

doi: 10.7690/bgzdh.2015.04.016

航空涡轮叶片叶身造型参数化设计

刘诗汉, 马 虎

(空军第一航空学院航空修理工程系, 河南 信阳 464000)

摘要: 为提高航空涡轮叶片设计的数字化水平, 减轻设计人员的设计计算量, 开发了一种基于 CATIA 的航空涡轮叶片建模方法。首先在分析涡轮叶片几何特征及其气动性能和结构强度的影响因素, 确定了叶片截面形状的控制参数, 再运用内建于 CATIA 的知识工程工具和函数, 构造三维涡轮叶片。该方法实现了涡轮叶片设计的参数化, 所设计叶片的叶身曲面和不同径向位置的截面曲线均达到 G2 连续。

关键词: 涡轮叶片造型; 参数化; 知识工程; CATIA; G2 连续

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A

Parameterization of Modeling the Aero-turbine Blade Based on CATIA

Liu Shihan, Ma Hu

(Department of Aeronautic Repair Engineering, The First Aeronautic Institute of Air force, Xinyang 464000, China)

Abstract: To promote the numeralization of aero-turbine blade design and relieve engineers from heavy designing calculation, a modeling technique of an aero-turbine blade is developed based on CATIA. At first, the geometric features and factors which impact its performance and strength of a blade are analyzed, and some parameters are selected to control the pattern of the section of a blade. Then, some tools and functions of knowledge engineering built in CATIA are used to construct a blade. The technique results to parameterization of aero-turbine blade design, and is proved to be effective while modeling a blade which has a G2 class continuity surface and contours of sections at different radial distance.

Keywords: aero-turbine blade modeling; parameterization; knowledge engineering; CATIA; G2 class continuity

0 引言

涡轮叶片叶身造型对航空发动机性能具有决定性影响, 而其设计过程十分复杂, 理论性和实践性都很强。如何能减轻设计人员的工作强度, 提高设计工作效率, 并将成功的设计经验运用于新的涡轮叶片造型设计开发的问题一直备受关注。近年来, 随着计算机图形学研究的不断深入, 商用 CAD 软件的功能不断增强, 通过二次开发实现涡轮叶片造型的计算机辅助设计成为解决这一问题的有效途径。目前所用的开发平台有 UG^[1-2]、Pro/E^[3]、SolidWorks^[4]等, 基于 CATIA 的还很少。同时也存在因完全程序化带来的不便于修改设计结果, 以及因没有考虑叶片的结构强度因素导致设计结果偏离实际使用要求的问题。

CATIA 是法国 Dassault 公司的跨平台的商业三维 CAD 设计软件, 在世界航空业界占有重要位置, 是我国航空工业领域主要采用的设计平台。笔者以 CATIA 为平台, 研究涡轮叶片造型的参数化设计方法, 使设计者通过设定少量参数即可得到初步的叶片造型, 修改参数值便能得到新的叶型。选择参数时将强度因素考虑在内, 同时在建模过程中加入交

互环节^[5], 可对设计结果修改, 增强设计方法的灵活性。

1 叶片截面曲线结构分析

叶身外型面是自由曲面, 由众多外型截面沿径向积叠而成。外型截面由前缘、后缘、叶盆和叶背四条曲线组成(图 1), 前缘和后缘是圆弧, 叶盆和叶背曲线的选择比较灵活, 早期常用二次曲线或高次多项式来构造, 一般曲线随次数的增加, 连续性提高而调整的灵活性降低, 而 NURBS 曲线能在两方面都有满意的效果^[6-7], 成为目前构造自由曲线的首选。按对涡轮叶片的影响可将截面型线各部几何参数分为 3 组^[8], 如图 1 所示。

第 1 组, 对能量损失和气流出口角有重大影响的参数。1) 叶栅的相对栅距 $t_r=t/l$; 2) 几何进口角 β_{r1} ; 3) 几何出口角 β_{r2} ; 4) 有效出口角 $\beta_{2AV}=\arcsin(b_2/t)$, 可用来确定喉圆 C_4 的半径; 5) 后缘转折角 δ 。

第 2 组, 决定叶型强度特性的参数。1) 弦长 l ; 2) 叶型最大厚度 C_{max} ; 3) 前缘小圆 C_1 半径 r_1 ; 4) 后缘小圆 C_2 半径 r_2 ; 5) 叶型转折角 $\theta_r=180-\beta_{r1}-\beta_{r2}$ 。

第 3 组, 辅助参数如下。1) 叶型中最大内切圆

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-01-07

作者简介: 刘诗汉(1965—), 男, 湖北人, 博士, 副教授, 从事 CAD/CAM、虚拟维修、虚拟维修研究。

C_3 圆心离开前缘的距离 X_{Cmax} ; 2) 叶型中最大内切圆与弦线的垂直距离(与挠度相当) Y_{Cmax} ; 3) 前缘尖角 ω_1 ; 4) 后缘尖角 ω_2 ; 5) 安装角 γ 。

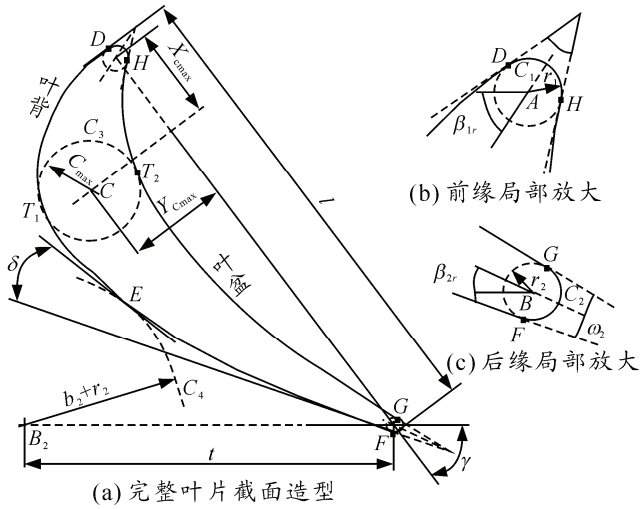


图1 外截面的组成

这些参数(除叶型转折角 θ_r 外)是根据设计目标对涡轮叶片气动性能、强度刚度进行计算或由经验进行类比设计确定的,在叶片截面造型时必须满足。但是满足这些参数的型线并不是唯一的,这给创新设计提供了空间。

2 叶片造型方法

2.1 叶片截面造型方法

以上节列出的参数为初始值,可以直接确定前缘圆弧、后缘圆弧、叶型中最大内切圆和叶背曲线上与相邻叶片形成叶栅通道喉部的点。建立以后缘圆弧中心为坐标原点的坐标系,这些几何元素由公式(1)~(9)给出。

$$x_A = -(l - r_1 - r_2) \cos \gamma \quad (1)$$

$$y_A = (l - r_1 - r_2) \sin \gamma \quad (2)$$

$$x_B = 0, y_B = 0 \quad (3)$$

$$x_C = -\frac{X_{Cmax}}{l - r_1 - r_2} x_A - Y_{Cmax} \sin \gamma \quad (4)$$

$$y_C = -\frac{Y_{Cmax}}{l - r_1 - r_2} y_A - Y_{Cmax} \cos \gamma \quad (5)$$

$$x_D = x_A - r_1 \sin(\beta_{r1} - 0.5\omega_1) \quad (6)$$

$$y_D = y_A + r_1 \cos(\beta_{r1} - 0.5\omega_1) \quad (7)$$

$$x_E = (b_2 + r_2) \sin(\beta_{r2} - 0.5\omega_1 + \delta) \quad (8)$$

$$y_E = (b_2 + r_2) \cos(\beta_{r2} - 0.5\omega_1 + \delta) \quad (9)$$

$$b_2 = t \sin \beta_{2AV} \quad (10)$$

$$x_F = x_B - r_2 \sin(\beta_{r2} - 0.5\omega_1) \quad (11)$$

$$y_F = y_B - r_2 \cos(\beta_{r2} - 0.5\omega_1) \quad (12)$$

$$x_G = x_B + r_2 \sin(\beta_{r2} + 0.5\omega_1) \quad (13)$$

$$y_G = x_B + r_2 \cos(\beta_{r2} + 0.5\omega_1) \quad (14)$$

$$x_H = x_A + r_1 \sin(\beta_{r1} + 0.5\omega_1) \quad (15)$$

$$y_H = y_A + r_1 \cos(\beta_{r1} + 0.5\omega_1) \quad (16)$$

叶背曲线用样条曲线画出, D 、 E 、 F 是3个带约束的已知型值点,叶背曲线在这些型值点处分别与 C_1 、 C_2 和 C_4 圆弧相切,另有一个约束是要与 C_3 圆弧相切,产生切点 T_1 。 D 、 E 、 F 和 T_1 将曲线分为3段,为便于调节,每段曲线上都要增加若干个中间点(图2),具体数量由曲线的弯曲程度及长度来定。 DT_1 段曲率较大,线段较长,中间点数目不应少于2个,中间点的位置由直线 L_1 和 L_2 限定,其中 L_1 是过 E 点与前缘圆弧相切的直线, L_2 是前缘圆弧 C_1 与最大内切圆 C_3 的公切线。按相同方法在叶背曲线的其他各段以及叶盆曲线各段添加中间点,各段所需中间点的数量及位置见如表1所示。

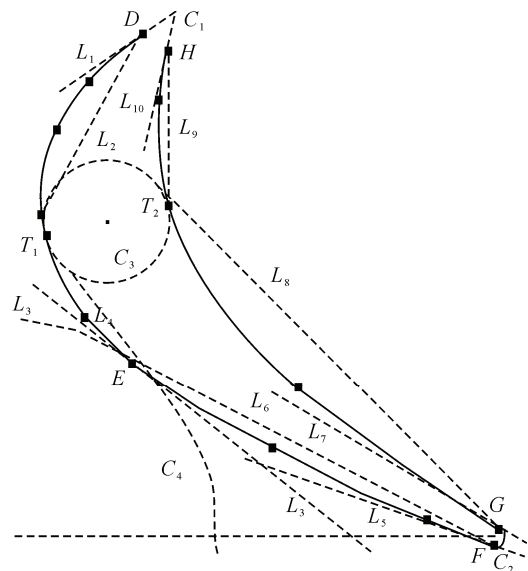


图2 叶背及叶盆曲线型值点的选取

表1 叶背及叶盆曲线型值点的选取方案

项目	叶背			叶盆	
曲线段名	DT_1 段	T_1E 段	EF 段	GT_2 段	T_2H 段
中间点数	2~3	1~2	2	1~2	1~2
约束条件	L_1 、 L_2 之间	L_3 、 L_4 之间	L_5 、 L_6 之间	L_7 、 L_8 之间	L_9 、 L_{10} 之间
说明	L_1 、 L_{10} 分别为过 D 、 H 点的前缘小圆的切线; L_2 为前缘小圆与最大内切圆的公切线; L_3 为最大内切圆与喉圆的公切线; L_4 为过 E 点的喉圆的切线; L_5 、 L_7 分别为过 F 、 G 点的后缘小圆切线; L_6 为喉圆与后缘小圆的公切线; L_8 、 L_9 分别是前缘和后缘小圆与喉圆的公切线。				

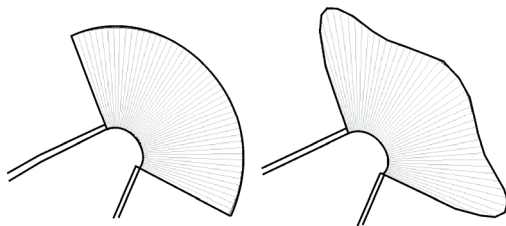
用相切来约束叶背和叶盆与前缘圆弧的关系,只能保证曲线间的连续性达到 $G1$ 连续。研究结果表明, $G1$ 连续前缘曲线会使气流产生较大的流动损

失。为使前缘部分的曲线达到 G2 连续, 对前缘用样条曲线重新构造, 并将前缘曲线与叶背及叶盆间的连接均设定为曲率连接, 这对整个截面的几何造型影响很小(图 3), 而连续性得到改善(图 4)。



(a) 样条叶片截面前缘的重心及主轴 (b) 圆弧前缘叶片截面的重心及主轴

图 3 截面的几何数据截图



(a) 以圆弧连接的前缘曲率变化 (b) 以样条曲线连接的前缘曲率变化

图 4 前缘曲率变化

2.2 叶身造型方法

叶身型面由多个外形截面积叠而成, 积叠线的可以是直线或者曲线, 积叠线相对于外形截面的位置主要有 3 种类型: 1) 通过前缘小圆中心; 2) 通过后缘小圆中心; 3) 通过截面形心。前 2 种类型的积叠线位置可直接通过参数确定, 而第 3 种类型的积叠线位置要以交互方式, 运行 CAD 软件的惯性测量功能获得。积叠线的起点位置确定后, 根据积

叠线方程 $z=f(x,y)$ 用规则曲线方法能绘制出整条积叠线, 再根据安装角沿叶身高度方向的变化规律 $\Delta\gamma=g(z)$, 即可确定每个截面的曲线的形状和方位, 进而用扫掠方法创建整个叶身型面。

3 涡轮叶片造型实例

以 CATIA 为平台, 借助于其知识工程模块的参数化方法, 发挥其强大的曲线曲面造型功能, 对给定参数的涡轮叶片进行三维设计^[9]。

3.1 参数创建及数据导入

CATIA 支持用 Microsoft Excel 表格创建设计参数并导入数据, 笔者采用 Excel 数据表格与宏命令相结合的方法^[10]。

首先创建如表 2 所示 Excel 表, 参数名及单位位于第一行, 参数值从第 2 行开始, 每行是一组, 具有建模所需的全部参数值。

再创建类似以下宏代码, 这段代码读取前面创建的 Excel 表, 其中第 06 行代码的末尾指向保存 Excel 表的完整路径(行号是后加的, 以便说明问题, 实际脚本程序中不应有行号), 表格的名称为“DesignTable1temp1.xls”。在零件的 Relations 节点(第 05 行)下创建 1 个长度“”参数“”和 1 个角度“”参数“”(第 09 行), 并建立设计表参数与零件参数之间的关联(第 10 和 11 行)。如此, 可将数据一次性导入 CATIA, 同时创建 CATIA 参数。

```
01 Language="VBSCRIPT"
02 Sub CATMain()
03 Set partDocument1 = CATIA.
```

ActiveDocument

表 2 涡轮叶片截面造型参数设计

Kt	beta1r/ (°)	beta2r/ (°)	beta2AV/ (°)	Delta/ (°)	// mm	Kr1	Kr2	KR _{max}	KR _{max} X	KR _{max} Y	omega1/ (°)	omega2/ (°)	Gama/ (°)
0.8	56	25	24.2	19	28.6	0.025	0.015	0.1	0.19	0.22	42	11.4	55

```
04 Set part1 = partDocument1.Part
05 Set relations1 = part1.Relations
06 Set designTable1 =
relations1.CreateDesignTable("设计表.1", "设计表
创建者 Administrator 2014/*/*", False, "H:\...\
DesignTable1temp1.xls ")
07 Set parameters1 = part1.Parameters
08 Set length1 =
parameters1.CreateDimension("`length1`",
"LENGTH", 10.000000)
09 Set angle1 = parameters1.
CreateDimension("`alf`", "ANGLE", 0.000000)
```

```
10 designTable1.AddAssociation length1, "`
length1`"
11 designTable1.AddAssociation angle1,
"`alf`"
12 designTable1.Configuration = 1
13 End Sub
```

3.2 创建叶片截面

创建宏, 将公式改写成宏代码, 确定几何要素在草绘平面上的位置, 调用相关绘图命令, 完成所有可由给定参数值完全确定的参考元素及叶片前缘圆弧和后缘圆弧的绘制。

1) 在平面内创建点, 点的坐标在括号内给出:

```
Set point2D1=factory2D1.CreatePoint(-40.00, 18.00)
```

2) 在平面内创建直线, 直线起止点坐标在第 1 语句的括号内给出:

```
Set line2D3= factory2D1.CreateLine(-55.00, -6.00, 15.00, -18.00)
```

3) 在平面内创建圆, 圆心点坐标及半径在第 1 语句的括号内给出, 前 3 条语句为创建圆的基本语句, 之后的 5 条语句是创建约束, 使圆与直线相切。

```
Set circle2D1 = factory2D1.
```

```
CreateClosedCircle(-40.00, 18.00, 26.00)
```

```
circle2D1.CenterPoint = point2D1
```

```
circle2D1.ReportName = 3
```

```
Set constraints1 = sketch1.Constraints
```

```
Set reference2 =
```

```
part1.CreateReferenceFromObject(circle2D1)
```

```
Set reference3 =
```

```
part1.CreateReferenceFromObject(line2D3)
```

```
Set constraint1 = constraints1.AddBiEltCst
```

```
(catCstTypeTangency, reference2, reference3)
```

```
constraint1.Mode =
```

```
catCstModeDrivingDimension
```

4) 在平面内创建样条曲线, 下面的代码实际上只创建了样条曲线上的一个控制点, 该控制点与已经创建的平面内的已知点“controlPoint2D1”重合。重复使用这组语句可创建多个控制点, 最终创建出样条曲线。

```
Set reference1 = part1.
```

```
CreateReferenceFromObject(controlPoint2D1)
```

```
Set controlPoint2D1 = spline2D2.GetItem("控制点.1")
```

```
Set reference2 = part1.
```

```
CreateReferenceFromObject(controlPoint2D1)
```

```
Set constraint1 =
```

```
constraints1.AddBiEltCst(catCstTypeOn, reference1, reference2)
```

```
constraint6.Mode =
```

```
catCstModeDrivingDimension
```

运用以上方法, 创建叶片截面曲线, 适当设定约束条件, 使叶背、叶盆和前缘曲线之间的连接达到 G2 连续。

3.3 创建叶片叶身型面

用交互方式选定积叠方式, 创建积叠轴线, 用截面扫掠工具创建叶身型面, 最终生成的涡轮叶片如图 5 所示。

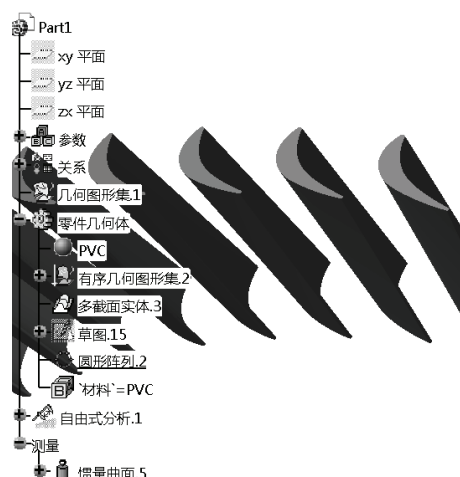


图 5 涡轮叶栅实例

3.4 截面造型的修改

对个别参数的微调可直接在设计表中进行, 修改设计表后保存, CATIA 文档将自动更新以与修改后的设计表同步。

大量修改或重新设计涡轮叶片, 只需将新的参数值输入原设计表中新的一行(比如第 N 行)并保存, 同样, CATIA 文档将自动更新以与修改后的设计表同步, 但新参数值不会自动生效, 要使其生效, 打开第 1 段宏代码, 修改第 12 行形如“designTable1.Configuration=N-1”, 再次更新 CATIA 文档, 就会按新的参数值创建零件。

3.5 截面曲线连续性及叶片型面连续性分析

用自由曲面模块的曲面分析工具对所创建涡轮叶片表面进行分析^[9], 图 4 是截面曲线曲率分析结果, 对表面光滑度的分析重点在前缘与叶背和叶盆的连接, 图 6 给出了斑马线分析结果, 不难看出: 无论是截面曲线还是叶片型面, 都达到 G2 级光滑。

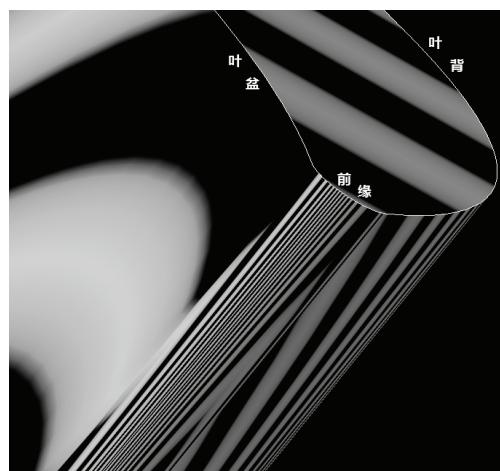


图 6 叶片型面光滑度分析