

DOI: 10.3901/JME.2022.07.317

# 考虑工件变形的五轴侧铣薄壁件铣削力建模<sup>\*</sup>

卫星驰<sup>1</sup> 赵 嫚<sup>1</sup> 杨青平<sup>2</sup> 曹珍珍<sup>2</sup> 茅 健<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海 201620;

2. 成都永峰科技有限公司 成都 610511)

**摘要:** 针对铣削加工过程中工件和刀具接触关系的时变性所导致铣削力预测不精准的问题, 提出一种综合考虑工件变形作用下的五轴侧铣铣削力建模方法。首先, 基于机械 II 型力学模型, 综合考虑剪切力和犁切力作用, 建立五轴侧铣加工微元铣削力模型; 其次, 利用欧拉-伯努利梁理论计算工件在任意切削深度下的变形量; 进而, 更新工件变形量引起的切削深度变化, 构建考虑工件变形的五轴侧铣薄壁件铣削力模型; 最后, 通过试验与模型预测结果对比, 得出在考虑变形的情况下,  $X$ 、 $Y$  方向上铣削力的平均峰值误差分别减小了 4.42% 和 0.62%, 验证了模型的有效性。

**关键词:** 铣削力建模; 工件变形; 五轴侧铣; 薄壁件

**中图分类号:** TH161

## Milling Force Modeling of Thin-walled Parts with 5-Axis Flank Milling Considering Workpiece Deformation

WEI Xingchi<sup>1</sup> ZHAO Man<sup>1</sup> YANG Qingping<sup>2</sup> CAO Zhenzhen<sup>2</sup> MAO Jian<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. Chengdu Useful Technology Co., Ltd., Chengdu 610511)

**Abstract:** Aiming at the problem that the time-varying nature of the contact relationship between workpiece and tool during machining can lead to inaccurate modeling of milling forces, a modeling method of five-axis flank milling forces under workpiece deformation is proposed. Firstly, based on the mechanical model of mechanical type II, the milling force model of micro-element is established by integrating the effects of shear force and plow cutting force. Secondly, the deformation of the workpiece at any depth of cut is calculated based on the Euler-Bernoulli beam theory. Then, the workpiece deformation is introduced into the modeling process and the covariates in the model are updated to establish a milling force model for thin-walled parts with five-axis flank milling considering the workpiece deformation. Finally, by comparing the experimental and model prediction results, it is concluded that the average peak errors of milling forces in  $X$  and  $Y$  directions are reduced by 4.42% and 0.62%, respectively, considering the deformation, which verified the validity of the model.

**Key words:** milling force modeling; workpiece deformation; five-axis flank milling; thin-walled parts

## 0 前言

五轴侧铣以线接触成形, 加工效率高, 被广泛应用于航空复杂曲面薄壁件的加工。然而, 由于该类零件的低刚性, 导致工件在加工过程中易产生变

形误差, 为保证加工质量通常以牺牲加工效率为代价<sup>[1]</sup>。铣削力作为五轴侧铣加工中的尤为重要的参数之一, 直接影响到薄壁件的加工变形。为了减小加工变形误差, 建立精确的铣削力模型是至关重要的。

国内外学者就如何准确地建立切削力模型进行了大量研究。目前的铣削力模型根据建模方法的不同可分为四大类: 经验公式模型<sup>[2]</sup>、物理模型<sup>[3]</sup>、神经网络模型<sup>[4]</sup>以及机械力学模型<sup>[5]</sup>。这四种建模方法

<sup>\*</sup> 上海市浦江人才计划资助项目(20PJ1404700)。20210405 收到初稿, 20211208 收到修改稿

各有利弊,其中机械力学模型由于表达式简明清晰,系数标定试验易于实现,已成为目前应用最多的模型。刘均等<sup>[6]</sup>以微元铣削力模型为基础,通过计算某一时刻参与切削的切削刃长来构建瞬时铣削力数学模型。该模型侧重于微元积分上下限的确定,未考虑加工中由工件变形引起的瞬时切屑厚度变化。

ZHANG 等<sup>[7]</sup>结合实际刀具运动过程,首次提出考虑刀具跳动影响的瞬时切屑厚度的精确表示模型,借助线性迭代算法提高了该模型的计算精度和效率,精确预测出复杂曲面五轴侧铣切削力。LI 等<sup>[1,8-9]</sup>综合考虑了实际加工中的刀具跳动、侧刃和底刃切削效应等因素,提出一种高精度计算瞬时未切削切屑厚度的解析方法,改进了现有模型,准确快速地预测了平底立铣刀五轴侧铣过程铣削力。李勇<sup>[10]</sup>针对复杂直纹曲面类零件侧铣加工提出一种改善的铣削力的预测模型,该模型综合考虑了机床进给速度、工件轮廓几何特性对铣削力的影响。WANG 等<sup>[11-12]</sup>在切削力计算中,综合考虑了刀具跳动对瞬时切屑厚度的影响和曲线刀具轨迹对切入/切出角度的影响,针对五轴侧铣加工中的切屑厚度补偿问题,提出了一种简化的等效厚度模型,该模型相比于线性迭代模型将瞬时切屑厚度的预测效率提高了 10 倍以上。王立平等<sup>[13]</sup>提出了一种基于拆分思想的五轴侧铣加工瞬时切屑厚度计算方法,与现有模型相比计算效率提升了 40%。段飞宇<sup>[14]</sup>以五轴数控机床的运动学分析为基础,提出了基于点离散法的切入/切出角计算方法,运用参数化补偿的思想建立了等效瞬时切屑厚度模型,准确预测出五轴侧铣过程中的铣削力。陈志涛<sup>[15]</sup>引入加工变形量来计算变形后的切削厚度,进而改进了薄壁件侧铣加工铣削力模型,但只应用于三轴加工。

上述铣削力建模方法没有考虑工件变形的影响,或只适用于三轴加工。本文针对五轴加工中由工件变形引起的刀具/工件接触关系变化问题,将工件的弹性变形引入建模过程,结合机械 II 型力学模型改进了五轴侧铣的铣削力模型,并通过侧铣试验验证了模型的有效性。

## 1 五轴侧铣铣削力建模

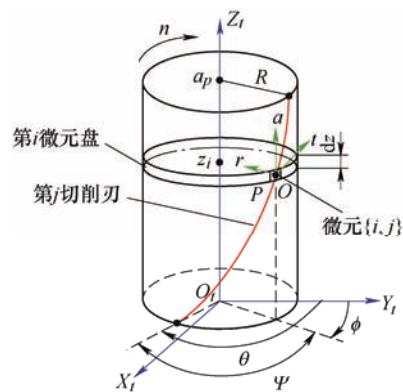
### 1.1 坐标系定义

建立准确的刀具铣削微元模型和坐标系是铣削力建模的基础。考虑到五轴加工的复杂性以及刀具-工件的接触关系在加工中的时变性,为方便描述,首先对各坐标系进行如下定义。

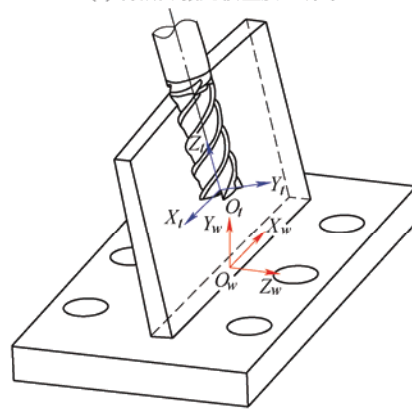
**切削刃微元坐标系:**如图 1a 所示,将刀具切削刃轴向切深部分离散成若干微元,以微元的体中心为原点建立微元坐标系  $O_t\text{-}x_t y_t z_t$ ,取平行于刀轴方向为  $a$  轴,向上为正向;取垂直于刀轴方向为  $r$  轴,向内为正向;依据右手法则,定义  $t$  轴。

**刀具坐标系:**如图 1b 所示,以刀具底刃中心为原点建立刀具坐标系  $O_f\text{-}X_f Y_f Z_f$ ,取刀轴方向为  $Z_f$  轴,向上为正向;由于加工过程中刀具始终与被加工表面相切,所以取工件表面的曲率方向为  $Y_f$  轴,向外为正向;依据右手法则,定义  $X_f$  轴。

**工件坐标系:**如图 1b 所示,以工件底部中心为原点建立工件坐标系  $O_w\text{-}X_w Y_w Z_w$ ,取垂直工作台的方向为  $Y_w$  轴,向上为正向;以机床  $X$  轴定义  $X_w$  轴,方向与机床  $X$  轴一致;依据右手法则,定义  $Z_w$  轴。



(a) 切削刃微元模型及坐标系



(b) 工件/刀具坐标系

图 1 各坐标系定义

### 1.2 瞬时铣削力模型建立

为便于铣削力模型的解析建模与仿真计算,将轴向切深为  $a_p$  的切削刃部分离散成  $M$  个微元盘,则单个微元盘厚度  $d_z = \frac{a_p}{M}$ ,取第  $j$  切削刃上的第  $i$  个微元盘为研究对象,其对应的切削点  $P$  记作微元  $\{i, j\}$ 。

如图 1a 所示,  $\psi$  为微元  $\{i, j\}$  相较于第  $j$  齿底部端点的滞后角, 可表示为

$$\psi(z_i) = \frac{2z_i \cdot \tan\beta}{D} \quad (1)$$

式中,  $\beta$  为刀具螺旋角;  $D$  为刀具直径;  $z_i$  为微元  $\{i, j\}$  对应的轴向高度。

设在刀具坐标系下,  $\phi$  为径向切削角, 即微元  $\{i, j\}$  的  $r$  轴负向与刀具  $Y_t$  轴正向的夹角, 由于刀具螺旋角  $\beta$  的存在, 同一切削刃上的切削微元对应的径向切削角随着切削微元的轴向高度而变化, 因此对于微元  $\{i, j\}$  其径向切削角可表示如下

$$\phi_j(z_i) = \theta + (j-1)\phi_p - \psi(z_i) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{2\pi n}{60}t \quad \phi_p = \frac{2\pi}{N}$$

其中,  $\theta$  为第  $j$  齿底部端点的瞬时径向切削角;  $\phi_p$  为齿间角;  $N$  为铣刀的切削刃数。

在刀具坐标系下, 微元  $\{i, j\}$  对应的切削点  $P$  的坐标可以表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{pmatrix} X_P^t \\ Y_P^t \\ Z_P^t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{D}{2} \cdot \sin\phi_j(z_i) \\ \frac{D}{2} \cdot \cos\phi_j(z_i) \\ z_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

则微元切削刃长度  $ds$  可由下式计算

$$ds = dz \sqrt{\left[\left(X_P^t\right)'\right]^2 + \left[\left(Y_P^t\right)'\right]^2 + 1} \quad (4)$$

则按 ALTINTAS<sup>[5]</sup>提出的机械 II 型力学模型, 微元  $\{i, j\}$  所受的三向作用力可以按如下公式表示

$$\begin{cases} dF_t = g(\phi_j(Z_i)) [K_{tc}h(\phi_j(Z_i))dz + K_{te}ds] \\ dF_r = g(\phi_j(Z_i)) [K_{rc}h(\phi_j(Z_i))dz + K_{re}ds] \\ dF_a = g(\phi_j(Z_i)) [K_{ac}h(\phi_j(Z_i))dz + K_{ae}ds] \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $K_{qc}$  ( $q=t, r, a$ ) 为切向、径向和轴向的剪切力系数,  $K_{qe}$  ( $q=t, r, a$ ) 为切向、径向和轴向的犁切力系数, 二者随被加工材料的不同而该改变。 $h(\phi)$  为瞬时切屑厚度。由于侧铣加工是间断切削, 只有在侧刃与工件接触时才会出现切削现象, 所以在此引入判断切削刃微元是否参与切削的窗函数  $g(\phi_j(z_i))$ , 其表达式为

$$g(\phi_j(z_i)) = \begin{cases} 1 & \phi_{en,j}(z_i) < \phi_j(z_i) < \phi_{ex,j}(z_i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\phi_{en,j}(z_i)$  为切削刃微元的切入角;  $\phi_{ex,j}(z_i)$  为切削刃微元的切出角。

五轴机床在侧铣加工时, 刀具会随着加工型面而摆动, 因此切削刃微元坐标系和刀具局部坐标系会时刻变化, 且试验测得的铣削力是基于工件坐标系下的数据, 为了表述方便, 需要将切削刃微元的三向铣削力由微元坐标系转换到工件坐标系中统一表示。

如图 2 所示, 先将铣削刃微元受力绕  $a$  轴逆时针旋转  $(\pi + \phi_j(z_i))$  转换到刀具坐标系下表示, 即

$$\begin{pmatrix} dF_X^t \\ dF_Y^t \\ dF_Z^t \end{pmatrix} = \mathbf{R}(a, \pi + \phi) \begin{pmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\phi_j(z_i) & -\sin\phi_j(z_i) & 0 \\ \sin\phi_j(z_i) & -\cos\phi_j(z_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_a \end{pmatrix} \quad (7)$$

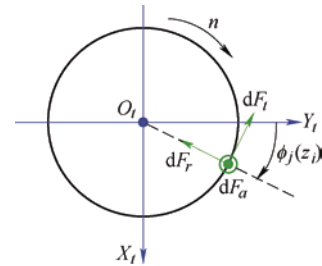


图 2 铣削刃微元受力分析

再将所有参与切削的铣削刃微元沿轴向积分求和, 得到刀具坐标系下该时刻总的铣削力模型

$$\begin{cases} F_X^t = \sum_{j=1}^N \int_{z_{j0}}^{z_{j1}} (dF_X^t) dz \\ F_Y^t = \sum_{j=1}^N \int_{z_{j0}}^{z_{j1}} (dF_Y^t) dz \\ F_Z^t = \sum_{j=1}^N \int_{z_{j0}}^{z_{j1}} (dF_Z^t) dz \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $z_{j0}$ 、 $z_{j1}$  分别表示第  $j$  切削刃参与切削的下积分限、上积分限。

最后将刀具坐标系下的铣削力模型转换到工件坐标系下表示, 即

$$\begin{pmatrix} F_X^w \\ F_Y^w \\ F_Z^w \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} F_X^t \\ F_Y^t \\ F_Z^t \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为刀具坐标系向工件坐标系的转换矩阵。五轴建模方法是以三轴建模方法为基础, 在此基础

上考虑了刀轴矢量的摆角与工作台的旋转角。在五轴加工过程中,刀具位姿实时变化,侧铣加工直纹面时是联动加工,与三轴建模的区别主要体现在公式(10)所示的转换矩阵中。假设机床主轴绕  $Y_w$  轴转动  $\alpha_y$  角,工作台绕  $Z_w$  轴转动  $\alpha_z$  角得到当前的刀位,等效为刀具绕  $X_t$  轴旋转  $\alpha_y$  角,刀具绕  $Z_t$  轴旋转  $\alpha_z$  角,则转换矩阵  $T$  可表示为

$$T = R(Z_w, \alpha_z) R(X_t, \alpha_y) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_z & -\sin \alpha_z \cos \alpha_y & \sin \alpha_z \sin \alpha_y \\ \sin \alpha_z & \cos \alpha_z \cos \alpha_y & -\cos \alpha_z \sin \alpha_y \\ 0 & \sin \alpha_y & \cos \alpha_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

## 2 工件变形下的模型参数计算

准确计算模型各参数是准确预测铣削力的前提,对于上述铣削力模型,瞬时切屑厚度、切入/切出角和剪切力/犁切力系数需要求解,其中剪切力/犁切力系数可采用平均铣削力法通过铣槽试验进行标定。

### 2.1 工件变形量计算

低刚性薄壁件在实际加工中会由于过大的切削载荷而产生一定的弹性变形,使得刀具-工件的接触关系发生变化,进而影响模型的实际参数值。相比于弱刚性薄壁件,刀具在加工中变形极小,本文在计算中予以忽略。

对工件变形量进行定义,如图 3a 所示为实际加工时的原始刀位,图 3b 所示为等效刀位,则工件的弹性变形量可表示为

$$\delta_d = \delta_t - \delta_r \quad (11)$$

式中,  $\delta_t$  为受力变形量;  $\delta_d$  为弹性变形量;  $\delta_r$  为残余变形量(数值非常小,忽略不计)。

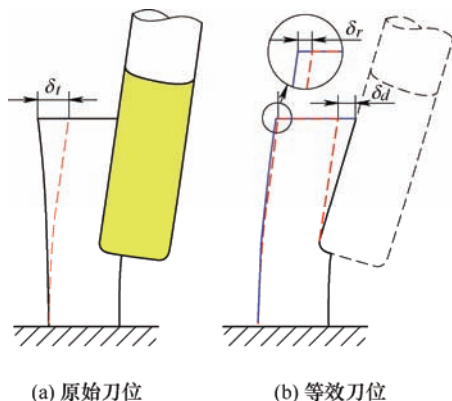


图3 工件变形定义

工件在减薄过程中并非一次成形,单层铣削往

往需要多行加工来实现余量的去除,因此工件的截面形状呈变化状态,将铣削过程等效为变截面阶梯悬臂梁模型,采用欧拉-伯努利梁理论<sup>[16]</sup>来计算工件的弹性变形量。图 4a 所示为变截面阶梯悬臂梁模型,图 4b 所示为梁的受力状态,将梁在截面变化处截断进行分析,则有

$$\delta_d(Z_1) = \frac{FZ_1^3}{6EI_1} - \frac{FL_1Z_1^2}{2EI_1} - \frac{FL_2Z_1^2}{2EI_1} \quad (12)$$

$$\delta_d(Z_2) = \frac{FZ_2^3}{6EI_2} - \frac{FL_2Z_2^2}{2EI_2} \quad (13)$$

式中,  $\delta_d(Z_1)$  为下端未加工区域的变形量;  $\delta_d(Z_2)$  为上端加工区域的变形量;  $E$  为材料的弹性模量;  $w$  为梁的宽度;  $I_1 = \frac{wt_1^3}{12}$ ,  $I_2 = \frac{wt_2^3}{12}$  为截面惯性矩。由于被加工零件表面的曲率变化不大,在此将薄壁件的截面近似为矩形来计算截面惯性矩。

将两端的变形量在断面处以斜率  $k(Z)$  进行匹配,最终得到式(15)所示的工件变形量分段函数。

$$k(Z) = \frac{FZ^2}{2EI_1} - \frac{FL_1Z}{EI_1} - \frac{FL_2Z}{EI_1} \quad (14)$$

$$\delta_d(Z) = \begin{cases} \frac{FZ^3}{6EI_1} - \frac{FL_1Z^2}{2EI_1} - \frac{FL_2Z^2}{2EI_1} & 0 < Z \leq L_1 \\ \delta_d(L_1) + \frac{F(Z-L_1)^3}{6EI_2} - \frac{FL_2(Z-L_1)^2}{2EI_2} + k(L_1)(Z-L_1) & L_1 < Z \leq L_1 + L_2 \end{cases} \quad (15)$$

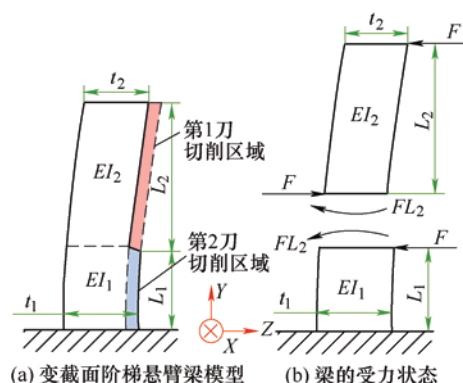


图4 工件变形量计算

### 2.2 模型参数计算

在不考虑刀具跳动、加工颤振等因素影响的情况下,引入工件变形后,刀具与工件的接触位置如



图 5 所示, 由几何关系得瞬时切屑厚度为

$$h'_{i,j}(\phi) = f_z \cdot \sin[\phi_j(z_i)] - \frac{\delta_d}{\cos[\phi_j(z_i)]} \quad (16)$$

式中,  $f_z$  为每齿进给量。

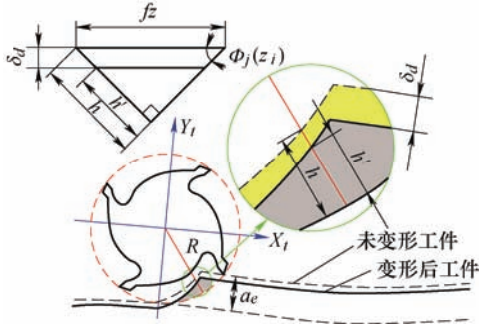


图 5 变形后的瞬时切屑厚度计算

如图 6 所示, 切入/切出角从刀具  $Y_t$  轴正向开始顺时针计算, 切入角的计算可根据刀具-工件的几何关系得到, 即

$$\phi_{en} = \pi - \arccos\left(1 - \frac{2(a_e - \delta_d)}{D}\right) \quad (17)$$

由于五轴侧铣加工过程中圆柱立铣刀始终与被加工表面相切, 切削刃沿已加工表面的切线方向切出, 所以切出角始终为  $\pi$ , 即

$$\phi_{ex} = \pi \quad (18)$$

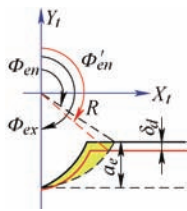


图 6 变形后的切入/切出角计算

### 3 模型验证

为了验证上述模型的有效性, 本节设计了薄壁件五轴侧铣加工试验。搭建如图 7 所示的铣削力测量试验平台, 试验设备包括 HMC-C100PL 立卧转换五轴加工中心, Kistler 9272 型四分量测力计, 上海好耐电子生产的 HR-CA-411 型电荷放大器、HRU1213MA 型便携式数据采集卡, 以及装有数据采集与处理软件 HRsoft\_DW 的笔记本电脑一台。其中零件数模取自“S 件”的一部分,

零件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times \delta 6 \text{ mm}$  并带有闭角, 零件材料为 7050-T7451 铝合金, 采用顺铣单向走刀加工。

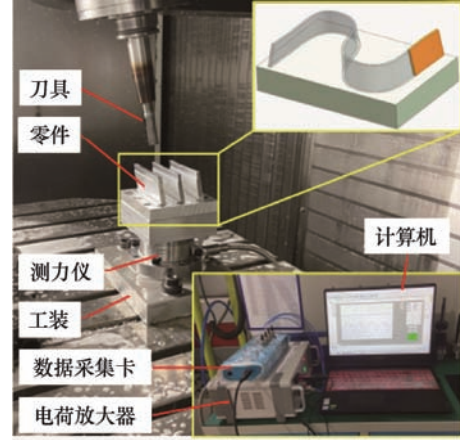


图 7 铣削力测量试验平台

#### 3.1 铣削力系数标定

在铣削力预测之前, 需要先对铣削力系数进行标定, 本文采用平均铣削力法<sup>[5]</sup>通过铣槽试验进行铣削力系数标定。如图 8 所示, 铣槽过程中切入角  $\phi_{en} = 0$ , 切出角  $\phi_{ex} = \pi$ , 则单个周期内的平均铣削力为

$$\begin{cases} \bar{F}_X = -\frac{Na_p K_{tc}}{4} f_z - \frac{Na_p K_{te}}{\pi} \\ \bar{F}_Y = -\frac{Na_p K_{rc}}{4} f_z - \frac{Na_p K_{re}}{\pi} \\ \bar{F}_Z = \frac{Na_p K_{ac}}{\pi} f_z + \frac{Na_p K_{ae}}{2} \end{cases} \quad (19)$$

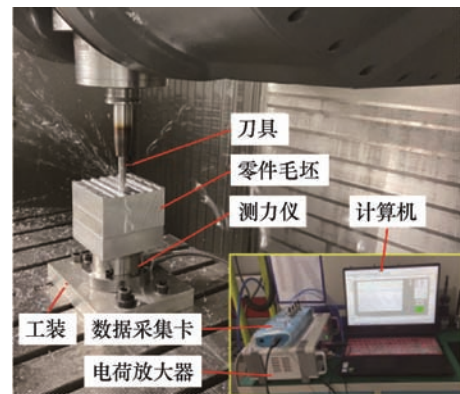


图 8 铣削力系数标定试验

由式(19)可知, 平均铣削力与每齿进给量呈线性关系。以转速  $n=8000 \text{ r/min}$ , 切深  $a_p=1.5 \text{ mm}$ , 每齿进给量  $f_z$  分别为  $0.02 \text{ mm}$ ,  $0.04 \text{ mm}$ ,  $0.06 \text{ mm}$ ,  $0.08 \text{ mm}$ ,  $0.10 \text{ mm}$ ,  $0.12 \text{ mm}$  的参数进行铣槽试验,

测得三向平均铣削力数据如表 1 所示, 其中正负号代表受力方向。

表 1 铣槽试验参数及平均力测量结果

每齿进给量 $f_z/\text{mm}$	平均力/N		
	$\bar{F}_x$	$\bar{F}_y$	$\bar{F}_z$
0.02	-48.018	-46.481	20.336
0.04	-53.128	-62.013	21.778
0.06	-60.836	-83.727	14.109
0.08	-69.253	-103.83	19.442
0.10	-98.348	-139.03	26.439
0.12	-105.58	-158.66	26.979

将表 1 中数据进行一元线性回归拟合, 结果如图 9 所示, 结合式(19)计算得到铣削力系数分别为

$$\begin{aligned} K_{tc} &= 548.43 \text{ N/mm}^2 & K_{te} &= 20.48 \text{ N/mm} \\ K_{rc} &= 1031.20 \text{ N/mm}^2 & K_{re} &= 12.43 \text{ N/mm} \\ K_{ac} &= 52.39 \text{ N/mm}^2 & K_{ae} &= 7.23 \text{ N/mm} \end{aligned} \quad (20)$$

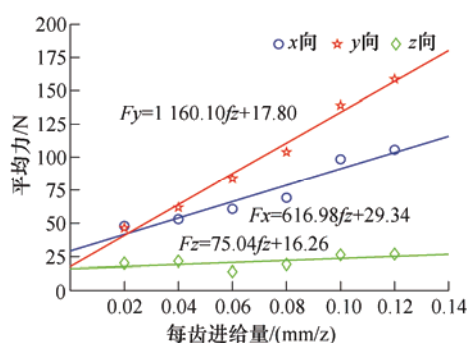


图 9 平均铣削力回归拟合结果

### 3.2 铣削力预测与试验对比

采用  $\Phi 16\text{R}3$  的整体硬质合金立铣刀进行五轴侧铣加工试验, 其中刀具螺旋角  $\beta=45^\circ$ , 齿数  $N=3$ , 加工所用转速  $n=2\,000 \text{ r/min}$ , 每齿进给量  $f_z=0.06 \text{ mm}$ , 轴向切深  $a_p=15 \text{ mm}$ , 径向切深  $a_e=1 \text{ mm}$ , 铣削力信号的采样频率为  $f_s=10 \text{ kHz}$ 。由式(21)计算得到铣削加工的主频率, 即刀齿冲击工件的频率  $f=100 \text{ Hz}$ , 对采集到的铣削力信号进行低通滤波, 滤波低截止频率设置为  $100 \text{ Hz}$  以滤除主频之外的杂波。

$$f = \frac{n}{60} \cdot N \quad (21)$$

取 2~20 s 内的切削力实测值见表 2, 得到图 10 所示的三向铣削力实测值。

表 2 铣削力实测值

时间 t/s	铣削力/N		
	$F_x$	$F_y$	$F_z$
2	0.312 106 31	0.304 193 43	0.489 671 68
2.000 1	0.303 381 66	0.290 346 72	0.452 409 90
2.000 2	0.293 769 82	0.275 734 93	0.413 987 70
16.01	32.801 679 38	-46.682 012 16	8.061 579 46
16.010 1	32.242 694 85	-46.768 416 47	7.851 573 19
16.010 2	31.699 778 15	-46.931 544 42	7.645 075 21
16.010 3	31.175 574 54	-47.169 847 48	7.442 048 55
19.999 8	-0.043 477 30	-0.718 819 49	-1.115 354 24
19.999 9	-0.045 953 05	-0.702 296 81	-1.104 108 05
20	-0.048 532 35	-0.685 562 96	-1.092 236 20

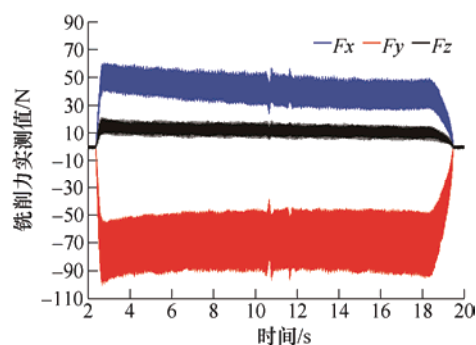


图 10 铣削力实测值

从图 10 中可以得出, 五轴侧铣加工时整体铣削力并非周期性波动, 而是与零件的加工表面曲率相适应, 在 10~12 s 之间的铣削力突变即是由零件对应部位表面的曲率瞬变引起的。

同时, 为了验证模型的准确性, 将相应的切削参数和式(20)中求得的铣削力系数代入铣削力模型获得铣削力的预测值, 取稳定阶段的某个周期 16~16.03 s 内的力信号, 使用 Matlab R2020a 软件按图 11 所示流程对侧铣加工的铣削力进行数值模拟, 将试验结果同考虑变形与不考虑变形模型的预测结果进行比较。本文忽略了 Z 轴方向的受力, 主要对 X 和 Y 两个对加工变形影响较大的方向进行了对比, 对比结果如图 12 和 13 所示。

如图 12 和图 13 所示, 考虑变形因素后实际的瞬时切屑厚度减小, 最终体现为切削力的减小。在 X 方向, 未考虑变形的预测平均峰值为 48.36 N, 考虑变形的预测平均峰值为 43.48 N, 实测平均峰值为 44.78 N, 考虑工件变形后使得实测值与预测值的误

差减小了 4.42%。在 Y 方向, 未考虑变形的预测平均峰值为 -83.25 N, 考虑变形的预测平均峰值为 -78.96 N, 实测平均峰值为 -80.79 N, 考虑工件变形后使得实测值与预测值的误差减小了 0.63%。值得注意的是, 实测铣削力与预测值在波峰、波谷出现的位置及波形趋势上大致保持一致, 但试验结果与预测结果存在偏差, 原因在于电荷放大器在使用过程中会存在电荷漂移、断续铣削的加工特点会引起不可避免的波动、所建立的模型没有考虑实际加工中诸如刀具跳动、加工颤振等因素的影响, 相关工作还有待进一步研究。

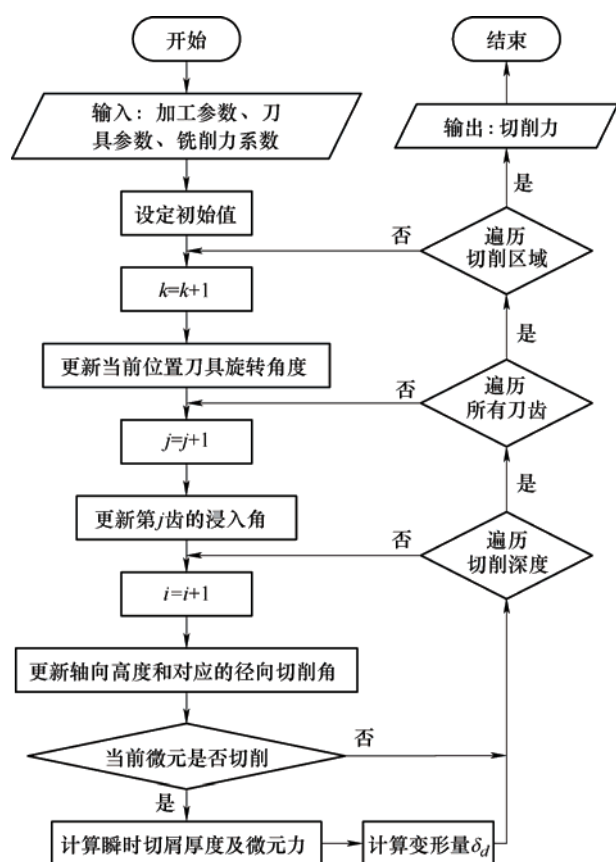


图 11 铣削力预测流程

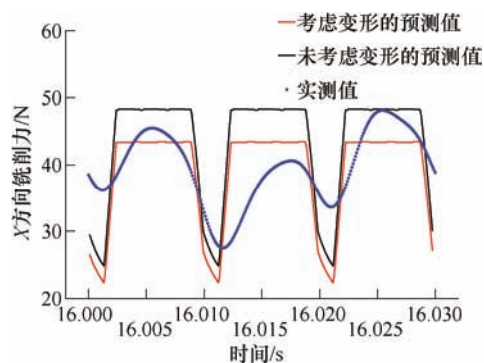


图 12 X 方向铣削力预测值与实测值对比

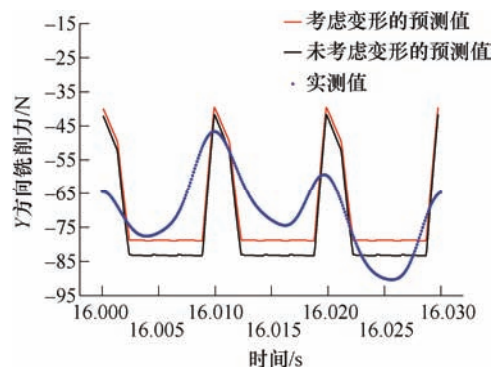


图 13 Y 方向铣削力预测值与实测值对比

## 4 结论

(1) 建立了工件变形影响下的薄壁件五轴侧铣铣削力模型。以机械 II 型力学模型为基础, 利用欧拉-伯努利梁理论计算工件的弹性变形量, 并将其引入建模过程来更新模型参数, 确保铣削力预测模型的准确性。

(2) 搭建了薄壁件五轴侧铣试验平台, 通过试验结果同考虑变形与不考虑变形的比较, 得出在考虑变形的情况下, X、Y 方向上铣削力的平均峰值误差分别减小了 4.42% 和 0.62%, 验证了模型的有效性。

(3) 本文建立的考虑工件变形的铣削力模型, 为后续的铣削参数优化和稳定性控制提供了技术支持, 同时为研究包含力致误差在内的综合误差建模提供了理论依据, 有助于分析五轴侧铣加工薄壁件的变形误差机理。

## 参 考 文 献

- [1] LI Z L, ZHU L M. Mechanistic modeling of five-axis machining with a flat end mill considering bottom edge cutting effect[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(11): 111012.
- [2] 王立涛, 柯映林, 黄志刚. 航空铝合金 7050-T7451 铣削力模型的试验研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(19): 70-72.  
WANG Litao, KE Yinglin, HUANG Zhigang. Experimental study of milling force model for aviation aluminum alloy 7050-T7451[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(19): 70-72.
- [3] TSAI C L, LIAO Y S. Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 24-33.

- [4] ZUPERL U, CUS F, REIBENSCHUH M. Neural control strategy of constant cutting force system in end milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(3): 485-493.
- [5] ALTINTAS Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [6] 刘均, 曾桂林, 邹益胜, 等. 瞬时铣削力数学模型及验证[J]. *机械设计与制造*, 2016(11): 1-4.  
LIU Jun, ZENG Guilin, ZOU Yisheng, et al. Instantaneous milling force mathematical model and experimental verification[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2016(11): 1-4.
- [7] ZHANG X, ZHANG J, PANG B, et al. An accurate prediction method of cutting forces in 5-axis flank milling of sculptured surface[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 104: 26-36.
- [8] LI Z L, DING Y, ZHU L M. Accurate cutting force prediction of helical milling operations considering the cutter runout effect[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9): 4133-4144.
- [9] LI Z L, NIU J B, WANG X Z, et al. Mechanistic modeling of five-axis machining with a general end mill considering cutter runout[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 96: 67-79.
- [10] 李勇. 侧铣直纹曲面的铣削力预测及变形误差研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
LI Yong. Research on milling force prediction and deformation error of ruled surface by flank milling error of ruled surface by flank milling[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [11] 王立平, 段飞宇, 侣昊, 等. 五轴侧铣加工瞬时未变形切屑厚度计算模型[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 148-152.  
WANG Liping, DUAN Feiyu, SI Hao, et al. Calculation model of instantaneous undeformed chip thickness in 5-axis flank milling process[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 148-152.
- [12] WANG L P, YUAN X, SI H, et al. A cutting force model based on compensated chip thickness in five-axis flank milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(1): 1413-1423.
- [13] 王立平, 王顶, 于广, 等. 五轴侧铣加工铣削力预测[J]. *清华大学学报*, 2020, 61(9): 1-7.  
WANG Liping, WANG Ding, YU Guang, et al. Milling forces during five-axis flank milling[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2020, 61(9): 1-7.
- [14] 段飞宇. 基于复杂直纹面精加工的变形误差补偿及刀位优化研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
DUAN Feiyu. Research on the compensation of deformation error and the optimization of tool position based on the fine machining of complex ruled surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [15] 陈志涛. 基于切削厚度迭代计算的薄壁件加工误差建模[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.  
CHEN Zhitao. Modeling of machining errors of thin-walled parts based on iterative calculation of cutting thickness[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [16] SCHMITZ T L, HONEYCUTT A. Analytical solutions for fixed-free beam dynamics in thin rib machining[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 41-50.

作者简介: 卫星驰, 男, 1994 年出生。主要研究方向为精密检测与控制、装备自动化。

E-mail: wxingchi1023@163.com

茅健(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为精密检测与控制、装备自动化。

E-mail: jmiao@sues.edu.cn