

文章编号:0559-9342(2005)03-0054-02

混流式水轮机转轮叶片的自由曲面构造

何士华, 张立翔, 武亮
(昆明理工大学, 云南昆明 650051)

关键词: 水轮机叶片; 数值模型; 自由曲线

摘要: 针对混流式水轮机叶片传统木模图的缺陷, 基于参数样条自由曲线造型理论, 从叶片木模图所提供的数据出发, 生成了叶片的数值模型, 为进行叶片振动特性及相关力学特性的数值分析计算提供了原始依据。

Numerical model of francis turbine runner blades

He Shi-hua, Zhang Li-xiang, Wu Liang

(Kunming University of Science & Technology, Kunming Yunnan 650051)

Key Words: francis turbine blade; numerical model; free curves

Abstract: According to the features and original data of the conventional wood-mould drawings of Francis turbine runner blade, the paper generates the numerical model of runner blades based on parametric spline curve method. The results could be the basis to study vibration and relevant mechanics characteristics of runner blades.

中图分类号: TM312

文献标识码: A

0 前言

混流式水轮机转轮叶片形状十分复杂, 传统的叶片工艺制作及放样主要依据叶片木模图(见图1)来实现^[1], 但对于流场计算、叶片强度和振动问题的数值分析计算以及计算机辅助设计和制造等, 传统的木模图已无法直接满足相应的要求^[2,3], 这时, 首先应正确、精确地给出叶片上点的坐标值, 将复杂的物理模型的几何形状用数值方法加以表达。

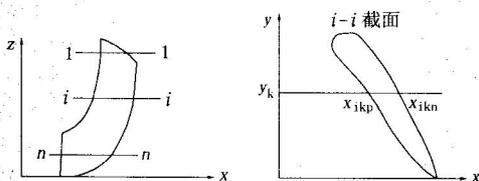


图1 混流式水轮机转轮叶片木模图示意

叶片数值模型生成的原始依据是叶片木模图。根据叶片木模图所给出的各水平截面(等z面)的数据(x,y), 取z轴为水轮机旋转轴, x轴位于叶片出口边平面, y轴与x轴在同一水平面内。自叶片出口边开始, 取不同位移角φ的旋转轴面与各水平截面相交, 由各交点的数据可绘制叶片各旋转轴面截线。对按ω_z=0(ω_z为旋涡向量在圆柱坐标系(r,z,φ)中的φ轴上的分量)的二元理论方法设计的叶片, 其进、出口边均为轴面截线。

根据某混流式水轮机模型转轮叶片的木模图(模型与原

型比例为1:4), 利用上述方法绘制的叶片各旋转轴面截线如图2所示。

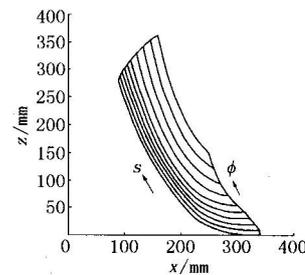


图2 混流式水轮机转轮叶片轴面截线

1 混流式水轮机转轮叶片数值生成的基本原理

在自由曲面生成和造型技术中, 一般曲面用参数表示更具优越性, 即用含有两个参数φ,s∈[0,1]的双参数方程表示:

$$\begin{cases} x=x(\phi, s) \\ y=y(\phi, s) \\ z=z(\phi, s) \end{cases} \quad (1)$$

令图2所示的轴面截线为φ向线, 下面应用参数样条曲

收稿日期: 2004-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重大基础研究计划项目(90210005)

作者简介: 何士华(1963—), 男, 湖北天门人, 博士, 副教授, 主要从事水力机械研究工作。

线理论生成叶片的整张曲面。

在直角坐标系中给定 $n+1$ 个型值点 $P_i(x_i, y_i, z_i), i=0,1,2, \dots, n$, 构造三个以累加弦长 s 为参数的插值样条函数:

$$\begin{cases} x=x(s) \\ y=y(s) \\ z=z(s) \end{cases} \quad (2)$$

分别插值于点集 $(s_i, x_i), (s_i, y_i)$ 和 $(s_i, z_i), i=0,1, \dots, n$ 。

对给定的型值点 $P_i(x_i, y_i, z_i), i=0,1,2, \dots, n$, 相邻两个型值点之间的弦长为:

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad \text{即 } i=1,2, \dots, n \quad (3)$$

与型值点 $P_k(k=1,2, \dots, n)$ 相应的累加弦长为:

$$s_0=0, s_k = \sum_{j=1}^k |P_{j-1} - P_j| = \sum_{j=1}^k l_j, \quad k=1,2, \dots, n \quad (4)$$

采用三次样条函数表达式为: $x=x(s), y=y(s), z=z(s)$ 。如以 $x=x(s)$ 表达为例, 则由(4)式得到的型值点列 $(s_i, x_i), i=0,1, \dots, n$, 第 i 段样条可表示为

$$x(s) = a_i s^3 + b_i s^2 + c_i s + d_i \quad (5)$$

令第 i 段首端通过点 (s_{i-1}, x_{i-1}) , 斜率为 m_{i-1} ; 末端通过点 (s_i, x_i) , 斜率为 m_i 。利用上述条件求出 a_i, b_i, c_i, d_i , 可得

$$x(s) = m_{i-1} \frac{(s-s)^2(s-s_{i-1})}{h_i^2} - m_i \frac{(s-s_{i-1})^2(s-s)}{h_i^2} + x_{i-1} \frac{(s-s)^2[2(s-s_{i-1})+h_i]}{h_i^3} + x_i \frac{(s-s_{i-1})^2[2(s-s)+h_i]}{h_i^3} \quad (6)$$

式中, $h_i = s_i - s_{i-1}$ 。

根据相邻两曲线段在型值点处的二阶导数连续的条件, 可得 $n-1$ 个插值三次样条函数的 m 连续方程, 再补充首、末两端的边界条件, 即可求出各 $m_i^{[4,5]}$ 。

2 混流式水轮机转轮叶片的数值生成

根据混流式水轮机叶片木模图所提供的原始数据^[6], 应用累加弦长三次参数样条曲线方法生成叶片数值模型的基本步骤如下:

(1) 从叶片出口至进口, 取不同的旋转轴面位移角, 绘制叶片的各轴面截线(如图2所示)。为保证各轴面截线的完整性和弦长计算的精确性, 笔者应用最小二乘法对轴面截线的端部进行了延展, 应用插值三次样条函数对轴面截线进行了补插。

(2) 从叶片下环处开始, 对经补插和延展后的每一轴面截线, 应用公式(3)计算相邻两个型值点之间的弦长, 应用公式(4)计算累加弦长, 构造以累加弦长 s 为参数的三个插值三次样条函数 $x=x(s), y=y(s), z=z(s)$ 。

图2所示从叶片出口至进口的10条轴面截线, 经计算得总弦长依次为 $s_{m1}=408.22 \text{ mm}, s_{m2}=403.84 \text{ mm}, s_{m3}=396.69 \text{ mm}, s_{m4}=386.45 \text{ mm}, s_{m5}=374.15 \text{ mm}, s_{m6}=358.42 \text{ mm}, s_{m7}=336.16 \text{ mm}, s_{m8}=310.56 \text{ mm}, s_{m9}=280.49 \text{ mm}, s_{m10}=247.94 \text{ mm}$ 。

(3) 为保证所生成的叶片数值模型网格划分的均匀性, 将各轴面截线的累加总弦长平均分段(本文取为15等分), 并根据等分弦长, 从叶片下环处开始再次计算累加弦长。

(4) 对每一轴面截线, 根据等分弦长计算得到的累加弦长, 进行累加弦长三次参数样条插值, 即可得到叶片曲面的数值模型, 如图3所示。其主、俯视图如图4所示。

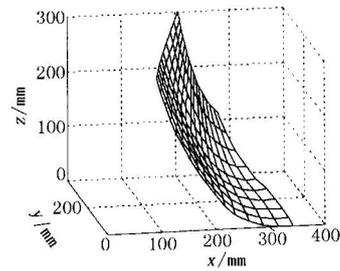


图3 混流式水轮机叶片的数值生成

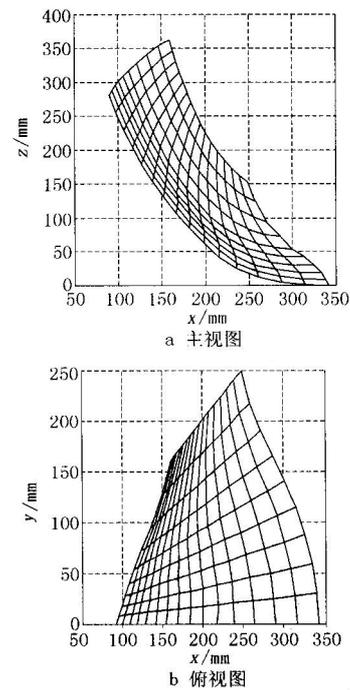


图4 混流式水轮机叶片主、俯视图

3 结论

为了适应传统手工制作和放样的需要, 在绘制混流式水轮机叶片的木模图时, 将沿流线和轴面截线方向的数据转换到了水平截面上, 但水平截面所提供的数据无法直接应用于研究分析叶片的振动特性、力学规律和几何特点。本文基于自由曲线曲面造型理论所生成了混流式水轮机叶片的数值模型, 为后续各种应用提供了原始依据。

参考文献:

- [1] 曹鹏, 姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [2] 梁武科, 罗兴琦, 吴广宽. 混流式水轮机叶片自由曲面的延展[J]. 水利学报, 2003(5):69-73.
- [3] 张立翔, 何士华. 混流式水轮机叶片流激振动的数学描述[J]. 水动力学研究与进展, A集, 2004, 19(5):585-592.
- [4] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 苏步青, 刘鼎元. 计算几何[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [6] 齐学义, 潘中水, 牛玉法. 混流式水轮机转轮强度的样条有限元求解[J]. 水力发电, 1998(12):31-33.