160,160,-850,0.44544519,-0.71053578,-0.54471781
GOTO/170,170,-840,0.43721112,-0.71563185,-0.54471781
GOTO/180,180,-830,0.42891875,-0.72063251,-0.54471781

```

图7 密化后刀具位姿数据(部分)
Fig.7 Tool position and attitude data after densification (part)

```

N1302 X20 Y20 Z-980 A49.315073 C-33.005382 t45.3
N1303 X30 Y30 Z-970 A49.976668 C-33.005383 t45.38
N1304 X40 Y40 Z-960 A50.638262 C-33.005384 t45.44
N1305 X50 Y50 Z-950 A51.299857 C-33.005385 t45.51
N1306 X60 Y60 Z-940 A51.961452 C-33.005386 t45.66
N1307 X70 Y70 Z-930 A52.623046 C-33.005387 t45.67
N1308 X80 Y80 Z-920 A53.284641 C-33.005388 t45.72
N1309 X90 Y90 Z-910 A53.946236 C-33.005389 t45.76
N1310 X100 Y100 Z-900 A54.60783 C-33.005390 t45.80
N1312 X110 Y110 Z-890 A55.269425 C-33.005391 t45.83
N1313 X120 Y120 Z-880 A55.93102 C-33.005392 t45.87
N1314 X130 Y130 Z-870 A56.592614 C-33.005393 t45.91
N1315 X140 Y140 Z-860 A57.254209 C-33.005394 t45.93
N1316 X150 Y150 Z-850 A57.915804 C-33.005395 t45.97
N1317 X160 Y160 Z-840 A58.577398 C-33.005396 t46.01
N1318 X170 Y170 Z-830 A59.238993 C-33.005397 t46.04
N1319 X180 Y180 Z-820 A59.900588 C-33.005398 t46.07

```

图8 密化后运动数据(部分)
Fig.8 Motion position and attitude after densification (part)

表8 机床模型理论位姿数据(NC程序第7行局部密化段)

Table 8 Theoretical position and attitude data of machine tool model (local densification section in line 7 of NC program)

| 段数 | 节点类型 | 模型坐标系原点/mm | X轴矢量 | Y轴矢量 | Z轴矢量 |
|----|------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 13 | X | (495, 3220, 2550) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Y | (1575, -1380, 6000) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Z | (-1380, -1380, 4120) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | A | (-1380, -1380, -2180) | (0.501, -0.672, -0.544) | (-0.544, 0.501, -0.672) | (-0.672, -0.544, 0.501) |
| | C | (1620, 1695, 420) | (0.544, -0.728, 0) | (-0.728, 0.544, 0) | (0, 0, 1) |
| 14 | X | (505, 3230, 2550) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Y | (1575, -1370, 6000) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Z | (-1370, -1370, 4130) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | A | (-1370, -1370, -2170) | (0.493, -0.678, -0.544) | (-0.544, 0.493, -0.678) | (-0.678, -0.544, 0.493) |
| | C | (1630, 1705, 430) | (0.544, -0.728, 0) | (-0.728, 0.544, 0) | (0, 0, 1) |

表9 机床模型实际位姿数据(NC程序第7行局部密化段)

Table 9 Actual position and attitude data of machine tool model (local densification section in line 7 of NC program)

| 段数 | 节点类型 | 模型坐标系原点/mm | X轴矢量 | Y轴矢量 | Z轴矢量 |
|----|------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 13 | X | (494.9724, 3219.9975, 2549.9571) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Y | (1574.9691, -1380.0185, 5999.9469) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Z | (-1380.0311, -1380.0187, 4119.9436) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | A | (-1380.0355, -1380.0189, -2180.0597) | (0.501, -0.672, -0.544) | (-0.544, 0.501, -0.672) | (-0.672, -0.544, 0.501) |
| | C | (1619.960098, 1694.980857, 419.9290998) | (0.544, -0.728, 0) | (-0.728, 0.544, 0) | (0, 0, 1) |
| 14 | X | (504.9724, 3229.9975, 2549.9571) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Y | (1574.9967, -1370.016, 5999.9898) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | Z | (-1370.0002, -1370.0002, 4129.9967) | (1, 0, 0) | (0, 1, 0) | (0, 0, 1) |
| | A | (-1370.0044, -1370.0002, -2170.0033) | (0.493, -0.678, -0.544) | (-0.544, 0.493, -0.678) | (-0.678, -0.544, 0.493) |
| | C | (1629.995598, 1704.999757, 429.9888) | (0.544, -0.728, 0) | (-0.728, 0.544, 0) | (0, 0, 1) |

根据机床模型实际位姿数据,可得到机床仿真运动过程,如图9所示。

6 结论

本文研究了基于五轴数控机床仿真拓扑结构定义、刀具位姿仿真密化计算、刀具轨迹仿真密化时间标记计算与考虑五轴数控机床几何误差的机床模型位姿计算,得到了如下结论。

(1) 针对五轴数控机床仿真拓扑结构定义了节点、机床模型与机床仿真坐标系,并对机床仿真运动位姿表达的相关参数进行了定义。

(2) 针对刀具位姿仿真密化的计算方法,对数控系统指令模式、密化次数、矢量转换、刀轴矢量密化、刀位坐标密化的计算方式进行了阐述,保证了数控系统指令执行与机床仿真运动的一致性。

(3) 针对刀具轨迹仿真密化时间标记的计算方法,采用简化后的S型曲线加减速算法,对密化后的刀具位姿数据进行速度控制,通过建立时间标记,实现对机床仿真运动时间的精确控制。

(4) 对机床模型的理论位姿计算方法进行阐述,在机床模型仿真运动过程中引入机床几何误差项,保证机床仿真运动与实际机床运动的误差一致性。

参考文献

[1] VAN HOOK T. Real-time shaded NC milling display[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 15-20.

[2] 汤幼宁,魏生民,杨海成. 基于Dexel模型的NC加工仿真和验证研究[J]. 西北工业大学学报, 1997, 15(4): 629-633.

TANG Youning, WEI Shengmin, YANG Haicheng. On simulation of NC milling using dexel model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1997, 15(4): 629-633.

[3] 邵志香. 面向自由曲面数控加工的适应性实时仿真关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(沈阳计算技术研究所), 2012.

SHAO Zhixiang. Research on adaptive and real-time simulation key technologies for NC machining of free-form surface[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Computing Technology), 2012.

[4] 罗堃. 三角片离散法实现数控铣床加工仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(11): 1024-1028.

LUO Kun. Using triangular faceted model for NC machining verification[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(11): 1024-1028.

[5] 赵红显. 数控加工运动仿真及材料去除的研究与实现[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

ZHAO Hongxian. Research and implementation of CNC machining motion simulation and material removal[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.

[6] LIU S Q. Real-time, dynamic level-of-detail management for three-axis NC milling simulation[J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(4): 378-391.

[7] LI J G, DING J, GAO D, et al. Quadtree-array-based workpiece geometric representation on three-axis milling process simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5-8): 677-687.

[8] BOHEZ E L J. The stencil buffer sweep plane algorithm for 5-axis CNC tool path verification[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(12): 1129-1142.

[9] 彭键钧,郭锐锋,张世民,等. 数控加工仿真系统的研究与应用[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(6): 1240-1244.

PENG Jianjun, GUO Ruifeng, ZHANG Shimin, et al. Research and application of NC (numerical control) machining simulation system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(6): 1240-1244.

[10] 肖通. 面向数字孪生的五轴机床建模与监控技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

XIAO Tong. Research on 5-axis machine tool modeling and monitoring technology for digital twin[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[11] 伍鹏. 五轴数控机床开放式后置处理系统研究与开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

WU Peng. Research and development of post-processing open system for five-axis NC machine tool[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

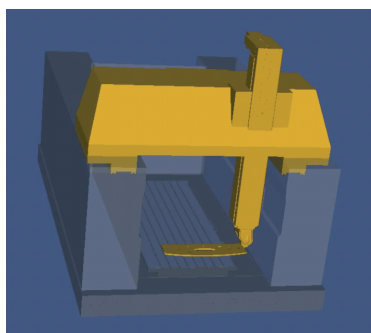
[12] 李庄. 五轴机床运动学通用建模理论研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

LI Zhuang. Research and application on kinematic generic modeling theory for five-axis machine tool[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

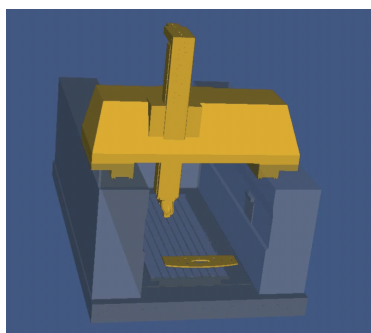
[13] 陈建. 通用五轴数控加工仿真系统研发[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

CHEN Jian. General five-axis NC machining simulation system development[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[14] 田军锋,林浒,姚壮,等. 数控系



(a) 仿真开始



(b) 仿真结束

图9 机床运动仿真过程

Fig.9 Machine motion simulation process

统 S 型曲线加减速快速规划研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(1): 168-172.

TIAN Junfeng, LIN Hu, YAO Zhuang, et al. Study on S-shape curve acceleration and deceleration control fast planning on CNC system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(1): 168-172.

[15] 粟时平, 李圣怡, 王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 121-125.

SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin.

Identification method for errors of machining center based on volumetric error model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 121-125.

[16] 张宏韬. 双转台五轴数控机床误差的动态实时补偿研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

ZHANG Hongtao. Research on dynamic and real-time error compensation for two turntable five-axis NC machine tool[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,

2011.

[17] 付国强, 傅建中, 沈洪焄. 五轴数控机床旋转轴几何误差辨识新方法 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2015, 49(5): 848-857.

FU Guoqiang, FU Jianzhong, SHEN Hongyao. One novel geometric error identification of rotary axes for five-axis machine tool[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(5): 848-857.

Research on Motion Position and Attitude Algorithm of Machine Tool for Five-Axis CNC Machining Simulation

JIANG Lei, ZHANG Yuexinkai, LIANG Bin, DING Guofu

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[ABSTRACT] CNC machining simulation is the centralized embodiment of digitalization and intelligence in the development of manufacturing industry. But the existing research still has deficiencies in accuracy in the calculation of position and attitude of machine tool movement. Constraints such as command mode, acceleration and deceleration control of CNC system and geometric error of machine tool are not considered. For this issue, this paper studies the motion of five-axis machine tool simulation algorithm. Firstly, the topology, model and coordinate system of five-axis CNC machine tool are completely defined. Secondly, the topology structure, model and coordinate system of five-axis CNC machine tool are defined completely. On this basis, the densification of simulation of tool position and attitude based on command mode of CNC system and the corresponding time marking calculation method are explored. Combining with geometric error model of five-axis CNC machine tool, the simulation position and attitude of the model movement process of the machine tool which is more in accordance with the actual geometric state of the machine tool are obtained. The proposed algorithm is validated by topological structure modeling, tool position simulation densification and position and attitude calculation of machine tool model considering geometric errors, which proves the feasibility and validity of the algorithm.

Keywords: Five-axis CNC machine; Machining simulation; Tool path; Motion position and attitude; Motion algorithm

(责编 古京)