

基于流程驱动和模型定义的航空发动机机匣三维工艺设计及应用

3D Machining Process Design & Application for Aero Engine Casing Based on Process Driven and Model Definition

■ 赵驯峰 熊吉建 李湑 周小文 周济同 / 中国航发成发 余天 / 武汉开目信息技术股份有限公司

航空发动机机匣的复杂结构特征和加工变形控制，决定了机匣工艺设计的复杂性，如何实现高效率、高质量的工艺设计，成为型号研制的重要研究方向。

随着航空发动机研制换代，机匣结构功能设计呈现复杂化和复合化的趋势。机匣结构属于典型的精度高、结构复杂、易变形的薄壁零件，突出问题在于工艺设计的快速反应能力和薄壁难加工材料的变形控制^[1]。传统离散式二维工艺设计无法基于二维图样实现全面制造工艺要素的快速工艺和质量保障的响应能力。因此，工艺设计在提高工艺质量、工艺效率的驱动下，针对高度复杂的机匣壳体零件，研究基于模型定义（MBD）的数据为驱动源的高效

率高质量工艺设计方法尤为重要。MBD的三维工艺已经在航空制造、雷达、军事装备等领域进行了广泛的研究和探索^[2-3]，并取得了较好的成果。本文通过对机匣结构与工艺分析，提出MBD机匣的数字化三维工艺设计方法，并建立基于工作流驱动的工艺任务流程，实现提高效率高质量工艺设计。

工艺分析

机匣零件作为航空发动机重要的环形承力结构，根据设计结构可以分为整体机匣、对开机匣以及带整流

支板机匣等，如图1所示。恶劣的工况和轻量化、复合化的结构设计趋势，决定了机匣具有复杂的结构特征和高度精密的制造要求。机匣主体结构一般为薄壁的回转结构，内外壁分布复杂流道和异形特征，如支板、型腔、凸台、异形槽以及精密孔等，这些复杂特征极大地提高了机匣工艺设计的复杂程度。但各类机匣的机械结构与设计特征具有较大的同类性和相似性，为数字环境下基于模型和特征加工的机匣三维工艺设计提供了契机。

由于机匣的机械加工工艺需要

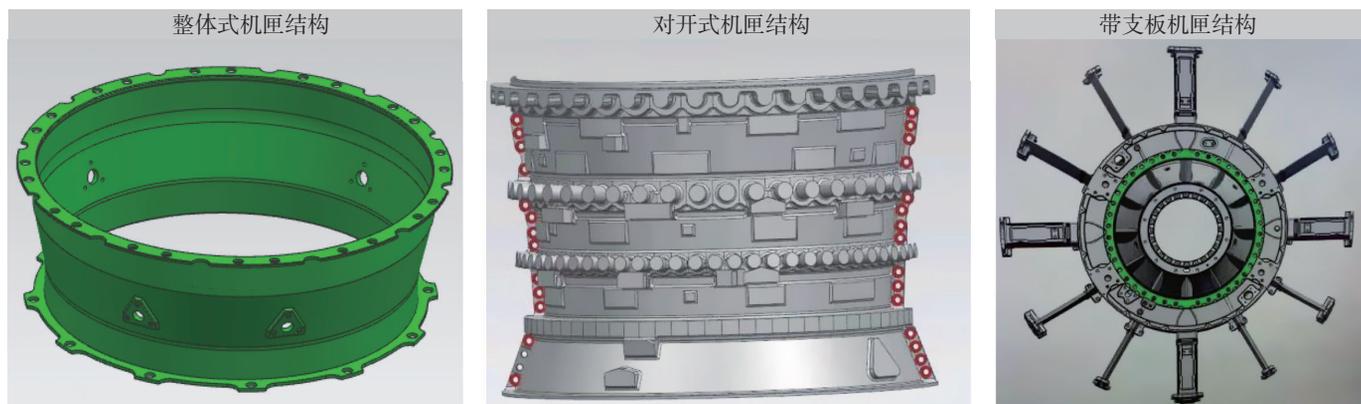


图1 机匣结构

* 基金项目：中国航发自主创新专项资金项目（ZZCX-2020-024）、四川省重大科技专项项目（2021ZDZX0001）

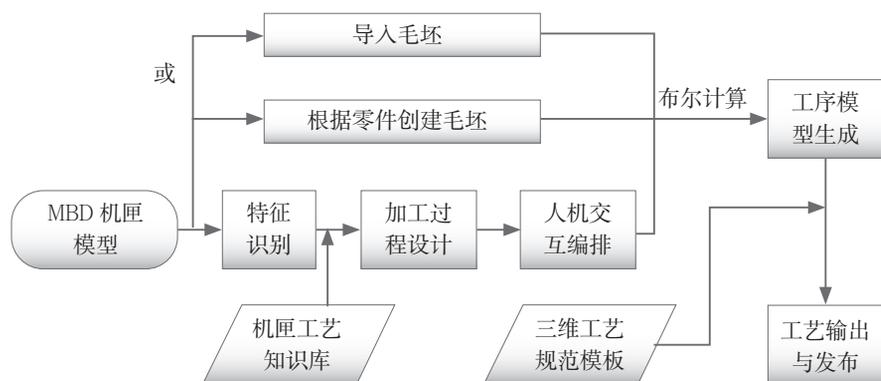


图2 MBD机匣的三维机械加工工艺设计路线

处理复杂结构特征和精度要求，所以机匣机械加工工艺的布局与变形控制具有较高的要求。在机匣的具体工艺制造中，由于性能要求和复杂特征使得加工方法不仅仅包含数控车削、多轴铣削，还包括电火花加工、热处理、表面强化等特种工艺，导致机匣工艺过程极其复杂、工序极其繁多。机匣作为薄壁精密构件，局部结构刚性差，为了消除机匣加工的薄壁变形误差，往往一个机匣工艺需要分散成数十道工序。

设计路线

MBD机匣的三维机械加工工艺设计方法路线如图2所示，由于机匣复杂的结构和制造信息，直接识别和提取整个MBD的数据难度很大，所以在数字化环境下通常采用对MBD的模型特征分解和分步识别。由于各类机匣的设计特征具备同类型和相似性，使得基于特征识别的机匣MBD设计模型解析和数据提取的三维工艺设计具备可行性。所以，在MBD机匣的三维机械加工工艺设计中，首先对特征进行逐一识别，提取每一个特征的几何形态、尺寸信息和拓扑关系。将机匣典型工艺及加工方法推送给识别特征，匹配生

成每个特征的切削体，与导入毛坯或根据零件创建的毛坯布尔计算出工艺模型。再调用预制的三维工艺规范模板，输出三维机械加工工艺文件。

工艺流程

机匣工艺设计是一个复杂工程系统，除了对机匣模型进行加工方法设计，还需要集成工装设计、数控编程、刀具设计、过程仿真等系列协同环节，完善工艺制造的全部要素。同时，为了提升工艺设计效率和质量，在协同工艺集成的基础上，引入流程驱动的方法，实现流程化驱动多角色协同的机匣工艺设计体系。具体过程为：首先，梳理机匣机械加工工艺设计流程的逻辑关系，利用顺序驱动、条件驱动和循环驱动转化为实际工艺任务的工作流^[4]，并搭建

流程驱动平台的固化机匣工艺设计流程；其次，根据工艺任务，确定工艺专家、工艺员、数控编程、工装设计、仿真不同角色的职责和权限；最后，启动工艺任务流程驱动源，将工艺设计流程的逻辑关系转化成任务驱动，指示相应角色完成系列工艺活动。

关键技术

机匣特征识别及信息提取

航空发动机机匣的设计数据由MBD的模型代替了传统的二维图样，MBD的模型成为三维机械加工工艺设计的主要依据。由于零件特征决定了加工方法，所以三维机械加工工艺设计的起始数据来源于模型的特征和加工信息，因此如何进行特征识别和信息提取极为关键。实现MBD机匣的特征识别，是根据获取的特征拓扑结构数据以及提取的属性、边界和位置，重新组合形成具有工艺语义的加工特征，如表1所示，根据机匣的结构和加工方法，其加工特征可归纳为车削加工类特征、铣削加工类特征和钻孔类特征。

机匣典型工艺知识及加工方法推送

一般情况下，机匣工艺设计的精度保证和变形控制，往往取决于优化的工艺方法和成熟的工艺路线。

表1 机匣特征识别分类

| 特征分类 | 加工方法 | 包含特征 |
|-------|-----------------|----------------------------------|
| 车削类特征 | 车削加工，包括车平面和车轮廓 | 回转面、回转面系、端面、内外圆柱面、内外锥面、环槽、倒角倒圆等 |
| 铣削类特征 | 铣削加工以及三轴和多轴镗铣加工 | 型腔、锥底槽、曲面、柱底槽、侧壁、平底凹槽、球槽、台阶槽、键槽等 |
| 钻削类特征 | 钻削和/或铣削加工 | 通孔、台阶孔、盲孔、螺纹孔、孔系等 |

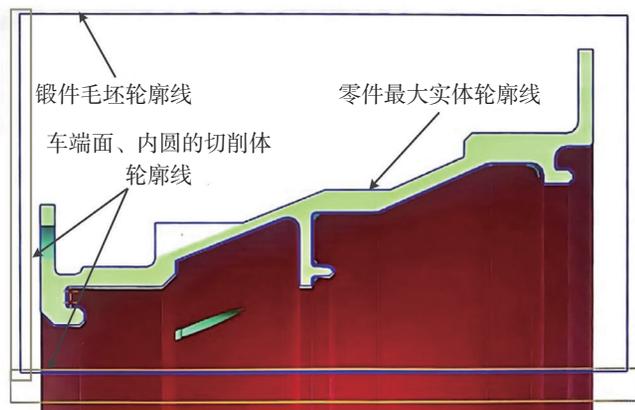


图3 车削特征的切削体构建方法

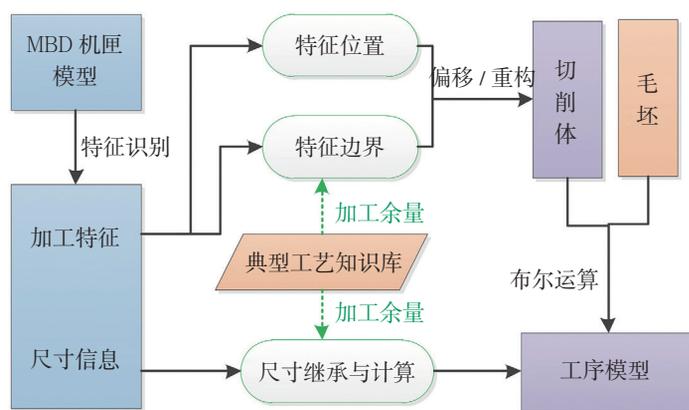


图4 非车削特征的切削体构建方法

而机匣典型工艺知识库就是固化各类机匣优化成熟的工艺及加工方法，在新工艺设计时直接引用相应机匣的典型工艺和加工方法，从而达到高效率高质量的工艺决策规划^[5]。但引用一个完整机匣工艺直接复用在另一个零件，由于工艺的复杂性，实现难度很大。因此，较好的方法是将工艺知识库拆分后分步引用，机匣工艺知识库可以拆分成典型工艺库、加工方法和工艺资源库。

在建立机匣典型工艺库中，关键点在于利用机匣零件的结构相似性、工艺相似性和材料相似性，将零件进行分类并划分零件族，梳理出族类典型工艺路线；新建零件工艺设计时，根据零件族类直接调用典型工艺路线，则形成新零件的工艺路线；建立加工方法库，重点在于针对加工特征梳理出加工方法、加工余量等工艺参数，并构建加工方法与加工特征参数化关联，实现加工方法及参数的调用和推送；最后，工艺资源库是设备、工具、工装等资源，辅助完成工艺规范全要素输出。

机械加工过程工序模型生成

机匣三维工艺设计需要全工序

三维工艺模型表达机械加工过程，所以工艺模型创建是三维工艺设计的核心。由于机匣结构异型，机械加工工艺采用去除余量法生成的模型比较符合实际加工过程。因此，机匣三维工艺模型创建核心是利用特征信息构造特征切削体，各个特征切削体逐步去除毛坯余量而创建工艺模型的过程。构建切削体主要分为车削切削体和非车削切削体。车削切削体是机匣车削回转类特征识别后生成的最大实体轮廓线，根据加工余量值偏移、编辑轮廓线得到车削切削体轮廓线，回转建模构造车削切削体，如图3所示。非车削切削体是机匣铣削和钻削类特征（如型腔、孔、槽口等）根据特征位置、拓扑边界构建相应特征的几何切削体，构建过程如图4所示。

工序尺寸继承与计算

工序模型生成过程中，工序模型能够计算和继承设计尺寸数据，有效提高工艺设计效率。图5是三维尺寸信息的数据结构，在以特征加工为基础的三维机械加工工艺设计过程中，通过特征识别对设计模型中的特征所关联的尺寸数据结构进行解构与调整，并依靠尺寸的参

照面与特征加工的关联面实现转换。所以，尺寸继承与计算关键在于找出尺寸的关联面与参照面信息。在工序模型中依据设计尺寸参照面原点与法向量，创建相同的参照面，然后依据特征加工信息对特征关联面进行调整，由设计模型中加工余

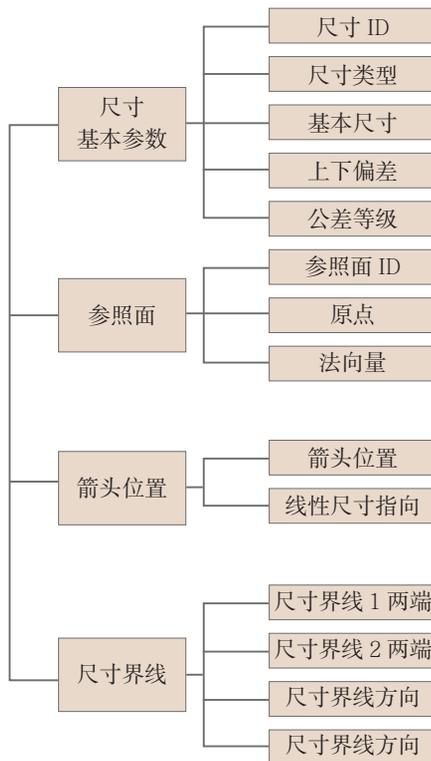


图5 三维尺寸信息的数据结构

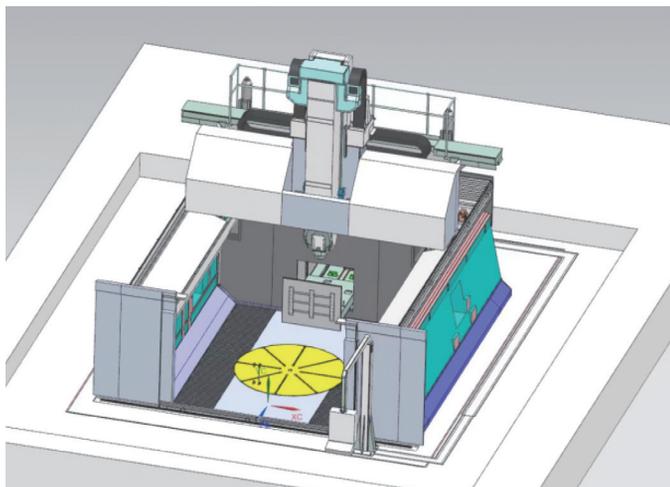


图6 工艺模型驱动编程与仿真 workflow



图7 车间机匣数字化制造实物

量为零的特征关联面转化至工序模型中带有余量的中间加工特征面，并修改尺寸值为实体数据值，修改尺寸参照面为中间加工特征关联面，完成工序模型中的尺寸创建，达到工序尺寸继承与计算的效果。

可视化三维呈现技术

完成全部工艺要素后，模型和工艺的结构化数据通过配置与可视化工艺模板的关联关系，实现数据的映射，最终输出可视化三维工艺文件。可视化三维工艺文件通过制造执行系统（MES）和现场终端实现车间工艺指导。其中，在工艺指导过程中，可以交互式对工艺模型及细节进行移动、旋转、缩放，并可以交互显示加工内容与模型加工面及尺寸信息的关联。

实施应用

选择一种典型环形机匣零件作为应用案例，基于上述工艺设计思路，开展流程驱动和模型定义的数字化三维机械加工工艺设计，其实施过程具体为：机匣设计数据发布在产品全生命周期管理系统后，启动工

艺设计驱动源；工艺任务发送至制造部门，并由工艺专家对零件族进行分类和评估，并派发工艺设计任务和工装协同任务；工艺员将传递来的MBD机匣模型作为工艺输入源开展工艺设计，通过特征识别解析机匣零件加工特征和制造属性；根据零件族类和结构，调用相应的典型工艺，并推送工艺参数和加工方法；根据工艺评估结果微调工艺和加工方法，实现全工序工艺模型创建和计算；工装协同任务完成后录入机匣制造资源库，调用资源库完善机匣全部工艺要素，输出和发布工艺；在工艺模型和制造工具完善的基础上，传送工艺模型和制造工具激活数控编程、加工仿真等工作流，如图6所示；最后，实现车间机匣数字化制造，如图7所示。

结束语

基于流程驱动和模型定义的三维机械加工工艺设计，是提升航空发动机机匣工艺制造效率和质量的有效技术手段。面对型号研制，深入研究及应用基于模型定义的三维工艺

设计，建立流程化驱动的协同制造体系，是机匣工艺制造实现数字化协同制造的重要环节，有利于提升企业高质量制造水平和快速反应能力。

航空动力

（赵驯峰，中国航发成发，工程师，主要从事航空发动机机匣制造及数字化工艺研究）

参考文献

- [1] 马英,孙长友,李丹.大型薄壁低涡机匣变形控制研究[J].科技创新与应用,2015(32):105.
- [2] 吴欣.一体化三维工艺设计在复杂电子装备中的应用[J].电子机械工程,2016,32(01):36-39.
- [3] 陈小军,练学辉,陈杨.三维工艺系统在雷达数字化协同设计中的运用[J].雷达与对抗,2017,37(04):47-50.
- [4] 弘娅晖,杨雅棋.基于流程驱动的航空制造业信息化建设方法研究[J].装备制造技术,2021(10):208-210.
- [5] 王永鹏,徐伟,石晓飞,等.基于数字化环境的航空机壳壳体快速工艺设计方法研究[J].新技术新工艺,2020(11):16-21.