

# 基于产品模型的涡轮盘榫槽拉刀快速设计系统

李志辉, 周来水, 卫 炜, 张秋月

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 为有效解决涡轮盘榫槽拉刀设计周期长和效率低的问题, 提出基于产品模型的榫槽拉刀快速设计方法。该方法通过特征识别和参数提取获得涡轮盘榫槽型面的加工特征参数, 建立适应不同齿数的涡轮盘榫槽拉刀通用模板, 通过参数关联将提取出的加工参数信息转化为拉刀设计信息, 并驱动涡轮盘榫槽拉刀模型模板生成相应的榫槽拉刀。上述研究成果缩短了榫槽拉刀的设计周期, 提高了榫槽拉刀的设计效率, 并实现了涡轮盘设计部门、工艺设计部门、榫槽拉刀工艺装备部门之间基于三维产品模型的有效协作。

**关键词:** 涡轮盘; 产品模型; 榫槽拉刀; 参数化设计; 模型驱动

## Rapid Design System of Mortise Broach for Turbine Disk Based on Product Model

LI Zhihui, ZHOU Laishu, WEI Wei, ZHANG Qiuyue

( College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China )

**[ABSTRACT]** A rapid design method of mortise broaches based on product model was proposed to solve the problems of long designing cycle and low efficiency of mortise broaches. In this method, characteristic parameters were obtained by feature recognition and parameter extraction based on product model. 3D parametric model templates were built to apply to mortise broaches with different numbers of teeth. Characteristic parameters were transformed to design information of broaches by parameter association. The model templates were driven to generate the broaching tools. The application of this method can shorten the design cycle of mortise broaches, reduce duplication of effort and improve design efficiency. Besides, the communication based on 3D-product model can enhance the corporate efficiency among product design department, process design department and tooling design department for turbine disk.

**Keywords:** Turbine disk; Product model; Mortise broach; Parametric design; Model-driven

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.070

涡轮作为航空发动机的核心转动部件, 是提高发动机性能的关键部件<sup>[1]</sup>。航空发动机涡轮结构主要包括涡轮盘和叶片, 发动机工作时, 涡轮在高温环境下高速旋转, 涡轮盘除了受到气体压力, 还会受到极大的离心力作用, 这对涡轮盘与叶片之间的连接提出了严格的要求<sup>[2]</sup>。枞树形榫齿连接以其质量轻、材料利用率高、拆装方便等特点广泛运用于涡轮部件中<sup>[3]</sup>, 榫槽连接部位长期承受着高温和高应力的综合作用, 还需要保证叶片有正确的位置和方位, 因此榫槽的制造精度要求极高。拉削是一种高精度、高效率、高复杂程度、可最终成形的机械加工方法, 在航空发动机制造业中, 拉削普遍被用来加工盘类零件的榫槽和叶片的榫头<sup>[4]</sup>。

榫槽拉刀结构复杂, 一整套榫槽拉刀由数把甚至数

十把拉刀组成, 刀与刀之间有着复杂的尺寸关联, 在设计过程中需要考虑众多参数, 计算量大<sup>[5-6]</sup>。传统设计方法是设计人员根据排刀图, 参考设计案例, 依据个人经验进行设计。当榫槽拉削特征(榫槽型面的齿形、齿数等)发生改变时, 设计人员就需要对整套拉刀重新设计, 导致拉刀设计周期长、设计效率低。

文献[7]提出了圆孔拉刀的参数化设计方法, 通过建立拉刀三维实体模型, 选择拉削方式、计算齿升量、拉削余量等参数, 实现了圆孔拉刀的参数化建模、强度校核和工程图纸的绘制。文献[8-9]提出了航空发动机涡轮盘榫槽拉刀快速设计方法, 该方法需要建立参数化的榫槽排刀草图和榫槽拉刀模板, 从草图中提取出拉刀设计参数, 通过参数匹配和模板驱动, 生成相应的榫槽

拉刀。但是由于排刀图的设计信息不完整,设计人员仍需要查询并计算其他参数,并且该系统只适用于齿数和齿形都固定的榫槽拉刀,当涡轮盘齿数或齿形发生改变时,需要重新建立榫槽拉刀模板。

本文提出了基于产品模型的涡轮盘榫槽拉刀快速设计方法,该方法基于涡轮盘三维产品模型,针对“齿根为圆弧、齿顶为平面”的枞树形榫槽结构形式,可直接提取榫槽加工特征参数,完成榫槽拉刀快速设计。首先,基于涡轮盘三维模型,通过特征识别方法识别出模型中的榫槽特征,通过参数提取方法提取出榫槽特征参数;其次,建立榫槽拉刀通用模板,通用性指该模板对不同齿数的榫槽具有普遍适用性;最后,将提取出的榫槽特征参数和拉刀设计参数相匹配,驱动榫槽拉刀模板生成相应的榫槽拉刀。这种方法能够实现涡轮盘设计部门、工艺设计部门和工艺装备部门之间基于三维产品模型的高效协作,无需绘制涡轮盘工程图纸,即可将涡轮盘产品模型中的榫槽型面的参数直接应用于榫槽拉刀的设计当中,使三维模型成为整个过程的信息来源,对缩短生产周期、提高榫槽拉刀设计效率和设计质量都具有重要意义。

## 1 基于产品模型的特征识别与参数提取方法

传统的拉刀设计是基于二维图纸的多部门串行工作,拉刀设计过程如下:(1)设计部门在设计完涡轮盘三维模型后,绘制涡轮盘榫槽加工的二维图纸,并将二维图纸传递给工艺部门;(2)工艺部门根据榫槽型面的二维图纸制定榫槽加工工艺路线,并给出榫槽加工的拉刀排刀图;(3)工艺装备部门根据工艺路线和排刀图,完成拉刀的设计。从产品设计、工艺设计到工艺装备设计的整个设计流程中,不同部门间的协作、信息之间的共享和传递仍是基于二维工程图。本文针对“齿根为圆弧、齿顶为平面”的枞树形榫槽特征,提出基于产品模型的特征识别与参数提取方法,完成榫槽拉刀的快速设计。

### 1.1 涡轮盘榫槽特征识别

特征识别技术是指利用算法自动识别出模型中的加工特征,其中加工特征指设计模型中具有特定加工语义的制造特征信息,这些信息能够作为指导工艺设计和数控编程的依据<sup>[10-11]</sup>,如图1所示,本文提出的涡轮盘榫槽特征识别算法能够针对涡轮盘产品模型,识别出涡轮盘榫槽加工特征,该加工特征包含涡轮盘榫槽的加工参数,从而完成从设计特征到加工特征的映射。

涡轮盘上的枞树形榫槽特征的形式根据齿根和齿顶的结构不同分为5种类型:(1)齿根为圆弧、齿顶为

圆弧的形式;(2)齿根为平面、齿顶为平面的形式;(3)齿根为平面、齿顶为圆弧的形式;(4)齿根为圆弧、齿顶为平面的形式;(5)其他局部结构不同的形式。由于榫槽特征本身的复杂性和特殊性,榫槽拓扑面的组成形式与涡轮盘其他特征有很大区别。

研究发现,无论何种榫槽类型,其拓扑面的数量与齿数的数量有一定的数学规律,以“齿根为圆弧、齿顶为平面”的枞树形榫槽为例(图2),组成该榫槽特征的拓扑面的数量和该榫槽特征的齿数具有以下关系:

$$N=5 \times M+12 \quad (1)$$

式中, $N$ 表示组成该榫槽特征的面数; $M$ 表示榫槽齿数的数量,其中 $M=2,3,\dots,6$ 。

组成榫槽特征的拓扑面的数量远大于涡轮盘内其他拉伸特征,即使当榫槽的齿数为最小时( $M=2$ ),组成榫槽特征的拓扑面的数量 $N=22$ ,多于任何其他拉伸特征。因此,基于榫槽特征拓扑面组成形式的特殊性,通过UG NXOpen API可以识别出该榫槽特征,识别过程如下:(1)导入涡轮盘产品模型,通过遍历模型特征树,获得所有特征并存入特征模板类中;(2)遍历特征模板类中所有特征,获得所有拉伸特征并存入拉伸特征模板类中;(3)遍历拉伸特征模板类,获得组成各个拉伸特征的拓扑面的数量 $N$ ,当 $N \geq 22$ 时,可知该特征为榫槽特征;(4)获得 $N$ 后,通过式(1)可知榫槽的齿数 $M$ 。

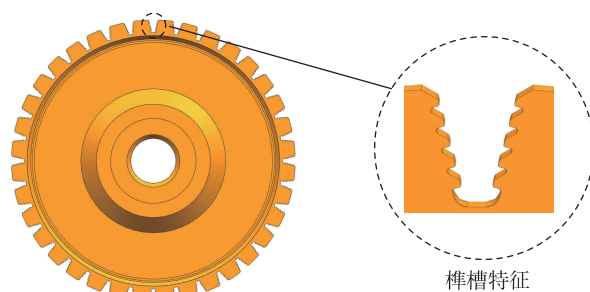


图1 航空发动机涡轮盘中的枞树榫槽特征

Fig.1 Fir-tree mortise feature of aero-engine turbine disk

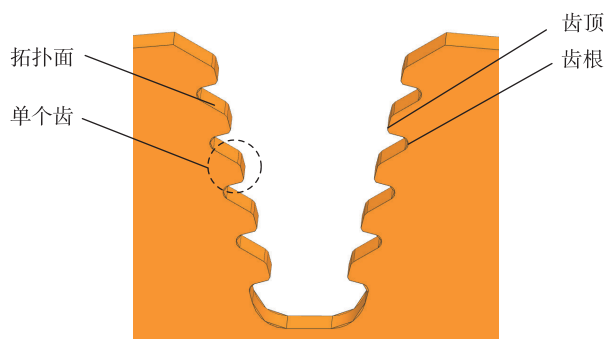


图2 “齿根为圆弧、齿顶为平面”的枞树榫槽特征

Fig.2 Fir-tree mortise feature of circular tooth root and flat tooth top

### 1.2 涡轮盘榫槽参数提取

在整个拉刀快速设计系统中,涡轮盘榫槽的特征参数是贯穿整个系统的必要信息,榫槽特征参数的提取是实现拉刀快速设计的关键技术。

#### 1.2.1 参数的分类

图3是一个齿数为5的枞树形榫槽特征型面草图,草图包含该榫槽型面的所有基本设计信息。这些设计信息反映的形状和尺寸参数是榫槽拉刀的参数化设计所必需的基本信息,因此需要从识别的榫槽特征中提取出这些信息,表1包含了所有需提取的参数的具体含义。

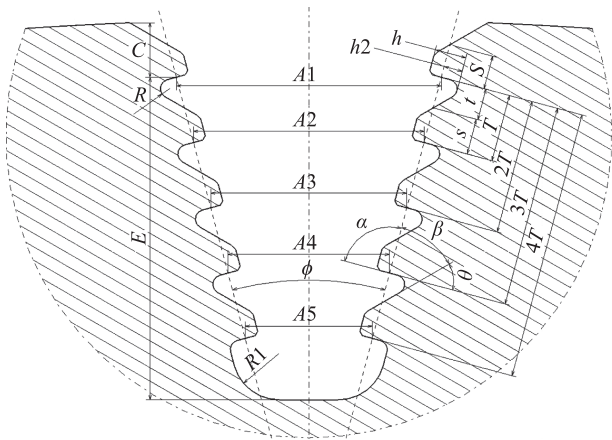


图3 涡轮盘枞树形榫槽特征型面的形状和尺寸信息

Fig.3 Shape and size information of fir-tree mortise feature

表1 涡轮盘枞树形榫槽型面各参数含义

Table 1 Meaning of each parameter of fir-tree mortise feature

参数	参数含义
$\phi$	槽型角
$A_i$	榫槽各齿节距
$C$	榫槽第1齿节点到槽顶距离
$E$	榫槽第1齿节点到槽底距离
$R$	齿底半径
$R_1$	槽底半径
$h$	榫槽齿高
$h_2$	榫槽齿顶高
$S$	榫槽齿厚
$t'$	榫槽槽宽
$S'$	榫槽第1齿齿厚
$T_1$	齿距
$\alpha$	榫槽工作面与中心线夹角
$\beta$	榫槽非工作面与中心线夹角
$\theta$	榫槽齿型的齿形角

由于所需提取的参数数量多、类型不一,本文根据各个参数的几何意义和求取方法对所有尺寸参数进行了分类,这不仅可以提高参数提取的效率和准确性,还可以实现代码重用、减少重复工作。根据获取参数所需的几何元素的数量进行分类,包括几何形状参数、相对位置参数和其他类型参数。(1)几何形状参数:几何形状参数的获取只需要在榫槽特征获取单个几何元素,例如获取齿底的半径时,只需要获得相应圆柱面。(2)相对位置参数:相对位置参数的获取需要获取多个几何元素进行计算,例如获取面与面之间的距离时,需要获得两个面并进行计算。(3)其他类型参数:其他类型参数指不能从几何元素直接获取的参数,需要根据多个参数进行数学计算,或者通过建立辅助拓扑点、面进行参数获取,例如获取榫槽齿节距,需要建立榫槽特征对称面。

#### 1.2.2 参数的获取

为了提取所需的参数,在获得榫槽特征的基础上,分析榫槽结构的特点,根据各拓扑元素之间位置和尺寸的特殊性,使用相应的方法逐个获得尺寸参数。

分析榫槽结构可知,榫槽特征在几何上具有对称、齿形具有一定重复性,因此可以通过中心线一侧和若干个齿形的拓扑信息完成所有参数提取。图4所示是齿数为5的枞树形榫槽特征的结构:(1)榫槽沿中心线对称,中心线任意一侧即可获得榫槽的所有轮廓尺寸;(2)第1齿形包括了榫槽的开口特征,开口特征指榫槽与涡轮盘外缘结合处的特征;(3)第2齿形与其他齿形在几何上完全一致,拥有所有的齿形参数;(4)槽底处的拓扑面包含了榫槽的深度等信息。因此,通过获取组成第1、2齿和榫槽槽底的拓扑面,并对这些面进行分析,即可获得所需所有几何参数。

在UG中,通过UG NXOpen API 提取得到的榫槽特征组成面的排列及其索引号是无序的,为了获得目标拓扑面(组成第1、2齿和榫槽槽底的拓扑面)的索引号,需要分析其与其他拓扑面的关系。本文通过分析各个面之间的关系,提出目标拓扑面的索引号的获取方法。

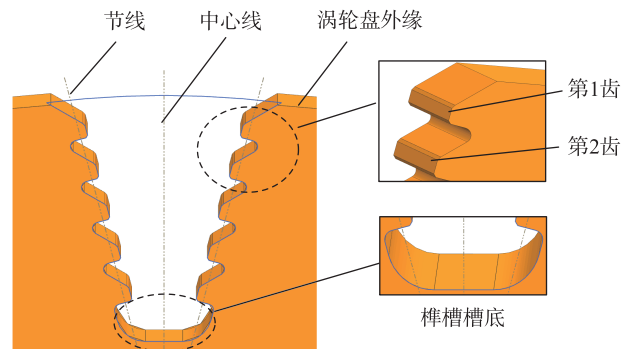


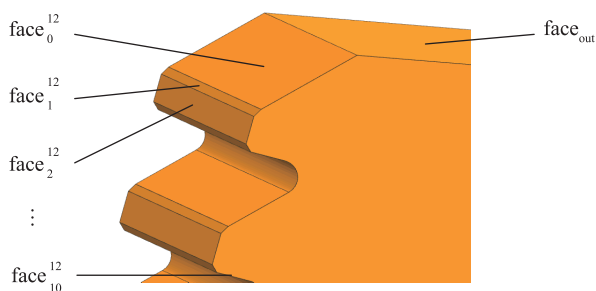
图4 枞树型榫槽特征的结构

Fig.4 Typical structure of fir-tree mortise feature

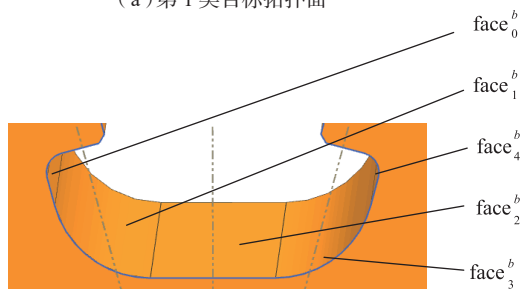
如图5所示,需要识别的目标拓扑面共16个:组成第1、2齿的拓扑面  $face_i^{12}$  ( $i=0,1,\dots,10$ ) 为第1类型拓扑面,组成槽底的拓扑面  $face_i^b$  ( $i=0,1,\dots,4$ ) 为第2类型拓扑面,这些面的数量并不会随齿数的改变而变化。设特征识别算法获得的所有榫槽特征拓扑面集合  $FACE=[face_1, face_2, \dots, face_N]$ ,其中  $N$  为榫槽特征拓扑面的数量。设任意两个拓扑面之间的距离为  $D_j D_k = Distance(face_j, face_k)$ ,该距离指面(有限面)之间的最小距离,当距离为0时,表示两个面相邻,其中  $face_j, face_k \in FACE$ 。

本文通过计算未知拓扑面与已知拓扑面之间的距离,寻找与已知面相邻面的方法,依次获得各个拓扑面,具体实现方法如下:(1)通过特征识别算法获得榫槽特征的所有拓扑面  $face_i$ ,拓扑面总数  $N$ ,榫槽特征节线  $line_n$  和涡轮盘外轮廓面  $face_{out}$ ;(2)通过计算各个拓扑面  $face_i$  与外轮廓面  $face_{out}$  之间的距离  $D_i D_{out}$ ,当  $D_i D_{out}$  取得最大时,  $face_i$  即为所要获取的榫槽底面  $face_i^b$ ,当  $D_i D_{out}$  取得最小时,  $face_i$  即为齿形面中与涡轮盘外缘相邻的面  $face_0^{12}$ ;(3)通过计算各个拓扑面  $face_i$  与槽底面  $face_0^b$  的距离  $D_i D_0^b$ ,当  $D_i D_0^b=0$  时,表示  $face_i$  为与槽底接触的拓扑面  $face_1^b$  和  $face_3^b$ ,其中与  $face_0^{12}$  距离较小的面为  $face_3^b$ ,另一个为  $face_1^b$ ;(4)以此类推,计算未知拓扑面与已知拓扑面之间的距离,寻找与已知拓扑面相邻的拓扑面,依次获得所有目标拓扑面。

获得所有目标拓扑面的索引号之后,根据前文对参数的分类,采用相应的提取方法,并调用相应的UG



(a) 第1类目标拓扑面



(b) 第2类目标拓扑面

图5 需要获得的目标拓扑面

Fig.5 Target topology that needs to be obtained

NXOpen API,即可获取所有特征参数。

## 2 榫槽拉刀参数化设计模型

榫槽拉刀属于形状复杂的非标准件,在实际应用中其拓扑关系变化不大,但是结构尺寸却需要针对具体的榫槽特征进行调整。参数化建模能够有效解决此类问题,参数化建模是指在零件或部件形状的基础上,用一组尺寸参数和约束定义该几何图形的形状,尺寸参数和约束与几何图形有显式的对应关系,当尺寸或约束发生改变时,相应的几何图形也会有相应的变化,从而达到驱动该几何图形的目的<sup>[12-13]</sup>。本文采用基于图形模板的参数化设计方法实现榫槽拉刀的快速设计系统的开发<sup>[14-15]</sup>。

在一般榫槽拉刀快速设计系统中所建立的拉刀模板只适用于一种齿数的榫槽,这导致不同齿数的榫槽,需要重新建立拉刀模板,重复工作量大。因此,本文提出榫槽拉刀通用模板的参数化建模(通用性指针对固定齿形、不同齿数的榫槽拉刀具有广泛适用性),实现榫槽拉刀的快速设计。

### 2.1 拉刀的设计参数

根据某航空发动机涡轮榫槽拉刀设计的工艺,拉削工序顺序依次为榫槽梯形开槽第1段、榫槽梯形开槽第2段、榫槽槽底加工、齿形粗拉削加工、齿形倒角拉削加工、齿顶斜面拉削加工以及齿形成形精加工,工序排刀图如图6所示。在此工序下,一套榫槽拉刀共有7把刀,分别为:榫槽第1段开槽拉刀、榫槽第2段开槽拉刀、榫槽槽底加工拉刀、齿形粗拉刀、齿形倒角拉刀、齿形斜面拉刀模板和齿形成形精拉刀。

榫槽拉刀的设计过程如下:(1)选择拉削方式,确

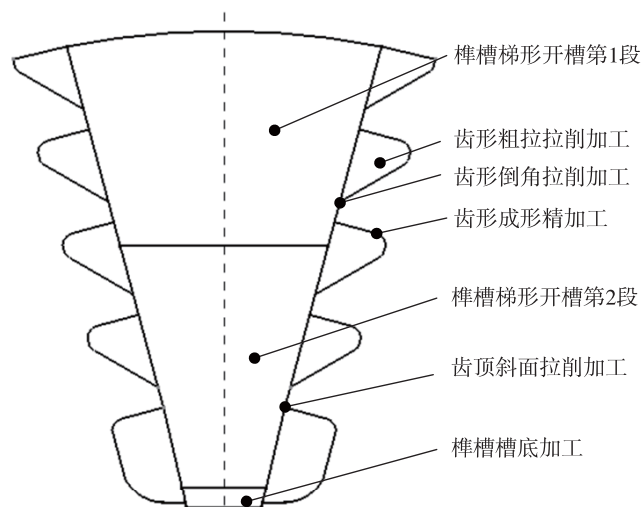


图6 枞树型榫槽的拉削方案

Fig.6 Broaching plan of fir-tree mortise

定拉削工序;(2)确定榫槽拉刀的齿升、前角和后角;(3)确定容屑系数,齿距和齿形。实现拉刀的参数化设计,首先需要得到拉刀设计所需的所有设计参数,包括榫槽特征参数和拉削工艺参数等。

基于拉刀设计过程和通用模板驱动方法,为了将榫槽特征参数和拉刀设计参数进行有效匹配,并实现模板对不同齿数的通用性,本文对拉刀设计参数做出了分类,分为主参数、辅助参数和齿数参数3大类。

主参数包括两类,两类参数的获取方式不同。第1类主参数是与榫槽型面有直接关系的设计参数,需要通过特征识别和参数提取获得;第2类主参数是与榫槽型面没有直接关联的拉刀结构参数或拉削工艺参数,例如容屑系数、拉削齿形参数等,需要通过用户自定义的方式获得。辅助参数是按照拉刀设计规则、由主参数(包括第1类和第2类)转化得到的参数,辅助参数的获取建立在主参数已获取的基础上,虽然不能独立驱动模板,但是具有特定的设计意义,例如拉削部分齿数是由拉削深度和齿升量计算所得。齿数参数是与榫槽齿数有关的拉刀设计参数。为了便于数据的管理和模型驱动,将这些参数单独定义为齿数参数。

## 2.2 涡轮盘榫槽拉刀通用模板的构建

一套榫槽拉刀由多种类型的拉刀组成,因此需要对每种类型的榫槽拉刀建立单独的模型模板。由于拉刀设计参数多,参数之间关系复杂,榫槽齿数的变化会引起拉刀结构上的变化,因此传统的拉刀设计模板只针对固定榫槽齿数拉刀建立模板,如文献[9]中的拉刀模板只能适用于榫槽齿数为5的榫槽拉刀。为了让拉刀设计系统有更好的通用性和实用性,本文深入研究齿数与榫槽结构、齿形参数、拉刀结构的关系,提出了榫槽拉刀通用模板的建立方法。

以某航空企业为例,榫槽加工工艺包括7道工序,分别对应7把不同的榫槽拉刀。分析每一把拉刀随齿数变化而产生的结构上的变化,可知,拉刀根据具体加工对象的不同可分为齿形加工拉刀和梯形槽加工拉刀。当齿数变化时,第1、2、3、6把拉刀均用于梯形槽的加工,其结构不会因为齿数的变化而变化。当齿数变化时,齿形加工拉刀的结构会产生变化,主要体现在第4、5、7把拉刀中,即齿形粗拉刀、齿形倒角拉刀和齿形成形精拉刀。进一步分析,这3把刀中与齿数变化有关的参数如下:(1)榫槽型面的齿数 $M$ ;(2)第1齿节点到槽底的距离 $E$ ;(3)榫槽齿距 $T_1$ 等。

7把拉刀除了具有独立的齿形设计参数之外,还有部分的设计参数是具有关联性的,例如:

(1)拉削余量:在开槽第1段、第2段以及开槽槽底这3把拉刀中,都需要给榫槽两侧以及槽底留些许余

量,这样可以减少刀齿与加工表面之间的摩擦。在进行粗拉榫槽齿型时,必须留精拉余量,精拉余量需要分配到各把拉刀的设计参数中。

(2)拉削深度:前3把刀在进行拉削开槽时,都需要对槽底进行加工,因此榫槽深度参数需要分别分配到这3把刀的设计参数中。

(3)榫槽楔角、齿型角、榫槽齿厚等参数:在进行后4把刀的拉削加工时,这些参数是直接和相应拉刀进行关联的,即必须保证这些参数在拉刀模板中的一致性。

获得了各把拉刀的设计参数,首先需要确定7把拉刀模板间独立的参数以及相互关联的参数,然后建立通用的拉刀模板,并通过UG内部的表达式约束、命名各把拉刀三维模型的各个尺寸参数,实现各拉刀三维模型的完全约束和参数化。

## 2.3 参数的关联和模型驱动

参数的关联和模型驱动是实现本文系统的关键步骤。拉刀设计所需的参数众多,获取方式不一。

第1类主参数通过特征识别和参数提取模块获得,由于从特征识别模块和参数提取模块得到的参数是榫槽加工特征参数,因此需要经过参数的匹配,转化为拉刀拉削部分的设计参数。

第2类主参数包括拉刀其他部分的参数,例如前角、后角等部分的参数,这类参数需要通过用户自定义获得。

辅助参数是根据拉刀设计规则,由主参数计算所得。齿数参数是为了实现模板通用性的特殊参数,其中齿数 $M$ 由特征识别和参数提取模块获得。获取所有设计参数后,通过驱动已建立的榫槽拉刀模板,最后获得所需的涡轮盘榫槽拉刀,参数关联和模型驱动过程如图7所示。

## 3 榫槽拉刀快速设计系统实现

采用模块化设计方法将特征识别、参数提取、模型驱动、数据库应用和计算机图形处理技术融为一体。

系统的运行流程如图8所示。特征识别模块能够针对所打开的涡轮盘产品模型,自动识别出榫槽特征,并将组成该特征的所有拓扑面存入特征模板库。参数提取模块能够在所有榫槽特征拓扑面中获得目标拓扑面,通过对各个目标拓扑面的分析和计算,自动提取出榫槽特征参数,将其存入特征参数库。参数匹配模块通过将榫槽特征参数和用户自定义参数进行一定的转化和提取,最后将所有参数与拉刀设计参数的主参数、辅助参数和齿数参数进行关联匹配,将匹配后得到的所有拉刀设计参数存入拉刀设计参数库。模板驱动模块能够使用拉刀设计参数驱动拉刀模板中的各个模板,完成

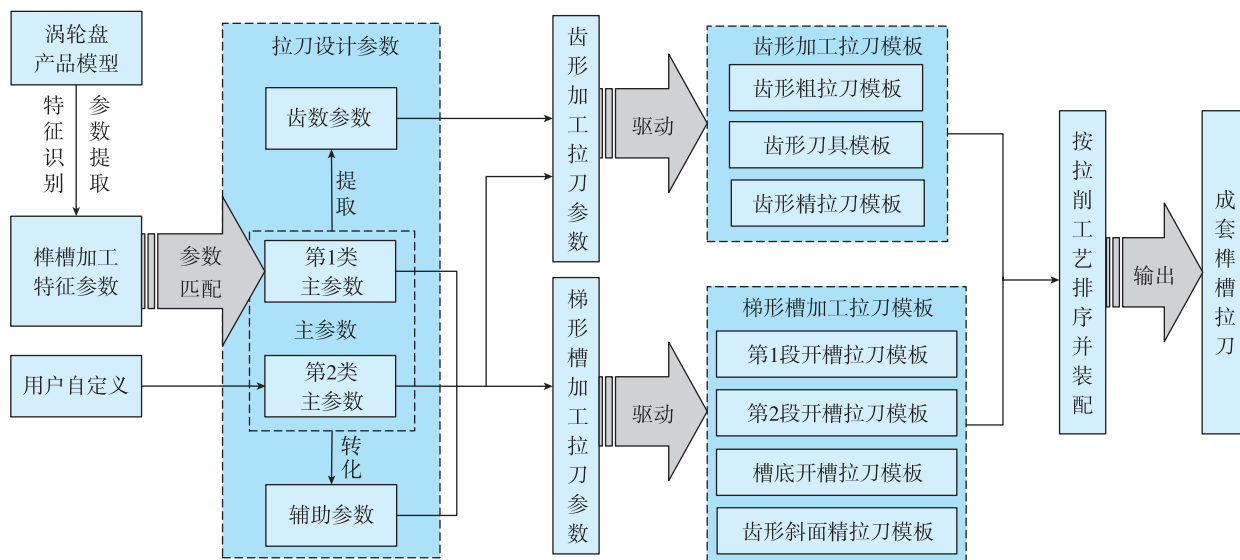


图7 参数匹配和模板驱动过程

Fig.7 Process of parameter matching and template driving

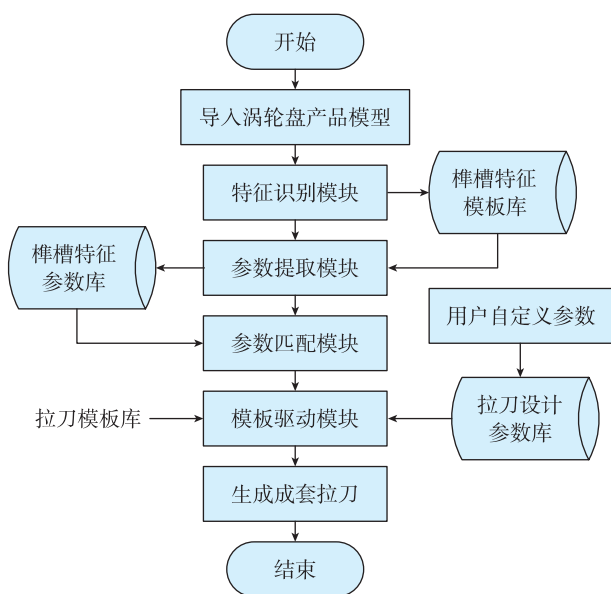


图8 基于产品模型的榫槽拉刀快速设计系统流程

Fig.8 Flow of rapid design system of mortise broaches based on product model

快速设计。

#### 4 实例验证

在拉刀快速设计系统完成之后,为了验证模板对不同齿数的涡轮盘榫槽都具有通用性,本文对榫槽型面齿数  $M=2,3,4,5,6$  的涡轮盘产品模型进行了验证,经过检验,所生成的拉刀均满足工艺和工装上的要求。

由于不同齿数拉刀的快速设计在操作上有一定的重复性,本文选取了型面齿数为3齿的涡轮盘为例,拉

刀快速设计系统运行实例如图9所示。

(1) 用户通过UG平台打开相应的涡轮盘产品模型。根据快速设计向导进入特征识别模块,系统将自动识别到的榫槽型面以红色高亮的形式提示用户,并需要用户进行确认。

(2) 获得榫槽型面特征后,按照快速设计向导进入参数提取模块,系统自动提取榫槽齿数、拉削长度、榫槽节距、榫槽齿高、齿底半径等21个参数。这些参数将存入榫槽特征参数库,以供拉刀设计所用。

(3) 按照对话框提示补充输入每个工步中对应拉刀的用户自定义参数,例如工步3中榫槽槽底加工拉刀的用户自定义参数有拉削深度、拉削余量、齿升量、容屑系数、侧隙角等,输入完用户自定义参数后,点击应用按钮即可驱动模型模板生成相应的拉刀。

(4) 按照快速设计向导,依次完成7个工步中相应拉刀的快速设计,最终生成成套枞树形榫槽拉刀,完成拉刀设计。

#### 5 结论

(1) 提出了一种基于产品模型的航空发动机涡轮盘榫槽特征的特征识别和参数提取算法。该方法能够直接基于涡轮盘产品模型,自动识别榫槽特征,并自动提取出设计榫槽拉刀所需要的参数。同时在UG环境中,用C++语言实现了涡轮盘榫槽的特征识别和参数提取算法。

(2) 提出了榫槽拉刀的参数化建模方法,针对“齿根为圆弧、齿顶为平面”的枞树形榫槽,建立了对不同齿数具有通用性的榫槽拉刀参数化模板。基于参数提取

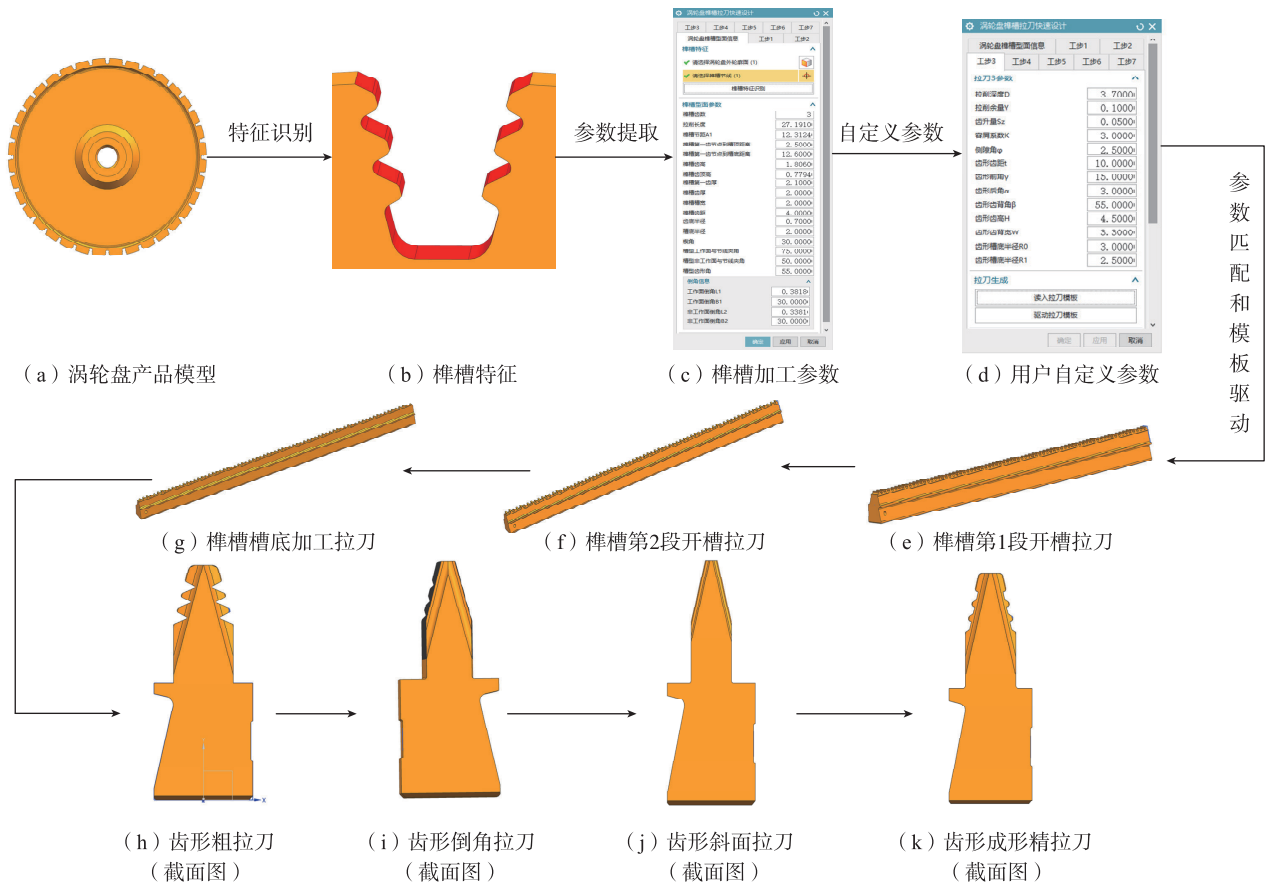


图9 榫槽拉刀快速设计系统运行实例

Fig.9 Example of the rapid design of mortise broaches

所得到的拉刀设计信息,将榫槽特征的信息和拉刀设计所需的信息匹配,驱动拉刀模板,完成快速建模,完成了榫槽拉刀快速设计系统的开发。

(3) 该系统通过基于产品模型的特征识别和参数提取算法使得涡轮盘和其工艺装备的设计环节联系紧密,实现了整个过程的三维信息化,为三维模型取代二维工程图提供了可行性,提高了榫槽拉刀设计的自动化程度和效率,缩短了拉刀设计的周期。

参考文献

[1] 姜雪梅,赵鹏飞.航空发动机关键转动部件加工技术[J].航空制造技术,2014,57(7):42-48.  
 JIANG Xuemei, ZHAO Pengfei. Machining technique of aeroengine critical rotating component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(7): 42-48.  
 [2] 隋景丛,史前凯,于洁,等.涡轮盘榫槽边缘的数控复合光整加工[J].现代制造,2014(42):34-35.  
 SUI Jingcong, SHI Qiankai, YU Jie, et al. Numerical control compound finishing of turbine disk groove edge[J]. Modern Manufacturing, 2014(42): 34-35.  
 [3] 雷驰,温卫东,崔海涛.通用过渡圆弧改进设计与榫齿连接结构多变量优化[J].航空动力学报,2015,30(5):1178-1183.

LEI Chi, WEN Weidong, CUI Haitao. General transition arcs redesign and multivariable optimization of tenonmortise joints[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(5): 1178-1183.  
 [4] 姜雪梅.高速拉削工艺的研究与应用[J].制造技术与机床,2003(3):42-46.  
 JIANG Xuemei. Research in and application of high-speed broaching process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2003(3): 42-46.  
 [5] 徐岩,张川.拉刀设计对航空发动机涡轮盘榫槽面的影响[J].航空制造技术,2010,53(15):50-52.  
 XU Yan, ZHANG Chuan. Influence of broach design on aeroengine turbine disk fir tree groove[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(15): 50-52.  
 [6] 邢誉峰,诸德超.航空发动机涡轮盘榫槽的形状优化设计[J].航空学报,1995,16(4):488-491.  
 XING Yufeng, ZHU Dechao. Shape optimum design of engine's turbodisk tenon-grooves[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(4): 488-491.  
 [7] 柳文阳.圆孔拉刀的参数化设计及有限元分析[D].长沙:湖南大学,2013.  
 LIU Wenyang. The parametric design and finite element analysis of round hole broach[D]. Changsha: Hunan University, 2013.  
 [8] 高翔,周来水,赵西松,等.航空发动机榫槽拉刀快速设计(下转第81页)

## 5 结论

(1) 针对三自由度精密定位系统,提出了基于激光位移传感器的测量和运动学参数标定方法,并对系统进行了标定试验。

(2) 利用封装有应变传感器的压电致动器实现了系统的半闭环控制,并对系统的定位精度、耦合性能进行了测试,试验结果表明 $X$ 方向正弦轨迹误差为5.4%。 $Y$ 方向正弦轨迹误差为8.18%。

### 参考文献

- [1] 罗怡,王东辉,王晓东,等.多零件轴孔精密过盈装配[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):111-116.
- LUO Yi, WANG Donghui, WANG Xiaodong, et al. Multi-peg-hole precision assembly based on interference fit[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 111-116.
- [2] LEE S K, YOO J H, YANG M S. Effect of thermal deformation on machine tool guide motion[J]. Tribology International, 2003, 36(1): 41-47.
- [3] 杨庆国.高速精密气浮定位平台设计方法[D].天津:天津大学,2007.
- YANG Qingguo. Design method of a high-speed and high-precision air-supported positioning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [4] CHEN J S, CHEN K C, LAI Z C, et al. Friction characterization and compensation of a linear-motor rolling-guide stage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(9): 905-915.
- [5] ZHANG C, LIU Q. Design and control of air bearing precision positioning stage driven by linear motors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 34(2): 224-228.
- [6] SHANG J, TIAN Y, LI Z, et al. A novel voice coil motor-driven compliant micropositioning stage based on flexure mechanism[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 957-978.
- [7] XU Q. Design and development of a compact flexure-based XY, precision positioning system with centimeter range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(2): 893-903.
- [8] 李晓辰.微定位系统设计与控制方法研究[D].天津:天津大学,2014.
- LI Xiaochen. The mechanical design and control methodology of a 2-DOF precision positioning platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [9] 赵玮,于靖军,毕树生,等.串并联微操作机器人系统的研究[J].北京航空航天大学学报,2001,27(6):623-627.
- ZHAO Wei, YU Jingjun, BI Shusheng, et al. Experimental system of serial-parallel micromanipulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 27(6): 623-627.
- [10] 田延岭,张大卫,闫兵.三自由度纳米磨削微定位平台的运动学特性[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2006,39(7):777-782.
- TIAN Yanling, ZHANG Dawei, YAN Bing. Kinematic characteristics of a 3-DOF micropositioning table for precision grinding[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2006, 39(7): 777-782.

通讯作者:尚江坤,硕士、助理工程师,研究方向为飞机数字化装配技术、智能控制与精密装配技术,E-mail:jiangkun2020@163.com。

(责编 铃兰)

(上接第76页)

系统研究与开发[J].机械制造与自动化,2017,46(4):36-39.

GAO Xiang, ZHOU Laishui, ZHAO Xisong, et al. Research and development of rapid design system of mortise broaches for aero-engine[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(4): 36-39.

[9] 高翔.航空发动机涡轮盘榫槽拉刀快速设计系统研究与开发[D].南京:南京航空航天大学,2016.

GAO Xiang. Research and development on mortise broaches rapid design system of aero-engine turbine disk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[10] 黄瑞,张树生,白晓亮.可制造性驱动的三维CAD模型相交制造特征识别方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(7):1089-1098.

HUANG Rui, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang. Manufacturability driven interacting machining feature recognition algorithms for 3D CAD models[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2013, 25(7): 1089-1098.

[11] 范海涛,张树生,陶俊,等.工艺语义驱动的铣削类零件加工特征识别技术[J].计算机集成制造系统,2012,18(2):306-313.

FAN Haitao, ZHANG Shusheng, TAO Jun, et al. Feature recognition for milling parts driven by process semantic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 306-313.

[12] 张超.基于SolidWorks平台的轴类零件参数化设计[J].智能制造,2007(11):43-44.

ZHANG Chao. Parametric design of shaft parts based on SolidWorks platform[J]. Digital Manufacturing Industry, 2007(11): 43-44.

[13] 潘万彬,高曙明,陈翔.参数化模型的局部自动适应重用方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(2):314-327.

PAN Wanbin, GAO Shuming, CHEN Xiang. An automatic adaptation reuse method for the subparts of parametric solid models[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2016, 28(2): 314-327.

[14] 张乐林,祝锡晶,叶林征.基于UG二次开发的参数化建模方法[J].计算机系统应用,2016,25(1):146-149.

ZHANG Lelin, ZHU Xijing, YE Linzheng. Method of parametric modeling based on UG secondary development[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(1): 146-149.

[15] 梅小宁,杨树兴.基于UG二次开发的参数化建模方法在优化设计中的应用[J].科技导报,2010,28(3):29-32.

MEI Xiaoning, YANG Shuxing. Applications of parametric modeling method based on secondary development of UG in optimization[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 29-32.

通讯作者:周来水,博士、教授,研究方向为数字化设计制造技术,E-mail:zlsme@nuaa.edu.cn。

(责编 铃兰)