

# 基于规则的涡轮叶片精铸模型 递增转换技术

Incremental Conversion Technology of Investment Casting Model of  
Turbine Blade Based on Rule

西北工业大学 汪文虎 陈卓 陈荣 李兴海



汪文虎

西北工业大学教授,主要从事航空发动机复杂零部件的多坐标数控加工机理、工艺技术和航空发动机涡轮叶片、叶盘类零件的关键精铸工装设计及制造系统开发与应用。“九五”、“十五”、“十一五”期间主持并参加了多项国防预研和重点型号的航空发动机关键零部件的研制,获包括国家级科技进步二等奖、省部级科技进步一等奖在内的多次奖励。编写和出版了《计算机辅助制造》教材专著,在国内著名期刊、会议发表论文 30 多篇。

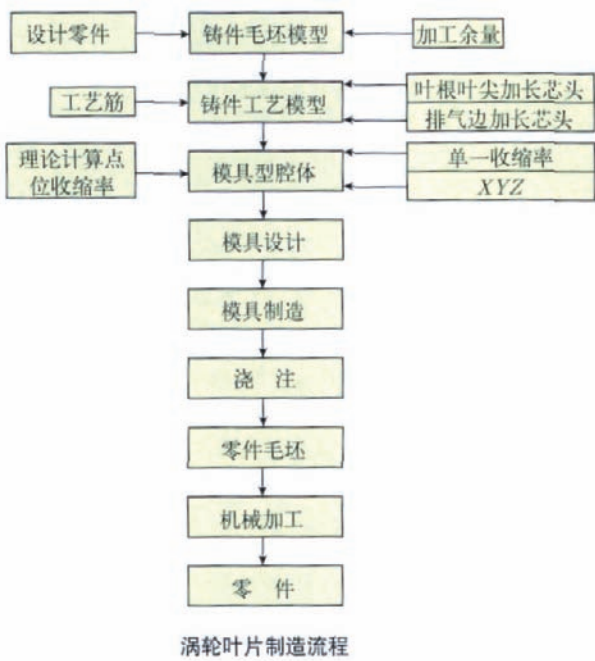
目前主要采用精密铸造成型辅以机械加工的方法来完成涡轮叶片的制造。在涡轮叶片制造过程中精铸模具的设计将是整个生产周期中的关键“瓶颈”。而对于精铸模具的设计,保证其精度的关键就是模具型腔体的获取,即模型的递增转换。

涡轮叶片作为航空发动机的关键部件之一,其设计结构和制造质量是影响发动机整体性能的重要因素<sup>[1]</sup>;而随着对航空发动机性能要求的不断提高,涡轮叶片的形状更趋复杂,质量要求更加苛刻,常用的机械加工根本无法满足加工要求。目前主要采用精密铸造成型辅以机械加工的方法来完成涡轮叶片的制造。在涡轮叶片制造过程中精铸模具的设计将是整个生产周期中的关键“瓶颈”。而对于精铸模具的设计,保证其精度的关键就是模具型腔体的获取,即模型的递增转换。

在传统的精铸模具设计过程中,首先是对叶片零件模型添加加工余量,得到毛坯模型,再考虑浇注过程的工艺元素,得到零件的工艺模型,

在此基础上添加综合收缩放型,即得到模具设计所用的型腔体模型。在这一系列过程中,需要设计人员具有扎实的理论基础和丰富的专业知识,并且在整个的设计过程中,各个部分的设计人员要有良好的沟通,来保证设计的规范性和可延续性。否则容易导致耗时长、设计过程复杂、规范性差,将极大地影响模具的设计速度和质量<sup>[2]</sup>。

本课题提出了基于规则推理<sup>[3]</sup>的方法,首先提取叶片零件的典型特征,根据所制定的规则进行规则推理,借助 UG 软件提供的二次开发功能<sup>[4]</sup>,实现其加工余量与工艺段的自动添加,最终生成叶片铸件毛坯模型、铸件工艺模型、型腔体模型的递增转换。



### 涡轮叶片零件分析

航空发动机涡轮叶片根据功能不同分为涡轮导向叶片(导叶)和涡轮工作叶片(动叶)。导向叶片由上下回转缘板和叶身组成,内部由扰流柱、纵向、横向肋条等组成,以加强换热效果,提高涡轮燃烧室温度。工作叶片与导向叶片区别在于,工作叶片由叶身、回转缘板和榫头组成,内部结构与功能和导向叶片相似,均由扰流柱、纵向、横向肋条、排气边等组成<sup>[5]</sup>。

目前导向叶片主要采用精密铸造辅以机械加工的工艺完成,通过模具获得陶瓷内芯及嵌有陶瓷内芯的蜡型,然后经过制壳、脱蜡、浇注等工序,最终制得叶片铸件毛坯。在这一工艺过程中蜡型及陶瓷型芯模具的设计又是整个工程的关键。

在进行模具设计之前必须对涡轮叶片的内外零件模型添加加工余量、工艺附件、收缩放型后得到模具型腔体模型,依据模具型腔体模型设计制造内外形模具。先经涡轮叶片内形陶芯模具压制陶芯,将烧结强化后的合格陶芯放入外形蜡型模具中,压制合格的带陶芯匹配蜡型,再转入后续精铸工序,其中从零件模型到模

具设计的中间过程为模型递增转换的过程。

(1) 零件模型。

涡轮叶片零件模型反映的是经过制造后获得的实体零件的最终状态,而设计的顺序和制造的顺序是刚好相反的,涡轮叶片精铸模型的设计应该以此为开端进行。

(2) 铸件毛坯模型。

铸件毛坯的形成是根据涡轮叶片零件图和铸造工艺方案来确定的。零件图反映了铸件经过加工后的结构和相关尺寸,表示出了哪些地方需要加工,哪些地方不需要加工。不需要加工的地方,应该就是毛坯的原始形状大小,在毛坯图中,应该基本不变;需要加工的地方,应该进行分析才能确定毛坯上原始的对应形状大小。

(3) 铸件工艺模型。

涡轮叶片铸件工艺模型由于直接用于后续的收缩放型、型腔体及模

具的设计,故而对于其的设计必须考虑后续各步设计中所需的工艺步骤,添加相应的加长芯头及局部工艺元素。

### 叶片模型特征提取

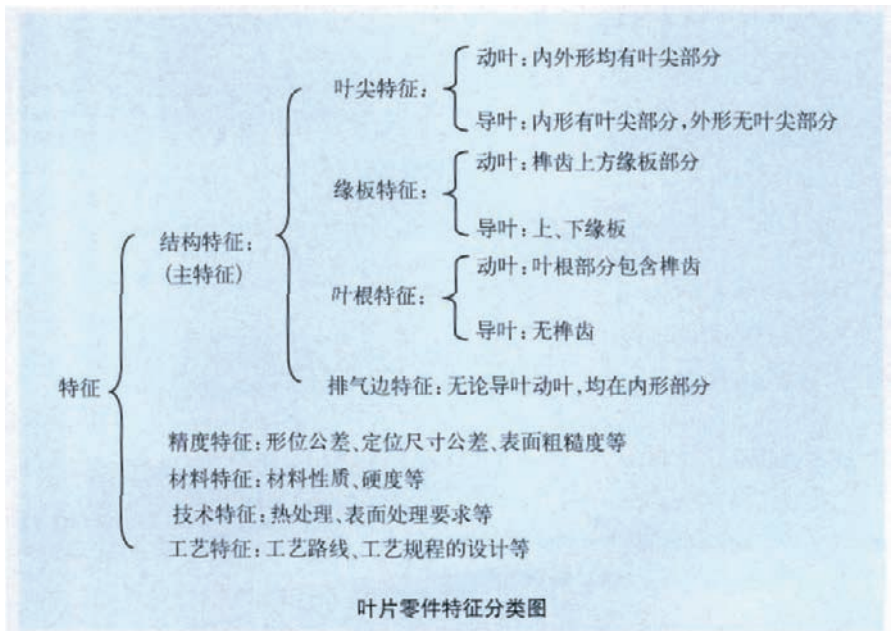
根据规则推理的要求,首先要提取叶片零件的特征信息。由于叶片零件结构复杂,在特征提取时,不仅要考虑到其CAD模型包含的几何与拓扑信息,还要考虑到内外型匹配时的定位,配合之间的相互关系,并且要考虑到后续的余量以及工艺段添加时的位置信息。综合分析后,可以按照叶片功能及其形状特征和工作特征进行划分。

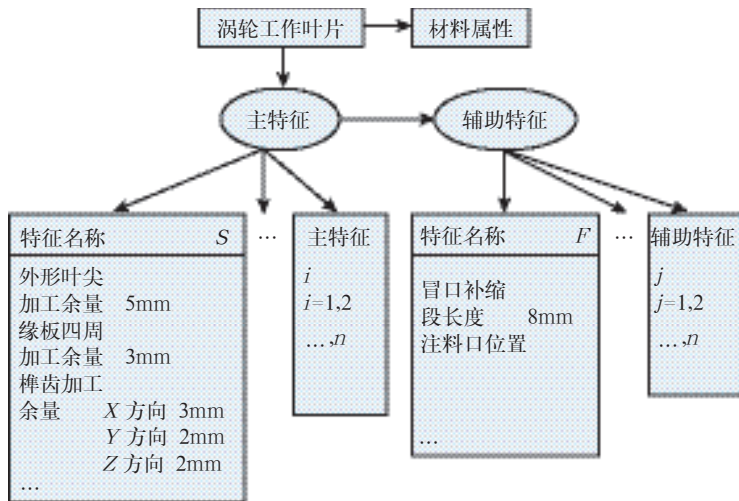
### 基于规则的模型转换

基于规则的叶片精铸模型转换的方法是通过UG/Open API接口,运用UG二次开发完成对叶片CAD模型的特征信息抽取,并以特征对象类的形式表示叶片CAD模型转换规则,最后基于UISTYLER开发的叶片CAD模型转换界面<sup>[6]</sup>,通过人机交互,完成对叶片的模型转换。

#### 1 规则的描述

规则的描述是确定整个模型转换的关键。由于涡轮叶片的结构比较复杂,并且一个叶片对应有内、外





某工作叶片结构特征表达方法

型两套模具,即要考虑到匹配时的位置关系。为此设计人员首先要建立模型转换时的规则,明确转换的步骤和要求。

对叶尖特征的规则:

- (1) 内型叶尖工艺芯头;
- (2) 外形叶尖加工余量;
- (3) 叶尖引晶段;
- ...

对缘板特征的规则:

- (1) 缘板四周加工余量;
- ...

对叶根特征的规则:

- (1) 榫齿部分加工余量;
- (2) 注料口的布置位置;
- (3) 内型叶根部分工艺要求;
- (4) 冒口补缩段;
- ...

对排气边特征的规则:

- (1) 排气边加长芯头;
- (2) 排气边加厚芯头;
- ...

对工艺特征的规则:

- (1) 工艺路线制定;
- (2) 收缩放型;
- ...

## 2 规则推理

推理控制模块发出的指令控制规则类的活动状态和特征类的活动状态、规则的匹配等活动。规则类有静止和活动 2 个状态,缺省状态为

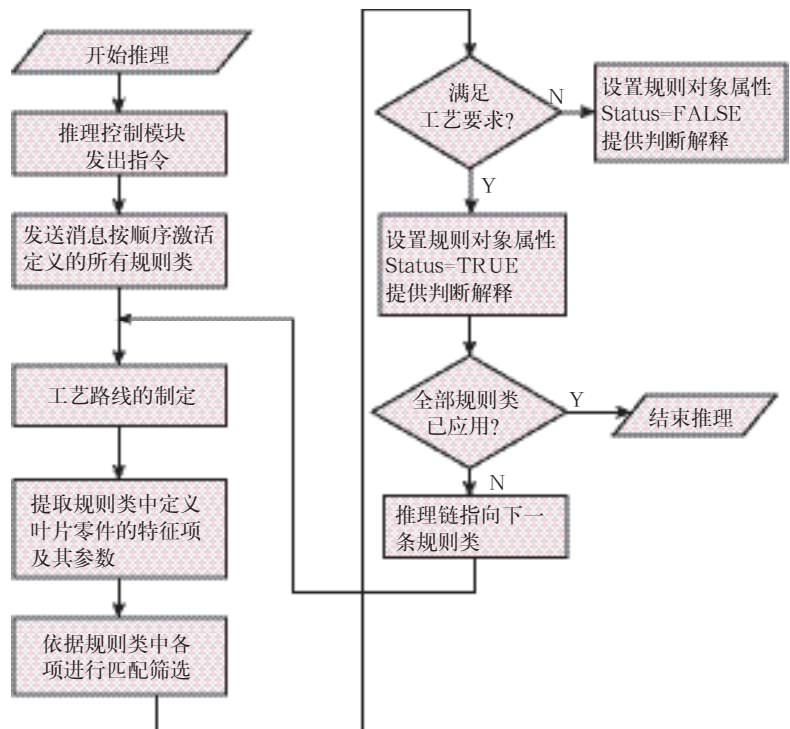
静止。当规则类收到消息后转换为活动状态,活动状态中每个规则类与叶片的特征类传递消息,进行推理分析,然后将规则执行结果反馈给系统用户,并提供相应的判断解释。

在激活所有定义的特征类后,根据工艺特征的规则,叶片模型递增转换的工艺路线制定方案为:首先是以其零件模型为基础建立其铸件毛坯模型,其次是以铸件毛坯模型为基础,建立其工艺模型,最后是以工艺

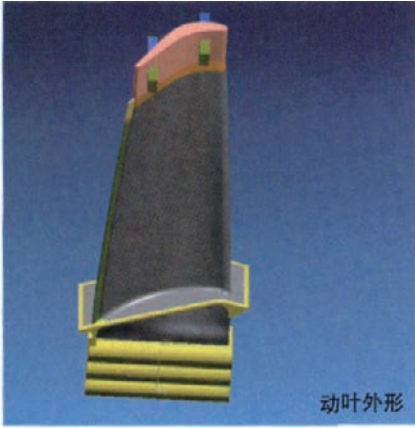
模型为基础,经过收缩放型后得到其型腔体模型。根据上述工艺路线,提取规则类中定义叶片零件的特征项及参数,进行具体的规则推理,即依据规则类中各项进行匹配筛选。

对于涡轮导向叶片,在建立其铸件毛坯模型时,根据缘板特征的规则,对缘板四周要添加机械加工余量,得到导叶的铸件毛坯模型。在建立其工艺模型时,根据叶尖特征规则和排气边特征规则,即要加入工艺芯头来确保其相对位置,同时对排气边缝也要适当加长,并考虑到内外形的匹配,要对其加入叶尖、叶根和排气边工艺芯头,而得到涡轮导向叶片的工艺模型。对得到的工艺模型进行收缩率的计算,同时运用位移场进行反变形预测,得到放缩后的工艺模型,即导向叶片型腔体模型。

对于涡轮工作叶片,其叶尖、缘板四周、榫齿四周由于要相互配合,根据缘板、叶尖、叶根特征规则,对其 3 部分均要加入机械加工余量,得到动叶的毛坯模型。在建立其工艺模型时,根据叶尖的特征规则,首先



推理过程示意图



动叶外形

对外形的叶尖部分加入引晶段,其次为了防止合金浇注过程中内部陶芯漂移引起壁厚超差,要加入4个矩形的定位窗口。根据叶根特征的规则,要对榫齿段进行处理,增加起补缩效能的冒口补缩段。对于叶片内型,根据叶尖、排气边的特征规则,对叶尖部分要附加一定定位窗口依附段,同时由于排气边与叶根部分由多个离散实体组成,不利于陶芯压制、烧结及蜡型匹配,必须通过工艺连接体将其组合为一体,即需加入排气边、叶根

横向芯头。从而得到涡轮工作叶片的工艺模型。对得到的工艺模型进行收缩率的计算,同时运用位移场进行反变形预测,得到放缩后的工艺模型,即工作叶片型腔体模型。

### 3 运行实例

以某涡轮导向叶片为例,首先提取叶片零件的典型特征,用户交互输入零件的材料特征和技术特征等;依据提示,进入叶片铸件毛坯模型设计模块,系统依据提取的零件特征信息以及用户输入的零件特征信息,根据以上所提出的规则机制,进行叶尖、缘板、加工余量以及内型芯头生成,而后系统提示进入铸件工艺模型设计模块,通过添加必要芯头等工艺部件获得工艺模型,最后通过对叶片铸件工艺模型收缩放形进行型腔体模型设计,最终生成合适的模具型腔体。

### 结束语

本课题研究了航空发动机涡轮叶

片精铸模具模型递增转换的过程,提出基于规则推理的方法,以UG软件为平台,利用VC作为开发工具,实现了模型递增转换的程序自动化于规则化,极大得提高此类零件的设计水平和设计速度,减少了零件再设计时大量的重复性工作,缩短了模具的研制周期,从而很有效的控制了生产成本。

### 参考文献

- [1] 汪文虎,张西涛. 航空发动机涡轮叶片精铸模具的现状与发展趋势. 航空制造技术, 2005 (6): 26-29.
- [2] 肖祥芷, 王义林. 模具 CAD/CAM/CAE. 北京: 电子工业出版社. 2004.
- [3] Wu M C, Liu C R. Analysis on machined feature recognition techniques based on B2rep. Computer2Ai2ded Design, 1996, 28 (8): 603-616.
- [4] 郭连水, 宋建平, 戴约真. 基于特征的参数化设计方法. 航空学报, 1994, (10): 1201-120.
- [5] 汪文虎, 王增强, 任军学, 等. 导向器类零件精铸模具 CAD/CAM 系统开发应用. 航空制造技术, 2003(6): 38-40.

(责编 晓霖)



# 芬尔把手点缀精美机械



手柄类



水平调整件



合金拉手



手轮



把手



铰链

唯有更专业



● 压紧把手

才有高品质



● 拉紧把手



● 顶紧把手



**扬州芬尔机械配件有限公司**  
YANGZHOU FAIERR MECHANICAL FITTING CO., LTD.

地址: 江苏省扬州市沙头镇施沙路8号 邮编: 225105  
电话: 0514-87533188 87533288 传真: 0514-87533288 87533088  
http: //www.faierr.com E-mail: sale@faierr.com.cn

广告索引号09-081