

基于真实刀位轨迹的铣削厚度建模*

贺小东¹,雷海峰²,江波²,吴宝海¹

(1.西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072;

2.中航工业西安航空发动机(集团)有限责任公司,西安 710021)

[摘要] 瞬时未变形切削厚度是决定铣削加工切削力预测精度的一个重要参数。现有铣削力预测方法中,通常采用圆形轨迹逼近铣刀刀齿的运动轨迹并进行未变形切削厚度的计算。铣刀刀齿的实际运动轨迹为摆线轨迹,采用圆形轨迹近似必然造成在计算未变形切削厚度时存在误差。为获得更精确的铣削力预测结果,本文提出了一种基于刀齿真实轨迹的未变形切削厚度计算方法。通过计算铣刀刀齿的真实摆线运动轨迹,推导出未变形切削厚度计算的超越方程。通过对该超越方程的数值求解,得到了准确的未变形切削厚度。最后,通过算例分析及对比验证了所提方法的有效性。

关键词: 铣削;真实刀位轨迹;瞬时铣削厚度;铣削力

Model of the Instantaneous Underformed Chip Thickness Based on Real Tool Path

HE Xiaodong¹, LEI Haifeng², JIANG Bo², WU Baohai¹

(1.Key Laboratory of Contemporary Design and integrated Manufacturing Technology (Northwestern Polytechnical University), Ministry of Education, Xi'an 710072, China;

2.AVIC Xi'an Aero-Engine(Group)Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] In the milling process, the determination of the instantaneous undeformed chip thickness is a key issue. In the traditional models, assuming a circular tool path, the instantaneous undeformed chip thickness is expressed as a function of feed per tooth and the phase angle, which resulted in decreased accuracy of the results. This paper presents a more accurate method of the determining of the undeformed chip thickness based on true tooth trajectories. Though analyzing true tooth trajectories, the instantaneous undeformed chip thickness can be obtained by solving the transcendental equation. Finally, perform the simulation and experiment validation, the results show that the method proposed has more advantages.

Keywords: Milling; True tooth trajectories; Instantaneous undeformed chip thickness; Milling force

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.084

未变形切削厚度是铣削加工建模的重要参数之一。传统的切削厚度模型中,假设刀位轨迹是圆形,进而近似得到切削厚度和每齿进给及相位角的关系,通过验证^[1],在理想状态下,即不考虑刀具偏心等,进给量为定值时,在每齿进给比较小的情况下,这种假设可以满足一定的计算要求。

虽然传统模型高度简化了分析过程,但是不能满足日益增长的高精密工程的需求。随着对加工精度要求的提高,如超精加工和铣削振动的影响等,需要更加精确地计算铣削力时,就需要更加精确地求出未变形切削厚度。

铣削是断续的切削过程,为了确定切削厚度,必须首先确定刀具相对工件的切触点轨迹。铣削过程几何已经得到了广泛的研究,早期的学者认为切触点的轨迹是圆形, MARTELLOTTI^[2-3]的研究表明铣刀的刀位轨迹是余摆线,并且推导出了准确的轨迹方程。SPEIWAK^[4]提出了更加精确的近似刀位轨迹来计算切削厚度。LI等^[5]应用泰勒展开得到了超越方程的数值解,求得了真实刀位轨迹下未变形切削厚度的近似解。RAO等^[6]对曲面加工中的切削厚度进行了分析,并将真实轨迹和圆形近似轨迹的铣削厚度进行了对比。袁平^[7]在有限元仿真中用到了真实刀位轨迹。西北工业大学的闫雪^[8]基于立铣刀真实切削刃轨迹,对近似的切削厚度模型进行补偿,得到较传统方法更加准确的结果。

* 陕西省自然科学基金研究计划资助项目(No.2014JM7274)。

本文基于真实的刀位轨迹提出了一种新的瞬时切削厚度的计算方法。通过相邻刀齿的几何关系分析,最终通过求解超越方程得到瞬时切削厚度的数值解。本文研究假设为理想铣削过程,即不存在偏心、振动和变形等。

1 瞬时切削厚度建模

铣刀刀尖的运动是由刀具的平动和绕自身轴线的转动两个运动合成得到的,实际运动轨迹是一条摆线。在进给量远小于铣刀直径的情况下,铣刀刀尖的轨迹可以用圆来近似,未变形切屑厚度可以用下式表示:

$$h = f_1 \sin \theta \quad (1)$$

其中, f_1 为进给率(单位为 mm/r-齿), θ 为瞬时相位角(单位为 deg 或 rad)。

通过验证^[9],在理想加工状态,即不考虑刀具变形偏心等,进给量为定值的时候计算瞬时切削厚度时,在每齿进给量较小的情况下,这种假设可以满足一定计算要求。随着对加工精度要求的提高,如铣削振动研究和故障诊断等需要计算更精确的切削力时,需要得到更精确的瞬时切削厚度。

基于上述原因,建立如下模型:

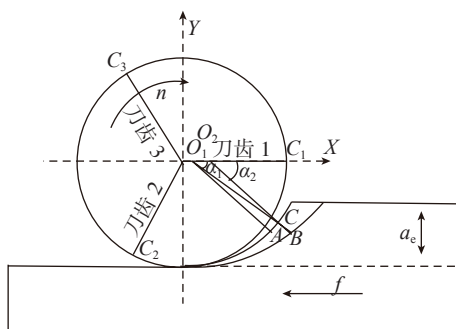


图1 瞬时切削厚度示意图

Fig.1 Schematic diagram of instantaneous undeformed chip thickness

已知在实际加工过程中,刀具以转速为 n , 同时以 f 的进给速度切削材料,假设左侧的摆线为齿1的轨迹,右侧的摆线为齿2的轨迹,刀具刀心点坐标为 O 点的坐标为,在该位置时,刀齿1位于上述图中的位置,记当前刀齿1的旋转角为 0° ,当刀具运动到 O_1 点时,刀齿1运动到 A 点的位置,假设刀齿1的旋转角度为 α_1 ,则时刻 t 时,已知 $(\alpha_1 = \omega t$ 为刀具旋转的角速度, $\omega = 2\pi n$ (转速)/60, t 为转过 α_1 所需要时间), A 点(刀齿1轨迹上的点)的坐标可以表示为:

$$A = \begin{bmatrix} x_{E_1} \\ y_{E_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \frac{\alpha_1}{\omega} + R \cos \alpha_1 \\ R \sin \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

O_1 点的坐标为:

$$O_1 = \begin{bmatrix} f \frac{\alpha_1}{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当刀齿2切入的时候,假设刀齿2旋转的角度为 α_2 ,其轨迹上任意一点 B 点的坐标(刀齿2轨迹上的点)可以表示为:

$$B = \begin{bmatrix} x_{E_2} \\ y_{E_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \frac{\alpha_2 + \phi}{\omega} + R \cos \alpha_2 \\ R \sin \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, ϕ_p 为齿间角。

O_2 点的坐标为:

$$O_2 = \begin{bmatrix} f \frac{\alpha_2 + \phi}{\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据几何关系列表表达式:

$$\tan \alpha_2 = \frac{R \sin \alpha_1}{f t_1 + R \cos \alpha_1 - f t_2} \quad (6)$$

其中, R 为刀具半径, f 为每齿进给。

$$t = \frac{\alpha}{\omega} \quad (7)$$

对于三齿立铣刀来说,由于齿位角为 $\frac{2\pi}{3}$,因此,其旋转角度差 $\frac{2\pi}{3}$,可以建立两者的关系如下:

$$\tan \alpha_2 = \frac{R \sin \alpha_1}{f \frac{\alpha_1}{\omega} + R \cos \alpha_1 - f \frac{\alpha_2 + 2\pi/3}{\omega}} \quad (8)$$

根据超越方程(8),MATLAB编程求解 α_1 ,得到数值解,从而可求得齿1和齿2轨迹上任意对应两点的坐标,由下式

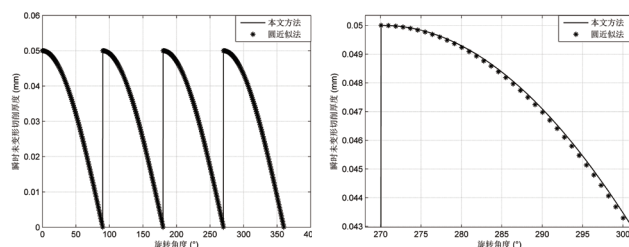
$$h = |B - C| = \sqrt{(x_{E_1} - x_{E_2})^2 + (y_{E_1} - y_{E_2})^2} \quad (9)$$

获得瞬时未变形切削厚度。

如图2,图3所示,当每齿进给比较小时,这两种计算方法的差距不是很大,随着每齿进给的增大,差距越来越明显。

2 铣削力实验验证

铣削过程中,切削力是反映切削厚度的最佳参数,



(a) 瞬时未变形切削厚度对比图

(b) 局部放大图

图2 瞬时未变形切屑厚度对比

(每齿进给0.05mm/z, 刀具直径12mm, 切宽6mm)

Fig.2 Comparison of instantaneous undeformed chip thickness and local enlarged drawing (feed per tooth 0.05mm/z,the diameter of cutting tool 12mm,cutting width 6mm)

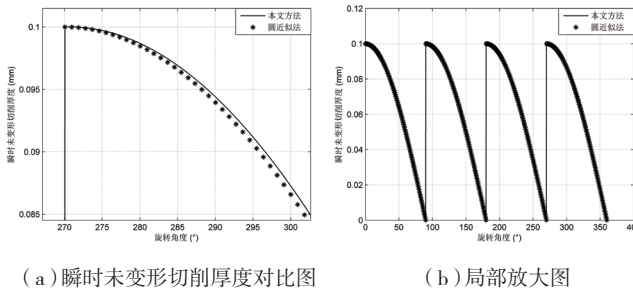


图3 瞬时未变形切屑厚度对比
(每齿进给0.1mm/z, 刀具直径12mm, 切宽6mm)

Fig.3 Comparison of instantaneous undeformed chip thickness and local enlarged drawing (feed per tooth 0.1mm/z, the diameter of cutting tool 12mm, cutting width 6mm)

本文选用机械模型。机械模型认为切向 $[F_t(\phi)]$ 、径向 $[F_r(\phi)]$ 和轴向 $[F_a(\phi)]$ 切削力表示为变化的切削面积 $[ah(\phi)]$ 和切削刃接触长度 (a) 的函数:

$$\begin{cases} F_t(\phi) = K_{tc}ah(\phi) + K_{tc}a \\ F_r(\phi) = K_{rc}ah(\phi) + K_{rc}a \\ F_a(\phi) = K_{ac}ah(\phi) + K_{ac}a \end{cases}, \quad (10)$$

其中, K_{tc} , K_{rc} 和 K_{ac} 分别为剪切作用对切向、径向和轴向切削力的作用系数, K_{te} , K_{re} 和 K_{ae} 是刃口力系数。切削力系数和刃口力系数由正交试验测得,具体求解方法参见^[9]。通过下列变换可以将微元力分解到进给 X ,法向 Y 和轴向 Z :

$$\begin{cases} dF_{xj}(\phi_j(z)) = -dF_{tj} \cos \phi_j(z) - dF_{rj} \sin \phi_j(z) \\ dF_{yj}(\phi_j(z)) = +dF_{tj} \sin \phi_j(z) - dF_{rj} \cos \phi_j(z) \\ dF_{zj}(\phi_j(z)) = +dF_{aj} \end{cases}。 \quad (11)$$

试验在立式加工中心 YHVT850Z 上进行,试验材料为铸铝 2A70。用 Kistler 9255B 3 向测力仪,获取每组试验条件下的铣削力,实际加工所使用刀具为劲锋三齿立铣刀,刀具型号为 12 × 12 × 26 × 83-3F。

实验结果见图 4 所示。从图中可以看出本文所提出的方法在较大每齿进给情况下更加准确,更能表现出优越性。

3 结束语

本文基于真实刀具轨迹,提出了一种计算瞬时切削厚度的新模型。通过对超越方程的数值求解,可以得出在每齿进给不断增大的情况下,圆形近似方法误差不断增大,而本文所提出方法准确性更加突出。与以往的计算模型相比,本文提出的瞬时切削厚度计算方法能够得到更加精确的瞬时切削厚度。最后通过两种方法对切削力进行了预测比较,结果表明:本文建立的切削厚度预测模型预测的切削力更加准确,具有较好的使用价值。

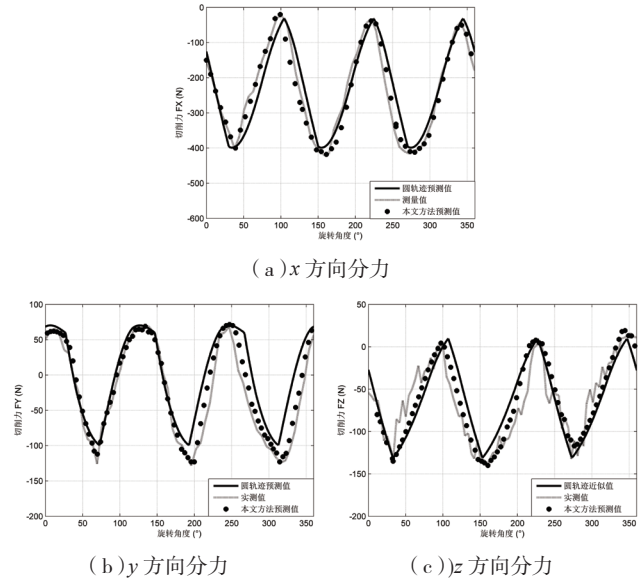


图4 圆轨迹近似和本文方法预测切削力与实测值比较
(主轴转速为5300, 进给速度为2000mm/min)

Fig.4 Comparison of cutting force between the measured values VS circular tool path and the method proposed in this paper (the spindle speed 5300 rpm , the feed speed cutting tool 12mm, cutting width 6mm)

参考文献

- [1] SPIEWAK S. An improved model of the chip thickness in milling. Annals of the CIRP, 1995, 44(1):39-42.
- [2] Martellotti M E. An analysis of the milling process. Trans. ASME, 1941, 63:677-700.
- [3] Martellotti M E. An analysis of the milling process. Part 2. Down milling. Trans. ASME, 1945, 67:233-251.
- [4] SPIEWAK S. An improved model of the chip thickness in milling. Annals of the CIRP, 1995, 44(1):39-42.
- [5] LI H Z, LIU K, LI X P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113:378-384.
- [6] RAO V S, RAO P V M. Modelling of tooth trajectory and process geometry in peripheral milling of curved surfaces. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45:617-630.
- [7] 袁平, 柯映林, 董辉跃. 基于次摆线轨迹的铝合金高速铣削有限元仿真. 浙江大学学报, 2009, 43(3):570-577.
- [8] YUAN P, KE Y L, DONG H Y. Trochoid-path-based FEM simulation for high-speed milling of aluminum alloy. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 43(3):570-577.
- [9] 闫雪, 陶华, 蔡晋, 等. 基于真实刀具轨迹的立铣刀切削厚度模型. 机械工程学报, 2011, 47(1):182-183.
- [10] YAN X, TAO H, CAI J, et al. Model of the Instantaneous Undeformed Chip Thickness in Milling Based on Real Tooth Trajectory. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1):182-183.
- [11] Janez G, Martin K, Klaus W. Mechanistic identification of specific force coefficients for a general endmill. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44:401-414.

(责编 叶枫)