

# 贯流式水轮机内部流动数值解析

## Numerical Analysis of Bulb Turbine

刘攀, 吴家声, 杨栗晶, 韩凤琴, 久保田 乔<sup>1</sup>

(华南理工大学电力学院动力工程系, 广东广州, 510640)

**摘要：**本文对于研究对象的贯流式水轮机，使用 STAR-CCM+生成网格并使用 STAR-CD 软件进行了数值解析，并报告了贯流式水轮机内部流动数值解析过程。

**关键词** 贯流式水轮机；内部流动；STAR-CCM+网格；数值计算

### 1. 引言

网格分布是流动控制方程数值离散的基础，网格质量的好坏直接影响到计算的收敛性和结果的精度，因此，网格技术是实现湍流数值模拟的关键技术之一，并且网格生成的难度和耗费在整个模拟计算过程中占有较大的比重。为了适应贯流式水轮机流体内部复杂的流动状况，使计算尽快收敛，结果足够精确，本研究对象网格类型均采用 CDAJ 公司新推出的可以生成多面体网格的 STAR-CCM+ 软件，多面体网格的收敛性更优于四面体网格，只需要更少的迭代步数，对网格数量的依赖性比四面体更小，多面体模型只需要四面体网格数的 1/4，但计算精度相当。这样的优势对于本研究的复杂活动导叶到转轮叶片的流道特别适用。

### 2. 研究对象及网格结构

#### 2.1 水轮机网格结构

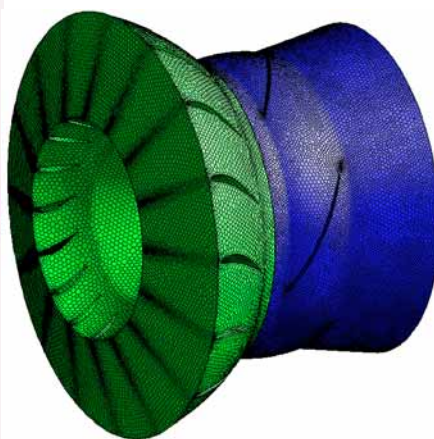
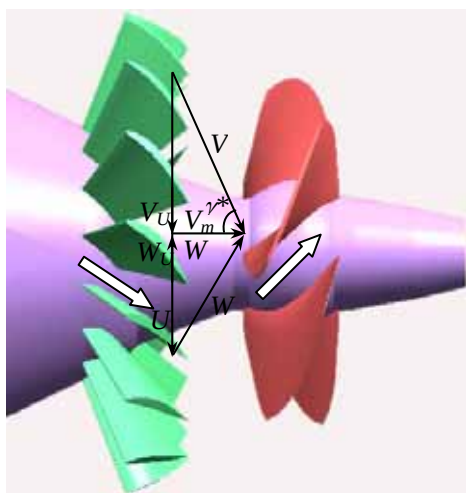


图 1：水轮机活动导叶静叶栅及转轮动叶栅      图 2：活动导叶及转轮网格

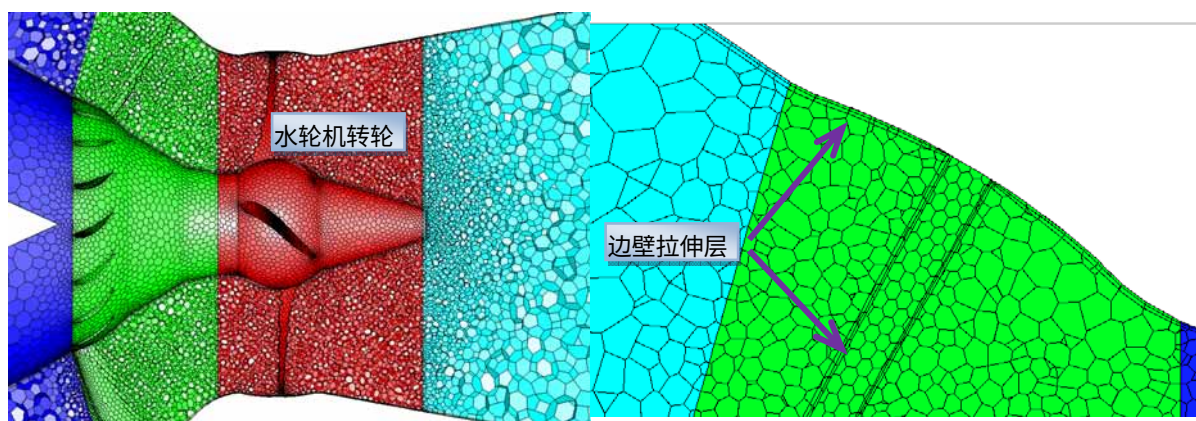


图3 新型多面体网格

图4 边壁拉伸层网格

考虑到非光滑边壁对流动造成的影响,在贴近流动边壁处布置了两层拉伸层网格,由于拉伸层网格实现了从体网格到边壁的良好过渡,拉伸层网格的棱柱形构造提高了贴近非光滑边壁流动状况的精度,使水流的模拟更趋于实际试验。另外,拉伸层网格也有利于转轮轮缘缝隙网格的形成,对研究轮缘缝隙流提供了网格构造的方便。

## 2.2 边界条件设定

一般界面以及动静交界面的设定: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动静滑移面,固定导叶出口和活动导叶进口设置为一般界面,所有固壁设置为无滑移的水力光滑界面。另外,为了使计算更加容易收敛,通过可能性更大,在水轮机进口和出口分别添置了拉伸网格,使得水流有一段整流作用。在水流流出交界面那一边,边界类型设置为 pressure,在水流流入交界面那一边,边界类型设置为 inlet,其余设置为 wall。

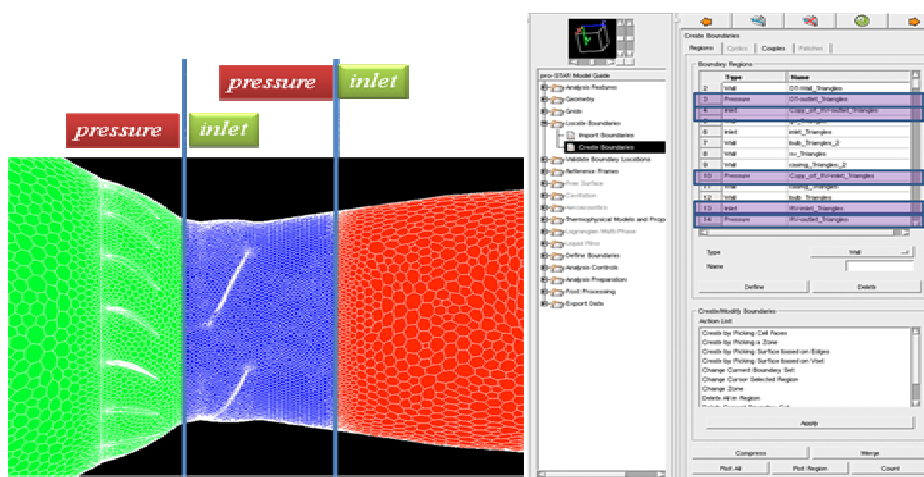


图5 边界类型设定

在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；给定转轮的转速，具体数值如下表 1 所示。

表 1 仿真工况参数

| $Q(\text{m}^3/\text{s})$ | $n(\text{rpm})$ | $P(\text{pa})$ |
|--------------------------|-----------------|----------------|
| 2.0729                   | 700             | 122625         |

湍流模型及计算设定：

选择 k- 高雷诺数模型作为湍流模型。在 STAR-CD 的 MRF 方法中，对于定常解析一般有显式(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显式(Explicit Multi-Frame)作为定常流解析计算方法<sup>[2]</sup>。

### 3. 数值计算结果

**计算收敛情况：**在迭代计算过程中，设定的定常流动计算的收敛指标为： $\max(Rk) \leq 1.0 \times 10^{-6}$ 。影响收敛效果有以下几点：网格质量；合适的湍流模型；合适的松弛因子。经尝试对于本解析对象的较复杂的贯流式水轮机模型，当 U-Momentum, V-Momentum, W-Momentum=0.5, Pressure=0.2, Turbulence KE-Turbulence Diss=0.6 的时候获得了较好的收敛结果，见图 6、7。

**数值解析结果：**图 8(a)~(d)为水轮机进水室和固定导叶 SV 部分的流场、压力场、能量场的分布状况。图 9(a)~(d)为活动导叶叶栅 GV 部分的流场、压力场、能量场的分布状况。图 10~15 为转轮活动叶栅中间流线流场、压力场、能量场，图 16~21 为转轮叶片表面流场、压力场、能量场，图 22~25 为尾水管部分的流场、压力场、能量场的分布状况。由解析结果可以看出：水轮机整个过流通道中水流流畅有序，能量传递有着较好的一贯性，特别是大流量尾水管中的流动未见明显的脱流，应该能够推论此水轮机具有较好的性能。水轮机叶片出口边靠轮缘处出现了一些局部较大的增速流，提示我们有必要对于这部分叶片形状进行改造。

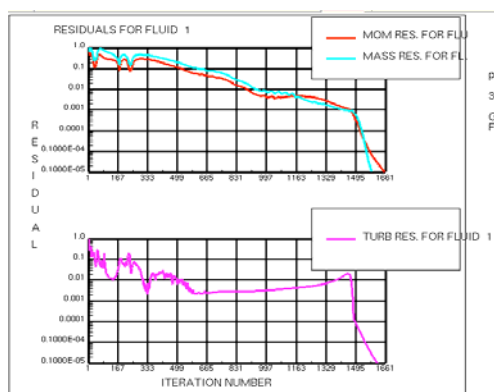


图 6 Turbulence KE-Turbulence=0.7

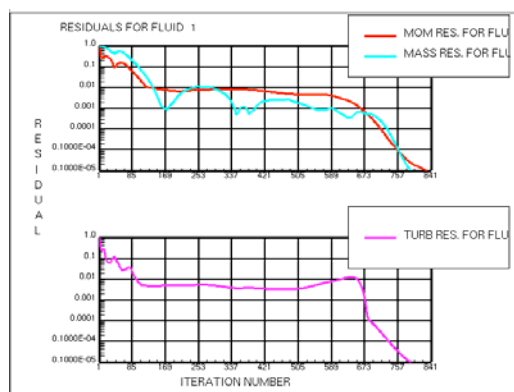


图 7 Turbulence KE-Turbulence=0.6



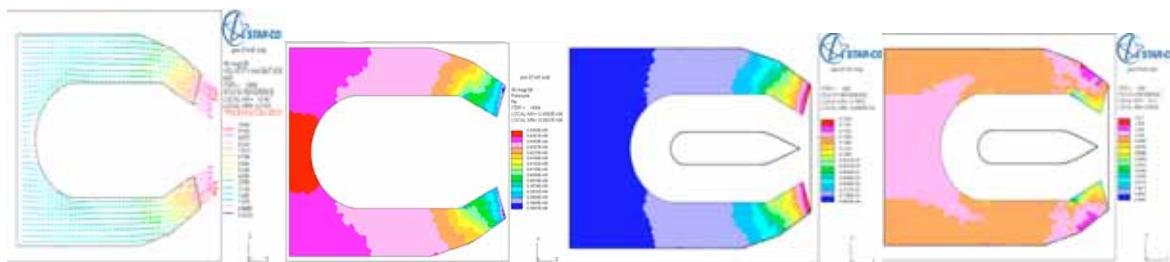


图 8(a) SV 绝对速度分布图 图 8(b) SV 压能分布图 图 8(c) SV 动能分布图 图 8(d) SV 总能分布图

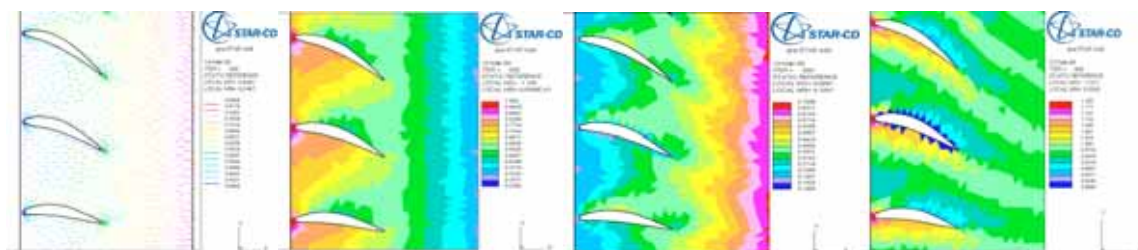


图 9(a) GV 中间流线绝对速度 图 9(b) GV 中间流线压能分布 图 9(c) GV 中间流线动能分布 图 9(d) GV 中间流线总能分布

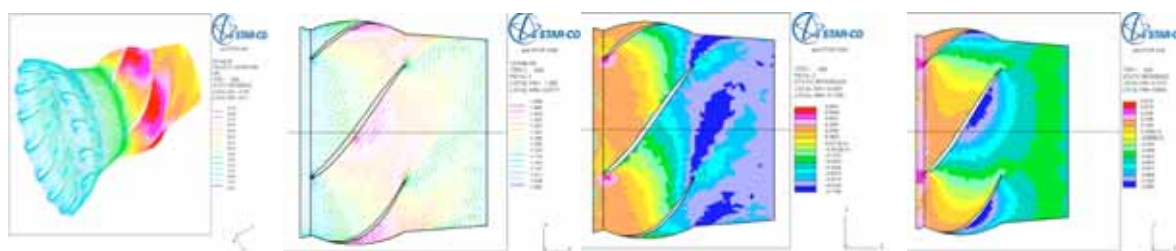


图 10 GV, RV 中间流线流场 图 11 RV 中间流线相对速度 图 12 RV 中间流线欧拉能量 图 13 RV 中间流线压能



图 14 RV 中间流线动能 图 15 RV 中间流线总能 图 16 转轮叶片压力面的相对速度 图 17 转轮叶片负压面的相对速度

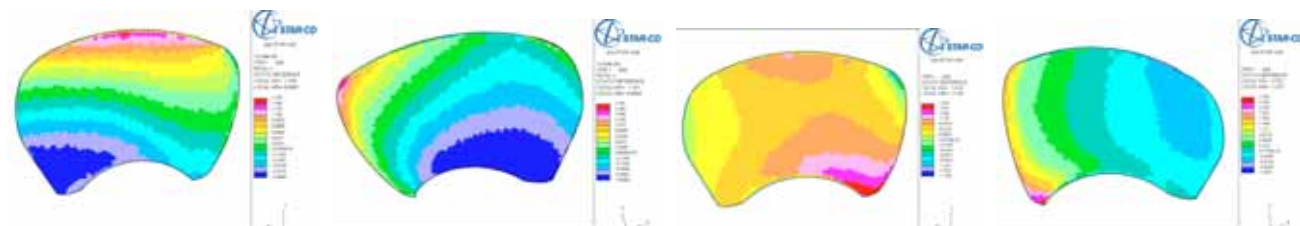


图 18 转轮叶片压力面的欧拉能量 图 19 转轮叶片负压面的欧拉能量 图 20 转轮叶片压力面的总能 图 21 转轮叶片负压面的总能

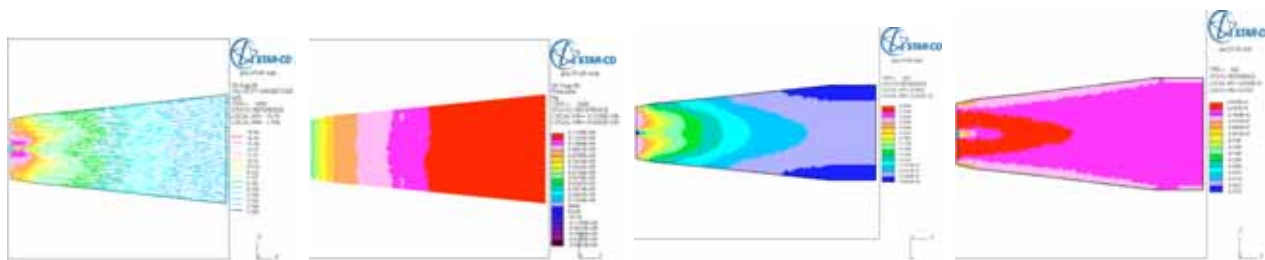


图 22 DT 绝对速度分布图

图 23 DT 压能分布图

图 24 DT 动能分布图

图 25 DT 总能分布图

## 4. 结论

在中国 CDAJ 非常热情有力的协助下,进行了贯流式水轮机内部流动数值解析。从分析的结果表明,运用流体分析软件 STAR-CD 的 MRF 中的显示方法进行的贯流式水轮机内部流场的数值模拟,得到的数值解析结果显示了水轮机流道中具有较好的流动状态,定量地把握了流场、压力场及能量场的状态。模拟结果会对水轮机的内流控制、效率提高及优化设计提供有力的指导。

### 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\_uguide, 2006, Chapter 12,1-4.