

# 航空结构件典型特征的虚拟高性能加工研究<sup>\*</sup>

彭小敢, 李 亮, 郝秀清, 郭月龙, 黄志平

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 航空整体结构件由不同的典型特征构成, 对整体结构件加工性能的研究, 可以通过分别对典型结构特征的加工性能进行研究, 然后再组合特征进行特征关联研究的方法实现。虚拟加工是研究切削加工过程的重要仿真方法。在虚拟环境下构建由典型特征组合而成的被加工零件, 然后分别应用大进给铣削和大切深铣削两种高性能加工策略进行加工仿真试验。试验结果显示: 大进给铣削策略下的主切削力、切削功率和材料去除率明显小于大切深铣削策略下的, 并且大进给铣削策略下的比能耗在转角特征处出现明显的突变点。分析发现, 由于在转角特征处频繁升降进给速度, 使得大进给铣削策略下的材料去除率与理论值出现较大偏差。

**关键词:** 航空结构件; 典型特征; 虚拟加工; 高性能加工; VERICUT

## Virtual High Performance Machining of Typical Features of Aerospace Structures

PENG Xiaogan, LI Liang, HAO Xiuqing, GUO Yuelong, HUANG Zhiping

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

**[ABSTRACT]** Aerospace monolithic component was composed of different typical characteristics, the research on the machining properties of the monolithic component can be implemented by studying the machining properties of typical structure characteristics, respectively, and then combining characteristics to study the correlation of characteristics. Virtual machining is an important simulation method to study the machining process. In this paper, the machined part, which was made up of typical features, was constructed in virtual environment. The two high performance machining strategies of high feed milling and high cutting depth milling were applied to machining simulation experiments, respectively. The experimental results show that the main cutting force, cutting power and material removal rate under high feed milling strategy are obviously less than that of high cutting depth milling strategy, and the specific energy consumption of high feed milling strategy has obvious mutation point at the corner characteristic. It is found that the material removal rate of high feed milling strategy has a large deviation from the theoretical value due to the frequently up and down of the feed speed at the corner characteristics.

**Keywords:** Aerospace structure; Typical characteristic; Virtual machining; High performance machining; VERICUT

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.092

随着飞机性能要求的提高, 飞机结构件大量采用整体化设计, 这使得单个结构件的尺寸越来越大, 集成的功能特征越来越多, 结构也越来越复杂<sup>[1]</sup>。材料加工去除率通常在 90% 以上, 加工耗时较长。为提高加工效率和质量, 需要对整体结构件的加工性能进行研究, 制定适当的加工策略。虽然不同的整体结构件的结构形式各不相同, 但其均由一些典型特征构成, 主要典型特征有: 封闭槽腔、开口槽腔、底角与转角、三角小槽腔与

锐角、型面等。因此, 对整体结构件加工性能研究可通过先分别对典型结构特征的加工性能进行研究, 然后再组合特征进行特征关联研究, 最后由这些典型特征及特征关联构建整体结构件, 得出整体结构件加工特性, 实现整体结构件高效和可靠加工。

进入 21 世纪, 高性能切削加工及其主要支撑技术——虚拟数控加工技术成为数控切削加工领域学者和工程师们关注的新热点<sup>[2]</sup>。虚拟加工技术基于计算机仿真技术和虚拟现实技术实现产品的数字化加工过程的仿真, 评价设计零件的可加工性, 并检验数控加工工艺的科学性<sup>[3]</sup>。虚拟加工过程耗时较少, 可重构性较

<sup>\*</sup> 基金项目: “高档数控机床与基础制造装备” 科技重大专项 (2014ZX04012-014)。

好,可视性较好,成本较低。通过使用虚拟加工系统,可以减少材料的浪费,并避免对车间机床正常加工生产活动的干扰<sup>[4]</sup>。此外,数字化虚拟集成制造系统允许加工操作在虚拟环境中进行模拟和优化<sup>[5]</sup>。应用商业化数字控制系统,可以实现预测精度在95%以内的零件加工周期的虚拟预测<sup>[6]</sup>。因此,虚拟加工技术在实际生产加工中的应用越来越广。通过虚拟加工技术可消除加工刀具与工件及夹具之间的干涉现象,消除工件和夹具与机床之间的碰撞现象,优化刀具路径,还可估算切削力和切削功率,使加工策略与机床和刀具等设备工具相匹配,充分发挥加工策略和设备工具的优势,使切削加工处于高性能加工模式,提高加工效率。

VERICUT是一款数控加工仿真软件,能够实现数控加工程序验证、机床模拟和程序优化等<sup>[7]</sup>,广泛应用于航空、汽车等领域。大进给切削加工和大切深切削加工是两种典型的高性能切削加工技术。本文在VERICUT环境下,以具有典型航空结构件特征——封闭槽腔和开口槽腔的零件为被加工对象。分别运用大进给铣削和大切深铣削进行虚拟切削加工仿真试验,并依据仿真试验结果对两种高性能加工策略下的主切削力、切削功率、材料去除率和比能耗进行对比分析,探讨两种高性能加工策略的加工优势。

## 1 仿真试验方案

### 1.1 被加工零件建模

在NX环境下,构建由封闭槽腔和开口槽腔为主要特征的被加工零件,如图1所示。该零件包含有5个半径为15mm转角特征和一个半径为30mm转角特征,最大轮廓尺寸为200mm×120mm×60mm,壁厚为5mm,通过对实体毛坯进行型腔铣削的加工方式加工出该零件,材料去除率为75.6%。工件材料设定为Ti6Al4V。

### 1.2 试验方案

在虚拟加工试验中,虚拟机床选用三轴立式数控铣床,刀具选用硬质合金涂层立铣刀,使用虚拟平口虎钳作夹具,分别采用大进给铣削和大切深铣削加工策略进行虚拟高性能切削加工试验。试验中选定的刀具尺寸

和初始切削参数,如表1所示<sup>[8]</sup>。

### 1.3 虚拟加工试验体系的构建

在VERICUT环境下,选用三轴立式数控铣床为加工设备,数控系统选用Siemens 840D,数控程序选用由NX软件CAM生成的加工程序。工件毛坯装夹在平口虎钳上。切削加工仿真状态如图2所示。

两种高性能加工策略下的切削加工仿真试验均采用先加工开口槽腔,后加工封闭槽腔的加工顺序,每个槽腔均采用分层顺序铣削的进刀方式,加工中刀具由毛坯内部向外部环形走刀。详细刀具轨迹如图3所示。

## 2 试验结果与讨论

仿真试验结束后,通过使用VERICUT力模块,分别将大进给铣削和大切深铣削两种加工策略下切削过程中的主切削力、功率等数据导出。并利用MATLAB对导出的部分主切削力、功率等数据进行处理后得到数据对比曲线图,由于两种策略下数据的采样频率不同,

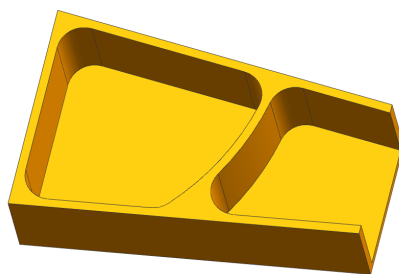


图1 构建的虚拟零件

Fig.1 Virtual workpiece

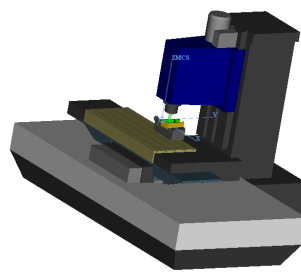


图2 虚拟加工状态

Fig.2 Virtual machining state

表1 试验初始参数

Table 1 Initial parameters of test

加工方式	直径 $d$ / mm	齿数 $N$	切削速度 $V_f$ / ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	转速 $n$ / ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	进给速度 $V_f$ / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	每齿进给量 $f_t$ / ( $\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$ )	轴向切深 $a$ / mm	径向切深 $B$ / mm
大进给铣削	25	3	100	1273	3819	1	0.7	12.5
大切深铣削	30	4	37.7	400	80	0.05	20	10

曲线图仅用于直观表达整体趋势和对比讨论两种策略下切削过程量的优劣。

### 2.1 主切削力对比分析

通过图 4 可以看到,大切深铣削时主切削力明显大于大进给铣削时。由于数理统计中,均值和方差用来刻画随机过程各个孤立统计特性的重要数字特征。标准差是方差的算术平方根,能反映一个数据集的离散程度。因此,本文选用两种加工策略下主切削力数据的均值和标准差进行对比分析。使用 MATLAB 软件计算得:大切深铣削时主切削力的均值为 1720N,标准差为 723.5N;大进给铣削时主切削力的均值为 324.8N,标准差为 143N。大切深铣削时主切削力均值是大进给铣削时主切削力均值的 5.3 倍,所以大切深铣削时,要求刀具和主轴具有较高的刚性。即在同等条件下,大切深铣削时刀具的直径应较大。这样对于一些细节部位,如较小的转角部位就不能很好地切除,留量较大,需要后续设置专门工序进一步加工,增加工序直接影响刀具的配置和加工效率。此外,大切深铣削时主切削力的标准差是大进给铣削时主切削力标准差的 5 倍,所以大切深铣削时主切削力变化范围较大,同时也意味着刀具和工件承受的交变冲击载荷较高,从而易于激发切削加工振动,造成切削加工过程的平稳性较差。因此,在加工中大进给铣削相比大切深铣削更具有优势。

### 2.2 切削功率对比分析

由图 5 可以明显看到:大切深铣削功率远大于大进给铣削功率。这与生产经验相符合。使用 MATLAB 软件计算两种加工策略下切削功率数据的均值和标准差:大切深铣削时功率的均值为 1.11kW,标准差为 0.51kW;大进给铣削时功率的均值为 0.5kW,标准差为 0.22kW。大切深铣削时功率的均值是大进给铣削时功率均值的 2.2 倍。对比标准差,大切深铣削时功率数据的离散程度更大,即功率变化范围更大,这与主切削力变化的趋势一致。切削功率使材料发生塑性变形和克服切屑与前刀面之间的摩擦,最终绝大部分能量转变成热能,由此产生切削热。切削热直接影响刀具的磨损和使用寿命<sup>[9]</sup>。因此,大切深铣削策略对刀具性能要求更高。此外,切削功率还与机床的选用相关,在实际生产中通常需要估算切削功率来配套加工机床,当前节能减排和绿色制造等理念已被普遍接受,因此配套机床即要预防“小马拉大车”,同时更要避免“大马拉小车”。虚拟加工为实际生产中机床的选配提供了很好的参照数据。

### 2.3 材料去除率对比分析

在稳定切削条件下,材料去除率计算表达式<sup>[10]</sup>:

$$MRR = aBnNf_i \quad (1)$$

式中,  $MRR$  为材料去除率,  $a$  为轴向切深,  $B$  为径向切深,  $n$  为主轴转速,  $N$  为铣刀齿数,  $f_i$  为每齿进给量。

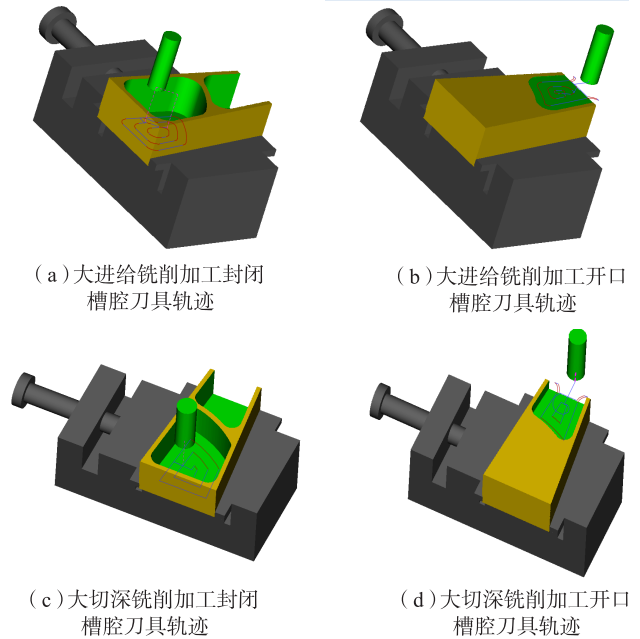


图3 仿真试验刀具轨迹图

Fig.3 Tool trajectory diagram of simulation experiment

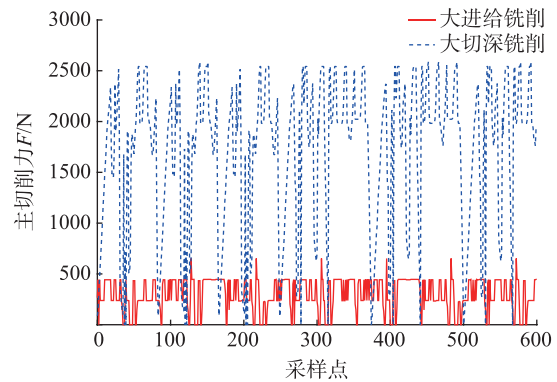


图4 两种加工策略的主切削力对比

Fig.4 Comparison of main cutting forces of two machining strategies

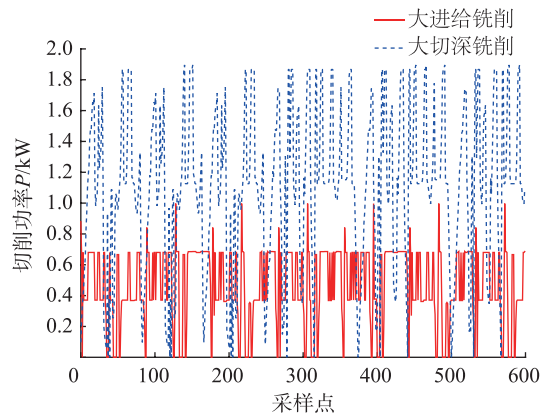


图5 两种加工策略的切削功率对比

Fig.5 Comparison of cutting power of two machining strategies

将表1中的参数代入式(1)可分别计算出理想状态下,大进给铣削的材料去除率为 $33.42\text{cm}^3/\text{min}$ ,大切深铣削的材料去除率为 $16\text{cm}^3/\text{min}$ 。大进给铣削的材料去除率要高于大切深铣削,由此推测,大进给铣削的加工效率要高于大切深铣削。然而本文仿真试验结果显示:大进给铣削的材料去除率为 $12.1\text{cm}^3/\text{min}$ ,大切深铣削的材料去除率为 $6.2\text{cm}^3/\text{min}$ 。大切深铣削时的加工效率要高于大进给铣削时。这与基于理想状态下理论计算值的推测存在较大差异。理论计算是在恒定切削条件下的一种估算。然而实际生产加工中,工件的结构特征对加工策略具有制约作用。进一步分析切削加工仿真过程可以发现:大切深铣削时,进给速度能保持在 $80\text{mm}/\text{min}$ ;而大进给铣削时,在工件转角特征处进给速度大幅下降,致使进给速度在 $739\sim 3819\text{mm}/\text{min}$ 之间不断变化,这与实际的加工状态比较符合。所以在本试验中,大切深铣削的加工效率相比大进给铣削更具有优势。由此可得,要依据工件的结构特征制定相应的加工策略,否则不能发挥加工策略的优势。

#### 2.4 比能耗对比分析

比能耗是一种从加工有效输入和输出的角度描述能量效率水平的一种方法,它的数值通常是用来估计的加工过程中的能耗。因此,从某种角度看,比能耗也是一种能耗模型。比能耗可以通过以下公式计算<sup>[11]</sup>:

$$\text{SEC} = \frac{P}{\text{MRR}} \quad (2)$$

式中,SEC为比能耗, $P$ 为加工输入功率,MRR为材料去除率。

在本文试验中采取简化措施,将公式(2)中的加工输入功率 $P$ 用切削功率代替,通过计算得到:大进给铣削与大切深铣削加工过程的比能耗均值之比约为1。这与上文对切削功率和材料去除率分析计算结果相一致。由图6可以发现,不论是大切深铣削策略还是大切深铣削策略,比能耗都具有明显的周期性。这与在仿真中采用层铣策略特征相一致。此外,可明显看到大进给

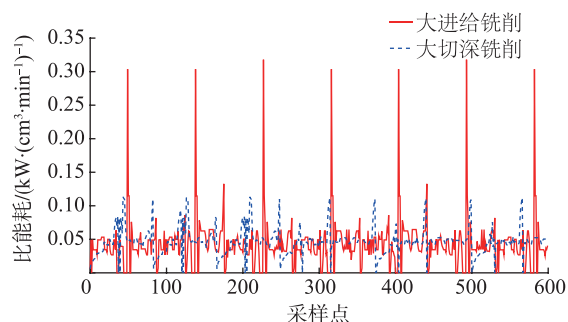


图6 两种加工策略的比能耗对比

Fig.6 Comparison of specific energy consumption of two machining strategies

铣削策略加工时,比能耗存在若干突变点。分析切削加工仿真过程发现,这些突变点出现在铣削转角特征加工时。由此可得,大进给铣削策略在转角特征加工时不具有高性能加工的优势。

### 3 结论

在虚拟环境下构建由航空结构件的典型特征封闭槽腔和开口槽腔组合而成的零件,并对该零件运用大进给和大切深两种高性能加工技术进行虚拟切削加工仿真试验。通过对试验分析研究表明:

(1)采用大进给铣削策略时主切削力和切削功率明显小于采用大切深铣削策略时。这与两种高性能加工策略的特征相一致。

(2)采用大进给铣削策略时材料去除率明显小于采用大切深铣削策略时。分析发现大进给铣削策略下,随着加工进程中零件特征的变化,刀具进给速度呈现大幅增减变化。可见工件的结构特征对加工策略具有制约作用。

(3)采用大进给铣削策略和大切深铣削策略的比能耗相当,但是大进给铣削策略下在转角特征处出现明显的突变点。

#### 参考文献

- [1] 牟文平,隋少春,李迎光.飞机结构件智能数控技术研究现状加工关键[J].航空制造技术,2015,58(13):56-59.  
MOU Wenping, SUI Shaochun, LI Yingguang. Key technology for intelligent NC machining of aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 56-59.
- [2] 刘强.高性能数控机床与虚拟数控加工[J].航空制造技术,2008,51(17):32-35.  
LIU Qiang. High performance machine tool and virtual CNC machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(17): 32-35.
- [3] 徐建国,张谓,张友良,等.虚拟加工环境建模及实现技术[J].系统仿真学报,2007,19(13):2972-2975,2998.  
XU Jianguo, ZHANG Xu, ZHANG Youliang, et al. Research on the modeling and implementation technology of virtual machining environment[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(13): 2972-2975, 2998.
- [4] ABDUL K A, XU X, HÄMMERLE E. Virtual machine tools and virtual machining—a technological review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 494-508.
- [5] ALTINTAS Y. Virtual high performance machining[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 372-378.
- [6] ALTINTAS Y, TULSYAN S. Prediction of part machining cycle times via virtual CNC[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 361-364.

(下接第101页)

[4] ZHAO L Z, ZHANG Y H, WU X H, et al. Virtual assembly simulation and ergonomics analysis for the industrial manipulator based on DELMIA[C]//Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Paris: Atlantis Press, 2016.

[5] GAO Y J, WEI X B, MA B F, et al. Ergonomic simulation and optimization during the body assembly[C]//Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Berlin: Springer: 1419–1427.

[6] 柴春雷, 黄琦, 董占勋, 等. 面向家电产品的人机工程分析与评价系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 580–584.

CHAI Chunlei, HUANG Qi, DONG Zhanxun, et al. Ergonomic analysis and evaluation system for home appliance product[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4): 580–584.

[7] 洪涛, 王申康. 人体正面运动的尺度骨架模型初始化算法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(12): 1585–1588.

HONG Tao, WANG Shenkang. The study on the initial algorithm of the scale skeleton model of the human body positive movement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(12): 1585–1588.

[8] YANG M, YIN M D. Ergonomics simulation and application in virtual assembly based on DELMIA[J/OL]. Agricultural Development & Equipments, 2009. [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-NJJY200907005.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-NJJY200907005.htm)

[9] 王巍, 高雪松, 穆志国, 等. 人机工程仿真技术在飞机零组件装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 92–96.

WANG Wei, GAO Xuesong, MU Zhiguo, et al. Application of man-machine engineering simulation technology in aircraft component assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 92–96.

[10] 郝天峰, 贾晓亮. 面向 PLM 的飞机虚拟协同维修性分析及评价[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 80–85.

HAO Tianfeng, JIA Xiaoliang. Analysis and evaluation of virtual co-maintenance of aircraft for PLM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 80–85.

[11] 曾毅, 尚建忠, 曹玉君, 等. 维修性设计中的可视性评价方法研究[J]. 工程图学学报, 2009, 30(1): 70–74.

ZENG Yi, SHANG Jianzhong, CAO Yujun, et al. Study on the method of visibility evaluation in maintainability design[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(1): 70–74.

通讯作者: 张永建, 硕士、助理工程师, 研究方向为飞机数字装配技术, E-mail: zyj\_harry@163.com。

(责编 逸飞)

(上接第91页)

[6] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. S形进气道纤维铺放轨迹规划和优化方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 855–861.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Path planning and optimization algorithm for fiber placement of S-shaped inlet[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 855–861.

[7] 王显峰, 富宏亚, 韩振宇. 复杂形体面片缠绕成型方法的分析与实现[J]. 宇航材料工艺, 2006, 36(6): 39–41.

WANG Xianfeng, FU Hongya, HAN Zhenyu. Analysis and realization of patch winding method for complex form[J]. Aerospace Material & Technology, 2006, 36(6): 39–41.

[8] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现[J]. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(5): 613–616.

DANG Xudan, XIAO Jun, HUAN Dajun. Implementation on fiber placement parallel equidistant path generation algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2007, 53(5): 613–616.

[9] 林福建. 自动铺丝束成型的关键技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(3): 25–26.

LIN Fujian. The key technology about automatic fiber placement[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(3): 25–26.

[10] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇. 纤维铺放轨迹规划的两种方法及其比较研究[J]. 材料工程, 2009(S2): 349–353.

SHAO Zhongxi, FU Hongya, HAN Zhenyu. Comparative study on two methods of fiber placement path planning[J]. Material Engineering, 2009(S2): 349–353.

通讯作者: 马志涛, 高级工程师, 研究方向为数控机床、复合材料构件成型、航空专用装备等, E-mail: 808s@sina.com。

(责编 逸飞)

(上接第95页)

[7] 杨胜群. VERICUT 数控加工仿真技术[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 1–18.

YANG Shengqun. VERICUT numerical control machining simulation technology [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 1–18.

[8] 史琦. TC21 钛合金高性能铣削工艺基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI Qi. Research on high performance milling of titanium alloy TC21[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[9] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 38–50.

HE Ning. High speed cutting technology[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012: 38–50.

[10] 汤爱君, 刘战强. 铣削加工系统三维稳定性理论研究与发展[J]. 工具技术, 2008, 42(5): 3–5.

TANG Aijun, LIU Zhanqiang. Perspectives and progress in three-dimensional stability lobes in milling chatter system[J]. Tool Engineering, 2008, 42(5): 3–5.

[11] ZHOU L R, LI J F, LI F Y, et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3721–3734.

通讯作者: 李亮, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为高速、高效切削加工, E-mail: liliang@nuaa.edu.cn。

(责编 大漠)