

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.06.025

# 水轮机转轮准三维反问题设计及流场性能分析

杨峰

(电子科技大学 成都学院电子工程系, 四川 成都 611731)

**摘要:**为设计出高质量的水轮机转轮叶片,确保机组运行时各项性能指标良好,在某小型混流式水轮机的转轮设计中,采用准三维反问题设计方法获得了叶片翼型的形状及尺寸数据并建立了转轮模型,再通过对机组全流道的流场性能分析以及效率和出力计算,得到了机组内部流态顺畅且效率和出力均满足要求的研究结果。研究表明,以转轮流场状态为依据的准三维反问题叶片设计,能有效实现机组转轮与电站水文参数条件的良好匹配,进而达到提升机组效率和稳定性的目的。

**关键词:**水轮机;转轮;反问题设计;流场性能

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)06-0098-03

## Inverse Design and Fluid Analysis of Water Turbine Runner

YANG Feng

(Chengdu College, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** The article discusses the design method of turbine runner blade with good performance. It takes the francis turbine for example, designs the runner blade, based on the inverse design method and builds its 3D model. By analyzing the characteristics of the flow field and calculating the efficiency and output, the result of the flow condition inside turbine is obtained. The inverse design method based on the flow characteristic is suitable for the power station. It can be used to improve the performance efficiency and stability of the units.

**Keywords:** water turbine; runner blade; inverse design; flow characteristic

## 0 引言

转轮是实现水轮机能量转换的核心部件,它对机组的流态、效率等指标均有重要影响。因此,水轮机转轮设计是非常关键的环节。目前转轮的主要设计方法有直接选型和相似性设计法两种。其中,直接选型<sup>[1]</sup>是根据电站水头、流量等条件,在型谱中选择合适的转轮类型;相似性设计法<sup>[2]</sup>则是以条件相似的电站机组作为参照,选择相同的转轮型号,再按几何相似计算其尺寸。这两种方法的设计周期较短且能够保证基本的性能指标,但问题在于:1)在一定的条件范围内(如水头、流量以及装机容量等),可选择的转轮往往不只一种,采用直接选型无法确定最优方案;2)两个电站的条件不可能完全相同,采用相似性原则选择的转轮不一定与电站完全适应,导致机组运行时容易偏离最优工况,影响其性能。所以,从准确把握机组流态特性的角度出发,准三维反问题设计<sup>[3]</sup>的转轮具有更好的适应性。综上所述,采用准三维反问题设计混流式水轮机转轮叶片,并进行流场特性分析、效率及出力计算,对于准确把握机组的流场规律,确保各项性能指标以及经济性良好等,都具有重要的理论和工程价值。

## 1 转轮叶片的准三维反问题设计及模型构建

### 1.1 准三维反问题设计方法

准三维反问题设计的原理<sup>[4]</sup>:以转轮流场的周期性特征为基础,把流场分解为2个速度分量(周向分量和周期性分量)进行求解。同时,根据叶片的光滑绕流情况构建控制方程,其中周向分量的流函数表达式<sup>[5]</sup>为:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{\partial r \bar{V}_\theta}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\partial r \bar{V}_\theta}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $r, z$ 分别为三维空间坐标方向向量; $\psi$ 为流函数; $f$ 为转轮叶片的包角; $r \bar{V}_\theta$ 为流场的周向速度分量。

周期性分量的速度势函数表达式<sup>[5]</sup>为:

$$\frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial z^2} - \frac{n^2 D^2}{r^2} \varphi_n = \frac{e^{-inDf}}{inD} \nabla^2 r \bar{V}_\theta - e^{-inDf} \left( \frac{\partial r \bar{V}_\theta}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\partial r \bar{V}_\theta}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中: $\varphi_n$ 为势函数; $n$ 为Fourier展开项; $D$ 为转轮叶片数; $i$

基金项目:四川省教育厅自然科学项目(14ZB0385)

作者简介:杨峰(1982—),女,四川成都人,讲师,硕士,主要从事机械设计制造及其自动化方面的研究和教学工作。

为虚向量。

由于转轮叶片的光滑程度直接关系到水流顺畅与否,故光滑的绕流边界是叶片必须满足的条件,基本表达式<sup>[5]</sup>为:

$$V_z \frac{\partial f}{\partial z} + V_r \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{W_\theta}{r} \quad (3)$$

式中: $V_z$ 、 $V_r$ 分别为转轮叶片的轴向和径向速度分量; $W_\theta$ 为叶片的周向速度分量。

综上所述,联立式(1)-式(3)就构成了水轮机转轮叶片的准三维反问题设计方程组。在电站水头、流量等参数确定的前提下,对上述方程组进行数值计算,当结果收敛时,便获得了转轮叶片的翼型形状和尺寸。

### 1.2 转轮叶片的设计及模型构建

以某电站的混流式水轮机转轮叶片为设计对象,该电站基本参数情况如表 1 所示。

在转轮叶片的反问题设计中,先将已知参数代入,对式(1)-式(3)进行求解,获得单个叶片的翼型坐标;建立光滑叶片的三维模型;再建立上冠和下环的模型,并通过阵列操作完成转轮整体的模型构建,如图 1 所示。

表 1 电站主要参数

叶片翼型类型	转轮直径/mm	转轮叶片数量	额定水头/m	额定流量/ ( $m^3/s$ )	额定转速/ ( $r/min$ )	额定出力/kW
BNTM	600	14	92	7	1 000	1 600

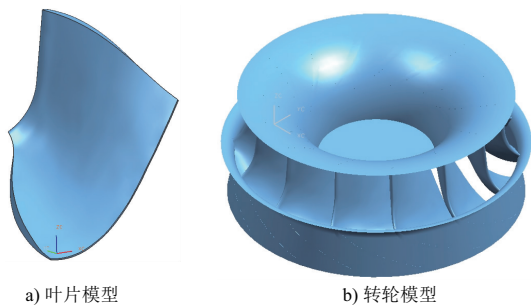


图 1 转轮三维模型

## 2 水轮机全流道流场性能分析

准三维反问题方法,是以机组内部流场的无粘性为前提,所以需要对其进行流场性能分析,进而判别机组的流态特性。考虑到蜗壳、导水机构等过流部件对转轮流态的影响,以全流道模型为数值计算对象。由于计算的工况点较多,限于篇幅,仅选择额定工况且导叶开度为 90% 的条件进行说明。

### 2.1 网格划分

对机组流场的网格划分,按照文献[6]的方法,对过流部件进行单独划分,并整合成整体,具体情况如表 2 所示。

表 2 网格划分

过流部件	网格类型	网格间距/mm	数量
蜗壳	四面体网格	20~25	335 036
导水机构		10~14	401 089
转轮		7~8	788 462
尾水管		25~30	310 027

### 2.2 约束条件设置

约束条件的主要流程包括:1) 湍流模型选择 RNG  $k-\epsilon$  双方程模型<sup>[7]</sup>;2) 采用标准壁面函数进行近壁区设置<sup>[8]</sup>;3) 边界条件设置为蜗壳压力进口和尾水管压力出口边界。

### 2.3 结果分析

#### 1) 流态分析

转轮流场分布情况如图 2 所示,上冠和下环压力沿圆周方向呈良好的对称分布,而转轮叶片的正面和背面压力沿进水边到出水边有明显的梯度下降。无论是叶片正面还是背面,相邻梯度的压差较小,故沿程水头损失也较小。从叶片的汽蚀性来看,叶片正面除出水边极小区域外,均为正压,故正面的抗汽蚀性比较好;叶片背面靠出水边附近的 1/4 区域,均处于负压范围。可以推断该区域肯定存在汽蚀破坏,但负压值并不高,所以破坏的程度也较轻,可以在叶片后续的生产中改进工艺性能,达到减轻汽蚀的目的。

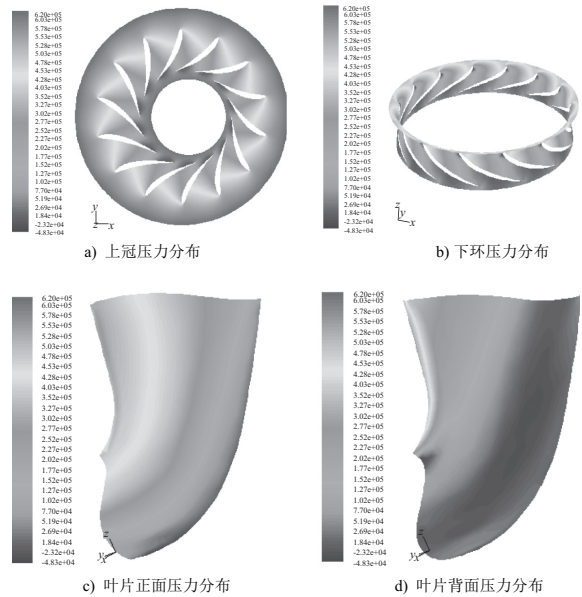


图 2 转轮压力分布

整个流场的流态特性如图 3 所示,从蜗壳进口至转轮出口,压力分布趋势为逐级递减,而速度的变化规律为逐渐增加,符合水轮机的流场运动规律<sup>[5]</sup>,而且整个流场的压力水平均不高。原因在于水流流入蜗壳时,其流动的规律满足等速度矩原理<sup>[9]</sup>。由于蜗壳的直径较小,导致水流的速度越大,动压也越大,而流场的总压却是恒定值,所以静压力则相应降低;从流场的速度矢量来看,梯级速度变化较

大,说明能量的转换率较高,从而确保了机组的高效率,同时水流流动也比较顺畅,基本没有涡流、横向流等现象。

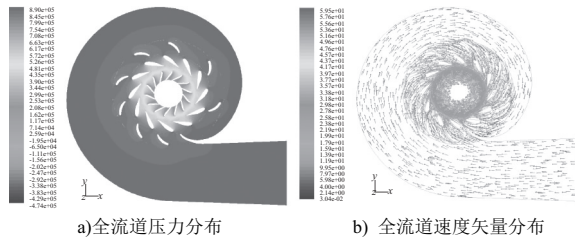


图3 全流道速度压力分布规律

尾水管进口端的流态变化规律如图4所示。在尾水管的进口断面,压力和速度沿圆周方向基本对称,虽然在径向存在压力变化的情况,但其幅度很小,几乎可以忽略。尾水管的流场轨迹线分布如图5所示,水流速度基本上沿垂直方向泄流;由于转轮出水边的速度环量不强,故尾水管锥段内的偏心涡带不明显。虽然在尾水管的中段区域,产生了强烈涡带,但至出水端处,涡带有逐渐减弱的趋势,在出口断面处,涡带基本消失。此外,尾水管的出口处,存在一定的回流现象,但程度较低,对机组造成的影响有限。

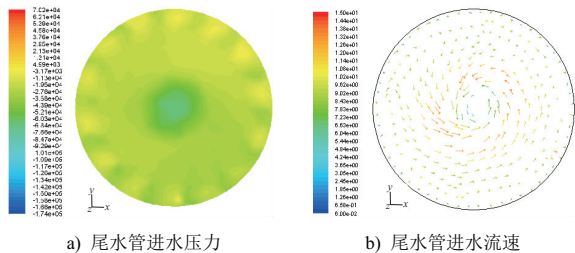


图4 尾水管进水端速度压力分布规律

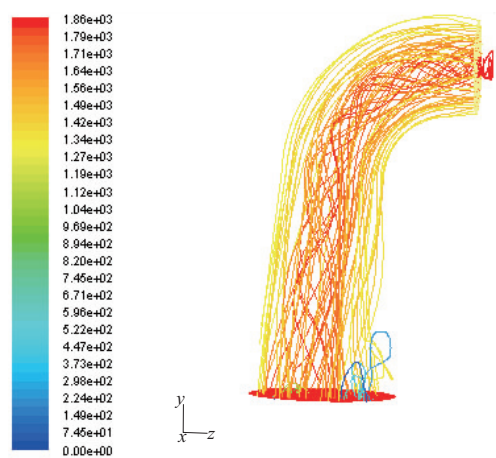


图5 尾水管迹线分布规律

综上所述,采用反问题设计的转轮,内部流态性能良好,流动顺畅,达到了预期的设计目标。

### 2) 效率及出力计算

对于机组而言,发电效率和出力是非常关键的指标。因此,根据仿真结果计算效率和出力是必要的步骤。效率计算的过程为,首先取仿真结果中各工况下的转速、流量以及水头等参数,然后计算出效率。效率的计算公式

为<sup>[10]</sup>:

$$\eta = \frac{M\omega}{\rho gQH} \quad (4)$$

式中: $M$ 为力矩; $\omega$ 为转速; $Q$ 为各工况点的流量; $H$ 为计算水头。

同理,机组的出力计算表达式为:

$$N = \rho gQH\eta \quad (5)$$

在额定工况下活动导叶开度分别取 60%、70%、80%、90%、100%进行仿真,再按式(4)和式(5)计算出各开度下的仿真效率和出力,结果如表3所示。

表3 效率及出力计算值

名称	导叶开度/(%)				
	60	70	80	90	100
效率值/(%)	85.3	90.2	91.9	91.7	90.1
出力/kW	1 321.223	1 518.074	1 596.527	1 702.859	1 815.724

从表3所示的仿真效率变化规律来看,在70%~100%的开度下,效率的变化并不大,原因在于70%~100%开度下,流量值较大,机组的流态稳定,转轮的力矩和流量同时变化,二者的比值变化很小,故效率差别不大;但当开度为60%时,流量减小幅度较大,流动趋于复杂,转轮的力矩下降较快,力矩和流量的比值减小明显,导致效率也显著下降<sup>[11]</sup>。整体而言,在接近最优工况下的80%和90%开度,机组的效率均超过了90%,所以反问题设计的转轮叶片能够让机组达到较高的效率,即该设计是合理的。此外,从出力计算的结果来看,导叶开度越大则机组的出力越高,该结果符合水轮机内部流动规律<sup>[11]</sup>。同时,在接近最优工况80%的导叶开度下,出力值为1 596.527 kW,略小于表1所示的理论额定出力值(1 600 kW),但二者仅偏差3.473 kW,几乎可以忽略不计。可以认为,机组的出力是满足设计要求的。

综上所述,从发电效率和机组出力两个方面来看,准三维反问题设计的转轮具有良好的流场性能,即设计是合理的。

## 3 结语

在某混流式水轮机转轮设计中,采用准三维反问题法设计出了转轮叶片,建立了全流道模型。为预测机组的水力特性,对全流道模型进行了流场特性分析、效率以及出力计算,这三方面的研究结论均验证了该叶片设计的合理性;说明了转轮叶片的准三维反问题设计法是行之有效的,可以达到提升转轮叶片质量的目的。

### 参考文献:

[1] CHRISTIAN Pellone, THIERRY Maitre, ERVIN Amet. 3D RANS modeling of a cross flow water turbine[J]. Springer Singapore, 2014:405-418.  
 [2] WU Yulin, LIU Shuhong, DOU HuaShu. et al. Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine[J]. Computers and Fluids, 2012, 56(6): 128-142.

(下转第106页)