

一种基于刚体动力学分析的计算流体力学方法

王鑫, 田娅娟, 薛鹏, 陈锐

(北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038)

摘要: 流体机械运行的瞬变过程中各工况参数均为时间的函数, 并且存在主要参数的正负方向改变。本文针对流体机械瞬变运行过程的特点, 提出了一种基于刚体动力学分析的计算流体力学方法。以垂直轴潮流能水轮机为例, 通过求解研究对象的动力学方程与流场的CFD分析耦合迭代, 最终得出研究对象的运动与受力状态, 结果表明计算较好地实现了流体机械瞬变过程的模拟。

关键词: 计算流体力学; 刚体动力学; 瞬变过程; 垂直轴潮流能水轮机

中图分类号: O35; O313.3

文献标识码: A

常见流体机械的运行过程通常为稳态过程, 但在某些特殊条件下或某些特殊的流体机械也经常存在瞬变运行过程, 如混流式水轮机的甩负荷工况、垂直轴潮流能水轮机的运行等。流体机械尤其是水轮机的瞬变运行过程中将发生一系列由惯性附加动力引起的不稳定现象^[1], 并引起一定的动态附加载荷, 这对机组的运行存在着影响甚至造成运行事故^[2], 因此对存在瞬变运行过程的流体机械设计时需要进行相关计算模拟。目前对流体机械的瞬变过程研究以模型试验和原型试验方法为主, 数值计算方面的研究主要集中在数值解析与仿真研究方面, 模拟的精度与效率不高。计算流体力学(CFD)方法是流体机械领域近来应用较多的一种数值模拟方法, 在复杂模型流场求解、可视化分析方面具有较强的优势, 其在流体机械瞬变过程数值模拟研究设计中将提供重要的作用。

1 基于刚体动力学分析的计算流体力学方法

1.1 基本方程 为了描述刚体的运动及受力规律, 需要根据牛顿运动定律求解其平动规律, 根据欧拉定律求解其转动规律, 二者迭加得到刚体的整体运动及受力规律^[3]。对常规的旋转式流体机械而言, 一般运行时可将转轮运动简化为刚体的绕定轴转动问题, 因此其运动与受力关系可用如下方程描述:

$$T_{total} = T_{Fluid} + T_{Load} + T_{Loss} = J\dot{\omega} \quad (1)$$

式中: T_{total} 为转轮所受合外力矩; T_{Fluid} 为流体作用于转轮的力矩; T_{Load} 为负载所造成的力矩; T_{Loss} 为机械摩擦等系统引入的损失力矩; J 为转轮相对于转轴的转动惯量, 是一个常数; $\dot{\omega}$ 为转轮的角加速度; ω 为转轮的旋转角速度。

根据式(1)可知, 在某一时刻当转轮所受合力矩不为零时, 转轮的转速将随合力矩的大小与方向发生相应的变化。若要维持转轮的转速保持稳定的运行状态, 则需保证转轮所受合力矩为零。对于某一确定的系统, 损失力矩一般变化不大, 负载力矩对于某一工况也为定值, 因此转轮所受流体的作用力矩将随不同工况条件下的负载力矩发生变化, 这一过程属于转轮的自行调节运行特性。当流体机械运行于瞬变工况时, 流体作用于转轮的力矩为瞬变参量, 若其随转轮旋转过程呈一定规律的

收稿日期: 2013-04-08

作者简介: 王鑫(1981-), 黑龙江人, 工程师, 博士, 主要从事水轮机、水泵、潮流能水轮机的研究工作。E-mail: pc21@iwhr.com

周期性变化，则在最终的稳定运行条件下，转轮所受合力矩也应以零为平均值的周期性变化参数，转轮的瞬时角加速度、角速度等参数也都将呈现一定规律的周期性变化。

由转速变化关系可知，已知 t 时刻的角速度 ω_t 及瞬时角加速度 $\dot{\omega}$ 时， $t+\Delta t$ 时刻的角速度可由下式表示：

$$\omega_{t+\Delta t} = \omega_t + \dot{\omega}\Delta t \quad (2)$$

由转角变化关系可知， $t+\Delta t$ 时刻的转轮方位角可由下式表示：

$$\theta_{t+\Delta t} = \theta_t + \omega\Delta t \quad (3)$$

因此，若可以获得转轮在各时刻的瞬时运动状态及受力状态，即可根据式(1)-式(3)获得转轮在下一时刻的运动状态及位置情况，我们称这三个方程为旋转式流体机械转轮运动与受力关系的刚体动力学基本方程。

1.2 耦合刚体动力学方程的计算流体力学方法 基于前述分析，对于旋转式流体机械受力与运动规律的瞬变特性，可以采用耦合转轮动力学基本方程与CFD的模拟方法进行研究。基本思想就是使用CFD方法模拟某一工况条件下转轮周围的流场条件并获得此时转轮的受力情况，并在已知受力的条件下使用转轮刚体动力学方程求解其新的运动状态，采用适当的方法将上述两个步骤进行耦合以实现连续的迭代计算，最终获得研究对象的完整运动状态与受力变化情况。图1为本文采用的数值模拟方法流程图。

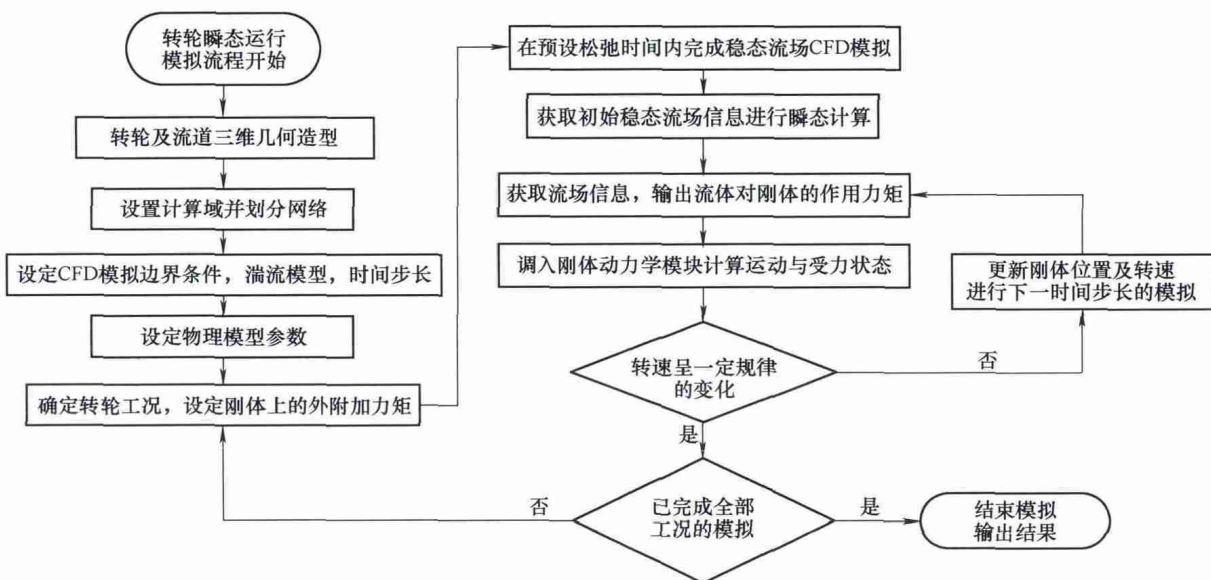


图1 转轮瞬变运行过程数值模拟流程图

2 计算对象

本文的计算对象为垂直轴潮流能水轮机，它是一种流体动能吸收装置^[4]，主要通过转轮叶片受到流体流动冲击产生升力推动转轮旋转进行发电，图2为一种最简单的垂直轴潮流能水轮机直叶片H型转轮，它具有结构简单、制造与维护方便、可适应任意水平方向来流条件而不需要对流辅助装置、对水深要求不高、无需建坝蓄水和投资小等优点^[5]，近来获得了广泛的关注与研究。

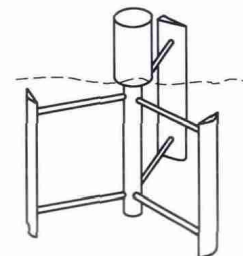


图2 直叶片式垂直轴潮流能水轮机转轮

本文数值模拟的计算区域为垂直轴水轮机转轮与其附近的流动域，图3为计算区域及网格的示意图。流动域尺寸为350mm×350mm×1800mm，转轮模型直径300mm，布置在流道中部。由于转轮部分与外部流道存在相对运动，因此设立一个包围转轮叶片的圆柱形交界面，其中圆柱内部区域作为旋

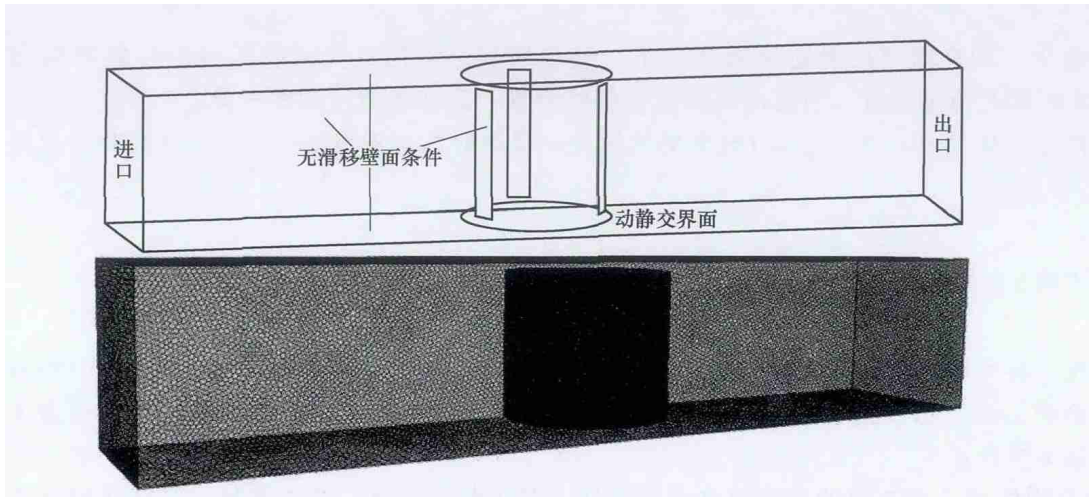


图3 垂直轴水轮机模型转轮全流道几何模型与网格划分

转域，而除去圆柱域的其他区域作为静止域考虑。

各部分的边界条件设定如下：(1)转轮部分区域的旋转域与转域外部的静止域，二者之间的界面设置为 Interface 条件；(2)进口设为法向速度进口条件；(3)出口采用压力出口条件，在出口处给定平均静压为零；(4)流道壁面设定为无滑移壁面条件；(5)转轮的3个叶片按照刚体动力学分析模块要求设置为刚体及无滑移壁面，并给定其质心位置、质量、转动惯量、初始转速等参数条件，设定其运动自由度为绕潮流水轮机转轴的转动。(6)采用耦合刚体动力学分析模块的CFD非定常数值模拟方法来预测垂直轴转轮的水力特性，需要通过调节施加在转轴上的外力矩来改变转轮的工作负载条件。对某一来流条件下的模拟工况点选择，需要从空载也即外加力矩为零的工况开始模拟，并逐渐增加转轴的外附加力矩的值，最终达到对转轮在该来流条件下各工况条件下的工作特性模拟。

3 计算结果分析

3.1 外特性 图4为1.8m/s来流速度条件下三叶片垂直轴潮流能水轮机转轮力矩特性及功率特性模拟曲线，图中横坐标为叶尖速比 λ ，表示转轮叶片尖端线速度与来流速度的比值，纵坐标分别为力矩系数 C_T 及能量利用率系数 C_p 。模拟结果中工作尖速比范围约为2.2~3.6，力矩系数最高约为0.25，能量利用率最高约为58%。随尖速比减小，力矩系数单调增加，而能量利用率增长趋势变缓，并在 λ 为2.4时出现极值点。

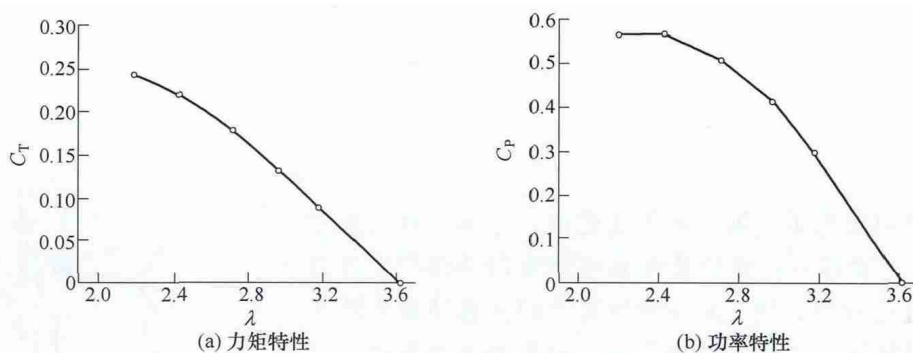


图4 垂直轴转轮外特性曲线

3.2 瞬态特性 这里选取转轮分别工作于输出功率为零及最大值时的两个代表工况进行转轮瞬态特性的分析。

3.2.1 输出功率为零时转轮的瞬态特性 图5为设置在转轴上的外附加力矩为零，转轮输出功率为零的工况条件下，在运行稳定后两个转动周期内转轮中的转轮力矩系数以及转速随叶片方位角的变化曲线。

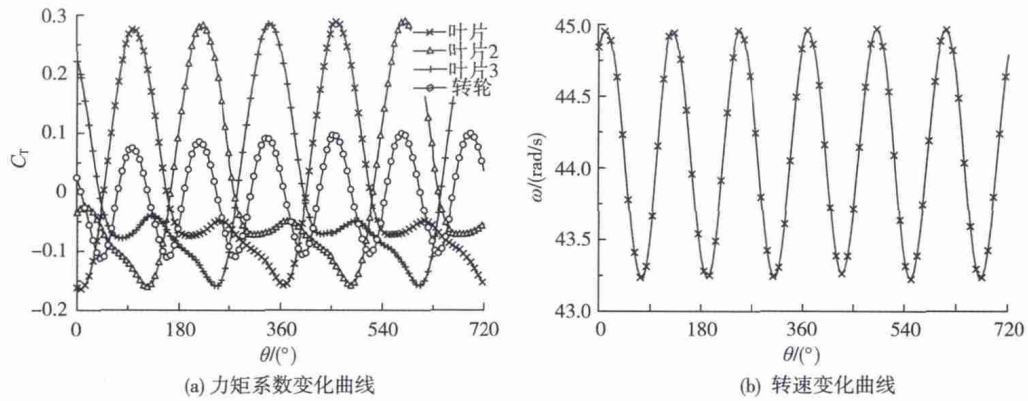


图5 转轮输出功率为零时的瞬态特性

可以看出，单个叶片的力矩系数约在 $-0.15\sim 0.3$ 范围内变化，转轮整体的力矩为各叶片所受流体力矩的和，其力矩系数在 $-0.1\sim 0.1$ 范围内变化，且在转轮转动一周过程中存在3个峰谷。由于转轴上预先设置的外附加力矩为零，因此转轮所受总力矩大于0时转轮旋转角加速度大于0即转轮旋转加速，小于0时旋转减速。转轮总力矩系数在一个转动周期内平均值为0，这也满足转轮周期性稳定运行的判定条件。转速在 $43.2\sim 45\text{rad/s}$ (相当于 $412\sim 430\text{r/min}$)范围内波动，转速平均值约为 44.1rad/s ，其振幅约为 1.8rad/s ，约为转速平均值的4%。

3.2.2 输出功率最大时转轮的瞬态特性 图6为设置在转轴上的外附加力矩为 $-5\text{N}\cdot\text{m}$ ，转轮输出功率最大的工况条件下，在运行稳定后两个转动周期内转轮中的转轮力矩系数以及转速随叶片方位角的变化曲线。

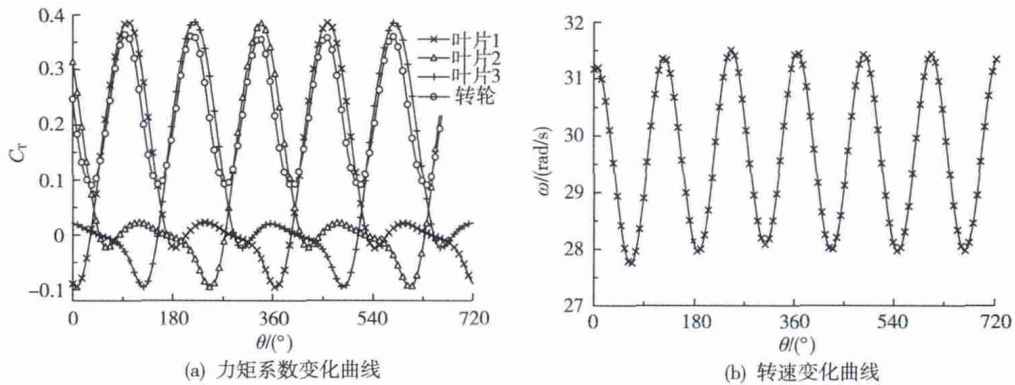


图6 转轮输出功率最大时的瞬态特性

此时转轮中单个叶片力矩系数在 $-0.1\sim 0.4$ 内变化，幅度较零输出功率时稍大，变化趋势较为相似，转轮整体的力矩系数变化范围为 $0.1\sim 0.35$ ，平均力矩为 $5\text{N}\cdot\text{m}$ ，与附加外力矩相平衡。转速约在 $28\sim 31.5\text{rad/s}$ 范围内波动，转速平均值约为 30rad/s ，振幅为 3.5rad/s ，约为转速平均值的12%。转速的变化幅度绝对值约为转轮空载变化幅度的两倍，但此时转速的相对变化量约为空载时的3倍。因此当转轮的输出功率增大时，转轮的转速、所受流体力矩等各参数的变化幅度加大，非定常性表现的更明显。

4 结论

通过基于刚体动力学分析的计算流体力学数值模拟的方法，本文对一种垂直轴潮流能水轮机的固有瞬变运行过程进行了三维非定常模拟，得出主要结论如下：(1)垂直轴潮流能水轮机运行时，转轮转速与转轮所受流体作用力矩时刻变化；(2)随着转轮负载的逐渐加大，转轮的非定常运行特性更加明显；(3)计算结果显示本文采用的数值模拟方法可以较好地预测垂直轴潮流能水轮机的固有瞬变运行过程，为类似的旋转式流体机械瞬变运行模拟提供了比较可靠的参考。

参 考 文 献 :

- [1] 常近时 . 水力机械装置过渡过程[M] . 北京 : 高等教育出版社 , 2005 .
- [2] 李金伟 , 刘树红 , 周大庆 , 等 . 混流式水轮机飞逸暂态过程的三维非定常湍流计算 I [J] . 水力发电学报 , 2008 , 27(6) : 148-152 .
- [3] 边宇虹 . 分析力学与多刚体动力学基础[M] . 北京 : 机械工业出版社 , 1998 .
- [4] Kirke B K , Lazauskas L . Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch[J] . Renewable Energy , 2011 , 36 : 893-897 .
- [5] Dai Y M , Lam W . Numerical study of straight-bladed Darrieus-type tidal turbine[J] . Energy , 2009 , 162(2) : 67-76 .

Research of computational fluid dynamics method based on rigid body dynamic analysis

WANG Xin , TIAN Ya-juan , XUE Peng , CHEN Rui
(Beijing IWHR Technology Co. , Ltd , Beijing 100038 , China)

Abstract : In the transient process of the fluid machinery , every operation parameter is the function of the time , and there are also orientation changes for some main parameters. The characteristic of the fluid machinery transient process has been researched , and a kind of computational fluid dynamics method based on rigid body dynamic analysis is presented in this paper. Taking the vertical axis hydro turbine for example , the motion and stress state of the object is obtained by coupling the rigid body dynamics equations and computational fluid dynamics for iteration to get both the state of rigid body motion and the force information. The computing result indicates that the method can simulate the transient process of the fluid machinery quite well.

Key words : computational fluid dynamics ; rigid body dynamic ; transient process

(责任编辑 : 李福田)

(上接第 105 页)

Benefit analysis on using the frequency conversion technology in Binghe centre heating station

HUANG Li-chen¹ , HUANG Yan²

(1. Department of Housing Management of Jixian county , Tianjin 301900 , China ;
2. Tianjin Instituted of Hydroelectric and Power Research , Tianjin 301900 , China)

Abstract : For most of the centre heating stations in China today , the output heat flows are controlled by adjusting the position of their valves to meet the fluctuation of heating loads , which not only waste a lot of energy but also run at a risk of damage. Binghe centre heating station has to adopt a new technology of frequency conversion to control the pumps and fans. The running data of circle-pump , supply-pump and driving-fans that controled by the frquency speed-regulating system have been analyzed , as well as the energy saving effects of the devices. The results show that it saves energy for 40%~50% compared with the original operation mode. The system runs well in the way of unattended operation , stable and reliable , in the past five years , which has produced obvious benefits at both economic and social aspects.

Key words : central heating ; frequency conversion ; monitor system ; economic benefit

(责任编辑 : 韩 昆)