

C_f/SiC 复合材料铣削加工过程仿真分析及试验研究

吴逸宇,赵国龙,李亮,毛东辰,雷梦勇,把圣伟,李晗

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对C_f/SiC复合材料铣削加工过程中刀具磨损快、加工效率低、加工工艺优化试验成本高等问题,开展C_f/SiC复合材料三维铣削仿真分析及试验研究。基于ABAQUS软件建立C_f/SiC复合材料三维铣削加工仿真有限元模型,预测加工过程中的铣削力,通过试验验证该模型的正确性。对比仿真预测的理论值和试验测得的实际值发现二者的平均误差仅为15%,所获取的一组较优的加工参数为C_f/SiC复合材料铣削加工参数优化提供了理论依据。

关键词:C_f/SiC复合材料;铣削加工;有限元模型;参数优化

中图分类号:TG54;TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0077-04

Simulation Analysis and Experimental Study on Milling Process of C_f/SiC Composites

WU Yiyu, ZHAO Guolong, LI Liang, MAO Dongchen, LEI Mengyong, BA Shengwei, LI Han

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Simulation analysis and experimental study on the three-dimension milling of C_f/SiC composites are carried out to tackle the problems of rapid tool wear, low machining efficiency and high cost of optimization tests in the milling process. Based on ABAQUS, a finite element model for simulating the 3D milling of C_f/SiC composites is established to predict the cutting force in process, and its validity is verified by experiments. According to the comparison between the theoretical value predicted through simulation and actual value measured by experiments, it is found that the mean error between two values is only 15%, and a set of good milling parameters provides theoretical basis for the optimization of processing parameters of C_f/SiC composites milling.

Keywords: C_f/SiC composites; milling; finite element model; parameter optimization

0 引言

纤维增强陶瓷基复合材料是在陶瓷基体相中加入连续的纤维作为增强相而形成的一种多相材料,该类材料综合了纤维优越的力学性能和陶瓷所具备的物理化学性能,以连续纤维作为增强相有效提高了陶瓷材料的韧性。纤维增强陶瓷基复合材料具有高比强度、高比模量、低比重、低热膨胀系数、优良热力学性能和抗热震冲击性能、耐烧蚀及耐磨损等优良性能,是目前用于空天装备主要热端部件的新型高温结构材料之一^[1]。虽然目前多数C_f/SiC复合材料构件可以通过净尺寸预成形技术直接制备获得,但是预成形工艺无法制备一些复杂结构的C_f/SiC复合材料零部件,而且预成形技术很难达到某些零部件的表面质量和尺寸形状精度的要求^[2]。在实际生产和应用过程中,不可避免地需要对C_f/SiC复合材料进行二次加工。然而,C_f/SiC复合材料是一种典型的难加工材料,具有非均质、硬度高、脆性大且力学性能各向异性等特点,加工过程中易导致刀具磨损快,加工表面缺陷多等问题。针对各行业对C_f/SiC复合材料结构件高质量、高效加工的需求,如何提高C_f/SiC复合材料加工质量和加工效率十分关键。

加工过程仿真模型预测可以为加工过程工艺优化提

供指导作用,从而有效地降低研究成本。与传统金属材料不同,碳纤维增强复合材料具有各向异性且非均质性,在加工过程中,其成屑机理与纤维/基体断裂损伤模式受纤维铺层角、纤维体积含量及刀具几何角度影响,切屑去除以压缩剪切、弯曲剪切、纤维/基体界面脱粘及纤维断裂为主^[3]。故而在进行碳纤维增强复合材料仿真时,需结合其自身的材料特性以及实际的切削机理进行预测分析。在宏观建模方面,李巾锭^[4]利用ABAQUS有限元分析软件,创建了C_f/SiC复合材料二维轴对称模型模拟纤维顶出过程,能够预测出较为准确的材料界面剪切强度。YANG Q等^[5]采用有限元模拟的方法建立了C_f/SiC复合材料的各向异性损伤演化本构模型,并应用拉伸试验的方法验证了材料在不同载荷下预测值的可靠性。薛建刚^[6]基于ANSYS的用户子程序实现了C_f/SiC复合材料损伤本构模型的调用,计算了常温下C_f/SiC复合材料拉伸、剪切以及高温下拉伸的应力-应变曲线,且预测值与实际情况较为吻合。王伟等^[7]采用Deform建立了碳纤维复合材料的本构模型和三维侧铣加工有限元模型,探究了径向切削深度对切削力、工件表面加工质量、切削温度和切屑分离情况的影响。秦旭达等^[8]采用ABAQUS建立了碳纤维增强复合材料三维铣削仿真模型,该模型在结构上采用等效均质建模,层内单元利用VUMAT子程序建立了三维Hashin

基金项目:国家自然科学基金项目(52075255);中央高校基本科研业务费专项资金项目(NT2021020)

第一作者简介:吴逸宇(1995—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为复合材料高效加工工艺研究。

起始失效准则以及损伤演化过程模型,层间采用 Cohesive 单元连接以模拟层间损伤的产生及扩展。微观建模方面,张韩斌等^[9]利用 Oliver-Pharr 的方法在细观力学层面上对不同位置压痕点的载荷位移曲线进行了分析,揭示了界面强度、界面厚度对纳米压痕过程中载荷位移曲线、材料硬度以及弹性模量的影响规律。杜翔宇^[10]基于子模型技术提出了一种多尺度计算方法,将宏观模型与微观模型相结合,从宏观和微观两个角度完成了 C_f/SiC 复合材料带孔板破坏过程的多尺度模拟预测,计算出了孔边细观结构的破坏过程和失效模式。YUAN S M 等^[11]建立了基于旋转超声加工的 C_f/SiC 复合材料侧铣削切削力模型,并用实验验证了模型的准确性。ZHANG X W 等^[12]提出了一种新的陶瓷基复合材料铣削过程中切削力的随机模型,将随机分布的碳纤维和随机加刷的刀具磨损结合起来,分别对剪切变形区、摩擦变形区和犁耕区的切削力进行建模。综上所述,诸多学者对 C_f/SiC 复合材料的力学性能、本构模型等进行了模拟预测研究,但有关于 C_f/SiC 复合材料的加工有限元仿真方面的报道则相对较少。本研究基于 ABAQUS 软件通过定义材料参数、损伤准则等建立了 C_f/SiC 复合材料铣削加工过程的有限元模型,该模型分析了切削力与切削速度、每齿进给量、铣削深度及铣削宽度等参数之间的关系,为 C_f/SiC 复合材料铣削加工过程的切削力控制以及切削参数的优化提供理论依据。

1 C_f/SiC 复合材料三维铣削仿真模型的建立

1.1 材料模型

利用 ABAQUS 软件建立 2.5D C_f/SiC 复合材料三维铣削加工仿真有限元模型,应用三维平面壳单元建立工件模型,以提高三维铣削加工仿真的可靠性和准确性。建模过程中,依托软件中的用户定义子程序接口构建 C_f/SiC 复合材料等效均质层合结构的力学模型。在 C_f/SiC 复合材料铣削加工仿真分析过程中,未将加工过程中的温度变化纳入考虑范围,故而所采用的分析步类型为显示动力学分析,而未使用温度位移耦合分析。

仿真过程中所使用的刀具材料为 PCD,密度为 $\rho = 14\ 500\ \text{kg/m}^3$,弹性模量 $E = 900\ \text{GPa}$,泊松比为 0.2。

1.2 材料失效模型

铣削加工过程中,被加工材料的应力状态会不断发生变化,其单元的刚度矩阵就需要进行实时的更新。因而,为了模拟 C_f/SiC 复合材料铣削加工过程中材料的损伤情况,需要对 C_f/SiC 复合材料的损伤准则进行定义。根据 C_f/SiC 复合材料纤维和基体本身的特征及失效方式,采用 Hashin 损伤准则作为碳纤维的失效准则,采用 Puck 准则作为 SiC 基体的失效准则^[13]。

模型中纤维所采用的失效准则为:

纤维拉伸失效准则($\sigma_{11} \geq 0$)

$$\left| \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right|^2 + \left| \frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right|^2 + \left| \frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right|^2 \geq 1 \quad (1)$$

纤维压缩失效准则($\sigma_{11} < 0$)

$$\left| \frac{\sigma_{11}}{X_C} \right|^2 \geq 1 \quad (2)$$

基体拉伸失效准则($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)

$$\left[\left(\frac{\sigma_{11}}{2X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{22}^2}{|Y_C Y_T|} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 \right] + \sigma_{22} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C} \right) = 1 \quad (3)$$

基体压缩失效准则($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)

$$\left[\left(\frac{\sigma_{11}}{2X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{22}^2}{|Y_C Y_T|} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right)^2 \right] + \sigma_{22} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C} \right) = 1 \quad (4)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{12} 、 σ_{22} 分别为分析过程中材料应积分点的应力分量; X_T 、 Y_T 表示纤维在 1、2 方向上的拉伸强度; X_C 、 Y_C 表示纤维在 1、2 方向上的抗压强度; S_{12} 、 S_{13} 表示纤维在 12、13 平面内的剪切强度。

根据碳纤维材料特性,纤维在 3 方向的拉伸强度 $Z_T = Y_T$,在 3 方向上的抗压强度 $Z_C = Y_C$,在 23 平面内的剪切强度 $S_{23} = S_{13}$ 。

仿真过程中用于材料刚度矩阵计算的碳纤维材料力学性能参数如表 1 所示^[14]。

表 1 碳纤维力学性能参数

名称	数值
1 方向弹性模量 E_1/GPa	167.00
2 方向弹性模量 E_2/GPa	9.28
3 方向弹性模量 E_3/GPa	9.28
12 平面泊松比 ν_{12}	0.34
13 平面泊松比 ν_{13}	0.34
23 平面泊松比 ν_{23}	0.45
12 平面切变模量 G_{12}/GPa	6.35
13 平面切变模量 G_{13}/GPa	6.35
23 平面切变模量 G_{23}/GPa	4.78

模型中,相邻纤维层之间采用 Cohesive 单元来模拟分层损伤及演化。Cohesive 单元的初始损伤条件为

$$\left(\frac{\sigma_1}{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{P_2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{P_3} \right)^2 = 1 \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为方向 1、2、3 方向上的应力分量; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 3 个方向上应力。

当 Cohesive 单元满足损伤初始条件的时候,单元发生损伤并产生刚度退化,从而模拟加工过程中层间单元的失效过程。

1.3 仿真模型建立

为了在实现仿真所需精度的同时,降低分析计算成本,需要对模型的建立进行合理的设计。如图 1(a)所示,创建一个三维拉伸平面壳单元模型,通过偏置网格的方式建立一个 $8\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 的工件模型。图 1(a)中所示的刀具几何模型由 SolidWorks 创建并导入 ABAQUS 中,通过对刀具模型施加边界条件来实现刀具的沿 x 负方向的进给速度以及绕 z 轴的角速度。对于材料铺层情况,模型共建立 31 层,其中 16 层为纤维层,按照 $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ]$ 的顺序自上而下依次排列,每个纤维层中间均设有厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的 Cohesive 单元过渡层。

如图 1(b)所示,为降低计算成本,提高仿真分析的效率,将工件参与切削部分进行局部撒种来加密网格,以保证计算准确性,而不参与切削的部分则采用全局布种的方式划分成较为稀疏的网格。

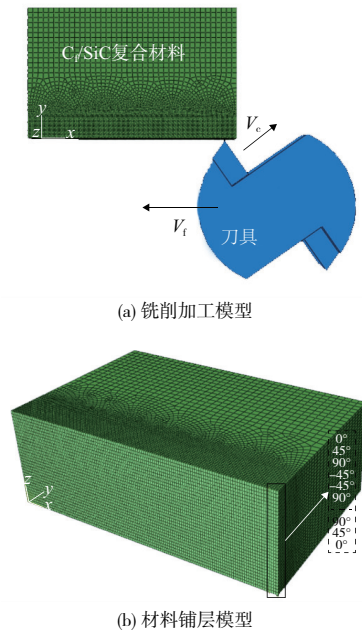


图 1 仿真模型示意图

2 铣削试验条件与方法

为了验证所建立有限元模型的正确性和可靠性,根据仿真所使用的加工参数进行铣削试验研究。铣削试验在 DMU 60 mono BLOCK 五轴立式加工中心上进行,铣削过程中通过 KISTLER 9443B 压电式三向动态测力传感器采集加工过程中的铣削力信号并输出至计算机留作后续处理。试验中所使用的刀具为 PCD 两刃直槽铣刀,直径 $d=6$ mm,刀具总长 $L=80$ mm,刀刃长 $l=12$ mm,端齿前角为 2° 、后角为 9° ,周齿前角为 1° 、后角为 12° 。

试验加工参数如表 2 所示,测量并计算各组参数的切削力。

表 2 试验参数

序号	切削速度/ (m/min)	每齿进给量/ (mm/z)	铣削深度/mm	铣削宽度/mm
1	31.4			
2	94.2	0.010	2.0	1.0
3	157.0			
4		0.005		
5	94.2	0.010	2.0	1.0
6		0.015		
7			0.5	
8	94.2	0.010	1.0	2.0
9			1.5	
10				1.0
11	94.2	0.010	1.0	2.0
12				3.0

3 结果与分析

3.1 有限元仿真模型验证

仿真及试验均采用顺铣加工的方式,铣削过程中主运动方向承受的材料变形抗力是最大的,所消耗的功也最多,因而主切削力 F_x 相对较大。而其他方向所受的材料变形抗力则相对较小, F_x 要远大于另外两个方向的铣削力,所以在后续的分析过程中仅将 x 向铣削力作为比较对象。将有限元仿真分析计算的 x 向铣削力数值与试验测量的 x 向铣削力数值进行对比,计算仿真值和试验值之间的误差如表 3 所示。

表 3 仿真值与试验值对比

序号	F_x 仿真值/N	F_x 试验值/N	误差/%
1	47.31	57.35	17.5
2	76.18	88.17	13.6
3	88.05	114.20	22.9
4	60.79	82.93	26.7
5	76.18	88.17	13.6
6	121.11	136.69	11.4
7	54.25	60.08	9.7
8	70.72	91.96	23.1
9	107.54	126.22	14.8
10	73.71	83.48	11.7
11	70.72	91.96	23.1
12	109.57	129.82	15.6

通过比较发现,有限元仿真计算出的铣削力数值略小于试验值。这可能是因为仿真分析过程中将刀具模型定义为刚体,未将刀具磨损考虑在内,也可能是因为仿真分析过程采用的是动态显示分析而不是热力耦合分析步,计算分析时忽略了切削温度的影响。而实际试验过程中,C_f/SiC 复合材料是一种极难加工的材料,材料硬度很高,与刀具产生摩擦和冲击使刀具磨损很快,且加工区域温度很高,也极易造成刀具的快速磨损,从而导致铣削力的急剧增大。因而仿真计算的数值小于试验值。通过分析表中仿真值和试验值的误差发现,试验值与仿真值的误差范围在 9.7%~26.7%,误差相对较小,从而证明了该模型对于加工参数的优化选择确实具备指导意义。

3.2 切削速度对切削力的影响

图 2 为切削速度对切削力的影响规律图。在每齿进给量、铣削深度、铣削宽度一定时,铣削力会随着切削速度的增大而增大。随着切削速度增大,刀具切削的瞬时速度变大,刀具在更短的切削瞬间去除脆性材料所需的瞬时力也变大。

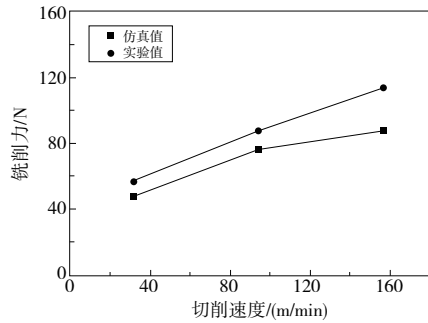


图2 不同切削速度时的铣削力
($f_z = 0.01 \text{ mm/z}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 1 \text{ mm}$)

3.3 每齿进给量对切削力的影响

图3所示为铣削力随每齿进给量变化的情况。当每齿进给量变大时,单个齿去除的材料量变多,加工过程中的切削抗力变大,从而导致铣削力会随每齿进给量的增加而增大。

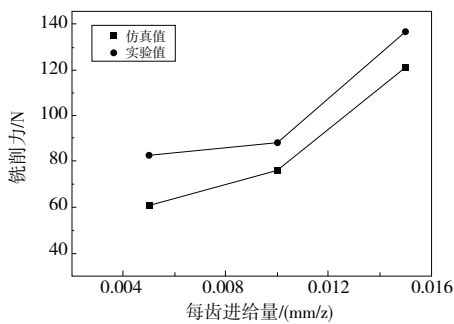


图3 不同每齿进给量时的铣削力
($v_c = 94.2 \text{ m/min}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 1 \text{ mm}$)

3.4 铣削深度和宽度对切削力的影响

如图4、图5所示,当铣削深度或铣削宽度增加时,单个齿去除的材料量增大,那么铣削过程中受到的切削变形抗力增大,从而导致铣削力随着铣削深度及铣削宽度的增大而增加。

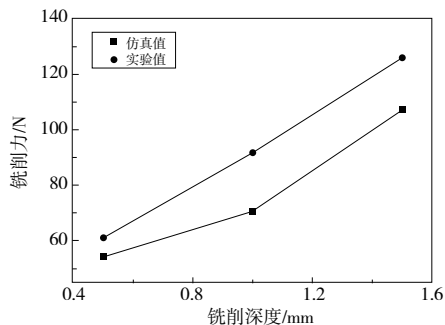


图4 不同铣削深度时的铣削力
($v_c = 94.2 \text{ m/min}$, $f_z = 0.01 \text{ mm/z}$, $a_e = 2 \text{ mm}$)

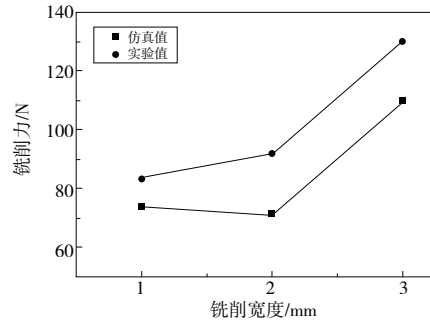


图5 不同铣削宽度时的铣削力
($v_c = 94.2 \text{ m/min}$, $f_z = 0.01 \text{ mm/z}$, $a_p = 1 \text{ mm}$)

综上所述,以高材料去除率为目标,同时考虑切削力等因素优化铣削用量,所获取的一组较优的参数为 $v_c = 94.2 \text{ m/min}$, $f_z = 0.01 \text{ mm/z}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $a_e = 2 \text{ mm}$ 。

4 结语

针对 C_f/SiC 复合材料铣削加工时刀具磨损大、加工效率低、研究成本高等问题,基于 ABAQUS 软件创建了 C_f/SiC 复合材料三维铣削加工模型,对 C_f/SiC 复合材料的铣削加工过程进行了有限元仿真及试验研究,得出以下结论。

1) 基于 ABAQUS 用户子程序接口定义 C_f/SiC 复合材料的损伤模型,创建了 C_f/SiC 复合材料三维铣削加工有限元仿真模型,为试验分析的参数优化选择提供了参考。

2) 所建立的 C_f/SiC 复合材料三维铣削加工有限元仿真模型预测的铣削力与试验结果相比,仿真值与试验值的平均误差为 15%,模型可以较为准确地为试验设计提供参考依据。

3) 以高材料去除率为目标,同时考虑切削力等因素优化铣削用量,获取了一组较优的加工参数为 $v_c = 94.2 \text{ m/min}$, $f_z = 0.01 \text{ mm/z}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $a_e = 2 \text{ mm}$ 。

参考文献:

- [1] 王林建,林有希,林华. 纤维方向对碳纤维复合材料切削加工影响综述[J]. 机械制造与自动化,2019,48(2):6-10.
- [2] WANG H J, SUN J, LI J F, et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9/10/11/12):1517-1525.
- [3] 徐锦泐,密思佩,明伟伟,等. 纤维增强复合材料切削仿真研究进展[J]. 航空制造技术,2018,61(22):16-23.
- [4] 李巾锭. C/SiC 复合材料纤维顶出有限元仿真研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [5] YANG Q, HAN X X, XU C H, et al. Development and validation of an anisotropic damage constitutive model for C/SiC composite[J]. Ceramics International, 2018, 44(18):22880-22889.
- [6] 薛建刚. 陶瓷基复合材料各向异性损伤本构模型[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [7] 王伟,王霄,袁豹,等. 基于 Deform 的碳纤维复合材料铣削过程有限元分析[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(12):7-12.

(下转第 100 页)

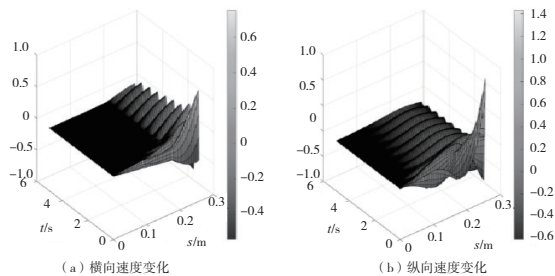


图 10 章鱼仿生臂横向、纵向速度变化

3 结语

通过力学理论和 Newton-Euler 迭代算法实现了仿生机械臂力学模型的构建和求解,并根据章鱼仿生原理设计和制作了仿生机械臂样机,最后通过实验平台对仿生机械臂动力学模型进行了试验验证。试验表明:本文构建的仿生机械臂力学模型准确性高,计算误差较小,为仿生机械臂的建模提供了一种新的建模参考。

参考文献:

- [1] 鲍官军,张亚琪,许宗贵,等. 软体机器人气压驱动结构研究综述[J]. 高技术通讯,2019,29(5):467-479.

- [2] 闵剑,刘朝雨,王江北,等. 模块化软体机器人多模式运动分析[J]. 西安交通大学学报,2020,54(3):126-133.
- [3] 李博,孙文杰,姜磊,等. 电话性双稳态机构及其在软体机器人中应用的研究进展[J]. 机械工程学报,2020,56(19):43-52.
- [4] 陈刚,邹元富,李伟,等. 面向结肠镜软体机器人设计与建模仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(12):157-162.
- [5] 林用满,管卫华,甘莉莉. 六自由度水果采摘机械臂结构设计与试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(2):62-71.
- [6] 尹顺禹,许艺,岑诺,等. 软体智能机器人的系统设计与力学建模[J]. 力学进展,2020,50(0):195-220.
- [7] 董虎,林苗,顾苏程,等. 多向气动驱动器软体仿生舌弯曲状态的研究[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(9):1882-1893.
- [8] 郭亚星,郑继贵,侍威,等. 基于绳索欠驱动连续型机械臂设计及仿真[J]. 导弹与航天运载技术,2021(2):92-96.
- [9] 吴扬,吴胜同,裘旭冬,等. 基于 Simcenter3D 的舱门刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):129-131.
- [10] 李冰玉,阚子云,彭海军,等. 基于张拉整体结构的连续型弯曲机械臂设计与研究[J]. 机器人,2020,42(6):686-696.

收稿日期:2021-10-08

(上接第 80 页)

- [8] 秦旭达,唐心凯,葛恩德,等. CFRP 三维铣削仿真模型的建立及层间损伤分析[J]. 宇航材料工艺,2020,50(1):22-29.
- [9] 张韩斌,任成祖,张立峰,等. C/SiC 复合材料纳米压痕有限元仿真[J]. 材料科学与工程学报,2016,34(1):49-53,74.
- [10] 杜翔宇. 2.5 维编织 C/SiC 复合材料含孔连接结构破坏的多尺度模拟[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [11] YUAN S M, FAN H T, AMIN M, et al. A cutting force prediction dynamic model for side milling of ceramic matrix composites C/SiC based on rotary ultrasonic machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,86(1/2/3/4):37-48.
- [12] ZHANG X W, YU T B, ZHAO J. An analytical approach on

stochastic model for cutting force prediction in milling ceramic matrix composites [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020,168:105314.

- [13] CEPERO-MEJÍAS F, CURIEL-SOSA J L, BLÁZQUEZ A, et al. Review of recent developments and induced damage assessment in the modelling of the machining of long fibre reinforced polymer composites[J]. Composite Structures, 2020,240:112006.
- [14] 张勋,陈燕,徐九华,等. 大直径碳纤维复合材料三维铣削有限元仿真及试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2020,40(2):53-60.

收稿日期:2021-10-29

(上接第 95 页)

7 结语

通过对工业机器人实训平台模块化可重构软件系统的研究,构建了各模块间的知识库和知识表达形式,完成所有模块的参数化定义。同时,研究并构建了功能模块快速重构的流程和算法,并在 Visual Studio 平台上完成了重构算法程序的运行测试,积累了实训平台软件系统的设计和实测数据。针对实训平台模块化可重构软件系统的设计不足之处,明确了后续优化方向,为实现工业机器人实训平台的快速重构功能提供技术基础。

参考文献:

- [1] 周杰,孙可儿,江源,等. 可重构模块化机器人与教育产业的融合发展探索[J]. 中国市场,2020(31):71-72.
- [2] ZADEH L A. Similarity relations and fuzzy orderings [J].

Information Sciences, 1971,3(2):177-200.

- [3] 张尧,吴成茂,白鹭. 基于特征选取的局部模糊聚类算法研究[J]. 光电技术应用,2021,36(3):35-42.
- [4] 黄康,陈祥,朱晓慧,等. 基于知识重用的模块化快速重组方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(7):880-886.
- [5] 王晓兵. 机械产品模块化设计策略[J]. 内燃机与配件,2021(7):194-195.
- [6] 安燕霞,曲秀秀,吕天波. 军用航空发动机 IETM 数据模块编码规则研究[J]. 航空维修与工程,2021(5):26-29.
- [7] SU X Y, MAHADEVAN S, XU P D, et al. Dependence assessment in human reliability analysis using evidence theory and AHP [J]. Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis, 2015,35(7):1296-1316.
- [8] 朱二周,孙悦,张远翔,等. 一种采用新型聚类方法的最佳类簇数确定算法[J]. 软件学报,2021,32(10):3085-3103.

收稿日期:2021-11-03