

文章编号: 1674-8085(2017)03-0087-06

# 轴流式水轮机叶片建模与优化

\*朱 波, 王幼民, 赵天一

(安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽, 芜湖 241000)

**摘 要:** 在枯水期, 由于转轮叶片效率低, 一些地区轴流式转轮不能发电。为了解决这一问题, 改善转轮叶片非圆曲线的设计尤为重要。当前, CAD 软件不能够对非圆曲线进行延伸, 在分析其原因的基础上引入了趋势外推法。研究了各段翼型截面的分布规律, 建立了多项式曲线延伸数学模型, 利用 MATLAB 软件的编程找到叶片已知点的内外侧延伸点以及运用 MATLAB 软件的曲线拟合功能来改善叶片的形状, 以使叶片表面趋于光滑, 从而减小功率损耗和提高运行效率。为了完善非圆曲线智能延伸功能, 基于 C++编程, 对 NX 软件进行二次开发, 进一步优化了轴流式转轮叶片。

**关键词:** 转轮叶片; 非圆曲线; 趋势外推法; 智能延伸; 二次开发

中图分类号: TK733<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2017.03.015

## MODELING AND OPTIMIZATION OF AXIAL FLOW TURBINE BLADES

\* ZHU bo, WANG you-min, ZHAO tian-yi

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

**Abstract:** Due to the low efficiency of runner blades, axial flow runner in some areas cannot generate electricity during dry season. To solve this problem, it is particularly essential to improve the design of non-circular curves for runner blades. Non-circular curves cannot be extended by CAD nowadays. Trend extrapolation method was introduced on the basis of analyzing the reason. The distribution regularity of various airfoil sections was researched. Polynomial curve extension mathematical model was established. The inside and outside extension points of known points for blades were found by adopting MATLAB programming. The shape of blades was improved by using the curve fitting function of MATLAB so that the surface of blades tends to smooth, which will reduce losses and improve efficiency. To improve the intelligent extension function of non-circular curves, the secondary development of NX based on C++ programming was conducted. The axial flow runner blades were further optimized.

**Key words:** runner blade; non-circular curve; trend extrapolation; intelligent extension; secondary development

我国一些地区的储水量和季节有着密切的关系。枯水期水的流量减小较多, 可能使轴流式水轮机运行工况点远离其有效工作区, 导致出力急剧下降乃至带不上负荷, 最终只得停止发电。其原因主要是水轮机转轮叶片的非圆曲面部分设计得不精

确, 从而导致运行效率降低。在美国, 弗吉尼亚理工大学对水电赋予了全新的概念。他们相信, 随着科技的发展, 先进技术将逐步应用于水轮机叶片的设计和制造。此外, 基于多目标优化设计的水轮机叶片效率将近 90%。当前, 对于轴流式转轮叶片非

收稿日期: 2016-10-23; 修改日期: 2017-01-05

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金重大项目(KZ00216014)。

作者简介: \*朱 波(1991-), 男, 安徽滁州人, 硕士生, 主要从事机械制造及其自动化方面研究(E-mail: 1752961431@qq.com);

王幼民(1964-), 男, 湖北孝感人, 教授, 主要从事流体传动与控制(E-mail: 1579513704@qq.com);

赵天一(1994-), 男, 安徽宿州人, 硕士生, 主要从事机械工程方面的研究(E-mail: 1792168590@qq.com)。

圆曲面部分的设计,大多采用三维软件进行直接建模,如投影法;或者通过简易的计算如算术平均法,而后再建模。三维软件在设计中经常使用,可是这些软件并不适合用来对非圆曲线进行延伸,在对曲线的生成上存在着诸多缺陷,导致了曲线的失真性,使其在后期的延伸和建模上产生越来越大的误差,最终可能会导致曲面变得面目全非。算术平均法也是粗略的计算,不准确。本文采用趋势外推法<sup>[1-2]</sup>对非圆曲面进行延伸。趋势外推法是从以前和现在的发展状况来预测未来发展的方法,现在正广泛地应用于科技、经济和社会发展的判断<sup>[3]</sup>。趋势外推法可以近似地估计曲线的走向,不过这种估计并不是那么简单,需要对所研究的转轮叶片的数据进行大量的采集与研究,对这些数据所对应的部分曲面进行延伸。翼型截面都是通过成熟理论计算而来,随着计算机辅助设计方法及理论的成熟,利用 MATLAB 软件进行编程,通过趋势外推法建立数学延伸模型。另外,利用 MATLAB 软件中的曲线拟合功能最大限度地降低曲线的失真性,并且利用基于趋势外推法的曲线智能延伸模型对水轮机转轮叶片进行动态延伸,得到所需要的水轮机叶片拟合效果图。随着科技的快速发展,计算机技术已广泛地应用于研究转轮叶片的设计和制造。计算机辅助设计可以应用于水轮机转轮叶片的水力设计,并将大大地提高转轮叶片的设计精度和运行效率。

## 1 设计理论

翼型截面展开图向流面圆柱面转化技术被使用。将已知木模图中平面直角坐标系中对应点的坐标 $(x_j^i, y_j^i)$ 转换成空间柱坐标系的坐标 $(\rho_j, \theta_j^i, Z_j^i)$ ,

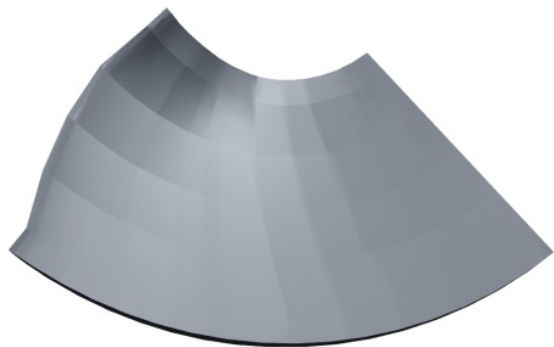


图1 投影法叶片模型

Fig.1 Blade model via projection

再转为空间笛卡尔坐标系的坐标 $(X_j^i, Y_j^i, Z_j^i)$ ,转化计算分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} \rho_j \\ \theta_j^i \\ Z_j^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_j \\ x_j^i \\ y_j^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_j^i \\ Y_j^i \\ Z_j^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_j \cos \theta_j^i \\ \rho_j \sin \theta_j^i \\ y_j^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $i=1,2,\dots,40$  表示每段翼型截面上点的编号,  $j=1,2,3,4,5$  表示各段翼型截面的编号,  $R_j$  表示第  $j$  个翼型截面在空间柱坐标系下的半径。

## 2 传统轴流式转轮叶片建模

已知转轮叶片翼型截面展开图的流面圆柱面的转化技术,确定了基于投影法和算术平均法的两种传统的转轮叶片非圆曲面延伸方案。

### 2.1 基于投影法建模

首先,将通过翼型截面展开图向流面圆柱面转化技术得到的点导入到 NX 软件中,通过样条曲线把各段翼型截面曲线以及各段翼型截面相应点对应的曲线进行拟合,然后利用投影法<sup>[4]</sup>分别将已知五段翼型截面的内外侧曲线投影到半径分别为  $R_6$ 、 $R_7$  的柱面上,形成内外侧边缘曲线 6、7 段,通过曲线组来形成转轮叶片曲面延伸后的模型。基于投影法设计输出的转轮叶片模型和转轮模型分别如图 1 和图 2 所示。

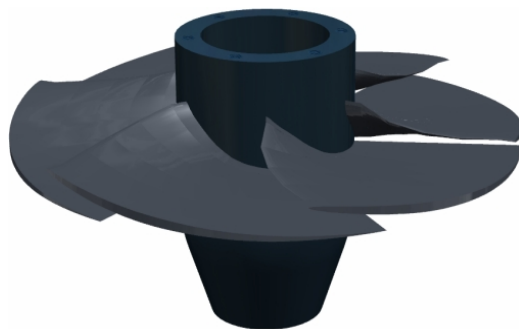


图2 投影法转轮模型

Fig.2 Runner model via projection

## 2.2 基于算术平均法建模

### 2.2.1 内外侧翼型截面曲线上对应点坐标求解

所给各段翼型截面曲线的间距相等, 曲线上点的横坐标近似用算术平均法求解, 如式 (3) 所示。

$$P_i = \frac{1}{4} \sum_{j=2, i=1}^{j=5, i=40} (X_j^i - X_{j-1}^i) \quad (3)$$

内外侧翼型截面曲线延伸点横坐标分别为:

$$\begin{cases} X_6^i = X_5^i + \frac{P_i}{2} \\ X_7^i = X_1^i - \frac{P_i}{2} \end{cases}, i=1, 2, \dots, 40 \quad (4)$$

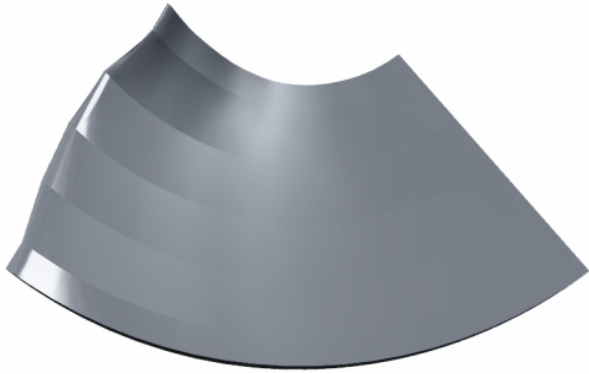


图3 算术平均法叶片模型  
Fig.3 Blade model via arithmetical average

同理, 可求出 Y, Z 的值, 即得到已知翼型截面曲线的内外侧延伸截面曲线。

### 2.2.2 基于算术平均法的转轮叶片建模

将由算术平均法求得的内外侧延伸点和已由翼型展开图向流面圆柱面转化的点分别通过各段截面曲线和对应点拟合曲线的形式导入 NX 软件, 并建立相应的转轮叶片模型。按算术平均法设计输出的转轮叶片模型和转轮模型分别如图 3 和图 4 所示。

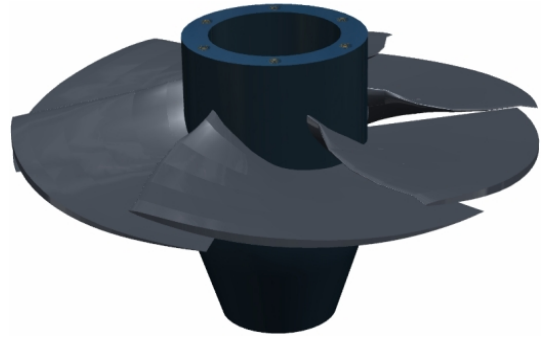


图4 算术平均法转轮模型  
Fig.4 Runner model via arithmetical average

## 3 新型轴流式转轮叶片建模及优化

已知五段翼型截面, 主要需要完成的是对各段翼型截面相应点构成的曲线延伸<sup>[5]</sup>, 故选择四次多项式曲线模型。

### 3.1 基于趋势外推法建模

#### 3.1.1 建立四次多项式曲线延伸模型

在 XY 平面内的曲线延伸模型如式 (5) 所示。

$$Y = aX^4 + bX^3 + cX^2 + dX + e \quad (5)$$

在 XZ 平面内的曲线延伸模型如式 (6) 所示。

$$Z = fX^4 + gX^3 + hX^2 + iX + j \quad (6)$$

#### 3.1.2 确定四次多项式方程系数

取  $j$  截面上一个点  $i$  编号为例子, 根据五个截面上五个对应的点坐标 (X, Y, Z), XY 和 XZ 平面内的曲线延伸模型的所有系数的求解如式 (7) 所示。

$$\begin{bmatrix} Y_1^i \\ Y_2^i \\ Y_3^i \\ Y_4^i \\ Y_5^i \\ Z_1^i \\ Z_2^i \\ Z_3^i \\ Z_4^i \\ Z_5^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_1^i)^4 & (X_1^i)^3 & (X_1^i)^2 & (X_1^i)^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (X_2^i)^4 & (X_2^i)^3 & (X_2^i)^2 & (X_2^i)^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (X_3^i)^4 & (X_3^i)^3 & (X_3^i)^2 & (X_3^i)^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (X_4^i)^4 & (X_4^i)^3 & (X_4^i)^2 & (X_4^i)^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (X_5^i)^4 & (X_5^i)^3 & (X_5^i)^2 & (X_5^i)^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_1^i)^4 & (X_1^i)^3 & (X_1^i)^2 & (X_1^i)^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_2^i)^4 & (X_2^i)^3 & (X_2^i)^2 & (X_2^i)^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_3^i)^4 & (X_3^i)^3 & (X_3^i)^2 & (X_3^i)^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_4^i)^4 & (X_4^i)^3 & (X_4^i)^2 & (X_4^i)^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (X_5^i)^4 & (X_5^i)^3 & (X_5^i)^2 & (X_5^i)^1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^i \\ b^i \\ c^i \\ d^i \\ e^i \\ f^i \\ g^i \\ h^i \\ i^i \\ j^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.1.3 确定转轮叶片内外侧延伸点坐标

由于各段翼型截面是翼型展开图向流面圆柱面转化而来的,所以已知各段翼型截面和未知的延伸的各段翼型截面相对于原点的距离可以得到。联立 XY 和 XZ 平面建立的曲线延伸模型建立方程组如式(8)所示。

$$\begin{cases} a^i(X_k^i)^4 + b^i(X_k^i)^3 + c^i(X_k^i)^2 + d^i(X_k^i) + e^i = Y_k^i \\ (X_k^i)^2 + (Y_k^i)^2 = R_k^2 \\ f^i(X_k^i)^4 + g^i(X_k^i)^3 + h^i(X_k^i)^2 + i^i(X_k^i) + j^i = Z_k^i \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $k=6, 7$  是所求转轮叶片的内外侧延伸点所在的截面。由前两个式子消去  $Y_k^i$ , 可得一个八次多项式方程,在 MATLAB 中建立关于  $X_k^i$  的 roots 矩阵

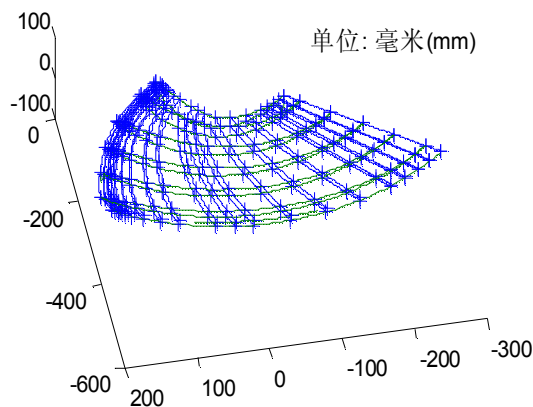


图5 延伸后的立体图

Fig.5 Space diagram after Extending

### 3.1.5 基于趋势外推法的转轮叶片建模

采用趋势外推法原理,建立四次多项式数学延伸模型,通过在 MATLAB 软件中编程,可以较准确地求出内外侧延伸的点以及实现转轮叶片非圆

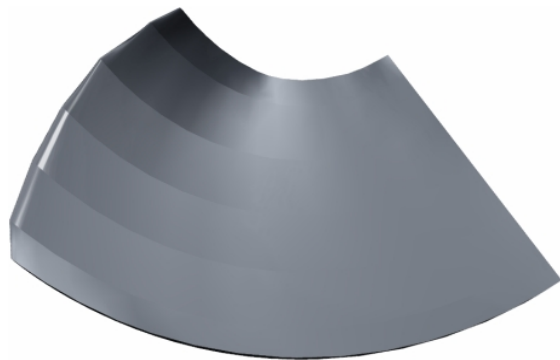


图7 趋势外推法叶片模型

Fig.7 Blade model via trend extrapolation

函数求出  $X_k^i$  的 8 个解向量,根据  $X_k^i$  的范围确定  $X_k^i$  并求出  $Y_k^i$ ,  $X_k^i$  代入第三个式子求出  $Z_k^i$ , 即得到内外侧延伸点坐标。

### 3.1.4 基于 MATLAB 的 spline 函数拟合

在 MATLAB 中编程<sup>[6]</sup>,建立相应的动态延伸模型。首先,对每段翼型截面进行拟合,由于闭合曲线坐标的非线性关系,将坐标进行了分组,1-18 点为一组,18-21 点为一组,21-40 为一组,40-1 点为一组。再对各段翼型截面对应点进行曲线拟合<sup>[7-8]</sup>,就可以得到拟合后的转轮叶片模型。在 MATLAB 中的曲面延伸立体图和俯视图分别如图 5 和图 6 所示。

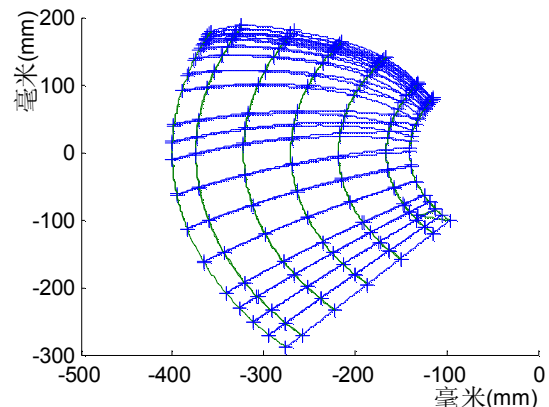


图6 延伸后的俯视图

Fig.6 Top View after Extending

曲线的智能延伸。将得到的点和已求得点分别通过各段截面曲线和对应点拟合曲线的形式导入 NX, 建立相应的模型。基于趋势外推法设计输出的叶片模型和转轮模型分别如图 7 和图 8 所示。

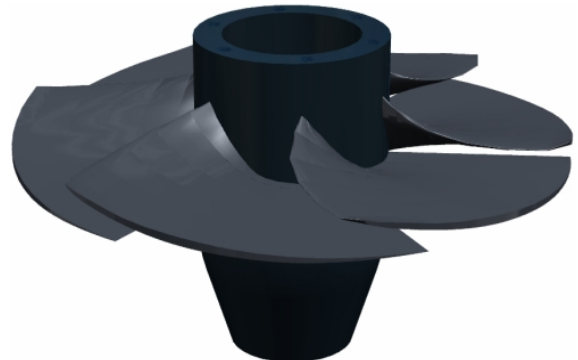


图8 趋势外推法转轮模型

Fig.8 Runner model via trend extrapolation

### 3.2 基于 NX 二次开发的模型优化

当利用 NX 软件建模的时候,如果只是使用拟合样条曲线和通过曲线组来建模,每次拟合的都是当前的和局部的,考虑不到后续的拟合,这通常会导致叶片曲面不光滑。基于 Visual C++ 程序编程,对 NX 进行二次开发<sup>[9-10]</sup>。在 NX Open Grip 环境下运行程序,使叶片曲面的拟合一次完成,实现对整个叶片曲面拟合的全局考虑,避免因多次通过曲线组而使叶片表面不够光滑。

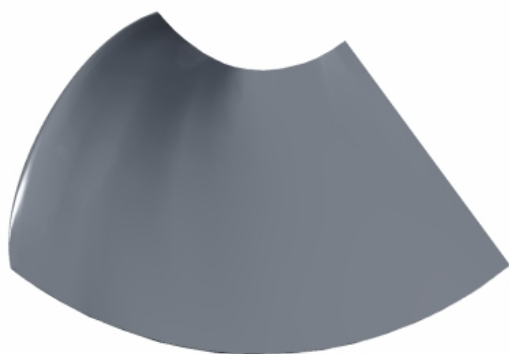


图 9 优化后叶片模型

Fig.9 Blade model optimized

由图 9 和图 10 所示,基于趋势外推法建立的转轮模型通过 NX 二次开发后,转轮叶片曲面变得更加的自然和光滑,叶轮运行效率也显著提高。

### 3.3 三种建模方案比较

由以上各模型图可知,三种方案得到了三种叶片模型图,下面对各建模方法进行综合比较。投影法是三维建模中常用的预测叶片起始边缘的方法,此方法可以在三维软件中粗略地画出模型,可以近似估计转轮叶片曲面的大致走向。在基于投影法建模的过程中,内外侧边缘的翼型截面曲线是由次内外侧翼型截面曲线投影而来。叶片只是水平向内外圆柱面投影,没有能够随着曲线姿态而自然延伸。算术平均法是在基于翼型截面特殊分布的情况下使用的,也可以近似估计叶片曲面的大致情况,计算方法不精确,所得模型不理想。在基于算术平均法求叶片次内外侧曲线上的点延伸到内外侧边缘的对应点坐标时,叶片在弯曲段延伸得不自然,算术平均法延伸使叶片过于机械化。趋势外推法可以根据叶片曲面上曲线的发展趋势推断未来延伸的情况,可以较准确的描述出叶片自然延伸的姿态。趋势外推法是根据已求得的还原翼型截面曲线对

首先,在某盘中建立 Grip 文件夹;接着,建立相应的 C++ 程序;然后,在 NX 工具里 NX Open Grip 中运行所建立的程序。在 NX 软件中通过拟合样条中的文件夹将每条曲线导入其中,然后在 Grip 中选择 sphere.grx,按顺序依次选择拟合曲线,首尾相接,生成相应的 B-曲面。基于 NX 二次开发环境下叶片的优化模型和最终的转轮模型分别如图 9 和图 10 所示。

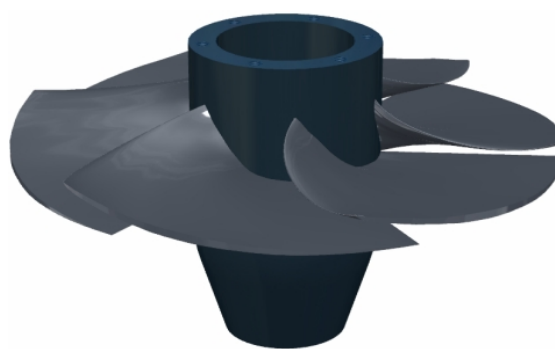


图 10 优化后转轮模型

Fig.10 Runner model optimized

应点建立的精确数学模型,通过 MATLAB 软件的编程求得所需的内外侧边缘曲线上对应点的三坐标,并且通过编程实现曲线延伸,另外,在叶片建模过程中,由于转轮叶片需要多次通过曲线组,导致转轮叶片表面光滑度不够,基于 Visual C++ 编程,对 NX 软件进行二次开发,在 NX 软件中完成转轮叶片的智能拟合,得到优化后的光滑叶片模型,大大提高了转轮的工作效率。

## 4 实例分析

选用 ZD560 轴流定桨式水轮发电机,其基本参数为:设计龙头  $H=13\text{ m}$ ,原先流量  $Q=1.42\text{ m}^3/\text{s}$ ,叶轮转速  $n=814\text{ r/min}$ ,公称直径  $d=800\text{ mm}$ ,当流量从雨季的  $4\text{ m}^3/\text{s}$  降到旱季的  $1.42\text{ m}^3/\text{s}$  时候,效率仅仅  $\eta=27.4\%$ 。水轮机无法正常发电。

为了减小功率损耗并且提高转轮的运行效率,采用减速增容的方法,设计一个新的转轮,轮毂比为  $0.4$ ,保证效率  $\eta$  取  $80\%$ 。其最终参数为:优化流量  $Q'=0.73\text{ m}^3/\text{s}$ ,优化转速  $n'=184.7\text{ r/min}$ ,公称直径  $d'=800\text{ mm}$ ,叶片个数为  $6$ ,该实际转轮图如

图 11 所示。通过优化设计后的转轮效率为  $\eta' = 82.7\%$ ，在枯水期能够正常发电。



图 11 实际转轮  
Fig.11 Actual runner

## 5 结论

1) 已知五段翼型截面上所有对应的五个点，这五个点在接近水平的时候，用投影法可以近似估计延伸的位置，可是在弯曲段，内外侧延伸点由上往下自由延伸，如果用投影法只能水平延伸，误差非常大；用算术平均法可以近似求出内外侧点的坐标，预测叶片的模型，虽然可以近似求出坐标，可是类似于一组离散数据的线性回归，有一定的误差；趋势外推法可以根据五个点延伸的趋势进行延伸。根据函数幂次越大，弯曲越明显的趋势可知，如果选取中间一部分点进行延伸，所得的延伸曲线比实际曲线要平缓，而且五段截面对应的五个点距离也挺大的，故选择五组数据进行求多项式函数。

2) 为了完善非圆曲线延伸功能，基于 C++编程对 NX 软件进行二次开发，进一步优化了轴流式

转轮叶片的曲面建模，从而减小了功率损耗并且提高了转轮的运行效率，并且通过实例证明了优化后的转轮叶片运行效率明显提高，设计方案合理。

### 参考文献:

- [1] 郭英,党亚民,卢秀山. 基于时间序列趋势外推改进模型的 SISE 预测[J]. 测绘科学, 2007, 32 (1): 34-52.
- [2] 吴修彬,孙召瑞,孙贵斌,等. 曲线趋势外推延伸方法研究及其应用[J]. 制造业自动化,2014,36(4): 100-103.
- [3] 杨立群,王小万,冯丙华. 基于指数平滑方法的我国政府卫生支出分析[J]. 中国卫生经济, 2011, 30 (1): 22-23.
- [4] 陈剑平,卢波,谷宪民,等. 用投影法求算岩体结构面三维连通率[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15): 2617-2621.
- [5] 谢锐杰,朱广生,刘鹏. VSP 时深曲线的向下延伸[J]. 新疆石油地质, 2000, 21 (6): 468-469.
- [6] 吴小平,把多铎,胡沙沙,等. 基于 MATLAB 离心泵特性曲线的拟合与绘制[J]. 中国农村水利水电, 2010,(11): 144-146.
- [7] 谭晓慧,余伟,沈梦芬,等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J]. 岩土力学, 2013, 34 (S2): 51-56.
- [8] 潘林有,谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, 25 (7): 1053-1058.
- [9] 刘爱军,张一兵,洪敏. 基于 C++与 UG 制动器衬垫三维建模与二次开发[J]. 装备制造技术,2008(8): 98-100.
- [10] 唐杰,张祥林. C++在 UG 二次开发中应用[J]. 现代机械, 2007(1): 80-83.