复合弯扭涡轮叶片尾缝的快速建模

张宝源 席 平 杨 炯

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 尾缝是涡轮叶片中的重要冷却结构. 为解决复合弯扭叶片尾缝的精确建模问题并提高其建模效率,提出了包含尾缝工具体创建和尾缝窗口创建过程的创成式尾缝快速建模方法. 首先通过叶身内外型截面线自动匹配算法、叶盆叶背曲线方位判断算法,创建具有和叶身相同或相近弯扭状况的尾缝工具体. 之后借助自定义的数据结构记录各组尾缝窗口信息,创建多组不同规格的尾缝窗口,完成尾缝建模. 最后使用 UG Open API 工具开发了尾缝快速建模程序,并通过实例验证了所提出方法的可行性.

关 键 词: 计算机辅助设计; 尾缝; 复合弯扭涡轮叶片; UG Open API

中图分类号: TP 391.7; V 232.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0048-06

Rapid modeling of trailing edge slots in bowed-twisted turbine blade

Zhang Baoyuan Xi Ping Yang Jiong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Trailing edge slots are important cooling structures in turbine blade. In order to realize the precise modeling of these structures in bowed-twisted turbine blade and improve the modeling efficiency, a rapid generative modeling method was proposed, including the tool body creation step and the slot windows creation step. Firstly, the tool body with the same or similar bowed-twisted condition as the blade was created via the matching algorithm of inside and outside blade profiles and the direction determining algorithm of pressure and suction sides. Then the groups of slot windows with different sizes were created by employing specific data structure to store the window groups information. Finally, a rapid trailing edge slots modeling program was developed based on UG Open API, and the modeling result validates the feasibility of the method.

Key words: computer aided design; trailing edge slots; bowed-twisted turbine blade; UG Open API

1 问题提出

随着涡轮进口燃气温度的不断提高,为了保证发动机可靠工作,现代涡轮叶片多采用对流、冲击及气膜复合冷却方式[1]. 相应的冷却结构包括气膜孔、尾缝、冲击孔、扰流肋、扰流柱等,如图 1 所示. 尾缝是其中的重要组成部分. 冷却气流从尾缝流出,对后腔内壁和尾缘进行强化对流换热,还可以吹除叶片后的尾迹涡流及附面层,使涡轮性能得到改善.

为进一步提高涡轮效率,我国王仲奇院士和前苏联费里鲍夫教授在 20 世纪 60 年代提出了复合弯扭叶片的概念[2],如图 2 所示. 其机理主要是通过叶片弯扭改善叶栅流道内的压力分布,进而改善叶栅根部和顶部流动状况,以减少径向、横向二次流强度,降低端部损失,最终实现涡轮总损失的降低和效率的提高[3]. 然而先进的气动外形,也给叶片上尾缝的精确建模带来了如下困难:①每个尾缝需适应该处叶身的弯扭状况,为自由曲面特征;②所有尾缝沿曲线排列;③尾缝成组分布,不同组之间的高度和间距不同.

以上特点使得复合弯扭叶片设计中,手动创

收稿日期: 2013-03-13; **网络出版时间**: 2013-06-03 16:47

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130603.1647.001.html

作者简介: 张宝源(1984 -),男,河北石家庄人,博士生,drunkenfist@163.com.

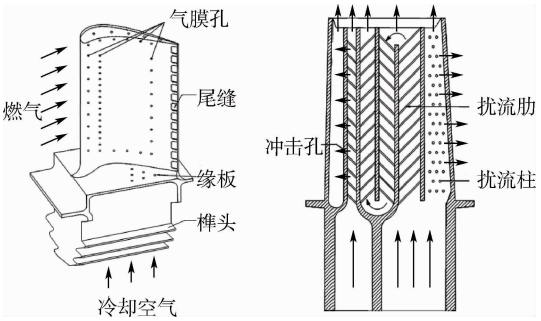


图 1　涡轮叶片主要冷却结构

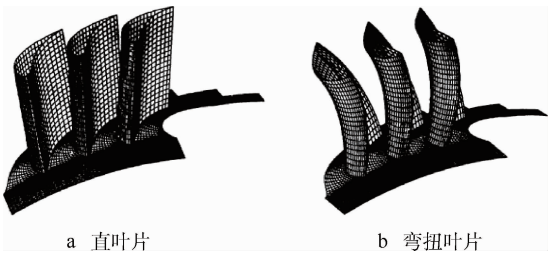


图 2　直叶片与弯扭叶片

建尾缝特征人机交互繁杂,效率低下,同时也不利于实现叶片的自动迭代优化过程. 为提高建模效率,许多研究者对涡轮叶片及其冷却结构的快速建模技术进行了探讨:

1) 宋玉旺等[4]利用特征造型和参数化建模技术开发了涡轮叶片的快速建模系统;朱谦等[5]提出了基于引导线和最小能量优化的涡轮气冷叶片伸根建模方法,实现了伸根这一复杂曲面过渡特征的快速建模. 但以上研究主要针对直叶片,无法直接用来解决弯扭叶片中尾缝的建模问题.

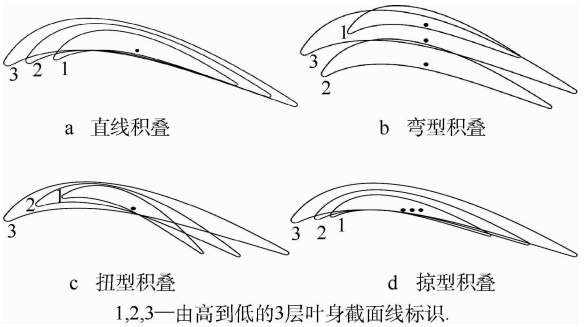
2) Koini 等[6]使用一条 NURBS 曲线表示整个叶身截面,并可按照任意形式的积叠规律构建叶片三维模型,可适用于弯扭叶片建模;Pérez-Arribas 等[7]分别使用 rake distance, twist angle 和 skew angle 参数表征各叶身截面的弯扭掠程度,进而构建风机叶片模型;田庆等[8]根据弯扭叶片特点,提出了一种叶身截面线光滑拼接方法和叶身曲面放样方法. 但以上研究主要针对叶身造型,对尾缝等冷却结构未做讨论.

3) Martin[9]建立了包含参数化建模、流-热耦合分析及优化设计的涡轮叶片设计系统,虞跨海等[10-11]使用数学解析多项式与特征造型技术相结合的方法实现叶片及冷却结构建模,进而对涡轮冷却叶片进行了多学科优化设计. 但以上研究着重于分析、优化环节,对尾缝的建模未作详细描述.

因此,本文对复合弯扭叶片中尾缝的快速建模技术进行了研究. 首先对尾缝的几何特点进行分析,提出了建模的总体方案. 之后分别讨论了尾缝工具体及尾缝窗口的快速建模方法. 最后在 Siemens UG 平台上开发了涡轮冷却叶片尾缝建模程序,验证了本文所提出方法的有效性.

2　复合弯扭涡轮叶片尾缝特征分析

涡轮叶片叶身一般由多条二维叶身截面线积叠而成,使用以各叶身截面线为等参数线的 NURBS 曲面表示[12]. 叶身的弯扭状况由截面线的积叠方式决定,如图 3 所示. 复合弯扭叶片是其中弯、扭、掠型积叠方式的组合.



1,2,3—由高到低的3层叶身截面线标识.

图 3　叶身截面线积叠方式

尾缝位于涡轮叶片尾缘,由一系列贯通叶身内外的窗口组成. 按照窗口所开位置不同,可分为半劈尾缝和全劈尾缝,前者窗口开在尾缘叶盆一侧,后者则直接开在尾缘上,如图 4 所示. 本文仅针对半劈尾缝进行讨论,全劈尾缝的快速建模方法可类似得出.

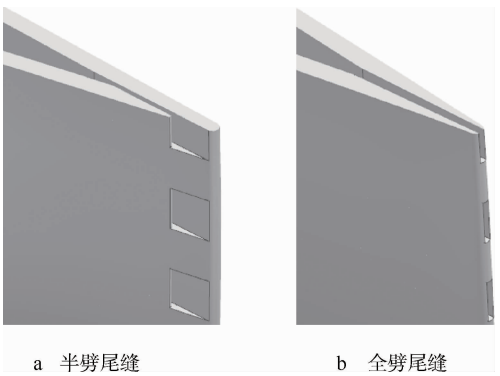


图 4　尾缝的两种结构形式

与复合弯扭叶片相适应的尾缝具有如下 3 个建模难点:①每个尾缝需适应该处叶身的弯扭状况,为自由曲面特征;②所有尾缝沿曲线排列;③尾缝成组分布,不同组之间的高度和间距不同.

其中,难点①决定了尾缝无法使用预先建立标准特征,再按需导入的派生式建模方法;难点②使得无法通过 CAD 软件已有的直线、圆周阵列方式创建尾缝序列;难点③意味着需要设计合适的数据结构存储多组不同规格尾缝的信息.

因此,本文采用创成式参数化建模方法,实现复合弯扭涡轮叶片尾缝的快速建模,总体方案如

图 5 所示.

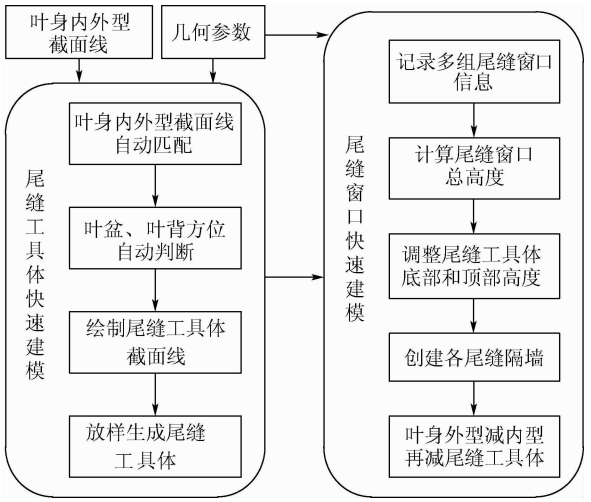


图 5 尾缝的建模总体方案

根据相匹配的叶身截面线绘制尾缝工具体截面线,再放样得到尾缝工具体,使得尾缝工具体以及在此基础上创建的尾缝窗口具有与叶身相同或相近的弯扭状况,从而解决了建模难点①. 因为各尾缝窗口由隔墙剪裁尾缝工具体而成,所以不需要使用直线、圆周阵列方式生成,从而解决了建模难点②. 通过使用自定义的数据结构记录各组窗口的几何参数,可以方便地创建多组不同规格的尾缝窗口,并便于后续修改,从而解决了建模难点③.

以下详细介绍过程中的建模步骤和相关算法.

3 尾缝工具体的快速建模方法

尾缝工具体由多层截面线放样而成,如图 6 所示. 各层截面线示意图如图 7 所示,其中实线为尾缝工具体截面线,由首尾相连的 7 条直线段构成,分别用序号 1 ~ 7 表示;双点划线为辅助直线,用序号 8 表示;虚线为径向高度相匹配的叶身内外型截面线(包括叶盆、叶背及尾缘圆弧). 尾缝工具体截面线的几何参数和约束关系如表 1、表 2 所示.

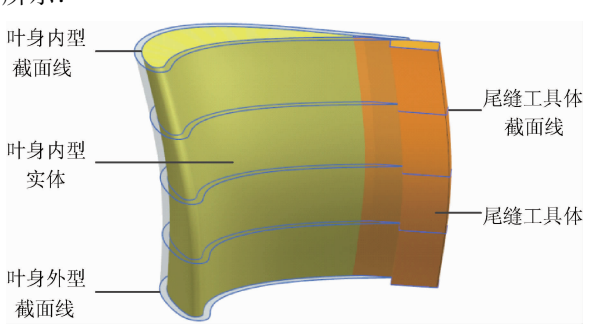


图 6 尾缝工具体建模

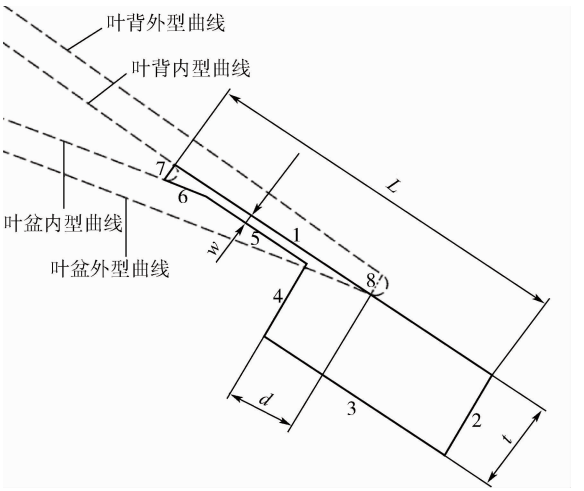


图 7 尾缝工具体截面线示意图

表 1 尾缝工具体截面线几何参数

参数	几何意义
w	尾缝宽度
d	尾缝工具体到尾缘距离
L	尾缝工具体长度(保证切穿叶身即可)
t	尾缝工具体宽度(保证切穿叶身即可)

表 2 尾缝工具体截面线约束关系

元素 1	元素 2	约束关系
直线 1 起点	叶背内型曲线终点	重合
直线 1	叶盆外型曲线终点	点在线上
直线 2	直线 8	平行
直线 3	直线 1	平行
直线 4	直线 2	平行
直线 5	直线 1	平行
直线 6 终点	叶盆内型曲线终点	重合
直线 6	叶盆内型曲线	相切
直线 8 起点	叶背外型曲线终点	重合
直线 8 终点	叶盆外型曲线终点	重合

根据用户输入的几何参数值,按照以上约束关系创建各层截面线,再对各层截面线放样即可完成尾缝工具体的建模.

在使用程序进行尾缝工具体快速建模过程中,有两个问题需要解决:①叶身内、外型截面线数目可能不同,并且有在径向高度上相互错开的情况,如何自动寻找径向高度相匹配的叶身内、外型截面线? ②对于半劈尾缝,窗口需要开在叶盆一侧,如何让计算机根据叶身截面线的几何特点自动判断哪一边是叶盆曲线?

3.1 叶身内外型截面线自动匹配算法

由于局部加密或精简等原因,叶身内、外型截面线数目可能不同,并且有在径向高度上相互错开的情况,如图 8 所示. 实现叶身内外型截面线按径向高度自动匹配是绘制尾缝工具体截面线的前提.

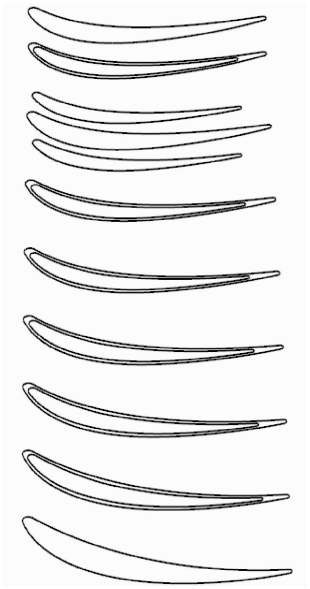


图 8　叶身内外型截面线分布情况示例

本文提出的叶身内外型截面线自动匹配算法如下.

1) 使用冒泡排序法分别对叶身外型截面线和叶身内型截面线按 Z 坐标由大到小的顺序进行排序,并将排序后的截面线标识依次分别存放在数组 Out_Array 和 In_Array 中,记其中元素的数量分别为 n_o 和 n_i;

2) 用整数 r 表示已匹配的叶身内外型截面线数,置 $r=0$;用布尔型数组 flag[n_o]表示各外型截面线是否已匹配,置数组中所有元素为 false;用数组 M_In_Array[n_i]和 M_Out_Array[n_o]分别记录相匹配的叶身内、外型截面线标识,置数组中所有元素为空;

对 $i=1, 2, \cdots, n_i$,执行 3) ~6):

3) 获取 In_Array 中第 i 条内型截面线的 Z 坐标,记为 z_i;

对 $j=1, 2, \cdots, n_o$,执行 4) ~6):

4) 若 flag[j]为 true,则直接执行下一轮 j 循环,否则执行 5);

5) 获取 Out_Array 中第 j 条外型截面线的 Z 坐标,记为 z_o;若 $|z_i - z_o| > \varepsilon$($\varepsilon$ 为一个很小的正实数,比如 10^{-5}),则直接执行下一轮 j 循环,否则执行 6);

6) $r=r+1$,置 M_In_Array[r]为 In_Array[i],置 M_Out_Array[r]为 Out_Array[j],置 flag[j]为 true,跳出 j 循环,执行下一轮 i 循环.

输出结果:r 为相匹配的叶身内外型截面线数,M_In_Array 数组的前 r 项为匹配的内型截面线标识,M_Out_Array 数组的前 r 项为匹配的外型截面线标识. 且两组曲线均按 Z 坐标由大到小顺序排列.

以图 8 中所示情况为例,内型截面线共 8 条,外型截面线共 9 条,按照以上算法找到匹配的内、外型截面线共 6 组,与实际情况相符.

3.2　叶盆、叶背曲线方位判断算法

叶身截面线存在向 Y 轴正向或负向两种弯曲方式. 判断哪一边是叶盆曲线后才能决定尾缝窗口的朝向.

本文提出的叶盆叶背曲线方位判断算法如下:

1) 从待判断的两条曲线中任取一条记为曲线 1,另一条记为曲线 2;

2) 取曲线 1 的起点 $\boldsymbol{P}_s$ 和终点 $\boldsymbol{P}_e$,求两者的中点 $\boldsymbol{P}_m=(\boldsymbol{P}_s+\boldsymbol{P}_e)/2$,取曲线 1 的弧长中点 $\boldsymbol{P}_1$(对于参数化较均匀的曲线取其参数域中点即可),令矢量 $\boldsymbol{V}=\overrightarrow{\boldsymbol{P}_m\boldsymbol{P}_1}$;

3) 取曲线 2 的弧长中点 $\boldsymbol{P}_2$,若 $\boldsymbol{V}\cdot\overrightarrow{\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{P}_2}>0$,则曲线 1 为叶盆曲线,曲线 2 为叶背曲线;否则,曲线 2 为叶盆曲线,曲线 1 为叶背曲线.

按照叶身截面线实际弯曲方式和曲线 1 的选取方法不同,可分为 4 种情况,如图 9 所示,均可由以上算法得出正确的判断结果.

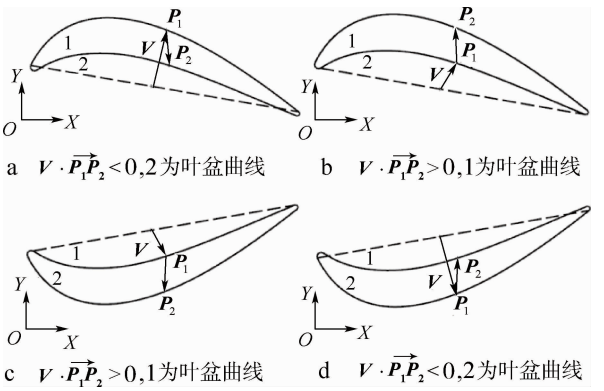


图 9　叶盆、叶背曲线方位判断的 4 种情况

判断出叶盆、叶背曲线方位后,便可决定尾缝窗口的朝向. 设叶盆外型曲线终点为 $\boldsymbol{P}_{ep}$,叶背外型曲线终点为 $\boldsymbol{P}_{eb}$,则在图 7 中,绘制完直线 1 后,从直线 1 终点开始,沿 $\overrightarrow{\boldsymbol{P}_{eb}\boldsymbol{P}_{ep}}$ 方向,绘制直线 2,即可保证尾缝窗口开在叶盆一侧.

4　尾缝窗口的快速建模方法

根据用户输入的各组尾缝窗口几何参数,首先由窗口总高度,调整尾缝工具体底部和顶部的高度,再创建若干隔墙,对尾缝工具体进行剪裁,即可得到尾缝窗口序列,如图 10 所示.

尾缝窗口可能分为若干个组,不同组之间的

高度和间距不同. 用两个数组分别顺序存储各个尾缝窗口的高度和间距虽然未尝不可,但是在后续参数调整过程中,必须逐个修改,比较繁琐. 本文使用数组 n 存储每组内尾缝窗口个数,数组 h 存储每组尾缝窗口的高度,数组 s 存储每组尾缝窗口的间距. 例如对于图 11 所示的多组不同规格尾缝窗口,上述 3 个数组中记录的数据如图 12 所示.

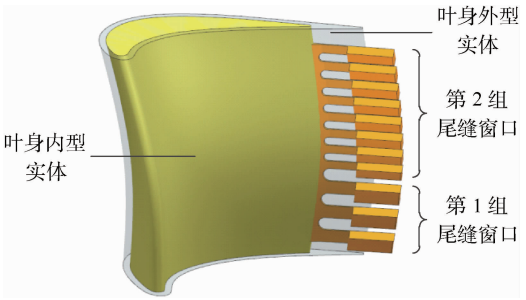


图 10 创建尾缝窗口

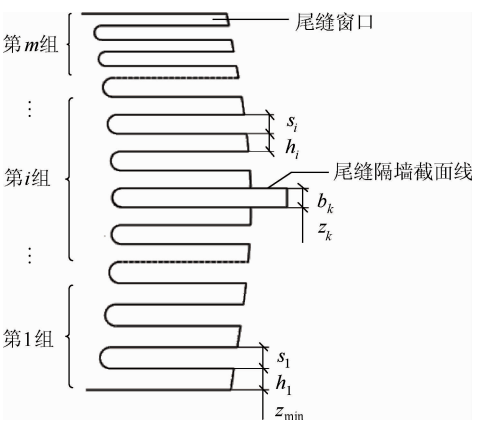


图 11 多组不同规格尾缝窗口的示意图

组号	1	…	i	…	m
组内窗口个数 n	3	…	5	…	3
窗口高度 h	h_1	…	h_i	…	h_m
窗口间距 s	s_1	…	s_i	…	s_m

图 12 多组尾缝窗口信息的记录方法

这样的记录方式既方便后续尾缝窗口的整组修改,又起到了压缩数据的作用.

设尾缝窗口共有 m 组,则所有尾缝窗口的总高度为

$$H = \sum_{i=1}^{m} n_i(h_i + s_i) - s_m \tag{1}$$

判断第 k 个尾缝窗口在哪一组的方法:将数组 n 中的元素从第 1 个开始累加,当累加和 sum≥k时,取出最后累加的元素的下标 i,即为该窗口所在的组号 i_k.

记上述过程为 $i_k = f(k)$. 对于第 k 个尾缝隔墙,其高度 b_k 恰为第 k 个与第 $k+1$ 个尾缝窗口的间距,其 Z 方向位置 z_k 为前 k 个尾缝窗口的高度、间距之和. 设第 1 个尾缝窗口的 Z 方向位置为 $z_{\min}$,则

$$b_k = s_{i_k} = s_{f(k)} \tag{2}$$

$$z_k = \begin{cases} z_{\min} + (k-1)(h_{f(k)} + s_{f(k)}) + h_{f(k)} \\ \qquad f(k) = 1 \\ z_{\min} + \sum_{i=1}^{f(k)-1} n_i(h_i + s_i) + \left(k - 1 - \sum_{i=1}^{f(k)-1} n_i\right) \cdot \\ (h_{f(k)} + s_{f(k)}) + h_{f(k)} \\ \qquad f(k) > 1 \end{cases} \tag{3}$$

所以,首先将尾缝工具体底部高度调整为 $z_{\min}$,并将顶部高度调整为 $z_{\min} + H$,再按照式(2)、式(3)计算所得参数分别创建各尾缝隔墙,对尾缝工具体进行剪裁,即可得到符合用户输入参数的尾缝窗口序列. 最后用叶身外型实体依次与叶身内型实体和尾缝工具体布尔求差,即可得到尾缝特征.

5 尾缝快速建模的程序实现

以上述研究工作为基础,课题组在 Siemens UG NX 7.5 平台上,使用 UG Open API 工具开发了尾缝快速建模程序,界面及建模实例如图 13 所示;并将程序嵌入到“涡轮气冷叶片快速建模系统”中,系统界面如图 14 所示,可实现叶身外型、叶身内型(等壁厚、变壁厚)、叶冠、榫头内外型、缘板、隔肋、扰流柱、扰流肋、尾缝、冷气通道转接段、伸根内外型、气膜孔(圆型、簸箕型)等 10 余种结构特征的快速建模和快速修改,并已在某设计所得到初步应用.

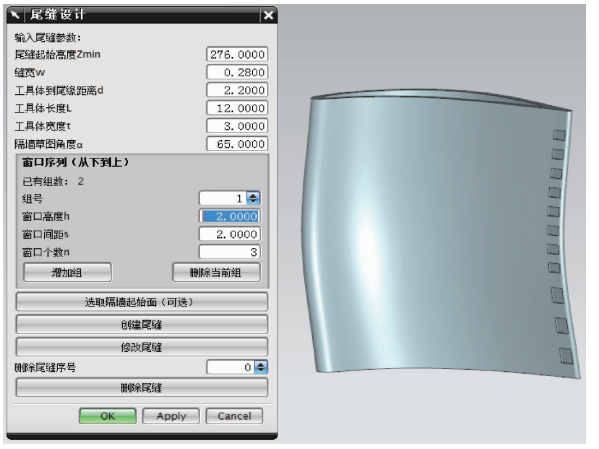


图 13 复合弯扭叶片尾缝建模程序及实例

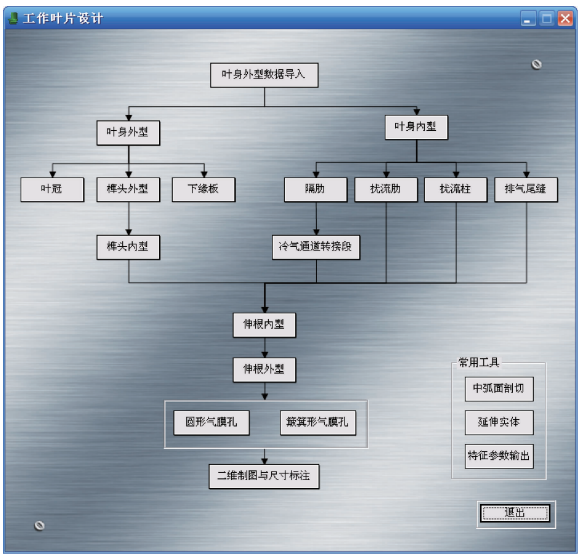


图 14　涡轮气冷叶片快速建模系统界面

6　结　论

本文对复合弯扭涡轮叶片和尾缝特征进行了分析,提出了包含创建尾缝工具体和创建尾缝窗口过程的创成式尾缝快速建模方法和相关算法,解决了复合弯扭叶片中各尾缝建模难点:需适应该处叶身弯扭状况;沿曲线排列;成组分布,不同组之间的高度和间距不同等. 根据以上研究工作,开发了尾缝快速建模程序,验证了本文所提出方法的有效性.

本文提出的方法实现了复合弯扭叶片中尾缝的快速建模和快速修改,提高了设计质量和设计效率,并为涡轮叶片尾缝等冷却结构的 CAE 分析及优化设计过程提供了基础. 后续研究可着眼于知识驱动的涡轮叶片结构建模以及 CAE 分析模型快速生成技术.

参考文献(References)

[1] 倪萌,朱惠人,裘云,等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术,2005,18(4):25 – 33
Ni Meng, Zhu Huiren, Qiu Yun, et al. Review of aero-turbine blade cooling technologies[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(4):25 – 33(in Chinese)

[2] 王仲奇,郑严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[J]. 中国工程科学,2000,2(6):40 – 48
Wang Zhongqi, Zheng Yan. Research status and development of the bowed-twisted blade for turbomachines[J]. Engineering Science, 2000, 2(6):40 – 48(in Chinese)

[3] 王雷,胡松岩. 动力涡轮弯扭导向叶片的设计[J]. 航空发动机,2001(4):6 – 10
Wang Lei, Hu Songyan. Design of the bowed-twisted guided blade in power turbine[J]. Aero Engine, 2001(4):6 – 10(in Chinese)

[4] 宋玉旺,席平. 基于特征造型技术的涡轮叶片参数化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(4):321 – 324
Song Yuwang, Xi Ping. Parametric design of turbine blade based on feature modeling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4):321 – 324(in Chinese)

[5] 朱谦,宁涛,席平. 基于引导线的涡轮气冷叶片伸根建模方法[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(8):1085 – 1089
Zhu Qian, Ning Tao, Xi Ping. Root extending section of turbine blade modeling method based on guide curves[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(8):1085 – 1089(in Chinese)

[6] Koini G N, Sarakinos S S, Nikolos I K. A software tool for parametric design of turbomachinery blades[J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(1):41 – 51

[7] Pérez-Arribas F, Trejo-Vargas I. Computer-aided design of horizontal axis turbine blades[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 252 – 260

[8] 田庆,莫蓉,夏禹,等. 航空发动机叶片 CAD 造型方法[J]. 航空制造技术,2007(2):78 – 81
Tian Qing, Mo Rong, Xia Yu, et al. CAD modeling method for aeroengine blade[J]. Aircraft Manufacturing Technology, 2007(2):78 – 81(in Chinese)

[9] Martin T J. Computer-automated multi-disciplinary analysis and design optimization of internally cooled turbine blades[D]. University Park: The Pennsylvania State University, 2001

[10] 虞跨海,李立州,岳珠峰. 基于解析及特征造型的涡轮冷却叶片参数化设计[J]. 推进技术,2007,28(6):637 – 640
Yu Kuahai, Li Lizhou, Yue Zhufeng. Parametric design for cooling turbine blades based on analytic and feature modeling[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6):637 – 640(in Chinese)

[11] Yu K, Yue Z, Wang J. Parametric modeling and multidisciplinary design optimization of 3-D internally cooled turbine blades[R]. AIAA-2007-7719, 2007

[12] Hoschek J, Müller R. Turbine blade design by lofted B-spline surfaces[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 119(1/2):235 – 248