

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.003

面向复杂曲面的机器人砂带磨抛路径 规划及后处理研究^{*}

毛洋洋, 赵 欢^{*}, 韩世博, 丁 汉
(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对机器人砂带磨抛复杂曲面叶片问题,对叶片内外型面和进排气边的磨抛路径规划及后处理技术进行了研究,对复杂曲面叶片的机器人砂带磨抛路径规划的计算效率及加工效率进行了分析,提出了一种将基于等残留高度法的笛卡尔空间计算的磨抛行距转化为参数域空间的磨抛行距的方法,并将机器人砂带磨抛复杂曲面叶片接触轮的中心坐标位置、支撑轴矢量以及轴线矢量数据后处理为机器人的位姿信息,利用机器人砂带磨抛系统装备实验平台对复杂曲面叶片进行了实际的加工实验。研究表明:所提出的刀路规划和后处理技术能够有效地解决机器人砂带磨抛复杂曲面叶片的问题,具有加工路径总长短以及路径条数少的特点,计算简单、加工效率高、加工表面质量好。

关键词:刀路规划;后处理;机器人砂带磨抛;复杂曲面

中图分类号:TH16;TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0829-06

Tool path planning and post-processing techniques of robotic belt grinding for complex surfaces

MAO Yang-yang, ZHAO Huan, HAN Shi-bo, DING Han

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems of the complex blades of robotic belt grinding, the tool path planning and post-processing techniques were studied, which were used in the profile, intake and exhaust sides of the complex blades. After the analysis of the computational efficiency and machining efficiency for the complex surfaces of robotic belt grinding path planning, the method was purposed to put the line spacing in Cartesian space based on the residual height into the parametric line spacing, and the data of the central coordinates position, supporting axial vector and axial vector of the contact wheel was post-processed into the pose information of robot. The actual processing tests were carried out on the platform of the robotic belt grinding equipment. The results indicate that the tool path planning and post-processing method can effectively solve the complex problem of grinding the surface of the complex blades, and can also possess the characteristics of less machining path length and the total number, with a simple calculation, high efficiency, high precision machining.

Key words: tool path planning; post-processing; robotic belt grinding; complex surfaces

0 引 言

叶片是一种典型的复杂自由曲面零件,在航空发动机中起着能量转换的关键作用,是“发动机的心脏”^[1-3]。随着灵活性好、通用性强的机器人和磨削精

度高、磨削工件表面质量好的砂带相结合,并实际应用于复杂曲面叶片加工领域中,刀具路径的规划和机器人砂带磨抛的后置处理方法逐渐成为磨抛过程中的基本问题。因此,如何规划好的砂带磨抛刀具路径,并将叶片上获得的刀位信息后处理为机器人的位姿信息,是基于复杂曲面叶片机器人砂带磨抛的重要课题。

收稿日期:2016-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51535004,51323009)

作者简介:毛洋洋(1992-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事机器人磨抛加工方面的研究. E-mail:maoyangyang@hust.edu.cn

通信联系人:赵欢,男,讲师, E-mail:huanzhao@hust.edu.cn

张海洋等^[4]针对叶片类复杂曲面零件,采用等弦高误差法和等残留高度法分别作为磨削步长和行距的计算方法,加工精度和加工效率高,却没有考虑刀路规划的计算效率。Ding 等^[5]提出的自适应等截平面刀具路径生成方法需要依据曲面的斜率将其划分为不同的区域,并利用残留高度作为自由曲面加工的行距计算方法。Wang 等^[6]提出了雕刻曲面的等参数刀具路径生成方法,参数线不仅可以均匀地分布在曲面上,而且计算简单,但是残留高度较大,加工精度不高。Li 等^[7]针对自由曲面五轴加工提出了等残留高度作为相邻刀路生成方法,以最大化加工效率,并说明了传统的等参数线法生成的刀路不仅总长超过等残高法生成的刀路总长的 36%,而且加工效率更低。Sun 等^[8]针对多面体加工提出了由三角网格产生的等参数刀路方法而非等平面方法,其优势在于刀路可以沿着多面体的边界自然产生。杜鹏飞^[9]针对叶片几何特性规划砂带磨削路径时,提出了双矢量编程方法,解决了砂带接触轮表面与叶片型面的局部几何特性匹配问题。周金强^[10]在工件模型上规划出加工路径,然后运用 D-H 法后置处理生成机器人系统能够运行的加工代码,最终驱动机器人进行加工。石璟^[11]根据加工中刀具与工件的相对位姿,通过将机床视为特殊结构的机器人,反解了机床的各个关节运动参量。综上所述,张海洋, Ding 和 Li 将等残留高度法作为磨削行距的计算方法,可以很好地兼顾加工效率和加工精度,但是计算效率不高。Wang 和 Sun 采用的参数线法加工精度和效率不高,但是计算简单。因此,刀具路径规划的过程中如何更好地兼顾计算效率、加工效率及加工精度,并将刀位信息后处理为机器人的驱动信息,依然是亟待解决的问题。

针对上述问题,本研究以复杂曲面叶片的机器人砂带磨抛,研究了刀路规划与后处理技术,提出了将笛卡尔空间的磨抛行距转化为参数行距的方法,以适应复杂曲面叶片的构型,并结合 UG\NX9.0 API,二次开发出刀路规划软件。同时将获得的刀位数据进行机器人砂带磨抛理想位姿的后处理,最后在机器人砂带磨抛系统装备上进行试验验证。

1 叶片刀路规划

生成复杂曲面叶片型面和进排气边的刀路步骤可以分为两个部分:加工区域提取及加工路径生成。

其基本思想如下:首先在叶片待加工区域选择边界曲线,然后分析其边界曲线的 x, y, z 方向的最值,根据分析得到的 x, y, z 方向的最值做截平面分割叶片提取加工区域。待加工区域提取完成后,本研究在该区域内生成第一条路径曲线(一般选取截平面与叶片型面或进排气边相交线),选取曲线起点作为第一个目标

点,然后采用等弦高误差法顺序计算单条路径曲线上的加工步长,确定刀触点,直至生成的刀触点超出曲线的有效范围。最后根据当前路径曲线上的刀触点采用等残留高度法计算各点对应的笛卡尔空间的加工行距值,并选取其中的最小值将其转化为参数域空间的参数值,以此确定下一条路径曲线所在的位置。如果该曲线在提取的加工区域内,则继续生成加工路径;否则终止计算。

其对应的算法流程如图 1 所示。

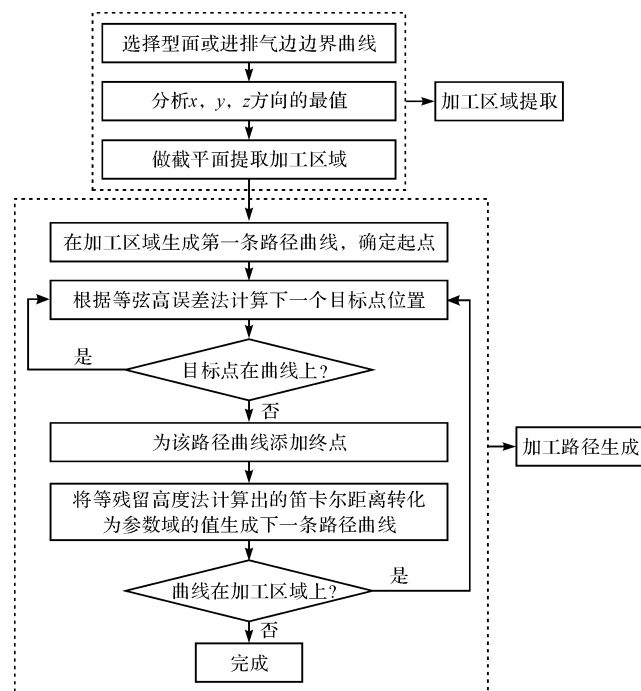


图 1 叶片刀路规划算法流程图

1.1 加工步长计算

在加工区域生成的路径曲线上取得刀触点的过程实际上就是对加工路径的离散化过程,即用一系列的直线段分段低次插值逼近空间曲线。相邻刀触点之间的距离称为加工步长,其对曲面的加工轮廓精度影响很大^[12]。当加工路径刀触点之间的步长很大时,复杂曲面的轮廓精度就很低,表面质量也很差;当加工路径刀触点之间的步长很小时,则生成的刀触点过于密集,后处理工作量大,严重影响复杂曲面轮廓的加工效率。

加工步长常用控制方法是等弦高误差法,弦高误差指的是刀位点连线到刀轨的最大距离,加工步长示意图如图 2(a) 所示。等弦高误差法则是使各离散直线段对应的弦高误差相等,该方法能够根据工件表面的曲率变化分别计算每一个目标点的位置,得到不同的步长。因此等弦高误差法既可以减少目标点的数量,简化计算和程序的后置处理,提高加工效率,又可以很好地兼顾加工精度,满足复杂曲面的加工要求。

图 2(a) 中, R_1, R_2 两目标点处的曲率半径通常

不相等,但是由于在实际加工过程中加工步长 l 很小,两者的差别并不显著。为了简化计算,可近似认为 $R = R_1 = R_2$ 。依据几何关系有:

$$l \leq \sqrt{8R\varepsilon} \quad (1)$$

式中: ε —加工允许的弦高误差。

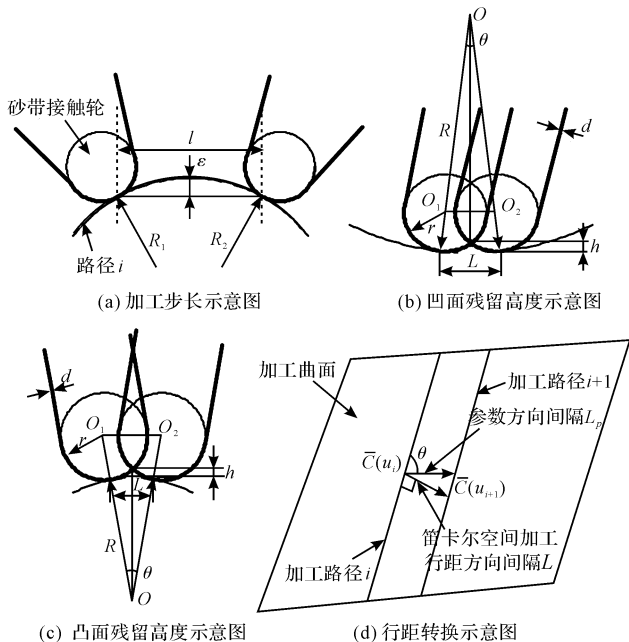


图2 磨抛路径规划示意图

1.2 加工行距计算

加工行距指的是两相邻磨削行刀触点路径之间的距离。加工行距与残留高度密切相关,行距过大则表面残留高度增大,复杂曲面的加工精度就低;行距过小则加工路径增多,复杂曲面的加工效率下降。因此,为了兼顾叶片加工效率和加工精度,需要对加工行距做出合理的规划。等残留高度法是根据叶片的局部曲率特征,动态地生成每一条加工轨迹,所以其能够使得规划路径的残留高度取得最大允许值,从而降低磨削次数提高加工效率。

叶盆为凹面,当砂带接触轮沿规划的加工路径磨削叶盆时,其示意图如图2(b)所示。根据图示的几何关系,有:

$$R_a = r + d \quad (2)$$

式中: r —接触轮半径, d —砂带厚度。

且有:

$$L \approx 2 \sqrt{2R_a h} \sqrt{\frac{R}{R - R_a}} \quad (3)$$

式中: L —磨削行距, h —残留高度, R —目标点处的曲率半径。

当砂带接触轮沿规划的加工路径磨削叶背(叶背为凸面)时,其示意图如图2(c)所示,按照磨削叶盆时的计算推导同理可得,加工行距 L 为:

$$L \approx 2 \sqrt{2R_a h} \sqrt{\frac{R}{R + R_a}} \quad (4)$$

1.3 加工行距转换

利用1.2节中的公式(3)和公式(4)即可获得笛卡尔空间下的加工行距,然而,笛卡尔空间的加工行距并不能直接用于参数域空间,这是因为:(1)笛卡尔空间加工行距的方向与参数曲线的方向并不相同,如图2(d)所示;(2)笛卡尔空间加工行距的单位与参数域空间路径曲线的行距单位并不相同。因此,必须将笛卡尔空间的加工行距转换为参数域空间的参数行距。Rong-Shine Lin^[13]指出:

$$L_p = \frac{L}{\sin \theta} \quad (5)$$

式中: L —上文中求得的叶盆(凹面)或叶背(凸面)的加工行距, L_p —参数方向的路径间隔, θ —笛卡尔空间刀具路径与参数域空间参数曲线之间的夹角。

为求得公式(5)中的 θ ,可利用计算式:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{u}} \cdot (-\mathbf{T})}{\left| \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{u}} \right| \cdot |\mathbf{T}|} \right) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{T}$ —笛卡尔空间刀具路径的切向矢量, $\partial \mathbf{C} / \partial \mathbf{u}$ —参数域空间参数曲线的切向矢量。

然后,本研究使用泰勒展开式将参数方向的路径间隔 L_p 转化为参数域空间参数曲线的参数行距 Δu 。给定参数曲线 $\mathbf{C}(u)$, $0 \leq u \leq 1$,在 u_i 处作泰勒展开式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(u_{i+1}) &= \mathbf{C}(u_i) + \mathbf{C}'(u_i) \Delta u + \\ &\quad \frac{1}{2!} \mathbf{C}''(u_i) \Delta u^2 + \frac{1}{3!} \mathbf{C}'''(u_i) \Delta u^3 + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Delta u = u_{i+1} - u_i$, Δu —参数域空间加工路径对应的参数行距, u_i —参数域空间第 i 条刀具路径对应的参数值, u_{i+1} —第 $i+1$ 条刀具路径对应的参数值; $|\mathbf{C}(u_{i+1}) - \mathbf{C}(u_i)|$ —参数方向对应的路径间隔,即 L_p 。忽略高阶项,路径间隔可由下式表示:

$$L_p = |\mathbf{C}(u_{i+1}) - \mathbf{C}(u_i)| = |\mathbf{C}'(u_i) \Delta u| \quad (8)$$

而参数曲线 $\mathbf{C}(u)$ 可以表示为:

$$\mathbf{C}(u) = x(u)\mathbf{i} + y(u)\mathbf{j} + z(u)\mathbf{k} \quad (9)$$

所以可得:

$$L_p^2 = A \Delta u^2 \quad (10)$$

其中:

$$A = \left[\left(\frac{dx}{du} \right)^2 + \left(\frac{dy}{du} \right)^2 + \left(\frac{dz}{du} \right)^2 \right]_{u=u_i}$$

因此,参数域空间加工路径对应的参数行距值 Δu 计算式为:

$$\Delta u = \frac{L_p}{\sqrt{\left[\left(\frac{dx}{du} \right)^2 + \left(\frac{dy}{du} \right)^2 + \left(\frac{dz}{du} \right)^2 \right]_{u=u_i}}} \quad (11)$$

2 刀位点计算

因为砂带与叶片表面是线接触,为了获得准确的型面必须同时控制接触点的法向矢量方向和轴向矢量方向。因此,叶片砂带磨削加工采用控制接触轮的中心点、接触轮的支撑轴矢量和接触轮的轴向矢量的点-双矢技术,实现砂带接触轮精准磨削叶片等复杂曲面零件的运动。

2.1 接触轮中心坐标

叶片砂带磨削的运动轨迹是接触轮中心轨迹的曲线,砂带接触轮的中心点坐标可以通过接触点沿法向偏置接触轮的半径 r 得到。砂带磨削叶片示意图如图 3 所示。

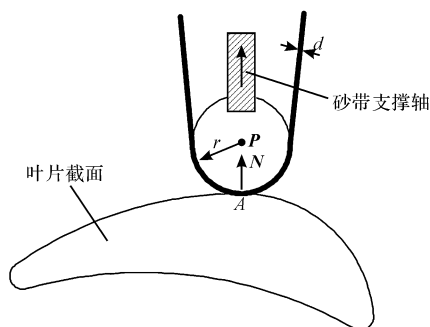


图 3 砂带磨削叶片示意图

A 点—砂带磨削叶片接触点,其坐标为 $A(A_x, A_y, A_z)$; P 点—砂带接触轮的中心点,其坐标为 $P(X, Y, Z)$; N —叶片曲面上磨削接触点的单位法向矢量,其大小为 $N(N_x, N_y, N_z)$; r —砂带接触轮的半径; d —砂带的厚度

则砂带接触轮的中心坐标为:

$$\begin{cases} X = A_x + (r + d) \cdot N_x \\ Y = A_y + (r + d) \cdot N_y \\ Z = A_z + (r + d) \cdot N_z \end{cases} \quad (12)$$

2.2 接触轮支撑轴矢量

砂带接触轮支撑轴矢量用于控制磨削浮动压力方向,由于在磨削过程中,接触轮与叶片型面的接触姿态唯一确定,为确保这一姿态不变,可选定接触轮支撑轴矢量 (I, J, K) 与砂带接触轮磨削叶片接触点处的法向矢量 (N_x, N_y, N_z) 一致,即:

$$\begin{cases} I = N_x \\ J = N_y \\ K = N_z \end{cases} \quad (13)$$

2.3 接触轮轴线矢量

对于圆柱形刀具,获得最小磨削干涉的刀具与磨削曲面的最佳接触条件是:刀具轴线与加工面在接触点处的最小曲率方向重合。为了使砂带与加工面在刀触点处的接近程度最高、干涉最小,其刀轴矢量应位于

接触点处曲面的最小曲率方向^[14]。

设叶片曲面 $S = S(u, v)$, 则法曲率^[15] k_n :

$$k_n = \frac{1}{\rho_n} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2} \quad (14)$$

其中: $L = S_{uu} \cdot n$, $M = S_{uv} \cdot n$, $N = S_{vv} \cdot n$, $E = S_u \cdot S_u$, $F = S_u \cdot S_v$, $G = S_v \cdot S_v$; n —砂带磨削叶片接触点处的法向矢量; S_u, S_v —曲面 $S = S(u, v)$ 的一阶导函数; S_{uu}, S_{uv}, S_{vv} —曲面 $S = S(u, v)$ 的二阶导函数; du —沿 u 向参数线的微分; dv —沿 v 向参数线的微分。

为计算方便,设 $\lambda = dv/du$, 把它代入上式,得:

$$k_n = \frac{L + 2M\lambda + N\lambda^2}{E + 2F\lambda + G\lambda^2} \quad (15)$$

由上式求得:

$$\begin{cases} du_i = N - k_i G \\ dv_i = k_i F - M \end{cases}, i = 1, 2 \quad (16)$$

式中: k_i —两个主曲率,根据砂带磨削性能需求,取绝对值小的 k_i 值所对应的 du, dv 确定刀轴方向,即:

$$(U, V, W) = duS_u + dvS_v \quad (17)$$

3 机器人砂带磨抛叶片后置处理

Comau NJ220-2.7 机器人驱动代码为 PDL2 语言。末端执行器位姿点由 (X, Y, Z, A, E, R) 组成, 其中: X, Y, Z —末端执行器三维坐标; A, E, R —绕 z 轴、绕 y 轴、绕 z 轴的旋转角。因此机器人砂带磨抛叶片后置处理的关键是将刀路规划的刀位点转化为 (X, Y, Z, A, E, R) 位姿点。

3.1 工件坐标系下的位姿矩阵

工业机器人砂带磨削复杂曲面叶片时,一方面需要控制砂带接触轮的中心坐标位置 $\{P\}$ (由公式(12)确定)和砂带接触轮支撑轴矢量 $\{N\}$ (由公式(13)确定),另一方面也需要控制砂带接触轮的轴线矢量 $\{T\}$ (由公式(17)确定)。根据砂带接触轮中心坐标位置、砂带接触轮支撑轴矢量和轴线矢量可以建立接触轮位姿的齐次矩阵,确定接触轮的唯一姿态。

刀位点处的副法向矢量 $\{B\}$ 可以通过接触轮支撑轴矢量 $\{N\}$ 和轴线矢量 $\{T\}$ 的正交关系求得:

$$B = T \times N \quad (18)$$

通过以上方法即可求得所需的刀位信息,信息中包括砂轮中心位置 $\{P\}$ 、砂轮支撑轴矢量 $\{N\}$ 、砂轮的轴线矢量 $\{T\}$ 和副法向矢量 $\{B\}$ 。

工件坐标系下的刀位信息图如图 4 所示,砂带接触轮中心坐标位置 $\{P\}$ 、砂带接触轮支撑轴矢量 $\{N\}$ 、砂带接触轮轴线矢量 $\{T\}$ 和副法向矢量 $\{B\}$ 可以构造出在工件坐标系 $\{W\}$ 下的齐次矩阵^[16] ${}^W T$:

$${}^W T = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x & p_x \\ n_y & t_y & b_y & p_y \\ n_z & t_z & b_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

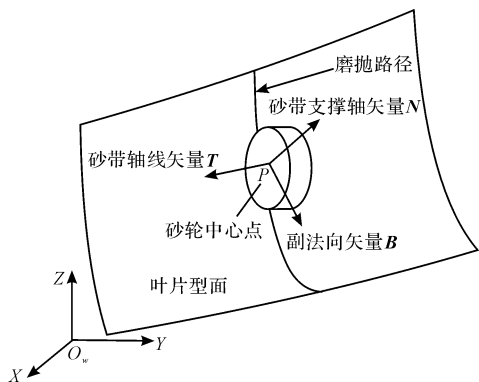


图4 工件坐标系下的刀位信息图

3.2 运动学逆解

末端执行器位姿点由 (X, Y, Z, A, E, R) 组成。由3.1节中可知, X, Y, Z 分别由 p_x, p_y, p_z 确定, A, E, R 由旋转矩阵 R 确定, 其中:

$$R = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x \\ n_y & t_y & b_y \\ n_z & t_z & b_z \end{bmatrix}$$

又由 A, E, R 旋转构成的变换矩阵为:

$$R(\varphi) = R_z(A)R_y(E)R_x(R) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos A \cos E \cos R - \sin A \sin R, \\ r_{12} &= -\cos A \cos E \sin R - \sin A \cos R, \\ r_{13} &= \cos A \sin E, \\ r_{21} &= \sin A \cos E \cos R + \cos A \sin R, \\ r_{22} &= -\sin A \cos E \sin R + \cos A \cos R, \\ r_{23} &= \sin A \sin E, \\ r_{31} &= -\sin E \cos R, \\ r_{32} &= \sin E \sin R, \\ r_{33} &= \cos E. \end{aligned}$$

当 $E \in (0, \pi)$, 逆解求得:

$$\begin{cases} A = \text{Atan2}(b_y, b_x) \\ E = \text{Atan2}(\sqrt{b_x^2 + b_y^2}, b_z) \\ R = \text{Atan2}(t_z, -n_z) \end{cases}$$

当 $E \in (-\pi, 0)$, 逆解求得:

$$\begin{cases} A = \text{Atan2}(-b_y, -b_x) \\ E = \text{Atan2}(-\sqrt{b_x^2 + b_y^2}, b_z) \\ R = \text{Atan2}(-t_z, n_z) \end{cases}$$

4 实验及结果分析

机器人砂带磨削系统装备图如图5所示。

该系统主要由机器人、工件及砂带磨抛机组成。机器人型号为 Comau NJ220-2.7, 手腕负载 220 kg, 最

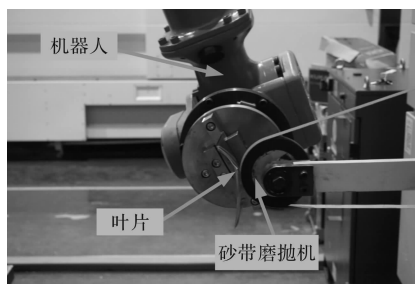


图5 机器人砂带磨削系统装备图

大工作半径 2 701 mm, 重复精度 ± 0.075 mm。砂带磨抛机型号为 HS-R136, 电机转速为 2 800 r/min, 功率 2.2 kW。试验中使用的砂带为 GXK-51 P180, 即密植砂全树脂重布棕刚玉砂带, 粒度为 180#, 砂带规格(周长×宽度)为 2 500 mm×22 mm。砂带接触轮的线速度是 10.263 m/s, 机器人的进给速度为 20 mm/s。

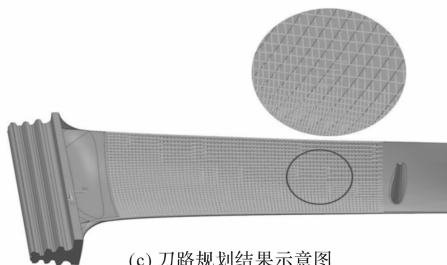
本研究利用上文阐述的叶片刀路规划和机器人砂带磨抛叶片后置处理方法, 结合 UG\NX9.0 API, 二次开发出刀路规划软件。叶片模型图如图6(a)所示, 设置的加工轨迹规划参数如图6(b)所示, 即弦高误差为 0.05 mm, 残留高度为 0.2 mm, 随后进行刀路规划和刀位点计算, 得到的刀路规划结果如图6(c)所示, 包括叶片砂带磨削接触点、接触轮支撑轴矢量和接触轮轴线矢量。



(a) 叶片模型图



(b) 软件界面图



(c) 刀路规划结果示意图

图6 叶片模型及刀路规划结果示意图

等参数线法、等残高法以及本研究方法生成复杂

曲面机器人砂带磨抛刀具路径性能数据的对比表如表 1 所示。

表 1 刀具路径性能对比表

路径类型	等参数线法	等残高法	本研究方法
路径长/mm	17 312.1	16 843.8	16 555.9
路径条数	113	92	77
计算效率/s	2.3	10.6	2.1
加工效率/s	865.6	842.2	827.8
加工精度	Ra0.8	Ra0.4	Ra0.2

从表 1 中可知,本研究方法较等参数线法和等残高法的计算效率更高,其加工精度也较等参数线法和等残高法具有更加明显的优势。此外,数据表明,本研究方法生成的刀具路径总长较等参数线法和等残高法短,路径条数也较等参数线法和等残高法少。因而在满足加工精度的前提下,本研究方法的路径转向次数较等参数线法和等残高度少,所以加工效率更高。

为了验证上述理论的有效性,本研究进行加工试验,加工后的效果如图 7 所示。



图 7 机器人磨抛叶片图

5 结束语

(1)针对等残高法计算复杂但加工效率高、参数线法计算简单但加工效率低的问题,本研究提出了将笛卡尔空间的磨抛行距转化为参数行距的方法,既使计算简单、又使加工效率高。

(2)本研究对机器人砂带磨抛接触轮的刀位数据进行了后置处理,转化为机器人末端的理想位姿。

(3)本研究开展了机器人砂带磨抛叶片的生产加工试验,结果表明了上述关于刀路规划和后处理算法的有效性,并具有计算简单、加工效率高、加工表面质量好的特点。

参考文献(References):

[1] 赖喜德. 叶片式流体机械的数字化设计与制造[M]. 成都:四川大学出版社,2007.

[2] 刘诗汉,马 虎. 航空涡轮叶片叶身造型参数仪设计[J]. 兵工自动化,2015,34(4):55-59,63.

[3] 田国富,董宜荣,高 峰,等. 基于 NX 和 VERICUT 的叶片加工仿真研究[J]. 机械,2015,44(5):38-40,76.

[4] 张海洋,杨文玉,张家军,等. 叶片机器人砂带磨抛的轨迹规划研究[J]. 机电工程,2014,31(5):578-581.

[5] DING S, MANNAN M A, POO A N, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces[J]. **Computer-Aided Design**,2003,35(2):141-153.

[6] WANG Y M, TANG X S. Five-axis NC machining of sculptured surfaces[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,1999,15(1):7-14.

[7] LI H, FENG H Y. Efficient five-axis machining of free-form surfaces with constant scallop height tool paths[J]. **International Journal of Production Research**,2004,42(12):2403-2417.

[8] YUWEN S, DONGMING G, HAIXIA W. Iso-parametric tool path generation from triangular meshes for free-form surface machining[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**,2006,28(7-8):721-726.

[9] 杜鹏飞. 多轴叶片砂带磨削轨迹生成技术研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2009.

[10] 周金强. 基于 UG 的工业机器人离线编程系统[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2013.

[11] 石 璟. 面向叶片加工的数控砂带抛磨系统的研究[D]. 无锡:江南大学机械工程学院,2009.

[12] PARK H, KIM K, LEE S C. A method for approximate NURBS curve compatibility based on multiple curve refitting[J]. **Computer-Aided Design**,2000,32(4):237-252.

[13] LIN R S, KOREN Y. Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces[J]. **Journal of Engineering for Industry**,1996(1):20-28.

[14] MARCINIAK K. Influence of surface shape on admissible tool positions in 5-axis face milling[J]. **Computer-Aided Design**,1987,19(5):233-236.

[15] 梅向明,黄敬之. 微分几何[M]. 上海:高等教育出版社,2008.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: