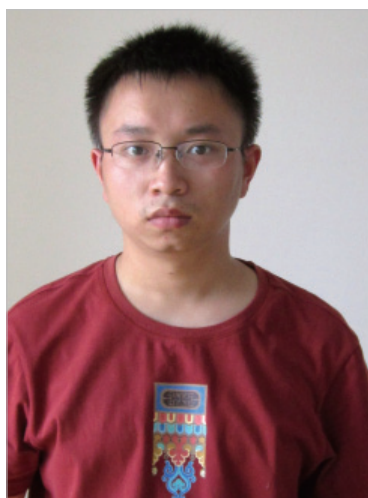


考虑刀具窜动下的切削过程 仿真与切削力建模

Cutting Force Modeling and Cutting Process Simulation in Milling Taking
Cutter Run-Out Into Account

西北工业大学机电学院 杨 川 杨茂奎



杨 川
西北工业大学硕士,主要从事集成
制造技术研究。

本文考虑了刀具窜动在加工过程中的重要影响,从加工中的刀具轨迹线出发,采用数值分析方法求解相关参数,得到的结果与试验结果能够良好地吻合。

用多齿切削刀具进行铣削加工的过程中,刀具窜动使得各齿旋转半径各不相同,导致未变形切屑厚度发生变化,从而引起切削载荷的变化,切屑载荷变化可以改变平均切削力、最大切削力、最小切削力与瞬时切削力,引起刀具损坏、刀具磨损以及系统动态变化,带来表面误差,降低刀具寿命。主轴偏移、刀具倾斜、刀具的磨削效应、刀具磨损、流屑对刀具的冲击,以及系统动态失衡等因素都会导致刀具的窜动。其中前两者为统一因素,具有普遍存在的现象。

对于刀具窜动学者们作了大量研究, Kline 与 Devor^[1] 阐述了考虑刀具窜动的情况下刀具切削点直径、瞬时未变形切屑厚度、平均切屑厚度及切入切出角并与未考虑刀具窜动的情况做了比较。K.Y. Lee 等^[2] 对于四齿平低铣刀在加工过程中的刀具窜动参数的测定提出了新的方法。Edouard Rivière-Lorphèvre 等^[3] 研究

了新的关于刀具径向窜动的参数确定算法。Tony L. Schmitz 等^[4] 重点讨论了刀具窜动对工件表面成形、表面误差、加工稳定性的影响。Santosh Ranganath 等^[5] 总结了前人对刀具窜动的研究,将刀具磨削效应,刀具磨损等非统一因素引入到刀具窜动直径的求解过程中,并提出了新的相关数据采集方法以及参数确定方法。此外, K.A. Desai 等^[6] 研究了曲面加工中的刀具窜动问题,建立了考虑刀具窜动的过程几何模型。

本文考虑了刀具窜动在加工过程中的重要影响,从加工中的刀具轨迹线出发,采用数值分析方法求解相关参数,得到的结果与试验结果能够良好地吻合。

刀具窜动模型

刀具窜动是指在加工过程中,由刀具旋转中心测得的到各切削刀距离不等的现象(图 1),传统的刀具

在现代制造业中,铣削加工是一种广泛而且高效的加工方式,随着人们对零件精度要求的日益提高,对加工过程进行的精度仿真得到了很多学者的关注,因为切削中的微观动作难于展现,故而大多数预测方法都是建立基于切削力的机械力学仿真模型,其参数多来自于实验,精度仿真中的数学模型通常包括切屑几何模型、系统动态模型、切削力模型,其中难点在于建立力学仿真模型。在使

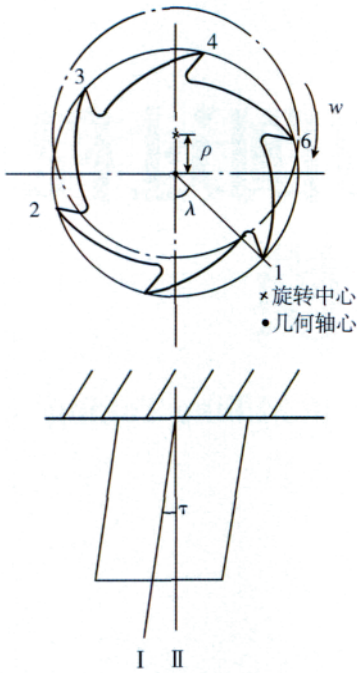


图1 主轴偏移与刀具倾斜

窜动模型包括了主轴偏移与刀具倾斜。主轴偏移指刀具固定端测得的刀具主轴与旋转中心存在偏差,由刀具中心旋转与中心距离 ρ , 以及刀齿定位角 λ (由任意最近刀齿得到) 定义。刀具倾斜指刀具主轴与旋转轴存在一定角度,由倾斜角 τ , 以及旋转中心位置角 ϕ 定义。Santosh Ranganath^[5] 等将刀具磨削效应, 刀具磨损等非统一因素引入了刀具窜动模型, 通过非统一参数 δ_k (k 表示第 k 齿) 定义。各参数由实验确定, 传统方式通过比较测量的切削力值与计算得到的值进行比较找到“Best fit”值, 这种方法假设刀具为刚性, 不考虑刀具磨削效应等非统一因素, 这种方法的研究重点是包含刀具窜动的机械力学模型而不是刀具窜动本身。Santosh Ranganath^[5] 等在确定刀具窜动参数时采用了“Simplex Search technique”, 取得了良好效果。刀具窜动模型包括刀具窜动时的切削刃切削半径, 刀具窜动引起的未变形切屑厚度变化, 切入切出角的变化及刀具窜动引起的加工误差。

1 刀具窜动时的切削半径

由于刀具倾斜值非常小, 并且可以通过设置参考面而使其对加工的影响最小化, 且 Kline 与 Devor^[1] 认为刀具磨损与刀具磨削效应等非统一因素对加工的影响较小(0.0025mm) 并且在研究中将其忽略, 而主轴偏移对最后的加工结果影响不能被忽视, 本文主要讨论主轴偏移对加工的影响。在刀具窜动存在的情况下位于第 i 齿, Z 轴坐标为 z 的切削微元的切削半径为:

$$r(i, z) = R + \rho \cos\left(-\left(i - 1\right) \frac{2\pi}{n_t} - \lambda + \frac{z \tan \alpha_h}{R}\right) \quad (1)$$

其中, R 为刀具名义半径, ρ 为刀具中心与旋转中心距离, λ 为刀齿定位角, n_t 为刀具齿数, z 为刀齿微元在 Z 轴上的坐标, α_h 为刀具螺旋角。

2 刀具窜动存在时的切屑厚度

(1) 传统刀具窜动模型。

传统的切削厚度模型将刀具窜动的影响归纳为改变每齿进给量, 表示为:

$$f(i, z) = f(th, z) + R(i, z) - R(i + 1, z) \quad (2)$$

$$h(i, z) = f(i, z) \cdot \sin \theta(i, z) \quad (3)$$

即第 i 齿的每齿进给量等于名义每齿进给量加上该齿切削半径与前一刀齿切削半径之差, $f(th, z)$ 为名义每齿进给量, $h(i, z)$ 为未变形切屑厚度, 角 $\theta(i, z)$ 为为该齿位置角。

该模型简化了刀具窜动过程, 在刀具窜动相对于每齿进给量较小时能够有效地求得未变形切屑厚度。

(2) 改进的刀具窜动模型。

通过对真实刀具切削轨迹的分析, 能够得到更精确的刀具窜动模型。

以 $i=0$ 时的刀具中心为原点 O , 进给方向为 X 轴, 加工表面法线方向为 Y 轴建立坐标系, 在该坐标系中刀具中心坐标为:

$$\begin{cases} x_c = \rho' \theta_i \\ y_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\rho' = \frac{f}{2\pi} = \frac{n_t f_i}{2\pi}$, 为无滑动状态

下的等效滚动直径; $\theta_i = \omega t = \frac{2\pi n}{60} t$,

为刀具旋转角; n 为刀具转速, r/min。

切削刃上点 P 的坐标为:

$$\begin{cases} x_i = \rho' \theta_i + r(i, z) \sin \theta(i, z) \\ y_i = r(i, z) \cos \theta(i, z) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\theta(i, z) = \theta_i + (i - 1) \frac{2\pi}{n_t} -$

$$\frac{z \tan(\alpha_h)}{R} + \theta_0 \quad (1 \leq i \leq n_t) \quad (6)$$

式中, θ_0 为 $t=0$ 时刀具位置角。

当刀具窜动相对于单齿进给量较大时, 刀齿可能会切削第 $i+k$ 齿的残余轨迹, 例如图 2 中四齿刀具加工轨迹, 因为刀具窜动的存在, 使得各齿的切削半径不等, 图中的齿 1 在 A 处去除第 3 齿留下的残余材料, 而不是去除前一齿即齿 2 的残余材料。齿 4 在 B 处去除齿 3 的残余材料而不是去除前一齿即齿 1 留下的切削痕迹。由此可采用如下方法求解未变形切屑厚度。

$$+ \overset{+}{O}_1 \overset{+}{O}_2 \overset{+}{O}_3 \overset{+}{O}_4 \overset{+}{O}_5$$

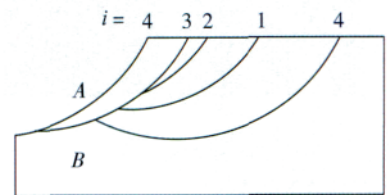


图2 某四齿刀具切削轨迹

假设切削点为 Q , 则其坐标为:

$$\begin{cases} x_{i+k} = \rho' \theta_{i+k} + r(i+k, z) \sin \theta(i+k, z) \\ y_{i+k} = r(i+k, z) \cos \theta(i+k, z) \end{cases} \quad (7)$$

此时, 由刀具中心 C , 以及 P 、 Q 点 3 点共线可得到:

$$\frac{x_i - x_c}{y_i - y_c} = \frac{x_{i+k} - x_c}{y_{i+k} - y_c} \quad (8)$$

将式(1)、(4)、(5)、(6)、(7) 带入方程(8), 整理得到:

$$\sin(\theta_{ip} - \theta_{iq} - k\frac{2\pi}{n_t}) + \frac{\rho' \cos \theta(i, z)}{r(i+k, z)} (\theta_{i1} - \theta_{i2}) = 0 \quad (9)$$

$$\text{令 } X = \theta_{ip} - \theta_{iq},$$

$$A = \frac{\rho' \cos \theta(i, z)}{r(i+k, z)},$$

则式(9)变为 $\sin(X - k\frac{2\pi}{n_t}) +$

$AX = 0, X > 0$, 其中 A 值较小(常小于 1)。如图 3 所示, $f(x) = -AX$ 与 $f(x) = \sin(X - k\frac{2\pi}{n_t})$ 的交点即为方程的解, 在靠近 $k\frac{2\pi}{n_t}$ 处某点能够满足方程, 该点可由二分法解出, 然后可得到要求的各量。

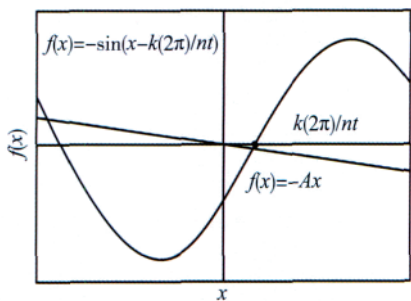


图3 方程根的求解

从而得到切屑厚度为:

$$h(i, z) = |PQ| = |PC| - |CQ|$$

$$= r(i, z) - \sqrt{(x_{i+k} - x_c)^2 + (y_{i+k} - y_c)^2} \quad (10)$$

由于 k 未知, 因此无法直接计算刀具未变形切屑厚度, 可令 $k=1, 2, \dots, n_t$, 分别计算切削厚度, 将各值得到的结果进行比较, 最小值即为实际切屑厚度, 若计算得到的最小值为负, 则说明该齿未参与切削, 则令该齿切屑厚度为零。如图 4 所示, 图中 PQ_1, PQ_2, PQ_3 均为可能存在的切屑厚度, 由于 PQ_1 最小, PQ_1 即为切屑厚度。

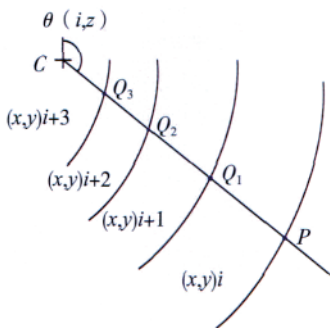


图4 刀具窜动存在下的切屑厚度

3 刀具切入切出角的确定

在不考虑刀具窜动的情况下, 由于各齿平等参与切削, 切入切出角为恒定值, 刀具窜动存在时, 由于各齿切削半径不等, 会发生当前刀齿切削前 k 齿的现象, 从而刀具切入切出角会发生变化。在切入切出点处, 切削厚度为零如图 5 所示, 对应刀具位置角即为切入切出角。确定方法如下:

(1) 计算在 $a_1 = -\frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3\pi}{2}$ 处的切屑厚度 h_1 , 必定为负。

(2) 计算 $a_2 = \frac{\pi}{2}$ 处的切屑厚度 h_2 , 判断 $h_1 \cdot h_2$ 若该值为正, 则说明该齿未参加切削。若其值为负, 则有:

a. 根据中值定理在 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 内必存在某点使切屑厚度值为零, 令该点为切入点 P_{en} 。

P_{en} 可通过如下方法进行确定:

令 $a_3 = \frac{a_1 + a_2}{2}$, 计算该处切屑厚度 h_3 , 判断 $(h_0 \cdot h_3)$, 若 $h_0 \cdot h_3 = 0$, 则该点即为切入点; 若 $h_0 \cdot h_3 < 0$, 则令 $a_2 = a_3, h_2 = h_3$; 若 $h_0 \cdot h_3 > 0$, 则令 $a_1 = a_3, h_1 = h_3$ 。循环此过程, 直到 $(a_1 = a_2)$ 满足容差 ε , 取 $\theta_{en} = \frac{a_1 + a_2}{2}$ 为切入角。

b. 同理在 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 内亦有某点使切屑厚度为零, 该点取为切出点 P_{ex} 。按如上方法, 同样可以找出切出角 θ_{ex} 。

4 刀具窜动存在下的加工误差

在加工过程中, 加工误差源于两

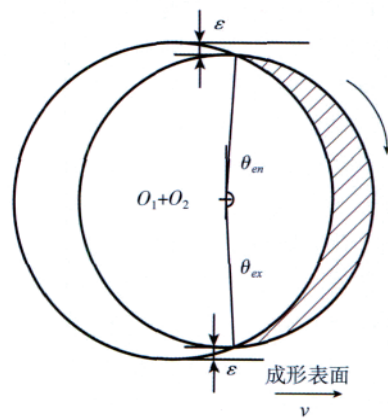


图5 切入、切出角以及加工误差

相邻刀具轨迹线相交所得到的尖点与成型表面的高度差, 如图 5 所示, 对于逆铣加工误差产生于切入点处, 按照切入点计算:

$$\varepsilon(i, z) = r(i, z)_{\max} - r(i, z) \cos \theta_{en}。$$

对于顺铣加工误差产生于切出点处, 按照切出角计算:

$$\varepsilon(i, z) = r(i, z)_{\max} - r(i, z) \cos(\theta_{ex} - \pi)$$

或

$$\varepsilon(i, z) = r(i, z)_{\max} - r(i, z) \cos(\theta_{ex} - \pi)$$

转化为:

$$\varepsilon(i, z) = r(i, z)_{\max} + r(i, z) \cos(\theta_{ex})。$$

切削力模型

切削力模型是加工过程物理仿真的核心内容, 其精度决定了物理仿真的精度, 而刀具窜动是多齿刀具加工中不可避免的问题, 因而将刀具窜动模型引入到切削力模型中十分必要, 刀具窜动主要影响到力学模型中的切屑厚度, 切入切出角。

切削力模型主要有如下 2 种: 第一种模型基于微观物理现象, 预测切屑的形态及切削力, 例如有有限元素法等, 此类模型由多种复杂的材料动态模型组成, 大多数情况下, 对正交切削的预测能力有限, 由于对加工过程建模需消耗大量时间, 故而在生产中较少采用。第二种模型也是被广泛接受的模型, 为基于机械力学的加工过程简化模型, 刀具沿轴向被分割为

若干等距的梁单元,每一单元所受切削力被独立研究,它的缺点在于计算切削力需要的参数不是来源于材料本身特性,而是通过试验得到。

本文采用第二种模型,如下所示。

对于某轴向坐标为 Z 、厚度为 dz 的梁单元,作用于第 i 个切削刃上的切削力可分解为 3 个不同方向上的力:切向力 $dFr(i,z)$,径向力 $dFr(i,z)$ 及轴向力 $dFa(i,z)$,由于轴向力对加工过程影响不大故本文只考虑切向及径向力则有:

$$\left. \begin{aligned} dFr(i,z) &= K_r h(i,z) dz \\ dFt(i,z) &= K_t h(i,z) dz \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

其中, K_r , K_t , K_a 分别表示各自方向上的切削力参数,其值可由实验得出。 $h(i,z)$ 为对应于该切削微元的瞬时尚未变形切屑厚度。

为方便分析计算,将各力投影到标准坐标系内得到:

$$\left. \begin{aligned} dFx(i,z) &= -dFt(i,z) \cos \theta(i,z) \\ &- dFr(i,z) \sin \theta(i,z) \\ dFy(i,z) &= dFt(i,z) \sin \theta(i,z) \\ &- dFr(i,z) \cos \theta(i,z) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将所有 n_f 个刀齿上所受的切削力相加便得到刀具在此时受到的切削力:

$$F_x = \sum_{i=1}^{n_f} F_{i,x}; \quad F_y = \sum_{i=1}^{n_f} F_{i,y}。$$

试验验证

本文通过将理论所得的切削力与测量所得切削力进行比较从而验证刀具窜动模型的准确性,利用直径为 20mm,螺旋角为 35° 的三齿平底铣刀进行工作,通过 Kistler9255 测量仪收集切削力数据,切削材料为 A1-2618。试验分为 2 组,如表 1 所示,其中 $\rho = 3.2 \mu\text{m}$, $\lambda = 48.8^\circ$,图 6(a) 为不考虑刀具窜动时的理论切削力与实验测得的切削力的比较,在理想状态下,切削力曲线呈规律变化,与

表1 切削条件参数

切削参数	A	B
径向切深 /mm	10	5
轴向切深 /mm	5	5
每齿进给量 / (mm·min ⁻¹)	0.07	0.05
主轴转速 / (r·min ⁻¹)	1000	1000

实际切削力有较大差距。在考虑刀具窜动对加工的影响的情况下,传统模型与本文中的刀具窜动模型都进行了仿真模拟,其结果参见图 6(b) 与图 6(c)。从仿真结果与实际的切削力比较结果可以看出 2 种模型都能很好的模拟实际切削过程,而本文中

程中的未变形切屑厚度、切入切出角等进行了研究,通过一系列试验将本文提出的模型与不考虑刀具窜动模型、传统刀具窜动模型进行了切削力预测结果的对比,得到了令人满意的结果。

最后在切削参数改变的情况下同样证明本文中刀具窜动模型能够有效预测切削过程。

通过试验可以看出对切削力的仿真仍然存在一定误差,那是因为在加工过程中还存在刀具变形,热变形,刀具磨损,刀具震动等因素会对加工过程产生影响,同时这些因素也会影响刀具窜动,降低预测的精确

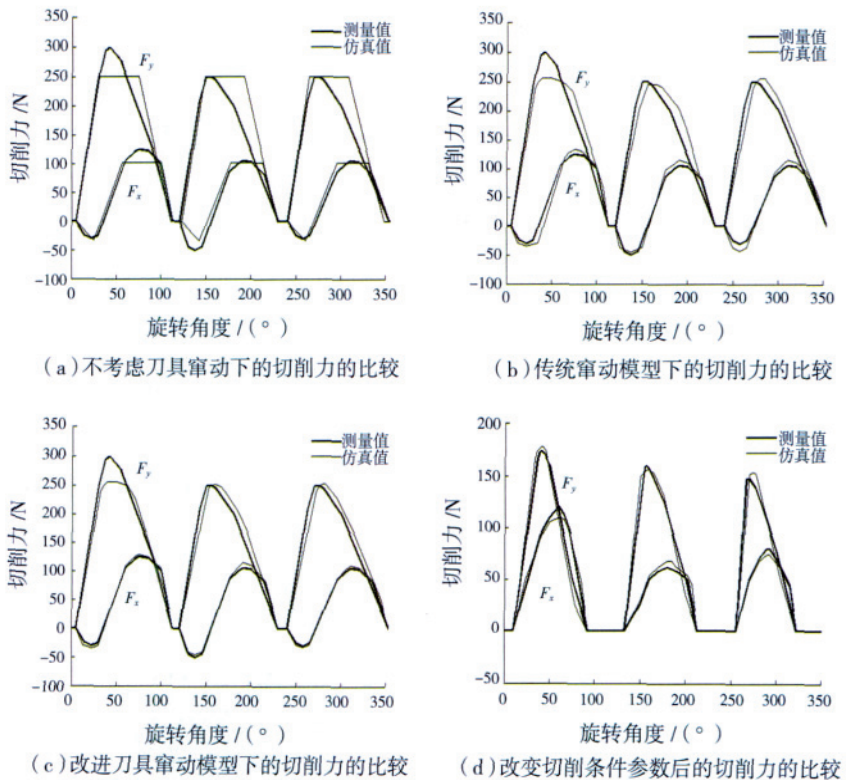


图6 切削力理论与测量值的比较

的窜动模型较传统模型更接近于实验测得的数值。图 6(d) 采用了 B 组的切削条件参数,同样得到了令人满意仿真结果。

结束语

本文建立了基于加工过程实际切削轨迹的刀具窜动模型,对加工过

度。刀具窜动是一个复杂的过程,和其他精度影响因素的集成研究也需要更深入的展开。

本文共有参考文献 6 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 泰山)