

考虑刀具变形的球头铣刀铣削力建模与仿真*

倪其民 李从心 吴光琳 阮雪榆

(上海交通大学国家模具CAD工程研究中心 上海 200030)

摘要: 提出了准确识别参与切削的切削刃段的实体造型方法; 基于铣削力与切削负载之间的经验关系, 建立了三分量的球头铣刀铣削力模型; 通过将刀具简化为一个悬臂梁结构, 给出了刀具变形计算公式; 从刀具变形对刀齿切削路径影响的几何关系出发, 推导了三维进给运动下的瞬时切厚表达式。在此基础上, 开发了完整的球头铣刀三轴铣削过程铣削力仿真系统。仿真计算和试验结果表明了模型及算法的正确性。

关键词: 球头铣刀 铣削力 刀具变形 建模 仿真

中图分类号: TG501.3 TP391

0 前言

球头刀具三轴铣削加工广泛应用于汽车、航空、航天以及模具制造业中, 球头刀具铣削过程分析和铣削力仿真对加工精度预测、铣削过程适应控制以及工艺参数优化都有非常重要的意义。复杂曲面产品的加工, 往往需要采用“长径比”较大的细长刀具, 在铣削力的作用下, 刀具的变形及其对切削系统的反馈作用不可忽略。因此, 考虑刀具变形的铣削力模型更能反映铣削过程的实际状态。由于球头刀具铣削过程的复杂性, 球头铣刀铣削力建模的研究直到20世纪90年代初才开始, 考虑刀具变形的球头铣刀铣削力模型则更为少见。Sim等人^[1]基于任何复杂切削过程都可以看作是沿着切削刃上许多很小的正交切削或斜角切削的综合的假设, 结合切削力和刀具变形之间的物理关系, 建立了考虑刀具变形的球头铣刀铣削力模型。但是, 由于这种建模方法的依据在理论上还很不完善, 在应用上有很多局限, 该模型无论在精度上还是在效率上都有所欠缺^[2]。Feng等人^[3]和马万太等人^[4]从分析刀具变形对切屑几何参数的影响作用入手, 根据切削力和切削负载之间的经验关系, 建立了考虑刀具变形的球头铣刀铣削力模型。但他们的模型中均没有包含轴向铣削力分量, 因而都是不完整的, 同时, 在切屑几何参数的分析中, 均将刀具的三维进给运动简化为二维情形, 不具有一般性, 难以用于复杂曲面三维加工过程的连续仿真。此外, 在参与切削的切削刃段这一重要参数的确定上, 他们均采用简单的几何分析法, 仿真精度低, 且只能用于形状简单

工件的等切深加工过程, 不能处理几何形状复杂或有突变的情形, 也不能反映残留高度等参数的影响。

本文在文献[3]、[4]的基础上进行研究, 提出了抽取参与切削切削刃段信息的实体造型方法, 给出了刀具进给速度的三维描述方案, 推导了三维进给运动下考虑刀具变形的瞬时切厚计算公式, 建立了三分量的球头铣刀铣削力模型, 构造了改进的铣削力收敛算法。在此基础上, 开发了完善的球头刀具三轴铣削过程铣削力仿真系统, 和以往的研究相比, 具有完整、精确、合理、通用的特点。

1 参与切削的切削刃段信息的提取

参与切削的切削刃段的数目和分布是决定铣削力大小和方向的一个关键因素。在复杂曲面加工中, 为准确抽取该信息, 需要采用适当的方法对被加工工件、刀具、被切除材料等实体进行描述和运算。实体造型技术为三维物体提供了准确、完整、无二义性的描述手段, 采用以实体造型技术为基础的直接布尔运算法进行加工过程几何仿真, 通用性好, 精度高^[5]。因此, 本文选用以商用CAD/CAM软件UG II为平台的实体造型方法确定铣刀上参与切削的部分。算法的基本过程如下: 通过交互操作、数据文件(转换和)传递或执行用户程序自动生成的方法产生被加工工件的初始模型, 用曲线拟合的方法将球头铣刀上的各部分切削刃统一以分段三次NURBS曲线表示; 对于刀位文件中的每一走刀路径, 用多个简单实体的布尔并运算产生刀具扫描体, 用原工件实体和该刀具扫描体进行布尔差运算, 得到走刀后的工件模型(并据之完成对工件的更新显示), 用原工件实体和刀具扫描体进行布尔交运算, 得到该刀具运动所切除材料的实体模型:

* 教育部博士点基金资助项目(98024834)。20001009收到初稿, 20010813收到修改稿

查询组成被切除材料实体的各个表面,用表示刀具切削刃的 NURBS 曲线和这些曲面分别求交,得到和被切除材料实体的边界曲面重合的 NURBS 曲线片段(曲线段在曲面内),这些曲线段就是该时刻参与切削的切削刃段。

2 铣削力模型

将球头铣刀沿轴向划分成许多很小的微段,作用在刀刃微段上的空间铣削力可以分解为微切向力 dF_t 、微径向力 dF_r 和微轴向力 dF_a , 如图 1 所示。

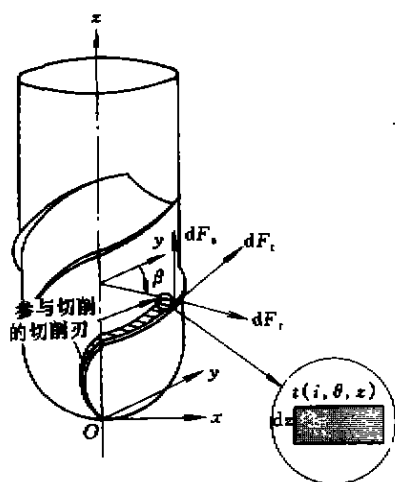


图1 球头铣刀切削微元受力示意图

根据铣削力与切削负载的经验关系,有

$$dF_t(i, \theta, z) = K_t(z)t(i, \theta, z)^{m_t} dz \quad (1)$$

$$dF_r(i, \theta, z) = K_r(z)t(i, \theta, z)^{m_r} dz \quad (2)$$

$$dF_a(i, \theta, z) = K_a(z)t(i, \theta, z)^{m_a} dz \quad (3)$$

式中 i ——切削刃编号

θ ——刀具转角

z ——切削微元距刀尖点高度

dz ——切削微元在 z 方向的切削宽度

$t(i, \theta, z)$ ——瞬时切削厚度

K_t, K_r, K_a ——切向、径向和轴向铣削力系数

m_t, m_r, m_a ——反映切屑厚度对铣削力影响的指数

铣削力参数 K_t, K_r, K_a 和 m_t, m_r, m_a 可通过文献[6]所述参数识别方法获得。

将微切向、径向铣削力分量转换至 $x-y$ 坐标系,得

$$dF_x(i, \theta, z) = dF_t(i, \theta, z)[- \cos \beta(i, \theta, z)] + dF_r(i, \theta, z)[- \sin \beta(i, \theta, z)] \quad (4)$$

$$dF_y(i, \theta, z) = dF_t(i, \theta, z)[\sin \beta(i, \theta, z)] + dF_r(i, \theta, z)[- \cos \beta(i, \theta, z)] \quad (5)$$

式中 $\beta(i, \theta, z)$ ——铣刀转角为 θ 时,第 i 切削刃上距刀尖点 z 处切削微元的切削位置角

$$\beta(i, \theta, z) = \theta - \frac{z}{R} \tan \alpha - (i-1) \frac{2\pi}{N_f}$$

式中 α ——铣刀螺旋角

R ——铣刀半径

N_f ——铣刀切削刃数

在某一时刻,即给定转角 θ ,作用在刀具上的切削合力可通过对所有参与切削的切削微元的受力进行累加得到,其各向分力如下

$$F_x(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{z_{j,\min}}^{z_{j,\max}} dF_x(i, \theta, z) \quad (6)$$

$$F_y(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{z_{j,\min}}^{z_{j,\max}} dF_y(i, \theta, z) \quad (7)$$

$$F_z(\theta) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{z_{j,\min}}^{z_{j,\max}} dF_z(i, \theta, z) \quad (8)$$

式中 N_i ——刀具处于 θ 转角位置时,第 i 个切削刃上参与切削的切削刃段数

$z_{j,\min}, z_{j,\max}$ ——第 j 个参与切削的切削刃段的轴向最低度和最高度

从铣削力模型可以看出,除参与切削的切削刃段的数目及分布外,瞬时切削厚度是决定铣削力大小和方向的另一关键参数。在铣削加工中,切削微元的瞬时切削厚度是刀具进给速度和切削位置角的函数,对于柔性铣刀,瞬时切削厚度还与刀具变形量有关。下面首先给出刀具变形模型,然后导出瞬时切削厚度的计算公式。

3 刀具变形模型

将刀具简化为一个由刀夹刚性夹持的悬臂梁结构,作用在刀具上的 x, y 方向的切削力使其发生弯曲变形。为了降低计算的复杂性和减少计算工作量,进一步将作用在刀具上的分布力简化为作用在适当位置(本文称之为切削力中心)的集中力(即瞬时切削合力)。作用在切削力中心的切削合力对刀夹产生的力矩等于各切削微元切削力对刀夹产生的力矩之和。因此,以 y 方向的切削力中心 $r_y(\theta)$ 为例,有

$$r_y(\theta) = L - \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_i} \int_{z_{j,\min}}^{z_{j,\max}} dF_y(i, \theta, z)(L - rdF_y(i, \theta, z))}{F_y(\theta)} \quad (9)$$

式中 L ——铣刀悬臂长度
 $rdF_y(i, \theta, z)$ ——微分切削力 $dF_y(i, \theta, z)$ 的作用
 位置距刀尖点的距离, 可用 z 或
 $z + dz/2$ 来近似表示

图 2 为简化后的刀具转角为 θ 时 y 方向的受力和变形示意图。

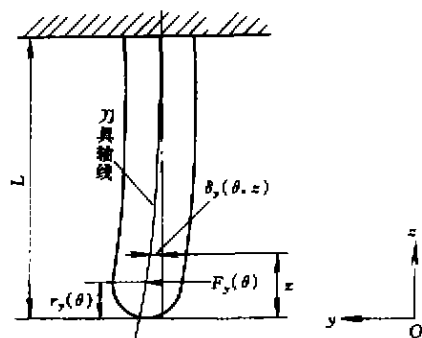


图 2 球头铣刀在 y 方向受力和变形示意图

根据悬臂梁理论, 距刀尖点 z 处 y 方向的变形量 $\delta_y(\theta, z)$ 可以表示为

$$\delta_y(\theta, z) = \frac{F_y(\theta)}{2ER^4} \left[\langle r_y(\theta) - z \rangle^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - r_y(\theta)) \right] \quad (10)$$

式中 E ——铣刀的弹性模量

$\langle a \rangle$ ——窗口函数

$$\langle a \rangle = \begin{cases} a & \text{当 } a \geq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } a < 0 \text{ 时} \end{cases}$$

将上述两式中的下标 y 替换成 x , 即可得到 x 方向的变形量 $\delta_x(\theta, z)$ 的计算公式。

4 瞬时切削厚度计算公式

4.1 刀具进给方向描述

在复杂曲面加工中, 刀具的进给运动是三维的, 而且任意两个相邻走刀路径上的进给方向一般都不相同。因此, 一些学者在研究中将进给速度限制在 xOz 平面内的做法^[2-4], 显然是不合适的。为此, 本文提出了用进给速度矢量与 z 轴正向的夹角 ψ 和进给速度矢量在 xOy 平面内的投影与 x 轴正向的夹角 φ 来描述进给方向的方法(见图 3)。 ψ 和 φ 可根据刀具运动的始末位置 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 确定

$$\psi = \arccos \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \quad (11)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (12)$$

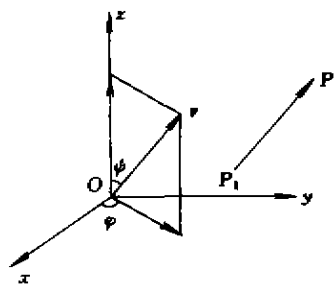


图 3 进给方向描述

这样, 进给速度(以每齿进给量 f_z 为例)在 x 、 y 、 z 三个方向的分量可用下式计算

$$\begin{cases} f_x = f_z \sin \psi \cos \varphi \\ f_y = f_z \sin \psi \sin \varphi \\ f_z = f_z \cos \psi \end{cases} \quad (13)$$

4.2 瞬时切削厚度计算公式

切削微元的瞬时切削厚度实际上就是当前刀齿的切削路径和前一刀齿的切削路径在切削位置角 $\beta(i, \theta, z)$ 处的径向距离。文献[6]给出了刚性(不考虑刀具变形)球头铣刀在三维进给运动下的瞬时切削厚度计算公式。对于柔性铣刀, 由于刀具在切削力作用下产生的变形使刀齿的切削路径发生了变化, 因而使得瞬时切削厚度与变形前有所不同。

图 4 为在三维进给状态下, 第 i 个切削刃上距刀尖点 z 处的切削微元 $P(i, z)$ 在刀具转角为 θ 时的瞬时切削厚度示意图。从图中可以看出, 由于刀具在 x 、 y 方向的变形, 球头铣刀距刀尖点 z 和 $z + f_z \cos \psi$ 处的变形后轴线中心 C'_i 和 C'_{i-1} 偏离了未变形轴线中心 C_i 和 C_{i-1} , 同时, 由于刀具的进给运动, 未变形轴线中心 C_i 与 C_{i-1} 在 x 、 y 方向分别偏离了 $f_z \sin \psi \cos \varphi$ 和 $f_z \sin \psi \sin \varphi$ 的距离。

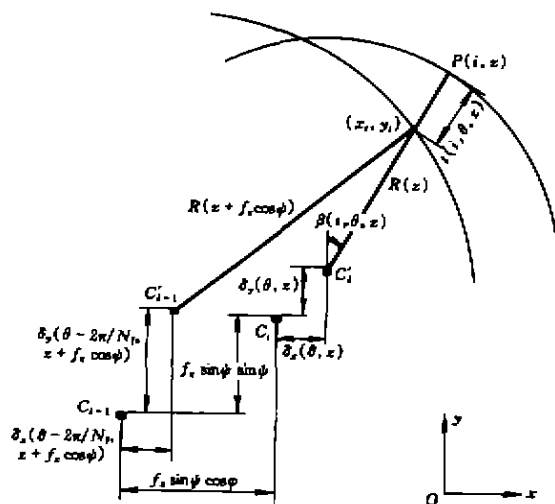


图 4 考虑刀具变形的瞬时切削厚度示意图

根据图 4 所示的几何关系, 如果假设 C'_i 的坐标为 $(0, 0)$, 则 C'_{i-1} 的坐标 (x_d, y_d) 可表示如下

$$x_d = -\delta_x(\theta, z) - f_z \sin \psi \cos \varphi + \delta_x(\theta - 2\pi / N_f, z + f_z \cos \psi) \quad (14)$$

$$y_d = -\delta_y(\theta, z) - f_z \sin \psi \sin \varphi + \delta_y(\theta - 2\pi / N_f, z + f_z \cos \psi) \quad (15)$$

由于 (x_i, y_i) 在 $P(i, z)$ 和 C'_i 的连线上, 故有

$$y_i = \xi x_i \quad (16)$$

式中 $\xi = 1 / \tan \beta(i, \theta, z)$

又由于 (x_i, y_i) 位于以 C'_{i-1} 为圆心、以 $R(z + f_z \cos \psi)$ 为半径的圆弧路径上, 所以有

$$(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2 = R(z + f_z \cos \psi)^2 \quad (17)$$

将式(16)代入式(17), 整理后可得

$$(1 + \xi^2)x_i^2 - 2(x_d + \xi y_d)x_i + x_d^2 + y_d^2 - R(z + f_z \cos \psi)^2 = 0 \quad (18)$$

解之得

$$x_i = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (19)$$

式中 $A = 1 + \xi^2$

$$B = -2(x_d + \xi y_d)$$

$$C = x_d^2 + y_d^2 - R(z + f_z \cos \psi)^2$$

将式(19)代入式(16)可得 y_i 的值。

这样, 由图4可见, 考虑刀具变形后的瞬时切削厚度可以表示为

$$t(i, \theta, z) = R(z) - \sqrt{(x_i - 0)^2 + (y_i - 0)^2} = R(z) - \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (20)$$

以上各式中, 函数 $R(z)$ 表示球头铣刀上距刀尖点 z 处切削微元的切削半径。

$$R(z) = \begin{cases} \sqrt{2Rz - z^2} & \text{当 } z \leq R \\ R & \text{当 } z > R \end{cases}$$

5 铣削力收敛算法

刀具在铣削力的作用下发生变形后, 形成新的瞬时切削厚度分布, 新的切削厚度反过来又产生新的铣削力, 而新的铣削力作用下的刀具变形又会形成新的切削厚度分布, 因此, 考虑刀具变形的铣削力的计算过程是一个以基于刀具变形的切削厚度分布为反馈链的反复迭代的过程。为此, 文献[3]、[4]分别提出了类似的铣削力收敛算法, 但都仅考虑了 x 、 y 方向铣削力的收敛问题, 文献[6]对其算法进

行了改进, 加入了轴向铣削力的收敛过程和算法, 这里不再赘述。

6 仿真实例

基于以上模型和算法, 在商用软件UG II平台上用C语言开发了一个完整的球头铣刀三轴加工过程铣削力仿真系统。下面通过试验和仿真实例对该系统的铣削力预报能力进行检验。

试验测试系统如图5所示, 由DMU-70V 5轴联动高速加工中心、Kistler四分量动态测力仪、电荷放大器、配有CIO-DAS1602/12数据采集板的Pentium MMX/200-PC等组成。工件材料为45钢。刀具为直径10 mm的高速钢球头铣刀, 切削刃数 $N_f = 2$, 右旋, 螺旋角 $\alpha = 30^\circ$ 。

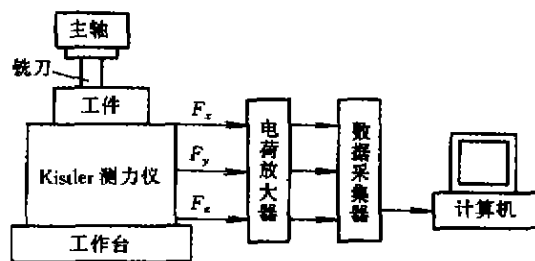


图5 铣削力测试系统原理图

铣削条件: 切削深度2.5 mm, 走刀行距3.0 mm, 主轴转速1 000 r/min, 每齿进给量0.035 mm/z, 进给方向角 ψ 和 φ 分别为 120° 和 135° , 不使用切削液。仿真与实测的铣削力波形如图6所示, 图中虚线代表实测力, 实线代表仿真力。可以看出, 仿真出的铣削力波形无论在形状上还是在数值上都与实测铣削力吻合较好。

7 结论

本文根据铣削力与切削负载之间的经验关系, 提出了考虑刀具变形的球头铣刀三分量铣削力模型, 建立了完整的球头铣刀三轴铣削过程铣削力仿真系统。该系统克服了现有铣削力模型和仿真算法模型不完整、仿真精度低、适应范围窄的缺陷, 可用于复杂曲面加工过程的仿真, 对于优化工艺过程, 提高加工效率和加工质量, 具有重要的指导作用。仿真计算和试验结果表明了模型和算法的正确性。

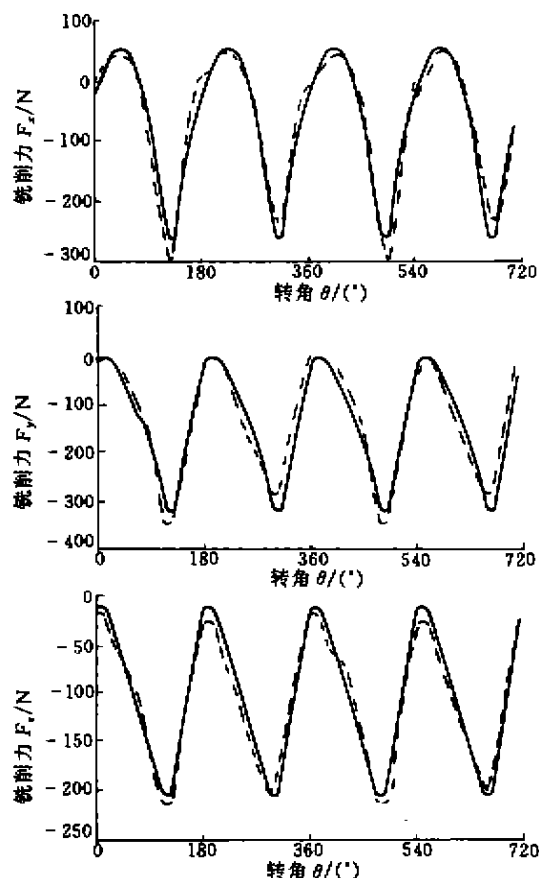


图6 铣削力实测与仿真结果比较

参 考 文 献

- 1 Sim C, Yang M. The prediction of the cutting force in ball-end milling with a flexible cutter. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1993, 33(2): 267~284
- 2 Feng H Y, Menq C H. The prediction of cutting forces in the ball-end milling process—I. model formulation and model building procedure. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1994, 34(5): 697~710
- 3 Feng H Y, Menq C H. A flexible ball-end milling system model for cutting force and machining error prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1996, 118(4): 461~469
- 4 马万太, 王宁生. 考虑弹性变形时的球头铣刀切削力模型的研究. *南京航空航天大学学报*, 1998, 30(6): 633~640
- 5 Imani B M, Sadeghi M H, Elbestawi M A. An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1998, 38(9): 1 089~1 107
- 6 倪其民. 复杂曲面自适应加工关键技术研究: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2000

MODELING AND SIMULATION OF MILLING FORCES FOR FLEXIBLE BALL-END MILLING CUTTERS

Ni Qimin Li Congxin Wu Guanglin Ruan Xueyu
(Shanghai Jiaotong University)

Abstract: Key techniques in modeling and simulation of cutting forces in ball-end milling process with a flexible cutter are studied. First, the idea to extract the chip geometry for general 3-axis ball-end milling operations, in the form of in-cut segments of the engaged edges, using solid modeling technique, is proposed. Then, on the basis of the empirical relationship between cutting forces and chip load, a three-component force model is developed. The calculation formula of deflection-dependent instantaneous chip thickness under three-dimensional cutter feed motion is devised in two steps. First, the cutter deflection is calculated, by modeling the ball-end milling cutter as a solid cantilever beam rigidly supported by the tool holder. Then, the expression of chip thickness is established by analyzing the effect of cutter deflection on the cutting path of cutter teeth. Based on the modeling and simulation techniques introduced, a simulation system for prediction of cutting forces in 3-axis ball-end milling process is developed. The applicability of the system is demonstrated through a typical instance. The simulation results show a very satisfactory agreement with those obtained by the experiments.

Key words: Ball-end mills Milling force Cutter deflection

Modeling Simulation

作者简介: 倪其民, 男, 1973 年出生, 博士生。主要从事模具 CAD/CAM、数控技术等方面的研究工作, 发表论文 10 余篇。