

引文格式: 杨洋, 王虎, 刘开发, 等. 鼓形砂轮加工整体叶盘叶型曲面的轨迹规划方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 136–143, 150.
YANG Yang, WANG Hu, LIU Kaifa, et al. Trajectory planning method for blisk surface with drum grinding wheel[J].
Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(19): 136–143, 150.

鼓形砂轮加工整体叶盘叶型曲面的轨迹规划方法

杨 洋, 王 虎, 刘开发, 尚振涛, 金 滩

(湖南大学, 长沙 410082)

[摘要] 整体叶盘作为高性能航空发动机的重要组成部件,其结构的复杂性和难加工性给加工制造技术带来了极大的挑战。为此,针对整体叶盘叶片曲面宽行加工,本文提出了一种改进的变弦高轨迹规划方法。首先,重构了叶片曲面并以叶片曲面的凹凸性质和运动约束为基准,扩展了鼓形砂轮设计原则。然后根据实际加工区域对重构曲面进行了裁剪,考虑走刀方向上的叶片曲面曲率变化对弦高误差的影响,规划了砂轮磨削轨迹。结果表明,与传统方法设计的鼓形砂轮相比,采用扩展原则设计的鼓形砂轮,在相同条件下刀轨数从41条减至32条,有效增大了加工行宽;改进后的规划方法可将弦高误差控制在允许误差范围内,采用不同的砂轮进行仿真计算,欠切量的标准差分别由9.42 μm 和2.82 μm 降低至5.27 μm 和1.98 μm ,欠切量分布更均匀。

关键词: 鼓形砂轮; 整体叶盘; 叶型; 轨迹规划; 磨削

中图分类号: V263

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.19.136

Trajectory Planning Method for Blisk Surface With Drum Grinding Wheel

YANG Yang, WANG Hu, LIU Kaifa, SHANG Zhentao, JIN Tan

(Hunan University, Changsha 410082, China)

[ABSTRACT] As a critical component of high-performance aerospace engines, the blisk poses significant challenges to manufacturing technology due to its complex structure and poor machinability. To address the wide-path machining demand of blisk blade surfaces, this paper proposes an improved variable chordal trajectory planning method. First, the blade surface was reconstructed. Taking the concave-convex properties of the blade surface and tool machine tool motion constraints as the criteria, the design principles for drum grinding wheels were extended. Then, the reconstructed surface was trimmed according to the actual machining area, and the grinding trajectory of the wheel was planned by considering the influence of blade surface curvature variation in the tool path direction on chord height error. The results show that compared with the drum grinding wheel designed by traditional methods, the one designed based on the extended principles reduces the number of tool paths from 41 to 32 under the same conditions, effectively increasing the machining row width. The improved planning method can also control the chord height error within the allowable range. Simulations with different grinding wheels show that the standard deviation of undercut is reduced from 9.42 μm to 5.27 μm , and from 2.82 μm to 1.98 μm , respectively, resulting in a more uniform undercut distribution.

Keywords: Drum grinding wheel; Blisk; Blade profile; Trajectory planning; Grinding

高性能航空发动机的加工制造水平是衡量国家综合科技水平、工业基础实力和综合国力的重要标志。其中,整体叶盘作为关键零部件之一,其性能直接对发动机的整体表面产生重要的影响^[1-2]。整体叶盘是将发动

机转子叶片和轮盘设计为一体,省去了传统连接中的榫头、榫槽及锁紧装置等。但由于整体叶盘叶型扭曲大、可加工域窄、刀具可达性差,对整体叶盘叶型的加工轨迹规划提出了诸多挑战。

有关数控磨削加工中的轨迹规划问题,国内外众多学者开展了研究。Ma等^[3]提出了一种砂带磨削的自适应路径规划方法,通过插值对刀轨进行修正可将被加工工件的表面粗糙度值 R_a 控制在 $0.086\ \mu\text{m}$ 以内。Xie等^[4]为避免复杂曲面加工时产生过切问题,对加工区域进行分区,采用截面法生成了无过切的路径。Lv等^[5]提出了基于材料去除轮廓的轨迹规划算法,通过计算大量提取点将弦高误差控制在约束范围内,提高了砂带磨削加工的轮廓精度。Li等^[6]提出了一种基于复杂曲面上测点位置的匹配方法,该方法可以生成机器人砂带磨削路径上的关键参数。罗来臻等^[7]针对机器人砂带磨削工艺,提出了一种以磨抛姿态变化为约束,同时对姿态进行光滑处理的轨迹规划方法,该方法可使机器人的关节角速度变化平缓,刀路光滑性得到提升。李飞等^[8]对曲率弦高法进行了优化,提高了机器人砂带磨削的加工效率和表面质量。詹庆荣等^[9]提出了改进弦高误差约束的轨迹规划方法,该方法提高了磨削轨迹对曲率的适应性。戴士杰等^[10]提出了一种分段前瞻控制算法,该算法综合考虑了弦高、法向加速度以及进给速度对焊接过程的影响,最终有效提高了叶片的焊接精度。张铁等^[11]提出了一种改进的机器人砂带磨削的泰勒插补算法,该算法可根据曲率变化自适应地增减刀位点,从而保证加工效率。然而,以上方法在规划磨削轨迹时,没有考虑工件曲面的几何性质及运动约束对刀具参数的影响,所生成磨削轨迹的加工行宽窄,难以实现宽行加工。另外,整体叶盘的加工空间小,叶型扭曲大,使用等弦高法规划磨削轨迹时不能很好地随曲率变化生成刀位点,在加工过程中容易产生过切问题。

针对上述问题,本文首先重构了叶片曲面并结合叶型曲面的凹凸性质与实际运动约束,提出了扩展的鼓形砂轮设计原则,增大了鼓形半径的选用范围以获得更大的加工行宽;其次,考虑了走刀方向上的叶片曲面曲率变化,以局部曲率的变化为基准增大或减小弦高,从而提出了一种弦高随曲率变化的变弦高轨迹规划方法。

1 叶片曲面的重构

为使整体叶盘叶片型面满足动力学要求,一般将其设计为复杂的自由曲面。目前,B样条(B-spline)曲面以其强大的灵活性和功能性被广泛应用于各个领域。双三次B曲面可以达到G2连续,实践中多用到双三次B曲面来表示自由曲面。具有 $m \times n$ 个控制顶点的B曲面的数学表达式为^[12]

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (1)$$

式中, d_{ij} 为控制顶点; $N_{i,k}(u)$ 为 u 方向的第 i 个 k 次B

样条基函数; $N_{j,l}(v)$ 为 v 方向的第 j 个 l 次B样条基函数。因此,重构叶片曲面的关键是确定合适的节点矢量以及求解控制顶点。

如图1所示, $p(u_0, v)$ 、 $p(u_1, v)$ 、 $p(u_i, v)$ 为叶片曲面 $p(u, v)$ 的参数线, $p(u_i, v_0)$ 、 $p(u_i, v_1)$ 、 $p(u_i, v_2)$ 、 $p(u_i, v_i)$ 为参数线上的点。如此,在叶片曲面重构后只需要确定 u 、 v 参数,可得到参数线及点位数据。

1.1 节点矢量的确定

首先,从三维模型中提取呈矩形阵列的数据点 $q_{i,j}$ ($i=0, 1, \dots, r; j=0, 1, \dots, s$)。按纵横方向分别为 u 、 v 参数方向。两个参数方向的节点矢量分别是 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{m+4}]$ 与 $V=[v_0, v_1, \dots, v_{n+4}]$,其中, $m=r+2, n=s+2$ 。曲面上两个参数方向的节点矢量由数据点的参数化确定。

叶片曲面在两个参数方向上均为开曲面,以 u 参数方向构建三次曲线为例,曲线定义域外节点矢量可按式(2)确定^[13]。

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{m+1} = u_{m+2} = u_{m+3} = u_{m+4} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

定义域内按积累弦长法确定节点矢量^[14]:

$$u_i = u_{i-1} + \frac{|p_i p_{i-1}|}{\sum_{j=1}^m |p_j p_{j-1}|}, \quad i = 4, 5, \dots, m \quad (3)$$

式中, p_i, p_{i-1} 为相邻数据点。

而对于叶片型面这种自由曲面,采用双向规范积累弦长参数化的方法更合适^[15]。

$$\begin{cases} u_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n u_{i,j}, \quad i = 4, 5, \dots, m \\ v_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m v_{i,j}, \quad j = 4, 5, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u_{i,j}$ 为曲面 u 参数方向按积累弦长法获得的节点矢量; $v_{i,j}$ 为曲面 v 参数方向按积累弦长法获得的节点矢量。

1.2 控制顶点的反算

利用张量积曲面的性质,可将整个叶片曲面的反算

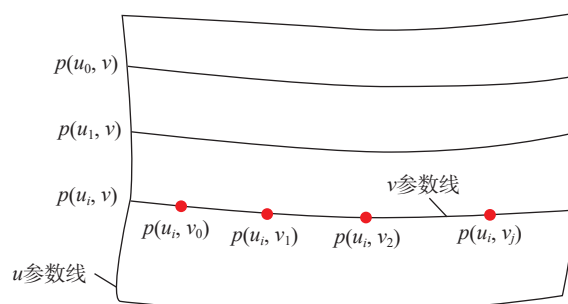


图1 整体叶盘叶片曲面磨削轨迹

Fig.1 Grinding trajectory on the blade surface of blisk

过程转化为两个参数方向上的多个曲线反算问题,即

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} & v \rightarrow \\ u \downarrow & \begin{bmatrix} q_{0,0} & q_{0,1} & \cdots & q_{0,n-2} \\ q_{1,0} & q_{1,1} & \cdots & q_{1,n-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{m-2,0} & q_{m-2,1} & \cdots & q_{m-2,n-2} \end{bmatrix} \\ & \Rightarrow \end{matrix} \\
 & \begin{matrix} & v \rightarrow \\ u \downarrow & \begin{bmatrix} \bar{d}_{0,0} & \bar{d}_{0,1} & \cdots & \bar{d}_{0,n-2} \\ \bar{d}_{1,0} & \bar{d}_{1,1} & \cdots & \bar{d}_{1,n-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{d}_{m,0} & \bar{d}_{m,1} & \cdots & \bar{d}_{m,n-2} \end{bmatrix} \\ & \Rightarrow \end{matrix} \\
 & \begin{matrix} & v \rightarrow \\ u \downarrow & \begin{bmatrix} d_{0,0} & d_{0,1} & \cdots & d_{0,n} \\ d_{1,0} & d_{1,1} & \cdots & d_{1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m,0} & d_{m,1} & \cdots & d_{m,n} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

先按某一方向构建多条曲线求解得到中间控制顶点,然后将中间控制顶点当作新的“数据点”求解最终的控制顶点 $d_{i,j}$ 。

以先沿 u 方向构建开曲面处理为例,先求解一条 u 方向上的曲线,将定义域内的节点矢量依次代入式(1),有 $m-1$ 个方程与 $m+1$ 个未知控制顶点。由于 u 方向上首(末)控制顶点与首(末)数据点重合,方程变为 $m-3$ 个,未知控制顶点减为 $m-1$ 个,所以引入切矢条件并改用式(6)的矩阵形式更为方便^[16]。

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & a_1 & & & \\ a_2 & b_2 & c_2 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & a_{m-2} & b_{m-2} & c_{m-2} & \\ & & c_{m-1} & b_{m-1} & a_{m-1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{m-2} \\ d_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{m-2} \\ e_{m-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} a_i = \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_i + \Delta_{i+1} + \Delta_{i+2}} \\ b_i = \frac{\Delta_{i+2}(\Delta_i + \Delta_{i+1})}{\Delta_i + \Delta_{i+1} + \Delta_{i+2}} + \frac{\Delta_{i+1}(\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2})}{\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2} + \Delta_{i+3}} \\ c_i = \frac{(\Delta_{i+1})^2}{\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2} + \Delta_{i+3}} \\ e_i = (\Delta_{i+1} + \Delta_{i+2})q_{i-1} \\ \Delta_i = u_{i+1} - u_i \end{cases} \quad (7)$$

式中, $i=2,3,\dots,m-1$ 。

切矢条件为^[17]

$$\begin{cases} b_1 = 1, c_1 = a_1 = 0, e_1 = q_0 + \frac{\Delta_3}{3} \dot{q}_0 \\ c_{m-1} = a_{m-1} = 0, b_{m-1} = 1, e_{m-1} = q_{m-2} + \frac{\Delta_3}{3} \dot{q}_{m-2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, \dot{q}_0 与 \dot{q}_{m-2} 为首末数据点的切矢。

依次代入参数 u 值解式(6) $n-1$ 次,即可得到 $(m+1)$

$\times (n-1)$ 个中间控制顶点;然后,将中间控制顶点当作新的“数据点”在 v 方向上构建开曲面,再按上述步骤计算便可得到最终的 $(m+1) \times (n+1)$ 个控制顶点。至此,完成叶片曲面的重构。

2 刀具设计

由于整体叶盘叶片曲面较为复杂,曲率变化明显,在加工凹面的过程中易发生过切现象。因此,根据曲率匹配原则提出了一种鼓形砂轮的扩展原则。

2.1 鼓形砂轮形状

目前,在整体叶盘磨削加工中,比较常用的鼓形砂轮形状有锥鼓形砂轮和对称鼓形砂轮。相比于锥鼓形砂轮,对称鼓形砂轮通常可以获得更大的加工行宽,因此选用对称鼓形砂轮作为加工刀具,如图2所示。

2.2 鼓形砂轮设计原则

根据曲面论基本知识,曲面的第一、第二基本形式为

$$\begin{aligned} I &= Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \\ II &= Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \end{aligned} \quad (9)$$

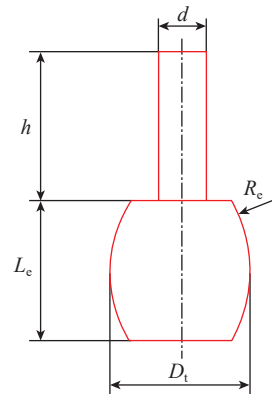
式中, E, F, G 为第一类基本量; L, M, N 为第二类基本量,结合此前重构的叶片曲面式(1),有

$$\begin{cases} E = p_u^2, F = p_u p_v, G = p_v^2 \\ L = p_{uu}n, M = p_{uv}n, N = p_{vv}n \\ n = p_u \times p_v \end{cases} \quad (10)$$

式中, p_u 是对 u 的一阶偏导数; p_v 是对 v 的一阶偏导数; p_{uu} 是对 u 的二阶偏导数; p_{vv} 是对 v 的二阶偏导数; p_{uv} 是对 u, v 的二阶混合偏导数。

从而可以得到高斯曲率 K 、平均曲率 H 、最大主曲率 k_1 和最小主曲率 k_2 。

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}$$



注: d 为砂轮刀杆直径; L 为砂轮刀杆长度; L_c 为砂轮磨头高度; R_c 为砂轮磨头鼓形半径,鼓形圆弧圆心位置在 $L_c/2$ 处; D_t 为砂轮磨头最大回转直径。

图2 鼓形砂轮
Fig.2 Drum grinding wheel

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} \quad (11)$$

依据曲面某点的高斯曲率 K 与 0 的关系,可判断该点的类型,即当 $K < 0$, $K = 0$ 或 $K > 0$ 时对应不同类型,高斯曲率 $K \geq 0$ 是曲面在该点局部凸的充要条件。传统原则是根据整个曲面的最大、最小主曲率来进行刀具尺寸的设计,但这样选择的刀具参数比较保守,主要表现为鼓形刀具的鼓形半径偏小,从而不得不减小加工行宽以保证残高。

考虑到被加工曲面为凸面时刀具的回转半径大小对被加工曲面无影响,因此本文只考虑高斯曲率 $K < 0$ 的区域,由此可得砂轮磨头最大回转直径 D_t 的选用要求为

$$D_t < \frac{2}{|\max(k_1)|}, K < 0 \quad (12)$$

考虑到叶片通道限制,设叶片间最短距离为 d_{\min} ,则砂轮磨头的最大回转直径 D_t 应当满足的另一要求为

$$D_t < d_{\min} \quad (13)$$

如图 3 所示, p 为曲面上高斯曲率 $K < 0$ 的区域上一点, k_e 为该点刀轴矢量方向的主曲率, α 为 k_1 与 k_e 的夹角,则 k_e 、 k_1 、 k_2 满足:

$$k_e = k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha \quad (14)$$

除此之外,考虑到实际机床行程的限制,在此给出运动约束。所用机床控制刀具转动方向 (k_e 所在的方向) 的轴为 C 轴,机床结构如图 4 所示,砂轮工作平面为水平面,给出运动约束 $C \in [-30^\circ, +30^\circ]$ 。即在计算 k_e 值时,

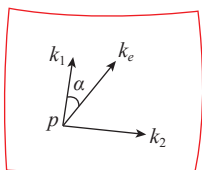


图 3 磨头设计原则

Fig.3 Principles of grinding tool design

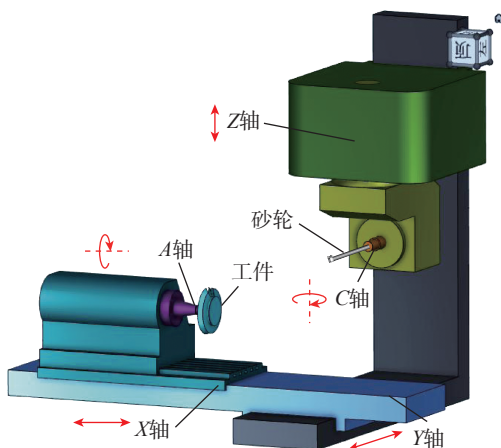


图 4 五轴机床结构

Fig.4 Five-axis machine tool structure

按照实际加工姿态将刀轴矢量旋转至水平面并确保与 Y 轴夹角不超过 $\pm 30^\circ$,由此可以得出:

$$R_c < \frac{1}{|\max(k_e)|}, C \in [-30^\circ, 30^\circ] \quad (15)$$

当鼓形半径 R_c 和最大回转直径 D_t 选定后可规划刀轨,砂轮磨头的高度 L_c 则应当根据规划的刀轨进行合理取值。一般来说,砂轮磨头高度 L_c 应当大于加工行宽;在保证砂轮刀杆不发生全局干涉的前提下,为保证整体刚性,刀杆直径 d 应尽可能大,同时,刀杆直径 d 一般小于砂轮磨头顶部回转半径;刀杆长度 h 则应该根据实际夹持长度与加工干涉具体考虑。

3 加工轨迹的规划

在整体叶盘随形磨削加工中,砂轮和整体叶盘叶片间主要包含沿步长方向的走刀运动和沿行宽方向的进给运动。轨迹规划的核心是确定合适的加工行宽以及加工步长控制方法。

3.1 加工行宽的规划

以等参数法作为行宽规划方法时,但该方法在加工叶片型面时存在一些局限,这跟叶片曲面的构造相关。如图 5 所示,叶片模型的实际加工曲面区域是边界线 1 (外轮毂面与叶片型面的交线) 与边界线 2 (叶根与叶片型面的交线) 之间的区域。此前重构的叶片参数曲面并非实际叶片曲面,对其使用等参数法规划刀轨时,根部往往存在难以加工的三角区域,需要另作处理,这对整体的刀轨规划是不利的。

因此,为保证等参数化刀轨的整体性,需要利用叶片曲面的实际边界对原始叶片曲面进行裁剪,在所得裁剪曲面下规划的等参数刀轨是均匀的、连续的。裁剪曲线的构造步骤如下。

(1) 确定边界线上的一系列数据点 p_i ($i=0, 1, \dots, n$), 并反求在原叶片曲面 $p(u, v)$ 上的参数 (u_i, v_i) 。

(2) 以参数 (u_i, v_i) 为新的“数据点”进行参数化处理,得到相应节点矢量 $T=[t_0, t_1, \dots, t_n]$ 。

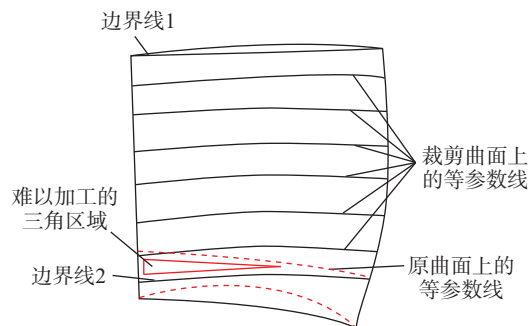


图 5 原叶片曲面与裁剪表面上的等参数线

Fig.5 Isoparametric lines on original blade surface and trimmed surface

(3) 在曲面参数定义域内构造过“数据点”的 B 曲线并表达为分量形式 $u=u(t), v=v(t)$ 。

(4) 将步骤 (3) 得到的曲线映射到原叶片曲面 $p(u, v)$ 上即可得到裁剪曲线 $p(u(t), v(t))$ 。

这样构造得到的曲线将严格位于原叶片曲面上。利用这两条边界线对原叶片曲面进行裁剪,即可得到所需曲面。再根据式 (16) 对裁剪后的曲面重新进行参数化处理。在 u', v 参数域下的等参数刀轨是目标刀轨。

$$u' = \frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \quad (16)$$

如图 6 所示, $p(u_i, v)$ 为叶片曲面 $p(u, v)$ 上的一条刀触点轨迹, P_C 为砂轮与叶片曲面的刀触点, O_W 为砂轮中心点, $p_r(u, v)$ 为残留曲面, P_a, P_b 为残留曲面 $p_r(u, v)$ 与有效轮廓的交点。

如此, P_a, P_b 间的距离即是鼓形砂轮在该点的切宽, 选取曲面上若干点重复计算可得到最大加工行宽, 进而得到 u 参数差值。

3.2 变弦高法规划步长

3.1 节讨论了等参数刀轨的规划, 将 v 方向设为沿步长方向的走刀方向。显然, 当 u 参数确定的时候, 根据式 (1) 可得到一条 B 曲线, 然后确定一系列的 v 参数, 得到相应的刀位点数据。走刀步长一般多采用等弦高法进行计算。等弦高法的前提是假定相邻刀位点间的曲率不变, 但是整体叶盘叶片曲面往往存在曲率变化剧烈的区域。因此, 以局部曲率变化为基准增大或减小弦高, 提出了一种弦高随曲率变化的变弦高规划方法。

图 7 为一条 B 曲线示意图, δ_i 为当前的弦高误差, L_i 为当前刀位点的走刀步长。

整体叶盘叶片的磨削轨迹比较密集。等弦高法认为, 相邻刀位点间曲线的曲率不发生变化, 则由几何关系可知:

$$L_i = 2\sqrt{\frac{2\delta_i}{\rho_i} - \delta_i^2} \quad (17)$$

在曲率变化明显时, 实际的弦高误差可能会超过允许的最大弦高误差, 因此对弦高进行调整, 即

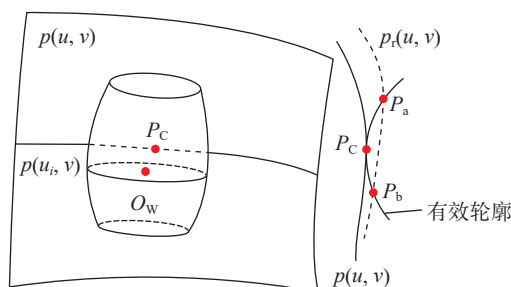


图 6 砂轮加工行宽示意图

Fig.6 Schematic of grinding wheel machining row width

$$\delta_{i+1} = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \delta_i \quad (18)$$

式中, ρ_i, ρ_{i+1} 分别为 p_i, p_{i+1} 处的曲率; δ 为允许的最大弦高误差, 从而有

$$L_i = |\overline{p_i p_{i+1}}| \quad (19)$$

式中, p_i, p_{i+1} 为相邻两个刀位点的曲率。

将式 (17) 代入式 (19) 可求出该条轨迹上的下个刀位点对应的参数值 v_{i+1} , 不断迭代即可求出整条轨迹上的所有刀位点参数。

3.3 刀轴矢量的规划

图 8 为某刀触点 p 处的砂轮位姿示意图, X_{SL} 轴为该刀触点刀轨方向的切矢方向, Z_{SL} 轴为该刀触点的法矢方向。依据满足右手法则建立 Y_{SL} 轴, 从而建立工件局部坐标系 ($X_{SL}-Y_{SL}-Z_{SL}$); 相应地, 在该刀触点建立砂轮局部坐标系 ($X_{TL}-Y_{TL}-Z_{TL}$), $X_T-Y_T-Z_T$ 为砂轮坐标系, 俯仰角 λ_L 为刀轴矢量 T_{axis} 与该刀触点切平面 ($X_{SL}-Y_{SL}$) 的夹角, 侧偏角 w_L 为 X_{TL} 轴与 X_{SL} 轴的夹角。取初始俯仰角 $\lambda_L=0^\circ$, 初始侧偏角 $w_L=0^\circ$ 。

3.4 干涉检测

整体叶盘叶片之间的加工空间小, 加工过程中极易产生干涉, 由于将初始俯仰角设置为 0° , 所以必须对先前规划的刀轴矢量做碰撞检测。走刀过程中刀具与叶片的碰撞问题, 实际上是刀具从上一刀所在位置直线插补运动到下一刀位置所构成的空间区域与指定检查面之间的求交问题。

但是这样求解较为复杂, 为了简化计算过程, 将其转化为指定检查面上的点到刀具轴线的距离与刀具半径的比较问题, 这一转化能大幅简化了计算过程, 提升求解效率。

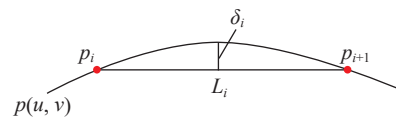


图 7 相邻刀位点步长示意图

Fig.7 Schematic of step length between adjacent tool path points

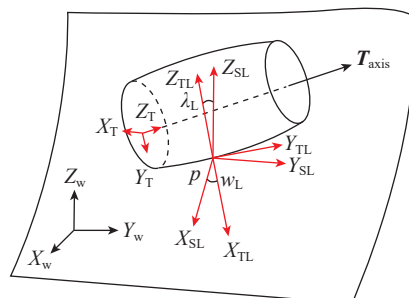


图 8 砂轮位姿示意图

Fig.8 Schematic of grinding wheel pose

值得指出的是,在曲面曲率变化较大且走刀步长不合理时,这种简化便会失效,如图9所示。可以看出,按照简化算法,两个位置的刀轴矢量均是安全的,但实际上刀具在这一次走刀经过的空间区域与叶片曲面有交集,即发生了碰撞。

虽然简化算法存在上述问题,但按照3.2节中曲率变化规划走刀步长的方法,可在曲率大的步位减小步长,从而可很好地避免这种情况的发生,如图10所示。

式(20)为检测点从曲面坐标系到砂轮坐标系的坐标变换计算式。

$$P'_i = T \cdot (P_i - P) \quad (20)$$

式中, T 是曲面坐标系 $(X_w - Y_w - Z_w)$ 到砂轮坐标系 $(X_T - Y_T - Z_T)$ 的坐标变换矩阵; P_i 是检查面上的点在曲面坐标系下的坐标; P'_i 是检查面上的点在砂轮坐标系下的坐标; P 是砂轮坐标系原点在曲面坐标系下的坐标。

干涉检测与调整的步骤如下。

(1) 按照式(20)计算检测面上的点在砂轮坐标系上的 X, Y, Z 坐标。将 Z 坐标值与砂轮磨头高度 L_e 作比较。

若 $Z > L_e$, 则将 $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值与刀杆半径 R 进行比较, $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值大于 R , 进入下一步, $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值小于 R , 则将俯仰角 λ_L 增大一个小角度 θ_1 , 返回计算。

若 $Z < L_e$, 则将 $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值与砂轮半径 $R(Z)$ 进行比较, $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值大于 $R(Z)$, 进入下一步, 若 $\sqrt{X^2 + Y^2}$ 值小于 $R(Z)$, 则将俯仰角 λ_L 增大一个小角度 θ_2 , 返回计算, 比较通过后进入下一步。

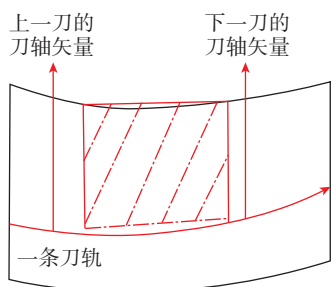


图9 检测无碰撞实际有碰撞

Fig.9 No collision detected but actual collision occurs

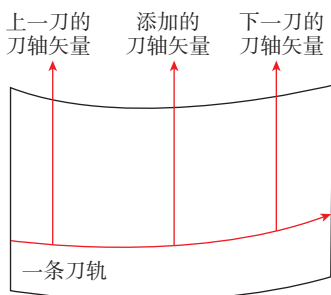


图10 检测无碰撞实际无碰撞

Fig.10 No collision detected and no actual collision

(2) 计算刀轴矢量方向对应的 C 角, 判断是否超出运动约束范围。若超出, 调整刀轴矢量, 返回第1步; 若未超出, 进入下一步。

(3) 若检测面上的点已全部计算完毕, 进入下一步; 否则进入下一个检测点的计算, 返回第一步。

(4) 该刀位点已计算完毕, 进行下一个刀位点的刀轴矢量检测, 直到所有刀位点的刀轴矢量检测完毕。

如此, 经过上述步骤处理得到的刀轨是无碰撞的。

4 仿真算例验证

为验证鼓形砂轮加工整体叶盘叶型轨迹规划的有效性, 以某型号整体叶盘叶片为加工对象, 该整体叶盘有22个叶片, 相邻叶片间最短距离 $d_{\min} = 10.5 \text{ mm}$, 叶片径向高度为30 mm, 砂轮沿 v 参数方向(横向)进给, 行宽沿 u 参数方向(纵向)计算。在三维模型上取 100×500 矩形阵列的数据点重构叶片, 计算得出的高斯曲率分布如图11所示, 曲率分析结果如表1所示。

由表1可知, 刀具的最大回转半径应小于 $1/k_{1-\max} \approx 23.0 \text{ mm}$; 此外, 由于叶片通道宽度 ($d_{\min} = 10.5 \text{ mm}$) 与预留的安全距离的限制, 将砂轮磨头最大回转直径 D_1 取8 mm。采用传统原则, 砂轮鼓形半径应当小于23.0 mm; 而根据所提原则, $k_{1-\max}$ 所对应的方向经变换后超出给定运动约束范围 $C \in [-30^\circ, +30^\circ]$, 不予采用。应当采用在运动约束范围内的 $k_{e-\max}$, 即砂轮鼓形半径应当小于 $1/k_{e-\max} \approx 51.3 \text{ mm}$ 。设计的鼓形砂轮磨头参数如表2所示。

此外, 砂轮磨头高度 L_e 的值比较依赖个人经验, 一般应大于加工行宽。为保证刚度, 刀杆直径 d 应在不

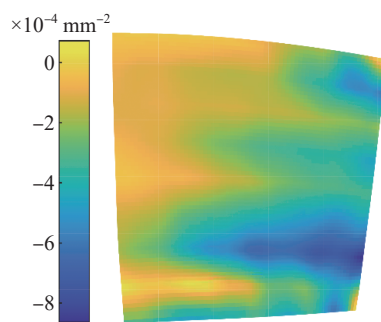


图11 高斯曲率分布图

Fig.11 Gaussian curvature map

表1 整体叶盘叶片曲面曲率分析结果

Table 1 Curvature analysis results of blade surfaces in integral blisk

$k_{1-\max}/\text{mm}^{-1}$	$k_{2-\max}/\text{mm}^{-1}$	$k_{e-\max}/\text{mm}^{-1}$	运动约束
0.0435	0.0089	—	—
—	—	0.0195	$C \in [-30^\circ, +30^\circ]$

干涉的前提下尽可能大,同时小于砂轮磨头顶部回转直径,刀杆长度 h 则应根据实际夹持长度与加工干涉具体考虑。如此,鼓形砂轮最终设计结果如表 3 所示。

砂轮的形状与尺寸确定以后,分别选用 1、2 号鼓形砂轮规划刀轨(以变弦高法为基准, u 参数差值分别为 0.024 和 0.031,此时最大残留高度基本一致,约 $14\ \mu\text{m}$;允许的最大弦高误差为 $2\ \mu\text{m}$),经刀轴调整后规划的刀轨均无干涉现象,各行刀轨刀位点个数对比如图 12 所示,可见改进后的刀轨在曲率较大的区域上刀位点个数有明显增加。

如图 13 所示,分别对比改进前、后的刀轨弦高误差,以 $u=0.93$ 为例,结果表明,等弦高法生成的刀轨在曲率较大处弦高误差会超过允许最大弦高误差 δ ($\delta=2\ \mu\text{m}$),这意味着加工时容易出现过切现象,而改进后弦高误差均在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,这表明变弦高法可有效控制弦高误差。

为评价整体叶盘叶片表面欠切量是否分布均匀,引入标准差来进行评价。采用改进前、后方法所规划的刀

轨,分别对 1、2 号砂轮进行 Vericut 仿真,仿真过程无干涉现象产生,部分加工代码与仿真过程如图 14 所示,仿真结果如表 4 所示,被加工面上欠切量的平均值、中位数和标准差如表 5 所示,欠切量如图 15 所示。

从表 4 可知,在保证最大欠切量基本一致的前提下,刀轨数量从 b 组的 41 条减至 d 组的 32 条,这说明按传统原则选用的鼓形砂轮鼓形半径 R_c 值趋于保守,而基于扩展原则设计的鼓形砂轮可有效增大加工行宽。从表 5 可以看出,欠切量的标准差分别由 a 组的 $9.42\ \mu\text{m}$ 降低至 b 组的 $5.27\ \mu\text{m}$,由 c 组的 $2.82\ \mu\text{m}$ 降低至 d 组的 $1.98\ \mu\text{m}$,原因是变弦高法通过随曲率变化的弦高,增加了曲率较大处的刀位点,从而使欠切量的分布更为均匀(图 15)。

表 2 鼓形砂轮磨头尺寸设计结果
Table 2 Dimension design of drum grinding wheel head

砂轮序号	设计方法	运动约束	$1/k_{l-\max}$	$1/k_{e-\max}$	R_c/mm	D_t/mm
1	传统	—	23.0	—	20	8.0
2	本文	$C \in [-30^\circ, +30^\circ]$	—	51.3	50	8.0

表 3 砂轮尺寸设计结果

Table 3 Design results of grinding wheel size mm

砂轮序号	D_t	R_c	h	d	L_c
1	8.0	20	96	6.0	4.0
2	8.0	50	96	6.0	4.0

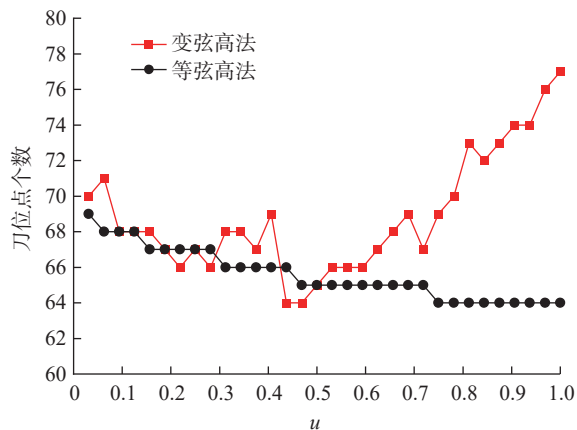


图 12 刀位点个数对比

Fig.12 Comparison of tool path point count

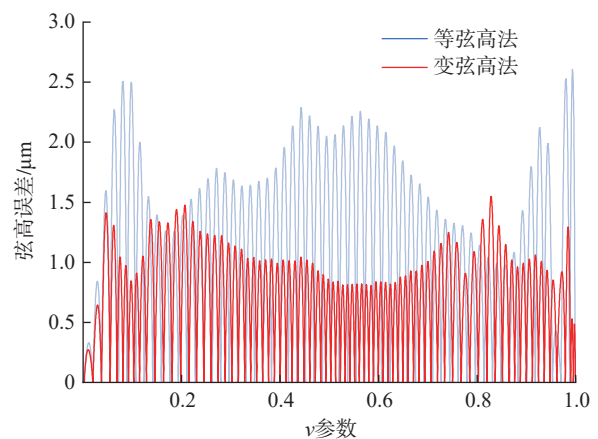


图 13 $u=0.93$ 刀轨的弦高误差

Fig.13 Chord height error of the knife track at $u=0.93$

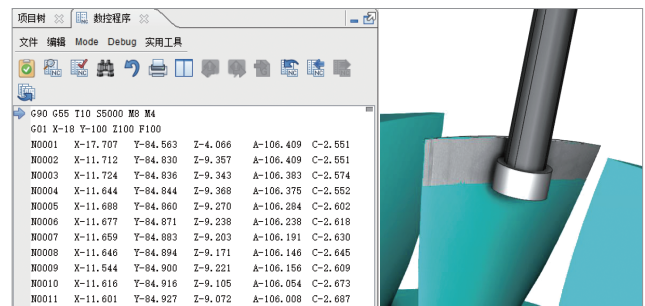


图 14 部分加工代码及仿真过程

Fig.14 Partial machining code and simulation process

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

砂轮序号	组号	刀轨规划方法	刀轨数/条	最大欠切量/ μm
1	a	等弦高法	41	17.61
	b	变弦高法	41	14.17
2	c	等弦高法	32	15.12
	d	变弦高法	32	14.01

表5 欠切量分析
Table 5 Undercut analysis

砂轮序号	组号	最大值	平均数	中位数	标准差
1	a	17.61	4.79	4.53	9.42
	b	14.17	3.19	2.79	5.27
2	c	15.12	4.25	3.86	2.82
	d	14.00	2.66	2.27	1.98

μm

5 结论

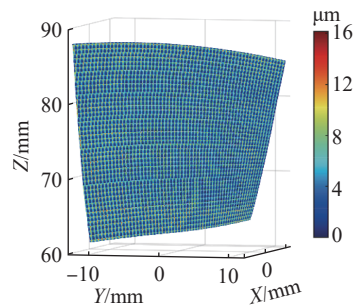
(1) 结合开式整体叶盘叶型曲面空间曲率分布,考虑砂轮几何形状对加工行宽的影响,提出了一种改进的变弦高轨迹规划方法。所提刀轨规划方法通过控制弦高,增加了在曲率较大处的刀位点数,使得欠切量的整体分布更为均匀,欠切量的标准差由 2.82 μm 减至 1.98 μm 。

(2) 仿真计算表明,本文所提方法可将弦高误差控制在允许范围内,等弦高法生成的刀轨在曲率较大处弦高误差会超过允许的最大弦高误差 2 μm ,而改进后弦高误差均在 1 μm 左右。

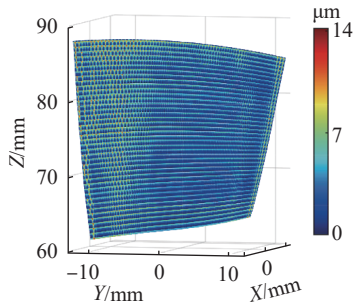
(3) 考虑叶片曲面的凹凸特征和运动约束对刀轴方向主曲率的影响,扩展了鼓形砂轮的设计原则。结果表明,所提原则可有效增大鼓形半径选择范围,从而增大加工行宽,在保证欠切量一致的情况下,刀轨数从 41 条减至 32 条。

参考文献

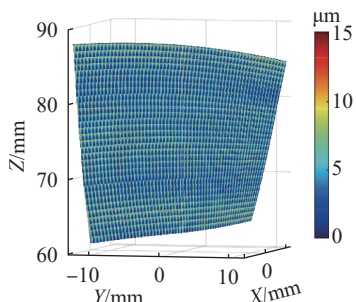
- [1] 黄云,李少川,肖贵坚,等.航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状[J].航空材料学报,2021,41(4):17-35.
HUANG Yun, LI Shaochuan, XIAO Guijian, et al. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 17-35.
- [2] 王增强.先进航空发动机关键制造技术[J].航空制造技术,2015,58(22):34-38.
WANG Zengqiang. Key manufacturing technology of advanced aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 34-38.
- [3] MA K W, HAN L, SUN X X, et al. A path planning method of robotic belt grinding for workpieces with complex surfaces[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(2): 728-738.
- [4] XIE H L, LI J R, LIAO Z Y, et al. A robotic belt grinding approach based on easy-to-grind region partitioning[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 830-844.
- [5] LV Y J, PENG Z, QU C, et al. An adaptive trajectory planning algorithm for robotic belt grinding of blade leading and trailing edges based on material removal profile model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 66: 101987.
- [6] LI W L, XIE H, ZHANG G, et al. 3-D shape matching of a blade surface in robotic grinding applications[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(5): 2294-2306.
- [7] 罗来臻,赵欢,王辉,等.复杂曲面机器人磨抛位姿优化与刀路规划[J].机械工程学报,2022,58(3):284-294.
LUO Laizhen, ZHAO Huan, WANG Hui, et al. Pose optimization and tool path planning for robotic grinding of complicated curved surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 284-294.
- [8] 李飞,陈树林,崔庞博,等.整体叶盘机器人砂带磨削轨迹优化及其实验[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(1):23-29.
LI Fei, CHEN Shulin, CUI Pangbo, et al. Trajectory optimization and experiment of robotic belt grinding blisk[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(1): 23-29.



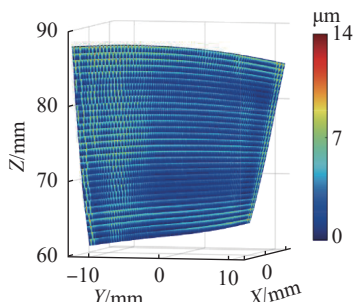
(a) 1号砂轮,等弦高刀轨



(b) 1号砂轮,变弦高刀轨



(c) 2号砂轮,等弦高刀轨



(d) 2号砂轮,变弦高刀轨

图15 加工欠切量

Fig.15 Undercut in machining

(下转第150页)

[2] 张浩. 基于 z 向渗透率研究的大型曲面构件液体成型工艺设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

ZHANG Hao. Liquid forming process design of large curved components based on z -direction permeability research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[3] 庄恒飞, 潘利剑, 刘卫平, 等. VARI成型厚度稳定与抽真空时间的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(2): 5–10.

ZHUANG Hengfei, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. A study of the steady thickness by the vacuum assisted resin infusion process and the vacuum keeping time[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(2): 5–10.

[4] 刘姝呈, 李林秀, 潘利剑, 等. 自动铺放工艺参数对干纤维预成型体工艺性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2020(11): 93–101.

LIU Shucheng, LI Linxiu, PAN Lijian, et al. Effect of automatic placement process parameters on process performance of dry fiber preforms[J]. Composites Science and Engineering, 2020(11): 93–101.

[5] 段振锦, 潘利剑, 刘卫平, 等. 干纤维铺放真空辅助成型复合材料的性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(12): 43–48.

DUAN Zhenjin, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. Structure and properties of vacuum assisted molding composite for dry fiber[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(12): 43–48.

[6] 聂玉强, 付晨辰, 彭运松. 干纤维自动铺放-液体成型技术进展研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(4): 19–26.

NIE Yuqiang, FU Chenchen, PENG Yunsong. Research on progress of automatic dry fiber laying-liquid forming[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(4): 19–26.

[7] ROTH Y C, WEINHOLDT M, WINKELMANN L. Liquid composite moulding-enabler for the automated production of CFRP aircraft components[C]//Proceedings of the 16th European Conference on Composite Materials, ECCM. 2014: 22–26.

[8] LAURENZI S, MARCHETTI M. Advanced composite materials by resin transfer molding for aerospace applications[J]. Composite Structures, 2022, 297: 115913.

[9] SHARMA S, SIGINER D A. Permeability measurement methods in porous media: A review[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Naples, 2008, 179–200.

[10] VERNET N, RUIZ E, ADVANI S, et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 61: 172–184.

[11] 郭俊刚, 张新娟, 田亦瑶, 等. 复合材料液体成型技术在飞机上的应用及发展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(2): 85–91.

GUO Jungang, ZHANG Xinjuan, TIAN Yiyao, et al. Development and application of liquid composite molding technique on aircraft[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(2): 85–91.

[12] 宁莉, 杨绍昌, 冷悦, 等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程, 2020(5): 123–128.

NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology[J]. Composites Science and Engineering, 2020(5): 123–128.

[13] 李先阳, 刘彬, 于雅琳, 等. 碳纤维复杂构件LCM成型工艺技术发展综述[J]. 复合材料科学与工程, 2023(11): 116–121.

LI Xianyang, LIU Bin, YU Yalin, et al. A review of the development of LCM forming technology for carbon fiber complex components[J].

Composites Science and Engineering, 2023(11): 116–121.

通信作者: 潘利剑, 副教授, 博士后, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料。

(责编 七七)

(上接第 143 页)

[9] 詹庆荣, 段鹏飞, 吴路路, 等. 基于改进弦高误差约束的机器人曲面磨削轨迹规划[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 58–62.

ZHAN Qingrong, DUAN Pengfei, WU Lulu, et al. Robot surface grinding trajectory planning based on improved chord height error constraint[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 58–62.

[10] 戴士杰, 张熠, 王志平, 等. 基于NURBS的航空发动机叶片焊接修复的轨迹规划[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 23–26, 114.

DAI Shijie, ZHANG Yi, WANG Zhiping, et al. Trajectory planning of welded repair for aero-engine blades based on NURBS curve[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 23–26, 114.

[11] 张铁, 张斌. 机器人砂带磨削路径优化插补算法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(8): 983–990.

ZHANG Tie, ZHANG Bin. Optimized interpolation algorithm for robotic belt grinding processes[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(8): 983–990.

[12] 王汝传, 黄海平, 林巧民. 计算机图形学教程[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

WANG Ruchuan, HUANG Haiping, LIN Qiaomin. Computer graphics[M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009.

[13] 黄紫双. 基于NURBS的曲面拟合和优化方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.

HUANG Zishuang. Research on surface fitting and optimization method based on NURBS[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.

[14] 孔德明, 黄紫双, 杨丹. 二次曲面的NURBS最优化表示方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(8): 909–917.

KONG Deming, HUANG Zishuang, YANG Dan. Research on NURBS optimization expression method of quadric surfaces[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(8): 909–917.

[15] 孙玉文, 徐金亭, 任斐, 等. 复杂曲面高性能多轴精密加工技术与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

SUN Yuwen, XU Jinting, REN Fei, et al. High-performance multi-axis precision machining technology and method for complex surfaces[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[16] SUN Y W, WANG X M, GUO D M, et al. Machining localization and quality evaluation of parts with sculptured surfaces using SQP method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(11): 1131–1139.

[17] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2013.

SHI Fazhong. Computer aided geometric design and non-uniform rational B-spline[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.

通信作者: 金滩, 教授, 博士生导师, 研究方向为磨削技术和理论, 以及高速磨削传热理论。

(责编 七七)