

基于特征的汽轮机叶片参数化设计软件

于红英¹, 刘文涛¹, 田芳馨¹, 石 勇²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001, mcadyhy@hit.edu.cn;

2. 哈尔滨工程大学 动力与能源学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了给叶片专用加工软件提供可用的叶片基础模型, 开发了基于特征的叶片参数化设计软件. 针对汽轮机叶片的结构特点, 将叶片分为叶根、根面、叶冠、冠面和叶身 5 个特征, 而叶身又可以分成背弧曲面、进汽边圆弧曲面、内弧曲面和出汽边圆弧曲面 4 个特征. 软件可根据用户输入的叶片参数, 对各个特征分别造型, 生成可用于开发叶片专用加工软件的叶片三维模型. 仿真结果表明: 用该方法生成的叶片模型, 可分别对叶身的不同部分赋以不同的切削速度和进给量, 从而避免过切. 基于特征的叶片参数化模型可为叶片加工提供实用的基础模型.

关键词: 汽轮机叶片; 特征; 参数化; 软件

中图分类号: TH164

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0746-05

Parametric design software for turbine blade based on the features

YU Hong-ying¹, LIU Wen-tao¹, TIAN Fang-xin¹, SHI Yong²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, mcadyhy@hit.edu.cn;

2. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to provide a usable blade model for special machining software of a blade, a parametric blade design software is developed based on the features. According to the characteristic of a turbine blade, the blade is divided into five master features: blade-root, root-surface, blade-coronal, coronal-surface and blade-body, while blade-body is divided into four child features: surface of back arc, circular arc surface of stream coming in, surface of inner arc and circular arc surface of stream coming out. 3D model of the turbine blade based on features can be generated automatically by the system with blade parameters input by users. The results of machining simulation show that different cutting speeds and cutting steps can be given for different parts of the blade-body and overcut can be avoided. The paramatic blade model based on features can provide a practical base model for a blade machining software.

Key words: turbine blade; feature; parametric; software

目前, 叶片的设计加工软件主要有通用软件和专用软件两类. 通用的商品化 CAD/CAM 软件, 如 UG、CATIA、Pro/E 等均针对通用零件, 对于叶片中特有的结构特征没有提供直接的参数化造型方法, 并且用通用软件的 CAM 模块生成的刀轨进行叶片实际加工时, 一方面加工速度不可改变, 从而可能导致出汽边圆弧处过切, 另一方面由于刀具不能兼顾侧面和底面, 刀具的倾角不可变, 从而

导致在清根加工时容易引起过切, 因此用通用软件生成叶片的刀轨存在的问题; 而专用软件, 如瑞士 Starrag 数控机床所附带的数控加工专用软件包, 这类软件虽然功能强大、针对性强, 但一般是买一台机床则配送一套软件, 引进国外的机床价格昂贵, 超出了中小企业的承受能力, 因此有必要提高产品研发能力, 开发具有自主知识产权的符合实际生产需求的叶片设计加工软件^[1-2]. 开发叶片的专用设计软件时, 一般要根据不同的设计条件, 国内外学者对此进行了大量的研究. 文献[3]从提高承载能力方面考虑, 用集成流体控

收稿日期: 2009-02-22.

基金项目: 黑龙江省博士后科研启动基金资助项目.

作者简介: 于红英(1968—), 女, 博士, 教授.

制的方法设计叶片;文献[4]给出了在考虑了叶片的压力、质量和温度的情况下进行叶片的设计;文献[5]开发了集设计(CAD)与分析(CFD)于一体的汽轮机叶片设计系统;文献[6]按有限元分析系统 ADINA 的代码格式进行了叶片建模,该系统不但提供了叶片失效分析的后置处理器,还是一个叶片设计的优化软件;文献[7]开发了一个叶片设计软件包,输出结果是三维 NURBS 曲面,可通过标准转换软件导入到 CAD 或分析软件中.文献[8]讨论了叶片设计原理并在 SolidWorks 平台下利用 VB 语言开发了叶片设计系统.文献[9-10]讨论了基于 UG 软件的叶片参数化设计方法.上述文献中所讨论的叶片设计主要针对于叶身设计,并未提出叶根、叶冠的参数化设计,并且叶身实体由若干条截面型线通过“蒙皮法”生成,不能满足数控加工的要求.文献[11]虽然在软件开发过程中考虑了叶根与叶冠的造型,但其不是为数控加工服务的,输出的模型是三维的 NURBS 曲面.

本文在 UG 平台上开发了叶片 CAD/CAM 系统.叶片 CAD/CAM 系统是专为汽轮机叶片而设计,充分地考虑了汽轮机叶片的特点,定制工艺参数,合理规划刀位,操作便捷,自动化程度较高.本文所述的叶片三维参数化设计是 CAD/CAM 软件系统的一部分,采用的是特征造型技术,专为叶片 CAM 系统提供符合加工工艺要求的叶片基础模型.特征造型能更好地表达产品完整的功能和生产管理信息.基于特征的参数化三维造型技术是 CAD 的关键技术,也是机械产品设计的的发展趋势.

1 基于特征的叶片参数化设计的基本思想

汽轮机叶片一般由叶根、叶冠和叶身 3 部分构成,其中叶身是叶片的基本部分,为复杂自由曲面.本文根据叶片的结构特点,将其分为叶根、根面、叶冠、冠面和叶身 5 个特征,其中根面与冠面,叶根与叶冠因结构相似,造型方式相同.根面、冠面作为叶根、叶冠与叶身的过渡面,用于修剪叶身片体及拉伸叶根、叶冠;叶根与叶冠形式多样,文中为统一算法,将其定义为多边形组;叶身部分可以看成由背弧曲面、进汽边圆弧曲面、内弧曲面和出汽边圆弧曲面等 4 个特征组成,如图 1 所示.对各个特征分别造型,得到 4 个曲面片,使得在后续的加工过程中,系统可以对曲面片分别赋予不同的加工速度,并在相邻曲面过渡处设置一定比例的降速点,实现切削速度的平稳过渡,以提高加工

质量和加工精度.

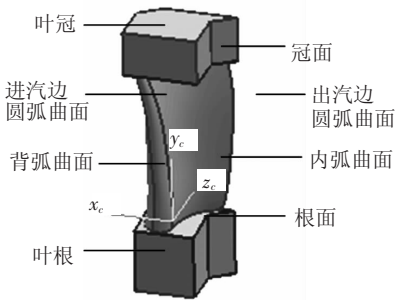


图 1 叶片特征示意图

2 叶片数据的定义

叶片造型数据由用户通过对话框读入.根据叶片特征的不同,造型数据同样分为叶根、根面、叶冠、冠面和叶身 5 部分,分别以不同的关键字标定.读入叶片数据时,根据关键字的不同,将数据赋予不同的结构体以备造型时使用.

1) 根面、冠面数据的定义.根面与冠面是连接叶根、叶冠与叶身的过渡面,其形式多样,主要有叶身首末截面、三点面、等高面、圆柱/圆锥面和任意回转面等 5 种定义形式,如表 1 所示.

表 1 根面、冠面定义形式

定义类型	定义方式	提供参数
0	叶身首末截面	无
1	三点定义平面	平面上 3 点
2	等高面	等高面上 1 点
3	圆柱面、圆锥面	母线两端点及旋转轴
4	任意回转面	母线上若干点及旋转轴

2) 叶根、叶冠数据的定义.叶根的常见形式有菱形、T 形、叉形等等.这里将叶根、叶冠定义为多边形组.图 2(a)为一叶根多边形组,共由 3 个多边形组成,如图 2(b)所示为多边形组 1、多边形组 2 及多边形组 3.将多边形组按照拉伸特征分为若干个截面,给出每个截面的角点数据,多边形组的截面如图 2(c)所示.因为叶根叶冠很少为三棱柱形式,所以每个截面给出的角点数一般不小于 4.又由于截面两两对应,因此截面数为偶数且不小于 2,对应截面的角点数相同.

3) 叶身数据的定义.叶身曲面通常为复杂自由曲面,其截面型线可分为背弧曲线、进汽边圆弧、内弧曲线和出汽边圆弧 4 个特征,如图 3 所示.相邻曲线的共用点定义为关键点,如点 A、B、C、D.叶身部分的参数应包括安装角、安装角变化量、截面型线的数量、每条截面型线的点数以及关键点等信息,而截面型线数据点则以一定格式

存储于数据文件中。

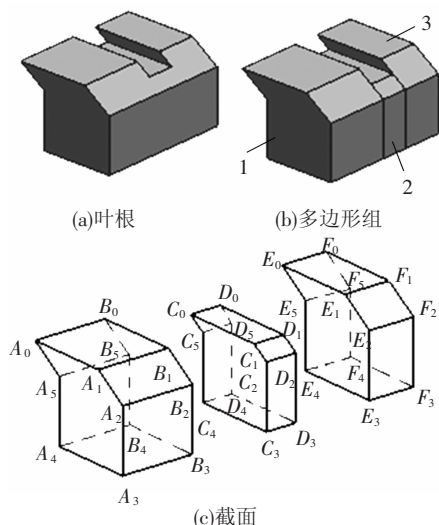


图2 叶根、叶冠多边形组的定义

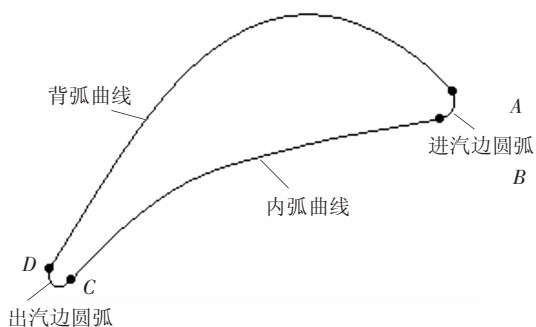


图3 叶片型线特征

3 叶片的三维造型

3.1 过渡面(根面、冠面)的参数化造型

过渡面以三点面和圆锥面最为常见。下面以这两种情况为例分别进行说明。

1) 以三点面方式定义过渡面。该方式定义的过渡面为平面。造型数据中给出了过渡面上不共线的3点, 设3点的坐标值分别为 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ 。连接点 A 、 B 做矢量 $\mathbf{r}_1$, 连接点 A 、 C 做矢量 $\mathbf{r}_2$, 则 $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$ 可表示为

$$\mathbf{r}_1 = \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\},$$

$$\mathbf{r}_2 = \{x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1\}.$$

平面的法矢 $\mathbf{n}$ 可由两矢量叉乘获得

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2. \quad (2)$$

调用函数 `UF_MODL_create_plane()` 生成平面。

2) 以圆锥面方式定义过渡面。该方式定义的过渡面为回转面。造型数据中给出母线两端点, 造型时通过给定母线的两端连接直线作出圆锥母线, 将母线绕给定的轴线旋转形成圆锥面。

3.2 叶根、叶冠的参数化造型

叶根、叶冠以多边形组的形式定义。下面以图

2(a) 所示的叶根为例, 介绍叶根造型的具体方法, 如图4所示。

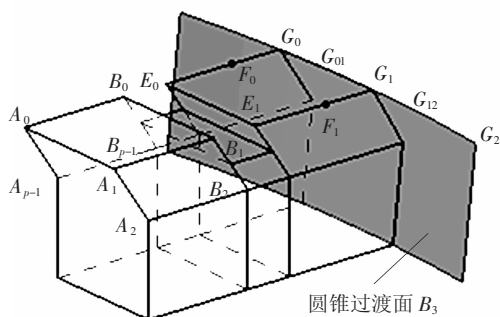


图4 叶根造型示意图

叶根、叶冠造型的具体步骤如下:

1) 读入截面数 N 及每个截面的角点数 P 。顺次读入多边形各个截面的角点坐标。

2) 将 N 个截面分为 $N/2$ 组, 每两个相邻截面为一组。

3) 在同组的两个截面上各取相邻的两点 A_0 、 A_1 及 B_1 、 B_0 , 顺次连接4点做4条首尾相接的线段 A_0B_0 、 B_0B_1 、 B_1A_1 及 A_1A_0 。以这4条线段为边界, 通过函数 `UF_MODL_create_bplane()` 做有界平面 S_1 。再取 A_1 、 A_2 及 B_2 、 B_1 4个点做平面 S_2 。以同样的方法做多边形的侧面 $S_3, \dots, S_{p-1}$ 。再取 A_{p-1} 、 A_0 及 B_{p-1} 、 B_0 4个点形成侧面 S_0 。取点 $A_0, A_1, \dots, A_{p-1}$ 形成底面 A , 再取点 $B_0, B_1, \dots, B_{p-1}$ 形成顶面 B 。将各个侧面 $S_0, S_1, S_3, \dots, S_{p-1}$ 及底面 A 、顶面 B 缝合, 形成第一个多边形实体。

4) 对于第2, 3, $\dots, N/2 - 1$ 组多边形, 造型方法同(3)。

5) 对于第 $N/2$ 组多边形, 将 E_0 、 E_1 分别沿 E_0F_0 、 E_1F_1 方向拉伸至过渡面, 交过渡面于点 G_0 、 G_1 , 连接 G_0 、 G_1 并向过渡面投影得曲线 $G_0G_{01}G_1$, 以投影曲线 $G_0G_{01}G_1$ 及线段 E_0E_1 、 E_0G_0 、 E_1G_1 为边界做多边形的侧平面。按同样的方法形成第 $N/2$ 个多边形组的其他侧平面。第 $N/2$ 个多边形组的底面 E 由点 E_0 、 E_1 、 $\dots$ 及 E_{p-1} 首尾相连接形成, 顶面 G 则由 $G_0G_{01}G_1$ 、 $G_1G_{12}G_2$ 等各段投影曲线连接而成的封闭曲线对过渡面进行剪切而形成。

6) 对 $N/2$ 个多边形实体进行“并”操作, 形成叶根的三维实体模型。

按同样的操作可生成叶冠的三维实体模型。

3.3 叶身的参数化造型

在进行叶身造型时, 对型线数据进行了大量处理, 避免型面扭曲及不光顺现象, 使用“通过曲线网格”方法生成片体形式的汽道型面。实现过程介绍如下。

1) 数据离散处理。当各截面的背弧、内弧数

据不均匀分布或数目不一致时, 会严重影响曲线网格的质量, 因此需对数据进行均匀离散处理. 将背弧、内弧数据点拟合成 B 样条, 再在样条上均匀等量的取出若干数据点作为新的型值点.

2) 端面型线插值. 为使型面沿 V 向完全贯入叶根和叶冠, 对型线背弧、进汽边圆弧、内弧和出汽边圆弧分别进行插值, 生成底面和顶面型线数据. 插值采用三次 B 样条插值方式, 以保证曲线的二阶连续性.

3) 坐标变换. 叶片型线上型值点的数据通

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' - A \\ y' - B \\ z' - C \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \lambda \\ -\cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \lambda & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' - A \\ y' - B \\ z' - C \end{bmatrix}$$

式中: x, y, z 为点在汽轮机整机坐标系 OT 下的坐标; x', y', z' 为表示点在叶片工件坐标系 $O'T'$ 下的坐标.

4) 网格曲线输出. 采用“通过曲线网格”方式创建叶身片体, 需要定义两簇相互交叉的线串. 在这里, 将通过截面型线数据点拟合而成的背弧、内弧样条曲线和进汽边、出汽边圆弧曲线作为主线串, 并沿截面型线高度方向取各个截面的对应点拟合样条曲线作为交叉线串.

5) 型线光滑处理. 型线理论数据或由测量得到的型线数据常常会有误差, 用这样的数据进行造型, 往往会导致型面出现凸起或凹陷, 严重影响型面的光滑性, 进而影响曲面的加工. 为此, 需对型线进行光滑处理, 使背弧曲线、进汽边圆弧、内弧曲线和出汽边圆弧内部达到曲率连续, 曲线相接处即关键点处达到斜率连续. 下面以内弧与进汽边圆弧曲线的桥接为例, 讨论型线光滑的处理方法, 如图 5 所示. 内弧曲线 ACD 与进汽边圆弧 AB 交于点关键点 A (见图 5(a)), 首先讨论内弧在 A 点处的切线斜率与进汽边圆弧在 A 点处的切线斜率是否相等, 若斜率相等则无需进行光滑处理; 若斜率不等, 则将内弧曲线上的点 A 剔除, 用剩余型值点重新拟合的内弧曲线 CD , 如图 5(b) 所示. 而后做桥接曲线 AC , 使曲线 AC 的两端分别与进汽边圆弧 AB 和内弧曲线 CD 相切. 将桥接曲线 AC 与重新拟合的内弧曲线 CD 连接即得到光滑曲线 ACD , 如图 5(c) 所示.

6) 生成叶身. 以型线为主线串, 以型线高度方向的样条曲线为交叉线串, 调用 API 函数 `UF_MODL_create_curve_mesh` 对背弧曲面、进汽边圆

常是在叶片工件坐标系下给定的, 而叶根与叶冠的数据通常是在汽轮机整机坐标系下给定的. 为满足造型的需要, 要进行坐标变换将两个坐标系统一, 通常将叶片工件坐标系下的数据转换至汽轮机整机坐标系下的数据. 假设汽轮机整机坐标系为 OT 及叶片工件坐标系为 $O'T'$, 设 O 在 $O'T'$ 坐标系下坐标为 (A, B, C) , 由叶片工件坐标系变换为汽轮机整机坐标系的 Euler 角的三次转动值为 α, β, γ . 则叶片工件坐标系到汽轮机整机坐标系的坐标变换矩阵为

弧曲面、内弧曲面和出汽边圆弧曲面分别进行造型, 如图 6 所示. 4 个曲面片经由过渡面剪切生成叶身.

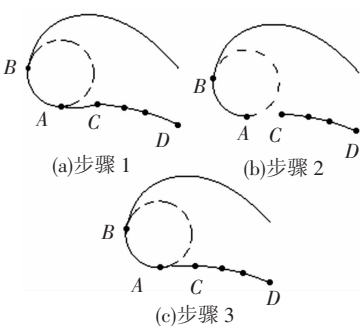


图 5 型线光滑处理示意图

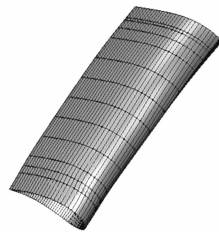


图 6 “通过曲线网格”方式生成的叶

3.4 布尔运算

将叶根实体、叶冠实体和叶身实体通过布尔运算加至一起, 生成叶片三维实体模型. 两次调用 API 函数 `UF_MODL_operations` 可实现将工具实体加到目标实体的布尔运算操作. 第一次调用该函数, 可将叶根实体设为工具实体, 叶身片体设为目标实体, 二者进行布尔加运算后生成新的实体, 假设命名为叶片体 1; 第二次调用该函数可将叶冠实体设为工具实体, 叶片体 1 设为目标实体, 二者进行布尔加运算后生成新的实体, 即叶片的三维实体模型.

4 造型实例

以某汽轮机厂 D135B 型叶片为例进行叶片造型,按特征关键字定义叶片不同部分的数据格式并形成叶片数据文件,从软件所提供的对话框中选择造型数据文件,如“D135B.txt”,即可直接生成如图 7 所示的叶片三维模型,只需几秒的时间即可完成操作.由于本软件只需按要求形成叶片数据文件,在软件界面上直接选择该文件即可生成叶片的三维实体模型,避免了交互式操作带来的操作失误,在一定程度上还可提高设计质量.

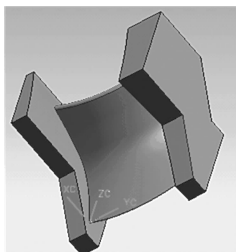


图 7 D135B 型叶片模型

5 结束语

1) 本文对基于 UG 二次开发平台的汽轮机叶片造型的关键技术进行了研究.根据叶片的结构特征,综合运用 UG/Open API、UG/Open Menu-Script 和 UG/Open UIStyler 等二次开发工具,开发了基于 UG 的汽轮机叶片三维参数化设计软件.

2) 实现了与 UG 的无缝集成,极大地方便了用户操作,减少了设计时间,提高了设计效率,为后续的叶片数控加工打下良好基础.

参考文献:

[1] 石云飞, 李山, 范海涛, 等. 基于 UG/Open 联合开发的叶片工序模型造型系统[J]. 制造业自动化, 2008, 30(7): 18-20.

- [2] 单晨伟, 张定华, 刘维伟. 组合曲面叶片的螺旋加工刀位轨迹生成[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(11): 2243-2247.
- [3] BONS J P, HANSEN L C, CLARK J P, *et al.* Designing low-pressure turbine blades with integrated flow control [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo. Nevada: ASME, 2005: 1079-1091.
- [4] TOLER D F. Mechanical design of turbine blades with interlocking tip shrouds [C]//Engine Systems: Lubrication, Wear, Components, system Dynamics, and Design. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2001: 137-143.
- [5] JÜRGEN G, AKIN K, MARIKUS S, *et al.* A full parametric model for turbomachinery blade design and optimisation [C]//Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference. Salt Lake City: ASME, 2004: 907-914.
- [6] CHRISTOPH-HERMANN R. Structural design of modern steam turbine blades using ADINA [J]. Computers and Structures, 2003, 81(8-11): 919-927.
- [7] KOINI G N, SARAOKINOS S S, NIKOLOS K. A software tool for parametric design of turbomachinery blades [J]. Advances in Engineering Software, 2009, 40(1): 41-51.
- [8] 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.
- [9] 谢永慧, 刘象拯, 张获. 汽轮机叶片三维参数化特征造型研究[J]. 汽轮机技术, 2005(2): 52-58.
- [10] 于红英, 唐德威, 伞红军. 汽轮机叶片参数化设计关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(10): 1537-1542.
- [11] KOINI G N, SARAOKINOS S S, NIKOLOS K. Parametric design of turbomachinery blades [C]//The International Conference on Computer as a Tool 2005. Piscataway: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2005: 539-542.

(编辑 杨 波)