

旋转速度有无对转轮内部三维数值流动的影响

Numerical Comparison of 3D-Flow through Runner with and without Rotational Speed

韩凤琴¹, 沈娜¹, 久保田乔¹, 石原卓哉²

(1. 华南理工大学电力学院动力工程系, 广东广州, 510640, 2. CDAJ 北京)

摘要：为了提高混流式水轮机的性能，一般在最优转速下对混流式水轮机的流态进行较深的数值研究。但是，不常见研究水轮机刚刚开启状态时转轮内部的流动。此时，水流在转轮里由于离心力和科里奥利力所产生的加速度很小，与最优转速时的流动状态完全不一样。

转轮进、出口水流速度三角形是研究水流绝对流动和相对流动界面之间的一个重要工具，通过牵连速度 U 将绝对水流速度 V 和相对水流速度 W 进行转换^[1]。本文对混流式水轮机在最优转速、开始启动状态进行了定常数值解析。通过转轮有无旋转速度两种情况下三维数值流动的比较，验证了水流速度三角形不仅适用于最优转速下的水流状态，而且也适用于在开始启动时的水流状态。从解析结果来看几何文件形状尺度缩小比 Scale Factor 似乎对牵连速度 U 会有所影响。

关键词：数值流动；速度三角形；最优工况；开启瞬间；形状尺度缩小比

Abstract : The flow pattern through the rotating runner of a Francis turbine is numerically well investigated by many researchers under the optimum rotational speed, in order to acquire the higher performance. However, the flow pattern when the runner starts to rotate is not common, because the apparent accelerations due to the centrifugal force and the Coriolis force are very small in the flow through the runner.

The theory of velocity triangles at runner inlet and outlet is a simple and important tool to investigate the transfer of flow on the interface between the absolute flow velocity vector V in the stationary frame and the relative flow velocity vector W in the rotational frame by considering the transport speed vector U . We executed the steady-flow analysis of a Francis turbine, under the optimum rotational speed and the starting speed. By comparing the numerical results of 3D-flow patterns with and without the effect of the runner rotation, the theory of velocity triangle can be applicable to the comprehension of the general tendency not only for the optimum rotation but also at the start of rotation. Our research also shows that the geometry *scale factor* in the geometry file seems to act as if the scale factor for the transport speed vector U .

Key words : numerical flow pattern; velocity triangle; optimum operating rotation; start to rotation; scale factor

1. 引言

转轮是水轮机的核心部件，它直接将水流能量转变成旋转机械能。转轮的设计质量对水轮机的过流能力，水力效率，汽蚀性能，工作稳定性及对变工况的适应性有很大的影响。水轮机中某一点的水流运动情况可以用该点的速度三角形来表示^[1]。最优转速下转轮入、出口的速度三角形是被人熟知的，许多人也对此有很深的研究，但是对于水轮机在开始启动状态下水流状态的研究却不多见。图 1 表示了最优转速及开始启动这两种工况下的转轮入口、出

口速度三角形。

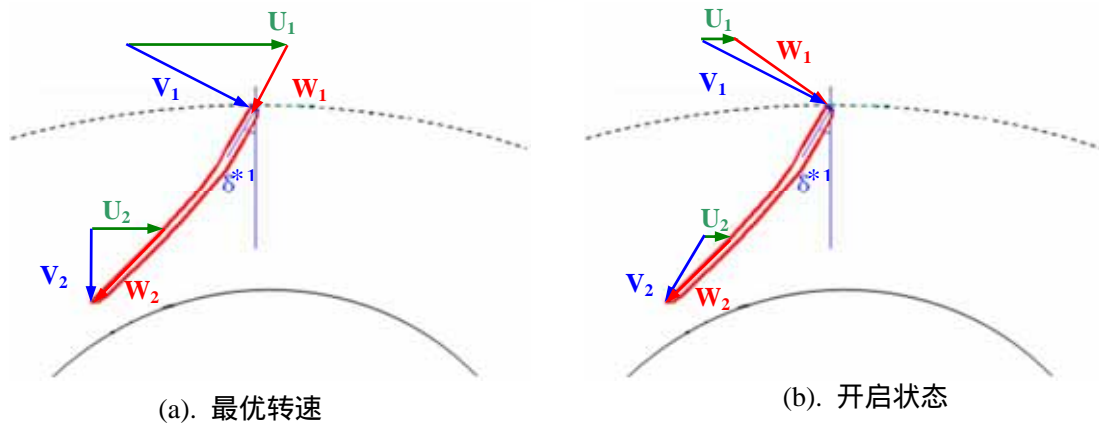


图 1. 转轮叶片进出口速度三角形

水流质点在运动着的叶片上流过时，如图 1 中所示由相对速度 W 、圆周速度 U 及绝对速度 V 组成速度三角形。转轮进出口水流速度三角形是研究水流绝对流动和相对流动界面之间的一个重要工具，通过圆周速度 U 将绝对水流速度 V 和相对水流速度 W 进行转换，那么这三者之间就存在着如下的关系：

$$\mathbf{V} = \mathbf{U} + \mathbf{W} \quad (1)$$

最优工况设计叶片入口时，用已给定了的绝对速度 V_1 和圆周速度 U_1 来决定沿叶片的流速 W_1 ，以进行转轮叶片的入口设计即决定叶片的入口角 δ^*1 。叶片出口设计是用得到的叶片出口相对速度 W_2 ，应用圆周速度 U_2 求得绝对速度 V_2 ，此时 V_2 最好是沿半径方向，即 V_2 的旋回分量为零如图 1(a)所示。图 1(b)中表示在开启状态时的速度三角形，此时 U_1 、 U_2 均近似为零，得到 $W_1 = V_1$ ； $W_2 = V_2$ ，即出现非常大的旋回，这也是在启动状态下速度三角形的特点。实际上，流动状态如何是可以用速度三角形求得和描述的。

2. 数值设定及转轮出入口界面的欧拉能量

2.1 水轮机网格结构

混流式水轮机包括蜗壳(SC)，11 个叶片的固定导叶(SV)，20 个叶片的活动导叶(GV)，14 个叶片的转轮(RV)以及整个尾水管(DT)五个部分。其几何建模如下图 2 所示。由于解析的是整个水轮机，应用 STAR-CD 公司开发的自动生成网格软件 STAR-CCM+来生成多面体网格。其网格结构如下图 3 所示。

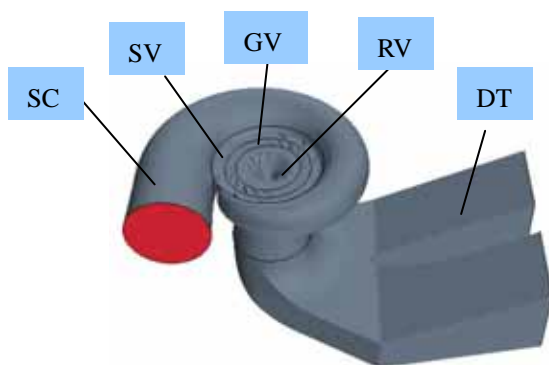


图 2. 水轮机三维几何建模

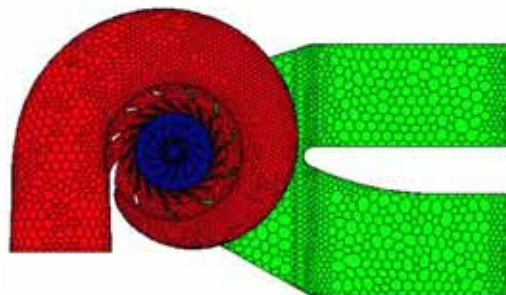


图 3. 水轮机整体网格划分

2.2 边界条件

在蜗壳的入口处设置质量流量,尾水管出口处根据吸出高水头设定静压水平;设置转轮的参考直径,给定转轮的转速,具体数值如下表 1 所示。给定水轮机的参考总能 $ET_{ref} = 658.72\text{J/kg}$,活动导叶出口和转轮入口间的交接面、转轮出口和尾水管入口的交接面都设置为瞬时的滑移面,所有固壁设置为无滑移的水力光滑界面。

表 1 仿真工况参数

$Q(\text{m}^3/\text{s})$	$n(\text{rpm})$	$D_{ref}(\text{m})$
40	-272.3	2.22

粘涡模型采用 Boussinesq 假设,即湍流剪切应力和粘性应力的作用方向是一致的,选择 $k-\varepsilon$ 高雷诺数模型作为湍流模型。水轮机作定常流动,计算步长为 1000 步。数值解析及后处理软件为 STAR-CD 4.02。在 STAR-CD 的 MRF 方法中,对于定常解析一般有显示(Explicit Multi-Frame)与隐式(Implicit Multi-Frame)两种计算方法。隐式格式的优点是,它是无条件稳定的,也就是说不受时间及空间的步长大小选择的影响;但它的缺点是较为耗费计算资源。相反,显式的优点是计算所需的工作量小,但因为它是层层推进的,所以受时间和空间步长选择的限制,可能选择不恰当就会得到发散的结果。本论文根据模型的特点选择隐式(Implicit Multi-Frame)作为定常解析计算方法^[2]。

2.3 转轮进出口界面的欧拉能量

转轮有无转速都可以计算在转轮入、出口的欧拉能量。转轮进出口界面如图 4 所示。

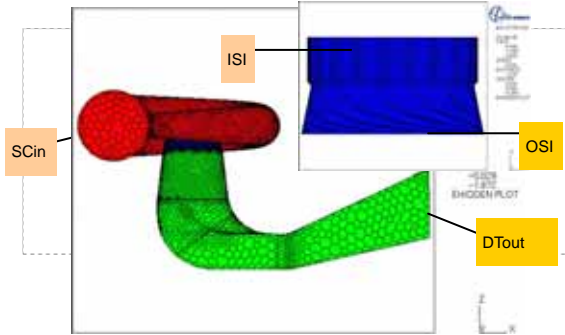


图 4 转轮进出口界面

一般要求出质量平均欧拉能量,其求解方法如下:

$$E_E = \frac{\sum_{i=1}^{\max} A_i \times V_{ni} \times E_E}{\sum_{i=1}^{\max} A_i \times V_{ni}} = \frac{\Omega \cdot \sum_{i=1}^{\max} A_i \times V_{ni} \times R_i \times V_{ui}}{\sum_{i=1}^{\max} A_i \times V_{ni}} \quad (2)$$

$$E_{ER} = E_{Ei} - E_{Eo} \quad (3)$$

(2)式中, A 为在所计算界面每一个网格的面积, V_n 为垂直断面网格的法向速度, P_t 为总压

力, Ω 为转轮旋转角速度, V_n 为在圆柱坐标系中沿 θ 方向的速度分量, R 为界面每个网格心到旋转中心的距离。(3)式中 E_{Ei} 、 E_{Eo} 分别为水流在转轮入、出口处的质量平均欧拉能量, 利用(3)式就可求得转轮的欧拉能量。

3. 旋转速度有无对转轮流动的影响

混流式水轮机转轮位于流道从径向变为轴向的拐弯处, 水流运动情况复杂。为了分析转轮有无圆周速度对水流的影响, 解析了转轮转速 $n = -272\text{rpm}$ 及 $n = -0.272\text{rpm}$ 这两种情况下水流的流动状态。图 5-7 给出了这两种情况在垂直断面 $y=0$ 以及接近活动导叶下表面的水平断面 $z = -0.29\text{m}$ 处的绝对速度 V 及相对速度 W 的分布。

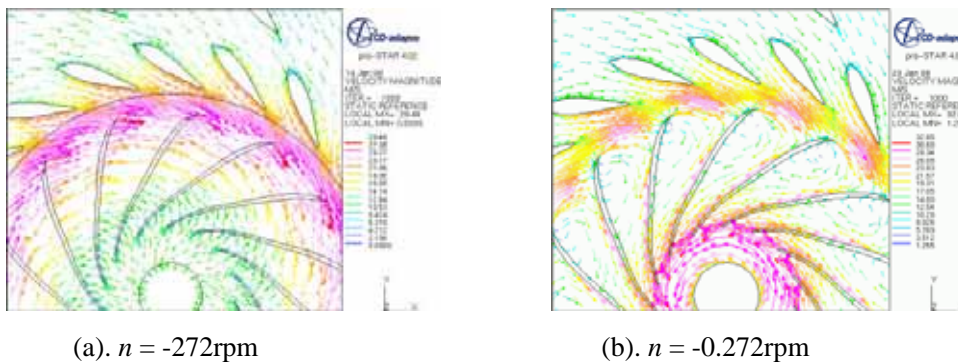


图 5 绝对速度 V 在断面 $z = -0.29\text{m}$ (接近活动导叶下表面的水平断面)上的分布

图 5 是绝对速度 V 在水平断面 $z = -0.29\text{m}$ 的分布状态。(a)为最优转速下 (b)为(a)1/1000 转速启动状态下的定常流动。图(b)如图 1(b)中所说明的那样, 在开启状态时的速度三角形, 此时 U_2 均近似为零, 求得 V_2 W_2 , 即出口出现非常大的旋回。最优转速的图(a)与图 1(a)中速度三角形相对应。

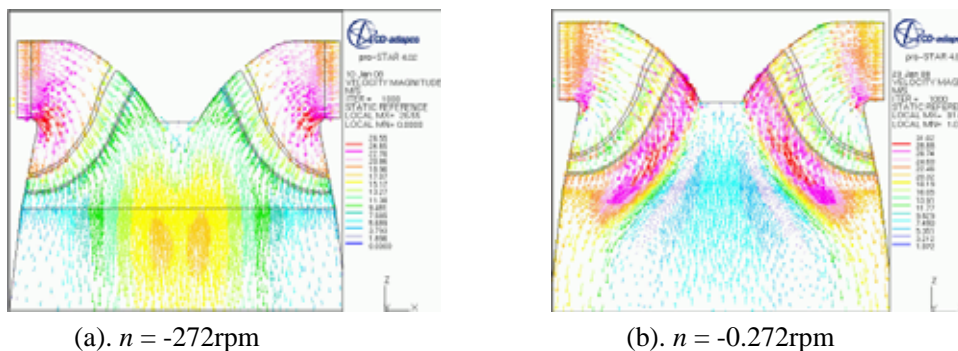


图 6 绝对速度 V 在垂直断面 $y=0$ 上的分布

图 6 是绝对速度 V 在垂直断面 $y=0$ 的分布状态。(a)最优转速下, (b)为(a)1/1000 转速启动状态下的定常流动。图 6(a)中绝对速度从转轮入口到出口为较正常平滑流动; 图 6(b)由于转轮出口水流形成了强大的旋回流, 尾水管中央形成了巨大的死水域, 结果使得主流避开死水域只能沿着管壁流出。

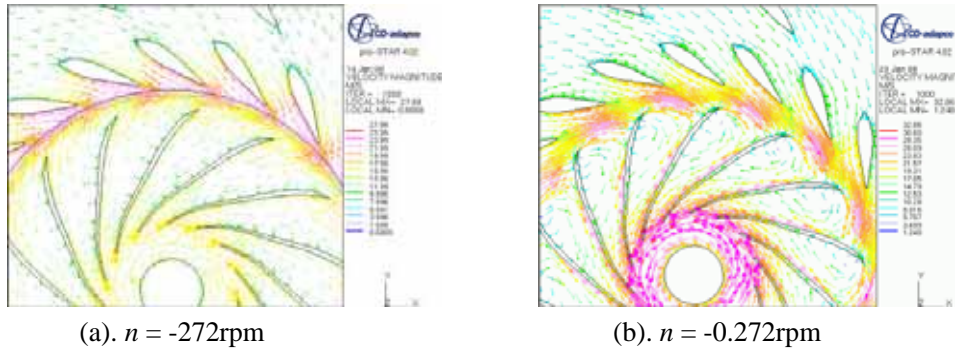
图 7 相对速度 W 在断面 $z=-0.29\text{m}$ 上的分布

图 7 是相对速度 W 在水平断面 $z=-0.29\text{m}$ 的流动状态。(a)最优转速下,(b)为(a)1/1000 转速启动状态下的定常流动。图(b)如图 1(b)中所说明的那样,在开启状态时的速度三角形,此时 U_1 均近似为零,求得 W_1 V_1 ,即入口出现大规模脱流。最优转速的图(a)与图 1(a)速度三角形相对应。

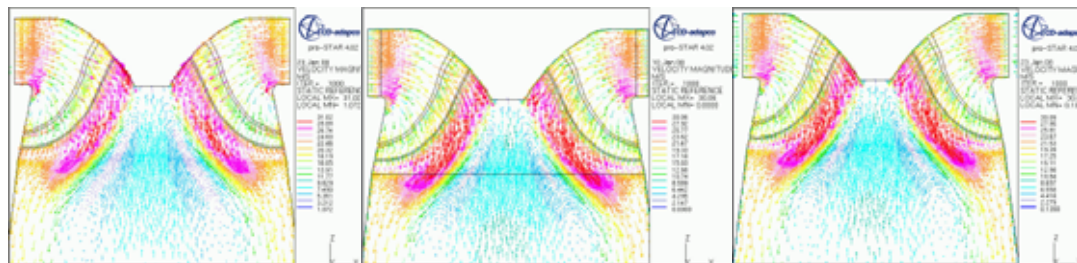
由第二章求质量平均欧拉能量的方法,得到在转轮有无圆周速度这两种情况下的质量平均欧拉能量如表 2 所示。对于转轮转速的有无,可以数值地定量计算欧拉能量的有无。

表 2 转轮欧拉能量

n (rpm)	$E_{Ei}(\text{J/kg})$	$E_{Eo}(\text{J/kg})$	$E_{ER}(\text{J/kg})$
-272	622.3	160.5	461.8
-0.272	0.64	0.28	0.36

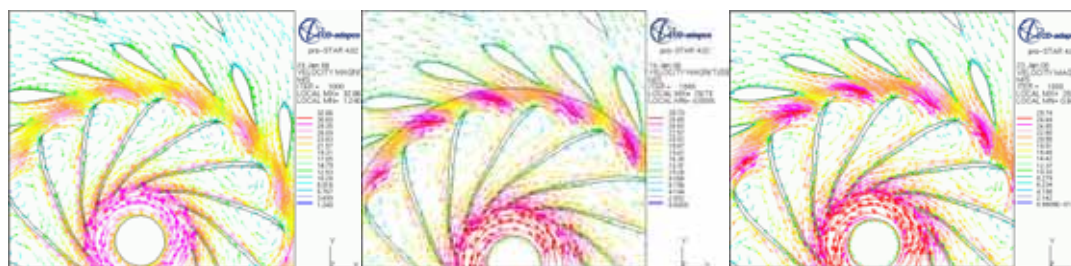
4. 写几何文件形状尺度缩小比 (Scale Factor) 的影响

STAR-CD 软件写几何文件时,需要记入形状尺度缩小比(Geometry Scale Factor)。图 8(a)是第三章在开始启动状态下其形状尺度缩小比是 1,也就是写出的几何文件是以米为单位的。图 8(b)是形状尺度缩小比为 0.001 且转速为 1000 倍的情况,图 8(c)与(b)的旋转方向相反。



(a). $SF=1$, $n = -0.272\text{rpm}$ (b). $SF=0.001$, $n = -272\text{rpm}$ (c). $SF=0.001$, $n = +272\text{rpm}$

图 8. 启动状态下绝对速度 V 在断面 $y=0$ 上的比较



(a). $SF=1$, $n=-0.272\text{rpm}$ (b). $SF=0.001$, $n=-272\text{rpm}$ (c). $SF=0.001$, $n=+272\text{rpm}$

图 9. 启动状态下相对速度 W 在断面 $z=-0.29\text{m}$ 上的比较

可见图 8 (a) (b) (c) 流动状态基本相同, 这是因为形状尺度缩小比 SF 和转速 n 的结合表示它们都处于启动状态。图 9 可以看出转轮入口发生大规模的脱流流动, 同样图 9 (a) (b) (c) 流动状态基本相同。我们知道

$$U = R \Omega = 2\pi n R / 60 \quad (4)$$

当 $SF=1$ 时, n 是近似为 0 的, 所以 U 是近似为 0 的; 当形状尺度缩小比 $SF=0.001$ 即是把模型缩小了 1000 倍, 此时 R 很小, U 也是近似为 0 的。实际上它们此时处于启动状态。

5. 结论

- (1) 数值解析了水轮机旋转速度 U 有无时转轮内部的流动状态, 通过在最优工况和开始启动状态下数值流动的比较验证了转轮的圆周速度 U 对于流动的影响。
- (2) 作为研究水流绝对流动和相对流动界面之间重要工具的水流速度三角形不仅适用于最优转速下的水流状态, 而且也适用于在开始启动时的水流状态。
- (3) STAR-CD 软件写几何文件时, 记入的形状尺度缩小比 (Geometry Scale Factor) 似乎对转轮的圆周速度 U 也有所影响。

参考文献

- [1] 久保田 乔等, 流体机械手册 (日本), 朝仓书店, 1997, 204-248.
- [2] STAR-CD 4.02, star_guide, 2006, Chapter 12, 1-4.