

# 复杂型面数控加工工艺及编程技术研究

## Study on CNC Machining Process and Programming Method for Complex Profile

贵州红林机械有限公司 刘荣萍 邓卫华

**[摘要]** 数控加工工艺与编程技术水平是影响产品加工质量和生产效率的重要因素之一。以航空燃油附件复杂型面的数控加工为典型实例,以实现高质量、高效率的加工效果为目标,重点介绍了数控加工工艺与编程思路及技巧,为数控加工技术的深度应用打下良好应用基础。

**关键词:** 数控加工 数控编程 复杂型面

**[ABSTRACT]** CNC machining process and programming method is one of the important factors that produce effects on the machining quality and efficiency. The ideas and skills for NC machining process are mainly discussed in order to obtain high quality and efficiency through some examples of the complex profiles in fuel control accessories of the aeroengine.

**Keywords:** CNC machining CNC programming Complex profile

随着我国航空制造技术的迅速发展,其液压附件的性能和质量要求不断提高,产品日趋复杂、精密,更新换代越来越频繁,对自动化数控设备的普及应用水平提出了越来越高、越来越迫切的需求。必须通过深入分析研究,不断提升企业的CAM技术应用水平,才能充分发挥先进数控设备的加工优势,确保航空燃油附件产品的加工质量和研制进度要求<sup>[1]</sup>。

### 1 CAD/CAM 应用流程

随着CAD/CAM技术的不断发展和日趋完善,它们在各个领域得到了极其广泛的应用。其CAD模块可实现基于特征的实体造型功能,CAM模块则具有很强的数控加工处理能力,给应用工程师们提供了一种交互式的编程工具,可以计算生成精确可靠的刀具加工轨迹,是一个功能强大的计算机辅助制造模块<sup>[2]</sup>。CAD/CAM在复杂型面加工中的应用工艺流程如图1所示。

下面结合航空燃油附件产品复杂型面加工实例,对上述应用流程中的CAM加工定义、切削仿真以及后置处理3个重要数控编程工艺步骤作详细阐述。

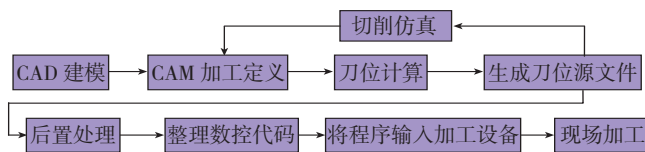


图1 CAD/CAM应用流程图

Fig.1 Flow chart for CAD/CAM application

### 2 CAM 加工定义

应用CAM需要充分利用CAD阶段获得的三维数据模型,以交互方式生成刀具加工轨迹,进而获得数控机床的加工指令。CAM自动编程功能在航空燃油附件产品复杂型面的数控加工编程中应用成效显著。具体操作应用过程中,只需要把复杂型面数控加工工艺方案清楚地表达成CAM语言,明确定义加工坐标系、切削区域、工步顺序、刀具参数、走刀路径、材料去除量、主轴转向转速以及刀具进给速度等,当完成对工艺方案的具体详细定义工作后,大量复杂的运算将全部由计算机准确可靠地完成,编程效率、计算数据的准确可靠性以及工艺方案的完整精确实现等都获得保证。由于CAM自动编程利用计算机技术解决了繁杂的数据计算问题,因此可以实现各类复杂型面加工工序内容的高度集中,这样不仅可以提高加工效率和成形质量,同时还避免了逐个型面加工计算所带来的尺寸积累误差,并有效减少后续修挫工作量和操作工人重复装卸笨重零件的工作量。更为重要的是,解决繁杂的数据计算问题后,工艺人员可在有限的时间内把全部精力集中在定义复杂型面加工工艺安排上,这对于提高复杂型面的加工工艺规划质量极其有利。

以图2所示航空燃油附件壳体金属模具单一模块数控加工CAM工艺规划过程为实例,对这些数控加工工艺参数的定义思路及选定原则进行详细分析介绍。

#### 2.1 建立加工坐标系

CAD阶段实体模型的建立以工作坐标系为基础,而数控加工刀位源文件的生成则以加工坐标系为基础,两个坐标系可以重合,也可根据实际需要各自定义。加工坐标系对于数控加工及编程是一个十分重要的概念。

数控机床的坐标系统,包括坐标系、坐标原点和运

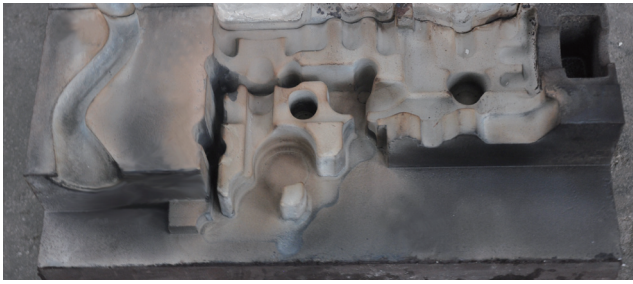


图2 航空燃油附件壳体模具

Fig.2 Mould of aircraft fuel control accessory

动方向,根据 JB3051-82《数控机床坐标和运动方向命名》标准规定,标准坐标系采用右手直角笛卡儿坐标系表示。定义加工坐标系时,坐标原点位置应便于加工者快速准确对刀,同时方便加工过程中需要进行的尺寸换算。确定加工坐标轴方向时应考虑被加工产品在数控机床上的装夹摆放情况。

图2所示模块加工工艺装夹方式为模块底面朝下,平放于工作台上,压板固定在模块不需加工的上平面。这样可实现一次装夹完成模块所有型面切削加工。因此,加工坐标轴的方向应该定义为:Z轴正方向为垂直于模块底平面并朝向模块型面方向;通常机床X轴方向行程大于Y轴方向行程,故X坐标轴方向定义为模块长边方向;为便于加工者随时观察模块加工过程,Y轴正方向宜选定为模块型面由低向高方向;坐标原点选定在易于找正对刀的模块左上角处。模块加工坐标系如图3所示。

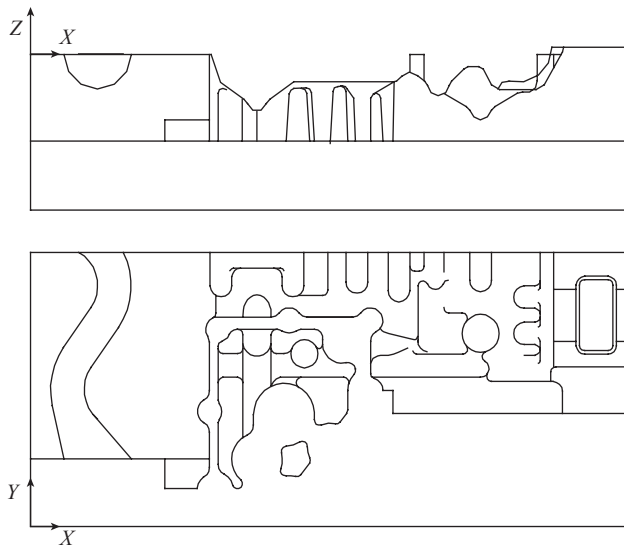


图3 模块加工坐标系

Fig.3 Coordinate system of module machining

## 2.2 划分加工区域

示例模块的总体加工区域为形成壳体复杂外型面的复杂型腔结构区域以及包括模具特有结构特征在内

的所有特征结构部位。但是针对不同工步的加工特点,针对不同的刀具加工要求,需要定义不同的工艺规划方案。如果不按模块的结构特点细划不同的加工区域,而是笼统定义一个包含所有加工特征在内的加工范围,需要进行的加工工步划分工作量的确会很少,数控加工编程工作量也会很小,任何编程人员都能够轻松并且快速编出加工程序,但做出的程序存在加工针对性不强、加工效率不高、个别区域走刀路线规划不合理的问题,加工出的产品质量和加工效率都无法令人满意;如果可以按模块不同特征结构的工艺特点细致划分出多个加工区域,则需要进行的加工工步规划必须针对不同的加工区域逐项进行,加工区域划分得越仔细,意味着加工工步越多,编程工作量就越大,但这样进行细致工艺规划所编制出来的数控加工程序实际加工效率高、效果好。

仍以图2所示模块加工为例,如果只定义一个大而全的加工范围,即模块外边框以内整个区域,如图4中区域1(实线区域),编程时只需安排一道精加工工步,做一次加工刀轨路径计算就可获得全部精加工刀轨数据。但这种没有针对模块各部位加工特点和切削量进行分类而分别加工的数控加工程序,需要用同一把刀具将所有结构不同、深浅不一的型面同时加工出来,加工实用性非常差。不仅加工效率低,成形质量不高,而且容易损伤切削刀具。如果将其加工范围分别定义为区域2、3、4、5(图4中4个虚线区域),工艺上就需要分别定义这4个加工区域所包含型面的切削加工方案,以此为依据进行数控加工编程计算时至少需要安排4道精加工工步,才可以获得全部精加工刀轨数据。这样对编程者的工艺规划专业水平要求提高了,但编出的加工程序加工针对性强、加工实用性好、加工效率高、成形质量好<sup>[3]</sup>。

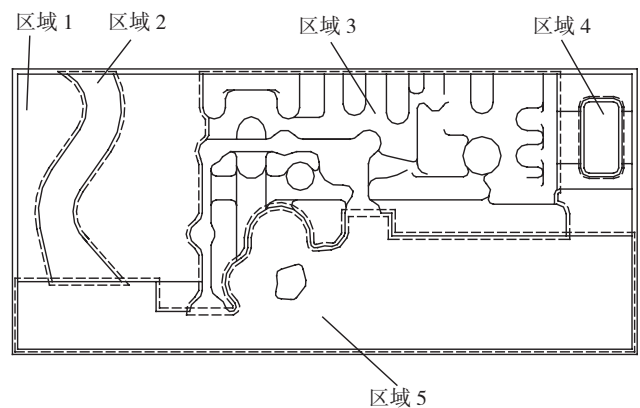


图4 加工范围的划分

Fig.4 Division of machining areas

## 2.3 定义加工刀具

由于航空燃油附件壳体金属模具以型腔结构为主,

需要大量切除各模块中的多余材料,故在规划加工工艺方案时,需要分别安排粗加工、半精加工以及精加工工步。粗加工及半精加工工步应快速、高效地去除模块上的多余材料,为精加工工步保留少量、均匀加工余量,目的在于提高模具的数控加工效率。精加工工步则规定去除粗加工及半精加工工步保留的多余材料,使模具型面精确成形,目的在于保证型面尺寸加工精度和加工表面质量<sup>[4]</sup>。

粗加工工步宜选用大尺寸、大铣削量立铣刀,半精加工及精加工刀具则需要根据加工型面结构特点,分别选用不同尺寸的牛鼻刀、球头刀或其他特殊结构刀具。

为了减少换刀次数,减少铣刀规格、计划停车次数和对刀次数,编程者可对 CAD 数据模型进行适当编辑修整,使各加工面的凹圆弧尽量统一。一般而言,即使不能寻求完全统一,也要力求将数值相近的圆弧半径分组合拢,达到局部统一,尽量减少铣刀规格和换刀次数<sup>[5]</sup>。

选用精加工切削刀具时,一般应遵循以下原则<sup>[6]</sup>:

(1) 刀具半径  $r$  应小于加工件内轮廓面的最小曲率半径  $\rho$ ,一般取  $r = (0.8 \sim 0.9)\rho$ 。

(2) 为保证刀具具有足够的刚度,选定范围的加工高度  $H < (1/4 \sim 1/6)r$ 。

(3) 加工盲孔(深槽)时,选取  $l = H + (5 \sim 10)\text{mm}$  ( $l$  为刀具切削部分长度,  $H$  为加工部位高度)。

(4) 加工型腔及通槽时,选取  $l = H + r_c + (5 \sim 10)\text{mm}$  ( $r_c$  为刀尖角半径)。

(5) 加工肋时,刀具直径  $D = (5 \sim 10)b$ ,其中  $b$  为肋的厚度。

(6) 曲面加工刀具通常选用球头铣刀。

在进行图 2 所示航空燃油附件壳体金属模具加工工艺分析过程中,由于成形壳体的外形尺寸较大,造成模具型腔各特征尺寸均较大,需去除模具多余材料量。因此,可以选用较大尺寸刀具进行模具的粗加工、半精加工及精加工工作。通过对模具型腔各特征几何数据进行归纳分析得到,该模具型腔曲面结构以凹弧面为主,因此,精加工刀具几何形状宜选为球头刀,只有这样的刀具才能完成对凹弧面的精确成形加工。另外,该模具型腔内轮廓面最小曲率半径  $\rho = 6\text{mm}$ ,根据精加工切削刀具的一般选用原则,刀具半径可选定为  $r = 0.9 \times 6 \approx 5\text{mm}$ ,因此,可选定该模具精加工切削刀具为 SR5 球头刀。

该模具的半精加工过程应为精加工保留少量、均匀的加工余量,刀具几何形状与尺寸宜与精加工刀具一样,选为 SR5 球头铣刀,加工余量设定为  $0.3\text{mm}$ 。

粗加工刀具的选用原则是较高的加工效率和较多的材料去除量。为满足高效加工的要求,需要首先选用

$\phi 20$  波纹立铣刀进行初步的材料去除工作,然后再进一步去余量切削。粗加工后,模具型面上留有加工余量最大点处,应是该模具型腔内轮廓面最小曲率半径处。通过对该特征的加工计算分析得到:可选用企业现有最大球头铣刀 SR7 球头刀分两层进行粗加工铣削,所留半精加工余量需 SR5 球头铣刀分 3 层进行铣削。具体分析计算过程如下(图 5)。

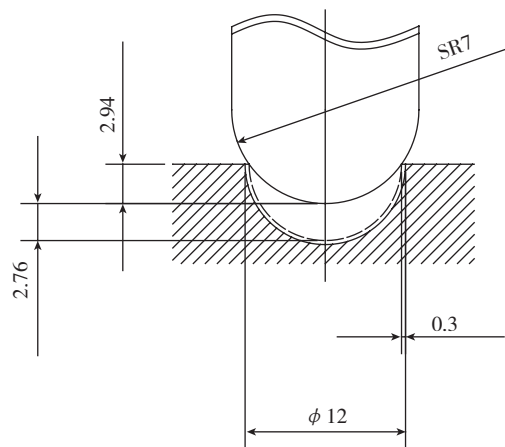


图5 材料去除量分析

Fig.5 Analysis of material removal

(1) 根据设定的精加工余量得留余后的内轮廓曲面,即图 5 所示虚线轮廓;

(2) 通过几何作图得到 SR7 球头铣刀所能加工到的极限位置;

(3) 通过图形测量得到 SR7 球头刀所需加工材料的最大加工高度  $2.94\text{mm}$ 。为保证该刀具在切削加工时的足够刚度,其单层加工高度应为  $H \leq (1/4) \times 7 = 1.75\text{mm}$ 。故 SR7 粗加工球头铣刀分两层进行去余量铣削:第 1 层铣削量高度  $H = 1.5\text{mm}$ ,第 2 层铣削量高度  $H = 1.44\text{mm}$ 。

(4) 通过图形测量得到 SR7 粗加工球头刀留给 SR5 半精加工球头刀的最大材料加工高度是  $2.76\text{mm}$ ,为保证 SR5 球头刀在切削加工时的足够刚度,其单层加工高度应为  $H \leq (1/4) \times 5 = 1.25\text{mm}$ 。故 SR5 半精加工球头铣刀需分 3 层进行铣削加工:第 1 层铣削量高度  $H = 1\text{mm}$ ,第 2 层铣削量高度  $H = 1\text{mm}$ ,第 3 层铣削量高度  $H = 0.76\text{mm}$ 。

## 2.4 规划走刀路径

走刀路径是数控加工中刀具刀位点相对工件运动的轨迹及方向。它既包括了工步的内容,也反映出工步安排的顺序,是编写程序的重要依据。因此,必须合理选择走刀路径。合理的走刀路径指能保证零件加工精度、表面粗糙度要求,数值计算简单、程序段少、编程量小、走刀路线最短、空程最少的高质量、高效率路径。另

外,一个好的走刀路径生成方法,不仅应该满足计算速度快、占用计算机内存少的要求,更重要的是要满足切削间距分布均匀、加工误差小且走刀步长分布合理、加工效率高等要求<sup>[7]</sup>。

根据上述走刀路径定义原则及多年编程加工积累的经验,定义走刀路径时,应尽量采用简单刀路,即尽量选用与机床坐标轴平行(即 $0^\circ$ 或 $90^\circ$ )方向切削。这是因为单轴插补加工的物理意义在于不存在轮廓误差,而两轴或两轴以上插补加工,在两轴位置增益不相同存在轮廓误差。由于单轴插补加工不存在轮廓误差,故对于加工中心加工零件,应尽量使被加工件的直线轮廓平行或垂直于坐标轴,以提高加工精度。

以图4所示航空燃油附件壳体金属模具的走刀路径规划为例,区域3是成形壳体外型面的型腔区域,其型面结构不具备规律性,故加工刀路可选择平行于Y轴的简单刀路,如图6所示。

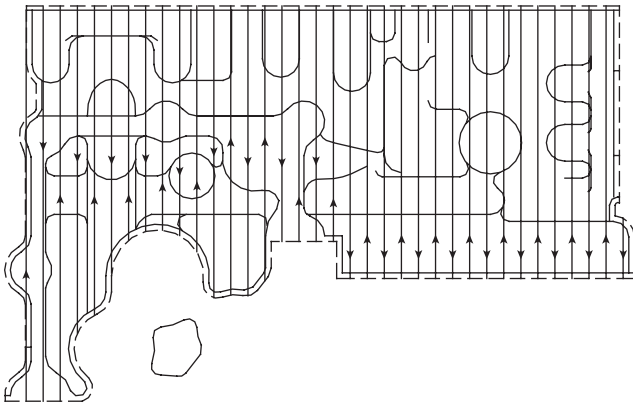


图6 型面加工刀路  
Fig.6 Tool path for profile machining

区域2是浇道,其型面的结构特点是:平行于X轴方向横截面近似圆弧形。因此,定义该型面加工刀路时,为保证刀具连续切削,避免在切削过程中提刀转移再下刀,刀路方向应选定为平行于X轴的简单刀路,这样有助于保证型面成形质量,同时加工出来的刀纹方向也有利于后期的钳工修模工作,其加工刀路轨迹见图7。如将其走刀方向选择为平行于Y轴的简单刀路,则加工过程中会频繁出现提刀转移的不连贯切削现象,既降低型面加工效率和刀具使用寿命,同时,加工所形成的刀纹方向也不利于未来的修模工作,难以保证型面加工质量。另外,由于该曲面平行于X轴方向,横截面斜率变化大,刀具平行于Y方向走刀时,相同跨距走刀切削所获得的型面表面粗糙度差异会很大,要想获得统一的加工表面质量,需要增加编程计算量。

对于区域4所示模具活块腔的加工刀路,由于它是一个深腔结构,进行工艺规划时重点需要保证其侧壁的

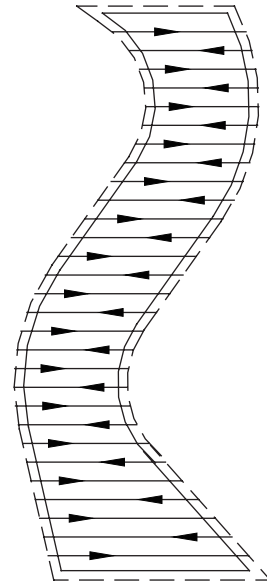


图7 合适的浇道加工刀路  
Fig.7 Proper tool path for sprue machining

成形质量,同时还应考虑到深腔切削对刀具的影响和要求。因此,宜采用由上向下逐层绕行切削的环切加工轨迹,见图8。此时如果采用平行X轴或Y轴的简单行切刀路加工,则刀具需忽上忽下切削加工,切削环境频繁变化,既不利于刀具使用寿命,活块腔的成形质量也很难得到保证。

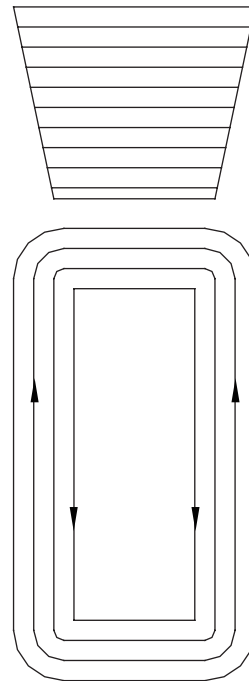


图8 合适的活块腔加工刀路  
Fig.8 Proper tool path for loose piece cavity machining

区域5所示模具分模面的加工属于平面轮廓铣削,其加工刀路应该选定为由内向外的平面绕行铣削,由最

后一刀沿轮廓铣削保证其侧壁的成形质量,见图9(箭头所示为最后一刀精加工刀具轨迹)。

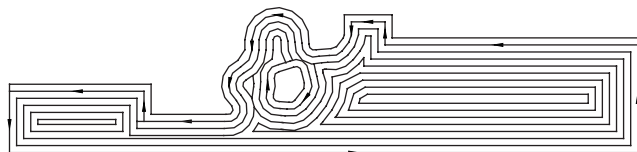


图9 分模面加工刀路  
Fig.9 Tool path for parting surface

当然,在进行各种型面的加工刀路定义时,需要根据型面轮廓结构实际情况以及实际使用要求的不同,有区别地选择各种形式、各种方向的加工刀路,而不一定都是选择简单刀路或平行刀路。如图10所示,该模块型面为圆周成形,若简单选择平行刀路加工,则型面在圆周各方向的刀纹留痕和成形质量都不一致,并且无法做到协调统一。因此,为保证形面成形面质量在各个方向上的连续性和一致性,其精加工刀路应该选择为放射线刀路,见图11,放射中心就选择在型面中心点上。这一刀路加工方式属于三轴联动插补,由于其各轴位置增益差别不大,故加工轮廓误差也不大,可以满足加工要

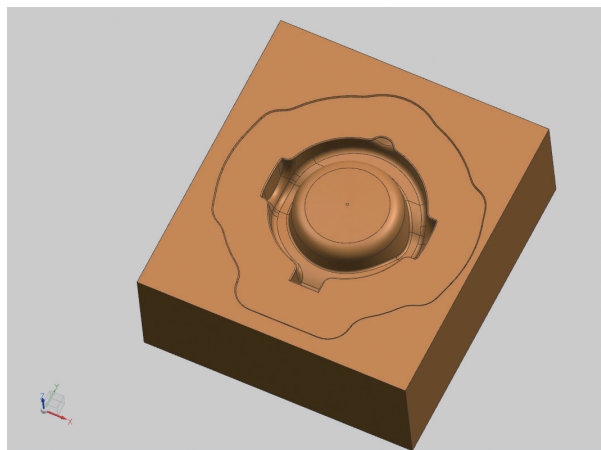


图10 锻模模块三维模型  
Fig.10 3D model of forging die block

求。

走刀路径定义好之后,只要按粗、精加工要求,逐项确定必要的加工参数,如走刀跨距、加工余量、分层铣削量等,就可以让CAM系统自动进行计算和处理,生成刀具轨迹数据源文件。在此基础上,进行后置处理就可获得数控加工程序。

### 3 切削仿真

应用自动编程软件CAM功能编制出的数控加工程序,程序段长、数据点多、程序结构复杂,因此造成程序校验工作较为困难。推荐采用仿真切削加工方式作为

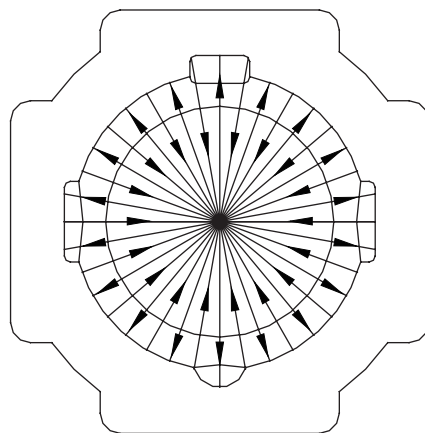


图11 放射线刀路  
Fig.11 Radial tool path

复杂程序的校验手段。

切削仿真的目的是检查所生成刀具运动轨迹的正确性,及时发现错误或缺陷,如刀具轨迹是否与机床或夹具发生干涉,机床的动作是否正确等,为实际切削加工提供可靠的依据,防止加工失误<sup>[8]</sup>。

大部分CAM自动编程系统本身具有刀具轨迹验证功能,对可能过切、干涉与碰撞的刀位点,可采用系统自带的刀具轨迹验证手段进行检验。但通常这类刀轨验证功能比较简单,对程序的校验效果不是很好,只适合作简单校验。对复杂加工过程,建议采用专业的仿真加工软件进行程序校验,这类软件往往能交互式地模拟、验证和显示NC刀具路径,是一种花费少、效率高、不用机床而可进行NC加工试验的方式。它可以免去费钱耗时的试切,缩短机床调试准备时间,并大大减少刀具磨损和清理等工作。

用专业切削仿真软件对程序进行校验仿真也讲究应用技巧,建议将每一刀轨文件的切削仿真分为以下两部分进行:

首先,按被加工件加工前的毛料尺寸定义切削仿真实所用毛坯几何体,按实际生产情况定义装夹压紧方式,这样,在仿真过程中可以看到每一道工序安排中刀具的实际切削状况,可以清楚地验证出刀具总长以及切削刃长度是否足够,下刀以及进退刀过程是否安全、合理,切削用量的定义是否合适,刀具是否会与加工件或机床发生碰撞等。仿真过程结束后,还可以在切削仿真后的模型上测量查看经虚拟切削后的加工尺寸。这些都可以帮助确认加工工艺安排是否正确合理,也可以作为重新调整加工工艺路线的关键依据。更重要的是,它可以让编程人员在把自己编写的加工程序交给加工者以前做到心中有数。

第二,直接采用CAD设计模型进行切削加工仿真。这样,通过切削仿真可以明确地观察到各工步加工刀具

切削轨迹是否有过切问题,避免出现因程序问题导致加工报废。

当然,切削仿真不可能帮助发现所有编程及走刀问题。如 G00 快速移动代码,仿真时是点到点运动,很多数控机床的控制系统则是按先 45° 方向运动,再沿单轴移动方式走刀,这种情况仿真软件是无法发现碰撞或过切问题的。因此,只有做到全面了解编程软件、仿真软件及加工设备各自特点,才能最终做出满足加工要求的适用数控加工程序。

## 4 后置处理

刀位源文件(文本文件)必须通过后置处理程序(Postprocess)进行格式转换,生成数控代码的文件格式才能够被数控系统接受。不同的数控系统通过自己独特的代码格式进行控制。后置处理是在仿真加工结束,确定刀具轨迹符合加工要求后进行的工作,即调用后置处理程序对刀具轨迹数据源文件进行处理,生成符合数控机床控制系统要求的数控加工程序。这是 CAM 编程的最终结果。“后处理程序”是一个软件程序,它用于把刀具路径档转换为 NC 工作程序,即将所生成的刀具几何运动轨迹处理为特定机床数控技术所需的 NC 代码,每一种特定加工机床和控制器都需要有不同的“后处理程序”,因此,“后处理程序”必须规划为某一特定的控制器/加工机的格式,这样转换出来的 NC 码才能被接受。

各类数控加工编程软件都会提供一个平台供工程师做二次开发,如 UG 软件提供了 MDFG.EXE 工具。应用工程师们可针对现场设备实际情况,自行编写制作标准后置处理程序,用来将所生成的刀位源文件分别转换成各类数控系统所用 NC 代码。标准后置处理程序经实践证明能够满足数控系统加工要求后,便可作为标准文件固化存档,使用时根据所选用的数控系统,调用其机床数据文件,运行数控编程系统提供的后置处理程序,将刀位源文件转换成数控加工程序。后置处理程序对 CAD/CAM 功能和具体数控设备起到了必不可少的桥梁作用。处理好后置处理程序的步骤,要求处理者对数控机床及数控系统有较为深入的认识。

针对加工航空燃油附件壳体金属模具所使用的不同数控设备的不同数控系统,笔者自行制作了两个标准后置处理程序 MAHO.MDFA 和 HAAS.MDFA,分别用来将所生成的刀位源文件转换成加工中心 MAHO M600E 和 HAAS VF-2 所能接受的数控代码。由于航空燃油附件壳体金属模具型面以复杂弧面连接为主,加工过程中进行的多为三维型面加工,使用直线插补和圆弧插补指令就可以满足编程要求。对需要使用数控系统固定循

环指令进行编程加工的模具其他结构特征,由于其结构简单,可采用手工编程方式,不在模具复杂型面的工艺规划过程中考虑。因此,在制作用于壳体金属模具数控加工的后置处理程序时,对切削过程中的 G 代码只定义了 G01(直线插补)、G02(顺时针圆弧插补)、G03(逆时针圆弧插补)的数据指定格式,这样生成的后置处理程序简单、容易修改,且不易出错。

由于航空燃油附件壳体型面复杂,加工程序段多,程序复杂难读,因此,其数控加工程序不宜手工更改。当加工过程中的工艺安排需要做较大调整时采用重新进行工艺规划、加工仿真等操作,生成新的数控加工程序用于生产加工。

## 5 结论

对于复杂型面的数控加工,工艺设计及编程人员必须在现有设备条件下,以获取高质量、高生产效率和低成本付出为目标,通过以下步骤进行工艺设计优化。

(1) 工艺路线优化设计: 遵循合理选用机床、工序集中、方便编程、合理选择装夹方式、先粗后精等原则优化工艺路线。

(2) 工序内容优化设计: 重点做好加工坐标系、加工区域、工步顺序、加工刀具、走刀路径、切削用量等优化设计。

(3) 加工仿真优化设计: 通过设计不同的仿真数据模型,分别验证切削过程的安全性和加工产品的安全性。

通过优化工艺设计,更充分地发挥先进数控设备的加工优势,在确保航空产品复杂型面加工质量前提下,实现高效、低耗加工。

## 参考文献

- [1] 黄键. 先进制造技术在发动机制造业上的应用. 新技术新工艺, 2008(3):45-46.
- [2] 武文革, 刘站强, 姜军宁. Cimatron 在气门室盖模具 CAD/CAM 中的应用. 现代制造工程, 2007(3):51-53.
- [3] 谢海东. 典型复杂型面模件高效数控加工策略. 机械制造技术, 2012(7):66-70.
- [4] 吴福忠, 连晋毅. 航空蜂窝芯零件数控加工工艺. 航空制造技术, 2007(7):92-95.
- [5] 林朝平, 郭国林. 数控加工编程中铣刀选择的工艺分析. 工具技术, 2006(40):68-69.
- [6] 张党飞, 阮晓光, 王寅晨, 等. 浅谈数控加工中刀具的特点及选择. 制造业自动化, 2011(10):146-148.
- [7] 张美琴, 肖树才, 张扬龙, 等. 分段沉积/雕铣成形的工艺规划研究. 现代制造工程, 2007(3):78-80.
- [8] 戴丽玲. 数控加工工艺方案拟定及仿真模拟过程. 昆明大学学报, 2005(1):40-43.

(责编 深蓝)