

整体叶轮五轴数控加工技术分析

吴燕辉 肖朝伟 周斌

(四川航天中天动力装备有限责任公司 四川 成都 610100)

摘要: 本文围绕五轴数控机床的结构、加工范围、高速切削工艺特点、整体叶轮五轴数控常规加工技术的应用及存在的问题进行了分析。为了优化整体叶轮五轴数控加工技术,围绕整体叶轮五轴数控加工技术中与整体叶轮建模相关的功能与命令设置、外部曲线文件的建立、整体叶轮五轴数控加工曲面的建立、旋转阵列得到整体叶轮的过程、整体叶轮五轴数控加工实际作业过程中精度控制要素(包括编程零点选择、刀具选择、切削参数选择)几个重点环节展开分析,供参考。

关键词: 整体叶轮; 五轴数控加工技术; 高速切削工艺; 数控加工曲面; 精度控制

0 引言

工业领域对叶轮有两种定义:其一,指装有动叶的轮盘,一般会成为冲动式汽轮机转子构成的一部分;其二,是指轮盘与安装在其上的转动叶片的合称。叶轮的分类一般由其自身的形状以及开闭情况决定。整体叶轮通常应用于高精尖设备,如透平机械的核心部件便由整体叶轮构成,很多航空发动机的关键部件也由整体叶轮构成。此种工业原件的主要特点为:叶片薄厚程度极佳、扭曲幅度大、叶片之间的间隔极小等。若要使整体叶轮具备上述特性,不能使用常规的加工技术。如果铸造加工、电火花加工、电解加工等方法加工出的整体叶轮难以避免气孔、砂眼等内部结构缺陷。基于此,必须探索一种高精加工技术。

1 五轴数控加工基床的特性分析

1.1 五轴数控机床的结构

常见的五轴数控机床分为双摆台结构、双摆头结构、一摆头一摆台结构。具体的特点如下。

(1) 双摆台结构。该种结构主要用于加工一些小型轻工件。设计成双摆台的形式之后,机床空间的利用率会进一步增大。在主轴位置固定不变的情况下,刀具的长度对摆动误差基本不会造成影响。不仅如此,在实际加工作业期间,由于工作台可根据实际情况进行旋转、角度倾斜,故操作便利性较大。此种形式五轴数控机床应用期间,工件一般会随着工作台一起摆动,故不适合加工体积、重量较大的零件。

(2) 双摆头结构。采用该种结构,两个转动轴都会对刀具施加相应的作用,且刀具会绕着两个相互正交的轴连续转动。受此影响,刀具能够指向任意一个方向。此种形式的五轴数控机床整体灵活性十足,但由于摆动

装置的结构极其复杂,故刚性可能无法满足一些工件的加工需求,应谨慎选择。

(3) 一摆头一摆台结构。刀具端与工件端各自设有一个转动轴,且两个轴的回转空间方向均已固定。

1.2 五轴数控机床的加工范围

无论五轴数控机床的具体结构呈现出何种特点,由于均设定了2个用于控制的回转轴,故在运转期间,针对相对静止的工件(上文提到,其中一种结构工件随轴移动,故不是绝对静止),刀具在轴线方向上的一定空间内可以被任意控制。如此一来,工件随轴转动的过程中,除了被正常切削之外,几乎不会受到任何其他干扰,而刀具切面受到意外磨损的情况也几乎不会发生,能够始终保持比较理想的切削状态。在此前提下,五轴数控机床的加工范围及特点包含:其一,能够一次性装夹多个面,进行几乎全方位的施工,能够大幅度提高零件的加工精度,保证加工效率;其二,刀轴的状态可以根据加工工件状态的变化而进行相应的调整,特别是刀具以及工件的姿态角随时随地都能够微调,故五轴数控机床具备加工复杂工件的可行性;其三,刀具和工件姿态角可以被灵活调整的另一个优势在于,在整个加工过程中,发生刀具干涉、欠切的概率可控制在极低水平,相应地,切削速度以及宽度会进一步提升。

1.3 基于五轴数控加工基床的高速切削工艺特点

以五轴数控加工机床为基础,针对整体叶轮进行加工时必须使用高速切削技术。该技术的实现原理为:由于五轴数控基床的主轴转速以及进给速度均可达到较高水平,足以满足金属切除率的相关要求,且能够保证加工精度及质量。采用高速切削时,在高速进给速度的支持下,在切削过程中,至少70%以上的热量会集中在切屑端,及时排出之后便不会作用于刀具。如此一来,刀具温度在较长时间内处于安全可控的状态,刀具的寿命

会延长、损耗率会大幅度降低。此外，由于加工工件残余的温度极低，故可降低因高热导致的工件变形发生率，可极大地提升加工过程的热稳定性，在冷却条件控制方面无需过多考虑。

1.4 基于五轴数控加工机床的整体叶轮常规加工技术的应用及存在的问题

使用五轴数控加工机床，按照常规工艺加工整体叶轮时，常见的问题如下。

(1) 叶片之间需要切削大量的材料，在完成这一基础要求的过程中，必须同时考虑气动性方面的要求同样需要达标。因此，小扭角结构以及根部常规角结构都不满足要求，必须使用大扭角、根部变圆角的结构。但调整为此种结构之后，叶轮加工全过程的精度控制水平、操作控制难度都会大幅度提升。

(2) 受加工槽道宽度不足、叶片长度超出一般标准、刚度相对较低等因素的影响，加工过程中出现变形的概率极大。

(3) 加工期间，由于相邻叶片之间的空间已经被严重压缩，而在进行清角加工作业时选用刀具的直径同样调整到相对低的标准，故经常出现刀具折断的情况。

(4) 加工过程中稍有不慎便会导致叶片严重扭曲的情况，会影响加工作业的正常开展。

(5) 除了加工期间的问题之外，如何保证针对整体叶轮曲面造型的有效控制，针对数控机床的控制编程时，部分命令的合理程度同样不高。由此造成的结果是，加工过程中容易因切削而产生其他振动，导致加工结果无法达到预期。

2 优化整体叶轮五轴数控加工技术的方法

2.1 与整体叶轮建模相关的功能与命令设置

2.1.1 数据处理建模要素

在上文介绍的整体叶轮五轴数控常规加工技术中发现，有关刀具与工件之间各自处于什么样的形态，接触时会呈现出什么样的状态，发生什么样的变化直接决定最终加工结果。基于此，为了使加工技术得到优化，首先需要完成建模，重点解决要素如下。

其一，围绕叶片、轮毂基本曲线构建模型。针对加工生产线实际应用的五轴数控机床的常规加工工况进行测量或是定向设计，首先得出构成基本曲线所需要的点列，以此为基础，需要生成 pts 点格式对应的文件。之后将该文件导入 Pro/E 软件，应用对应的功能模块，进行拟合作业，相关要求为：必须成功拟合出叶片的上下缘曲线以及轮毂曲线。

其二，在叶片上下缘曲线以及轮毂曲线的基础数据之上，需要完成叶片及轮毂曲面的建立。具体的实现过程为：使用扫描混合、边界混合、曲面合并等命令（注意，

上述功能执行顺序不可混淆）完成叶轮曲面建立，检测无误之后，方可使用旋转曲面命令，完成对轮毂曲面的建立。

其三，令叶轮曲面及轮毂曲面展现出实体。按照上述流程建立的叶片曲面以及轮毂曲面均属于“单一曲面”，几乎不具备厚度。因此，若要呈现出实体，必须构建封闭“曲面组”。可通过“实体化”的命令加以实现，之后将之作为实体阵列的建设的的基础支撑。

其四，叶轮实体阵列的建立。需要将完成实体化建立的叶片依次进行选择性的粘贴以及阵列化操作，获得所有的叶片组。之后根据实际测量获得的数据，对倒直角、变半径倒圆角等进行精确修饰，使模型的所有特征与实际情况趋于一致。

2.1.2 相关的重点功能及命令

(1) Pts 点格式部分。应用 Pro/E 软件进行点坐标的读入时，存在两种文件格式：*.ibl 以及 *.pts。前者读入三维空间点文件，需涉及三维空间坐标值；后者在每一行记录一个点的坐标，可以记录多行数据。考虑到整体叶轮是三维空间下的实体物，故推荐使用 *.pts 格式的文件读入。

(2) 曲线拟合部分。尽管 Pro/E 应用软件已经得到了全面升级，可直接导入利用三维扫描设备获得的整体叶轮的三维信息数据，但直接导入 Pro/E 软件后，极有可能出现失帧的情况，造成点位坐标混乱。为了保证导入的信息均符合原貌，仍然需要按照上述方式首先导入二维界面，之后利用 Pro/E 自带的“基准”功能，完成曲线拟合作业。

2.2 外部曲线文件的建立

通过测量或设计获得整体叶轮基本曲线相关的点列数据之后，首先应该进行全面检测，如果发现有部分数据信息模糊或是完全丢失，应该重新导入。重点检查的项目为：叶片上下边缘曲线、分流叶片的上下边缘曲线、轮毂面的母线。上述三项内容对应的文件名不得存在随机性，需要按照特定的数字顺序依次编号，如“point1.pts”“point2.pts”等。还需注意，每一组数据都可以通过拟合生成一个基本的曲线文件。在完成曲线拟合绘制之后，需要点击“曲线”命令，随后连接“通过点”，之后便会弹出“曲线拟合定义以及其他设置”对话框。此时应点击“选取点”下拉菜单中的“样条”，从其中任意选取一个点，便可完成符合要求的曲线建立，对应曲线文件的名称编制与上文所述相同。

2.3 整体叶轮五轴数控加工曲面的建立

整体叶轮建模过程中，曲面的建模难度最大，需要注意的事项最多。以一种叶片厚度不均匀的整体叶轮为例。此种叶轮的顶部较为稀薄，底部比较厚。对应的数值为：顶端的厚度仅为 0.70mm，根部的厚度为 1.63mm。

针对叶片和分流叶片进行绘制时,应使用扫描混合以及边界混合两项功能,之后点击曲面合并功能指令,实现曲面的合并。

2.4 旋转阵列得到整体叶轮的过程

在 Pro/E 软件中,整体选中叶片之后,显示出的内容具有单一性,尚未完全显示所有叶片。因此,应进行复制、粘贴,将多组叶片全部呈现出。叶片组的总数量决定具体的旋转角度,具体的计算方法为以叶片组的数量作为除数,以 360° 作为被除数。完成该阶段操作之后,还应进一步使用阵列命令,将其他几组叶片的造型清晰呈现。在此基础上,还需使用实体化以及变半径倒圆角两项功能,对叶片模型进行调整,最终经过渲染,便可在应用软件中完全复原实体整体叶片的全貌。

通过上述步骤完成整体叶轮在应用软件中的虚拟模型构建之后,需要模拟常规加工过程,对难点和问题进行清晰观察。在这个过程中,软件会实时显现监测数据。将这些数据进行分段记录、比对,通过调整角度(刀具角度和整体叶轮的角度)等方式,获得新的数据。将新旧数据进行对比,计算模拟加工效率、最终结果,找到性能更优的加工方案对应的数据,最终将此类数据作为优化的核心数据。

2.5 实际作业过程中精度控制要素

2.5.1 整体叶轮加工编程零点选择

根据上文所述,完成整体叶轮五轴数控加工技术具体应用前的建模准备工作之后,便需围绕控制算法进行编程。其中,编程零点设置非常重要,能够在很大程度上决定控制精度。编程中的零点便是数控程序中的原点。通常情况下,出于方便计算及五轴数控机床的五轴联动加工中心区域对刀具要求方面的考虑,应该将编程的零点设置在毛坯表面的中心区域。在机床处于实际运转状态时,应该首先使用仪器设备,对刀具的安装长度进行清晰测定。在此基础上,还应确保数控系统内的数据充足。为了确定变成坐标系的原点完全符合要求,可使用寻边器对刀的方式进行检验。

2.5.2 整体叶轮加工刀具选择

构成整体叶轮数控加工刀具系统的主要材料分别为刀具和标准刀柄。常用的刀具包含钻头、铣刀、铰刀、丝锥等。这些通用刀具便是成品刀具。标准刀柄的主要应用价值在于:在数控加工期间,如果需要调整刀具,则标准刀柄能够无障碍连接任何刀具(刀头),且更换速度极快(自动更换)。经过设置之后,机床主轴具备自动“松开”以及“拉紧定位”的功能,可以比较精确地完成各种刀具的更换及安装。此外,标准刀柄还能充分适应机械手的装刀和卸刀作业,有助于在刀库中以更高的效率完成刀具的识别、存储、搬运等管理作业。

2.5.3 整体叶轮加工切削参数选择

进行数控编程作业时,每一道工序的切削参数都必

须经过严格确定。为了确保万无一失,需要将每一道工序对应的切削参数写入数控程序之中,且以调用指令(注意,不能是常规指令,否则可能引起参数调用冲突)的形式存在。通常情况下,切削参数包含背吃刀量、进给速度、主轴转速等。由于针对整体叶轮的加工工艺存在差异,故对应的切削参数也会发生变化。具体选择时应遵循如下原则:(1)叶轮表面的加工精度和粗糙程度必须得到保证,刀具的切削性能需最大限度得到发挥,刀具的使用寿命应该达到预期水平(可通过模拟的方式加以实现);(2)机床的性能也应发挥到最佳水平,经过调整后,综合生产效率应该提升,生产成本需要有效缩减;(3)计算机模拟的结果可作为参考,但决定是否选用前,还需实践检验,二者结果相互对应,方可选用。

3 结语

常规五轴数控加工技术应用于整体叶轮加工时,受曲面特性的影响,需要针对直纹曲面和非直纹曲面,分别采用刨铣和点铣工艺进行加工。由于需要去除叶片之间的大量材料,且必须满足叶轮在气动性方面的要求,造成叶片的整体结构应符合大扭角、根部变圆角结构的要求。除了此类加工难点之外,由于加工槽道不够宽、叶片相对较长、刚度比较低,导致加工过程中极易出现变形现象。而受相邻叶片之间空间较小这一因素的影响,开展清角加工作业时,刀具的直径只能被迫随之降低,极易容易在加工过程中令刀具折断。对上述进行深入分析后,与数据库进行对照,借由计算机模拟,对一些加工流程进一步规范,最终目的在于使整体叶轮的加工效率系统性提升。以此为基础,逐渐提高整体叶轮的性能,这便是优化的核心诉求。

参考文献:

- [1] 王小旭,付大鹏.车用涡轮增压器叶轮的加工方法研究[J].机械工程师,2021(06):158-159+162.
- [2] 张竞龙.整体叶轮五轴数控加工工艺技术分析[J].现代制造技术与装备,2021,57(05):123-125.
- [3] 郭强,韩凤霞,张守明.基于复杂曲面的整体钻机叶轮加工工艺研究与实践[J].地质装备,2021,22(02):17-22.
- [4] 吴中竟,段昌德,乔杰,等.开式整体叶轮的多轴数控加工工艺技术研究[J].东方电气评论,2021,35(01):49-54.
- [5] 徐丽娜,孙慧,田德.基于NX平台的整体式分流叶轮五轴数控加工研究[J].现代制造工程,2019(11):85-89.