DOI: 10.3901/JME.2019.07.225

自由曲面平头立铣刀五轴加工铣削力预报*

郭明龙 魏兆成 王敏杰 李世泉 刘胜贤

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 铣削力是优化工艺参数,设计机床、刀具和夹具的重要依据。针对自由曲面平头立铣刀五轴宽行加工,提出了一种基于空间限定法的刀刃接触区间解析算法,建立了考虑刀具偏心的铣削力预报模型。基于微分离散思想,自由曲面看成一系列微小斜平面,以斜平面平头立铣刀五轴加工为研究对象,参数化定义刀具几何、进给方向和工件三者间的任意关系,界定刀刃微元参与切削的条件,沿刀刃曲线搜索获得整个刀刃接触区间,结合微元铣削力模型,构建了平头立铣刀斜平面五轴加工铣削力模型,即可实现对自由曲面平头立铣刀五轴加工的铣削力预报,并推导出铣削力由刀具坐标系到工件坐标系的转换矩阵。刀刃接触区间仿真表明,该空间限定法与刀具接触区域限定法相比算法更简单,通用性更强;与实体法相比效率更高。铣削力试验表明,测量铣削力与预报铣削力在趋势和幅值上总体吻合良好,证明了该铣削力预报模型的有效性。

关键词: 铣削力预报; 刀刃接触区间; 五轴宽行加工; 自由曲面; 平头立铣刀

中图分类号: TG506

Force Prediction Model for Five-axis Flat End Milling of Sculptured Surface

GUO Minglong WEI Zhaocheng WANG Minjie LI Shiquan LIU Shengxian

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Milling force is an important basis for optimizing process parameters, designing machine tools, cutters and fixtures. An analytical algorithm of in-cut cutting edge based on space constraint method is proposed for five-axis flat end milling of sculptured surface, and the prediction model of milling force is established considering cutter runout. Based on the idea of differential discretization, the sculptured surface can be assumed as a series of tiny inclined plane. The arbitrary relation between cutter geometry, feed direction and workpiece is defined by parameterization taking the five-axis flat end milling of inclined plane as the object of study. The conditions of cutting edge element involved in cutting are proposed, and the entire in-cut cutting edge is obtained by searching along the edge curve. Combined with the classical micro-unit milling force model, force prediction model for five-axis flat end milling of inclined plane can be established, then the force prediction for five-axis flat end milling of sculptured surface can be realized. Moreover, the transition matrix of milling force from cutter coordinate system to workpiece coordinate system can be derived. The simulation results show that the spatial constraint method is simpler and more versatile than the cutter workpiece engagement limitation method. The experiment results show that the predicted force is in good agreement with measured force in both trend and amplitude, which proves the validity of the milling force prediction model.

Key words: prediction of milling force; in-cut cutting edge; five-axis wide strip machining; sculptured surface; flat end milling

0 前言

随着国家经济结构转型升级以及智能制造技术的不断推进,高效率、高质量加工成为数控加工技术发展的必然趋势。1982 年张洪教授率先提出非球头铣刀曲面宽行加工概念^[1],平头立铣刀曲面宽行加工在保证相同切削深度、残余高度情况下,与球

头铣刀相比可以获得更大的切削带宽,效率更高;同时平头立铣刀切削条件好,刀具制造、刃磨简单,使其在加工效率和切削性能上的优势日益突显。平头立铣刀曲面宽行加工是一种较复杂的铣削加工方法,加工过程中,刀刃接触区间即刀具刀刃参与切削工件材料部分,随着刀轴矢量、进给方向及工件几何的变化而变化。刀刃接触区间界定了未变形切屑厚度边界,是实现铣削力准确预报的前提。铣削力预报模型,是研究铣削颤振的基础,对选择合理加工参数,充分发挥机床性能,实现高效稳定铣削

* 辽宁省自然科学基金(201602174)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT17GF213)资助项目。20180419 收到初稿,20181213 收到修改稿

具有重要意义。

目前,经过 30 多年的发展,关于非球头铣刀曲面宽行加工的研究,主要集中在刀位算法及刀位优化^[2-8]、刀具轨迹优化^[9-10]方面。科学的刀轴矢量可以最大限度增加切削带宽,提高加工效率。VICKERS 等^[2]定义刀轴矢量与刀位点曲面法向成固定夹角;JENSEN 等^[3]考虑曲面几何信息,确定刀轴矢量与曲面法向夹角为 $\arcsin(KR)$,其中, K 为最大主曲率, R 为刀具半径;王小椿等^[4]通过使刀具外几何面与工件曲面在垂直于进给方向的法截面三阶密切来确定刀位点刀轴矢量;WARKENTIN 等^[5]基于工件与刀具间有两个接触点,且两个接触点关于曲面最小主曲率方向对称确定刀轴矢量;倪炎榕等^[6]提出基于刀位误差的最短距离线法确定刀轴矢量。朱利民等^[7]提出了一般回转刀具体扫掠包络面最佳的逼近设计曲面扫掠造型方法,成功应用于侧铣加工离散刀位优化。阎长罡等^[8]针对圆锥刀非可展直纹面侧铣加工,避开包络面的复杂计算,通过刀位点法向映射曲线最小二乘逼近特征线的方法,提出了一种最优刀位判定条件。合理的刀轨优化可以避免过切和干涉,同时减少走刀次数,提高表面质量和加工效率。GUO 等^[9]针对五轴侧铣加工,分别由几何误差图曲线和几何误差均衡分布原则确定刀轴矢量和刀位点,提出了一个新的刀具轨迹优化模型。SU 等^[10]针对曲面三轴加工,基于最大加工带宽的进给方向提出了一个刀具轨迹生成方法。刀位与刀轨优化技术可以尽可能增加带宽,减少走刀次数,在一定程度上提高了效率,但对抑制颤振,加工参数优化,机床利用率等方面指导有限。

平头立铣刀铣削力预报的相关研究多针对三轴平面加工^[11],利用简单的窗口函数判断刀刃微元是否参与切削。关于曲面加工铣削力的研究较少,主要困难在于确定变切削条件下的有效瞬时刀刃接触区间,FU 等^[12]将刀具和工件沿 z 方向进行薄层离散提取刀具接触区域,进而确定刀刃微元积分上下界,实现了一般通用刀具三轴曲面加工铣削力预报。ZHANG 等^[13]提出了平头立铣刀曲面五轴侧铣加工刀刃切入角与切出角算法,其刀具接触区域相对于刀具仍为规则矩形,且该模型不能适用于真正意义上的曲面五轴宽行加工。LUO 等^[14-15]同样基于矩形离散法获得平头立铣刀大轴向切深曲面五轴加工的刀具接触区域,建立铣削力预报模型。ZHU 等^[16]在一般通用刀具曲面五轴加工铣削力预报模型中,基于建立的刀刃微元转换理论结合 Z-Map 法获得刀具接触区域。上述研究中,刀刃接触区间的确定均建立在刀具接触区域上,通过刀刃曲线与其求交获

得。目前,关于曲面多轴加工刀具接触区域的界定包括实体建模法^[17]和离散法^[18],相关理论研究均比较成熟,但实体法涉及大量的布尔运算,效率低,且费用昂贵;离散法需对工件或刀具进行离散表达,求解精度低,限制了两者在大型复杂曲面加工仿真中的应用。

本文针对自由曲面平头立铣刀五轴加工,提出了一个基于空间区域限定,独立于刀具接触区域的刀刃接触区间算法,在此之上,建立了考虑刀具偏心的铣削力预报模型。针对斜平面平头立铣刀五轴加工,提出了刀刃微元参与切削的条件,进而搜索整条刀刃获得刀刃接触区间,结合考虑刀具偏心的瞬时未变形切屑厚度和经典斜角切削理论,建立斜平面平头立铣刀五轴加工铣削力预报模型,基于微分离散思想,将自由曲面五轴加工看成一系列微小斜平面五轴加工,即可获得自由曲面平头立铣刀五轴加工铣削力预报模型,为便于分析测量,推导了铣削力由刀具坐标系到工件坐标系的转换矩阵。文章总体思路如图 1 所示。

图 1 总体思路

1 斜平面加工参数化

自由曲面平头立铣刀五轴加工,基于微分离散的思想,可以离散成一系列微小斜平面平头立铣刀五轴加工。为便于构建铣削力预报模型,本节针对斜平面五轴加工,将刀轴看成竖直方向,对工件坐标系,刀具坐标系,进给方向角,斜面倾斜角,径向位置角作如下定义。

1.1 坐标系

如图 2 所示,刀具坐标系 $O-X_C Y_C Z_C$,原点 O 为刀具端面中心, Z_C 轴沿刀轴方向背离刀尖, X_C 轴为刀轴矢量 $\boldsymbol{p}$ 与工件法向 $\boldsymbol{n}$ 叉乘所得, Y_C 轴与 X_C 轴, Z_C 轴成右手系,刀具坐标系随刀轴不断变化,为动态坐标系。

图2 斜平面平头立铣刀五轴加工

为便于铣削力的测量分析, 定义编程坐标系为工件坐标系 $O-X_W Y_W Z_W$, 该坐标系为静态坐标系。

1.2 斜面倾斜角, 进给方向角和径向位置角

如图2所示, 斜面倾斜角 ε 为微小斜平面法向 $\mathbf{n}$ 与刀轴矢量 $\mathbf{p}$ 之间的夹角, 界定斜平面与刀轴之间的相对位置。表达式如下

$$\varepsilon = \arccos \left(\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}}{\|\mathbf{n}\| \|\mathbf{p}\|} \right) \quad (1)$$

进给方向角 γ 为进给方向 $\mathbf{f}$ 与刀具坐标系 X_C 轴正向之间的夹角, 界定进给方向在刀具坐标系内的相对位置, 平头立铣刀五轴加工, 为获得更大带宽, 达到更高铣削效率, 径向位置角一般为 $\pi/2$ 。表达式如下

$$\begin{cases} \gamma = \arccos \left(\frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{f}}{\|\mathbf{s}\| \|\mathbf{f}\|} \right) \\ \mathbf{s} = \mathbf{p} \times \mathbf{n} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{s}$ 为 X_C 轴的单位矢量。

平头立铣刀刀刃微元与该切削微元在刀具端面投影位置一一对应, 径向位置角 ϕ 为刀刃切削微元投影点与刀具坐标系 X_C 轴正向之间的夹角, 顺时针定义, 如图2所示, 界定刀刃微元在刀具坐标系中的位置。以半径为 R , 螺旋角为 β 的右旋平头立铣刀为例, 刀刃参数方程如下

$$\begin{cases} x = R \cos \phi \\ y = -R \sin \phi \\ z = R(\phi_0 - \phi) / \tan \phi \end{cases} \quad (3)$$

式中, ϕ_0 为该条刀刃底部微元对应的径向位置角。

2 斜平面五轴加工的刀刃接触区间

刀刃接触区间界定了未变形切削厚度的边界, 是构建铣削力预报模型的前提。对斜平面平头立铣刀三轴加工, 将平头立铣刀螺旋线刀刃沿径向进行微分, 任意刀刃微元为刀具坐标系下空间的一点。

如图3所示, M 为前一条刀具轨迹形成的椭圆柱面, W 为工件的未加工表面, s 为轨迹间距, d_n 为刀具法向切削深度。判断任意刀刃微元点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 点是否参与切削, 需要同时满足以下两个条件。

(1) 该点位于椭圆柱面 M 界定的空间之外, 表达式为

$$\left(x_0 - \frac{z}{\tan \gamma \sin \varepsilon} \pm s \right)^2 + \left(y_0 - \frac{z_0}{\tan \varepsilon} \right)^2 > R^2 \quad (4)$$

式中, 正号表示顺铣, 负号表示逆铣。

(2) 该点位于未加工表面 W 的下侧, 表达为

$$z_0 = y_0 \tan \varepsilon - \frac{R \sin \varepsilon - d_n}{\cos \varepsilon} \quad (5)$$

图3 斜平面平头立铣五轴加工示意图

平头立铣刀五轴加工的刀刃接触区间为一段刀刃曲线, 基于上述刀刃微元是否参与切削的判据, 从刀具底部端点开始, 逐一对刀刃微元采样点进行判断, 找出两个相邻的采样点, 一个在刀具接触区域之内, 另一个在刀具接触区域之外, 应用一维黄金分割算法提高交点的精度, 该交点即是刀刃接触区间的边界点, 按照上述方法, 沿刀刃继续判断下去, 直到确定刀刃接触区间的另一边界面点。将刀刃曲线绕刀具坐标系 Z_C 轴旋转角度 $i \times 2\pi/N$ ($i=1,2,\dots,N-1$), 即可获得刀具任意旋转位置角 $\phi_{i,0}$ 下, 所有刀齿的刀刃接触区间。刀具接触区间算法流程如图4所示。

本节针对斜平面平头立铣刀五轴加工, 利用空间区域限定法, 提出了刀刃接触区间的解析算法, 该算法确定刀刃接触区间不再依赖于刀具接触区域, 算法编程简单, 计算效率更高, 且该算法思路能适用在不同刀具, 不同走刀方式的加工中。

3 曲面五轴加工的铣削力模型

基于 KLINE 等^[19]的理论, 刀具偏心即刀具几何中心与刀具旋转中心不重合, 会改变刀齿的有效

图4 刀刃接触区间算法流程图

切削半径, 影响未变形切屑层厚度, 如图5所示, 刀具偏心距 ρ 和偏心角 λ 衡量刀具的偏心程度, 高度 z 处对应的刀刃微元, 瞬时未变形切屑层厚度如式(6)所示

$$h_i(\phi_i(z)) = -n_i f_z \cos \varepsilon \sin \phi_i(z) + \left\{ -2n_i \rho \sin \left(\frac{n_i \pi}{N} \right) \sin[\zeta + \phi_i(z)] \right\}$$

$$\zeta = \lambda - \left(\frac{z \tan \beta}{R} + \phi_i(z) \right) - \frac{(2i-3)\pi}{N} \quad (6)$$

式中, n_i 为刀齿号, 以当前刀齿为参照, 表示当前刀齿切削的材料为前第 n_i 个刀齿遗留的材料; f_z 为每齿进给量; $\phi_i(z)$ 为刀刃微元径向位置角; ζ 为中间变量。

图5 刀具偏心示意图

基于 ARMAREGO 斜角切削理论, 高度 dz 的刀刃微元, 对应的切向($dF_{t,i}$), 径向($dF_{r,i}$)和轴向($dF_{a,i}$)切削力为

$$\begin{cases} dF_{t,i}(\phi, z) = K_{tc} h_i(\phi_i(z)) dz \\ dF_{r,i}(\phi, z) = K_{rc} h_i(\phi_i(z)) dz \\ dF_{a,i}(\phi, z) = K_{ac} h_i(\phi_i(z)) dz \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} 分别为切向、径向和轴向剪切力系数。

假定将螺旋角 β 作为立铣刀的斜角, 微元切削力在刀具坐标系 X_C, Y_C, Z_C 方向上的投影分量为

$$\begin{cases} dF_{x,i}(\phi_i(z)) = dF_{t,i} \sin \phi_i(z) - dF_{r,i} \cos \phi_i(z) \\ dF_{y,i}(\phi_i(z)) = dF_{t,i} \cos \phi_i(z) + dF_{r,i} \sin \phi_i(z) \\ dF_{z,i}(\phi_i(z)) = -dF_{a,i} \end{cases} \quad (8)$$

刀刃微元高度 z 与其对应的径向位置角 $\phi_i(z)$ 关系为

$$\phi_i(z) = \phi_{i,0} - \frac{z \tan \beta}{R} \quad (9)$$

求导可得

$$dz = -\frac{R}{\tan \beta} d\phi_i \quad (10)$$

式中, $\phi_{i,0}$ 为第 i 条刀刃底部微元对应的径向位置角。

综合式(6)~(10), 即可获得平头立铣刀微元切削力模型, 结合本文提出的刀刃接触区间算法, 对刀刃有效切削区间进行积分, 即可获得该刀刃的切削总力, 公式如下

$$\begin{bmatrix} F_{x,i}(\phi) \\ F_{y,i}(\phi) \\ F_{z,i}(\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{\phi_{i,d}}^{\phi_{i,u}} dF_{x,i}(\phi) d\phi \\ \int_{\phi_{i,d}}^{\phi_{i,u}} dF_{y,i}(\phi) d\phi \\ \int_{\phi_{i,d}}^{\phi_{i,u}} dF_{z,i}(\phi) d\phi \end{bmatrix} = \frac{R f_z \cos \varepsilon}{\tan \beta} \begin{bmatrix} A(\phi) & -B(\phi) & 0 \\ B(\phi) & A(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & C(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{tc} \\ K_{rc} \\ K_{ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11}(\phi) & G_{12}(\phi) \\ G_{21}(\phi) & G_{22}(\phi) \\ G_{31}(\phi) & G_{32}(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \sin \zeta \\ \rho \cos \zeta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$G_{11}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{tc} B(\phi) - K_{rc} D(\phi)]$$

$$G_{12}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{tc} A(\phi) - K_{rc} B(\phi)]$$

$$G_{21}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{tc} D(\phi) + K_{rc} B(\phi)]$$

$$G_{22}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{tc} B(\phi) + K_{rc} A(\phi)]$$

$$G_{31}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{ac} E(\phi)]$$

$$G_{32}(\phi) = \left[2 \sin \left(\frac{\pi}{N} \right) \right] \frac{R}{\tan \beta} [K_{ac} C(\phi)]$$

$$A(\phi) = \begin{bmatrix} 0.5\phi - 0.25\sin(2\phi) \\ \phi_{i,u} \\ \phi_{i,d} \end{bmatrix}$$

$$B(\phi) = \begin{bmatrix} -0.25\cos(2\phi) \\ \phi_{i,u} \\ \phi_{i,d} \end{bmatrix}$$

$$C(\phi) = (\cos(\phi)) \begin{bmatrix} \phi_{i,u} \\ \phi_{i,d} \end{bmatrix}$$

$$D(\phi) = \begin{bmatrix} 0.5\phi + 0.25\sin(2\phi) \\ \phi_{i,u} \\ \phi_{i,d} \end{bmatrix}$$

$$E(\phi) = (-\sin(\phi)) \begin{bmatrix} \phi_{i,u} \\ \phi_{i,d} \end{bmatrix}$$

$$\zeta = \lambda - \phi_{i,0} - \frac{(2i-3)\pi}{N}$$

对 N 个刀刃在径向位置角处 ϕ 的铣削力求和, 可得刀具坐标系 X_C, Y_C, Z_C 方向的瞬时铣削力, 公式如下

$$\begin{aligned} F_{x_C}(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{x,i}(\phi) \\ F_{y_C}(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{y,i}(\phi) \\ F_{z_C}(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{z,i}(\phi) \end{aligned} \quad (12)$$

刀具坐标系铣削总力为

$$F_C(\phi) = \sqrt{F_{x_C}(\phi)^2 + F_{y_C}(\phi)^2 + F_{z_C}(\phi)^2} \quad (13)$$

铣削加工刀具高速旋转, 曲面五轴加工中, 刀轴矢量不断变化, 根据牛顿第三运动定律, 测力仪大多与工件固定在一起, 为便于铣削力的分析和测量, 将上述建立的刀具坐标系下铣削力模型, 转换到工件坐标系, 表达式如下

$$\begin{bmatrix} F_{x_W} \\ F_{y_W} \\ F_{z_W} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} F_{x_C} \\ F_{y_C} \\ F_{z_C} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos\theta_{Xx} & \cos\theta_{Xy} & \cos\theta_{Xz} \\ \cos\theta_{Yx} & \cos\theta_{Yy} & \cos\theta_{Yz} \\ \cos\theta_{Zx} & \cos\theta_{Zy} & \cos\theta_{Zz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, θ 为工件坐标系 $O-X_W Y_W Z_W$ 各轴与刀具坐标系 $O-X_C Y_C Z_C$ 各轴之间的夹角。

以 θ_{Zx} 为例, 表示 Z_W 轴与 X_C 轴之间的夹角, 表达式如下

$$\theta_{Zx} = \arccos \frac{\mathbf{w} \cdot \mathbf{s}}{\|\mathbf{w}\| \|\mathbf{s}\|} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{w}$ 为 X_C 轴的单位矢量。

至此, 基于本文提出的刀刃接触区间算法, 建立了斜平面平头立铣刀五轴加工的铣削力预报模型, 结合微分离散思想, 将曲面加工看成一系列微

小斜平面加工, 上述铣削力预报模型即可应用于自由曲面加工。

4 试验与仿真

本文基于空间区域限定法, 提出了一种刀刃接触区间解析算法, 建立了自由曲面平头立铣刀五轴加工铣削力预报模型, 为了验证其有效性, 进行了系列仿真与试验。

4.1 刀刃接触区间仿真

基于布尔运算实体模型法求解刀刃区间效率低, 但精度较高, 为探究本文提出的刀刃接触区间解析算法的精度, 针对平头立铣刀曲面五轴加工仿真参数为: 刀具直径 6 mm, 3 齿, 右旋, 刀刃螺旋角 45° , 刀具轨迹行距 2 mm, 法向切深 1 mm, 前倾角 30° 。曲面借助 Unigraphics NX 软件扫描命令生成, 线性缩放, 引导线位于 $Z_w=20$ mm 平面内, 解析表达式为 $y=154\exp(0.245 \ 3x) - 102.9\exp(0.471 \ 8x)$, $z=20, 0 \leq x \leq 62.31, 22.68 \leq y \leq 56.56$, 起始、终止截面, 工件总体尺寸, 坐标系等参数如图 6a 所示。引导线沿 Z_w 方向在曲面上投影为第一条轨迹, 在曲面上向两边偏置一个步距可生成另一条刀具轨迹。沿

(a) 加工仿真示意图

(b) 刀刃接触区间

图 6 平头立铣刀曲面五轴加工仿真

刀具轨迹取 6 个刀位点, 第 6 个刀位点处刀具旋转一周对应的刀刃接触区间如图 6b 实线所示。基于实体法, 在刀具旋转角度分别为 40° , 60° , 80° , 85° 及分别增加 1 个和 2 个齿间角时刻, 借助 Unigraphics NX 软件建模模块, 对工件体, 刀具体, 工件和刀具在该加工参数下的相对位置, 及四个时刻 3 条刀刃曲线的具体位置建模并运行布尔运算命令, 刀刃曲线与刀具接触区域相交的部分即为刀刃接触区间, 利用 Unigraphics NX 软件分析测量工具, 即可获得刀刃接触区间的边界点坐标, 及边界点对应的径向位置角, 仿真结果如图 6b 点所示。本文提出的基于空间区域限定法仿真的刀刃接触区间上下界点, 与基于实体法获得的仿真结果吻合良好, 12 个边界点误差均在 1% 以内, 且通过提高二分搜索法的精度条件, 可以获得精度更高的刀刃接触区间仿真结果。

基于斜平面建立的刀刃接触区间解析算法运用到曲面加工时会存在误差, 魏兆成等^[20]针对刀具接触区域解析模型精度影响因素进行了系统的探究。本文仿真中沿刀具轨迹依次对 6 个刀位点, 在刀具旋转角度 60° 时基于实体建模法仿真获得的刀刃接触区间上下界点, 与本文提出的基于空间限定法仿真获得的刀刃接触区间吻合良好, 每个刀位点最大误差如图 7 所示, 随着刀位加工点曲率半径的增大, 误差逐渐减小, 本文提出的刀刃接触区间解析算法基于斜平面加工, 工件曲率半径越大刀位点越接近斜平面, 误差越小。

图 7 平头立铣刀曲面五轴加工仿真误差

仿真在个人台式机上进行, 计算机配置为: 处理器 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU 3.30 GHz, 安装内存(RAM) 4.00 GB。6 个刀位点处, 4 齿刀具旋转一周所对应的刀刃接触区间仿真平均时间为 0.692 220 s。

上述仿真表明, 本文提出的刀刃接触区间解析算法可有效用于曲面五轴加工, 且与实体建模法相比, 具有更高的效率。

4.2 铣削力预报试验

自由曲面五轴加工可以离散成一系列斜平面五轴加工, 在 DMU60 monoBLOCK 五轴联动加工中心安排如下试验: 步距 1 mm, 法向切深 0.8 mm,

进给率 180 mm/min, 转速 500 r/min, 斜面倾斜角 20° , 顺铣加工, 硬质合金刀具 1 和刀具 2, 偏心参数 $\rho_1=0.0008$ mm, $\lambda_1=28.65^\circ$, $\rho_2=0.009$ mm, $\lambda_2=54.43^\circ$, 直径 6 mm, 螺旋角 30° , 工件材料 45 钢, 刀具切削力系数是基于 WAN 等^[21]提出的瞬时切削力系数识别模型, 考虑系数为瞬时平均切屑层厚度 $\bar{h}(\phi)$ 的函数, 本文采用四次多项式拟合瞬时平均切屑层厚度 $\bar{h}(\phi)$ 与系数的关系, 以刀具 1 为例, 结果如式(16)所示。由 YDCB-III05 三向压电石英测力仪, INV3018A 型数据采集分析仪获得工件坐标系下的测量铣削力, 基于本文建立的铣削力预报模型, 借助 MATLAB 数值分析软件, 获得仿真铣削力。试验 1 和试验 2 分别对应刀具 1 和刀具 2, 其测量力与预报力对比结果如图 8 所示, 铣削测量力与预报力在幅值和趋势上吻合良好, 证明该铣削力预报模型在斜平面五轴加工应用中的有效性。

$$\begin{aligned} K_{tc} &= -8.03 \times 10^8 \bar{h}(\phi)^4 + 2.63 \times 10^8 \bar{h}(\phi)^3 - \\ & 3.17 \times 10^7 \bar{h}(\phi)^2 + 1.69 \times 10^6 \bar{h}(\phi) - 3.73 \times 10^4 \\ K_{rc} &= -3.57 \times 10^8 \bar{h}(\phi)^4 + 1.17 \times 10^8 \bar{h}(\phi)^3 - \\ & 1.4 \times 10^7 \bar{h}(\phi)^2 + 7.33 \times 10^5 \bar{h}(\phi) - 1.61 \times 10^4 \\ K_{ac} &= 1.62 \times 10^8 \bar{h}(\phi)^4 - 5.06 \times 10^7 \bar{h}(\phi)^3 + \\ & 6.06 \times 10^6 \bar{h}(\phi)^2 - 3.24 \times 10^5 \bar{h}(\phi) + 5.97 \times 10^3 \end{aligned} \quad (16)$$

图 8 斜平面平头立铣刀五轴加工铣削力预报

基于上述斜平面平头立铣刀五轴加工试验, 结合微分离散思想, 将上述试验 1 加工参数应用于自由曲面五轴加工。工件曲面解析为, $z=0.0025x^2+$

$0.000\ 130\ 7y^{2.8}$, $20 \leq x \leq 100$, $20 \leq y \leq 80$ 。借助 Unigraphics NX 软件建模模块, 图中轨迹参考线沿 Y_w 在曲面上的投影为曲线, 在曲面上生成偏置 s 为的一系列曲线, 借助 Unigraphics NX 软件加工模块的可变轮廓铣进行编程, 选取系列曲线设置驱动方法为“曲线/点”, 投影矢量沿 Z_w 负方向生成等高加工的刀具轨迹, 工件尺寸、参考线、行走轨迹等如图 9a 所示。铣削力测量及预报结果如图 10 所示, 预报铣削力与测量铣削力趋势吻合良好, F_{yW} 和 F_{zW} 方向力幅值吻合良好, F_{xW} 方向力幅值有偏差, 主要原因是工件坐标系与测力仪坐标系之间存在方向误差; 轨迹刀位点近似为斜平面五轴加工, 对其刀刃接触区间, 切入角和切出角, 平均切屑层厚度均有影响。总体表明, 该铣削力预报模型可有效应用于自由曲面平头立铣刀五轴加工。

图 9 自由曲面平头立铣刀五轴加工

(a) 测量

(b) 预报

图 10 自由曲面五轴加工三向铣削力测量与预报结果

5 结论

(1) 针对斜平面平头立铣刀五轴加工, 定义斜面倾斜角, 进给方向角和径向位置角, 基于空间区域限定法提出刀刃接触区间解析算法。

(2) 基于上述刀刃接触区间解析算法, 建立斜平面平头立铣刀五轴加工铣削力预报模型, 结合微分离散的思想, 该预报模型可应用于自由曲面五轴加工, 为便于分析测量, 推导了铣削力由刀具坐标系到工件坐标系的转换矩阵。

(3) 斜平面和自由曲面平头立铣刀五轴加工刀刃接触区间仿真结果表明, 本文提出的基于空间限定法与基于刀具接触区域限定法相比, 该算法可独立于刀具接触区域, 算法更简单, 通用性更强; 与基于实体建模法相比, 在曲率半径较小的刀位, 精度有轻微损失, 但效率远高于实体建模法。

(4) 斜平面和自由曲面平头立铣刀五轴加工试验结果表明, 预报铣削力和测量铣削力在趋势和幅值上总体吻合良好, 证明本文建立的基于刀刃接触区间解析算法铣削力预报模型, 可有效应用于平头立铣刀曲面五轴加工。

参 考 文 献

- [1] 张洪. 从增大行距宽度减小波纹度的角度看型面加工发展的方向[C]//北京航空学院庆祝建校三十周年论文集, 北京. 北京: 航空学院, 1982.
ZHANG Hong. The development trend of sculptured surface machining in increasing the strip width and decrease the scallop height[C]//Proceedings of the 30th Anniversary Celebration Ceremony of Beijing University, Beijing. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics, 1982.
- [2] VICKERS G W, QUAN K W. Ball-mills versus end-mills for curved surface machining[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(1): 22-26.
- [3] JENSEN C G, ANFERSON D C. Accurate tool placement and orientation for finish surface machining[J]. Journal of Design & Manufacturing, 1993, 3: 251-261.
- [4] 王小椿, 吴序堂, 李艳斌. 密切曲率法——一种由面加工的新概念[J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(5): 51-58.
WANG Xiaochun, WU Xutang, LI Yanbin. Curvature catering—a new concept for machining sculptured surface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992, 26(5): 51-58.
- [5] WARKENTIN A, BEDI S, ISMAIL F. 5-axis milling of spherical surfaces[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 1995, 36(2): 229-243.
- [6] 倪炎榕, 马登哲, 张洪, 等. 圆环面刀具五坐标数控加工复杂曲面优化刀位算法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(2): 87-91.
NI Yanrong, MA Dengzhe, ZHANG Hong, et al. Optimal orientation control for torus tool 5-axis sculptured surface NC machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(2): 87-91.
- [7] 朱利民, 卢耀安. 回转刀具侧铣加工扫掠包络面几何造型及其应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 176-183.
ZHU Limin, LU Yaoan. Modeling swept envelopes of rotary cutting tools with application to five-axis flank milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 176-183.
- [8] 阎长罡, 刘宇, 崔云先, 等. 圆锥刀侧铣非可展直纹面刀轴轨迹规划的特征线方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 206-212.
YAN Changgang, LIU Yu, CUI Yunxian, et al. Feature line method of tool axis trajectory planning for non-developable ruled surface flank milling with conical tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9): 206-212.
- [9] GUO Qiang, SUN Yuwen, JIANG Yan, et al. Tool path optimization for five-axis flank milling with cutter runout effect using the theory of envelope surface based on CL data for general tools[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 38: 87-97.
- [10] SU Cheng, JIANG Xin, HUO Guoying, et al. A tool path generation method for sculptured surface based on the vector field of maximum strip width[C]//2nd International Conference on EAME, 2017.
- [11] KAO Yungchou, NGUYEN N T, CHEN M S, et al. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2015, 77(9): 1793-1809.
- [12] FU Qiang, CHEN Zezhong. Accurate geometric modeling for three-axis sculptured surfaces milling[C]//ASME IDETC/CIE, August 15-18, 2010, Montreal, Quebec, Canada, 2010.
- [13] ZHANG Xin, ZHANG Jun, PANG Bo, et al. An accurate prediction method of cutting forces in 5-axis flank milling of sculptured surface[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 2015, 104: 26-36.
- [14] LUO Shan, JUN M B G, DONG Zuomin. Numerical simulation of chip ploughing volume and forces in 5-axis CNC micro-milling using flat-end mills[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 348-361.
- [15] LUO Shan, DONG Zuomin, JUN M B G. Chip volume

- and cutting force calculations in 5-axis CNC machining of free-form surfaces using flat-end mills[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, 90(1): 1145-1154.
- [16] ZHU Zerun, YAN Rong, PENG Fangyu. Parametric chip thickness model based cutting forces estimation considering cutter runout of five-axis general end milling[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2015, 101: 35-51.
- [17] YANG Yun, ZHANG Weihong, WAN Min. A solid trimming method to extract cutter-workpiece engagement maps for multi-axis milling[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, 68(9): 2801-2813.
- [18] ARAS E. Tool contact maps by rectangular grid decomposition[C]//ASME IDETC/CIE, August 28-31, 2011, Washington, DC, USA, 2011.
- [19] KLINE W A, DEVOR R E, TSAI C L, et al. The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling[J]. *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 1983, 23: 123-140.
- [20] 魏兆成, 王敏杰, 王学文, 等. 球头铣刀曲面多轴加工的刀具接触区半解析建模[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 198-205.
- WEI Zhaocheng, WANG Minjie, WANG Xuewen, et al. A semi-analytical cutter workpiece engagement model for ball end milling of sculptured surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 198-205.
- [21] WAN Min, ZHANG Weihong, TAN Gang, et al. New algorithm for calibration of instantaneous cutting-force coefficients and radial run-out parameters in flat end milling[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2007, 221(6): 1007-1019.
-
- 作者简介: 郭明龙, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为复杂曲面铣削力学/动力学。
E-mail: gminglong890913@mail.dlut.edu.cn
- 魏兆成(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为复杂曲面铣削力学/动力学。
E-mail: wei_zhaocheng@dlut.edu.cn
- 王敏杰, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进制造技术、模具技术。
E-mail: mjwang@dlut.edu.cn