

# 基于刀具进让式进给数控加工技术的研究

孙业荣<sup>1</sup>, 姚斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 安徽科技学院; <sup>2</sup> 厦门大学

**摘要:** 通过分析常规数控加工中存在的问题, 提出了一种刀具在进给方向上可进让式进给切削工件曲面轮廓的新工艺方法, 建立了进让式进给切削数学模型, 并从被加工工件的几何形状、切削过程中刀具受力情况及切削区的切削热释放情况等方面, 具体分析了采用该方法对加工精度的改善情况, 并给出了算法步骤。试验结果表明, 新方法有利于减小工艺系统的变形, 显著提高了工件的加工精度。

**关键词:** 数控加工; 进给运动; 加工精度

中图分类号: TG707

文献标志码: A

## Research on NC Machining Technology Based on Cutting Tool with Forward and Backward Motion

Sun Yerong, Yao Bin

**Abstract:** Based on analyzing problems that general NC machining process existed, this paper proposed a machining method of cutting tool forward and backward machining work piece in feed direction. The calculation model of cutting location was established, and the advantages of this process included a superior surface finish, low tool pressure and cutting heat released easily in the cutting section. Finally, experiments and data were shown. The advantages were illustrated by reducing deformation of machining complex and achieving higher machining precision.

**Keywords:** numerical control machining; feeding motion; machining precision

### 1 引言

在常规的数控加工中, 走刀步长短, 意味着加工精度高, 但会造成刀具轨迹线上刀位数据的密度大,

程序指令冗长, 更重要的是在一般加工方式下, 对一般运动精度的机床而言, 小步长程序指令的执行会产生进给速度波动和平均速度下降, 从而影响加工效率和表面质量。反之, 大的走刀步长, 意味着刀具轨迹线上刀位数据的密度小, 加工效率高, 但轮廓逼近精度降低, 一阶不连续性使工件表面完整性恶化, 后续处理工作量加大, 整体效率降低<sup>[1]</sup>。在常规的

基金项目: 校引进人才科研启动资金项目 (ZRC2008221)

收稿日期: 2008 年 12 月

削下的临界延性磨削深度为 15 $\mu\text{m}$ , 在超声振动磨削下其临界延性磨削深度与施振方向有关: 当振动方向垂直砂轮速度方向时其临界延性磨削深度约为 25 $\mu\text{m}$ , 当振动方向平行砂轮速度方向时其临界延性磨削深度约为 20 $\mu\text{m}$ 。

(3) 超过工件的临界磨削深度后, 磨削力有下降趋势, 而后出现剧烈跳动现象, 因此在超过延性临界磨削深度后, 其表面粗糙度将显著上升。由于超声振动有较大的延性临界磨削深度, 故在要求同样的表面质量时, 采用超声波振动加工将显著提高生产率。

### 参考文献

- [1] 刘传绍, 赵波, 高国富, 焦锋. 粗磨粒金刚石珩磨工程陶瓷的表面特征研究[J]. 工具技术, 2000, 34(5): 11-14.  
[2] Bifano T G, Dow T A, Scatter good R O. Ductile regime grind-

ing: A new technology for machining brittle materials[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1991, 113: 184-189.

- [3] Ming Zhou, X J Wang, B K A Ngoi, J G K Gan. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration[J]. Materials Processing Technology, 2002: 243-251.  
[4] K P Rajurkar, Z Y Wang, A Kuppattan. Micro removal of ceramic material ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in the precision ultrasonic machining [J]. Precision Engineering, 1999(23): 73-78.  
[5] 赵波, 郑玉歌. 超声珩磨难加工材料精密表面的高效特性研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(8): 61-64.

第一作者: 向道辉, 博士, 副教授, 河南理工大学机械与动力工程学院, 454000 河南省焦作市

First Author: Xiang Daohui, Doctor, Associate Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China

数控加工中, 刀具在被加工曲面上始终沿着所给的进给方向运动, 这势必带来两方面问题: 一方面, 在切削过程中, 刀具主轴在切削力的作用下容易产生扭曲变形和弯曲变形, 较薄的工件也容易发生刚性变形; 另一方面, 在切削过程中, 刀具与工件接触区产生的切削热不易释放出去, 容易造成被加工工件和机床工艺系统的热变形。以上两方面的问题都会影响工件的制造精度和表面完整性<sup>[2]</sup>。针对以上存在的问题, 本文提出了一种刀具可进让式进给运动的数控切削加工新方法, 这种一进一让地进给切削加工有利于以上问题的解决。

## 2 进让式切削加工原理和数学模型

在五轴机床上, 刀具沿被加工工件表面做直线插补运动时, 取被加工曲面上3个加工点  $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 、 $P_{i+2}$  的坐标分别为  $P_i(X_i, Y_i, Z_i, A_i, B_i)$ 、 $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1}, A_{i+1}, B_{i+1})$ 、 $P_{i+2}(X_{i+2}, Y_{i+2}, Z_{i+2}, A_{i+2}, B_{i+2})$ , 如图1所示, 其中砂轮从点  $P_i$  经点  $P_{i+1}$  至点  $P_{i+2}$  的距离等于一个走刀步长。刀具从加工点  $P_i$  沿走刀方向进给一个步长到达点  $P_{i+2}$  后, 再从点  $P_{i+2}$  沿走刀方向相反的方向回让到  $P_{i+1}$  点, 刀具就这样一进一让地进给切削工件曲面, 称之为进让式切削加工。其中  $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 、 $P_{i+2}$  三点之间的坐标关系如下:

$$P_{i+1} = P_i + k(P_{i+2} - P_i) \quad 0 < k < 1 \quad (1)$$

式中,  $k$  称为回让系数。因为刀具从点  $P_{i+1}$  再进给到  $P_{i+3}$  的步长必须满足下一段工件加工精度的要求, 因此  $k$  的取值大小由被加工曲面的加工精度要求和材料性能来决定;  $P$  代表  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $A$ 、 $B$  运动轴参数。

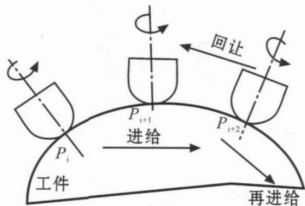


图1 球形刀五坐标进让式切削加工模型

## 3 加工精度的分析

走刀步长的计算: 由于多坐标数控加工(指三、四、五坐标数控加工)一般只采用线性插补, 因而, 刀具运动的包络面与加工表面存在一定的逼近误差,

在凹凸曲面上分别表现为欠切、过切现象, 所以, 对任一指定的直线逼近误差极限  $\varepsilon$ , 根据文献[3], 可以确定走刀步长  $L$  的计算公式为

$$L \leq 2 \sqrt{\frac{2\varepsilon}{k_f}} \quad (2)$$

式中,  $k_f$  为加工表面的法曲率。

以下着重分析采用进让式切削加工方式加工凹、凸曲面时, 对加工精度的影响。主要从几何、受力和切削热散失方面进行分析。

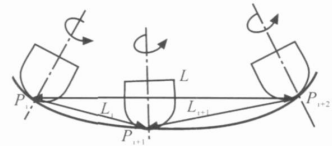


图2 刀具进让式切削加工凹曲面

第一种情况: 被加工曲面为凹曲面。根据进让式切削加工原理, 从考虑加工精度角度去分析该种加工方法的特点并得出以下结论。

①几何精度分析: 由图2所示可知, 刀具在回让的过程中, 也进行了切削加工, 切削的部分主要是刀具在进给过程中所形成的欠切部分。设  $L_i = L'$ , 在三角形  $\Delta P_i P_{i+1} P_{i+2}$  中,  $P_i P_{i+1} < P_i P_{i+2}$ , 即:  $L' < L$ , 由文献[3]可知:  $\delta'_i < \delta_i$ 。即: 减少了被加工曲面的欠切部分, 降低了加工误差, 提高了加工精度。另外, 走刀步长可以不必严格按照式(2)来确定, 可以加大走刀步长, 只要保证  $L_i$  满足上式即可。

②受力分析: 如图3所示, 按照文献[4]的分析, 设  $f$  方向为进给方向,  $f'$  方向为回退方向,  $F_c$  为切削合力, 可分解为进给力  $F_f$  和垂直进给力  $F_{fn}$ 。由于采用进让式切削加工, 切削力方向间断地发生变化, 刀具的主轴沿进给方向受到切削力的一个分力  $F_f$  的作用, 沿回让方向受到切削力的一个分力  $F'_f$  的作用很小, 这两种力对刀轴产生的扭矩作用效果是相反的, 因而, 可以避免刀具主轴的持续扭曲变形和弯曲变形的产生。同时, 被加工的工件在加工过程中产生的刚性变形也得到了恢复, 从而可以提高整个数控加工过程中的加工精度。

③切削热分析: 在常规切削加工过程中所产生的热量主要靠切屑、工件和刀具传出, 被周围介质带走的热量很少<sup>[5]</sup>, 但采用进让式切削加工, 在刀具回让的过程中, 刀具渐渐地远离进给方向的切削区, 这时便在切削区形成了空气气流的流动, 有利于切削热被周围介质空气带走, 加快了切削热的释放, 从而

减少了热变形,达到提高被加工曲面表面质量和加工精度的目的。

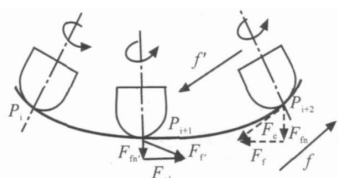


图3 刀具进让式切削加工所受的切削力

第二种情况:被加工曲面为凸曲面。基本上类似于凹曲面加工的分析结果,不同的是:①走刀步长必须根据被加工曲面所允许的直线逼近误差极限并结合上面的步长计算式来确定;②刀具在回让的过程中,基本上是不进行切削加工,但刀杆的弹性变形可以得到恢复。

总之,在采用进让式进给切削加工中,刀具和工件不断地接触与分开,刀具主轴在脉动循环切削力的作用下,其扭曲变形和弯曲变形不断得到恢复,工件的刚性变形也显著减小,从而可以提高工件的加工精度。采用进让式切削加工,在刀具回让的过程中,刀具渐渐地远离进给方向的切削区,这时便在切削区形成了外来空气气流的流动,有利于切削热被周围冷却介质或空气带走,加快了切削热的释放,从而减小了工艺系统的热变形。与传统方式相比,低的热应力对刀具和工件都起到了保护作用,提高了被加工曲面的表面质量和加工精度。

#### 4 刀具进让式进给切削加工的算法及步骤

为了在五轴数控切削加工中实现进让式进给,在生成数控指令时,对于一些特殊的复杂曲面工件(如某些曲面只能用非线性方程组来描述其几何要素),在计算得到其加工刀位节点后,将反映进让式进给运动规律的算法表现在数控指令生成的刀位计算中即可实现进让式进给加工。对于一般的曲面工件,利用商用CAM软件环境,将实体几何要素输入到计算机,可以得到工件实体模型的数控加工指令。最后,在已有指令中插入进让运动指令。其步骤如下:(1)根据工件表面曲率的大小和加工精度给定各段走刀步长<sup>[6]</sup>。(2)由于五轴加工中各轴均做直线插补运动<sup>[3]</sup>,故在5个轴上按照式(1)以相同的回让系数 $k$ 来实现进让式进给运动插值节点的计算和回让运动分配。(3)最后重新生成数控指令。

## 5 试验结果与分析

按照上述技术原理选用材料为45号钢的工件进行车削加工试验,加工条件相同,即吃刀深度相同(2mm),轴向总进给量相同(30mm),主轴转速相同(800r/min),刀具相同(93°外圆车刀),并选用在西门子802S的数控机床上加工。结果表明:在常规数控加工中,由于刀具始终受到切削力的作用,使得刀具吃刀深度随轴向进给量的增加而逐渐减少;在进让式切削加工中,加工刀具每进给5mm就回让3mm,在测量工件的同部位发现相差约0.02mm,也就是说:在相同加工条件下,采用进让式切削加工精度比采用常规数控加工精度高0.02mm。

通过反复试验发现,运用进让式进给加工方法对机床上各进给运动副的往复运动精度要求较高,加之进给电机正反转频繁,故宜选用直线电机。

## 6 结语

通过研究表明:采用进让式切削加工,一方面有利于机床工艺系统在加工过程中产生的变形恢复,另一方面有利于工件的刚性变形的恢复,提高了被加工曲面的表面质量,从而可以显著提高数控加工的加工精度。本文方法将数控机床具有的柔性潜能与工件几何参数控制方法相结合,尤其适合应用于高精度要求且较薄曲面工件的加工场合。

### 参考文献

- [1]李旗号,张丽.自由曲面数控加工中非线性误差分析与走刀步长的确定[J].合肥工业大学学报,2000,23(3):16-18.
- [2]Huang Hao, Wang Zhenzhong, Guo Yinbiao. Research on uniform wear technology of grinding wheel in high precision axisymmetric aspheric machining [C]. Proceedings of the 6th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, Xi'an, 2004: 283-284.
- [3]刘雄伟.数控加工理论与编程技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [4]师汉民.金属切削理论及其应用新探[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.
- [5]吴善元.金属切削原理与刀具[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [6]周济,周艳红.数控加工技术[M].北京:国防工业出版社,2002.

第一作者:孙业荣,工学硕士,讲师,安徽科技学院工学院,233100安徽省凤阳市

First Author: Sun Yerong, Master of Engineering, Lecturer, School of Technology, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 231000, China