

汽轮机叶型的数字化及几何信息采集

徐旭岭, 丁旭东, 隋永枫, 张军辉

(杭州汽轮机股份有限公司 杭州 310022)

摘要: 针对引进技术的汽轮机叶型缺乏原始设计信息、商业软件间的衔接断层导致二次开发的困难等现状, 文中对此类叶型进行数字化处理并还原采集设计信息, 全过程主要涉及 NURBS 曲线生成、中弧线计算、叶型数据封闭以及平面图形几何计算等。研究同时进行了相应算法设计及程序编写, 通过与 SolidWorks 软件的部分计算结果的比对, 证明的这一系列方法的可行性和正确性。其成果将为以知识传承为基础的智能叶型开发研究奠定基础。

关键词: 叶型开发; NURBS 曲线; 中弧线; 计算几何

Digitization and Geometry Information Gathering of Turbine Blade Profile

XU Xu-ling, DING Xu-dong, SUI Yong-feng, ZHANG Jun-hui
(Hangzhou Steam Turbine Co., LTD, Hangzhou, 310022, China)

Abstract: In view of lacking of the original design information of the introduction technology steam turbine blade, and the re-development difficulty about commercial software because of its Engagement fault as well, this research makes the blade sections into digitization, returns and collection its original geometry and design information. The entire process mainly involves the NURBS curve production, the mean camber curve computation, the entire curve data seal of blade section, the plane figure geometry computation and so on. The research process has simultaneously designed the corresponding algorithm and carried on the programs. Comparing the part results of this program execution with the SolidWorks software computed, it proofs these serial of methods feasibility and accuracy. The result of this research will make the foundation of the intelligent blade section development based on the knowledge inheritance.

Key Word: blade profile development, NURBS curve, mean camber curve, computation geometry

0 引言

工业汽轮机是一种叶轮式原动机, 具有应用广、种类多、转速高、变速范围大和能直接驱动工作机等特点, 因而对其核心部件——叶片的设计与电站汽轮机相比亦具有其特点。设计成型的汽轮机叶型是以散点数据表达的, 特别是引进技术的叶型资料。这给在借鉴已有叶型的设计信息进行新叶型开发带来很大的困难, 因而按目前开发叶型的方式将已有叶型进行逆运算, 反求原始设计信息。这必将对新叶型开发工作具有指导性的意义。同时基于成功母型的开发工作的成功率和效率都将得到提高。本文正是基于这一思路对已有叶型进行数字化及对原始设计信息进行采集等方面展开研究。

1 理论过程

汽轮机叶型设计一般流程是:

- 1) 假定级的焓降进行一元热力计算, 确定叶高、平均截面的进出气角及子午面形式;
- 2) 进行径向三元流动(S_2 流面)进行无叶片逆运算, 确定叶片的扭曲规律(β_1, β_2)、流量等热力参数等沿叶高的变化;
- 3) 建立原始或针对性修正的叶型模型(几何造型);

作者简介: 徐旭岭(1977-), 男, 浙江淳安人, 工程师, 硕士, 从事汽轮机结构及热力分析、固体力学与结构智能优化等研究, E-mail: alyton@htc.cn.

4)进行径向三元流动有叶片正运算(CFD 计算), 检验出气角 β_2 、效率以及气动参数是否符合设计, 否则返回 3);

5)进行强度、振动计算(FEA 计算), 检验频率 f 及避开率、变形及应力水平是否符合设计, 否则返回 3);

6)叶型安装设计及出图。

可见, 步骤 3)是提高叶型开发有效性和效率的关键。以成功叶型或继承其有效信息的叶型为母型优化步骤 3)是一种有效的途径。所以对叶型设计信息(扭曲规律、厚度分布、几何属性等)的采集就成了重点和本文的中心。

基于曲线单调性和数据相容性的考虑, 数字化叶型所需的数据分为两类: 一是背弧和内弧散点数据, 不包括前缘和尾缘的圆上的数据; 二是前缘和尾缘的半径。数字化及信息采集的理论过程如图(1)所示。

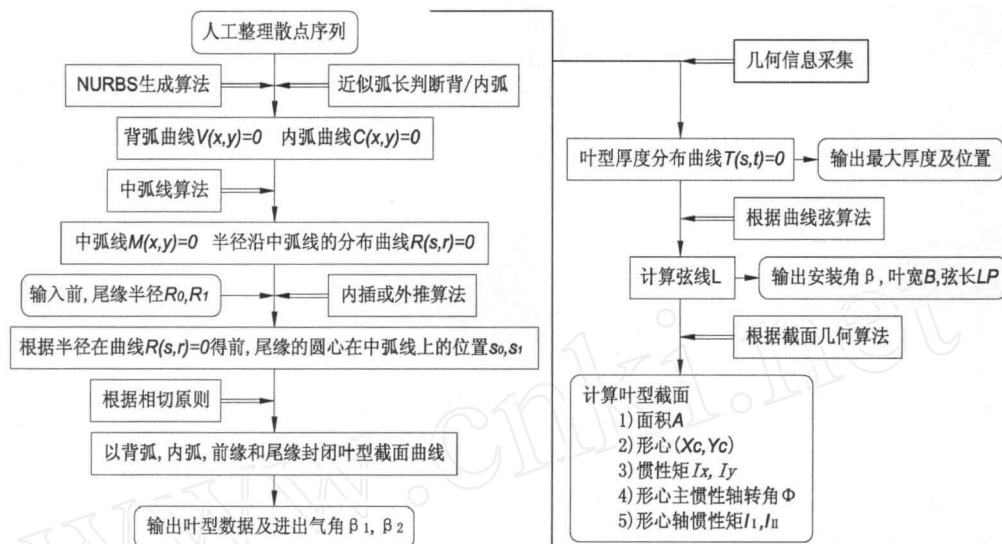


图 1 叶型计算全程

从图(1)可知, 数字化叶型的关键是 NURBS 生成算法, 而设计信息采集的关键是中弧线算法。

2 NURBS 生成算法

NURBS 是 Non-Uniform Rational B-Splines 的缩写, 即非统一有理 B 样条, 是一种非常优秀的建模方式。其基本数学表达式如式(1)所示。

$$P(u_{k+1}) = \frac{\sum_{j=0}^{n+k-1} d_j N_{j,k}(u_{k+1})}{\sum_{j=0}^{n+k-1} w_j N_{j,k}(u_{k+1})} = p_i \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (1)$$

其中 $N_{i,k}(u)$ 按 de-Boor-Cox 递推公式计算:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u \in [u_i, u_{i+1}] \\ 0 & u \notin [u_i, u_{i+1}] \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, n+k-1)$$

伪码算法描述如下:

定义基本变量: p1 为 NURBS 曲线上的计算点数, p[p1] 为点坐标

k 为样条的阶数, npluse 为节点个数

npts 为多边形的端点数, b[npts] 为相应点坐标

nplusc = npts + k;

```

置数组 nbasis[npts] 和 x[npluse] 为零;
计算一致性向量 x[npluse]=knot(npts,k);
确定步长 step = ((float)x[npluse])/((float)(p1-1));
for (il = 1; il <= p1; il++){ //计算 NURBS 曲线上的点坐标
    置参数 t = (float)x[npluse];
    计算 t 的功能数组 nbasis[npts]=rbasis(k,t,npts,x,h);
    计算坐标数组 p[p1];
    递增步长 step; }
返回 NURBS 曲线上坐标数组 p[p1];

```

3 中弧线算法

根据 GB/T15135-2002 中对中弧线的第二类定义：叶型中所有内切圆圆心的连线。以 $y=V(x)$ 、 $y=C(x)$ 分别表示背弧、内弧曲线，则中弧线即为求解方程组：

$$\begin{cases} (y_0 - V(x_1))V'(x_1) = x_1 - x_0 \\ (y_0 - C(x_2))C'(x_2) = x_2 - x_0 \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_0 - V(x_1))^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_0 - C(x_2))^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $(x_1, V(x_1))$ 和 $(x_2, C(x_2))$ 分别表示背弧和内弧上相对应的任意内切圆的切点， (x_0, y_0) 则为相应的内切圆的圆心。

本研究采用中弧线的逐次近似算法，与曲线一相切于 A 点的圆通过式(3)逐次收敛于曲线二的 B 点，通过中垂线使得加以始终在 AN 上并收敛于内切圆心 P 。

$$x_1^{(i+1)} = \frac{x_1^{(i)} + x_2^{(i)}}{2} \quad (3)$$

其算法图解示意，如图(2)。

求内切圆的基准点可根据计算要求进行选择。一般来说，进行叶型计算时选择背弧；进行通道计算时选择内弧。基准点在曲线上以一定步进方式行进至曲线终点。对于当前基准点 A 求内切圆的算法描述如下：

S1：求曲线 $y=V(x)$ 在 A 点的法线 AN ；

S2：求 AN 与 $y=C(x)$ 的交点 $B_1^{(0)}$ 和距离 $d = |AB_1^{(0)}|$ 及 $x_1^{(0)}$ ；

S3：取 $AB_1^{(0)}$ 中点 P_0 作以半径 $r_0 = |P_0A| = d/2$ 的圆 C_0 ；

S4：求 C_0 与 $y=C(x)$ 的另一个交点 $B_2^{(0)}$ 及其 $x_2^{(0)}$ ；

S5：以式(3)计算 $x_1^{(1)}$ ，即得 $y=C(x)$ 上点 $B_1^{(1)}$ ；

S6：作 $AB_1^{(1)}$ 的中垂线 M_1P_1 与 $AB_1^{(1)}$ 交于 P_1 ；

S7：以 P_1 为圆心，半径为 $r_1 = |P_1A|$ 的圆 C_1 ；

S8：求 C_1 与 $y=C(x)$ 的另一个交点 $B_2^{(1)}$ 及其 $x_2^{(1)}$ ；

S9：重复 S5-S8，至 $\varepsilon = |x_1^{(i)} - x_2^{(i)}| \leq \text{ZERO}$ 或 $AB_1^{(i)}$ 已与 $y=C(x)$ 相切无法求出 $B_2^{(i)}$ ，则最终 P_i 为内切圆圆心， $r_i = |P_iA|$ 为内切圆半径。

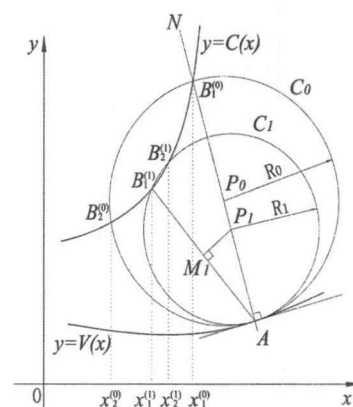


图2 逐次近似求内切圆

4 简单实例

为验证上述算法及程序的正确性和有效性，选择了某叶型的一断面进行分析。叶型断面数据如表 1 所示。经数据分析和试计算，由于前缘圆数据已经包括在散点序列中影响计算的成功性和结果的准确性，所以人工删除背弧数据中的前两点，在表 1 中已框出处理。

表 1 叶型坐标数据表

X_s	-65.67	-66.04	-65.75	-64.78	...	64.91	66.34	67.35	68.14
Y_s	-12.99	-11.93	-10.26	-7.98	...	-38.57	-41.32	-43.32	-44.94
X_D	-65.67	-64.65	-62.98	-60.67	...	61.06	63.12	64.6	65.79
Y_D	-12.99	-13.44	-13.31	-12.65	...	-41.29	-43.34	-45.13	-46.51
R_o	X_o	Y_o	R_1	X_1	Y_1	D_{max}	LP		
1.15	-64.83	-12.21	1.62	66.06	-44.38	18.04	137.78		

示例叶型如图 3 所示, (a)为原始叶型在 SolidWorks 中的计算结果, 与表 1 数据存在一定误差; (b)为程序计算结果的图示, 由于程序计算是以中弧线为基础, 因而可进一步得出叶型的进气角 $\beta_1 = 45^\circ$ 和出气角 $\beta_2 = 56^\circ$, 与(a)相比数据的准确性均较高。

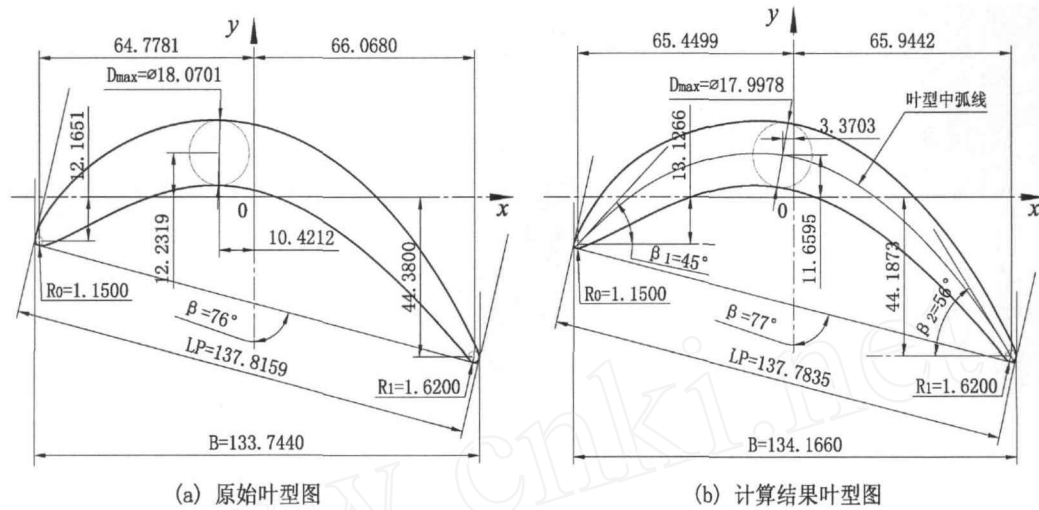


图 3 示例叶型截面图

对于叶型截面的其它几何属性图 3 中(a)、(b)对比如下表 2, 两叶型之间的相对误差仅为平均为 0.0809%。

表 2 几何属性对照表

项 目 \ 叶 型	(a)	(b)	比 较 (%)
面积 $A (mm^2)$	2166.08	2170.86	0.2207
形心 $C (mm)$	(-0.08, 0.09)	(-0.10, 0.12)	—
惯性矩 $I_x (mm^4)$	417982.12	418454.97	0.1131
惯性矩 $I_y (mm^4)$	2665684.50	2665619.85	-0.0024
形心主轴转角 $\Phi (^\circ)$	-14.10	-14.12	0.1418
形心轴惯性矩 $I_{I'} (mm^4)$	2817053.18	2817468.82	0.0148
形心轴惯性矩 $I_{II'} (mm^4)$	266613.44	266606.00	-0.0028

5 结 语

本文研究了以散点序列描述的叶型的数字化过程和原始设计信息的采集, 通过实例比较证明这一方法的可行性和有效性。研究过程中尚有一些欠完善之处:

- 1)对于安装角 $\beta \approx 90^\circ$ 时的叶型可进行旋转预处理以提高计算成功率;
- 2)为与后续研究衔接, 程序需进行 Win 窗体应用程序项目改造和对象的规范化定义;
- 3)厚度分布曲线上的外推算法在前缘曲线变化剧烈时存在一定的计算误差。

此研究是后续基于知识传承的智能叶片开发研究的基础性工作, 将此成果与热力计算、叶型自动生成、智能分析、CAE 技术进行有机结合才是真正的叶型开发有效途径。

参考文献:

- [1]吴厚钰. 透平零件结构和强度计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2][法]吉贝·德芒热, [法]让皮尔·晡热. 曲线与曲面的数学[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [3][美]P.M.普伦特. 样条函数与变分方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [4]GB/T 15135-2002, 燃气轮机 词汇[S].
- [5]陆启超. 中弧线的计算问题[J]. 数学的实践与认识, 1979(4).
- [6]孙钢峰. 叶片中弧线和最大叶型厚度的计算[J]. 汽轮机技术, 1988(2).
- [7]虞跨海, 岳珠峰. 涡轮冷却叶片参数化建模及多学科设计优化[J]. 航空动力学报, 2007,22(8).
- [8]周岳琨, 王建新, 管继伟 等. 汽轮机叶片设计和几何成型方法综述[J]. 汽轮机技术, 2001,43(4).
- [9]施英成, 陈文伟. 透平叶片型线设计的自动化及选型[J]. 应用科技, 1981(3).
- [10]刘会霞, 王霄, 蔡兰. AutoCAD 软件中样条曲线实现技术剖析[J]. 工程图学学报, 2003(3).

80201-606 // 13588062822

www.cnki.net