

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.01.028

基于 V-REP 和 MATLAB 的机器人建模及 轨迹规划仿真验证

孙凌云,罗福源,刘鹏

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:以6自由度串联结构机械臂为研究对象,通过DH参数法采用MATLAB工具箱建立机械臂的运动学模型,完成正逆运动学方程求解函数。使用三维设计软件UG对机械臂进行三维结构建模,通过接口导入到跨平台开源仿真软件V-REP中建立其机械臂的虚拟样机模型,运用MATLAB完成运动轨迹规划并通过远程API同步模式控制V-REP完成运动学仿真和碰撞检测。通过上述方法对机器人向压力机内部装卸工件过程进行了仿真,结果表明:该方法能够生成平稳无干涉的装卸工件轨迹,并通过后续的物理样机控制实验验证了该仿真方法的正确、有效。

关键词:工业机器人;运动学仿真;虚拟样机;V-REP;MATLAB;轨迹规划

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0108-05

Robot Modeling and Trajectory Planning Simulation Verification Based on V-REP and MATLAB

SUN Lingyun, LUO Fuyuan, LIU Peng

(College of Mechanic and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: With the 6-DOF serial structure manipulator as the research object, the kinematics model of the manipulator is established by the DH parameter method and Matlab toolbox to solve the forward and inverse kinematics equations. The three-dimensional structure of the manipulator is modeled with the 3D design software UG, and the virtual prototype model of the manipulator is established by importing it into the cross platform open source simulation software V-REP through the interface. The motion trajectory planning is completed by MATLAB, and the kinematics simulation and collision detection are completed by controlling V-REP in remote API synchronous mode. The simulation results show that the method can generate smooth and non-interference loading and unloading trajectory, and the simulation method is verified to be correct and effective through the subsequent physical prototype control experiments.

Keywords: industrial robot; kinematics simulation; virtual prototyping; V-REP; MATLAB; trajectory planning

0 引言

工业机器人是具有编程能力并可在自动控制下实现预期功能的多关节、多自由度机械装置,其主要机构类型包括关节型、笛卡儿型 SCARA、球面坐标型、圆柱面坐标型等。而其中关节型机械臂具有结构紧凑、空间施展范围大等优点,应用最为广泛。但因其连杆数量较多,运动学中正逆求解、奇异点解算以及三维空间中碰撞检测较为复杂,动力学系统也因其存在多输入输出耦合关系而存在求解复杂的问题^[1-2],导致关节型工业机器人开发周期长、开发费用高。随着工业机器人在工业、航天等多个领域的广泛应用^[3-4],如何提升控制系统精度、缩短研发周期、减少开发费用等引起了相关研究人员的广泛关注。

为了解决上述问题,虚拟样机技术应运而生,其兴起

于20世纪80年代,现已成功运用于汽车制造和工程机械等多个领域,成为新一代数字化设计方法^[5-6]。本文以6自由度串联结构 AUBO-i5 机械臂为研究对象,分析推导其正逆运动学公式,并在 MATLAB 中采用 Robotics Toolbox 工具箱搭建该6轴机械臂运动学模型,通过导入UG三维模型的方式在V-REP中建立其虚拟样机模型,使用MATLAB完成运动轨迹规划并通过远程API同步模式控制V-REP,完成机械臂向压力机内部装卸工件过程的运动学仿真和碰撞检测。

1 机械臂三维结构建模

本文选取实验室现有的某公司生产的 AUBO-i5 协作机器人为研究对象。该工业机器人具有6个自由度,即3个转动自由度和3个平动自由度,由基座、肩部、肘部和腕

基金项目:江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20160084);南京市产学研后补助项目(201722014)

第一作者简介:孙凌云(1995—),男,浙江杭州人,硕士研究生,研究方向为数控技术与装备自动化控制。

部构成,其关节示意图如图1所示。依据公司提供的官方资料,结合对AUBO-i5协作机器人测绘来获取形状和尺寸参数,完成三维结构建模。三维建模选用UG软件,其建模步骤包括草图绘制、各零件特征实体建模以及各关节连杆零件的装配等。利用UG软件建立的6轴机器人三维结构模型图如图2所示。

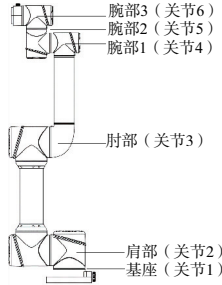


图1 AUBO-i5协作机器人
关节示意图



图2 AUBO-i5协作机器人
三维结构模型

2 机械臂运动学建模

2.1 AUBO-i5 正运动学的建立及公式推导

本节以某公司的AUBO-i5机器人作为研究对象,分析一个6自由度机器人的正运动学问题。对机械臂运动学建模时通常主流采用的是1965年HARTENBERG R S在文献[7]中提出的DH系,后人又做了许多改进,现在基本分为SDH和MDH^[8]两大类。AUBO-i5机械臂结构基本类似于UR机器人,但其第3关节轴方向相反,采用SDH参数法分析并建立AUBO-i5机械臂的连杆固定坐标系,连杆参数如表1所示,坐标系分布如图3所示。

表1 AUBO-i5的连杆参数表

编号 <i>i</i>	关节角 $\theta_i/(^\circ)$	偏距 d_i/m	长度 a_i/m	扭转角 $\alpha_i/(^\circ)$
1	0	0.122 0	0	90
2	90	0	0.408	180
3	0	0	0.376	180
4	-90	0.121 5	0	-90
5	0	0.102 5	0	90
6	0	0.094 0	0	0

正运动学方程推导即研究从关节空间到笛卡儿空间

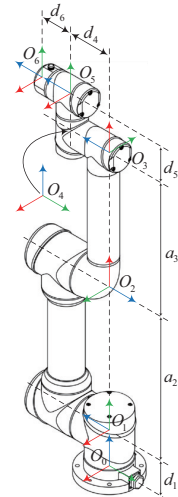


图3 AUBO-i5机械臂运动
参数和坐标系分布

的运动解过程如下:

SDH中连杆矩阵一般表达式为

$${}^i T = \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \times \text{Trans}(0, 0, d_i) \times \text{Trans}(a_i, 0, 0) \times \text{Rot}(X_{i-1}, \alpha_i)$$

$$\text{Rot}(X_{i-1}, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

求出SDH参数法下每一个连杆变换矩阵,得到6个连杆坐标矩阵的乘积,可以简写为

$${}^0 T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

该方程构成了AUBO-i5的正运动学方程。给定一组各个关节角的值,通过正运动学方程可以计算工具坐标系相对于基坐标系的位置和姿态,从而完成从关节空间描述到笛卡儿空间描述的操作臂位姿转化。

2.2 AUBO-i5 逆运动学方程求解

逆运动学问题,即已知工具坐标系相对于固定坐标系的期望位置和姿态,求解一系列满足期望要求的关节角。对于机械臂的非线性方程求解方法一般分为两大类:数值解和封闭(解析)解。由于数值解一般通过迭代法求解,比相应封闭解的求解速度要慢很多,且不能保证求出所有解,在筛选解的时候会造成一定问题,故在此不做详细讨论。下面主要讨论封闭(解析)解方法,具有6个旋转关节机器人存在封闭解的充分条件是相邻的3根关节轴相交于一点或者平行。

当目标点位姿状态已知时,以AUBO-i5为例推导对于2,3,4轴平行机械臂的解法,即通过已知的 ${}^0 T$ 位姿矩阵:

$${}^0 T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^6 T(\theta_i) \quad (1)$$

求解 θ_i , 满足 $\theta_i \in [-175^\circ, 175^\circ]$ 。经推导各个关节解如下, θ_1 的解。

$$\theta_1 = \arctan2(d_4, \pm\sqrt{A_1^2 + B_1^2 - d_4^2}) - \arctan2(A_1, B_1) \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} A_1 = d_6 r_{23} - p_y \\ B_1 = p_x - d_6 r_{13} \end{cases} \quad (3)$$

θ_5 的解:

$$\theta_5 = \arctan2(\pm\sqrt{1 - (r_{13}s_1 - r_{23}c_1)^2}, r_{13}s_1 - r_{23}c_1) \quad (4)$$

当 $\theta_5 \neq 0$ 时, θ_6 的解为

$$\theta_6 = \arctan2(A_6, B_6) \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} A_6 = \frac{r_{12}s_1 - r_{22}c_1}{s_5} \\ B_6 = \frac{r_{21}c_1 - r_{11}s_1}{s_5} \end{cases} \quad (6)$$

当 $\theta_5 = 0$ 时, 机械臂处于奇异位形, 此时 2 关节、3 关节、4 关节和 6 关节轴平行, 机器人存在无数种解, 按情况选取 θ_6 的解, 通常选取关节 6 的当前值。

当 $\theta_5 \neq 0$ 时, 得

$$\begin{cases} s_{234} = \frac{r_{33}}{s_5} \\ c_{234} = \frac{r_{13}c_1 + r_{23}s_1}{s_5} \end{cases} \quad (7)$$

θ_2 的解为

$$\theta_2 = \arctan2(B_2, A_2) - \arctan2(C_2, \pm\sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}) \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} A_2 = p_x c_1 + p_y s_1 + d_5 s_{234} - d_6 c_{234} s_5 \\ B_2 = p_z - d_1 - d_5 c_{234} - d_6 s_{234} s_5 \\ C_2 = \frac{A_2^2 + B_2^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2} \end{cases} \quad (9)$$

θ_3 的解为

$$\theta_3 = \theta_2 - \arctan2\left(\frac{-A_2 - a_2 s_2}{a_3}, \frac{B_2 - a_2 c_2}{a_3}\right) \quad (10)$$

θ_4 的值为

$$\theta_4 = \arctan2(s_{234}, c_{234}) - \arctan2(s_{23}, c_{23}) \quad (11)$$

上述式中: $s_{234} = \sin(\theta_2 - \theta_3 + \theta_4)$; $c_{234} = \cos(\theta_2 - \theta_3 + \theta_4)$; $s_{23} = \sin(\theta_2 - \theta_3)$; $c_{23} = \cos(\theta_2 - \theta_3)$; $s_i = \sin(\theta_i)$; $c_i = \cos(\theta_i)$ 。

根据上述推导方程在 MATLAB 中编写逆运动学求解函数, 对于 AUBO-i5 机械臂逆运动学求解可得到 8 组解。由于关节运动范围、机械构型干扰等的限制, 在实际筛选时需要去除一部分, 在最后剩下的解中, 一般选取最接近当前机械臂位形的解。

3 基于 V-REP 和 MATLAB 的运动学仿真

3.1 V-REP 简介

V-REP(virtual robot experimentation platform), 现在已改名为 CoppeliaSim, 是一款跨平台的开源机器人仿真软件, 其内部含有多种类型的功能与特性、丰富的应用编程

接口, 可满足机器人在各种环境下的仿真。其使用和搭建机器人仿真环境等操作相比 ADAMS 对于初学者更加友好且更加高效, 而 MATLAB 软件具有强大的矩阵计算功能, 能够根据机械臂的运动学方程进行快速仿真实验和验证, 故本文联合 V-REP 和 MATLAB 两种平台以实现机械臂的运动学验证仿真。

3.2 V-REP 中建立虚拟样机模型

V-REP 软件自身三维建模效率较低, 只能建立已知空间三维坐标的一些简单形状, 故采用 UG 三维模型导入的方法, 同时为了保证三维模型导入 V-REP 后模型方便处理, 需要先将 UG 中建立的 AUBO-i5 模型各个关节位置调整至关节零位处, 并将原点调整与基座的中心点重合。详细步骤如下: 将 UG 模型文件保存为 STL 文件, 导入 V-REP 场景中; 分解模型并删除大量多余形状, 以此减轻运动学以及动力学仿真的计算量; 组合各个形状, 添加机械臂动力学参数, 调整各个形状之间的继承关系并使用关节连接各个连杆; 最后添加装卸物件的末端夹具, 完成机械臂在 V-REP 中的三维建模, 如图 4 所示。图中为了方便理解, 显示了关节模型以及场景中各个部件的继承关系。

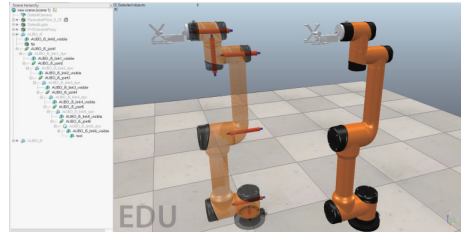


图 4 V-REP 中建立 AUBO-i5 虚拟样机模型

3.3 轨迹规划与运动学仿真

运动学仿真以 AUBO-i5 为研究对象, 使用 MATLAB 通过远程 API 客户端模式同步控制 V-REP 中虚拟样机的运动, 完成机器人向压力机内部装卸工件过程的仿真。虽然三次多项式轨迹确定的轨迹具有一定的连续性, 但是对于一些应用的动力学和惯性载荷会产生一些不期望的影响。为了获得连续的加速度轨迹, 位置和速度需要有合适的初始和终止条件, 也需要合适的初始和终止加速度值。故此次仿真为保证高平稳的运动控制, 路径规划采用基于五次多项式插值过渡的线性路径规划函数。五次多项式函数如下所示:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

利用 MATLAB Robotics Toolbox 工具箱以及自编写的正逆运动学解算函数对装卸工件过程进行插补: 机械臂零位状态—准备装夹—装夹工件—准备移动到压力机内部—完成工件放置。空间中添加 6 个路径中间点, 通过雅可比矩阵将关节速度和机械臂末端的笛卡儿速度联系, 以此平滑衔接笛卡儿空间直线段与关节空间曲线段, 完成对机器人末端执行器在多位姿之间移动轨迹的路径插补, 以实现无干涉的工件装卸过程, V-REP 虚拟样机仿真过程中 4 个时刻位姿如图 5 所示。

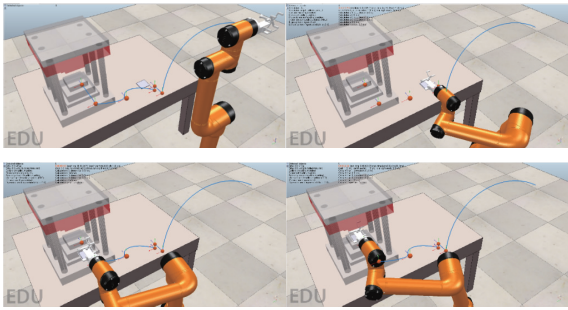


图5 AUBO-i5 装卸工件过程的运动仿真

对机械臂装卸工件于压力机内部作业过程进行无干涉路径规划后,以 0.005 s 为间隔生成总时长 25 s 并包含 5 000 路径点的运动轨迹,其中关节角度、关节角速度和关节角加速度随时间变化如图 6-图 8 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

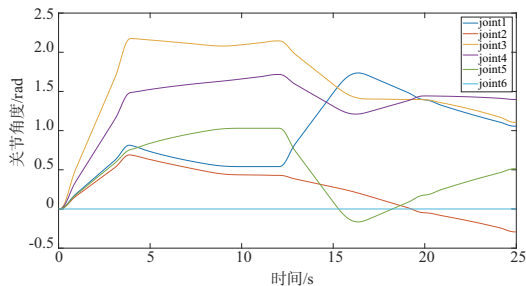


图6 关节角度随时间变化图

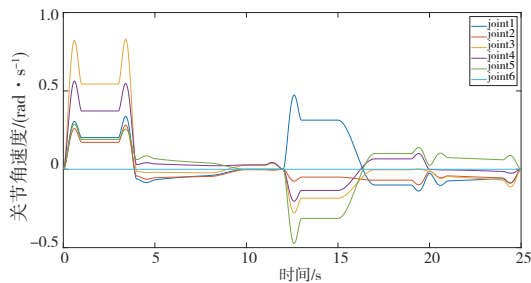


图7 关节角速度随时间变化图

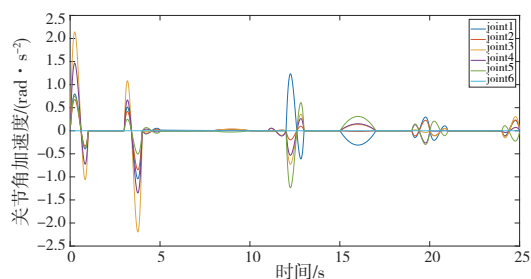


图8 关节角加速度随时间变化图

通过关节角加速度随时间变化图分析,可得知基于该运动轨迹规划的机械臂装卸工件过程平滑无冲击,满足高平稳运动的控制要求。

因压力机内部空间狭小,机械臂及末端夹具在装卸工件过程中可能会与压力机上下工作面发生干涉,因最后装

卸工件过程为直线轨迹,故只截取末端夹具最后接近压力机的位姿图,沿各主轴作投影图,如图 9 所示。投影图表明该轨迹规划正确无干涉,且 V-REP 仿真过程中同时开启碰撞检测和最小距离模块,实时仿真 AUBO-i5 虚拟样机及末端夹具和压力机及其他工件之间的干涉以及最小距离,在 25 s 完整仿真过程中,经软件检测,无碰撞且最小距离 > 0.004 m。

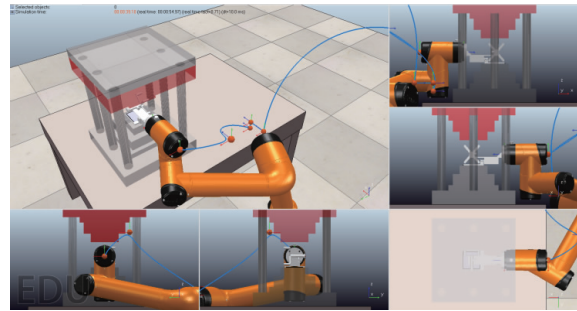


图9 压力机内部沿各主轴投影图

3.4 机器人轨迹运动实验

为验证上述生成的运动轨迹在真实机器人装卸工件作业中平稳且无干涉,搭建实验平台,通过机器人内部自带的 C 语言 SDK 库直接对机器人进行点位控制,通过 rs_enter_tcp2canbus_mode 函数进入驱动器 CAN 直接通信模式,再使用 rs_set_waypoints_to_canbus 函数将上节在 MATLAB 中生成的平稳无干涉的装卸路径加载到机器人路径缓冲区,驱动机器人沿规划路径运行,完成全部装卸工件过程。通过 rs_setcallback_realtime_joint_status 实时反馈各个关节速度,最终获得真实机器人和仿真关节角度两者误差随时间变化,如图 10 所示。

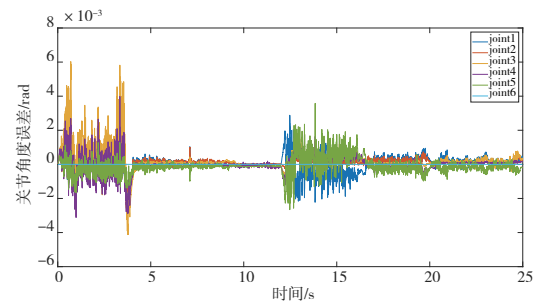


图10 真实运动与仿真关节角度误差图

经过对图 8 和图 10 进行联合分析,可以看出真实机器人运行和 V-REP 软件仿真关节误差值与各个关节瞬时角加速度呈现正相关性。对以上 25 s 运动路径误差数据进行处理,各个关节轴误差最大分别为 {0.165, 0.094, 0.346, 0.226, 0.205, 0.000} (°)。可见在 V-REP 仿真中高度还原了真实机器人各个关节在实际运行过程中的运动情况,验证了仿真方法的正确、有效。

4 结语

本文选取某公司生产的 AUBO-i5 协作机械臂为研究

对象,采用UG对机械臂以及末端夹具进行三维建模,通过对该6轴机械臂的运动学分析,建立正逆运动学公式,通过MATLAB搭建了运动学仿真模型以及编写其正逆解函数,并在V-REP中建立了虚拟样机,以用于工件装卸过程的仿真。采用MATLAB编写基于五次多项式插值过渡的线性函数对装卸工件过程进行轨迹规划,以此达到高平稳的运动控制,并通过远程API方式与V-REP建立通信进行运动仿真和碰撞检测。仿真结果表明:以上方法能够生成平滑无干涉的机器人工件装卸轨迹,并通过仿真的无干涉轨迹驱动实体机器人。经过对比实物机器人和软件仿真两者关节角度的实时误差,结果显示各个关节角度误差均 $<0.35^\circ$,说明软件仿真能高度还原真实机器人的实际运动情况,最终验证了MATLAB和V-REP联合仿真方法有效。

参考文献:

- [1] 熊有伦,丁汉,刘恩沧. 机器人学[M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [2] 刘佩森,靳杏子,郑翔鹏,等. 基于ADAMS的工业机器人建模与动力学仿真[J]. 成都工业学院学报,2018,21(4):10-13,59.

- [3] 李大明,饶炜,胡成威,等. 空间站机械臂关键技术研究[J]. 载人航天,2014,20(3):238-242.
- [4] JORGENSEN G, BAINS E. SRMS history, evolution and lessons learned[C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Long Beach, California. Reston, Virginia:AIAA,2011.
- [5] 左富勇,胡小平,谢珂,等. 基于MATLAB Robotics工具箱的SCARA机器人轨迹规划与仿真[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2012,27(2):41-44.
- [6] 伍婷婷. 五轴喷涂机器人运动控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [7] HARTENBERG R S, DENAVIT J. Kinematic synthesis of linkages[EB/OL]. (1964-06-12)[2020-11-10] https://www.researchgate.net/publication/37123219_Kinematic_Synthesis_of_Linkages.
- [8] CRAIG J J. Introduction to robotics mechanics & control[EB/OL]. (1989-06-15)[2021-11-10] https://www.researchgate.net/publication/220695644_Introduction_To_Robotics_Mechanics_Control.

收稿日期:2020-12-01

(上接第100页)

度最低,材料在受到前刀面的挤压作用时,界面层首先达到最大断裂能而被破坏,之后裂纹开始向两侧扩展。不同的是,在无超声的作用时,由于材料受到的轴向力较大,因此横向裂纹与中位裂纹的扩展长度更长,并最终与表面裂纹交汇,使得该区域的基体以细小碎块的形式被去除。

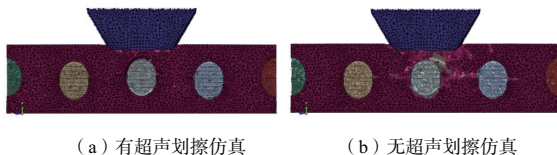


图8 基体内部裂纹扩展过程

4 结语

1)基于有限元分析软件ABAQUS建立了单颗金刚石磨粒划擦三维编织结构C/SiC复合材料有限元分析模型,以及C纤维、SiC陶瓷基体及界面层的几何模型与本构模型的建立,对仿真结果与试验结果的划擦力进行比较,轴向力误差值为8.9%,切向力误差值为11.2%,验证了该仿真模型的合理性与准确性。

2)从试验结果中可以看出,超声作用能够降低磨削力,轴向力最大降幅为31.8%,且随着切深的增大,降幅呈现逐渐减小的趋势。从仿真结果中可以看出,材料在超声的作用下,基体与纤维中裂纹的扩展长度较短,磨削力较小。

参考文献:

- [1] 刘艳,郑景珍,陈阿娣,等. C/SiC复合材料超声振动加工切削

- 力单因素试验研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(6):35-37,99.
- [2] 王巍,孙会来,赵方方,等. CFRP制孔三维仿真和试验研究[J]. 工具技术,2017,51(7):63-66.
- [3] 丁凯,傅玉灿,苏宏华,等. C/SiC复合材料钻削工具载荷及磨损研究[J]. 工具技术,2016,50(7):15-19.
- [4] 薛建刚,高希光,方光武,等. 2.5D C/SiC复合材料连续损伤本构模型[J]. 复合材料学报,2016,33(3):606-612.
- [5] 李中铨,任成祖,吕哲,等. 单颗粒金刚石平面磨削C/SiC复合材料的有限元仿真[J]. 材料科学与工程学报,2014,32(5):686-689,715.
- [6] 路冬,蔡力钢,程强,等. 碳纤维增强复合材料超声振动辅助车削有限元仿真[J]. 振动与冲击,2015,34(14):110-114,122.
- [7] 陈斌斌. 超声振动磨削CFRP裂纹控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [8] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GERLACH C A. An improved computational constitutive model for glass [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences,2017,375(2085):20160182.
- [9] ZHANG D, ZHAO L G, ROY A. Mechanical behavior of silicon carbide under static and dynamic compression [J]. Journal of Engineering Materials and Technology,2019,141(1):011007.
- [10] MI Y, CRISFIELD M A, DAVIES G A O, et al. Progressive delamination using interface elements[J]. Journal of Composite Materials,1998,32(14):1246-1272.
- [11] Dassault Systemes Simulia Corp. Abaqus Analysis User Guide [Z]. Providence: Dassault Systemes Simulia Corp,2014.

收稿日期:2020-12-08