

恒力周铣加工余量规划策略

魏兆成, 王敏杰*, 马日光

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对周铣加工的载荷控制问题, 提出了一种恒力余量规划策略. 首先分析了周铣加工的切削力模型, 确定了刀具的浸入包角为影响切削载荷最显著的因素. 然后以加工过程中浸入包角恒定为原则规划加工的余量分布情况, 并探讨了余量优化策略对传统加工方法可能产生的影响. 加工实验结果表明恒力余量规划方法对铣削载荷有很好的稳定作用.

关键词: 余量规划; 恒定包角; 切削力; 高速铣削

中图分类号: TG54; TP391.73 **文献标志码:** A

0 引言

当前广泛应用法向等距的余量规划方法, 加工时刀具的切削状态随着工件的几何形状而变化, 导致切削载荷起伏不定, 很容易造成局部过载. 在高速加工中, 即使微小的切削载荷波动, 也可能造成严重的后果. 因此在实际高速加工中加工参数的选取往往非常保守, 这就制约了加工效率的进一步提高, 浪费了高速机床系统的加工能力, 不能充分发挥先进设备的潜能. 缺乏控制切削载荷的手段, 已经成为制约高速加工深入应用的瓶颈.

目前关于高速加工中切削载荷控制的研究主要有: 基于加工过程仿真的进给速度优化方法和精细化的加工轨迹编程技术. 基于加工过程仿真的进给速度优化方法, 即在实际加工之前, 通过对加工过程中各种物理因素的分析与预测, 辅助 NC 编程人员进行加工路径规划和加工参数筛选, 以达到改善局部切削负载的目的^[1~3]. 该方法的主要实现手段是调节机床的进给速度, 虽然实现了对局部切削载荷的控制, 然而频繁的进给速度变动不仅会损坏工件的表面质量, 加剧刀具的磨损, 还给机床控制系统提出了严格的要求. 精细化的刀具轨迹编程技术, 是指通过改进加工工艺, 预先加工切削的关键区域, 或在加工关键区域的时候多次走刀、重复走刀、少量切削等, 以达到控

制加工过程平稳的目的^[4,5]. 然而在刀具轨迹精细编程中存在着很多不确定的人工干预因素, 这就对编程人员的经验和技巧提出了较高的要求, 并且程序量大增, 走刀轨迹也相对复杂, 从而制约了加工效率的提高, 同时也给推广应用设置了障碍.

为此本文针对立铣刀周铣加工的切削载荷控制问题, 提出一种适用于高速加工的余量规划策略, 并通过重新规划工件的余量分布情况, 使加工过程中切削载荷趋于稳定.

1 周铣加工的切削力模型分析

由于几何模型简单, 近十几年来国内外学者对周铣加工进行了深入的研究, 报道的众多切削力模型大体上可以归纳为两类^[6]:

第一类模型认为切削力与切屑厚度成一定比例关系.

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi_j, z) = K_t h_z(\phi_j) dz \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) = K_r dF_{t,j}(\phi_j, z) \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) = K_a dF_{t,j}(\phi_j, z) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $dF_{t,j}(\phi_j, z)$ 、 $dF_{r,j}(\phi_j, z)$ 、 $dF_{a,j}(\phi_j, z)$ 分别表示切削微元所受到的切向力、径向力和轴向力; K_t 、 K_r 、 K_a 分别表示切向、径向、轴向的切削系数, 这与剪切变形和材料性质有关, 一般通过实验方法回归得到; $h_z(\phi_j)$ 表示微元在 z 高度浸入角 ϕ_j 位置的径向切屑厚度, 最大值取决于每齿进给量的

收稿日期: 2007-01-10; 修回日期: 2008-09-25.

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20072188).

作者简介: 魏兆成(1981-), 男, 博士生; 王敏杰*(1958-), 男, 教授, 博士生导师.

大小; dz 表示微元轴向高度即轴向切屑厚度; $\phi_j(z)$ 表示在 z 高度第 j 刃的浸入角. 各参数的几何意义见图 1 所示.

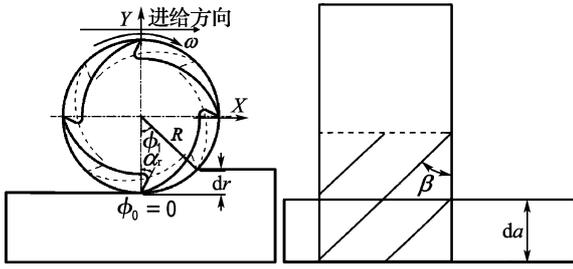


图 1 周铣加工示意图

Fig. 1 The sketch map of peripheral milling

第二类模型考虑了后刀面的耕犁效应, 引入了刃口力系数.

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi_j, z) = K_{tc} h_z(\phi_j) dz + K_{te} ds \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) = K_{rc} h_z(\phi_j) dz + K_{re} ds \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) = K_{ac} h_z(\phi_j) dz + K_{ae} ds \end{cases} \quad (2)$$

式中: $ds = dz / \cos \beta$, 表示微元倾斜刀刃的长度; $dF_{t,j}(\phi_j, z)$ 、 $dF_{r,j}(\phi_j, z)$ 、 $dF_{a,j}(\phi_j, z)$ 、 $h_z(\phi_j)$ 、 dz 等的定义和第一类模型是一致的; K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 分别表示切向、径向、轴向剪切应力系数, 与第一变形区的剪切变形、材料性质相关; K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 分别表示切向、径向、轴向刃口应力系数, 与后刀面和工件表面的耕犁、摩擦相关; ds 表示微元切削刃的长度.

从中可以发现两类切削力模型本质上是一致的, 第二类模型只是在第一类模型的基础上多考虑了近似常数的刃口力. 下面以第二类模型为例, 对式(2) 求积分, 结果如式(3) 所示: ϕ_0 、 ϕ_1 分别表示浸入角的初始和终止角度; $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_0$, 表示浸入角的差值, 也称为浸入包角; z_0 、 z_1 分别表示周铣加工轴向切深的初始和终止高度, 若刀尖部位参与切削, 则 z_0 为 0.

$$\begin{aligned} F_t &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{\phi_0}^{\phi_1} (K_{tc} h_z(\phi_j) dz + K_{te} ds) d\phi = \\ & K_{tc} \int_{\phi_0}^{\phi_1} h_z(\phi_j) d\phi \int_{z_0}^{z_1} dz + K_{te} / \cos \beta \cdot \int_{z_0}^{z_1} \Delta\phi dz; \\ F_r &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{\phi_0}^{\phi_1} (K_{rc} h_z(\phi_j) dz + K_{re} ds) d\phi = \\ & K_{rc} \int_{\phi_0}^{\phi_1} h_z(\phi_j) d\phi \int_{z_0}^{z_1} dz + K_{re} / \cos \beta \cdot \int_{z_0}^{z_1} \Delta\phi dz; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_a &= \int_{z_0}^{z_1} \int_{\phi_0}^{\phi_1} (K_{ac} h_z(\phi_j) dz + K_{ae} ds) d\phi = \\ & K_{ac} \int_{\phi_0}^{\phi_1} h_z(\phi_j) d\phi \int_{z_0}^{z_1} dz + K_{ae} / \cos \beta \cdot \int_{z_0}^{z_1} \Delta\phi dz \quad (3) \end{aligned}$$

设想某一给定条件的周铣加工, 即材料、切削速度、每齿进给量、轴向切深、径向切深等切削参数都已经确定, 此时影响切削力峰值的因素可以归结为参与切削的切削刃的最大长度, 该最大切削刃长度还可以简化表示为浸入包角. 加工过程中浸入包角是随着工件曲率变化的, 图 2 为浸入包角随工件曲率变化的示意图(横坐标 L 为刀具位置). 而保持铣削加工的切削载荷平稳, 主要是通过允许的范围内维持切削载荷的最大值来实现的, 也就是说若能够维持周铣加工的浸入包角大小不变, 就间接地保证了切削力的峰值趋于稳定, 即实现了铣削加工的载荷平稳.

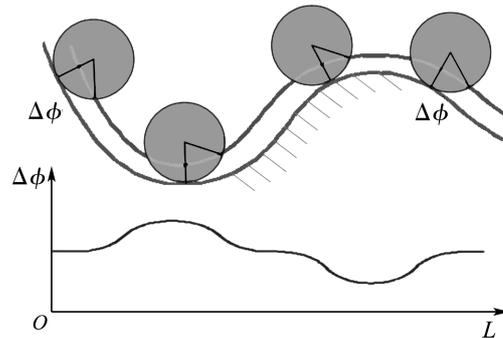


图 2 浸入包角变化示意图

Fig. 2 Change of cutter engagement angle

2 余量优化模型的建立

切削力模型分析结果表明, 只需保持铣刀的浸入包角恒定, 在给定的铣削加工过程中就能保证切削力幅值维持稳定. 保持浸入包角恒定, 用数学方法表达如图 3 和式(4) 所示.

$$\begin{aligned} r + R \cdot n + R \cdot p &= r' \\ n \cdot p &= -\cos(\Delta\phi) \end{aligned} \quad (4)$$

图 3 中三角形桁架 AOB 中, A 点在刀触线上运动, O 点在刀位线上运动, 则 B 点扫描的轨迹即为浸入包角恒定的加工余量曲线. 式(4) 表达的是计算某一刀触点恒力余量的方法, 其中 R 为刀具半径, n 表示刀触点 A 的单位法向量, p 表示对应刀位点 O 的单位偏置向量.

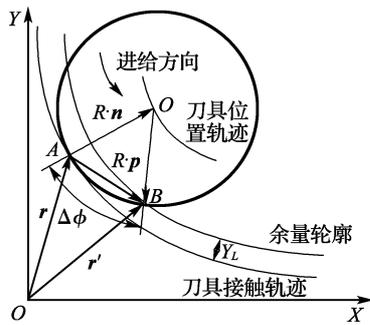


图3 恒力余量规划的几何模型

Fig. 3 Graphic expression of constant cutting force allowance scheduling

3 加工实例与结果分析

3.1 余量规划仿真

本实验加工余量规划仿真结果如图4所示。

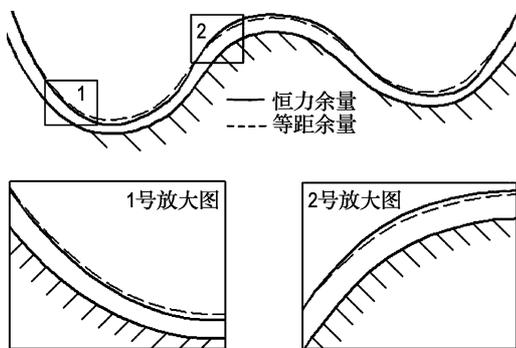


图4 余量规划结果

Fig. 4 Results of the allowance scheduling

其中1号局部放大图显示恒力余量在凹陷部位的余量值低于传统的等距余量值,2号局部放大图显示恒力余量的余量值在曲线凸起的部位高于等距余量值.在凹陷部位恒力余量值偏低,可以使得浸入包角在凹陷部位不至于变大,保证了切向、法向切削力峰值保持在一定范围内.在凸起部位恒力余量值偏高这样可以使得浸入包角在凸起部位不至于减小,保证刀具在工件的凸起部位受力仍和其他部位保持一致,从而使得整个加工过程载荷稳定.

3.2 实验装置

本实验采用的设备装置包括:OKUMA MB-56V A 高速加工中心;大连理工大学传感器研究所研制的 YDXIII97 压电三向铣削测力平台;刀具为 HGT-EB0808 硬质合金立铣刀,直径 8 mm, TiAlN 涂层;工件材料 45 钢,硬度 30HRC;试验工件轮廓曲线为四次 NURBS 曲线,外观如图 5 所示.加工参数取值为转速 10 000 r/min,轴向切深 4

mm,侧向切深 1 mm,进给 1 000 mm/min,顺铣.

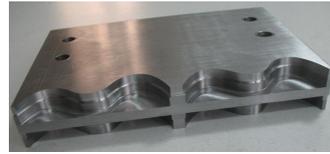
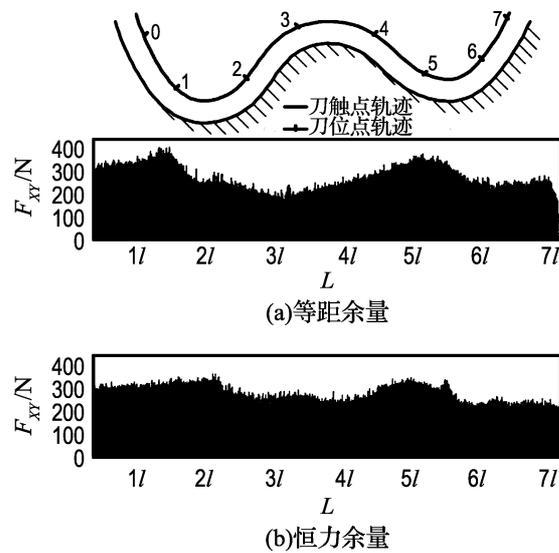


图5 实验工件

Fig. 5 Experiment workpiece

3.3 实验结果分析

加工过程中用 YDXIII97 压电三向铣削测力平台采集了 X、Y、Z 三个方向的切削力,经数据处理后切削力信号 F_{XY} 分别如图 6(a)、6(b)所示, F_Z 切削力见图 7(a)、7(b),其中 $F_{XY} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2}$.

图6 F_{XY} 的比较Fig. 6 Comparison of F_{XY}

在图 6(a)中切削力 F_{XY} 在 200~400 N 范围内变化,切削力在工件凹处显著上升,在试件凸处切削力明显减小.这是因为在凹处浸入包角增大,导致切削力峰值相应增大.工件凸起处浸入包角减小,因而切削力峰值减小.如图 6(b)所示,整个切削过程的切削力 F_{XY} 基本被控制在 250~320 N 以内,基本消除了法向等距余量规划引起的在曲率变化处的载荷波动,这主要得益于切削余量的重新规划,使得切削力趋于稳定.同时可以发现,切削力幅值还是存在一定的波动起伏,这主要是因为切削加工时进给速度原则上应该是刀触点的进给速度,但是现在的数控加工是按照刀位点进给速度来编制程序的^[7].曲面曲率变化不可避免造成了实际进给速度的变化.曲面凹陷部位进给速度大于设定的进给速度,曲面凸起的部位进给速度小于设定的进给速度,从而造成前者切削

力比后者大,引起切削力的波动.此外 CNC 插补加工时由于用微小线段逼近曲线,刀具轨迹不能保证光滑平滑,在曲线曲率较大的部位插补误差增大等,也会导致切削力起伏.

如图 7(a)所示,在曲面凹陷处 Z 正向切削力呈现明显增大,在曲面凸起部位,Z 正向切削力较小,总体感觉是 Z 正向切削力呈波动状态.如图 7(b)所示,在曲面凹陷处和凸起部位,Z 正向切削力无明显变化,基本处于稳定状态.与(a)图相比,(b)图的 Z 正向切削力比较平稳,曲面凸起部位的 Z 正向切削力有所增加.两图 Z 负向切削力基本相仿,在曲面曲率变化处皆有起伏波动.

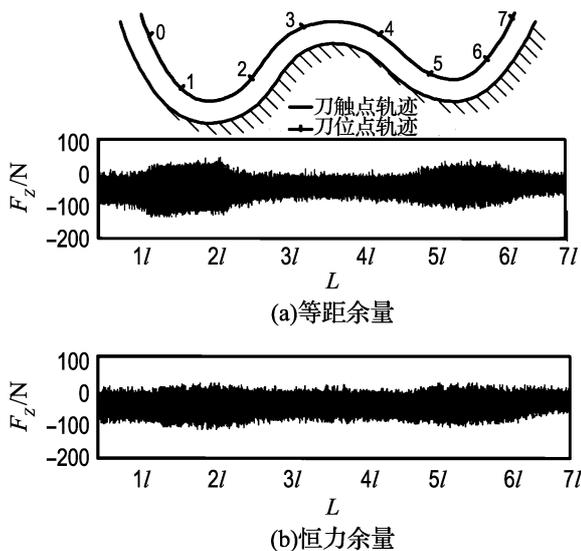


图 7 F_z 的比较
Fig. 7 Comparison of F_z

究其原因,产生 Z 正向切削力的主要是刀具底刃,而产生 Z 负向切削力的主要是刀具侧刃.加工等距余量方法制备的工件,在曲面凹陷处,由于浸入包角增大,刀具底刃参与切削的长度相应增大,Z 正向切削力相应增加.在曲面凸起部位,浸入包角减小,底刃参与切削的长度减小,所以 Z 正向切削力在该处相应变小.加工恒力余量方法制备的工件,整个加工过程中浸入包角基本恒定,因而 Z 正向切削力也基本保持恒定.在整个加工过程中,刀具侧刃参与切削的轴向长度保持恒定,且在整个切削中占主导地位,因而 Z 负向切削力在 Z 向力中占主导.Z 负向切削力在曲面凹陷部位有所增大,是因为实际加工中存在刀尖圆角,刀具后刀面与工件间不可避免地存在挤压摩擦现象,在相同的挤压深度下,工件凹陷部位产生的挤压摩擦力要大于凸起部位产生的挤压摩擦力,而 Z 负向切削力正是该挤压摩擦力在轴向的分力.

4 应用探讨

上述几个部分论证了恒力余量规划策略的可行性与可靠性,下面对该余量规划策略对现有加工方法可能产生的影响进行探讨.

首先,加工余量和刀具轨迹规划将不再仅仅是几何学问题.目前的余量规划和刀具轨迹计算方法,仅是从几何角度出发,如图 8 所示余量轮廓线和刀具轨迹线符合简单的等距偏置关系.随着高精高速加工技术的发展,加工过程的稳定性日益得到重视.传统的法向等距偏置的计算方法,虽然计算简单,但是在高速加工过程中容易造成局部过载,导致加工振动甚至刀具损坏等严重的后果,制约了加工效率的提高,使得高速加工优势难以充分发挥.恒力余量规划策略正是针对高精高速加工稳定的问题,计算余量时充分考虑刀具的切削负载情况,间接影响了刀具轨迹规划方法.如图 9 所示,余量面轮廓线和刀具轨迹线之间的关系不再是简单的等距偏置.

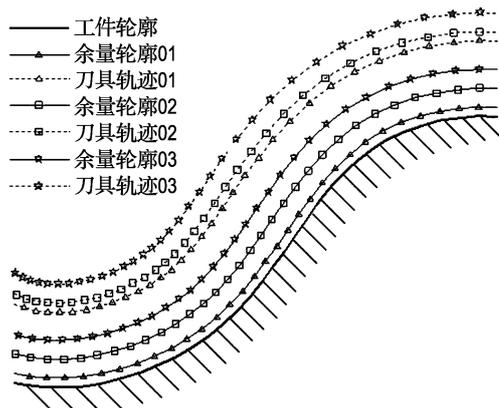


图 8 多工步等距余量规划示例
Fig. 8 Example of CPA scheduling

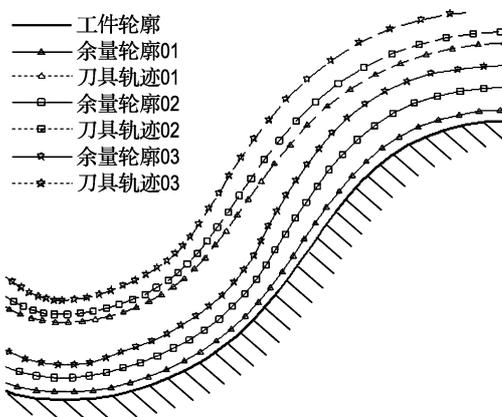


图 9 多工步恒力余量规划示例
Fig. 9 Example of constant force allowance scheduling

其次,加工参数之间的关系将更加密切,这些参数包括切削负载阈值、走刀方向和刀具半径.应用考虑切削负载的余量计算方法,由式(3)和式(4)的分析结果可知刀具半径、走刀方向和切削负载阈值直接影响了余量计算结果.因此,在加工编程阶段需全面考虑这些参数的影响.

再次,各加工阶段参数之间将建立关联性.如图9所示,余量轮廓01的计算结果,作为余量轮廓02的计算前提,同理,余量轮廓02的结果又是余量轮廓03的计算前提,进而直接影响了刀具轨迹的规划结果.因此,各加工阶段参数之间将建立关联性,比之传统方法各阶段间的相互独立性,本文方法对加工过程更能做到全局把握.

5 结 语

本文研究了立铣刀恒力周铣加工的余量规划策略,并通过实验验证了该余量规划策略的有效性.结果表明:采用恒力余量规划方法,切削力 F_{xy} 能够在加工的曲面曲率变化时基本保持稳定, F_z 正向切削力的幅值在曲面曲率变化时趋于稳定,负向切削力基本没有变化.由于 F_z 大小相对 F_{xy} 来说很小且对加工精度的影响也很小, F_{xy} 的稳定也就间接地保证了整个加工过程的平稳.最后对恒力余量规划策略在实际加工中的应用进行了探讨,结果表明,应用本文方法在加工工艺制定时能够很好地统筹切削载荷和刀具轨迹,对加工过程进行通盘考虑.

参 考 文 献 :

- [1] BAE Seok-hyung, KO Key-hoon, KIM B H, *et al.* Automatic feedrate adjustment for pocket machining [J]. **Computer Aided Design**, 2003, **35**(5):495-500
- [2] KLOYPAYAN Jirawan, LEE Yuan-shin. Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes [J]. **Computer in Industry**, 2002, **47**(1):55-76
- [3] KO Jeong-hoon, CHO Dong-woo. Development of a reference cutting force model for rough milling feedrate scheduling using FEM analysis [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2007, **47**(1):158-167
- [4] WANG Hong-cheng, JANG P, STOROI J A. A metric based approach to two-dimensional(2D) tool-path optimization for high-speed [J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, 2005, **127**(1):33-48
- [5] BIETERMAN M B, SANDSTROM D R. A curvilinear tool-path method [J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, 2003, **125**(4):709-715
- [6] 万 敏,张卫红. 薄壁件周铣切削力建模与表面误差预测方法研究 [J]. **航空学报**, 2005, **26**(5):598-603
- [7] LO Chih-ching. A new approach to CNC tool path generation [J]. **Computer Aided Design**, 1998, **30**(8):649-655

An allowance scheduling strategy for cutting force regulation in peripheral milling

WEI Zhao-cheng, WANG Min-jie*, MA Ri-guang

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new allowance scheduling strategy is presented, which can maintain a steady-state cutting in peripheral milling. Firstly, the cutter engagement angle is confirmed as the most dominant factor for cutting force in peripheral milling by analyzing the cutting force models reported in literatures. Then, the allowance, material to be removed in the next process, is modified such that the cutter engagement angle along the next path is regulated at a desired level. The possible influences on machining process by applying this strategy are also discussed. The improvement of cutting force stability by applying the new allowance scheduling strategy is experimentally validated.

Key words: allowance scheduling; constant engagement angle; cutting force; high-speed cutting