

航空发动机涡轮叶片榫齿参数化建模研究

辛云,赵威,李加森,李亮,赵国龙

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要: 涡轮叶片是航空发动机的重要组成部分,其关键特征榫齿结构复杂,建模种类繁多且耗时长,对零件的整体结构设计及后继加工工艺准备进程均有重要影响。以枞树形和燕尾形榫齿为例,根据燕尾形、枞树形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求,利用UG/Open与Visual Studio进行几何参数化建模;开发基于UG平台的航空发动机涡轮叶片榫齿快速建模模块与批量化建模模块,实现榫齿的快速建模,为后续加工工艺建模提供关键支撑。

关键词: 航空发动机;榫齿;参数化建模;UG/Open

中图分类号: V232.4; TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0106-05

Research on Parametric Modeling of Tenon Teeth in Aeroengine Turbine Blades

XIN Yun, ZHAO Wei, LI Jiasen, LI Liang, ZHAO Guolong

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

Abstract: Turbine blades, an important component of aircraft engine, whose tenon teeth are complex in structure, and modeling are numerous in types and time-consuming, have a significant impact on the overall structural design of parts and the preparation process of machining processes. Fir tree and dovetail tenon taken as examples, and in line with the dimensions and technical requirements of dovetail, fir tree tenon and tenon groove, geometric parameterization modeling was carried out using UG/Open and Visual Studio. A rapid modeling module and batch modeling module for turbine blade tenon teeth of aircraft engines based on UG platform were developed, achieving rapid modeling of tenon teeth and providing key support for subsequent machining process modeling.

Keywords: aircraft engine; tenon tooth; parameterized modeling; UG/Open

0 引言

航空发动机动力核心部件如涡轮盘、叶片类零件的加工,因其技术要求高、工艺过程复杂,已成为衡量航空制造企业内部制造能力和加工水平的重要标志之一^[1-2]。作为航空发动机最核心的部件之一,涡轮叶片对发动机的性能具有关键作用,榫齿是涡轮叶片和涡轮盘的连接结构,榫齿的加工工艺将直接影响航空发动机服役的稳定性和可靠性^[3]。因此,设计简便、建模速度快、模型准确的建模方法一直是本领域研究者的追求目标^[4-5]。

榫齿是涡轮叶片和涡轮盘的连接结构,榫齿的加工工艺将直接影响航空发动机稳定性和可靠性^[6]。榫齿与榫槽具有复杂的齿面和严格的啮合条件,其结构参数复杂、种类繁多、加工精度高、工艺过程复杂,很大程度上体现了航空制造加工水

平。榫齿连接作为目前最可靠的航空发动机叶片连接形式之一,其结构较为复杂,参数与类型也多种多样。压气机榫齿的结构通常采用燕尾形,而涡轮叶片榫齿由于需要承受高温高压通常采用枞树形,以确保各齿间载荷均匀,因此对榫齿的加工质量非常严格^[7]。同时榫齿常用的材料钛合金密度小、强度高、加工变形大,使叶片的加工材料成为典型的难加工材料^[8-9]。由于榫齿特征几何形状不一,材料去除率大,因此高速铣削高效、高加工质量的特点适用于叶片榫齿特征的加工,以保证加工效率及表面质量。

榫齿与榫槽具有复杂的齿面和严格的啮合条件,其三维建模设计难度大、结构参数复杂、种类繁多,这不仅给设计工作带来了严峻挑战,同时亦增加了工艺编程的难度。因此,设计适用的榫齿结构,建立简便、建模速度快、模型准确的建模方法一直是本领域研究者们追求的目标^[10-11]。

基金项目: 工信部两机专项项目(J2022-VII-000x-00xx);南京航空航天大学科研与实践创新计划项目(xcxjh20230511)

第一作者简介: 辛云(2000—),男,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为先进制造技术,xinyun@nuaa.edu.cn。

为了理清榫齿结构参数关系,国内外学者对榫齿结构的基本参数开展了一些研究。禹燕飞等^[12]通过采用代理模型优化和组合优化方法对涡轮叶片的燕尾榫齿结构进行优化设计,提升了优化效率。康剑雄等^[13]建立了榫头基础结构库,分析了榫齿特征各结构参数对榫头承载能力的影响。研究表明,30°楔角的榫头相比40°楔角的榫头具有更高的承载力;随着榫宽或齿距的增大,其有效承载力先升后降,而单位面积的承载力呈现下降趋势。余嘉伟等^[14]对枞树形榫齿的结构参数进行了分析,通过优化设计降低了榫齿产生的应力。KHAMIDULLIN等^[15]结合数值计算,提出了裂纹情况下涡轮盘及其结构在工作载荷条件下应力和应变场的控制参数,验证了模型的准确性,得到动力工程涡轮盘中铆钉型盘及叶片附件结构完整性的评估结果。BOTTO等^[16]通过收集模拟叶片在燕尾榫接头下的动态响应数据,结合有限元分析优化了燕尾榫的连接结构。

由上可见,榫齿结构涉及的参数众多,其关系也较为复杂,而参数化建模是梳理结构关系,简化设计,降低工作量的有效方法,国内外对此已有大量研究。谢崑^[17]对叶片锻件进行了二次开发,通过参数化设计各特征截面及其间距,构建了叶片锻件的参数化模型。韩兴国等^[18]对燃气轮机叶片进行参数化建模中,根据叶片叶身型面数据点建立了B样条,在用户界面中选取曲线组即可生成叶身型面模型,B样条拟合情况良好,提高了燃气轮机的建模精度。费冬青^[19]基于NX平台二次开发技术完成了平面包络环面蜗杆参数化建模,简化了复杂曲面的建模流程。马飞^[20]采用特征参数化建模技术,分别对叶身外形、叶身内形、叶身内部开发了涡轮冷却叶片参数化设计模块程序,模型包含了叶身的主要部分,程序体系较为完善,缩短了设计周期。KOINI等^[21]开发了涡轮机械类叶片的设计工具“tools for turbo machinery”,由参数生成榫齿截面后,根据叶身、缘板等表面位置生成曲面,简化了设计阶段的工作量。ZHANG等^[22]对中空风扇叶片提出了包括壁厚、对称轴等8个结构参数,并对其进行了模型参数化,得到了优化后的参数化模型。

综上所述,针对叶片等复杂结构零件的参数化建模需要的参数多,建模过程较为繁琐,且针对典型特征如榫齿等结构的建模研究仍相对较少,尚未形成行之有效的参数化建模方法。本文针对航空发动机涡轮叶片的典型特征榫齿,选取了燕

尾形与枞树形榫齿结构,对其参数化建模展开研究,通过分析榫齿的结构特征进而确定榫齿的建模方法,并利用UG/Open等开发工具,建立涡轮榫齿叶片参数化建模模块与批量化建模模块,以减轻设计阶段的工作量,提高建模效率。

1 涡轮叶片榫齿结构的参数化表达

航空发动机涡轮叶片榫齿主要有燕尾形和枞树形,主要分类如图1所示。

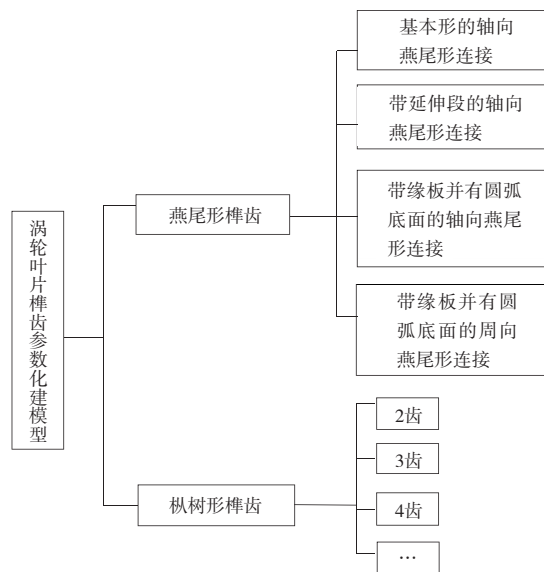


图1 航空发动机涡轮叶片榫齿主要类型

1.1 燕尾形榫齿结构的参数化表达

涡轮叶片与涡轮盘的燕尾形连接结构分为4种类型:1)基本形的轴向燕尾形连接,顶角 α 为40°或60°;2)带延伸段的轴向燕尾形连接,顶角 α 为60°或90°;3)带缘板并有圆弧底面的轴向燕尾形连接,顶角 α 为70°;4)带缘板并有圆弧底面的周向燕尾形连接,顶角 α 为90°。以带缘板并有圆弧底面的轴向燕尾形连接为例,尺寸标注如图2所示。

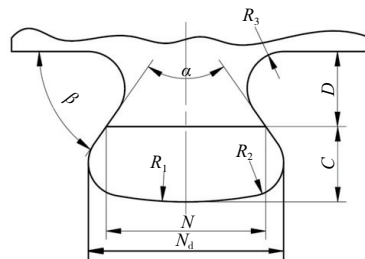


图2 带缘板并有圆弧底面的轴向燕尾形连接榫头截面尺寸参数化标注

根据燕尾形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求^[23],针对常用的尺寸系列,均已给出各参数的取值,因此只需参照取值建模即可,燕尾形连接榫

头参数如表 1 所示。

表 1 燕尾形连接榫头参数表

参数	名称/单位
α	楔角/(°)
β	底角/(°)
C	底面高/mm
D	顶面高/mm
N	顶面宽/mm
N_d	底面宽/mm
R_1	底面半径/mm
R_2	底面圆角半径/mm
R_3	顶面圆角半径/mm

1.2 枞树形榫齿结构的参数化表达

榫齿用于连接叶片与轮盘,其尺寸精度、与榫槽间的定位精度要求较高,尤其是枞树形榫齿,齿与槽之间为面接触,建模的准确性决定了后期加工的准确性。以 3 齿枞树形榫齿为例,枞树形连接榫头尺寸标注如图 3 所示,参数如表 2 所示。

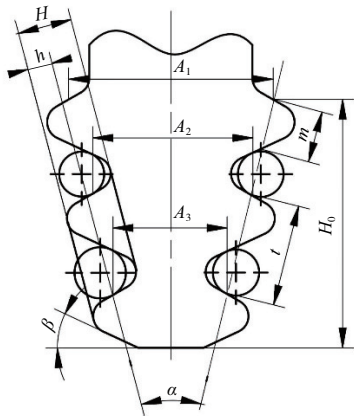


图 3 3 齿枞树形连接榫头截面尺寸参数化标注

表 2 枞树形连接榫头参数表

参数	名称/单位
α	楔角/(°)
A_j	第 j 对齿节距/mm
t	齿距/mm
H	齿高/mm
h	齿顶高/mm
m	齿厚/mm
β	压力角/(°)
γ	齿形角/(°)

枞树形榫头各参数的选取均可参考枞树形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求^[24]。假设涡轮盘榫

槽第二对齿齿顶之间的距离为 T , 榫头、榫槽非工作面在水平面方向上的距离为 C 。

榫槽节距 A_j 的尺寸:

$$A_{j1} = T - 2 \left[\frac{r}{\sin(\gamma/2)} \cos(\gamma/2 - \beta - \alpha/2) - r \right] + \frac{t \cos(\gamma - \beta)}{\sin \gamma} \cos(\beta + \alpha/2) + 8 \sin(\alpha/2) \quad (1)$$

$$A_{j2} = A_{j1} - 2t \sin(\alpha/2) \quad (2)$$

榫头节距 A_{j3} 的尺寸:

$$A_{j3} = A_j - 2C \quad (3)$$

式中 $2C = 0.05t$ 。

2 参数化建模模块设计

本部分将阐述开发参数化建模模块中使用到的工具及菜单栏与主界面的设计。

2.1 UG 二次开发工具

UG 为企业和用户提供的二次开发工具有: UG/Open MenuScript、UG/Open UIStyler 和 UG/Open API。UG/Open MenuScript 为菜单栏工具,有下拉式、模块式等多种形式的菜单。UG/Open UIStyler 为用户交互界面,组件丰富,可定制参数输入界面。UG/Open API 为编译器,通过链接和编译程序生成的 DLL 文件可在对话框或菜单中调用,从而实现榫齿参数化建模。

2.2 UG 二次开发菜单栏

通过榫齿参数化建模模块菜单,用户可选择参数化建模模块与批量化建模模块,涡轮叶片榫齿参数化建模模块菜单栏如图 4 所示。

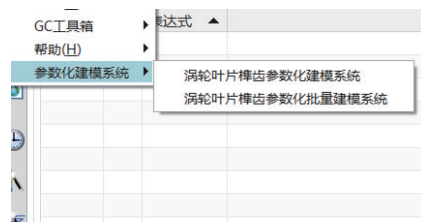


图 4 涡轮叶片榫齿参数化建模模块菜单

2.3 叶片参数化建模模块设计

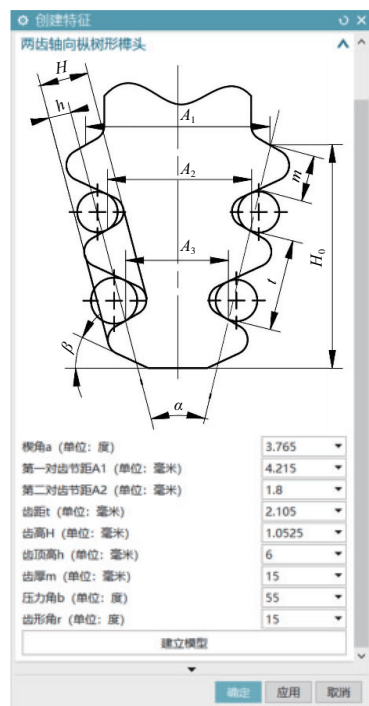
具有便捷的交互界面的参数化建模是实现榫齿快速建模的重要保证。针对燕尾形榫齿,只需选择尺寸系列即可完成建模;针对枞树形榫齿通过输入参数实现对榫齿参数化建模。为进一步提高建模效率,在此基础上,建立了批量化建模系统,通过导入模型数据即可对榫齿进行批量化建模。

3 参数化建模模块的实现

榫齿与缘板结构关联密切,如榫头长需与缘板安装边间距相等、位置相关等,在建模时需对草图进行尺寸约束。此外,参数化建模模块开发还需进行获取表达式、拉伸、缓存清除等工作。以枞树形 2 齿榫齿为例,模块二次开发的主要代码如下:

```
NXOpen::BasePart * basePart1; //加载文件
workPart->PmiManager()->RestoreUnpastedObjects();
NXOpen::Part * part1 ( dynamic_cast<NXOpen::Part * >
(theSession->Parts()->FindObject("_model1"))); //设置文件名
NXOpen::Features::SketchFeature * sketchFeature2( dynamic_cast<NXOpen::Features::SketchFeature * >(nXObject1)); //获取草图特征
std::vector<NXOpen::Expression * > expressions1; //获取表达式
expressions1 = sketchFeature2->GetExpressions();
NXOpen::Features::Extrude * extrude2( dynamic_cast<NXOpen::Features::Extrude * >(objects1[0])); //拉伸
copyPasteBuilder1->Destroy(); //清除缓存
```

在快速建模系统中,调用榫头参数化建模对话框,对相应参数赋值后,点击“建立模型”,即可生成对应的枞树形榫头实体模型,如图 5(a) 所示;在批量化建模系统中,将模型信息输入至 txt 文件,如表 3 所示。在参数化建模系统中导入相应的文件,导入成功后即显示相应的信息界面,如图 5(b) 所示。



(a) 参数化建模模块



(b) 批量化建模模块

图 5 参数化建模界面

表 3 2 齿枞树形连接榫头参数

参数名称	模型 1	模型 2
楔角/(°)	30	30
节距/mm	6.3	5.2
齿距/mm	1.8	1.6
齿高/mm	2.4	3.2
齿顶高/mm	1.2	1.6
齿厚/mm	4	5
压力角/(°)	15	15
齿形角/(°)	60	60
数量/件	1	1

在参数化建模系统中,包括输入参数在内的单个模型参数化建模时间平均约 30 s,而在不使用参数化建模模块的情况下建模时间通常在 15~20 min 左右,远低于非参数化建模时间;在批量化建模系统中同样的时间即可生成 2 个实体模型,且模型数量越多,建模效率越高。

4 结语

本文针对涡轮叶片榫齿提出了涡轮冷却叶片榫齿特征参数表达,建立了参数化建模与批量化建模模块并实现了榫齿的快速建模。基于燕尾

形、枞树形榫头尺寸标注与技术要求,参数化建模与批量化建模模块相互独立,可根据需求选择相对应的建模模块。主要结论如下:

1) 对目前企业采用较为普遍的燕尾形、枞树形涡轮叶片榫齿进行了结构的分析、特征参数的提取与参数化表达;

2) 基于 UG NX 平台,使用了 UG/Open 函数数据库,设计了菜单栏与参数化建模界面,设计人员在选择相应的模块之后,输入特征参数或导入模型数据即可生成特征结构几何模型;

3) 完成了基本形的轴向燕尾形连接、带延伸段的轴向燕尾形连接、带缘板并有圆弧底面的轴向燕尾形连接、带缘板并有圆弧底面的周向燕尾形连接及多齿枞树形连接的参数化设计模块程序,参数化建模时间由手工建模的 15~20 min 缩短为 30 s 左右,批量化建模对于大量模型的建立时间更短,极大地节约了建模时间。

参考文献:

- [1] XU W C, LU H Y, ZHAO L, et al. Research on intelligent design of geometric factor encoding for aircraft engine turbine structures [J]. Aerospace, 2024, 11(3):186.
- [2] KRAEV V M, SILUYANOVA M V, TIKHONOV A I. Assessment and improvement of rationality methods of modern aircraft engines design and technological solution[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1353(1):012033.
- [3] 彭友梅. 苏联·俄罗斯·乌克兰航空发动机的发展[M]. 北京:航空工业出版社,2015.
- [4] HUANG Y, XIAO G, ZOU L. Current situation and development trend of robot precise belt grinding for aero-engine blade [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3):48-67.
- [5] HE W T, LI Z W, GUO Y Y, et al. A robust and accurate automated registration method for turbine blade precision metrology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9):3711-3721.
- [6] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21):50-56.
- [7] 朱志成. 单晶涡轮叶片榫齿高效高表面完整性工艺研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
- [8] WANG M Y, CHEN X Z, DAI F Z, et al. Simulation of residual stress and micro-plastic deformation induced by laser shock imprinting on TC4 titanium alloy aero-engine blade [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26:9419-9436.
- [9] YANG J, LIU D X, FAN K F, et al. Designing a gradient structure in a Ni-based superalloy to improve fretting

fatigue resistance at elevated temperatures through an ultrasonic surface rolling process [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 168:107397.

- [10] WANG H, ZHU D, LIU J. Improving the accuracy of the blade leading/trailing edges by electrochemical machining with tangential feeding [J]. CIRP Annals, 2019, 68(1):165-168.
- [11] RYAZANOV A I. Automated 3D modeling of working turbine blades [J]. Russian Engineering Research, 2016, 36(9):751-754.
- [12] 禹燕飞, 张伟. 基于 Isight 和 Abaqus 缩短涡轮叶片燕尾榫结构优化设计周期 [J]. 风机技术, 2024, 66(1):48-54.
- [13] 康剑雄, 陈剑, 陈竞伟, 等. 涡轮叶片枞树形榫头承载特性研究 [C]//2019 年(第四届)中国航空科学技术大会论文集. 沈阳:中国航空协会, 2019:317-324.
- [14] 余嘉伟, 甘阳, 杨旭峰, 等. 枞树形榫结构参数对应力的影响 [J]. 失效分析与预防, 2024, 19(3):158-165.
- [15] KHAMIDULLIN R, SHLYANNIKOV V, KOSOV D, et al. Comprehensive study of the structural integrity of a damaged turbine disk using FEM, DIC and phase field methods [J]. International Journal of Fatigue, 2025, 192:108720.
- [16] BOTTO D, GLORIOSO M, OCCHIPINTI S, et al. Uncertainty in identifying contact stiffness in a dovetail attachment for turbine blades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 197:110379.
- [17] 谢巍. 基于 UG NX 的叶片锻模参数化设计及锻造工艺分析 [D]. 南昌:南昌航空大学, 2013.
- [18] 韩兴国, 殷国富, 刘树文. 燃气轮机叶片参数化建模方法研究 [J]. 轻工科技, 2019, 35(6):35-37.
- [19] 费冬青. 基于 NX 二次开发的平面包络环面蜗杆参数化建模 [J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1):131-133.
- [20] 马飞. 涡轮冷却叶片典型特征参数化建模及对强度影响规律研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2014.
- [21] KOINI G N, SARAOKINOS S S, NIKOLOS I K. A software tool for parametric design of turbomachinery blades [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(1):41-51.
- [22] ZHANG X J, CHEN W Y, HU D Y, et al. An efficient approach for parametric modeling and prediction of the hollow blade manufacture shape [J]. Aerospace, 2023, 10(2):145.
- [23] HB 5964—2002 燕尾形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求 [S].
- [24] HB 5965—2002 枞树形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求 [S].

收稿日期:2023-10-25