

基于刀具偏离量控制的刀轴矢量规划算法

闵莉,王野,耿聪,宋航远

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为提高五轴数控加工中的加工质量,从刀具偏离量的角度对刀轴矢量进行优化,减小由于切削力所引起的刀具变形产生的误差。方法 利用悬臂梁和变形叠加理论,对静态柔度进行优化;采用微元法计算刀具切削力的大小,并建立基于刀具偏离量的刀轴矢量控制模型及算法。结果 刀轴矢量经过优化后,刀具的偏离量和表面加工误差与优化前相比分别降低了25.2%、22%,都得到了有效控制。结论 笔者所提算法能够有效地抑制由于刀具偏斜引起的表面加工误差,从而获得更高的加工精度。

关键词 五轴数控;刀轴矢量;瞬时静态柔度;刀具偏离量

中图分类号 TH16;TG506 文献标志码 A

Tool Orientation Planning Algorithm Based on Cutter Deflection

MIN Li, WANG Ye, GENG Cong, SONG Hangyuan

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In five-axis CNC machining, in order to improve the quality of processing and reduce the error caused by tool deformation and cutting force, the tool axis vector is optimized from the perspective of tool deflection. This paper uses cantilever beam and deformation superposition theory to optimize the static flexibility, and uses the micro-element method to calculate the cutting force of the tool, and establishes the tool axis vector control model and algorithm based on the tool deviation. The simulation experiment results show that after the tool axis vector is optimized, the deviation of the tool and the surface machining error are reduced by 25.2% and 22% respectively compared with those before the optimization, and they are effectively controlled. It can be seen that the algorithm proposed in this paper can effectively suppress the surface machining error caused by the tool deflection, and obtain higher machining accuracy.

Key words: five-axis CNC; tool axis vector; instantaneous static flexibility; cutter deflection

在五轴数控加工过程中,由于五轴数控机床与三轴数控机床相比多了两个旋转轴,使得刀具获得了更多的自由度,便于提高复杂曲面的加工精度。但是随着自由度的增加,刀轴矢量的规划对曲面加工质量的影响也越来越大。因此,刀轴矢量的规划问题就成为复杂曲面加工的关键。

刀轴矢量规划问题一直是众多学者的研究热点。刘红军等^[1]提出基于机床运动学约束的刀轴矢量优化方法,对刀轴矢量进行规划。罗明等^[2]提出自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法,对角速度和角加速度进行约束。I. Lazoglu 等^[3]提出了一种五轴数控加工中的切削力的计算方法,利用切屑厚度和角度精准预测切削力,进行刀轴矢量的优化。A. Mamedov 等^[4]提出了基于工艺参数和切削力来确定刀具姿态,在刀轴可达范围内计算刀轴矢量。在实际加工中切削力的大小与工件表面的加工质量密切相关。当刀触点处的切削力过大时,会引起刀具偏斜。因此,抑制由于刀具偏斜引起的工件表面误差,可以改善加工表面的质量,获得更高的加工精度。加工刀具的静态柔度是影响刀具偏斜的重要因素,现有的刀轴矢量规划方案往往只针对切削力一方面进行调整,两者并未兼顾。基于此,笔者综合考虑了切削力与刀具本身的性能,提出了依据切削力和刀具瞬时静态柔度对曲面加工影响的大小来调整刀具姿态的规划方法,以提高表面加工质量。

1 刀触点瞬时静态柔度

切削力对五轴数控加工中加工质量的影响,不仅要考虑切削力本身的大小,还要考虑加工系统本身的性能,笔者引进系统刀具端静态柔度的概念^[5],它表征了刀具抵抗变形的能力。

将刀具建模为顶部固定的圆柱形悬臂梁,如图1所示。设作用力作用于刀具刀位点处,应用悬臂变形理论和变形叠加理论,推

导出刀具沿 X_t 轴的静态柔度为

$$S_{ix} = [3L_s^2(L_{sf} - R) + 2L_f^2/\mu_t^4 + 3(2L_s(L_{sf} - R) - L_s^2)(L_f - R)]/6EI. \quad (1)$$

式中: R 为球头刀刀具半径; E 为刀具的弹性模量; I 为刀柄部分的惯性矩; μ_t 为切刀凹槽部分的有效直径系数; A_s 为横截面积; L_f 为出屑槽的长度; L_s 为柄的长度; L_{sf} 为刀具的悬伸长度。

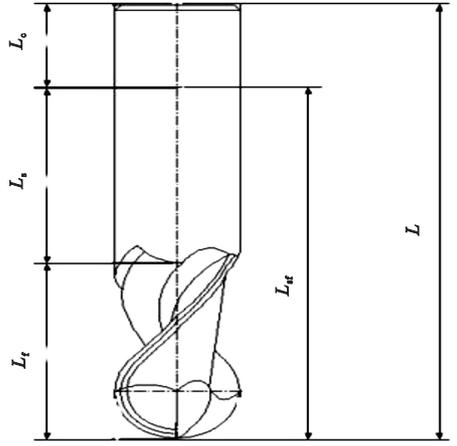


图1 刀具参数示意图

Fig. 1 The schematic diagram of tool parameters

实际加工时的切削力作用于刀触点处,为了精确求取刀具端静态柔度,笔者对静态柔度模型做了一定优化,定义了刀具瞬时静态柔度,以求取在刀触点处的静态柔度。

由图1可知:

$$L_s = L_{sf} - L_f. \quad (2)$$

式(1)可简化为

$$S_{ix} = [2(L_{sf} - L_f)^3 + 6(L_{sf} - L_f)(L_{sf} - R)(L_f - R) + 2L_f^2/\mu_t^4]/6EI. \quad (3)$$

假设刀位点的静态柔度值为 a ,刀尖点的静态柔度值为 b ,则

$$a = [2(L_{sf} - L_f)^3 + 6(L_{sf} - L_f)(L_{sf} - R) \times (L_f - R) + 2L_f^2/\mu_t^4]/6EI. \quad (4)$$

$$b = [2(L_{sf} - L_f)^3 + 6(L_{sf} - L_f)L_{sf} \cdot L_f + 2L_f^2/\mu_t^4]/6EI. \quad (5)$$

则刀位点到刀尖点静柔度的变化量表达式为

$$\Delta' = \frac{(L_{sf} - L_f)[R(L_{sf} + L_f) - R^2]}{6EI}. \quad (6)$$

由于 $(L_{sf} + L_f)$ 是 R 的几十倍, 所以 R^2 可忽略不计, 式(6)变为

$$\Delta = \frac{R(L_{sf} - L_f)(L_{sf} + L_f)}{6EI} \quad (7)$$

由式(7)可以认为在刀位点到刀尖点间, 静柔度的变化量是半径的一次函数, 则近似可得任意点的静柔度为

$$S'_{ix} = a + \Delta \cdot \cos\kappa \quad (8)$$

其中, κ 为接触点处的轴向接触角。

将任意点静态柔度表示为刀尖点静柔度值 b 与系数 ξ 的乘积:

$$S'_{ix} = \left[1 - \frac{\Delta(1 - \cos\kappa)}{b} \right] b = \xi \cdot b \quad (9)$$

如果推导系数 ξ 中的 $\frac{\Delta}{b}$ 值, 即可确定任意点的静态柔度值, 推导过程如下:

$$\frac{\Delta}{b} = \frac{R(L_{sf} - L_f)(L_{sf} + L_f)}{2(L_{sf} - L_f)^3 + 6(L_{sf} - L_f) \cdot L_{sf} \cdot L_f + \frac{2L_f^2}{\mu_t^4}} \quad (10)$$

由于 $\mu_t = D/D_e \in (0, 1)$, 其中, D_e 为刃径, D 为柄径, 所以 $1/\mu_t^4$ 可忽略不计, 令 $L_{sf}/L_f = k (k > 1)$ 最终可得

$$\frac{\Delta}{b} = \frac{R(k+1)}{2(k^2 + k + 1)L_f} \quad (11)$$

所以, 刀触点处的瞬时静态柔度为

$$S'_{ix} = \xi \cdot \frac{(k-1)(k^2 + k + 1)L_f^3 + \frac{L_f^2}{\mu_t^4}}{3EI} \quad (12)$$

$$\text{其中, } \xi = 1 - \frac{R(k+1)(1 - \cos\kappa)}{2(k^2 + k + 1)L_f}$$

可见, 刀具的静态柔度随 κ 的变化而变化, 随着 κ 逐渐变大, $1 - \cos\kappa$ 逐渐增大, 系数 ξ 的值逐渐减小, 式(12)的值也随之逐渐减小, 所以静态柔度的瞬时量与 κ 密切相关。多轴机床的刀具静态柔度越大, 在切削力的作用下刀具产生的偏斜越大, 工件的加工质量越差。当刀具姿态角变大时, 会使 κ 变大^[5], 使式(12)的系数值减小, 从而导致刀触点的瞬时静态柔度降低, 有利于抵抗切削力引起的刀具变形, 提高加工的质量。

同理可得沿 Y_i 轴的瞬时静态柔度:

$$S'_{iy} = S'_{ix} \quad (13)$$

2 刀具偏离量

2.1 切削力分力的计算

机床受力及单位向量的方向如图2所示。

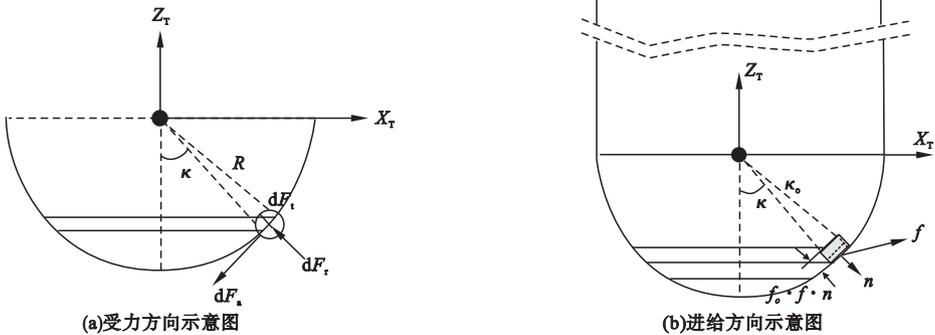


图2 受力及单位向量的方向

Fig. 2 The directions of unit vector and force

机床坐标系下径向、轴向和切向切削力的计算分别如下^[6]:

$$\begin{cases} dF_r = K_{rc} \cdot c_t \cdot d_b + K_{re} d_s \\ dF_a = K_{ac} \cdot c_t \cdot d_b + K_{ae} d_s \\ dF_t = K_{tc} \cdot c_t \cdot d_b + K_{te} d_s \end{cases} \quad (14)$$

其中, K_{rc}, K_{ac} 和 K_{tc} 分别为径向, 轴向和切向切削力系数; K_{re}, K_{ae} 和 K_{te} 为边缘力系数, 该系数都可以通过基于实验数据的校准程序获得。 d_b 为切削宽度; d_s 为切削刃长度; c_t 为未切切屑的厚度, 计算如下:

$$c_t = f_0 \cdot f \cdot n. \quad (15)$$

式中: f_0 为每齿进给量; f 为进给方向的单位向量; n 为切削刃位置处的表面法线向量。

将机床坐标系下切削力转换为刀具坐标系下切削力, 转换矩阵为^[7]

$$T = \begin{bmatrix} -\sin\kappa\sin\varphi & -\cos\varphi & -\cos\kappa\sin\varphi \\ -\sin\kappa\cos\varphi & \sin\varphi & -\cos\kappa\cos\varphi \\ \cos\kappa & 0 & -\sin\kappa \end{bmatrix}. \quad (16)$$

其中, κ 为接触点处的轴向接触角; φ 为径向接触角。

为了计算刀具挠度, 直观地反映刀具变形对加工精度和效率的影响, 需要将刀具坐标系下切削力转化为刀触点坐标系下切削力, 转换矩阵 N 为

$$N = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha \\ \sin\alpha\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中, α 、 β 均为刀具的姿态角; 刀具倾角 α 为刀轴矢量与曲面法向量之间的夹角, 刀具转角 β 为刀轴矢量绕曲面法向量转过的角度, 如图3所示。

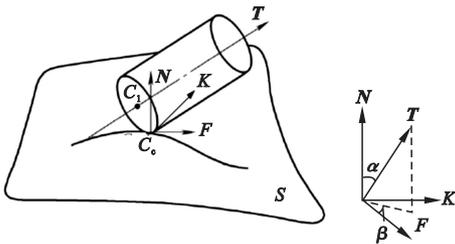


图3 刀具姿态角

Fig. 3 The angle of tool attitude

由此, 可以得出在刀触点坐标系下的切削力微元:

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = TN \begin{bmatrix} K_{rc} \cdot c_t & K_{re} \\ K_{ac} \cdot c_t & K_{ae} \\ K_{tc} \cdot c_t & K_{te} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_b \\ d_s \end{bmatrix}. \quad (18)$$

然后, 推导出各轴的总切削力为

$$F_x = \int_{h_1}^{h_2} dF_x. \quad (19)$$

其中, h_1 和 h_2 给出了接合区域的范围, 以距刀具尖端的瞬时高度表示。

同理可得 F_y, F_z 。

2.2 刀具偏离量

在五轴铣削加工中, 考虑到切削力和静态柔度的综合影响, 引入了刀具偏离量的概念, 表示刀具在垂直于刀具轴线方向的线位移, 作用力 F 与偏离量 d 之间的关系:

$$d = S_t \cdot F. \quad (20)$$

垂直于刀具轴线的切削力的分量 F_x 、 F_y 称为挠曲切削力, 挠曲切削力是使刀具产生偏斜的主要因素^[9], 笔者通过调整刀具姿态角, 将刀具偏离量控制在容许阈值范围内:

$$\sqrt{(F_x \cdot S'_{tx})^2 + (F_y \cdot S'_{ty})^2} \leq [d]. \quad (21)$$

其中, $[d]$ 表示与精度、加工刀具的尺寸和材料、工件的尺寸和材料等多个因素相关的阈值。

刀具瞬时静态柔度大, 抵抗外力变形的能力越差, 当挠曲切削力过大, 产生的变形也会相对较大, 加工的质量就会变差。在实际加工时, 可以改变刀具参数使 S_{tx} 、 S_{ty} 在加工条件允许的情况下尽可能小。

刀具偏离量过大时, 加工表面的误差变大, 影响加工的质量。由计算式(21)可知, 可以调整刀轴矢量来减小切削力的大小, 同时刀具的瞬时静态柔度减小, 进而减小刀具偏离量, 使之控制在阈值之内, 以减小刀具的变形, 控制加工误差, 改善高精曲面的加工质量。

3 基于偏离量的刀轴矢量规划算法

在刀具偏离量较大的位置, 曲面的加工误差就会变大, 进而影响加工质量。通过上述对瞬时静态柔度、刀具切削力的阐述, 我们可以更科学、更精确地对其进行优化, 以获得较高的加工质量。笔者提出一种刀轴矢量控制算法, 可以在尽可能保证加工效率的前提下获得更小加工误差的刀轴矢量。

3.1 区域划分及初始刀轴矢量的确定

凸曲面的曲率半径越小,切削力会越小;凹曲面的曲率半径越小,会使切削力越大^[10]。为了防止切削力过大,提高加工曲面的质量,减小切削力引起的刀具偏斜,可对曲面进行划分^[11],以提高工作效率和加工质量。

为了使加工带宽最大,获得最大的加工效率,刀触点的理论最佳刀轴矢量为曲面法向量方向,而进行实际加工时,可以根据不同曲面类型做具体修改。对于平面,刀具倾角 α 取 0° ,刀转角 β 取 0° 。对于凸面,刀具倾角 α 取 $0^\circ \sim 2^\circ$,刀转角 β 取 0° 。对于凹面,则需要计算其无局部干涉的最小刀具倾角 $\alpha = \arcsin(Rk_{\max})$ ^[11],刀具转角 β 取 $0^\circ \sim 5^\circ$,其中 k_{\max} 为曲面最大主曲率, R 为刀具半径。

3.2 优化算法及流程

刀具偏离量越大,刀具偏离轴线的距离越大,从而影响了复杂曲面的高精加工。为了保证刀具偏斜不至于过大,从而保证表面加工质量,需要将刀具偏离量保持在特定值以下。当刀具偏离量大于规定的阈值时,调整刀具姿态角,将偏离量的值调整到阈值范围之内。

刀轴矢量规划算法具体步骤如下:

步骤1:首先依据曲面特征将曲面划分为若干曲面特征相似的子区域,将这些相似的区域进行分片处理。

步骤2:若子区域为平坦区域 S_i ,采用法线加工法生成刀轴矢量 (α_i, β_i) ,采用等参数线法生成刀具轨迹,提高加工效率。

步骤3:若子区域为凹曲面 S_j 与凸曲面区域 S_k ,采用等残留高度法生成刀具轨迹,沿着所生成的刀具路径采用法线加工法生成刀轴矢量 (α_i, β_i) 。

步骤4:通过式(21)计算每个凹曲面区域的刀触点处刀具偏离量的大小,若其值在指定变化范围内,则保留刀轴矢量 u_i ;否则转步骤5。

步骤5:若偏离量的值不在指定变化范围内,则以 1° 的角度间隔增大刀具倾角,直至调整到阈值范围内。

步骤6:输出刀具姿态角,如图4所示。

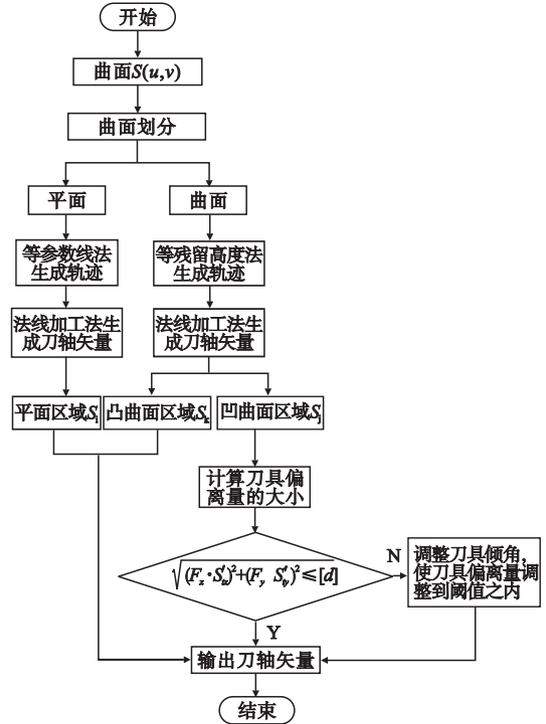


图4 算法流程图

Fig. 4 The flowchart of algorithm

4 算法仿真与实验分析

为了验证所提方法合理可行,选取一个加工曲面进行实例分析。取 $[d] = 0.2 \text{ mm}$,刀具选用整体式硬质合金球头铣刀,其半径 R 为 5 mm ,齿数为 2 ,刀具总长 L 为 100 mm ,刀具装夹时悬伸长度 L_{sf} 为 80 mm ,出屑槽的长度 L_f 为 30 mm ,弹性模量 E 为 210 GPa 。利用 Matlab 软件进行仿真,初始刀具轨迹采用等参数线法、等残留高度法生成,重复以上算法步骤直至整复复杂曲面。

由前文分析可知,在凹曲面区域曲率大的位置,切削力较大,产生的加工误差较大。为了表达更加直观,仿真实验忽略平面区域,对曲率变化较大的区域进行切削力计算及刀

轴矢量的优化,优化前后的局部刀轴矢量变化如图 5 和图 6 所示。

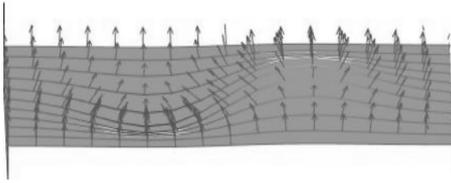


图 5 优化前刀轴矢量

Fig. 5 The tool axis vector before optimization

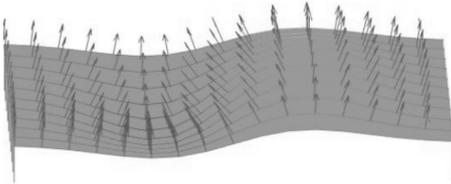


图 6 优化后刀轴矢量

Fig. 6 The tool axis vector after optimization

图 5 中,由式(21)计算得,未优化前当刀具沿着加工轨迹移动时,曲面区域刀触点处的刀轴矢量产生的刀具偏离量较大,影响了加工质量。图 6 中,优化后的刀轴矢量将刀具偏离量控制在了误差容许的范围内,提高了曲面的加工质量。选取同一条刀具轨迹上的优化前后的刀轴矢量进行分析,分别对刀具偏离量和曲面加工误差进行比较,其对比结果如图 7、图 8 所示。

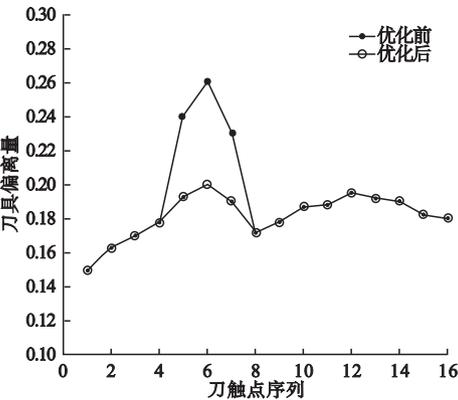


图 7 刀具偏离量的对比

Fig. 7 Comparison of cutter deflections

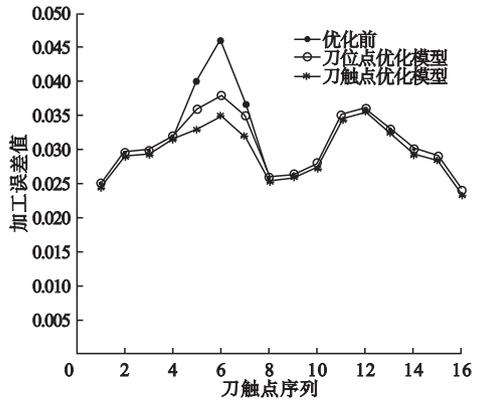


图 8 加工误差的对比

Fig. 8 Comparison of machining errors

图 7 中,采用笔者提出的刀触点瞬时静态柔度模型,依据刀具偏离量对刀轴矢量进行优化,优化后的刀触点处的刀具偏离量相对减小,能够有效改善曲面质量。图 8 中,分别对比了优化前、采用刀位点静态柔度模型优化和采用刀触点静态柔度模型优化的加工误差值。由曲线可知,采用刀触点瞬时静态柔度的优化模型,与优化前和刀位点相比,加工误差分别降低了 22% 和 9%,提高了刀具偏离量的计算精度,提高了曲面加工的质量。

5 结 论

(1)采用区域划分的刀轴矢量规划算法,大大减少了刀具偏离量的计算,提高了加工效率。

(2)刀触点瞬时静态柔度的计算方法,极大地减小了刀具偏离量值和加工时产生的误差值,使得后续刀轴矢量的调整更加精准,提高了曲面的加工质量。

参考文献

[1] 刘红军,张爱国,赵吉宾,等. 复杂曲面五轴数控加工中刀具位置优化[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(6): 5 - 10.
(LIU Hongjun, ZHANG Aiguo, ZHAO Jibin, et al. Tool positions optimization of complex surface for five-axis CNC machining [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2014, 50(6): 5 - 10.)

[2] 罗明,吴宝海,李山,等. 自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 158 - 163.

- (LUO Ming, WU Baohai, LI Shan, et al. Five-axis tool orientation optimization based on kinematical method [J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(9): 158 - 163.)
- [3] LAZOGLU I, BOZ Y, ERDIM H. Five-axis milling mechanics for complex free form surfaces [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2011(60): 117 - 120.
- [4] MAMEDOV A S, EHSAN L K, LAZOGLU I. Machining forces and tool deflections in micro milling [J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 18 - 21.
- [5] 洪贤涛. 球头铣刀铣削力建模与仿真研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (HONG Xiantao. The research of ball-end milling force modeling and simulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.)
- [6] DUAN X Y, PENG F Y, ZHU K P, et al. Tool orientation optimization considering cutter deflection error caused by cutting force for multi-axis sculptured surface milling [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 103(5 - 8): 47 - 50.
- [7] 鞠楠. 基于切削力分析的叶片加工刀具轨迹规划 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (JU Nan. NC machining tool path planning of the blade based on cutting force analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- [8] 曹著明, 芦璐, 田小强, 等. 复杂曲面加工刀轴矢量优化研究 [J]. 航空精密制造技术, 2018, 54(6): 58 - 62. (CAO Zhuming, LU Lu, TIAN Xiaoqiang, et al. Optimization of machining tool axis vector of complex curved surface [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2018, 54(6): 58 - 62.)
- [9] LI L L, ZHANG Y F, LI H Y, et al. Generating tool-path with smooth posture change for five-axis sculptured surface machining based on cutter's accessibility map [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2011, 53(5 - 8): 699 - 709.
- [10] 赵凯, 刘战强. 基于加工特征的铣削力预测研究 [J]. 现代制造工程, 2014(6): 86 - 92. (ZHAO Kai, LIU Zhanqiang. Numerical prediction of milling forces based on machining feature [J]. Modern manufacturing engineering, 2014(6): 86 - 92.)
- [11] 闵莉, 陈颖, 王洪畅. 自适应细分曲面 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 163 - 171. (MIN Li, CHEN Ying, WANG Hongchang. The research on loop adaptive subdivision surface algorithm [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(1): 163 - 171.)
- [12] 闵莉, 王洪畅, 陈颖. 五轴铣削加工刀轴矢量平滑控制算法 [J]. 机械设计与制造, 2020(10): 141 - 144. (MIN Li, WANG Hongchang, CHEN Ying. Cutter axis vector smoothing algorithm for five-axis milling [J]. Machinery design & manufacture, 2020(10): 141 - 144.)
- [13] 杨滨涛, 夏峥嵘, 陶建民, 等. 闭式整体叶盘流道粗加工分层区域边界刀路刀轴计算方法 [J]. 新技术新工艺, 2019(3): 47 - 51. (YANG Bintao, XIA Zhengrong, TAO Jianmin, et al. Calculation method of the tool path arbor for divided layer area boundary of flow pass rough machining of integral shrouded blisk [J]. New technology & new process, 2019(3): 47 - 51.)
- [14] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. (LIU Xiongwei. NC machining theory and programming technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.)
- [15] DUAN X Y, PENG F Y, ZHU K P, et al. Cutting edge element modeling-based cutter workpiece engagement determination and cutting force prediction in five-axis milling [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 3: 41 - 44.
- [16] ZHU Z, YAN R, PENG F Y, et al. Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of five-axis general end milling [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2016, 101: 64 - 69.
- [17] GUZEL B U, LAZOGLU I. Increasing productivity in sculpture surface machining via off-line piecewise variable feedrate scheduling based on the force system model [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2003, 44(1): 103 - 107.
- [18] MA J W, HU G Q, QIN F Z, et al. Global tool axis vector optimization based on the minimum angular acceleration of rotary axes [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 35: 86 - 92. (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)