大型结构框数控加工技术

■ 中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司　（黑龙江　150066）　杨　双　王洪林

摘要：薄壁深腔类结构件的数控加工一直是航空制造车间的一个加工难点。本文以一个民用直升机尾部结构的大型结构框为例，从对产品的结构和工艺性分析入手，对产品的工艺方法、程编和切削加工参数的确定等进行了论述。

随着航空工业的不断发展，航空零件的机加工难度越来越高，其中薄壁深腔类零件尤为典型，其结构复杂，表面质量和尺寸精度要求高，在加工过程中尤其在粗加工时该类零件变形很大，因此在加工该类零件时，不仅要采用先进的加工设备，高端的编程软件，还要确定正确的加工方案，选用合理的刀具和切削参数，才能保证产品质量及生产要求。

1. 零件结构分析

该例件为某机型机身结构件框类零件（见图1），是典型的薄壁深腔类零件。该零件最大外廓尺寸为3 500mm×800mm，最高处为70mm，壁厚公差为±0.1mm，端头斜面倾斜角度为42°。该产品外形理论型面复杂，立筋及腹板壁厚要求较薄，在加工过程中零件特别容易产生变形，因此加工难度特别大。

2. 零件加工工艺性分析

该零件加工难点在于：①毛坯去除量大，应力大，零件容易产生变形。毛坯去除量接近90%，加工过程中产生巨大应力，变形难以控制。②腔深、壁薄。零件高度最高处达70mm，立筋最薄处1.5mm，腹板最薄处1.5mm，加工过程中容易产生变形。③该零件为双面腔，翻转过程中公差积累，尺寸保证困难。④工艺连接筋较多，零件腔内腹板形状复杂，加工中接刀区域繁多，大大增加编程难度。⑤零件中间部位悬空，加工中容易产生震颤，影响零件表面粗糙度值及腹板尺寸，对工装要求很高。⑥零件端头处立筋倾斜角度过大（见图2），给加工带来了很大难度。

针对这种情况，在加工前期，我们制定了合理的加工方案及部分典型位置的加工方法。在编程过程中，将CATIA软件的加工功能和VERICUT模拟仿真相结合，并应用新的机械加工理念，采用数控加工中心高速切削的加工方法，结合合理的刀具和切削参数，最终大大减少了加工中的变形，在提高加工效率的同时，很好地保证了零件的质量要求。

3. 加工设备及数控加工工艺方案

该零件在数控加工中心JOBS146（见图3）上进行加工。操作系统为SIEMENS 840D；*X*向行程为500mm，*Y*向行程为3 000mm，*Z*向行程为1 250mm，*A*±93°，*C*±200°；主轴转速为50～24 000r/min；主轴功率为

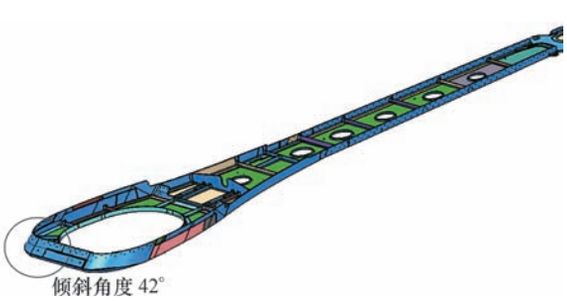

图　1

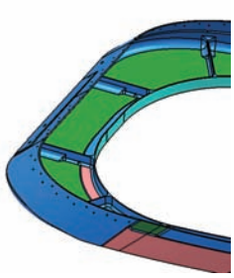

图　2

图3　JOBS146机床

49kW；刀柄为HSK A63。

由于零件外形尺寸及质量较大，粗加工后应力变形严重，数控加工时的定位装夹不适合采取周边工艺墙的方案，只能采取在零件上增加合适工艺凸台为辅助基准的方法来保证零件正、反两面的加工。

依据毛料尺寸，零件两侧间隔约600mm，共设置6对工艺凸台为辅助基准，其宽度为80mm；零件上部端头内部也设置一工艺凸台，有利于零件加工中的定位、装夹和压紧。

以工艺凸台为辅助基准的定位、装夹方式，替代了铣切夹具，节省了研制成本，缩短了零件的研制周期，提高了零件的整体刚性，解决了零件局部刚性差的问题，有利于加工尺寸的稳定。工艺凸台在环形框零件精加工完成后由数控工序去除。工艺凸台的布置形式如图4所示。

根据零件的结构特点和毛坯状况，最终确定数控加工分为粗加工、半精加工和精加工三个阶段。

粗加工阶段主要是去除毛坯的大部分加工余量，考虑到零件毛料去除量大，内应力释放后产生扭曲和变形，零件所有表面预留了10mm的加工余量。为充分消除零件的内应力变形，保证零件精加工后的重要特性尺寸和表面粗糙度，满足其较高的形状及位置精度要求，零件的半精加工阶段分两次进行，零件所有表面留2mm精加工余量。考虑到粗加工和淬火后产生的内应力变形对零件半精加工的影响，编程加工原点及编程坐标系设置在零件腹板上部的减轻孔中心处。

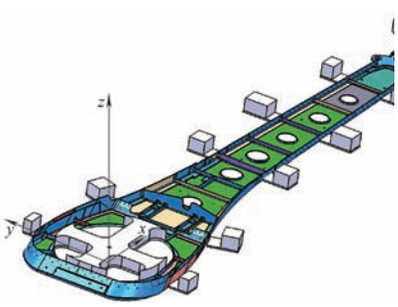

图 4

数控精加工阶段的主要任务是保证零件的重要特性尺寸和表面粗糙度，满足其较高的形状及位置精度要求。考虑到该零件为典型的深腔竖梁结构，在数控精加工阶段应以保证零件的尺寸精度和表面质量为主。

4. 数控程序编制

（1）程序编制的主要工艺原则。该零件按CATIA三维数字模型加工制造，零件数字模型完整描述了零件的主要信息，是CAD/CAM集成数控编程系统的核心。

粗加工阶段，为减小零件毛料内应力释放而产生的扭曲、变形，程序编制采用等高铣削对称去除大余量方式，选择合适的背吃刀量进行分层切削，保持切削和刀具载荷均匀，防止过载和波动，减少铣削内应力造成的变形；考虑到此零件为多槽腔结构设计，区域加工顺序选择不连续加工区域的层优先方法，以保证粗加工后零件各处槽腔及筋板的加工尺寸一致性；为充分释放粗加工后的零件内应力，零件腹板上的减轻孔粗加工并预留10mm余量。

半精加工是把粗加工后的残留加工面变得平滑，同时去除拐角处的多余材料，在工件加工表面留下一层比较均匀的余量，为精加工做准备。由于半精加工对零件表面质量、轮廓精度及刀具寿命有很大影响，因此，此零件的半精加工分两次进行，在粗加工预留10mm余量的基础上，按先进行内腔、内形加工，后进行外形加工的加工顺序，对零件所有表面预留5mm加工余量进行第一次半精加工后，再进行第二次半精加工，保证零件所有表面预留2mm精加工余量，最大限度地消除零件变形。

精加工是数控加工的最后一道工序，其目的是按照图样要求，使零件达到最好的表面质量和轮廓精度。此零件按先内形后外形的加工顺序，保证零件的重要特性尺寸和表面粗糙度，满足其较高的形状及位置精度要求。

针对此零件有多处凹槽腔及拐角的特点，采用二刃（或三刃）等直径铣刀以插铣加工（也称为钻铣加工或直捣式加工）的方式对零件上深陡槽腔的拐角（转接圆角）进行精加工，以避免由于铣削刀具太长，加工时偏摆太大，导致拐角处的加工尺寸、表面质量差等问题。

此零件单面最大精加工深度70mm，是典型的多深腔陡壁结构。为防止精加工时在陡壁面和非陡壁面上的切削载荷的急剧变化，对零件陡壁面和非陡壁面采用不同的程编加工方法，陡壁面采用槽腔铣，非陡壁面采用曲面轮廓铣，使这两部分都得到有效加工，获得均匀、理想的表面粗糙度值。

总之，精加工阶段必须合理安排零件数控加工程序。尽可能地使用连续策略，将程序加工

步骤减少到最少，在零件的一些临界区域应尽量保证不同步骤的精加工路径不重叠，避免出现刀痕；同时应尽量使用单个刀具精加工临界区域，防止因更换刀具而导致精加工后加工表面产生接刀痕迹，降低零件的表面质量，增加后续钳修工序工作量等问题。

（2）数控编程的误差控制。在图形交互式自动编程方式中，编程的核心是刀位点的计算，其编程误差主要考虑两个误差：一是刀具轨迹计算误差；二是残余高度。

数控编程刀具轨迹是由直线和圆弧组成的线段集合，近似地取代刀具的理想运动轨迹而拟合产生的插补运动，存在着一定的插补计算误差。这种误差是刀具轨迹计算误差的主要组成部分，它会造成零件加工尺寸不到位或过切现象的出现，在CAM软件中通过设置公差带的方法来控制刀具轨迹计算误差。

数控粗、半精加工阶段的主要目的是去除加工余量，消除内应力变形，考虑到CAM软件输出的刀位文件长度大小及数控机床CNC控制器的存储容量限制，其编程程序公差带（Machining tolerance）数值应设置为0.2～0.3mm；此零件尺寸公差按照GB 1800－1999执行，数控精加工阶段编程程序公差带数值应设置为≤0.05mm，以保证数控编程实际刀具轨迹不超出零件制造公差的范围。

在数控加工中，相邻刀轨间所残留的未加工区域的高度称为残余高度，作为评价加工质量的一个重要指标，它的大小决定了零件加工表面的粗糙度值，同时对数控加工完成后的钳修工作量有很大影响。

此零件数控精加工时，对残余高度的控制采用合理选择铣削刀具径向步进距离（刀轨行距）方法进行编程，在控制残余高度、保证加工表面质量的前提下，应以最大的刀轨行距生成数控刀具轨迹，提高数控精加工效率。

（3）数控程序切削用量的确定。数控编程时，必须确定每个程序段的切削用量，并以指令的形式写到程序中。切削用量主要包括主轴转速、背吃刀量及进给速度等。不同的加工阶段和方式应选用不同的切削用量，以充分发挥刀具的切削性能和数控机床功能，最大限度地提高生产率。

主轴转速n的确定：此零件粗加工及半精加工阶段均采用五坐标数控龙门铣JOBS146加工。依据该数控机床性能和所选用加工刀具直径大小，设置n=15 000r/min较为合适；为保证零件表面质量，数控精加工阶段采用n=10 000r/min，并可根据刀具直径大小进行适当调整。

背吃刀量a_p的确定：此零件粗加工阶段，依据毛坯材料、机床性能和刀具直径，并考虑到内应力变形、加工效率等因素，a_p数值确定为5mm较为合理；半精加工及精加工阶段，根据加工余量、刀具直径以及加工后的表面质量要求等影响因素，a_p数值设置为3mm为宜，同时依据选用刀具直径大小在程序编制时做适当调整。

进给速度v_f的确定：v_f数值应根据零件的加工精度和表面粗糙度要求及刀具和工件材料来选择确定。粗、半精和精加工阶段分别依据切削刀轨行距、背吃刀量a_p、每齿进给量f_z、主轴转速n在保证合理刀具寿命和零件加工精度、表面质量的前提下选取合适的进给速度v_f。

数控编程中，还应考虑在不同切削情况下采用不同的进给速度。如在初始切削进刀时，特别是Z轴下刀时，由于端铣受力较大，应采用相对较慢的速度进给；对于沿Z轴方向进给，由高往低的曲面区域加工模式，在产生端切削时，也应设置不同的进给速度；切削过程中的平面侧向进刀，产生的全刀切削而导致切削条件较差，需采用较低的进给速度。

5. 结语

通过此种零件的加工，我们积累了大量薄壁深腔类零件的加工经验，但在对特殊部位的处理时还是遇到了很大的困难，欢迎各界专家提出宝贵意见。

参考文献：

[1] 艾兴. 高速加工技术及其应用研究[J]. 中国工程科学，2000（11）：40-51.

[2] 张世莹. 用于高速铣削的刀具[J]. 产品与技术，2000（8）：62-64.

[3] 张伯霖，杨庆东，陈长年. 高速切削技术及应用[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

MW（收稿日期：20140918）