DOI: 10.3901/JME.2019.05.241

微铣削中考虑刀具跳动的瞬时刀具挠度变形研究*

张雪薇 于天彪 王宛山

(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

摘要: 基于对将刀具跳动(包括轴线偏移跳动及轴线倾斜跳动)的影响考虑在内的微铣削力的研究, 提出一种新的微铣削加工过程中刀具挠度变形解析计算方法, 在微铣削加工刀具挠度变形理论模型的建立过程中, 以微立铣刀为例, 将微立铣刀假设为连续的铁木辛柯梁(Timoshenko beam)并采用刀具工件切削接触区域内沿刀具切削刃方向作用于切削刃离散微元上的分布微铣削力载荷取代作用于刀尖位置的总微铣削力。此外, 为获取微铣削加工过程中的刀具挠度变形具体数值, 设计并搭建包括 x 轴及 y 轴两方向电容式传感器的测量系统, 并通过实验对所提出的微铣削加工过程中考虑刀具跳动的刀具挠度变形理论模型进行对比验证和分析, 验证所提出模型的正确性, 并为进一步研究微铣削加工过程工件表面质量及参数优化提供理论依据。

关键词: 微铣削; 刀具跳动; 刀具挠度变形; 微铣削力

中图分类号: TG156

Study on Instantaneous Tool Deflections Considering Tool Run-out in Micro Milling Process

ZHANG Xuewei YU Tianbiao WANG Wanshan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: According to the micro milling forces considering the influence of tool run-out (axial offset and tilt), a new mathematic method of tool deflections is proposed in the micro milling process. In the theoretical model of tool deflections in micro milling operations, the micro flat end mill is assumed as a continuous Timoshenko beam, and the distributed cutting forces acting on the discrete elements along the cutting edge direction have displaced the total cutting forces acting on the tool tip. Moreover, in order to obtain the values of tool deflections in micro milling operations, the measuring system including the capacitance sensors in the x -axis and y -axis directions is designed and set up. Then, the measured and predicted tool deflections can be compared and analyzed to validate the accuracy of the proposed theoretical model. The proposed model of tool deflections provides the theoretical foundation for further study on surface quality and parameters optimization of micro milling process.

Key words: micro milling; tool run-out; tool deflections; micro milling forces

0 前言

随着我国航空航天、生物医药、新兴电子科技和能源环保等领域的发展, 对起主导作用的以结构复杂及尺度微小为特征的零件产品的微小型化技术的需求更加迫切。微铣削加工过程中的加工变形一直是保证微小型零件加工制造的主要难题之一, 在包括主轴、刀具卡具、微铣刀、工件和工件卡具在内的微铣削加工系统中, 微铣刀的抗弯强度远低于

其他部分, 其由切削力^[1-2]作用影响而产生的加工变形问题尤为突出。

为了提高加工质量, 国内外学者对于建立刀具挠度变形模型进行研究。在通常情况下采用基于有限元分析(Finite element analysis, FEM)的数值计算方法计算刀具挠度变形, 其缺点是数据编程较为复杂、计算效率较低^[3-4]。2003 年, 伊利诺伊香槟分校 SUTHERLAND 等^[5]首先将刀具挠度变形的反馈影响考虑进入切削力模型。2003 年, 韩国庆北大学 KIM 等^[6]根据刀具和卡具之间的刚度计算由切削力引起的刀具挠度变形, 其中将刀具看作由刀柄和切削刃两部分构成的悬臂梁。同时, 2012 年韩国国立全北大学 RYU 等^[7]基于傅里叶级数将刀

* 教育部高校基本科研业务费资助项目(N162410002-9)。20180314 收到初稿, 20180912 收到修改稿

具挠度变形表述为刀具位置角和加工参数有关的通用解析表达式。2013年,西班牙莱昂大学 RODRÍGUEZ 等^[8]首先建立包含刀具挠度变形在内的切削厚度模型,基于此切削厚度模型分析刀具挠度变形对微铣削加工过程的影响。在此基础上,2013年土耳其学者 MAMEDOV 等^[9-10]进一步分别在剪切效应主导和耕犁效应主导的切削区域内建立微铣削力模型,并基于此确定微铣削加工过程中的瞬时刀具挠度变形,然而在微铣削力及瞬时刀具挠度变形的计算工程中忽略了刀具跳动(轴线偏移跳动和轴线倾斜跳动,即径向跳动和倾斜跳动)及实际加工的次摆线运动轨迹。目前对于铣削加工刀具挠度变形的研究,大多针对宏观加工,而对微铣削加工所采用的微铣刀的瞬时挠度变形的研究则较少。同时,这些研究没有考虑到刀具径向跳动和倾斜跳动以及实际加工次摆线运动轨迹对微铣削加工中所采用的微铣刀瞬时挠度变形理论模型的影响。

微铣削加工尺度小并且加工精度要求高,在微铣削力的作用下会使刀具发生一定程度的挠度变形,进而影响加工零件的尺寸精度和表面质量。考虑到同时对刀具和工件变形进行理论建模较为困难和复杂以及预测精度难以保证,并且对于工件而言微铣刀刚度较小,更易因刚度不足引起变形成为影响加工尺寸精度的主要因素,因此本文主要对微铣削加工过程中的瞬时刀具挠度变形预测模型进行研究。

以立铣刀微铣削加工为例,本文的目的在于通过考虑刀具跳动(径向跳动和倾斜跳动)及实际切削刃次摆线运动轨迹的微铣削力,构建针对微立铣刀的挠度变形的理论预测模型。微立铣刀被假设为连续的铁木辛柯梁(Timoshenko beam)并且采用刀具工件切削接触区域内沿刀具切削刃方向作用于切削刃离散微元上的分布微铣削力载荷取代作用于刀尖位置的总铣削力。为了测量出微铣削加工过程中的刀具挠度变形具体数值而设计出特定的连接件固定连接 x 轴和 y 轴两个方向的电容式传感器,并通过实验对所提出的微铣削加工瞬时刀具挠度变形理论模型进行验证和分析。

1 考虑刀具跳动的微铣削力建模

立铣刀微铣削加工过程如图1所示,点 P 为刀具切削刃上的任意点, λ_s 为微立铣刀螺旋角,将微铣刀沿着轴线方向离散为 K 个切削刃微元, a_p 为刀具轴向切削深度, a_e 为刀具径向切削深度,第 j 个

切削刃上刀具接触角 $\psi_j(t)$ 可通过下式来计算

$$\psi_j(t) = \theta(t) + (j-1)\phi_p - \varphi \quad (1)$$

式中, $\theta(t)$ 为 $j=0$ 时的旋转角 $\theta(t) = \omega t$; $\phi_p = 2\pi / N_z$ 为与齿数相关的齿间角; $\varphi = z \tan \lambda_s / R$ 为迟滞角; R 为微铣刀半径(mm); N_z 为微铣刀刀齿数。

图1 立铣刀微铣削加工过程

本文将包括刀具径向跳动和刀具倾斜跳动在内的刀具跳动的影响考虑在内,刀具跳动参数为:偏心距 ρ 、偏心距的位置角 α 、倾斜角 τ 、倾斜角的位置角 ϕ ^[11]。

基于所定义的刀具跳动参数,考虑刀具跳动(刀具径向跳动和倾斜跳动)影响的微铣削加工过程中刀刃运动轨迹偏移量如下式

$$x_r = [R(z) - R] \sin \left(\alpha - \frac{z \tan \lambda_s}{R} + \frac{2\pi j}{N_z} \right) \quad (2)$$

$$y_r = [R(z) - R] \cos \left(\alpha - \frac{z \tan \lambda_s}{R} + \frac{2\pi j}{N_z} \right) \quad (3)$$

式中实际切削半径表示为^[12]

$$R(z) = \{ \rho^2 + R^2 + (L-z)^2 \sin^2 \tau + 2R\rho(-\alpha + \varphi + 2j\pi / N_z) + 2(L-z) \sin \tau [\rho \cos \phi + R \cos(\phi - \alpha + \varphi + 2j\pi / N_z)] \}^{1/2} \quad (4)$$

式中, L 为微铣削刀具安装后刀具悬伸长度。

考虑刀具跳动的微铣削加工过程中理论瞬时未变形切屑厚度 h_c 基于 Newton-Raphson 迭代方法可表示为

$$h_c(t) = \sqrt{\tan^2 \psi(t) + 1} | [R(z) - R] \cos(\alpha_0 + \omega t - z \tan \lambda_s / R + 2j\pi / N_z) + R \cos \psi(t) - [R(z) - R] \cos(\alpha_0 + \omega t' - z \tan \lambda_s / R + 2(j-1)\pi / N_z) + R \cos \psi(t') | g(\psi(t)) \quad (5)$$

$$g(\psi(t)) = \begin{cases} 1 & \psi_{st} \leq \psi(t) \leq \psi_{ex} \\ 0 & \psi(t) < \psi_{st} \text{ or } \psi(t) > \psi_{ex} \end{cases}$$

式中, ψ_{st} 、 ψ_{ex} 为在刀具跳动和切削刃次摆线运动轨迹的基础上通过计算所获取的动态切入角、切出角^[13]。

在微铣削加工过程中, 当瞬时未变形切屑厚度 $h_c(t)$ 大于最小切削厚度 h_{min} 时, 微铣削加工过程由剪切效应主导并且工件加工材料完全形成切屑^[14]。与宏观铣削加工类似, 在剪切效应主导的区域内的微铣削力可表示为

$$\begin{pmatrix} dF_{xs}(t) \\ dF_{ys}(t) \\ dF_{zs}(t) \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} K_{tc} \cdot h_c(t) \cdot dz + K_{te} \cdot dz \\ K_{rc} \cdot h_c(t) \cdot dz + K_{re} \cdot dz \\ K_{ac} \cdot h_c(t) \cdot dz + K_{ae} \cdot dz \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos\psi(t) & \sin\psi(t) & 0 \\ -\sin\psi(t) & \cos\psi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $dF_{xs}(t)$ 、 $dF_{ys}(t)$ 、 $dF_{zs}(t)$ 分别表示在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上作用于切削刃微元处的剪切微铣削力分量; K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 分别表示与微铣削瞬时未变形切屑厚度有关的位于切向、径向和轴向的剪切力系数; K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 分别表示与微铣削瞬时未变形切屑厚度有关的位于切向、径向和轴向的切削力系数; dz 表示切削微元的轴向宽度;

当瞬时未变形切屑厚度 $h_c(t)$ 小于最小切削厚度 h_{min} 时, 微铣削加工过程由耕犁效应主导^[15], 工件加工材料在切削区域内同时产生弹塑性变形及部分切屑。在耕犁效应主导切削加工区域内的微铣削力可表示为

$$\begin{pmatrix} dF_{xp}(t) \\ dF_{yp}(t) \\ dF_{zp}(t) \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} K_{tp} \cdot A_p(t) \cdot dz + K_{te} \cdot dz \\ K_{rp} \cdot A_p(t) \cdot dz + K_{re} \cdot dz \\ K_{ap} \cdot A_p(t) \cdot dz + K_{ae} \cdot dz \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, K_{tp} 、 K_{rp} 、 K_{ap} 分别表示位于切向、径向和轴向的耕犁力系数。

2 动态瞬时刀具挠度变形理论模型

为了建立微铣削加工过程的瞬时刀具挠度变形理论模型, 以微立铣刀为例, 由于微立铣刀的螺旋槽结构在降低刀具抗弯强度的同时增加了模型建立的复杂性, 因此在进行微立铣刀建模时将刀具简化为具有 80% 等效直径的铁木辛柯悬臂梁模型^[16-17]。

图 2 所示为铁木辛柯悬臂梁模型, 悬臂梁长度为 L , 瞬时微铣削载荷作用在悬臂梁与工件切削接触区域

上, 悬臂梁产生与微铣削载荷方向相同的弹性变形, 即悬臂梁的挠度变形。将刀具离散为有限个刀具切削微元, 基于具有有限切削厚度 dz 的圆盘微元, 作用在微铣刀切削刃上的切削力随之被离散, 当 dz 非常小时, 每个圆盘微元上的切削力可看作集中载荷。如图 2 所示, 将微铣刀切削刃部分离散为 N_e 个单元, $2N_e - 1$ 个结点, 结点编号用于单元方向定位和确定结点位移, 每个刚结点有 3 个位移变量 u_x 、 u_y 、 u_θ , 圆盘微元可视为连续铁木辛柯梁单元, 铁木辛柯梁编号如图所示, 第 k 个连续铁木辛柯梁单元存在 6 个自由度, 即平移动移变量 u_x^{k-1} 、 u_y^{k-1} 、 u_x^k 、 u_y^k 和旋转位移变量 u_θ^{k-1} 、 u_θ^k 。铁木辛柯梁单元模态坐标系中, 弹性模量为 E , 铁木辛柯梁横截面积为 A , 剪切模量为 G , 惯性力矩为 I , 铁木辛柯梁单元的剪切修正系数 K_s 可通过下式计算^[18]

$$K_s = 5(1+\nu)/6+5\nu \quad (9)$$

式(9)中 ν 为刀具材料泊松比, 可定义为

$$\nu = E/2G - 1 \quad (10)$$

图 2 微铣刀铁木辛柯离散梁模型

单元刚度矩阵 $\mathbf{K}^e$ 可表示为

$$\mathbf{K}^e = \mathbf{G}^T \bar{\mathbf{K}}^e \mathbf{G} \quad (11)$$

转换矩阵 $\mathbf{G}$ 可表达为

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_{x\bar{y}} & n_{y\bar{y}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{x\bar{y}} & n_{y\bar{y}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

转换矩阵 $\mathbf{G}$ 内的 $n_{i,\bar{j}}$ 为方向余弦

$$n_{x\bar{x}} = n_{y\bar{y}} = \frac{x_2 - x_1}{l} \quad n_{y\bar{x}} = -n_{x\bar{y}} = \frac{y_2 - y_1}{l} \quad (13)$$

式中, l 是铁木辛柯梁单位长度。

综上, 式(11)可表述为

$$\mathbf{K}^e = \begin{pmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & A & B & 0 & -A & B \\ 0 & B & C & 0 & -B & D \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -A & -B & 0 & A & -B \\ 0 & B & D & 0 & -B & C \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{12EI}{l^2 G A K_s} \quad A = \frac{12EI}{l^3(1+\mu)} \quad B = \frac{6EI}{l^2(1+\mu)} \quad (15)$$

$$C = \frac{4EI \left(1 + \frac{\mu}{4}\right)}{l(1+\mu)} \quad D = \frac{2EI \left(2 - \frac{\mu}{2}\right)}{l(1+\mu)}$$

自由梁单元 k 所对应的 6 自由度刚度矩阵可表示为

$$\mathbf{K}^k = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} k_{11}^{1+2} & k_{21}^{1+2} & k_{31}^{1+2} & k_{41} & k_{51} & k_{61} \\ k_{12}^{1+2} & k_{22}^{1+2} & k_{32}^{1+2} & k_{42} & k_{52} & k_{62} \\ k_{13}^{1+2} & k_{23}^{1+2} & k_{33}^{1+2} & k_{43} & k_{53} & k_{63} \\ k_{14} & k_{24} & k_{34} & k_{44}^{2+3} & k_{54}^{2+3} & k_{64}^{2+3} \\ k_{15} & k_{25} & k_{35} & k_{45}^{2+3} & k_{55}^{2+3} & k_{65}^{2+3} \\ k_{16} & k_{26} & k_{36} & k_{46}^{2+3} & k_{56}^{2+3} & k_{66}^{2+3} \\ \vdots & & & \vdots & & \end{pmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ \vdots \end{matrix} \end{matrix} \quad (18)$$

连续铁木辛柯梁的整体单元位移矢量

$$\boldsymbol{\delta} = [u_x^1 \quad u_y^1 \quad u_\theta^1 \quad u_x^2 \quad u_y^2 \quad u_\theta^2 \quad \cdots \quad u_x^{N_e} \quad u_y^{N_e} \quad u_\theta^{N_e}]^T \quad (19)$$

基于所建立的对应于离散切削微元上的微铣削力模型,一旦获得刀具结构整体刚度矩阵,作用于刀具上引起刀具挠度变形的微铣削力与位移矢量的关系可以根据虎克定理得出

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} \quad (20)$$

式(20)中作用于刀具上引起刀具挠度变形的微铣削力可表述为

$$\mathbf{F} = [dF_x^1 \quad dF_y^1 \quad 0 \quad dF_x^2 \quad dF_y^2 \quad 0 \quad \cdots \quad dF_x^{N_e} \quad dF_y^{N_e} \quad 0]^T \quad (21)$$

通过求解式(20)可以得出 x 轴方向和 y 轴方向瞬时刀具挠度变形值。

$$\begin{pmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\mu)} & \frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\mu)} & \frac{6EI}{L^2(1+\mu)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & \frac{EI(4+\mu)}{L(1+\mu)} & 0 & -\frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & \frac{EI(2-\mu)}{L(1+\mu)} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3(1+\mu)} & -\frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\mu)} & \frac{6EI}{L^2(1+\mu)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & \frac{EI(2-\mu)}{L(1+\mu)} & 0 & -\frac{6EI}{L^2(1+\mu)} & \frac{EI(4+\mu)}{L(1+\mu)} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{12 \cdot E \cdot I}{K_s \cdot A \cdot G \cdot L^2} \quad (17)$$

基于连续铁木辛柯梁的单元刚度矩阵可求出整体刚度矩阵

3 瞬时刀具挠度变形仿真与实验验证

根据以上理论分析,可以利用 Matlab 软件分析计算微铣削加工过程中微立铣刀的瞬时挠度变形,求解微铣削刀具挠度变形的过程步骤见流程图 3。

为了验证微铣削加工过程刀具挠度变形预测模型的正确性,对实际工件进行微铣削槽铣试验。试验所采用刀具为硬质合金整体双刃微立铣刀,刀具直径为 508 μm ,螺旋角为 30°,刀前角 13°,微铣刀刀具悬伸长度 21 mm,切削刃半径 2.1 μm ,加工工件材料为铝合金 Al6061。微铣刀刀具跳动参数实验测量数值,其中偏心距 ρ 为 3.0 μm 、偏心距的位置角 α 为 49°、倾斜角 τ 为 1.8°、倾斜角的位置角 ϕ 为 36°。

图3 微铣削刀具瞬时挠度变形求解步骤流程图

图4 刀具挠度变形试验装置流程图

在每次加工过程中，微铣刀在工件上的作用位置在 z 轴方向上保持不变，即在加工过程中保持恒定的切削深度。测力系统采用 Kistler 9273 三向压电式测力仪以及配套的电荷放大器和数据采集系统。微铣刀挠度变形测量系统采用两个 MicroSense 5000 Series Model 5504 电容式非接触位移传感器分别测量 x 轴和 y 轴方向的微铣刀挠度变形值，其分辨率在 1 nm 以内。测力系统及刀具挠度变形测量系统试验装置流程图如图 4 所示，微铣削槽铣加工及测量试验如图 5 所示。其中， x 轴和 y 轴方向的电容式位移传感器采用如图所示的铝合金连接件将其固定在机床位置上。

图5 微铣削槽铣加工及测量试验

Test 10 和 Test 12 的切削加工参数所获取的仿真预测微铣削力和试验测得微铣削力的结果比较，比较结果显示两者在幅值和形状方面都吻合良好。图 6b、图 6d 和图 6f 为微铣刀挠度变形的理论预测值与试验测量值的比较结果，由图可见，微铣削加工过程中 x 轴方向测得的刀具挠度变形值分别在离刀具理论位置 $-4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $13\text{ }\mu\text{m}$ 、 $-6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $17\text{ }\mu\text{m}$ 、 $-4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\text{ }\mu\text{m}$ 之间的偏移范围内， y 轴方向测得的试验刀具挠度变形分别在离刀具理论位置 $-2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\text{ }\mu\text{m}$ 、 $-5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $-2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12\text{ }\mu\text{m}$ 之间的偏移

表1 微铣削槽铣加工试验过程切削参数

Test 编号	径向切削深度/mm	轴向切削深度/mm	每齿进给量/ $(\mu\text{m}/\text{tooth})$	主轴转速/ (r/min)
1	0.508	0.15	3.0	10 000
2	0.508	0.15	4.0	10 000
3	0.508	0.10	5.0	10 000
4	0.508	0.10	5.0	12 000
5	0.508	0.15	3.0	12 000
6	0.508	0.15	4.0	12 000
7	0.254	0.10	3.0	10 000
8	0.508	0.15	5.0	12 000
9	0.254	0.10	3.0	12 000
10	0.508	0.20	3.0	10 000
11	0.508	0.10	3.0	12 000
12	0.508	0.10	4.0	12 000

(a) Test 1 切削参数下微铣力比较结果

(b) Test 1 切削参数下刀具挠度变形结果

图 6a、图 6c 和图 6e 所示为基于表 1 中 Test 1、

(c) Test 10 切削参数下微铣削力比较结果

(d) Test 10 切削参数下刀具挠度变形结果

(e) Test 12 切削参数下微铣削力比较结果

(f) Test 12 切削参数下刀具挠度变形结果

图6 微立铣刀的微铣削力及刀具挠度变形仿真和试验结果比较

范围内,同时 x 轴方向最大测量刀具挠度变形分别在 $-1.5\mu\text{m}$ 和 $11.0\mu\text{m}$ 、 $-6.5\mu\text{m}$ 和 $17.5\mu\text{m}$ 、 $-3.0\mu\text{m}$ 和 $11.0\mu\text{m}$ 范围内, y 轴方向最大测量刀具挠度变形

分别在 $0\mu\text{m}$ 和 $13\mu\text{m}$ 、 $-5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 、 $-2\mu\text{m}$ 和 $11.5\mu\text{m}$ 范围内。

(a)

(b)

图7 不同刀具挠度模型所预测值和试验测量值误差百分比比较结果

根据本文所提出的微铣削加工过程刀具挠度模型和传统刀具挠度模型分别预测的微铣削加工过程中的刀具挠度仿真数值与试验测量值之间的误差百分比如图7a和图7b所示。本文所提出的微铣刀挠度变形模型预测值和微铣削加工过程中的试验测量值之间的误差百分比数值低于传统刀具挠度变形模型,且均在20%以内。根据微铣刀挠度变形的理论预测值和试验测量值的比较结果可以验证本文所提出的微铣刀挠度变形的理论模型的正确性和合理性。

4 结论

(1) 本文基于微铣削加工过程中刀具跳动(径向跳动和倾斜跳动)影响下的切削刃次摆线运动轨迹,提出了瞬时未变形切屑厚度理论模型,与经典微铣削加工过程中的未变形切屑厚度模型相比,所提出的瞬时未变形切屑厚度理论模型将有刀具跳动(径向跳动和倾斜跳动)及刀具次摆线运动轨迹及其所引起的微铣刀切入角和切出角的动态变化考虑在内。

(2) 在所提出考虑刀具跳动的微铣削加工瞬时未变形切屑厚度理论模型及考虑尺寸效应影响的切削机制下, 分别在耕犁效应主导和剪切效应主导的切削区域内建立其微铣削力理论模型, 计算出作用于刀具切削刃离散微元上的瞬时均布微铣削力。

(3) 根据微立铣刀的几何结构特点将刀具假设为连续铁木辛柯梁, 同时在刀具与工件切削接触区域利用沿刀具切削刃作用在切削刃离散微元的瞬时均布微铣削力取代作用于刀具特定点的铣削力合力, 以此建立微铣刀瞬时挠度变形理论模型, 并将不同切削加工参数下的仿真预测结果进行比较, 分析相关的切削加工参数对刀具瞬时挠度变形的影响。

(4) 利用硬质合金双刃微铣刀在材料为 Al6061 的工件上进行微铣削槽铣加工试验, 并采用所设计的连接件固定连接 x 轴和 y 轴方向的电容式位移传感器测量微铣刀在微铣削加工的瞬时刀具挠度变形数值, 通过与理论模型仿真结果的对比分析, 验证了本文所提出微铣刀挠度变形模型的正确性, 从而有助于进一步提高微铣削加工工件的表面质量、控制和优化加工工艺参数。

参 考 文 献

- [1] 朱锴鹏, 李科选, 梅涛, 等. 微铣削力建模研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 20-34.
ZHU Kunpeng, LI Kexuan, MEI Tao, et al. Progress of cutting force modelling in micromilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 20-34.
- [2] 聂强, 黄凯, 毕庆贞, 等. 微铣削中考虑刀具跳动的瞬时切厚解析计算方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 169-178.
NIE Qiang, HUANG Kai, BI Qingzhen, et al. New mathematic method of calculating instantaneous un-deformed chip thickness with tool run-out in micro-end-milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 169-178.
- [3] SAFFAR R J, RAZFAR M R, ZAREI O, et al. Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2008, 16(10): 1677-1688.
- [4] 宋戈, 李剑峰, 孙杰. 基于铣削力精确建模的工件表面让刀误差预测分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 168-175.
- SONG Ge, LI Jianfeng, SUN Jie. Analysis on prediction of surface error based on precision milling cutting force model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(21): 168-175.
- [5] SUTHERLAND J W, DEVOR R E. An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems [J]. Journal of Engineering for Industry, 1986, 108(4): 269-279.
- [6] KIM G M, KIM B H, CHU C N. Estimation of cutter deflection and form error in ball-end milling processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(9): 917-924.
- [7] RYU S H. An analytical expression for end milling forces and tool deflection using Fourier series [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(1-4): 37-46.
- [8] RODRÍGUEZ P, LABARGA J E. A new model for the prediction of cutting forces in micro-end-milling operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(2): 261-268.
- [9] MAMEDOV A, LAZOGLU I. Machining forces and tool deflections in micro milling[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 147-151.
- [10] MAMEDOV A, LAZOGLU I. Instantaneous tool deflection model for micro milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 769-777.
- [11] LI Z L, ZHU L M. Envelope surface modeling and tool path optimization for five-axis flank milling considering cutter runout[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(4): 041021.
- [12] WAN M, ZHANG W H, DANG J W, et al. New procedures for calibration of instantaneous cutting force coefficients and cutter runout parameters in peripheral milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(14): 1144-1151.
- [13] ZHANG X, EHMANN K F, YU T, et al. Cutting forces in micro-end-milling processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 107: 21-40.
- [14] BISSACCO G, HANSEN H N, SLUNSKY J. Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 67(1): 113-116.
- [15] JUN M B G, GOO C, MALEKIAN M, et al. A new mechanistic approach for micro-end-milling force modeling[J]. Journal of Manufacturing Science and

- Engineering, 2012, 134(1): 011006-011015.
- [16] HUO D H, CHEN W Q, TENG X Y, et al. Modeling the influence of tool deflection on cutting force and surface generation in micro-milling[J]. Micromachines, 2017, 8(6): 188.
- [17] MIJUŠKOVIĆ G, KRAJNIK P, KOPAČ J. Analysis of tool deflection in micro milling of graphite electrodes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1-4): 209-217.
- [18] TIMOSHENKO S P X. On the transverse vibrations of bars of uniform cross-section[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1922, 43(253): 125-131.
-
- 作者简介: 张雪薇, 女, 1988 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为微铣削加工。
E-mail: zhangxuewei@me.neu.edu.cn