

# 基于Linux的开放式数控系统加工轨迹仿真功能研发

陈平斌,林述温,陈坤火

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116)

**摘要:**基于Linux的PC+可编程I/O(接口)体系的开放式数控系统,设计了加工轨迹仿真的通用模型。针对毛坯仿真建模时,离散化精度和仿真速度之间的矛盾,提出一种离散模型建立的改进方法,即在均匀网格离散基础上对模型曲率较大处细化网格间距,并以数控铣削加工为例,针对该通用模型和改进的离散矢量建模法研发了三轴数控铣削加工仿真功能单元,实现了加工前试切模拟和轨迹错误检查。通过实际加工零件,验证了所开发加工仿真功能单元的正确性和通用模型在本开放式数控系统中的适用性。

**关键词:**开放式数控系统;轨迹仿真;功能单元模型;改进离散矢量建模

**中图分类号:** TG659; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2020)01-0071-04

## Research on Trajectory Simulation Function of Open Numerical Control System Based on Linux

CHEN Pingbin, LIN Shuwen, CHEN Kunhuo

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** In this paper, a general model for the machining trace simulation is designed for the open CNC system based on the architecture of "Linux PC+programmable I/O (interface)". When the blank simulation is modelled, there is a contradiction between the discretization precision and the simulation speed. An improved method for establishing the discrete model is proposed, which is used to refine the grid spacing on the basis of the uniform mesh discrete. The numerical control milling is taken for example, based on the general model and the improved discrete vector modeling method, a three-axis CNC milling simulation function unit is developed, which is used to do the pre-machining test simulation and track error checking. The validity of the simulation function unit and the applicability of the general model in this open CNC system are verified by machining parts.

**Keywords:** open CNC system; trajectory simulation; functional unit model; improved discrete vector modeling

## 0 引言

开放式数控系统,其结构开放、模块具有互换性,功能可扩展,已成为数控技术发展的趋势<sup>[1]</sup>。数控系统的加工仿真功能可有效检验NC代码的正确性、检验加工程序是否存在过切或欠切,优化切削参数<sup>[2-3]</sup>等。大多数控系统仿真功能需要借助CAM软件实现,如UG、CATIA等。随着计算机建模技术的发展,许多学者对数控仿真系统进行了研究,如文献[4]运用实体几何法建模思想研究了数控车床运动仿真及切削仿真;文献[5]采用Z-MAP方法对数控铣削加工仿真进行了研究;文献[6]基于离散建模对三轴数控铣削加工仿真算法进行研究。但上述研究大都是建立在Window平台上,而且系统能够支持仿真的对象有限。智能制造环境下对数控系统提出了开放性、集成CAM软件,方便编程模拟的需求<sup>[6]</sup>。为此,本文针对基于Linux平台,采用PC+可编程I/O卡体系的开放式数控系统<sup>[7]</sup>,研究了加工轨迹仿真功能单元的通用模型,并基于

该模型,研发了数控铣削机床的加工仿真功能。

## 1 轨迹仿真功能单元通用模型设计

数控系统是一个多任务、高实时的控制系统,基于IEC61499<sup>[8]</sup>功能块模型建立轨迹仿真功能单元的标准模型,可以在满足上述需求的同时降低开发周期。IEC61499基本功能块模型(BFB)如图1所示。根据该模型,建立加工轨迹仿真功能单元的通用模型,如图2所示。功能单元的执行由事件触发驱动,如开始仿真事件、触发事件可以多样,但是接口必须符合BFB模型标准。轨迹仿真控制执行表依据触发事件切换状态,并调用此状态下的控制算法进行处理,如若触发事件为开始仿真,ECC的状态由FREE转为START状态,开始处理刀位、毛坯等数据,并依次调用相应算法进行加工仿真计算。处理完毕后自动更新内部数据,将得到的数据由数据输出接口输出。当ECC的状态为FINISH状态,轨迹仿真功能单元执行完毕。

基金项目:福建省科技重大专项(2016HZ01010004)

第一作者简介:陈平斌(1993—),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为精密机械与控制技术数控设计。

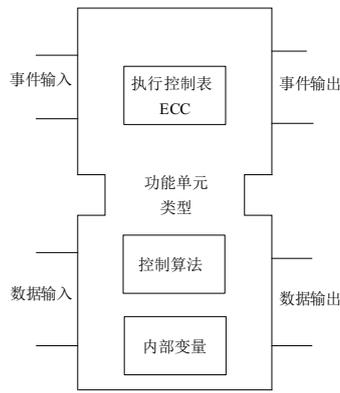


图1 IEC61499 基本功能块模型

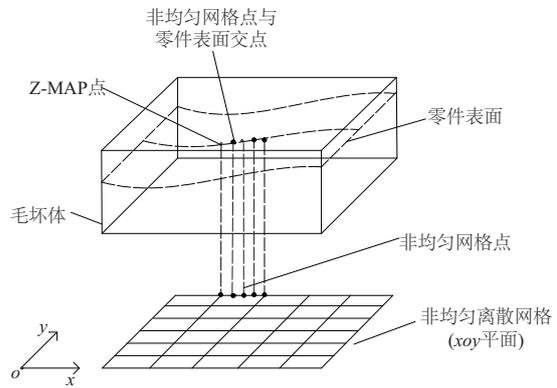


图3 非均匀离散方式模型

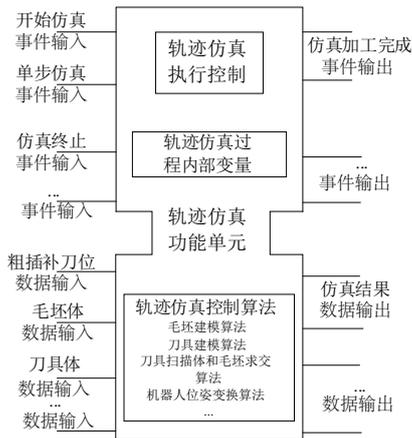


图2 基于BFB的轨迹仿真功能单元通用模型

## 2 数控铣削加工仿真功能单元的开发

### 2.1 改进离散矢量建模原理

在仿真计算中,采用离散矢量建模法进行加工仿真的实质<sup>[9]</sup>是刀具扫描体与毛坯体求交运算和毛坯体数据的更新显示。因此,采用何种方式、何种精度离散出用于求交计算的数学模型是该方法的关键所在。

均匀网格离散建模,是以一定的网格间距(离散精度)将零件包围在xoy平面的投影面均匀划分为有限个网格。每个网格点法矢方向与零件外表面的交点称为Z-MAP点。均匀网格的离散方式简单但是其仿真速度和离散精度存在矛盾,要想得到较好的仿真效果,只有不断地提升划分精度,但是会带来大量数据,严重影响仿真速度。

针对上述问题,进行了改进和优化,如图3所示。首先以一般的精度对零件曲面进行均匀离散划分,在零件外表面曲率值较大处进行局部增加划分精度,从而提升仿真效果,又兼顾了仿真速度。本文将这种局部优化的方法称为改进离散矢量建模方法,建立的数学模型称为非均匀离散方式模型。

### 2.2 毛坯体的建模

毛坯体建模采用改进离散矢量建模法,以方形块料为

例进行阐述毛坯模型建立的流程如下。

首先定义毛坯和仿真精度,包括毛坯尺寸、加工余量、仿真精度和速度控制。仿真精度和速度用Epsilon参数和Step参数控制。Epsilon表示相邻均匀离散网格之间的间距,Step用于改变单步的网格数,来调节粗加工和精加工时对网格间距的不同要求。在算法中,两者之积控制了仿真精度和速度。然后进行均匀离散网格划分,在毛坯建模中,将Z-MAP点的初始高度值赋值为毛坯高度,均匀离散网格之间的间距根据刀具类型和切削深度进行确定。球型刀和环形刀可按式(1)确定。

$$Epsilon_{max} = \sqrt{6Re_t} \tag{1}$$

式中: $e_t$ 为切削深度; $R$ 为刀具半径。

对于平底刀

$$Epsilon_{max} = 2e_t \tag{2}$$

在网格实际划分时由于切削深度无法精确估计,大多数情况下 $e_t$ 远远小于 $R$ 。为了简化起见,在仿真精度控制中将Epsilon取值范围定为0.1~1.0mm,并通过Step参数来调节粗加工和精加工时对网格间距的不同要求。实际采用的网格划分间距L为两者之积。

$$L = Epsilon \times Step \tag{3}$$

在均匀离散网格划分完成后,对零件表面曲率较大之处添加非均匀离散网格点。非均匀离散网格划分流程如图4所示。先将加工零件曲面离散为四边面片拼接表示,然后进行曲率估算。显然曲率较大之处四边面片不同方向两弧长之积将越大。据此通过遍历所有四边面片,计算其两弧长之积 $S_i$ 并和曲率较小处四边面片 $S_0$ 相比较来确定是否需要添加非均匀离散网格点。在算法中,令 $S_0 = L \times L$ ,并设定当 $S_i > 1.5S_0$ 时,以等间距在均匀离散网格基础上添加非均匀离散网格点。

### 2.3 刀具扫描体与毛坯模型交点计算

刀具在本仿真建模中可视作刚体处理,其模型建立后就保持不变。因此,关键是刀具扫描体与毛坯模型求交计算后模型的更新显示。所谓刀具扫描体是指刀具在刀位点之间移动形成的包络体,不同刀具类型会形成不同的包络体,因此涉及的求交计算也不同。

毛坯体数据的更新依赖于离散点法线方向与刀具扫描体的求交计算,为了简化计算和加快仿真速度,本文在每一个刀位点,先得到切削加工影响的局部区域(刀具在

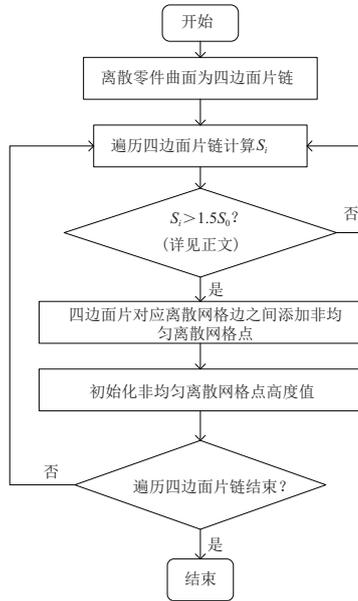


图4 毛坯体局部非均匀离散网格划分流程

$xoy$  平面投影的外切最小正四边形), 在此区域进行求交计算, 达到毛坯数据的局部更新。

#### 1) 离散点法矢与球形刀扫描体交点位置计算

球形刀的求交计算如图5所示, 设刀具(半径为  $R$ ) 从一个刀位点  $(x_s, y_s, z_s)$  移动到另一刀位点  $(x_e, y_e, z_e)$ , 两点的连线  $d$  称为刀具运动的中心线, 其在  $xoy$  平面的投影线记作  $d_{xy}$ , 刀心在  $xoy$  平面的投影点记作点  $s$  和点  $e$ 。  $p(x_p, y_p)$  为  $xoy$  平面局部区域的一离散点, 其法矢方向直线与球形刀具扫描体的交点为  $p'(x_p, y_p, z_p)$ , 此时对应的刀心坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ , 则:

$$d = \sqrt{(\Delta y^2 + \Delta x^2 + \Delta z^2)} \quad (4)$$

$$d_{xy} = \sqrt{(\Delta y^2 + \Delta x^2)} \quad (5)$$

式中:  $\Delta x = x_e - x_s$ ;  $\Delta y = y_e - y_s$ ;  $\Delta z = z_e - z_s$ 。

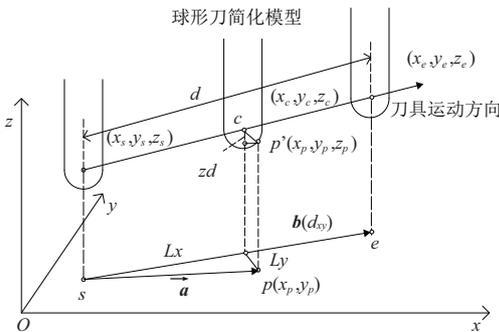


图5 球形刀与毛坯交点的几何关系示意图

连接点  $s$  和点  $p$  得到有向线段记作向量  $\mathbf{a}$ , 连接点  $s$  和点  $e$  得到有向线段(长度为  $d_{xy}$ )记作向量  $\mathbf{b}$ 。记向量  $\mathbf{a}$  在  $d_{xy}$  的投影长度为  $L_x$ , 在  $d_{xy}$  垂线上的投影长度为  $L_y$ , 由向量投影原理和几何关系可得:

$$L_x = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{b}|} = \frac{\Delta x \times (x_p - x_s) + \Delta y \times (y_p - y_s)}{d_{xy}} \quad (6)$$

$$L_y = \frac{|\Delta y \times (x_p - x_s) + \Delta x \times (y_p - y_s)|}{d_{xy}} \quad (7)$$

$$z_c = z_s + \frac{L_x}{d_{xy}} \Delta z \quad (8)$$

设过当前位置刀心点  $c(x_c, y_c, z_c)$  在加工影响的局部区域取离散网格点  $p(x_p, y_p)$ , 作垂直于  $d_{xy}$  线段的平面与球形刀相交得到一半圆弧, 该半圆弧即为当前刀具的切削刃。由包络线的特性, 半圆弧上的点与刀具中心线的距离为  $L_y$ , 则交点  $p'(x_p, y_p, z_p)$  与当前位置刀心点  $(x_c, y_c, z_c)$  在  $z$  轴方向的距离  $z_d$  为

$$z_d = \sqrt{(R^2 - L_y^2)} \quad (9)$$

由此可得离散网格点与球形刀具扫描体交点处的高度值  $z_p$ :

$$z_p = z_c - z_d = z_s + \frac{L_x}{d_{xy}} \Delta z - \sqrt{(R^2 - L_y^2)} \quad (10)$$

#### 2) 离散点法矢与环形刀扫描体交点位置计算

环形刀的切削刃为圆环面下部外侧面。设刀具半径为  $R$ , 切削刃半径为  $r$ , 对于平底刀可以看做是环形刀的特例(切削刃半径  $r$  为 0)。环形刀在两刀位运动之间的某一位置如图6所示。  $p'(x_p, y_p, z_p)$  为加工影响的局部区域一离散网格点  $p$  与环形刀具扫描体的交点, 其与当前位置刀心点  $O_c(x_c, y_c, z_c)$  在  $z$  轴方向的距离为  $z_d$ 。以  $d_{xy}$  方向为  $x$  轴,  $z$  轴方向不变, 建立一个新的坐标系。  $\alpha_1$  是  $p'o'$  连线与  $z$  轴方向的夹角,  $\alpha_2$  是  $xoy$  平面  $p_c$  与  $x$  轴方向的夹角。

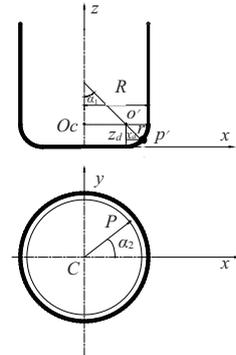


图6 环形刀求交计算

由包络体特性可知, 点  $p'$  的法线( $p'o'$ )方向与刀具速度方向正交, 设刀具速度方向  $\mathbf{T}$ ,  $p'$  的法线方向为  $\mathbf{N}$ , 则有:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{N} = 0$$

$\mathbf{T}$  可取为刀具中心点移动方向,  $\mathbf{N}$  取为单位法线方向则:

$$\mathbf{T} = (d_{xy}, 0, \Delta z)$$

$$\mathbf{N} = (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2, \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2, \cos \alpha_1)$$

由几何关系可知:

$$\cos \alpha_1 = \frac{z_d}{r}$$

$$x_d = \sqrt{(r^2 - z_d^2)}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{L_y}{(R-r) + x_d}$$

将式(12)、式(13)代入式(11)可得

$$x_d^2 \left( 1 - \frac{Dy^2}{(r+x_d)^2} \right) = \left( \frac{\Delta z}{d_{xy}} \right)^2 z_d^2 \quad (14)$$

在算法中采用迭代法求解  $z_d$ , 根据式(8)求得  $z_c$ , 则离

散网格点与环型刀具扫描体交点处的高度值  $z_p$  :

$$z_p = z_c - z_d \quad (15)$$

毛坯体数据的更新算法流程如图 7,其基本原理是通过比较求交计算所得  $z_p$  值,当新  $z_p$  小于原  $z_p$  值时更新离散点的  $z$  值,否则保留原值不变。当遍历完当前刀位点局部区域的所有离散网格点后,调用 Open GL 库 `glBegin(GL_QUAD_STRIP)` 函数绘制四边面片拼接形成切削后的毛坯外形。

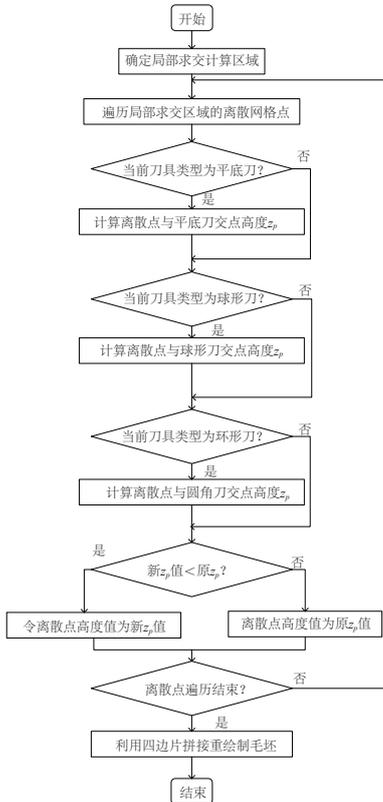


图 7 毛坯体数据更新算法流程

所研发数控铣削加工轨迹仿真功能单元的运行流程如图 8,在外部输入事件的驱动下,通过执行控制表切换状态进入下一个流程,并调用相应算法实现从毛坯定义、模型离散、求交计算、数据更新绘制等过程。

### 3 数控铣削加工轨迹仿真功能验证

图 9 所示为数控铣削加工仿真功能单元的默认显示界面。通过打开轨迹文件按钮,调用数控系统粗插补计算后的刀位文件。刀位文件获取采用前瞻速度、加速度预处理插补算法,详见文献[10]。仿真时毛坯选为块料,加工精度控制参数设为  $Epsilon \times Step = 0.5 \times 5$ 。采用平底刀和球型刀加工仿真时的效果如图 10 所示。此外,仿真功能单元能对过切、欠切进行检查并输出错误的程序段号。如图 11 所示,当发生过切时将进行提示,并在毛坯模型上通过与正常加工时差异化的颜色(图中为灰色)体现。实际加工试件经测量数据对比发现,仿真结果和实际加工结果基本一致,所研发数控铣削加工仿真功能单元适应本开放式数控系统。

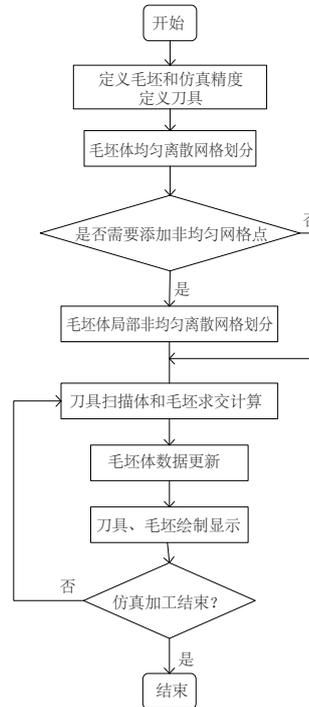


图 8 数控铣削加工轨迹仿真功能单元运行流程

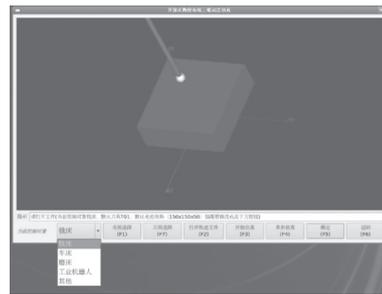


图 9 铣床轨迹仿真功能单元默认显示界面

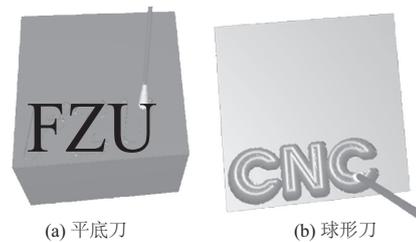


图 10 仿真加工结果

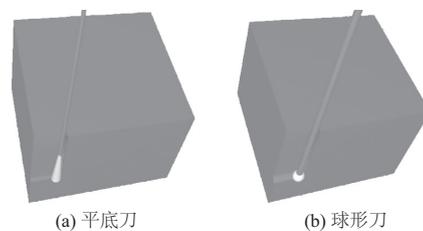


图 11 过切检查

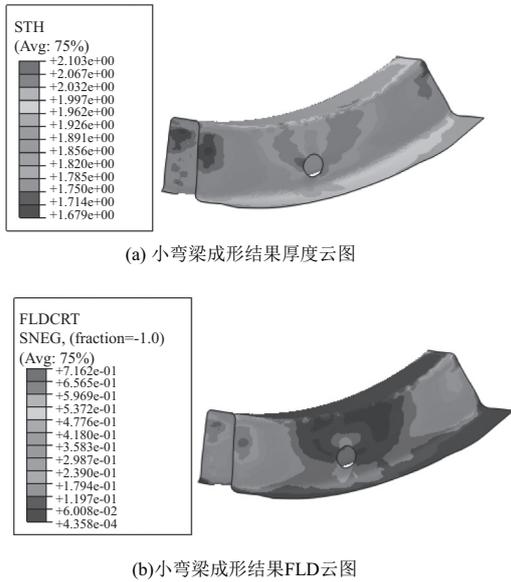


图9 小弯梁成形结果

### 3.3 讨论

在本算例中,因模具大体有6部分,需分别定义每部分模具与板料的接触对,共需定义6对接触对,并且材料设置、边界设置等也较为复杂。在Abaqus传统界面中定义这些内容需耗费30~60min,且人为定义,接触对易出错。本算例采用本文开发的系统界面定义了前处理过程,仅需10min输入前处理所需参数,即可完成本算例的前处理过程,不仅节省了建立有限元模型的时间,而且避免了人为操作的失误。

(上接第74页)

## 4 结语

本文针对PC+可编程I/O(接口)体系结构的开放式数控系统,为满足不同控制对象的仿真需求,基于IEC61499基本功能块模型设计了适应本开放式数控系统的轨迹仿真功能的通用模型。仿真建模时,为改善毛坯数学模型离散化精度和仿真速度之间存在的矛盾,在均匀网格离散基础上加以改进,并以数控铣床为例,基于通用模型和改进离散矢量建模法设计开发了三维动态加工仿真功能单元,实现了试切模拟和轨迹错误检查。毛坯建模时,离散化精度和仿真速度之间存在矛盾,本文采用改进离散矢量建模法,使之得到一定改善,但仍有待进一步探索新方法,以提高仿真精度和兼顾速度。

#### 参考文献:

- [1] 叶佩青,张勇,张辉. 数控技术发展状况及策略综述[J]. 机械工程学报,2015,21:113-120.
- [2] 任景刚. 数控加工仿真技术发展现状与趋势[J]. 航空制造技

## 4 结语

本文利用Python语言对Abaqus进行GUI二次开发,开发自动成形有限元模型建立过程功能的GUI界面,简化通用软件建立小弯梁成形有限元模型的过程,方便用户快速地建立有限元模型,节省了建模时间,并以小弯梁成形有限元建模过程为例,将小弯梁的仿真参数输入到界面中,自动完成小弯梁成形有限元模型的建立。经实例验证后,求解器计算的结果与实际相符,故本文所开发的系统具有一定的实用性。

#### 参考文献:

- [1] 赵亚夫. 轨道客车关键不锈钢零部件数控拉弯成形工艺研究[J]. 模具制造,2017,17(8):16-19.
- [2] 鲁万彪,李国苹,解瑞豹. 车顶小弯梁成形工艺[J]. 金属加工(冷加工),2016(S1):103-105.
- [3] 谢秉顺,王兴元,朱健军,等. 城市轨道交通车辆小弯梁成形数值模拟[J]. 机械制造与自动化,2013,42(5):120-122.
- [4] 栾小东,李希勇,孙廷俭. 基于ABAQUS的弯梁成形工艺研究[J]. 锻压技术,2012,37(4):167-171.
- [5] 吴向东,刘志刚,万敏,等. 基于Python的ABAQUS二次开发及在板料快速冲压成形模拟中的应用[J]. 塑性工程学报,2009,16(4):68-72.
- [6] 连昌伟,王兆远,杜传军,等. ABAQUS后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J]. 锻压技术,2006(4):111-114.
- [7] 苏景鹤,江丙云. ABAQUS Python二次开发攻略[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.
- [8] 贾利勇,富琛阳子,贺高,等. Abaqus GUI程序开发指南(Python语言)[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.

收稿日期:2018-10-29

术,2016,500(5):62-66.

- [3] 张天其,于忠海,张晓峰. 数控机床三维建模与加工仿真技术研究[J]. 机械工程师,2009(1):62-63.
- [4] 姜晓峰,李云飞. 计算机数控加工仿真中误差检测技术的研究与实现[J]. 小型微型计算机系统,2002(7):886-889.
- [5] 李军. 基于离散建模的三轴数控铣削加工仿真算法研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.
- [6] 李炳然,张辉,叶佩青. 智能制造环境下的数控系统发展需求[J]. 航空制造技术,2017,525(6):24-30.
- [7] 李式真. 开放式数控系统运动控制可配置的研究[J]. 机械制造与自动化,2015,44(4):174-176.
- [8] 涂钰青. 基于IEC61499标准的组件化模型集成数控系统形式化建模与验证的研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [9] 黄明吉. 虚拟数控技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 黄锥良. 基于Linux的软件型开放式数控系统高速运动控制技术的研究[D]. 福州:福州大学,2010.

收稿日期:2018-10-24