

数控编程在高速加工中的应用

The application of NC programming on the HSM

思美创（北京）科技有限公司技术总监 栾合俊

摘要：本文阐述了高速加工的概念，影响高速加工的几大因素，高速加工中各个环节的注意事项，高速加工在实际生产中的重要作用，重点阐述数控编程在高速加工中的应用。以供关注高速加工工艺、技术的相关人员参考。

Abstract: The article describes the concept and influencing factors of High Speed Machining operation, with special attention to the application of NC programming on the HSM.

一、概述

高速加工的概念：高速加工（HSM 或 HSC）是二十世纪九十年代迅速走向实际应用的先进的加工技术。通常是指高的主轴转速（10,000-100,000r/min）、高的进给/快移速度(可达40m-180m/min)下的铣削加工。国际上广泛应用于航空航天制造业、模具制造业、汽车零部件加工、精密零件加工。具体作用：解决新材料的加工问题，适应表面质量高、精度高、形状复杂的3D曲面加工，减少和避免费时、费钱的电火花加工，解决薄壁零件的加工问题，高速复合加工还可以减少搬运次数、装夹次数，避免重复定位带来的加工误差等。既提高了加工质量，又提高了加工效率。

加工铝制螺旋片



尺寸: 80 x 80 x 40 mm

● 技术数据:

粗铣: 42000 rpm
15000 mm/min

壁厚: 最小可薄至0.05mm
壁高: 20mm

加工时间: 7.5 min

- 在最短时间内生产出薄壁螺旋片
- 能进行采用常规方法所无法实现的生产

图 1: 薄壁件加工实例

高速铣削一般采用高的铣削速度，适当的进给量，小的径向和轴向切削深度，即切削体积。由于在切削时大量的切削热被切屑带走，工件表面温度较低。而且随着铣削速度的提高，切削力略有下降，表面质量提高，加工生产率也随之提高。由于高速铣削的上述特点，高速铣削工艺相对常规加工具有很多优点：

- 提高生产率
- 改善工件的加工精度和表面质量
- 实现整体结构零件的加工
- 有利于使用较小的刀具加工
- 有利于加工薄壁零件和高强度、高硬度脆性材料

由于上述优点，综合效率提高、质量提高、工序简化，尽管机床投资和刀具投资以及维护费用增加，但高速铣削工艺的综合效益仍有显著提高。

高速铣削是一项复杂的系统工程技术，是机床、刀具、刀柄结构、加工工艺技术、控制系统、CAD/CAM 软件等多种因素综合作用的结果。与传统加工工艺技术相比，对其中的每一项指标都有较高要求。

高速机床是实现高速加工的前提和基础。符合高速加工要求的机床应具备的必要条件有：高的主轴转速（10000~20000r/min 越来越普及，100000~200000r/min 的高速主轴正在研制开发中）、高速和高加（减）速的切削进给机构（进给/快移速度可达 40~180m/min，加速度现多为 1g~2g）、高速 CNC 控制系统(加减预差补，前馈控制，精确矢量补偿，最佳拐角减速等)、高速切削机床的安全防护与实时监控系統。对刀具而言，高速铣削必须具备安全性和高的耐磨度。从而要从以下几个方面考虑：刀具材料，刀具结构，刀杆结构，刀具的动平衡等。

除了机床、刀具等硬件满足高速加工的前提和基础，高速加工对数控编程也提出了与普通加工更高的要求。本篇重点阐述 CAD/CAM 软件在高速加工中的应用。

二、高速加工编程时主要关心的问题

采用高速铣削加工编程的原则主要与数控伺服系统、加工材料，所用刀具等方面有关。使用 CAM 系统进行数控编程时，刀具选择、切削用量以及选择合适的加工参数可以根据具体情况设置外，加工方法的选择就成为高速加工数控编程的关键。如何选择合适的加工方法来较为合理、有效地进行高速加工的数控编程，需要考虑的问题主要与以下几个方面相关：

1、 由于高速加工中心具有前视或预览功能，在刀具需要进行急速转弯时，加工中心会提

前进行预减速，在完成转弯后再提高运动速度。机床的这一功能主要是为了避免惯性冲击过大，从而导致惯性过切或损坏机床主轴而设置的。有些高速加工中心尽管没有这一功能也能较好地承受惯性冲击，但该情况对于机床的主轴也是不利的，会影响主轴等零件的寿命。在使用 CAM 进行数控编程时，要尽一切可能保证刀具运动轨迹的**光滑与平稳**。

- 2、 由于高速加工中，刀具的运动速度很高，而高速加工中采用的刀具通常又很小，这就要求在加工过程中保持固定的**刀具载荷**，**避免刀具过载**。因为刀具载荷的均匀与否会直接影响刀具的寿命、对机床主轴等也有直接影响，在刀具载荷过大的情况下还会导致断刀。

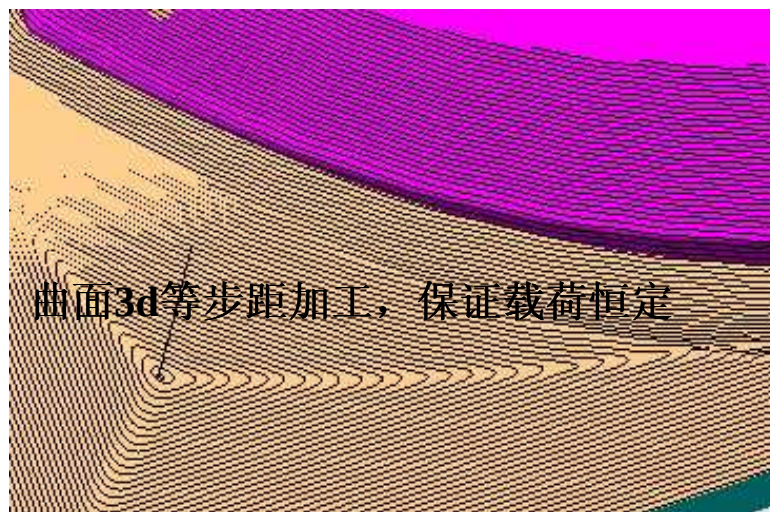


图 2：曲面 3 维等步距加工示意图

- 3、 采用更加安全和有效的加工方法与迅速进行安全检查校验与分析。举例如下：

- 刀柄、夹头干涉检查, 保证刀路轨迹的安全
- RE-EXECUTION WILL BE DUE TO PROCEDURE BEING SUSPENDED
- * PROCEDURE EXECUTION START TIME : 08/10/2004.13:59:30
- * See Set : NC Special Approx. Faces
- * =====
- * ENTRY POINT: X = -65.30 Y = 2.20 Z = 20.00
- * ENTRY POINT: X = -33.64 Y = 56.20 Z = 15.00
- * ENTRY POINT: X = -38.17 Y = 56.20 Z = 10.00
- * ENTRY POINT: X = -38.23 Y = 56.20 Z = 5.00
- * ENTRY POINT: X = 0.00008 Y = -51.80 Z = 0.00000

- * PROC. OPTIMIZATION START TIME : 08/10/2004.13:59:31
- * THE CURRENT SET OF HOLDERS GOUGES THE STOCK
- * HOLDER 1 SHOULD BE RAISED TO 34.88 ABOVE THE CUTTER TIP
- (刀柄 1 应高出刀尖 34.88mm)
- * EXISTING CUTTERSS CANNOT AVOID GOUGING
- (当前刀具无法避免干涉)
- * PROC. OPTIMIZATION END TIME : 08/10/2004.13:59:41
- * PROCEDURE EXECUTION END TIME : 08/10/2004.13:59:41

三、高速加工编程采用的编程策略

1、采用光滑的进、退刀方式。

在 Cimatron 系统中，有多种多样的进、退刀方式，如在走轮廓时，有轮廓的法向进、退刀，轮廓的切向进、退刀和相邻轮廓的角分线进、退刀等。针对高速加工时应尽量采用轮廓的切向进、退刀方式以保证刀路轨迹的平滑。在对曲面进行加工时，刀具可以是 Z 向垂直进、退刀，曲面法向的进、退刀，曲面正向与反向的进、退刀和斜向或螺旋式进、退刀等。在实际加工中，用户可以采用曲面的切向进刀或更好的螺旋式进刀。而且螺旋式进刀切入材料时，如果加工区域是上大下小，螺旋半径会随之减小以进刀到指定深度，有些 CAM 系统具有基于知识的加工，在检查刀具信息后发现刀具具有盲区时，螺旋加工半径不会无限制减小，以避免撞刀（参见图示）。这些对程序的安全性提供了周全的保障。

2、采用光滑的移刀方式。

这里所说的移刀方式主要指的是行切中的行间移刀，环切中的环间移刀，等高加工的层间移刀等。普通 CAM 软件中的移刀大多不适合高速加工的要求。如在行切移刀时，刀具多是直接垂直于原来行切方向的法向移刀，致使刀具路径中存在尖角；在环切的情况下，环间移刀也是从原来轨迹的法向直接移刀，也致使刀路轨迹存在不平滑情况；在等高线加工中的层间移刀时，也存在移刀尖角。这些会导致加工中心频繁的预览减速影响了加工的效率甚至使高速加工不成为高速加工。

高速加工中，采用的切削用量都很小（侧向切削用量和深度切削用量很小），移刀运动量也会急剧增加。因此必须要求 CAM 产生的刀路轨迹中的移刀平滑。在支持高速加工的 Cimatron 系统软件中，则提供了非常丰富的移刀策略。

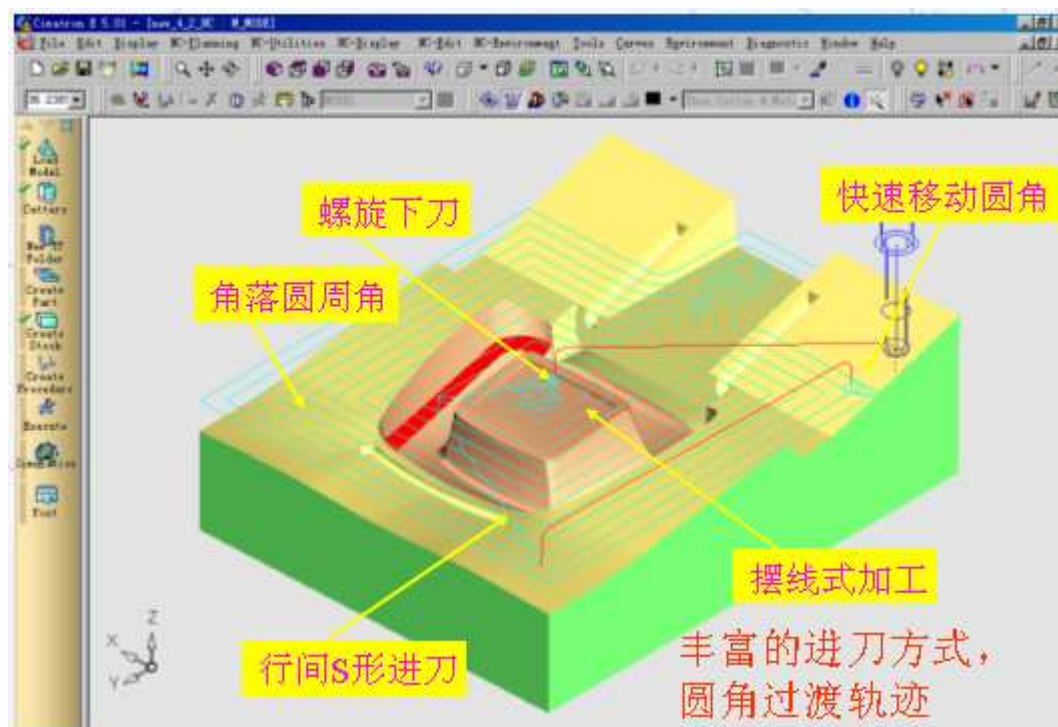


图 3：为高速加工提供丰富的走刀路径

(1) 行切光滑移刀

- a. 行切的移刀直接采用切圆弧连接。该方法在行切切削用量（行间距）较大的情况下处理得很好，在行切切削用量（行间距）较小的情况下会由于圆弧半径过小而导致圆弧接近一点，即近似为行间的直接直线移刀，从而也导致机床预览减速，影响加工的效率，对加工中心也不利。
- b. 行切的移刀采用内侧或外侧圆弧过渡移刀。该方法在一定程度上会解决在前面采用切圆弧移刀的不足。但是在使用非常小的刀子（0.6mm 直径的球头刀）进行精加工时，由于刀路轨迹间距非常的小（侧向切削用量为 0.2mm），使得该方法也不够理想。这时用户可以考虑采用下面更为高级的移刀方式
- c. 切向的移刀采用高尔夫球竿头式移刀方式。

(2) 环切的光滑移刀

- a. 环切的移刀采用环间的圆弧切出与切入连接。这种方法的弊端是在加工 3D 复杂零件时，由于移刀轨迹直接在两个刀路轨迹之间进行生成圆弧，在间距较大的情况下，会产生过切。因此该方法一般多用于 2.5 轴的加工，在加工中所有的加工都在一个平面内。
- b. 环切的移刀采用空间螺旋式移刀。该种移刀方法由于移刀在空间完成，避免了

上面方法的弊端。

(3) 层间的空间螺旋移刀，在进行等高加工时，用户要采用螺旋式等高线间的移刀。

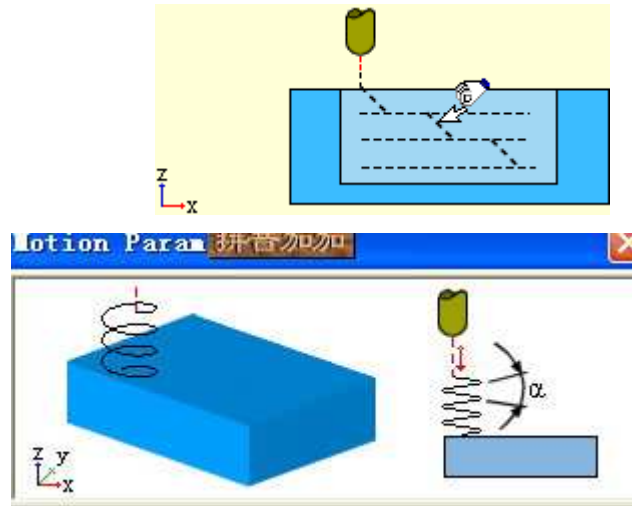


图 4：层间的空间螺旋移刀

3、应采用光滑的转弯走刀。

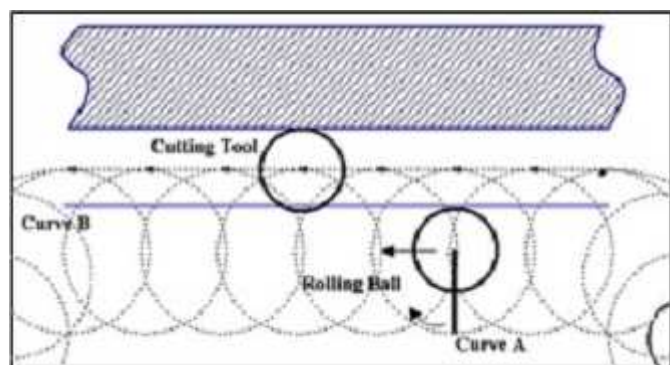
采用光滑的转弯走刀与进行光滑的移刀一样，对保证高速加工的平稳与效率同样重要。

(1) 圆角走刀；该种走刀方式并不是什么新的走拐角方式，一般 CAM 系统都有提供。该方式较适合高速加工，用户应予以采用。

(2) 圆环走刀；该种方法是较为高级的走拐角方式，就象驾驶高速跑车在高速公路上跑时，要想在不损失速率的情况下转弯和保证转弯更平稳，沿着立交环岛来转弯一样。这种方法在走锐角弯路时效果特别明显。

4、应采用更适合高速加工的加工方法。

Cimatron 先进的 CAM 系统提供了许多更适合高速加工的加工方法。如在轮廓加工中，用户可以使用螺旋式三轴连动的加工方法。使用该种方法进行轮廓加工时，刀具一边沿轮廓切削，一边在纵向进刀，这保证了刀具载荷的稳定，刀路轨迹也自然平滑。采用摆线式加工：摆线式加工是利用刀具沿一滚动圆的运动来逐次对零件表面进行高速与小切量的切削。采用该方法可以有效地进行零件上窄槽和轮廓的高速小切量切削，对刀具具有很好的保护作用。在进行零件的精加工时，在加工中心支持 Nurbs 代码的情况下，应采用 Nurbs 编程。这样产生的刀路轨迹的数据量不仅少，而且刀具运动也更



光滑平稳高效。

5、利用 CAM 内在的优秀功能

许多 CAM 系统都有很多高级的加工能力，充分利用和挖掘这些能力加工极大地改善加工的效果。

粗切时使用具有层间二次粗加工优化的功能。在等高线粗切中，由于零件上存在斜面，在斜面上会留有台阶，导致残留余量不尽均匀。这样对后续的加工不利，如刀具载荷不均匀。尽管系统具有载荷的分析与优化，但毕竟将影响加工的效率和质量。因此在进行粗切时，用户应选择具有优秀的层间二次粗加工功能，在粗切时就得到了余量均匀的结果，为后续加工提供更有利的条件，也提高了加工的效率。

在最后阶段对零件进行清根时，利用具有斜率分析的清根算法，对陡峭拐角和平坦拐角区别对待，即对陡峭拐角的清根使用等高线一层一层清根，对平坦区域采用沿轮廓清根，可以更好地保护刀具，获得更好的表面质量。

在等高线精加工时，应使用螺旋式改变进刀位置的方式，以避免在固定位置留有进刀痕迹，保证加工结果的整体优良。

在编程过程中，应利用有效的刀柄干涉检查的功能，确保刀具的安全性。要选择具有毛坯残留知识加工的系统。这种系统的干涉检查更为合理，因为系统是把刀具信息与上次加工的残留毛坯进行校验。

同时也可以利用 Cimatron 系统提供的结果校验工具进行余量可视化分析，加快作出进一步调整加工策略和进行补充加工的决定。以及使用 Cimatron 系统具有的自动化编程机制，制定结合工厂实际的加工模板，提升加工的效率与可靠性。Cimatron 也同时可以针对高速机床的控制系统编制适合高速加工的后置处理，指导 NC 程序生成正确加工代码。



图 5：生成正确的加工代码

四、结束语

随着高速铣削技术的不断普及，越来越多的企业已经在生产实践中开始应用该技术，如知名的海尔集团，西航公司的安泰叶片公司等。而高速铣削加工是一项综合技术的应用，编程是其中的一项关键性工作，也是一项创造性的工作。理想的产品来自于技术与经验的有效结合和在实践中的不断探索。对于开始采用高速加工技术的企业来说，要有一个适应、探索、总结和提高的过程。